

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中学物理实验大全



序 言

有幸捷足先登，阅读了本书的部分内容后，不禁使我回想起在清华读书时聆听吴有训先生讲课的情景。吴先生那一次讲的是“振动和共振”。他在大课堂里拉了一根很长的绳子，在绳上等距离地垂下 8 根短线，每根短线都一样长且在绳下端各系着一个用过的大号干电池。他讲了一段课后，即作表演。首先在横线垂直方向推动第一节干电池，让第一节干电池作单摆运动；不一会儿这个摆动逐渐减弱下来，而第二节干电池却开始摆动起来，以后第三、四节干电池也随之先后摆动起来。这个实验用的是最普通的器材，它却非常生动地显示了简谐振动和共振现象。它形象地给同学们留下了一个清晰明了的印象。这虽是六十多年前的事了，但我至今仍记忆犹新。

近些年来，我们国家的基础教育有了不少进步，各地也都在搞教育改革。但相对而言，中学理科教学中的实验仍然是个比较薄弱的环节。我国中学生代表队近几年参加国际奥林匹克物理竞赛，取得了很好的成绩。但有部分学生的实验考试成绩相对理论考试成绩来说比较低，这也说明我们中学物理课中的实验训练还有待加强。

作为一个物理教师，应该经常自己动手制作实验器材。我们当年在清华读书的同学，常常看见一位老师，身穿粗布工作服，时而用锯子、斧头加工器材，时而用氢、氧吹管控制玻璃器材和石英丝等。他就是上面提到的国内外有名的吴有训教授。历来成功的科学巨匠，都是亲自制作实验仪器的。吴先生经常告诫我们，要锻炼自己动手的本领，他说：“实验物理的学习，要从使用螺丝刀开始。”他为物理系开设了“实验技术”选修课，还要求物理系的学生读一些工学院的课程，如制图、车、钳工工艺等。这些课程对我们以后的学习和工作，起了很大、很好的作用。1937 年，我的同学钱三强到法国巴黎大学居里实验室，跟约里奥·居里夫妇共作原子核物理研究。约里奥的动手能力很强，自己会上车床。有一天，约里奥问钱三强：“你会不会金工？”钱三强毫不犹豫地回答道：“会一点。”钱的这一本领还是在清华大学金工学习课上学到的，这一下正好用上了。1948 年钱三强回国后，也同样鼓励年轻人要勤于动手，能自己制作仪器设备。

这本《中学物理实验大全》共收集了近四百个实验，每一个实验中还汇集了好几种方法。作者都是长年工作在中学教育第一线的有经验的老师。他们总结了自己在日常教学中的经验，将自己平时点点滴滴积累起来的实验成果拿出来与大家交流，应该是一件很有益的工作。希望这本书的出版能对提高中学物理实验教学的水平起一点作用，对我国的基础教育作出一点贡献。

王淦昌

编者的话

物理学是一门实验科学。要想成为一个优秀的物理工作者，要想在物理学的领域中有所收获，没有良好的实验基础是难以想象的。近年来，这个观念已被广大中学教师所接受，并逐步付之于行动。但毋庸讳言，实验教学仍然是我国中学物理教学中的一个薄弱环节，实验教学的现状与它在物理教学中应有的地位仍然是很不相称的。造成这种现状的原因很多，除了考试制度的局限和不少地区的学校实验设备严重不足等客观原因外，尚有不少中学物理教师和实验员还不能适应实验教学的要求。不论在实验素养、动手能力诸方面都有待进一步提高。从我国中学物理教学这一基本现状出发，为了尽快地提高我国中学物理实验教学水平，我们编写了这本《中学物理实验大全》。编写此书的主要目的有两上：一、提高教师的实验素养。本书较详细地介绍了有关实验误差理论的基础知识及其在中学物理实验中的应用。用误差理论来指导实验的每一个环节，通过实践逐步提高教师实验素质。二、增强教师指导学生实验的能力。本书对一系列重要的学生实验进行了深入的讨论，以求确定最优的实验方案，改进操作方法，并对实验结果作出合理的评价。

本书还集思广益，最大限度地广大中学教师中的优秀实验发掘出来，推广应用。为了做到这一点，我们在写作前期进行了广泛的征集优秀实验方案的工作。最后被录用稿件的作者多达三百名，作品由上海、福建、江苏、浙江、四川、湖北等省市的大中院校教师撰写。

为了确保实验原理的正确无误和操作方法的切实可行，本书所有实验都经过严格的审查。由编委和上海市物理实验开展得较好的南洋模范中学、控江中学、市北中学、金山县中等学校物理教研室的老师分段进行初审，主编复审，最后由上述各校对部分实验进行验证。

本书主编：杨介信、张大同。

本书编委：杨介信、张大同、唐一鸣、贾克钧。

本书基础篇作者：杨介信、张大同、杨大光、陈永春。

本书实验篇中的内容除了征集的优秀稿件外，其余的由张大同、唐一鸣、贾克钧分工撰写，并由他们三人对全篇分段进行统稿。本篇作者姓名的排列是按文章出现的先后为依据的，参加本篇编写的作者有：张大同、刘孝铨、冷跃翔、龚惠谟、庄起黎、何祥水、倪福海、张溶菁、虞关忠、杨介信、吴景辉、王树、刘炳昇、杨士凤、贺承德、唐一鸣、朱佩明、忻贤光、华德尧、陈适、朱寿泉、盛焕芳、徐自尧、张大有、高国强、张静可、袁哲诚、潘志钧、吴家伟、戴振邦、曹裁源、陈光明、张善贤、吴兆铨、顾维聪、张学诚、朱炳连、朱德宝、丁忠孚、刘通、郑上殷、薛云翔、王忠芳、胡关荣、曹磊、方剑荣、夏兆燊、傅爱菊、唐永康、徐国清、谯麟南、贺圣平、姜立中、刘钊培、郑海平、瞿德林、贾克钧、施孟嘉、施文祥、郑安澜、汤跃基、秦泽良、刘凤英、顾仲茂、曹慧、毛同彬、刘鸿骥、刘志勇、刘永熙、吴永熙、王仁镠、李渭源、鲁向东、张越、傅祥文、赵金国、周瑞杰、瞿俊杰、尹达新、杨岳根、姜邦富、陈立新、向大国、范鑑明、陈汉凯、戴保熹、闵杰、屈国荣、许治平、宋克之、金国桢、陈春山、俞伟铭、曹文绮、顾光旭、丁德音、陈方新、何晓华、瞿淳、阮美华、冯容士、姜文龙、华敦远、宋宁生、

周熊、朱金春、顾毓鹏、陈心田、陆起英、陈斐辉、严振道、高国治、王泰俊、朱以卓、孟展、严洪、刘伟源、陆仲贤、胡艇安、刘明、杨文超、项志良、陈松年、沈明祥、夏宗农、张兴法、郝芫、李新祥、周耀琴、白日豪、黄俊才、谢步时、张金华、陈承恩、黄森、周箴行、何绪伦、华玉琴、朱梧凤、方海根、王溢然、缪一明、汪琰、成海钧、许小明、徐晓雷、钱大威、彭桂芳、茅孝先、欧阳治中、顾惠民、郭成宝、刘敬德、周茂林、张海祥、吴志炜、张民强、陈申堂、巫朝荣、蔡华麒、吴志荣、朱国贤、李景松、朱励新、王世谊、周志钾、王素红、陈作勤、林绍伦、鲍凯歌、许新根、朱炳连、倪天龙、钱壮、蔡忠志、陈兆荣、林应基、王振文、张宇良、赵志和、曹永奎、张静甫、沈信武、缪智铭、马在轸、奚天敬、柯永晶、陆敏慧、应福廷、陈申、徐有樊、郭子正、黄之璋、朱家宝、索锡华、忻元祺、王大愚、王海泉、李家鹏、夏月明、蔡明德、王嘉昌、顾奎华、江小明、杨凤兴、杨宏道、张志刚、郭英伟、金宗儒、徐冠军、王为骥、林宝山、孟晓瑜、徐利伟、张泉庚、程红才、黄善新。

部分力学实验由上海市南洋模范中学白日豪，王嘉昌，宋宁生，张志锋，施钧，夏宗农，刘伟源验证。

部分热学、光学实验由上海市金山县中张大有，范镒明验证。

部分电学实验由上海市市北中学王泰俊，张静可，朱金春验证。

在编写本书过程中，得到上海市教育局教研室、上海教育学院、上海市仪器公司、上海市少科协、福建省教育学院、上海市向明中学、上海市南洋模范中学、上海市市西中学等有关领导和教师的大力支持。著名的老一辈科学家王淦昌先生在百忙中抽空为本书写了序言，他们的无私帮助给了全体编者极大的鼓舞，在此一并表示衷心的感谢。

《中学物理实验大全》编写组

基 础 篇
JICHUPIAN

· 中学物理实验大全 · ZHONGXUEWULISHIYANDAQUAN ·

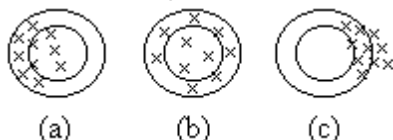
物理学是一门实验科学，物理实验离不开测量。著名物理学家开尔文曾经说过：“如果你能够测量你所谈的东西，并能用数量表示它，你对它就有所了解；假如你不能测量它，你对它的知识就是贫乏而不能令人满意的。”由此可见，测量是实验科学最本质的东西。

任何物质都有自身的各种各样的特性，反映这些特性的量所具有的客观的真实数值，称为真值。测量的目的就是力图得到真值。但是由于测量的方法、仪器、环境和测量者自身素质都会存在某些不理想的情况，因此测量不可能是完全精确的。在绝大多数情况下，测量结果(x)与客观存在的真值(A)之间总有一定的差异，这个差异就是测量误差(Δx)。可以用数学式表示为

$$\Delta x = |x - A|$$

因为 Δx 是用测量值和真值之差的绝对值来表示，所以把它叫做绝对误差。误差在测量过程中是必然存在且不可避免的。误差的大小是反映测量结果偏离客观真实的程度，反映测量结果的可信程度。

应该怎样来评价一个测量结果呢？下面以打靶为例来说明。如果一个射击者瞄准靶心进行射击，由于枪（不可能十全十美）、环境（包括射击时的风向、气温、光照）以及射击者本身的因素（包括他射击的技术水平以及射击的竞技状态）等诸多原因，子弹不可能每发都击中靶心，例举图中(a)、(b)、(c)三种情况。从图中可以看出，三次射击的结果都有一定的离散性。其中，(c)的弹着点最集中，重复性最好。(b)的弹着点的平均位置离靶心最近，正确性最高。



在物理实验的测量结果中，同样存在着重复性和正确性的问题。为了定量地描述这两种性质不同的问题，物理学中引入了偶然误差和系统误差两个概念。本章将分别讨论这两种误差。

一 估算直接测量中的偶然误差

在实验时所得的测量结果，因受被测对象、所用仪器、周围环境以及实验者本身情况的影响，会偏离真值而产生误差。由于影响结果的因素很多，它们又各自以不同的方式变动，所以对某一次具体的测量来讲，很难确定测量结果相对真值的偏离究竟有多大及到底是偏大还是偏小，这就使得每一次测量结果的误差都带有一定的偶然性（或称随机性）。这一类误差叫做偶然误差（或随机误差）。

在某一次测量时偶然误差是无法控制的，但在多次测量中，偶然误差的出现却服从一定的统计规律。统计理论和实验事实都证明了偶然误差服从正态分布。正态分布的特征是：大于真值和小于真值的测量值出现的机会相等，偏离真值很大的测量值出现的机会趋于零。而且误差较

小的测量值比误差较大的测量值出现的机会多。

为了简化问题起见，下面的讨论中暂时假设这些实验没有系统误差。

所谓直接测量，就是直接用测量仪器进行测量得到结果。比如用米尺测量长度，用温度计测量温度，用伏特表测量电压等都是直接测量。根据测量次数的不同，直接测量又可以分成多次测量和单次测量两种，下面分别讨论怎样估算这两种测量的偶然误差。

(一) 估算多次测量中的误差

研究实验误差是一门较专门的科学，深入讨论它，需要有丰富的实验经验和较多的数学知识。但在中学物理实验中讨论误差完全可以用一套简化的公式来计算偶然误差。

根据误差的定义，误差等于测量值与真值之差。但真值是无法得到的，因此要计算误差，首先必须确定一个代替真值的最佳值。根据统计理论可知，如果进行了 n 次测量，得到 n 个测量值

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

那么它们的平均值是最接近真值，即可用公式

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

作为最佳值来代替真值。当式中 n 趋向无穷大，而系统误差又可以忽略时，平均值就趋向真值。

测量值和平均值的差叫做残差，当 n 趋向无穷大时，残差趋向误差，在中学物理实验中，可用残差代替误差。

测量的偶然误差，可用公式

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

求得。

例 对某一长度测量 6 次，结果如下
 $x_1=3.41\text{cm}$ ， $x_2=3.43\text{cm}$ ， $x_3=3.45\text{cm}$ ，
 $x_4=3.44\text{cm}$ ， $x_5=3.42\text{cm}$ ， $x_6=3.44\text{cm}$ 。

那么，这组数据的平均值为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^6 x_i}{6} = \frac{1}{6}(3.41 + 3.43 + 3.45 + 3.44 + 3.42 + 3.44)\text{cm} = 3.43\text{cm}。$$

每次测量的绝对误差

$$\begin{aligned} x_1 &= |3.41\text{cm} - 3.43\text{cm}| = 0.02\text{cm}, \\ x_2 &= |3.43\text{cm} - 3.43\text{cm}| = 0.00\text{cm}, \\ x_3 &= |3.45\text{cm} - 3.43\text{cm}| = 0.02\text{cm}, \\ x_4 &= |3.44\text{cm} - 3.43\text{cm}| = 0.01\text{cm}, \\ x_5 &= |3.42\text{cm} - 3.43\text{cm}| = 0.01\text{cm}, \end{aligned}$$

$$x_6 = |3.44\text{cm} - 3.43\text{cm}| = 0.01\text{cm}。$$

误差的平均值

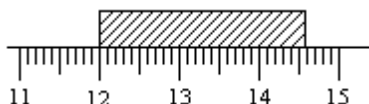
$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{6}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6) \\ &= \frac{1}{6}(0.02 + 0.00 + 0.02 + 0.01 + 0.01 + 0.01)\text{cm} \\ &= 0.02\text{cm}。 \end{aligned}$$

(二) 估算单次测量中的误差

在物理实验中，有时被测的物理量是随时间变化的，无法进行多次测量。例如测量自由下落物体某时刻的高度；用混合法测固体比热时某时刻的温度等都不可能重复测量，只能对被测量物体进行单次测量。还有些测量精密度要求不高，没有必要进行重复测量。以上两种情况，一般只要进行单次测量，并且根据仪器的精度、测量者的估读能力以及测量时的具体环境等因素来对单次测量可能发生的误差作适当的估计。下面选几种常用的测量为例，来说明单次测量最大误差的估读方法。

1. 用刻度尺测量长度

用一把最小刻度为毫米的刻度尺测量一块木块的长度。假如没有其他误差因素（例如视差等）存在，则误差的大小主要根据估读能力来确定。如果测量者能估读到最小分度的 $1/5$ ，则图中左端读数为 $(12.00 \pm 0.02)\text{cm}$ ，右端读数为 $(14.57 \pm 0.02)\text{cm}$ 。实验者的估读能力是有差异的。估读到的最小分度有的可读到 $1/10$ 而有的只能读到 $1/2$ 。



大多数 10 分度的测量仪器的单次测量估读都可参照上述方法进行。

2. 用游标卡尺测量长度

游标卡尺的游标可帮助测量者估读出较准确的数据。在使用游标卡尺进行测量时，如果游标尺上的某一根刻度线正好跟主尺上的某一刻度线对齐，那么读数是较容易读得准确的；如果游标尺上有两根刻度线跟主尺上的两条刻度线距离基本相等，这时可能出现的误差应该是游标精度的一半。由此可见，用游标卡尺单次测量长度的误差可定为游标精度的一半。例如用游标精度为 0.02mm （即游标副尺上有 50 格）的游标卡尺测量长度 x ，可认为 $x = 0.01\text{mm}$ 。

3. 用秒表测量时间

一般说来在使用秒表测量时间时，启动和制动秒表时所造成的误差比读数误差要大，因此应以前者为主确定单次测量的误差。实验工作者应通过自我训练使启动和制动时间各只有 0.1 秒的误差，使时间单次测量结果的误差控制在 0.2 秒之内。对初学者来说，则可将启动和制动的误差各定为 0.2 秒。

4. 用指零仪表测量

用天平、电桥、电位差计等指零仪表进行单次测量时，可根据天平的灵敏度和测量者对指零器的分辨能力来确定其误差。下面以天平为

例，说明确定误差的具体方法。天平的感量为 C ，用公式表示

$$C = \frac{m_2 - m_1}{\theta_2 - \theta_1}。$$

式中 $\theta_2 - \theta_1$ 为天平平衡时砝码质量由 m_1 变为 m_2 时天平指针偏转的格数。当测量者对指针偏转的分辨能力为 $\Delta\theta$ 时，单次测量的误差可定为 $C \cdot \Delta\theta$ 。例如某一架物理天平的感量为 0.02g （即砝码质量变化 0.02g 时，天平指针偏转一格），测量者对指针的分辨能力为 0.5 格，则单次测量误差可定为 0.01g 。

（三）测量结果的表示及其含义

测量结果应该包含数值、误差和单位三个部分。通常将测量结果写成 $\bar{x} \pm \Delta x$ 的形式，其中 \bar{x} 是测量值（可以是多次测量的平均值，也可以是单次测量的结果）， Δx 是测量误差。如上例的结果可写为 $x = (3.43 \pm 0.02)\text{cm}$ 。

在表述测量结果时，要注意以下几点：

(1) Δx 的值一般都只取一位，而且应该跟测量值 \bar{x} 的最后一位对齐。为了确保误差范围的有效性， \bar{x} 的值一般只进不舍。

(2) 长度测量结果为 $x = (3.43 \pm 0.02)\text{cm}$ ，并不表示 x 等于 3.45cm 或 3.41cm 两个值，而是表示 x 一般在 3.41cm 到 3.45cm 这个范围之内。

(3) 用关面所述的方法计算出来的 Δx 是欠完善的，因为在计算中没有反映出多次测量的效益和各独立偶然误差之间的抵偿作用。但是在直接测量次数不多的情况下，可粗略地把 Δx 作为 \bar{x} 的最大误差。当测量次数 $n=8$ 时，被测量值的真值有 $p=95\%$ 的可能落在 $\bar{x} \pm \Delta x$ 的范围之内。其他测量次数的 p 值如下表所列。由表中可见，测量次数越多，被测量值的真值落在误差范围内的可能性越大。

n	3	4	5	6	7	8	9	10	14	15	20
p	*~0.7	~0.8	0.8+*	~0.9	0.9+	~0.95	~0.95	0.95+	~0.99	0.99+	0.9973+

* ~表示接近，+表示略大。

测量误差的另一种表达形式是用相对误差来表示，相对误差

$$E = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\% ， 它与绝对误差比较，更能说明测量结果的好坏。$$

如甲测量一本书的宽度是 $0.127 \pm 0.001\text{m}$ ，乙测量百米赛跑跑道的长度是 $100.04 \pm 0.05\text{m}$ 。比较他俩测量的绝对误差，甲要比乙小得多，但比较他俩测量的相对误差是

$$E_{\text{甲}} = \frac{0.001}{0.127} = 0.8\% ，$$

$$E_{\text{乙}} = \frac{0.05}{100.04} = 0.05\% 。$$

从比较他俩的相对误差，可看出乙的测量结果优于甲的测量结果。

二 估算间接测量中的偶然误差

上节讨论了各种直接测量的方法及其误差的估算，但不是所有物理量都能直接测量的。例如要测量一块长方体金属块的密度，一般是先用测量长度的工具，测量出它的长 a 、宽 b 和高 c ，然后再用测量质量的工具测量出它的质量 m ，最后用公式 $\rho = m / (a \cdot b \cdot c)$ 计算出该金属的密度。因此，物理量的测量可分为两大类：一类是直接用测量工具进行测量得到结果，叫做直接测量；另一类是利用直接测量得到的值经过计算得到结果，叫做间接测量。因为间接测量的计算中所用的直接测量的值都是有误差的，因此通过计算得到的间接测量的结果，不可避免也有一定的误差。本节主要讨论怎样由直接测量的值及其误差估算出间接测量的值及其误差。

(一) 有效数字的意义及其运算法则

在测量和数字计算中，究竟应用几位数字来表示测量或计算的结果，是一件很重要的事情。初学者可能认为在计算的结果中，保留的位数越多，精密度便越高。有的学生在使用计算器计算时，甚至会把计算结果的八、九位小数一起记下来，这样想或这样做都是错误的。事实上由于仪器的限制和人们感官的缺陷，测量得到的结果都是含有一定误差的近似数，由这些近似数计算得到的结果当然也是近似的。为了使间接测量的结果更合理，物理学中引进了“有效数字”的概念。

1. 有效数字的意义

在科学实验中，数的用途有两类。一类是用来数“数目”。例如点小球的个数，无论谁来数，用什么方法数，在什么时候数或者在怎样的环境中数，都会得到同一个数目。对于这类数来说，我们均可认为其有效数字的位数为无限多。另一类数则是用来表示测量结果的。这类数的最末一位数往往是估计得来的，它们或多或少存在着误差。例如米尺的最小刻度是毫米（0.001 米），那么用米尺测量长度可以读到十分之一毫米（0.0001 米）。0.001 米这一位可以从米尺上读出来，是可靠的。因此说在 0.001 米位前面的数都是可靠数，而 0.0001 米这一位则是测量者估读出来的（称为存疑数）。所有可靠数加上最后一位存疑数，统称为有效数字。例如用米尺测量某一长度的结果是 0.2946 米，那么这个测量结果中 2、9、4 三位是可靠数，6 是存疑数，共有四位有效数字。

在应用有效数字时，应注意以下几点：

(1) 自然数 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 如果出现在测量结果中，均为有效数字。而自然数“0”如出现在其他数字之后或之间也为有效数字，但如出现在其他数字之前就不是有效数字，这时的“0”只起定位作用。例如数 0.08020。其前面两个零不是有效数字，后面四个数都是有效数字，因此它有四位有效数字。

(2) 读数时，必须按照仪器的精密度读出测量值。即使末位是“0”，也不能任意舍去。在数学中可以认为 2.10 厘米，2.100 厘米，2.1000 厘米是相同的，而在物理学中它们却表示了用三种不同的测量工具所测量的结果，其估读的存疑数分别在 0.01 厘米，0.001 厘米，0.0001 厘米这

些位上。所以决不能在测量结果后面任意加上或丢掉“0”这个数。

(3)有效数字是由测量对象和测量仪器所决定的，单位的换算不会改变有效数字的位数，因而必须注意单位换算时的正确表示法。例如将3.70米化成用毫米作单位，不能写成3700毫米，而应该用科学计数法写成 3.70×10^3 毫米，这样的写法仍保持了原来的三位有效数字。如写成3700毫米，则有效数字变成了四位。又如将280厘米化成用米作单位，不能写成2.8米，而应写成2.80米。

2. 有效数字的运算法则

在有效数字运算过程中，应遵循两条原则：

(1)凡是有存疑数字参与运算的结果，都是不可靠的。

(2)运算结果中的存疑数字只保留最高的一位，其他存疑数字一律舍弃。

舍弃的方法：如果最高位舍弃数大于5，则在其前一位数上增加1；最高位舍弃数小于5，则其前一位数不变；如果最高位舍弃数等于5，那么要看其前一位数的奇偶性。如果前一位是奇数，则增加1，如果前一位是偶数，则不变。例如，对27.0249取四位有效数字，结果为27.02，取五位有效数字，结果为27.025。又如将27.025跟27.035两个数，都取四位有效数字的话，则其结果分别为27.02与27.04。

有效数字的运算法则

(1)加减法

下面通过两个例子介绍在加减法运算的结果中对有效位数的取法。

$$\begin{array}{r} 32.\underline{1} \\ + 3.\underline{274} \\ \hline 35.\underline{374} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 26.\underline{65} \\ - 3.\underline{926} \\ \hline 22.\underline{724} \end{array}$$

计算时，在存疑数字下面加一条横线，以便与可靠数字相区别。在加法运算的结果35.374中，由于第三位数“3”已经是存疑数，后面两位“7”和“4”应该舍弃。但因为“7”大于“5”，因此最后的结果是35.4。由此可见，运算结果的末位数和两数中末位数位数高的一个数对齐。同理，上例中减法运算的结果22.724中的“4”应该舍弃。因为“4”小于“5”，因此它前面一位“2”不变。最后的结果是22.72。

在上面的例子中，如果事先以存疑数字中位数较大的一个量为基准，将其他量中多余的数舍弃，取齐诸量的最末一位数，则可以简化运算过程，其结果和上面算法相同。仍然用上面两个算式为例，其具体算法如下：

$$\begin{array}{r} 32.\underline{1} \\ + 3.\underline{3} \\ \hline 35.\underline{4} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 26.\underline{65} \\ - 3.\underline{93} \\ \hline 22.\underline{72} \end{array}$$

以上结论可以推广到多个量相加或相减的运算中去。

(2)乘除法

下面通过两个例子介绍对乘除法运算中有效位数的取法。

$$\begin{array}{r}
 5.348 \\
 \times 20.5 \\
 \hline
 26740 \\
 0000 \\
 +10696 \\
 \hline
 109.6340
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 173.4 \\
 217 \overline{) 37643} \\
 \underline{-217} \\
 1594 \\
 \underline{-1519} \\
 753 \\
 \underline{-651} \\
 1020
 \end{array}$$

在乘法运算的结果中，由于第三位“9”已经是存疑数，因此后面四个数字全部舍弃，结果是110。在除法运算的结果中，由于第三位“3”已经是存疑数，因此第四位“4”以后的数没有必要再算下去，但存疑数后的一位数“4”必须算出，因为它要确定存疑数“3”是否要加1。从以上两个例子中可以看到，两个量相乘（或除）的积（或商），其有效位数和诸因子中有效位数最少的那个数相同。这个结论可以推广到多个量相乘或相除的运算中去。

在做乘法运算时，如果某个因子的最高位有效数字等于8或9，则这个因子的有效位数常可以多记一位。请看下例

$$\begin{array}{r}
 9.13 \\
 \times 23.14 \\
 \hline
 3652 \\
 913 \\
 2739 \\
 +1826 \\
 \hline
 211.2682
 \end{array}$$

从计算的竖式中可以看出，乘法的结果应该有四位有效数字，因此可以认为“9.13”是四位有效数字。

以上这些结论，在一般情况下是成立的，但也有例外。读者只要掌握了有效数字的意义和存疑数字取舍的原则，是不难处理的。

(3) 其他初等函数

在乘方、开方、对数、三角函数等初等函数的运算中，其运算结果的有效位数要通过误差计算来确定，因此这部分内容放在下一节中介绍。

(二) 误差传递公式

在间接测量中，可以用误差传递公式由直接测量的值及其误差求出间接测量的值及其误差。

1. 四则运算中的误差传递

设有 $A = \bar{A} \pm \Delta A$ 、 $B = \bar{B} \pm \Delta B$ 、 $C = \bar{C} \pm \Delta C$ 、……等直接测得量。又设 x 为间接测得量，那么它们之间满足一定的函数关系，即 $x = f(A, B, C, \dots)$ 。将各直接测得量代入 $f(A, B, C, \dots)$ 中，便可以求得 $\bar{x} \pm \Delta x = f(\bar{A} \pm \Delta A, \bar{B} \pm \Delta B, \bar{C} \pm \Delta C, \dots)$ 。

其中 $\bar{x} = f(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \dots)$ 是间接测得量的最佳值， Δx 是间接测得量的误差。下面介绍在四则运算中怎样由 \bar{A} 、 ΔA 、 \bar{B} 、 ΔB 、 \bar{C} 、 ΔC 、……

计算出 x_0 。

(1)加法运算中的误差 (和的误差)

设 $x=A+B+C+\dots$,

$$\begin{aligned}\bar{x} \pm x &= (\bar{A} \pm A) + (\bar{B} \pm B) + (\bar{C} \pm C) + \dots \\ &= \bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \dots \pm A \pm B \pm C \pm \dots\end{aligned}$$

其中间接测得量的最佳值为 $\bar{x} = \bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \dots$,绝对误差为 $x = \pm A \pm B \pm C \pm \dots$ 。

由于A、B、C、……各量都是互相独立的,它们的误差可能为正,也可能为负。在最不利的情况下(即所有误差项全都同号),可能出现的最大误差是 $x = A + B + C + \dots$ 。我们规定这个可能的最大误差为间接测量的误差。

(2)减法运算中的误差 (差的误差)

设 $x=A - B - C - \dots$,

$$\begin{aligned}\bar{x} \pm x &= (\bar{A} \pm A) - (\bar{B} \pm B) - (\bar{C} \pm C) - \dots \\ &= \bar{A} - \bar{B} - \bar{C} - \dots \pm A \pm B \pm C \pm \dots\end{aligned}$$

其中间接测得量的最佳值为 $\bar{x} = \bar{A} - \bar{B} - \bar{C} - \dots$,绝对误差为 $x = \pm A \pm B \pm C \pm \dots$ 。按前面所讲,在最不利情况下,可能出现的最大误差是 $x = A + B + C + \dots$ 。

由此可见,和、差运算结果的绝对误差等于各直接测得量的绝对误差之和。

(3)乘法运算中的误差 (积的误差)

设 $x=A \times B$,

$$\begin{aligned}\bar{x} \pm x &= (\bar{A} \pm A) \cdot (\bar{B} \pm B) = \bar{x} \cdot \bar{B} \pm \bar{A} \cdot (\pm B) + \bar{B} \cdot (\pm A) + (\pm A) \cdot (\pm B)\end{aligned}$$

其中间接测得量的最佳值为 $\bar{x} = \bar{A} \cdot \bar{B}$,绝对误差为 $x = \bar{A} \cdot (\pm B) + \bar{B} \cdot (\pm A) + (\pm A) \cdot (\pm B)$ 。

由于 $(\pm A) \cdot (\pm B)$ 为二级小量,可以忽略不计,因此 $x = \bar{A} \cdot (\pm B) + \bar{B} \cdot (\pm A)$ 。在最不利的情况下,可能出现的最大误差是 $x = \bar{A} \cdot B + \bar{B} \cdot A$ 。于是,间接测得量的相对误差为

$$E_x = \frac{x}{\bar{x}} = \frac{\bar{A} \cdot B + \bar{B} \cdot A}{\bar{A} \cdot \bar{B}} = \frac{A}{\bar{A}} + \frac{B}{\bar{B}} = E_A + E_B。$$

(4)除法运算中的误差 (商的误差)

设 $x = \frac{A}{B}$,则

$$\begin{aligned}\bar{x} \pm x &= \frac{\bar{A} \pm A}{\bar{B} \pm B} = \frac{(\bar{A} \pm A) \cdot (\bar{B} \pm B)}{(\bar{B} \pm B) \cdot (\bar{B} \pm B)} \\ &= \frac{\bar{A} \cdot \bar{B} \pm \bar{B} \cdot A \pm \bar{A} \cdot B \pm B \cdot A}{(\bar{B})^2 - (\pm B)^2} \\ &= \frac{\bar{A} \cdot \bar{B} \pm \bar{B} \cdot A \pm \bar{A} \cdot B}{(\bar{B})^2} \quad (\text{忽略二级小量}) \\ &= \frac{\bar{A}}{\bar{B}} + \frac{\pm \bar{B} \cdot A \pm \bar{A} \cdot B}{(\bar{B})^2}.\end{aligned}$$

其中间接测得量的最佳值为 $\bar{x} = \frac{\bar{A}}{\bar{B}}$ ，绝对误差为 $x =$

$\frac{\pm \bar{B} \cdot A \pm \bar{A} \cdot B}{(\bar{B})^2}$ 。在最不利的情况下，可能出现的最大误差是

$x = \frac{\bar{B} \cdot A + \bar{A} \cdot B}{(\bar{B})^2}$ 。于是，间接测量的相对误差为

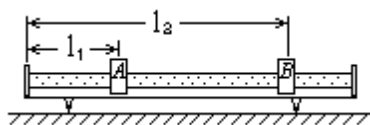
$$E_x = \frac{x}{\bar{x}} = \frac{\bar{B} \cdot A + \bar{A} \cdot B}{(\bar{B})^2} \cdot \frac{\bar{A}}{A} = \frac{A}{\bar{A}} + \frac{B}{\bar{B}} = E_A + E_B。$$

由此可见，乘、除法运算结果的相对误差等于各直接测得量的相对误差之和。这个结论虽然是从两个因子乘除的运算中推导出来的，但可以推广到任意多个因子乘除的运算中去。

如果在各类运算中有的量是公认的理论值或测量值，那么可以不考虑它们的误差。

从上面推导的误差传递公式中可以看到：当间接测量的计算公式中只含有加减运算时，可直接计算间接测得量的绝对误差 x ；当间接测量的计算公式中只含乘除运算时，应先计算间接测得量的相对误差 E_x ，然后再用 $x = E_x \times \bar{x}$ 计算它的绝对误差比较方便。

例 1 图中 A、B 为气垫导轨上的两个光电门。它们的位置分别为 $l_1 = 25.50 \pm 0.05$ 厘米， $l_2 = 78.80 \pm 0.05$ 厘米。求两个光电门之间的距离 s 。



解： $\bar{s} \pm s = (\bar{l}_2 \pm l_2) - (\bar{l}_1 \pm l_1)。$

$$\bar{s} = \bar{l}_2 - \bar{l}_1$$

$$= 78.80 \text{ 厘米} - 25.50 \text{ 厘米}$$

$$= 53.30 \text{ 厘米。}$$

计算公式中只有加减运算，所以可以直接计算 s 的绝对误差

$$s = l_2 \pm l_1$$

$$= 0.05 \text{ 厘米} + 0.05 \text{ 厘米}$$

$$= 0.1 \text{ 厘米}$$

因此，最后的结果是

$$s = 53.3 \pm 0.1 \text{ 厘米。}$$

误差一般只保留一位有效数字（至多两位），而且绝对误差的位数应该与最佳值中存疑数字的位数对齐。例 1 中的最佳值原来是 53.30 厘米。由于它的绝对误差是 0.1 厘米，因此最佳值中小数点后第一位上的“3”已经不可靠了，所以最后的最佳值只能是 53.3 厘米，而不再是 53.30 厘米。

例 2 测定长方体金属块的密度。长方体金属块长 $a = 4.572 \pm 0.004$ 厘米，宽 $b = 1.804 \pm 0.002$ 厘米，高 $c = 1.200 \pm 0.002$ 厘米，质量 $m = 88.4 \pm 0.1$ 克。

解：根据密度定义

$$\rho = \frac{m}{V}。$$

$$\bar{\rho} \pm \rho = \frac{\bar{m} \pm m}{(\bar{a} \pm a) \times (\bar{b} \pm b) \times (\bar{c} \pm c)}，$$

$$\begin{aligned} \bar{\rho} &= \frac{88.4}{4.752 \times 1.804 \times 1.200} \text{克/厘米}^3 \\ &= 8.932 \text{克/厘米}^3。 \end{aligned}$$

因为计算公式中只有乘除运算，所以先计算结果的相对误差 E 。

$$E_m = \frac{m}{m} = \frac{0.1}{88.4} = 0.0011；$$

$$E_a = \frac{a}{a} = \frac{0.004}{4.572} = 0.0009；$$

$$E_b = \frac{b}{b} = \frac{0.002}{1.804} = 0.0011；$$

$$E_c = \frac{c}{c} = \frac{0.002}{1.200} = 0.0017；$$

$$\begin{aligned} E &= E_m + E_a + E_b + E_c \\ &= 0.0011 + 0.0009 + 0.0011 + 0.0017 \\ &= 0.005。 \end{aligned}$$

再计算结果的绝对误差

$$\begin{aligned} &= \bar{\rho} \times E \\ &= 8.932 \times 0.005 \text{克/厘米}^3 \\ &= 0.05 \text{克/厘米}^3。 \end{aligned}$$

最后的结果是

$$= 8.93 \pm 0.05 \text{克/厘米}^3。$$

值得注意，上面推导的四则运算的误差传递公式，是在考虑各因子的误差同时出现最不利的情况时，即都取绝对值相加而得到的。实际上，出现这种情况的概率是不大的，而且参于运算的直接测得量越多，出现这种情况的概率就越小。因而用上述误差传递公式计算误差，在大多数时候都扩大了间接测量的误差。

2. 误差传递的一般公式

上面用初等数学推导了四则运算中误差的传递公式，这些结论在实验中是很有用的。现在再从广义的角度来讨论误差传递的一般公式及其应用。

设有函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。

式中 y 由 x_1, x_2, \dots, x_n 所决定。令 x_1, x_2, \dots, x_n 分别表示 x_1, x_2, \dots, x_n 的绝对误差， y 表示由 x_1, x_2, \dots, x_n 所引起的 y 的误差，则有

$$y \pm y = f(\bar{x}_1 \pm x_1, \bar{x}_2 \pm x_2, \dots, \bar{x}_n \pm x_n)。$$

将上式右端按泰勒级数展开，得到

$$f(\bar{x}_1 \pm x_1, \bar{x}_2 \pm x_2, \dots, \bar{x}_n \pm x_n) = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$$

$$\begin{aligned} & \pm x_1 \frac{\partial y}{\partial x_1} \pm x_2 \frac{\partial y}{\partial x_2} \pm \dots \pm x_n \frac{\partial y}{\partial x_n} \\ & \pm \frac{1}{2} (x_1)^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x_1^2} \pm \dots \pm \frac{1}{2} (x_n)^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x_n^2} \\ & \pm 2 x_1 \cdot x_2 \frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \cdot \partial x_2} \pm \dots \\ & \approx f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \pm x_1 \frac{\partial y}{\partial x_1} \pm x_2 \frac{\partial y}{\partial x_2} \pm \dots \pm x_n \frac{\partial y}{\partial x_n} \end{aligned}$$

上式最后一步由略去了高阶小量而得到，其中 $f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ 是 y 的最佳值，而

$$y = \pm \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot x_1 \pm \frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot x_2 \pm \dots \pm \frac{\partial y}{\partial x_n} \cdot x_n。$$

因为 x_1, x_2, \dots, x_n 都是独立的变量，它们的误差可能为正，也可能为负。在最不利的情况下（所有误差项全都同号），可能出现的最大误差是

$$y = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot x_1 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot x_2 + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot x_n。$$

我们规定这个可能出现的最大误差为 y 的误差。 y 的相对误差

$$E_y = \frac{y}{y} = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot \frac{x_1}{y} + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot \frac{x_2}{y} + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot \frac{x_n}{y}。$$

以上推导的就是误差传递的一般公式，这个公式虽然是近似的，但在直接测量的量个数不多的情况下，是完全可以用的。

(1) 从误差传递的一般公式可以很方便地推导出四则运算的误差传递公式

和的误差

设 $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ ，

$$\begin{aligned} y &= \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot x_1 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot x_2 + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot x_n \\ &= x_1 + x_2 + \dots + x_n \end{aligned}$$

差的误差

设 $y = x_1 - x_2 - \dots - x_n$ ，

$$\begin{aligned} y &= \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot x_1 + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot x_2 + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot x_n \\ &= x_1 + x_2 + \dots + x_n \end{aligned}$$

积的误差

设 $y = x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n$ ，

$$\begin{aligned}
E_y &= \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot \frac{x_1}{y} + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot \frac{x_2}{y} + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot \frac{x_n}{y} \\
&= \frac{x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n}{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \cdot x_1 + \frac{x_1 x_3 \cdot \dots \cdot x_n}{x_1 x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \cdot x_2 + \dots + \\
&\quad \frac{x_1 x_2 \cdot \dots \cdot x_{n-1}}{x_1 x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \cdot x_n \\
&= \frac{x_1}{x_1} + \frac{x_2}{x_2} + \dots + \frac{x_n}{x_n} \\
&= E_{x_1} + E_{x_2} + \dots + E_{x_n}
\end{aligned}$$

商的误差

$$\text{设 } y = \frac{x_1}{x_2 x_3 \cdot \dots \cdot x_n},$$

$$\begin{aligned}
E_y &= \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot \frac{x_1}{y} + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot \frac{x_2}{y} + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot \frac{x_n}{y} \\
&= \frac{1}{\frac{x_2 x_3 \cdot \dots \cdot x_n}{x_1}} \cdot x_1 + \frac{\frac{x_1}{x_2^2 x_3 \cdot \dots \cdot x_n}}{\frac{x_1}{x_2 x_3 \cdot \dots \cdot x_n}} \cdot x_2 + \\
&\quad \frac{\frac{x_1}{x_2 x_3^2 x_4 \cdot \dots \cdot x_n}}{\frac{x_1}{x_2 x_3 \cdot \dots \cdot x_n}} \cdot x_3 + \dots + \frac{\frac{x_1}{x_2 x_3 \cdot \dots \cdot x_n^2}}{\frac{x_1}{x_2 x_3 \cdot \dots \cdot x_n}} \cdot x_n \\
&= \frac{x_1}{x_1} + \frac{x_2}{x_2} + \frac{x_3}{x_3} + \dots + \frac{x_n}{x_n} \\
&= E_{x_1} + E_{x_2} + E_{x_3} + \dots + E_{x_n}
\end{aligned}$$

(2)用误差传递的一般公式推导其他初等函数的误差传递公式

乘方

设 $y=x^n$,

$$\begin{aligned}
E_y &= \left| \frac{dy}{dx} \right| \cdot \frac{x}{y} \\
&= n \cdot x^{n-1} \cdot \frac{x}{x^n} \\
&= n \cdot \frac{x}{x} \\
&= n \cdot E_x
\end{aligned}$$

例1 已知 $y=x^3$, $x=47.3 \pm 0.1$,
求: y 。

$$\begin{aligned}
\text{解: } E_x &= \frac{x}{x} = \frac{0.1}{47.3} = 0.0021, \\
E_y &= 3 \times E_x = 3 \times 0.0021 = 0.0063,
\end{aligned}$$

$$\bar{y} = (\bar{x})^3 = 47.3^3 = 105824,$$

$$y = \bar{y} \times E_y = 105824 \times 0.0063 = 667.$$

因为 y 的值可能大至 1.065×10^5 ，也可能小至 1.051×10^5 ，所以最后的答案应该是

$$y = (1.06 \pm 0.01) \times 10^5.$$

此例的计算结果说明，在乘方运算 $y = x^n$ 中， y 的有效位数可以取得和 x 的有效位数相同。如此例中 y 和 x 都是三位有效数字。

开方

$$\text{设 } y = \sqrt[n]{x},$$

$$E_y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \cdot \frac{x}{y}$$

$$= \frac{1}{n} \cdot x^{\frac{1}{n}-1} \cdot \frac{x}{x^{\frac{1}{n}}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{x}{x} = \frac{1}{n} \cdot E_x.$$

例2 已知 $y = \sqrt{x}$ ， $x = 56.4 \pm 0.1$ ，

求： y 。

$$\text{解：} E_x = \frac{x}{x} = \frac{0.1}{56.4} = 0.0018,$$

$$E_y = \frac{1}{2} \times E_x = \frac{1}{2} \times 0.0018 = 0.0009,$$

$$\bar{y} = \sqrt{x} = \sqrt{56.4} = 7.5100,$$

$$y = \bar{y} \times E_y = 7.5100 \times 0.0009 = 0.0068.$$

因为 y 的值可能大至 7.517，也可能小至 7.503，所以最后的答案应该是

$$y = 7.510 \pm 0.007.$$

此例的计算结果说明，在开方运算 $y = \sqrt[n]{x}$ 中， y 的有效位数可以取得和 x 的有效位数相同。

对数

① 自然对数

设 $y = \ln x$ ，

$$y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \cdot x = \frac{1}{x} \cdot x = E_x.$$

由上式可见，一个数的自然对数的绝对误差等于该数的相对误差。

② 常用对数

设 $y = \lg x = 0.43429 \ln x$ ，

$$y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \cdot x = 0.43429 \frac{1}{x} \cdot x = 0.43429 E_x.$$

由上式可见，一个数的常用对数的绝对误差近似等于该数的相对误差的一半。

例3 已知 $y = \ln x$ ， $x = 175.5 \pm 0.1$ ，

求： y 。

$$\text{解: } E_x = \frac{x}{x} = \frac{0.1}{175.5} = 0.0006,$$

$$y = E_x = 0.0006,$$

$$\bar{y} = \ln \bar{x} = \ln 175.5 = 5.1676.$$

因为 y 的值可能大至 5.1682, 也可能小至 5.1670, 所以最后的答案应该是

$$y = 5.168 \pm 0.001.$$

此例的计算结果说明, 在对数运算 $y = \ln x$ 中, y 的有效位数可取得和 x 的有效位数相同。同理 $y = \lg x$ 的有效位数也和 x 的有效位数相同。

三角函数

① 正弦函数

设 $y = \sin x$,

$$y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \cdot x = x \cdot \cos x.$$

② 余弦函数

设 $y = \cos x$,

$$y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \cdot x = x \cdot \sin x.$$

③ 正切函数

设 $y = \operatorname{tg} x$,

$$y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \cdot x = x \cdot \sec^2 x.$$

例 4 已知 $y = \sin x$, $x = 0.864 \pm 0.001$ 弧度,

求: y 。

解: $y = x \cdot \cos x = 0.001 \times \cos 0.864 = 0.0006$,

$$\bar{y} = \sin 0.864 = 0.7604.$$

因为 y 的值可能大至 0.7610, 也可能小至 0.7598, 所以最后的答案应该是

$$y = 0.760 \pm 0.001.$$

此例的计算结果说明, 在正弦函数 $y = \sin x$ 中, y 的有效位数可取得和 x 的有效位数相同。余弦函数 $y = \cos x$ 也有相同的结论。

例 5 已知 $y = \operatorname{tg} x$, $x = 0.864 \pm 0.001$ 弧度,

求: y 。

解: $y = x \cdot \sec^2 x = 0.001 \times \sec^2 0.864 = 0.003$,

$$\bar{y} = \operatorname{tg} 0.864 = 1.171.$$

因为 y 的值可能大至 1.174, 也可能小至 1.168, 所以最后的答案应该是

$$y = 1.17 \pm 0.01.$$

此例的计算结果表明, 在正切函数 $y = \operatorname{tg} x$ 中, y 的有效位数可取得和 x 的有效位数相同。

应该指出的是: 在三角函数的某些变化率特别大或特别小的区间, y 的有效位数可能与 x 的有效位数明显不同。在这种情况下应该另行处理。

例 6 已知 $y = \sin x$, $x = 3.13 \pm 0.01$ 弧度,

求：y。

$$\begin{aligned}\text{解：}\sin 3.13 &= 0.01159, \\ \sin(3.13+0.01) &= 0.00159, \\ \sin(3.13-0.01) &= 0.02159.\end{aligned}$$

以上数据说明在 x 的误差范围内，y 在 10^{-2} 位上已有变化，即 10^{-2} 位上的“1”已经是存疑数字，所以 y 只有一位有效数字。

3. 混合运算结果的误差

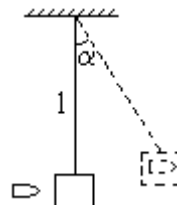
求混合运算结果的误差有两种方法。一种是用误差分步传递的方法，即多次应用四则运算及乘方、开方、对数、三角函数等初等函数的误差传递公式；另一种是应用误差传递的一般公式。

例 7 在用冲击摆测定子弹速度的实验中，木块和子弹的共同速度。

$$v = \sqrt{2gL(1 - \cos\alpha)}.$$

经过测量得到

$$L = 0.250 \pm 0.001 \text{ 米}, \quad \alpha = 16.3 \pm 0.2 \text{ 度}.$$



解一 用误差分步传递的方法。

$$\begin{aligned}(1) \text{ 设 } x &= \cos \alpha, \\ x &= \cos(16.3 \pm 0.2) = 0.2 \times (\pm 0.2 / 180) \times \sin 16.3^\circ \\ &= \pm 0.001.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(2) \text{ 设 } y &= 1 - x, \\ \text{常数“1”没有误差, 所以} \\ y &= 1 - x = 0.999 \pm 0.001.\end{aligned}$$

$$(3) E_y = \frac{\Delta y}{y} = \frac{0.001}{0.999} = 0.1\%,$$

$$E_L = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0.001}{0.25} = 0.4\%.$$

g 是公认值，不必计 g 的误差，因此

$$\begin{aligned}E_v &= \frac{1}{2}E_L + \frac{1}{2}E_y \\ &= \frac{1}{2}(0.4\% + 0.1\%) \\ &= 0.25\%.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \sqrt{2gL(1 - \cos\alpha)} \\ &= \sqrt{2 \times 9.8 \times 0.25 \times (1 - \cos 16.3^\circ)} \text{ 米 / 秒} \\ &= 0.4438 \text{ 米 / 秒},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v &= \bar{v} \times E_v = 0.4438 \times 0.25\% \text{ 米 / 秒} \\ &= 0.0011 \text{ 米 / 秒}.\end{aligned}$$

则有 $v=0.444 \pm 0.007$ 米/秒。

解二 用误差传递的一般公式。

$$v = \sqrt{2gL(1 - \cos\alpha)},$$

$$v = \left| \frac{\partial v}{\partial L} \right| \cdot L + \left| \frac{\partial v}{\partial \alpha} \right| \cdot \alpha$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2g(1 - \cos\alpha)}{L}} \times L + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2gL}{1 - \cos\alpha}} \times \sin\alpha \times \alpha$$

$$= \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 \times 9.8 \times (1 - \cos 16.3^\circ)}{0.25}} \times 0.001 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 \times 9.8 \times 0.25}{1 - \cos 16.3^\circ}} \right. \\ \left. \times \sin 16.3^\circ \times \frac{0.2 \times}{180} \right) \text{米/秒}$$

$$= 0.007 \text{米/秒},$$

$$\bar{v} = \sqrt{2g\bar{L}(1 - \cos\alpha)}$$

$$= \sqrt{2 \times 9.8 \times 0.25 \times (1 - \cos 16.3^\circ)} \text{米/秒}$$

$$= 0.4438 \text{米/秒}。$$

$$v = 0.444 \pm 0.007 \text{米/秒}。$$

例 8 混合法测量冰的熔解热 L 。将一块从冰水混和物中取出的质量为 $m_{\text{冰}}$ 、温度为 0 的冰块，放进温度为 $t_{\text{初}}$ 、质量为 $m_{\text{水}}$ 的水中，待冰全部熔解后，水温为 $t_{\text{末}}$ 。如果忽略量热器筒的吸热及系统与外界的热交换，即把冰、水组成的系统看成是一个孤立系统，那么可得热平衡方程式

$$Q_{\text{吸}} = Q_{\text{放}}$$

$$m_{\text{冰}}L + m_{\text{冰}}c_{\text{水}}t_{\text{末}} = m_{\text{水}}c_{\text{水}}(t_{\text{初}} - t_{\text{末}}),$$

$$L = \frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{冰}}}c_{\text{水}}(t_{\text{初}} - t_{\text{末}}) - c_{\text{水}}t_{\text{末}}。$$

经测量得到： $m_{\text{水}}=128.0 \pm 0.1$ 克； $m_{\text{冰}}=27.0 \pm 0.1$ 克； $t_{\text{初}}=(32.5 \pm 0.1)$ ； $t_{\text{末}}=(13.0 \pm 0.1)$ 。

解一 用误差分步传递的方法。

(1) 设 $x = t_{\text{初}} - t_{\text{末}}$,

$$\bar{x} = t_{\text{初}} - t_{\text{末}} = 32.5 - 13.0 = 19.5$$

$$x = t_{\text{初}} + t_{\text{末}} = 0.1 + 0.1 = 0.2。$$

(2) 设 $y = \frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{冰}}} \cdot c_{\text{水}} \cdot x$,

$c_{\text{水}}$ 有公认值，不必计它的误差，因此

$$E_y = E_{m_{\text{冰}}} + E_{m_{\text{水}}} + E_x$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{0.1}{27} + \frac{0.1}{128} + \frac{0.2}{195} \\
&= 0.015, \\
\bar{y} &= \frac{\bar{m}_{\text{水}}}{m_{\text{冰}}} \cdot c_{\text{水}} \cdot \bar{x} \\
&= \frac{128.0}{27.0} \times 19.5 \text{ 卡/克} \\
&= 92.44 \text{ 卡/克} \\
y &= \bar{y} \cdot E_y = 92.44 \times 0.015 \text{ 卡/克} \\
&= 1.4 \text{ 卡/克}。
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(3) L &= y - c_{\text{水}} \cdot t_{\text{末}}, \\
\bar{L} &= \bar{y} - c_{\text{水}} \cdot t_{\text{末}} \\
&= 92.44 \text{ 卡/克} - 1 \times 13.0 \text{ 卡/克} \\
&= 79.4 \text{ 卡/克}, \\
L &= y + c_{\text{水}} t_{\text{末}} \\
&= 1.4 \text{ 卡/克} + 0.1 \text{ 卡/克} \\
&= 1.5 \text{ 卡/克}。
\end{aligned}$$

因此 $L = (79 \pm 2) \text{ 卡/克}$ 。

解二 用误差传递的一般公式。

$$\begin{aligned}
L &= \frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{冰}}} \cdot c_{\text{水}} \cdot (t_{\text{初}} - t_{\text{末}}) - c_{\text{水}} \cdot t_{\text{末}}, \\
L &= \left| \frac{\partial L}{\partial m_{\text{水}}} \right| \cdot m_{\text{水}} + \left| \frac{\partial L}{\partial m_{\text{冰}}} \right| \cdot m_{\text{冰}} + \left| \frac{\partial L}{\partial t_{\text{初}}} \right| \cdot t_{\text{初}} \\
&\quad + \left| \frac{\partial L}{\partial t_{\text{末}}} \right| \cdot t_{\text{末}} \\
&= \frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{冰}}} (t_{\text{初}} - t_{\text{末}}) \cdot m_{\text{水}} + \frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{冰}}^2} \cdot c_{\text{水}} \cdot (t_{\text{初}} - t_{\text{末}}) \cdot m_{\text{冰}} \\
&\quad + \frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{冰}}} \cdot c_{\text{水}} \cdot t_{\text{初}} + \left(\frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{冰}}} \cdot c_{\text{水}} + c_{\text{水}} \right) \cdot t_{\text{末}} \\
&= \frac{1}{27} (32.5 - 13.0) \times 0.1 \text{ 卡/克} + \frac{128}{27^2} (32.5 - 13.0) \times 0.1 \text{ 卡/克} \\
&\quad + \frac{128}{27} \times 0.1 \text{ 卡/克} + \left(\frac{128}{27} + 1 \right) \times 0.1 \text{ 卡/克} \\
&= 0.072 \text{ 卡/克} + 0.35 \text{ 卡/克} + 0.48 \text{ 卡/克} + 0.58 \text{ 卡/克} \\
&= 1.5 \text{ 卡/克},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{L} &= \frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{冰}}} \cdot c_{\text{水}} \cdot (t_{\text{初}} - t_{\text{末}}) - c_{\text{水}} \cdot t_{\text{末}} \\ &= \frac{128.0}{27.0} \times 1.00 \times (32.5 - 13.0) \text{卡/克} - 1.00 \times 13.0 \text{卡/克} \\ &= 79.4 \text{卡/克}.\end{aligned}$$

$$L = (79 \pm 2) \text{卡/克}.$$

比较上面两种方法可以看出，误差分步传递的方法步骤比较多，而且容易发生错误，而用误差传递的一般公式比较简捷。

上述表明由直接测得量求得间接测得量有两种常用方法：有效数字的运算和应用误差传递公式。在实验中，如果两者发生矛盾，那么以误差传递公式的计算结果为准。如果因为各项误差的积累，使间接测得量的绝对误差较大，以使根据有效数字运算法则计算出来的本来应该可靠的位数也产生了误差，那么就将这一位作为存疑数，后面多余的数全部舍弃。例如例 8 中的答案，根据有效数字的运算法则应该有三有效数字即 $L=79.4$ 卡/克。但是用误差传递公式计算， L 的最大误差可能是 ± 1.5 卡/克，也就是说 79.4 中的“9”已经是存疑数，接上面的处理方法最后结果只能是 $L=79 \pm 2$ 卡/克。

三 实验的有利条件和最佳条件

(一) 实验的有利条件

上面已经讨论了怎样根据直接测量的误差来确定间接测量的误差。这里主要讨论应怎样控制各项直接测量的误差来减小间接测量的误差。

例 1 用单摆测定重力的加速度。

$$\text{单摆的周期 } T = 2\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}.$$

根据乘除法运算的误差传递公式 $E_g = E_l + 2E_T$ 。

l 和 T 是两个完全独立的量， l 的误差 E_l 和 T 的误差 E_T 可正可负。根据 E_l 和 E_T 的正负，共有四种可能的情况。

E_l	+	+	-	-
$2E_T$	+	-	+	-

如果在实验中设法使 E_l 和 $2E_T$ 尽量接近，则表中第(2)、(3)两种情况，它们误差将大部分抵消，也就是说最后的结果有 50% 的概率 E_g 的误差可以很小。

若要使 $E_l = 2E_T$ ，也并不困难。例如单摆的摆长 l 约为 1.00 米，用米尺测量摆长，其绝对误差为 0.002 米。那么，

$$E_1 = \frac{1}{1} = \frac{0.002}{1.00} = 0.2\%。$$

$$E_T = \frac{1}{2} \cdot E_1 = \frac{1}{2} \times 0.2\% = 0.1\%。$$

单摆摆动时间 t 用秒表测量。因为 $T = \frac{t}{n}$ (n 为单摆摆动次数)，所以 $E_K = E_T = 0.001$ 。由于实验者开表和停表时的操作误差一般可控制在 0.2 秒之内，那么，

$$t = t \cdot E_t，$$

$$0.2 = t \times 0.001，$$

$$t = 200 \text{ 秒}。$$

从上述结论 $t=200$ 秒可知，采用摆长为 1 米周期为 2 秒的单摆，只要让单摆摆动 100 次左右，这个实验就可达到预期的目的。

例 2 测量金属圆柱体的密度。

金属圆柱体的密度 $\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi D^2 h}$ 。根据误差传递公式

$$E = E_m + E_h + 2E_D。$$

m 、 D 和 h 是三个完全独立的量， m 的误差 E_m 、 D 的误差 E_D 和 h 的误差 E_h 可正可负，根据 E_m 、 E_D 和 E_h 的正负，共有八种可能的情况。

E_m	+	+	+	+	-	-	-	-
$2E_D$	+	+	-	-	+	+	-	-
E_h	+	-	+	-	+	-	+	-

如果在实验中设法使 E_m 、 $2E_D$ 、 E_h 尽量接近，则第(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)六种情况的误差将部分抵消，也就是说有 75% 的概率 E 的误差可以较小。

如果圆柱体的高 h 为 2.00 厘米，直径 D 为 3.00 厘米。 h 和 D 都用游标卡尺测量，其绝对误差为 0.02 厘米。那么

$$E_h = \frac{h}{h} = \frac{0.02}{20} \times 100\% = 0.1\%，$$

$$2E_D = 2 \times \frac{D}{D} = 2 \times \frac{0.02}{30} = 0.14\%。$$

在这里，这两项误差相差不多。如果其中一项的误差比另一项大得多（比如说大一个数量级），那么可以增加这个误差较大的量的测量次数或者换用精度更高的仪器来测量这个误差较大的量。

如果圆柱体的质量为 126.0 克，用感量为 0.1 克的天平测量，那么

$$E_m = \frac{m}{m} = \frac{0.1}{126.0} \times 100\% = 0.08\%。$$

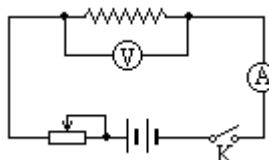
从本实验中， $E_h=0.1\%$ ， $2E_D=0.14\%$ ， $E_m=0.08\%$ 三个数据看，显然没有必要用精度更高的天平来测量圆柱体的质量。

例 3 测量金属的电阻率。

电路图中被测金属导线的电阻一般远小于伏特表的内阻，因此可以不考虑由实验线路带来的系统误差。根据欧姆定律 $R = \frac{U}{I}$ 和电阻定律

$$R = \frac{L}{S} \quad (S = D^2 / 4)。$$

可得 $\frac{D^2 U}{4LI}。$



根据误差传递公式

$$E = E_U + E_I + E_L + 2E_D。$$

式中四项误差都是互相独立的，根据它们的正负，共有十六种可能的情况。

E_U	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
E_I	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
E_L	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
$2E_D$	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-

如果设法使 E_U 、 E_I 、 E_L 和 $2E_D$ 尽量接近，那么第(4)、(6)、(7)、(10)、(11)、(13)六种情况的误差将大部分抵消；第(2)、(3)、(5)、(8)、(9)、(12)、(14)、(15)八种情况的误差将部分抵消。也就是说有 37.5% 的概率 E 的误差很小，有 50% 的概率 E 的误差较小。

从以上三个例子中看到，在间接测量中，使用适当的测量仪器和测量方法，可以使各直接测得量的误差比较接近，这对减小间接测量的误差是有利的。如果间接测量的误差是由 n 项直接测量的误差构成的，那么最不利的情况（所有误差项都同号）出现的概率只有 $\frac{1}{2^{n-1}}$ 而间接测量结果误差很小（误差大部分抵消）或误差较小（误差部分抵消）的概率有 $1 - \frac{1}{2^{n-1}} = 1 - 2^{1-n}$ 。 n 越大，这个概率也越大。

（二）实验的最佳条件

根据实验的有利条件，在实验时应该使各项直接测量的误差尽量接近。但在很多实验中，由于实验条件的限制，这一点是不容易做到的。在这种情况下就要尽量设法减小误差中最大的一项以及与之相关联的其他误差项，来提高实验的精度，这就是实验的最佳条件。

例 1 用惠斯通电桥测量电阻

用直线式电桥测量电阻 R_x 时，两比例臂由直线电阻 R_1 和 R_2 构成，比

较臂由电阻箱 R_s 构成。

当电桥平衡时

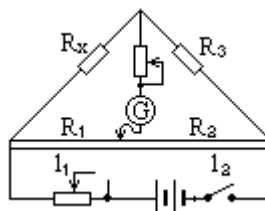
$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_s。$$

由于直线电阻是均匀的，用 L 表示直线电阻的总长度， l_1 和 l_2 分别代表两比例臂电阻的长度（如图），则有

$$R_x = \frac{l_1}{l_2} \cdot R_s = \frac{l_1}{L-l_1} \cdot R_s。$$

根据误差传递公式

$$E_{R_x} = \frac{1}{l_1} + \frac{1}{L-l_1} + \frac{R_s}{R_s}。$$



由于比较臂采用的是电阻箱，精度比较高，因此 $\frac{R_s}{R_s}$ 这项相对

误差比较小。余下的两项 $\frac{1}{l_1}$ 和 $\frac{1}{L-l_1}$ 相对来说较大（它们是相关联的），要尽量设法减小它们。

$$\text{设 } y = \frac{1}{l_1} + \frac{1}{L-l_1} = \frac{1 \cdot L}{l_1(L-l_1)}，$$

式中 L 是个恒量，在直线电阻的刻度确定后，误差 l 也是个定值。要使 y 有极小值，只要 $l_1(L-l_1)$ 有极大值即可。

$$l_1(L-l_1) = -l_1^2 + Ll_1 = -(l_1 - \frac{L}{2})^2 + \frac{L^2}{4}。$$

当 $l_1 = \frac{L}{2}$ 时， $l_1(L-l_1)$ 有极大值为 $L^2/4$ 。也就是说，当 $l_1 = l_2$ 时， y 有极小值，即 R_x 的测量误差最小。

例 2 混合法测定金属的比热。

将温度为 $t_{\text{金}}$ 、质量为 $m_{\text{金}}$ 的金属块放进温度为 $t_{\text{水}}$ 、比热容为 $c_{\text{水}}$ 、质量为 $m_{\text{水}}$ 的水中，达到热平衡后的温度是 $t_{\text{末}}$ 。为了简单起见，略去量热器等的吸热和系统向外的散热，根据热平衡方程

$$m_{\text{金}} \cdot c_{\text{金}} \cdot (t_{\text{金}} - t_{\text{末}}) = m_{\text{水}} \cdot c_{\text{水}} \cdot (t_{\text{末}} - t_{\text{水}})。$$

$$c_{\text{金}} = \frac{m_{\text{水}} \cdot c_{\text{水}} \cdot (t_{\text{末}} - t_{\text{水}})}{m_{\text{金}} \cdot (t_{\text{金}} - t_{\text{末}})}。$$

根据误差传递公式

$$E_{c_{\text{金}}} = E_{m_{\text{金}}} + E_{m_{\text{水}}} + E_{(t_{\text{末}} - t_{\text{水}})} + E_{(t_{\text{金}} - t_{\text{末}})}，$$

$$= \frac{m_{\text{金}}}{m_{\text{金}}} + \frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{水}}} + \frac{(t_{\text{末}} - t_{\text{水}})}{t_{\text{末}} - t_{\text{水}}} + \frac{(t_{\text{金}} - t_{\text{末}})}{t_{\text{金}} - t_{\text{末}}}。$$

为了比较各项误差的大小，这里给出一些具体的数值： $m_{\text{水}}=150.0$ 克， $m_{\text{金}}=50.0$ 克， $t_{\text{水}}=20.0$ ， $t_{\text{金}}=98.0$ ， $c_{\text{水}}=1.00$ 卡/(克·度)， $c_{\text{金}}=0.093$ 卡/(克·度)（铜块），混合后的温度 $t_{\text{末}}=22.3$ 。如果用1.0分度的温度计，估读误差约为0.2。那么，

$$\frac{(t_{\text{末}} - t_{\text{水}})}{(t_{\text{末}} - t_{\text{水}})} = \frac{0.2 + 0.2}{22.3 - 20.0} = 0.18，$$

$$\frac{(t_{\text{金}} - t_{\text{末}})}{(t_{\text{金}} - t_{\text{末}})} = \frac{0.2 + 0.2}{98.0 - 22.3} = 0.0053。$$

又设天平的绝对误差 $m=0.1$ 克，

$$\text{则 } \frac{m_{\text{金}}}{m_{\text{金}}} = \frac{0.1}{50} = 0.002，$$

$$\frac{m_{\text{水}}}{m_{\text{水}}} = \frac{0.1}{150} = 0.0007。$$

很显然，其中最大的一项误差是 $\frac{(t_{\text{末}} - t_{\text{水}})}{t_{\text{末}} - t_{\text{水}}}$ 。要减小这一项误差，只有适当地提高 $t_{\text{末}}$ 以增大 $(t_{\text{末}} - t_{\text{水}})$ 。但如果 $t_{\text{金}}$ 不变，提高了 $t_{\text{末}}$ ，

又会使 $\frac{(t_{\text{金}} - t_{\text{末}})}{t_{\text{金}} - t_{\text{末}}}$ 这一项的误差增大，因此必须将这两项误差综合起来一起考虑。下面讨论 $t_{\text{末}}$ 究竟应为多少时，可使得这两项误差最小。设

$$y = \frac{a}{x - t_{\text{水}}} + \frac{a}{t_{\text{金}} - x}，$$

式中 $a = t_{\text{末}} - t_{\text{水}} = t_{\text{金}} - t_{\text{末}}$ （是一个与 $t_{\text{末}}$ 无关的定值），又设 $x = t_{\text{末}}$ 。这样，问题变成当 x 为何值， y 有极小值。

$$y = \frac{at_{\text{金}} - ax + ax - at_{\text{水}}}{(x - t_{\text{水}})(t_{\text{金}} - x)}$$

$$= \frac{at_{\text{金}} - at_{\text{水}}}{-[x^2 - (t_{\text{水}} + t_{\text{金}})x + t_{\text{水}}t_{\text{金}}]}，$$

上式分子是一个与 x 无关的定值，只要分母取得极大值， y 就有极小值。

$$\text{分母} = -[x^2 - (t_{\text{水}} + t_{\text{金}})x + t_{\text{水}}t_{\text{金}}]$$

$$= -\left[\left(x - \frac{t_{\text{水}} + t_{\text{金}}}{2}\right)^2 + t_{\text{水}}t_{\text{金}} - \left(\frac{t_{\text{水}} + t_{\text{金}}}{2}\right)^2\right]$$

$$= -\left(x - \frac{t_{\text{水}} + t_{\text{金}}}{2}\right)^2 - t_{\text{水}}t_{\text{金}} + \left(\frac{t_{\text{水}} + t_{\text{金}}}{2}\right)^2。$$

当 $x = \frac{t_{\text{水}} + t_{\text{金}}}{2}$ 时，分母有极大值，则 y 有极小值。

从以上两个例子中可以看到,在实验中要尽量使最大的一项误差(包括与之相关联的其他误差项)取得极小值,这样的实验就处于最佳情况。所以实验的最佳条件是:各项直接测量的误差中的最大项要取极小值。

但是要注意,实验的最佳条件不是所有实验都有的,一般只是在实验中有两项误差相互有关联的时候才能讨论最佳条件。例如例1中的

$\frac{1}{l_1}$ 和 $\frac{1}{L-l_1}$ 以及例2中的 $\frac{(t_{末}-t_{水})}{t_{末}-t_{水}}$ 和 $\frac{(t_{金}-t_{末})}{t_{金}-t_{末}}$ 这两项误差都是

相互关联的,其中一项减小,另一项必然增大。而且讨论得出的最佳条件并非一定都能在实验中实现,比如例2中 $t_{末} = \frac{t_{水}+t_{金}}{2}$ 的最佳条件就

很难在实验中实现,只能在可能条件下尽量朝这个方向靠近。

从有效数字运算的角度来看,也不难理解实验的有利条件和最佳条件。当各项直接测量的误差相差不大的时候,各直接测量值的有效位数一般是相同的,所有测量值的有效数字都可以得到充分的利用。但如果各项直接测量的误差相差得很大(比如说相差两个数量级),那么相对误差比较小的那个直接测量值的最后两位有效数字必须被舍去,成为无效测量。以例2为例,如果用物理天平测量 $m_{水}$ 和 $m_{金}$,这两个量就分别有5位和4位有效数字;用1分度的温度计测量温度,那么 $(t_{末}-t_{水})$ 这一项最多也只有三位有效数字。根据有效数字的运算法则,计算结果最多只有三位有效数字,也就是说 $m_{水}$ 的后两位和 $m_{金}$ 的后一位有效数字都是无效测量。因此完全可以用托盘天平测量质量,或者改用精度高一些的0.1分度的温度计测量温度,以达到各项直接测量的有效位数基本相同。

四 系统误差

(一) 系统误差的特点和来源

测量数据中除了含有偶然误差外,还可能包括系统误差。譬如在重复测量某一物理量时,如果误差的符号基本不变或者按一定的规律变化,这种情况下产生的误差就叫做系统误差。

系统误差的特点是它的出现并不像随机误差那样服从统计规律,而是服从某种确定的函数规律。在相同的条件下测量同一物理量时,系统误差的大小和符号保持不变;当条件改变时,系统误差也按一定的规律变化。

系统误差的来源主要有以下几个方面:

1. 实验仪器不够准确

实验的测量仪器不准确会给实验结果带来明显的系统误差,例如米尺缩短,那么测量长度的结果总是偏大;如果秒表走得太慢,那么测量时间的结果总是偏小。为了减小由于测量仪器不准确给实验结果带来的系统误差,应该定期地对测量仪器进行校正。常用的校正方法是与准确度更高的仪器进行比较,如果没有准确度更高的仪器,也可以将多只同类仪器进行比较,一般说来不准确的总是少数。在校正过的测量仪器上

要注明修正值。在使用时可认为

$$\text{准确值} = \text{指示值} + \text{修正值}。$$

2. 实验原理不够完善

实验中所用的公式或原理是近似的，这也会引起一定的系统误差。

下面用两个例子说明这个问题。

例 1 用单摆测量重力加速度 g 。

单摆的周期公式 $T = 2\sqrt{\frac{l}{g}}$ 是一个近似公式，只是在摆角 θ 趋向零时才完全成立。当摆角 θ 不很小时，单摆周期公式应该是

$$T = 2\sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4}\right)^2 \sin^4 \frac{\theta}{2} + \dots \right]$$

略去 $\sin^4 \frac{\theta}{2}$ 及其后面各项，可得

$$T = 2\sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)。$$

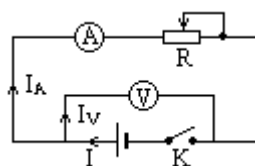
由此可见，用 $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$ 计算出的重力加速度是偏小的。这就是由于使用了近似公式带来的系统误差。

例 2 用安培表和伏特表测定电池的电动势和内阻。

电路如图所示。如果改变 R 的阻值，测得两组 (U, I) 值，列出方程组

$$\begin{cases} U_1 = E - I_1 r \\ U_2 = E - I_2 r \end{cases}$$

可解得 $r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$ ，



从电路图中不难看出，安培表测出的电流值是图中的 I_A ，而不是流过电池的电流 I 。只有当 $R_V \gg R + R_A$ 或者说 $I \gg I_V$ 时，方程组才近似成立。准确的方程应该是

$$\begin{cases} U_1 = E - \left(I_1 + \frac{U_1}{R_V} \right) r_0 \\ U_2 = E - \left(I_2 + \frac{U_2}{R_V} \right) r_0 \end{cases}$$

$$\text{可解得 } r_0 = \frac{(I_2 U_1 - I_1 U_2) R_V}{(U_2 - U_1) - (I_1 - I_2) R_V},$$

$$r_0 = \frac{(U_1 - U_2) R_V}{(U_2 - U_1) - (I_1 - I_2) R_V}.$$

比较 r 和 r_0 可知 $r < r_0$ 。这就是因计算方程的近似性带来的系统误差。

3. 环境的影响

由于环境因素（诸如温度、湿度、气压、照明、电磁场等）对实验的影响，也会导致系统误差。例如用热平衡法来测量冰的熔解热，如果实验时冰块投入容器，实验系统的温度始终低于室温，那么实验系统就会在实验过程中不断地从周围环境吸热，导致最后得到的冰熔解热的数值偏小。

4. 实验者本身的因素

测量者在测量时间时按表总有超前或落后，在观察指针时总有偏左或偏右等习惯，都会给测量结果带来系统误差。

（二）怎样发现系统误差

虽然系统误差的出现具有某种确定的规律性，但这种规律性对于不同的实验过程却是不同的。它不像处理偶然误差那样有完整而普遍通用的公式或计算方法，而只能针对每一个具体的实验采取具体的方法。这就要求实验者对研究对象的特殊规律有充分的了解，要求实验者在学识、实验经验、实验技巧方面有相当的水平。一般地说，处理系统误差比处理偶然误差要困难些，而且容易在不自觉中将它遗漏。研究实验的系统误差的第一步工作就是确定实验中到底有没有系统误差。常用而且比较简单的方法有以下几种：

1. 理论分析法

所谓理论分析法就是实验者凭借自己掌握的有关某个实验的物理理论、实验方法和实验经验对该实验所依据的理论公式的近似性、所采用的实验方法的完善性进行仔细、认真的研究和分析，从中找出可能导致系统误差的根源。前面讨论的“用单摆测定重力加速度”、“用安培表和伏特表测定电池的电动势和内阻”等实验，都是用理论分析的方法发现它们具有系统误差的。理论分析法是发现、确定系统误差的最基本的方法。

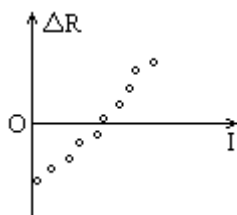
2. 误差观察法

在相同条件下进行重复测量，将测量误差按测量值的顺序排列，观察误差的符号及其数值的变化规律，从中可判断是否存在有规律变化的系统误差。

例 1 用伏安法测量小灯泡的电阻。改变小灯泡两端的电压，分别测得当流过小灯泡的电流为 $I_1=10.0\text{mA}$, $I_2=20.0\text{mA}$, …… , $I_{10}=100.0\text{mA}$ 时小灯泡的电阻 $R_1=U_1/I_1$, $R_2=U_2/I_2$, …… , $R_{10}=U_{10}/I_{10}$ 。求出电阻

的平均值 $\bar{R} = \sum_{i=1}^{10} R_i / 10$ ，再求出每次测量的误差 $R_i = R_i - \bar{R}$ 。可发

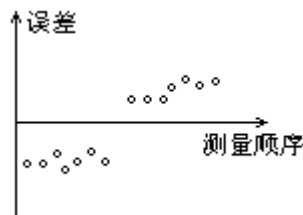
现 P 的符号有 - - - - - + + + + + 的规律，大小有 $R_1 < R_2 < \dots < R_9 < R_{10}$ 的规律。如果作 R - I 图，则如图所示。由此可知实验中存在着有规律变化的系统误差（其中误差的微小起伏是由于偶然误差的影响而引起的）。



如果改变测量条件（相应地改变了产生系统误差的原因），观察误差的符号及其数值的变化规律，还可以判断是否存在固定的系统误差。

例 2 瑞利(Rayleigh)由不同的来源制取了氮气。用化学方法，他分别从 NO , N_2O , NH_4NO_2 , NO_2 中制取了氮气，所得氮气的平均密度为 1.2505 克/分米³。接着，他又用各种不同的方法从空气中制取了氮气，平均密度为 1.2572 克/分米³。

求出测量的平均值，再求出每次测量的误差，可发现由化学方法制取的误差值都是负的，由空气中提取的误差值都是正的（如图所示）。这种情况说明实验中含有随测量条件改变而改变的固定系统误差。



3. 误差核算法

误差观察法只适用于系统误差比偶然误差大得较多的情况，否则往往检查不出是否有系统误差存在。误差核算法比误差观察法灵敏。具体方法如下：

设共进行了 N 次重复测量，把各次测量值的误差按测量顺序分成前一半和后一半两个组（若测量次数为奇数时可将中间的一个误差分别参加前后两组计算），然后分别计算前后两个组的误差之和，并求出它们的差

$$L = \sum_{i=1}^K e_i - \sum_{i=K+1}^N e_i$$

如果 L 基本为零，说明测量不存在系统误差或只存在固定的系统误差；如果 L 显然不为零，说明测量可能存在线性变化的系统误差或随测量条件改变的系统误差。

4. 相互比较法

由于固定系统误差本身的特点，无法通过在同一测量条件下进行的多次测量来发现这种系统误差，只能通过改变测量条件，并对两种测量的结果进行比较，才有可能发现。固定系统误差比较检查的方法有多种，可用不同的实验方法进行对比，可用不同的测量仪器进行对比，也可由不同人员测量进行对比等等。然后以两种不同测量结果之差与它们的偶然误差相比较来判断是否存在系统误差。

设用不同种方法测得同一物理量的结果为

$$\bar{x}_1 \pm s_1, \bar{x}_2 \pm s_2, \dots, \bar{x}_n \pm s_n。$$

其中 s 是某种方法测量的标准误差，如果用某种测量方法测量了 n 次，

那么 $s = \sqrt{\frac{\quad^2}{n-1}}$ 。如果有

$$|\bar{x}_i - \bar{x}_j| > 2\sqrt{s_i^2 + s_j^2}$$

那么可以断定 i 与 j 两种测量方法中至少有一组存在着固定系统误差。在前面例 2 中，瑞利用两种不同的方法制取氮气，由化学方法制取的氮气

的密度和由空气中制取的氮气的密度的平均值之差 $|\bar{\rho}_1 - \bar{\rho}|$ 比 $\sqrt{s_1^2 + s_2^2}$ 要大二十多倍，他便认定两种方法之间存在着系统误差。后来正是对这一系统误差的深入研究，才导致了雷姆塞(Ramsay)发现空气中的惰性气体。

(三) 系统误差的估计

实验的系统误差主要来源于实验仪器不够准确、实验原理不够完善以及环境因素的影响。下面分别讨论怎样估计由这些因素引起的系统误差的大小。

1. 由实验仪器带来的系统误差

每种测量仪器都有自己的技术指标，其中准确度是最重要的指标之一。测量仪器的最小分度就是它测量的准确度。例如：米尺的准确度是 1mm，螺旋测微计的准确度是 0.01mm，物理天平的准确度是 0.02g (游码尺的最小分度)，秒表的准确度是 0.1s，一般温度计的准确度是 1。通常可将仪器的准确度作为它测量的系统误差。

打点计时器的准确度取决于它使用的交流电的频率。在正常情况下，

交流电频率为 $50.0 \pm 0.5\text{Hz}$ ，因此 $E_f = \frac{f}{f} = 0.01$ 。因为 $T = \frac{1}{f}$ ，所以

$E_T = E_f = 0.01$ ，即 $T = T \cdot E_T = 0.02 \times 0.01\text{s} = 2 \times 10^{-4}\text{s}$ ，因此一般可将打点周期的系统误差定为 0.2ms。

电表的准确程度可由它的级别来定。例如 2.5 级表，指针的指示值与准确值的差保证不大于电表量程与 0.025 的乘积。如有一个量程为 3V 的 4.0 级电压表，其指示值的最大系统误差为 $3.0\text{V} \times 0.04 = 0.12\text{V}$ 。但将 0.12V 作为最小分度十分不方便，一般制成 0.10V 作为一分度(准确度)。如取 0.10V 为一分度的电表，它的等级应该为

$$\frac{0.10}{3.0} = 0.033 = 0.04。$$

注意：没有 3.3 级表，也不能升为 3 级，所以只能降为 4 级表。同样的理由，2.5 级表通常有 40 分度或 50 分度，1.5 级表通常有 100 分度。在使用电表测量时，一般可将它的最小分度作为测量值的系统误差。

示波器主要用来观察波形。如果用来测量它的准确度较差，通常为

满量程的 10%左右。但如果用示波器来作为比较测量时，准确度可大大提高。例如用利萨如图形来测量未知正弦信号的频率时，其准确度完全由作为标准信号的准确度决定，未知正弦信号频率的有效位数与标准正弦信号频率的有效位数相同。

2. 由实验原理带来的系统误差

通常实验方法都具有一定的近似性，也就是说实验原理常存在着不完善性。如果由实验原理造成的系统误差明显小于测量的偶然误差或其他系统误差，那么此实验原理是可行的；反之，则必须对实验原理进行改进或对实验结果进行修正。因此正确估计由于实验原理不完善引起的系统误差的大小是十分必要的。

此类系统误差的大小一般可以进行明确的计算。仍然以上面讨论过的用伏特表和安培表测量电源内阻和电动势的实验为例，如果不考虑伏特表的分流，可解得

$$\begin{cases} r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2} , \\ = \frac{I_1 U_2 - I_2 U_1}{I_1 - I_2} . \end{cases}$$

如果考虑伏特表的分流作用，可解得

$$r_0 = \frac{(U_1 - U_2)R_V}{(U_2 - U_1) - (I_1 - I_2)R_V} ,$$

$$r_0 = \frac{(I_1 U_2 - I_2 U_1)R_V}{(U_2 - U_1) - (I_1 - I_2)R_V} .$$

由于实验原理的不完善（伏特表的分流作用）所引起的内阻和电动势的相对误差分别为

$$E_r = \frac{r - r_0}{r_0} = -\frac{r}{R_V} ,$$

$$E_\varepsilon = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = +\frac{r}{R_V} .$$

很显然，只有当 R_V 远大于 r 时，实验结果才是令人满意的。例如伏特表量程为 0~3V，内阻 R_V 为 3.00K Ω ，级别为 2.5 级。那么伏特表测量的绝对误差 $\Delta V = 3.00 \times 0.025V = 0.075V$ 。如果待测电池的电动势在 1.5V

左右，那么由于伏特表不准确可能带来的误差是 $\frac{0.075}{1.5} = 5\%$ 。因此只

有当满足 $\frac{r}{R_V} < 0.05$ ，即 $r < 0.05 \times 3.0 \times 10^3 = 1.5 \times 10^2$ 的时候，才能

认为实验原理是可行的。如果使用级别更好而内阻不高的伏特表，可能就采用经过修正的 r_0 、 ε_0 的计算公式。

3. 由环境因素带来的系统误差

估计由环境因素所带来的系统误差的大小是一个比较困难的问题，一般只能确定一个最大值。仍然以前面说过的用热平衡法测量冰熔解热的实验为例，第一次先用普通室温的水做一次实验，实验过程中实验系统的温度始终低于室温。第二次加适量的热水以提高水的初温，再做一

次实验，这次实验过程中实验系统的温度始终高于室温。两次实验所测得的结果之差，可作为环境因素可能给实验带来的最大的系统误差。

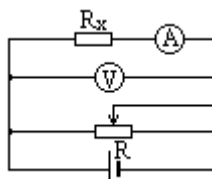
(四) 减小和消除系统误差的方法

系统误差的存在会影响测量结果的准确性，特别是对于偶然误差较小的测量影响更明显。一般可以认为：如果系统误差小于偶然误差，那么系统误差尚可容忍；反之，则必须设法减小系统误差。如前所述，处理系统误差没有一般的方法，下面介绍几种减小或消除系统误差的具有一定普遍意义的方法。

1. 对测量结果加以修正

对测量仪器用更高一级的标准仪器进行校正，确定一个修正值，最后在测量结果中将修正值除去。这是消除由测量仪器带来的系统误差的最常见、最有效的方法。

例 1 在如图所示的用伏安法测量电阻 R_x 的实验中，伏特表和安培表的读数分别为 U 和 I ，如果用修正公式 $R_x = \frac{U}{I} - R_A$ 计算待测电阻的阻值，就可以消除由于实验原理不完善带来的系统误差。



例 2 在用单摆测定重力加速度 g 的实验中，如果用公式

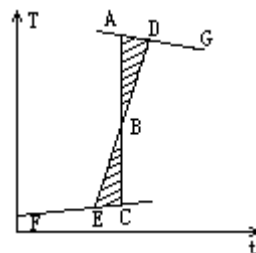
$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} \left(1 + \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)$$

计算 g 的值，可明显减小由于 θ 角不是零度带来的系统误差；如果用公式

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} \left(1 + \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{10} \frac{d^2}{l^2} - \frac{1}{6} \frac{\mu}{M} + \frac{\rho_0}{\rho} + \frac{T^2}{4\pi^2} \beta^2\right)$$

来计算 g 的值，便可以进一步消除由于空气阻力、空气浮力、摆线质量、摆球转动惯量等因素带来的系统误差。（式中各字母物理意义如下： l 为摆长， M 为摆球质量， d 为摆球直径， μ 为悬线质量， ρ_0 为空气密度， ρ 为摆球密度， β 为空气阻尼系数）。

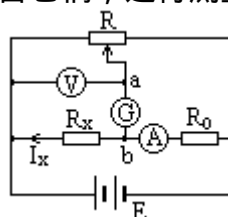
例 3 在用热平衡法测定金属的比热容时，实验系统的温度 (T) - 时间 (t) 曲线如图中实线所示。图中 T_E 是金属块刚投入量热器时的温度， T_D 是量热器升到的最高温度。将预测段直线 FE 向右延长，续测段直线 GD 向左延长，再作一竖直线 AC ，尽量使曲边三角形 ADB 和 BEC 的面积相等。折线 $FCAG$ 可看成热交换进行得无限快的理想实验图线。用 T_C 代替实验的初温 T_E ，用 T_A 代替实验的末温 T_D ，这样的修正可减小由于环境因素带来的系统误差。



2. 对实验原理加以改进

在某些准确度要求较高的实验中，必须对实验原理加以改进。以改进伏安法测电阻的实验来说明这个问题。

将例 1 中的电路改成右图的形式，便能有效地消除原来由于安培表分压带来的系统误差。实验中可调节 R ，使检流计的读数为零，此时 a 、 b 两点等电位，伏特表和安培表测量的完全是待测电阻 R_x 上的电压和电流。如果要进一步减小由于伏特表和安培表不准确带来的系统误差，可用准确度比伏特表、安培表高的电阻箱来代替它们，进行测量。



在上图电路中去掉安培表，将 R_0 换成电阻箱，则待测电阻上的电流

$I_x = \frac{E}{R_0 + R_x}$ 。再去掉伏特表，将滑动变阻器的左右两部分分别换成电阻箱 R_1 和 R_2 ，这时仍然使检流计读数为零，那么待测电阻上的电压

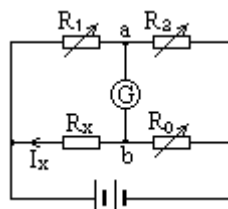
$U_x = \frac{ER_1}{R_1 + R_2}$ 。根据欧姆定律

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{ER_1}{R_1 + R_2} / \frac{E}{R_0 + R_x}。$$

$$\text{可得} \quad \frac{R_0 + R_x}{R_x} = \frac{R_2 + R_1}{R_1}，$$

利用分比定律

$$\frac{R_0}{R_x} = \frac{R_2}{R_1}。$$



这样就演变成了大家熟悉的惠斯通电桥。由此可见，对实验原理进行分析和改进，可以得到更准确的实验结果。

3. 采用适当的测量方法

在测量过程中，根据系统误差的性质，选择适当的测量方法，使测得值中的系统误差得到抵消，可以减小或消除系统误差对测量结果的影

响。

(1)交换抵消法：这种方法是在测量过程中使某些条件相互交换，使产生固定系统误差因素对测量结果起相反的作用，从而抵消这种不变的系统误差。

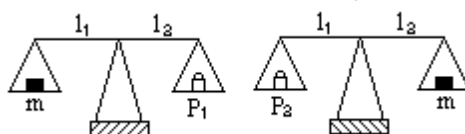
例 4 用天平测量物体的质量 m 。设天平左、右臂为 l_1 和 l_2 ，分别两次将 m 放在左、右盘中测得的质量为 P_1 和 P_2 ，如图。因为

$$l_1 m = l_2 P_1, \quad l_1 P_2 = l_2 m,$$

两式相除，可得

$$m = \sqrt{P_1 P_2}。$$

用这种交换测量的方法可消除由于天平不等臂带来的系统误差。



例 5 用惠斯通电桥测一未知电阻 R_x 。当电桥平衡后有

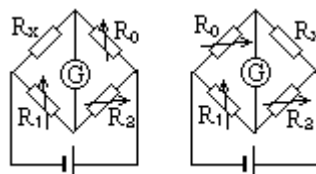
$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_0$$

为了消除 R_1 、 R_2 阻值不准确带来的系统误差，可交换 R_x 和 R_0 的位置，使电桥再次平衡后有

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_0'$$

两式相乘，可得

$$R_x = \sqrt{R_0 R_0'}。$$



(2)代换法：在测量装置上对被测量物进行测量后，在不改变测量条件的情况下，用一个可变标准量代替被测量物，调节可变标准量，使测量装置恢复原状。此时可变标准量的数值就是被测量物的数值。这种方法可消除绝大多数系统误差。

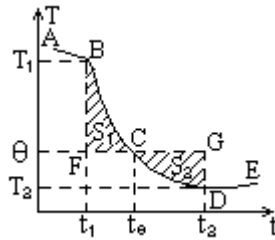
例 6 用天平称物体质量。先将待测物放在右盘中，然后在左盘中加细沙，直至天平平衡；然后取下待测物，在右盘中放标准砝码，直至天平恢复平衡。此时天平右盘中砝码的总质量就是待测物的质量。

例 7 用伏安法测电阻。接通电路后，记下伏特表和安培表指针的确切位置。然后用一个标准电阻箱替换待测电阻，将电阻箱阻值置于最大值后接通电路。调节电阻箱的阻值，直至伏特表、安培表的指针回到原来的位置上。此时电阻箱的阻值就是待测电阻的阻值。

(3)异号补偿法：在测量中控制某些条件，使测量结果中的两部分系统误差符号相反，大部分都能抵消。

例 8 在用热平衡法测定冰的熔解热时，实验系统的温度 $(T) - 时间(t)$ 曲线如图中实线所示。图中 T_1 是冰块刚投入量热器时的温度， T_2 是量

热器能降到的最低温度，是室温。在 t_1 到 t 这段时间里，量热器温度高于室温，量热器向周围环境释放的热量可用曲边三角形 BFC 的面积 S_1 来表示，从 t 到 t_2 这段时间里，量热器温度低于室温，量热器从周围环境中吸收的热量可用曲边三角形 CGD 的面积 S_2 来表示。如果在实验中适当地控制实验条件（如水的初温、水和冰块的质量等因素），使图中 S_1 和 S_2 两块面积大致相等，便可使量热器在 t_1 到 t 时间中的放热和 t 到 t_2 时间中的吸热大致抵消。从而减小因外界因素带来的系统误差。



(4) 对称观察法：当实验系统的变化显现某种对称性时，可安排互相对称的两次测量，以此来减小或消除系统误差。

例 9 在气体定律的实验中，先将注射器活塞向上拉一下，让它回到平衡位置 x_1 ；再将活塞向下压一下，让它回到平衡位置 x_2 ，最后取

$x = \frac{x_1 + x_2}{2}$ 作为测量结果，这样可以消除由于摩擦力带来的系统误差。

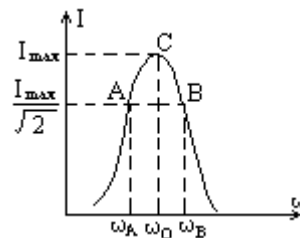
例 10 测定 LRC 串联电路谐振频率的实验。谐振曲线如图所示，函数关系是

$$I = \frac{U}{\sqrt{(L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 + R^2}}$$

式中 ω 为信号频率。由图可见，如果由电流最大值为判断谐振频率，由于 C 点附近曲线斜率很小，会使测量产生很大的误差。为此可以取 I 为 $I_{\max} / \sqrt{2}$ 时，曲线斜率最大的 A 点和 B 点。并可读出相应的频率 ω_A 和 ω_B 。

根据

$$I = \frac{U}{\sqrt{(L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 + R^2}}$$



当 $I\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0} = 0$ 时, $I_{\max} = \frac{U}{R}$;

当 $I\omega_B - \frac{1}{C\omega_B} = R$ 时, $I_B = \frac{U}{\sqrt{2}R}$;

当 $I\omega_A - \frac{1}{C\omega_A} = R$ 时, $I_A = \frac{U}{\sqrt{2}R}$;

以上两式相加,

$$LC(\omega_A + \omega_B) - \frac{\omega_A + \omega_B}{\omega_A \omega_B} = 2RC,$$

当 $LC(\omega_A + \omega_B) = \frac{\omega_A + \omega_B}{\omega_A \omega_B}$ 时,

$$\frac{1}{LC} = \omega_A \cdot \omega_B,$$

因此 $\omega_0 = \sqrt{\omega_A \omega_B}$ 。

由于 A、B 两点曲线斜率比 C 点大得多, 在仪器灵敏相同的情况下, 可使 I_A 和 I_B 测得更准确, 从而减小误差。

(五) 间接测量的系统误差

设间接测量中的偶然误差可忽略不计, 那么间接测量结果的误差就可以由各直接测量的系统误差来确定。下面分固定系统误差和不定系统误差两种情况来讨论。

1. 固定系统误差的传递

固定系统误差的大小和正负都是可以确定的, 因此可以用以下公式

算出间接测量的误差 $\theta_y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \theta_{x_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \theta_{x_2} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \theta_{x_m}$, 式中

θ_{x_1} 、 θ_{x_2} 、 \dots 、 θ_{x_m} 为各直接测的系统误差, $\frac{\partial f}{\partial x_1}$, $\frac{\partial f}{\partial x_2}$, \dots ,

$\frac{\partial f}{\partial x_m}$ 为传递系数。传递系数的大小和正负由间接测量的函数形式

$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 确定。由于各项误差传递系数和各项直接测量的误差都是可正可负的, 所以各项直接测量的误差对最后测量结果的影响可能是增大了误差, 也可能因相互抵消而减小了误差。

用以上误差传递公式可求出各种函数形式的误差传递结果。例如:

(1) $y=x_1+x_2$

绝对误差为 $y = x_1 + x_2$,

相对误差为 $E_y = \frac{1}{y}(\theta_{x_1} + \theta_{x_2})$ 。

(2) $y=x_1 \cdot x_2$

绝对误差为 $y = x_1 \cdot x_2 + x_2 \cdot x_1$,

相对误差为 $E_y = \frac{\theta_{x_1}}{x_1} + \frac{\theta_{x_2}}{x_2} = E_{x_1} + E_{x_2}$ 。

$$(3) y = \frac{x_1}{x_2}$$

绝对误差为 $\theta_y = \frac{\theta_{x_1}}{x_2} - \frac{x_1 \cdot \theta_{x_2}}{x_2^2}$ ，

相对误差为 $E_y = \frac{\theta_{x_1}}{x_1} - \frac{\theta_{x_2}}{x_2} = E_{x_1} - E_{x_2}$ 。

2. 不定系统误差的传递

由于不定系统误差的产生具有一定的随机性，其确切大小和正负都不知道，因此它和偶然误差有某些相似之处。在进行间接测量时，各个直接测量的不定系统误差取正或取负的机会是均等的，有一部分系统误差可能互相抵消。但因为误差传递的过程中难以确定能互相抵消的误差的多少，因此只能考虑最不利的情况，即所有误差都相加的情况，可得误差公式

$$\theta_y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \theta_{x_1} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \theta_{x_2} \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_m} \cdot \theta_{x_m} \right|。$$

上式的形式与偶然误差的误差传递一般公式相同，所不同的是误差的性质。偶然误差传递的一般公式中的 x 表示的是各直接测量中的偶然误差；而上式中的 θ 表示的是各直接测量中的不定系统误差，它们的含义是不同的。例如用电表进行单次测量时， x 可定为最小分度的 1/10 或 1/5，而 θ 则应定为电表的等级与电表满量程的乘积。

实验数据的处理 2

实验数据的处理方法，通常有列表法、图象法和函数法三种。三种方法各有优缺点。在处理同一个实验数据时，不一定要同时用这三种方法。可根据实验内容和实验目的，决定选用其中的一种方法或者取其中的两种方法配合使用。

一 列表法

(一) 列表法

列表法是将一组实验数据中的自变量和因变量的各个数值按照一定的顺序一一对应地列出来。如

表1 水银的密度和温度的关系

t	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	t	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$
-30.0	13.670	40.0	43.497
-20.0	.645	50.0	.473
-10.0	.620	60.0	.448
0.0	.595	70.0	.424
10.0	.570	80.0	.400
20.0	.546	90.0	.376
30.0	.522	100.0	.352

(二) 列表时的注意事项

1. 表的名称及说明

表的名称应简明扼要。如果表名太简单不足以说明问题时，可在表下做一个附加说明。

2. 项目

表中左边一列叫主项，一般代表自变量 x ；右边一列叫副项，一般代表因变量 y 。列表时可选择能直接测量的物理量（如温度、压强等）作主项。

3. 数值的写法

(1)表中应写数据的地方不得有空缺。数值为零时记“0”，数值空缺时记“—”。

(2)同一列的数值，小数点应该上下对齐。

(3)如果各数值的有效位数较多，但在表中只有后面几位有变化，则只需要将一列的第一个数值写完整，以下数值均可不写前面不变的几位数（例如表1中因变量 ρ 的十位数“1”和个位数“3”）。

(4)当数值过大或过小时，应以科学计数法表示。

4. 自变量 x 间距 Δx 的选择

列表时， Δx 常取整数或其他方便值，按增大或减小的顺序排列。相邻两数值之差 Δx 称为间距。如果差值为恒定值，则 Δx 称为公差或定差。因为 Δx 通常为整数，故 Δx 一般为 1、2 或 5 乘以 10^n (n 为整数)。

Δx 的值不能过大或过小。

5. 有效数字的位数

表中所有数值的有效数字位数都应根据实验中测量的精度来确定，不能随意增加或减少。

(三) 数据的分度

由实验得出的数据，由于实验条件的限制，自变量和因变量的变化，一般是不够规则的，应用起来很不方便。数据的分度就是将实验得到的一组数据按顺序有规律地在表中排列起来，并且使自变量 x 作等间距的变化。这样列出的表，便于查阅。

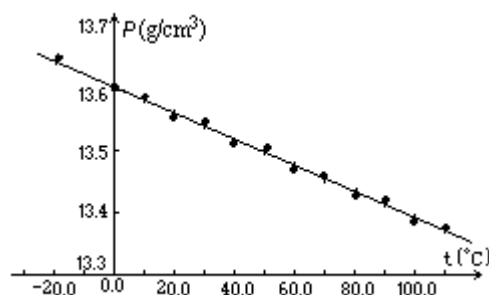
最方便的数据分度方法是图解法。先按照原始数据（即未分度的数

值)作图,作出一条光滑的图线。然后从图线上一一读出所需要的值列成表格即可。图线的详细作法,将在下一节中讨论。

表 2 实验原始数据

t	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	t	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$
-16.9	13.643	50.0	13.482
0.0	.590	60.0	.441
10.0	.580	70.0	.434
20.0	.548	80.0	.408
30.0	.530	90.0	.374
40.0	.490	100.0	.356

例 在一次探索水银的密度与温度关系的实验中,得到表 2 中的一组原始数据。根据表中数据,可作出密度 ρ 与温度 t 的关系图。



在实验中,由于条件的限制,零下的温度只测量了一个数值。但因为图线的线性程度较高,因此可以用数据分度的方法得到零下的另外几个值,见表 3。

表 3 水银的密度和温度的关系

t	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	t	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$
-30.0	13.670	40.0	13.498
-20.0	.646	50.0	.472
-10.0	.621	60.0	.450
0.0	.597	70.0	.425
10.0	.571	80.0	.402
20.0	.543	90.0	.378
30.0	.523	100.0	.354

从表 3 可以看出图解法进行数据分度的两个作用: 可以填补一些原来空缺的项,使表格更加规则; 可以对原始实验数据进行适当的修正(与表 1 比较,表 3 的数据比表 2 的数据要好一些)。

二 图线法

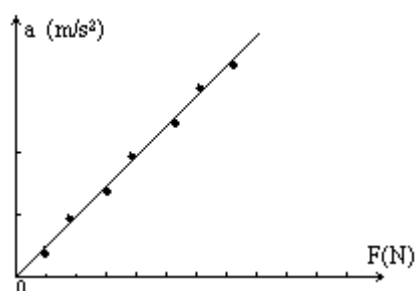
(一) 图线法的作用和优点

1. 图线法的作用

物理实验中通过作图得到实验结果的方法叫图线法。它是一种应用得很广泛的处理实验数据的方法。特别是在有些科学实验的规律和结果还没有完全掌握或者还没有找到明确的函数表达式时，采用作出的图线来表示实验结果，能形象直观地显示物理量变化的规律。

例 1 研究一定质量的物体，它所受的外力与它的加速度之间的关系。

可以在气垫导轨上进行实验。用一系列大小不同的力 F 依次作用在滑块上，测量得到一系列不同的加速度值 a 。在坐标纸上作出 a - F 图。如果图线是一条经过原点的直线这说明 a 和 F 成正比。接着可以再求这条直线的斜率，如果斜率的倒数与滑块的质量相等（在测量误差范围内），则可总结出一个物体的加速度 a 与它所受的外力 F 成正比的结论。写成等式的话，此等式的比例系数是该物体质量的倒数。这样就验证了牛顿第二定律。



图线法除了可以寻找物理量之间的关系外，还经常用来求一些物理量。其中最多见的是用于形式为 $y=kx+b$ 的式子。可以先从图线中求出斜率 k 和截距 b ，再求其他有关的物理量。

例 2 测量一根弹簧的倔强系数和它的原始长度。

弹簧的原始长度是指弹簧在不受任何外力作用时的长度。在地面上做实验，如将弹簧竖直挂起来，弹簧会因本身的重力而伸长；如果将弹簧放置在水平桌面上，则会因摩擦力的影响而造成较大的误差。因此要创造一个不受任何外力作用的环境实在不容易。但用图线法处理上述实验中的实验数据，就可以同时得到弹簧的倔强系数和原始长度。具体做法：

(1) 将待测弹簧竖直悬挂起来，下端吊一只质量为 m_0 的小盘。

(2) 在小盘中加入质量为 m 的砝码，要求这个砝码能使弹簧有一个明显的伸长，然后测量出弹簧的长度 l ，如图。

(3) 增加小盘中砝码的质量，再测量弹簧的长度。重复七到八次（注意：弹簧的伸长不能超过它的弹性限度。）

(4) 以横坐标表示 $F = (m+m_0)g$ ，纵坐标表示弹簧的长度 l ，作 l - F 图。



(5)测出图线的斜率 k 和截距 b (具体方法后面还要介绍)。根据胡克定律可知

$$l = l_0 + \frac{F}{K}$$

式中的 l_0 是弹簧的原始长度, F 是使弹簧伸长的外力, K 是弹簧和倔强系数。

根据一次函数图象的性质

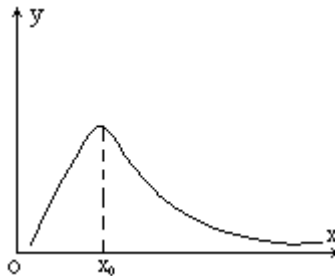
$$K = \frac{1}{k}, \quad l_0 = b。$$

这样就测出了弹簧的倔强系数和原始长度。

2. 图线法的优点

(1)直观 直观是图线法的最大优点。从图上可以清楚地看出两个变化的物理量之间的函数关系或变化规律。如从图中可以看出在 x_0 附近 y 有一个极大值, 当 x 趋向无穷大时, y 趋向零。

(2)简便 在测量精确度要求不高或进行粗测或在探索物理量之间的关系时, 用图线法都很方便。



(3)有取平均的效果 如果图线是根据许多数据点描出的平滑曲线或直线, 图线法就有多次测量取平均的作用。

(4)如果图线作得足够准确, 则不必知道 x 与 y 之间的函数关系式, 即可以对变量求微分和积分。

(5)可以发现某些测量错误 如果在图线上有个别点偏离得特别远, 则可能是测量或数据计算中有错误, 应该重新测量或进行核对。

(二) 作图线的方法

1. 图纸的要求

作图线必须用坐标纸。常用的有直角坐标纸(毫米方格纸)、对数坐标纸等。在选择坐标纸时, 应该注意:

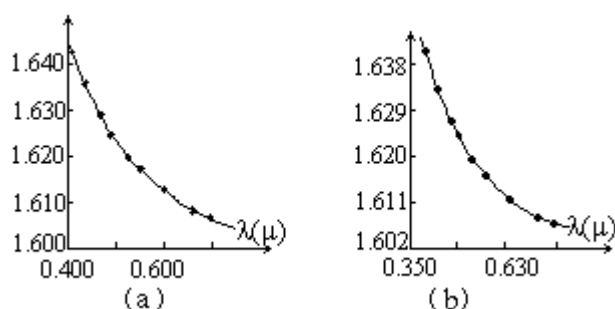
(1)坐标纸要均匀准确;

- (2)坐标纸的大小要合适，太小会影响数据的有效位数；
- (3)坐标纸的纸质要好，要能经得起长久使用；
- (4)如所作图形用于复印时，还要考虑坐标纸的颜色。

2. 坐标的分度

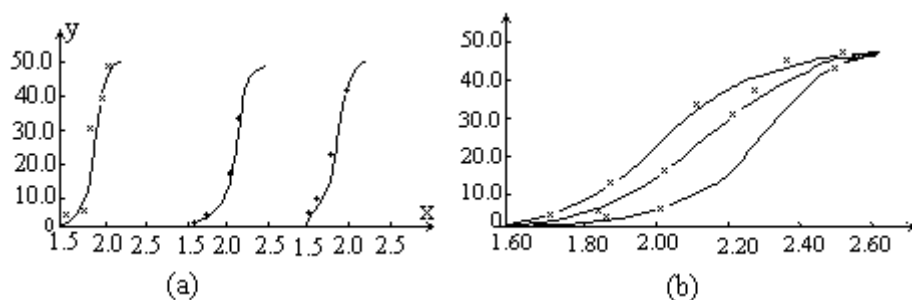
选好坐标纸以后，可根据以下规则进行分度：

(1)x 轴代表自变量，y 轴代表因变量。所谓分度就是确定每条坐标线所代表的数值。分度的选择，应以图中每一点的坐标都能方便地读出为原则。例如，图中(a)和(b)都表示某种玻璃的折射率与折射光的波长的关系，图(a)分度较合适，图(b)分度就不太好。譬如要从图中读取波长分别为 0.470 微米及 0.650 微米的光的折射率时，图(a)就比图(b)方便得多。



(2)坐标分度值不一定自零起。在一组数据中，自变量与因变量均有最低值和最高值。分度时，可以用低于最低值的某一整数作起点，高于最高值的某一整数作终点。分度时力求使图线比较匀称地分布在整幅坐标纸上，不要偏在一角或一边。

(3)坐标分度的大小要根据实验数据的有效位数来确定。一般的原则是：测量数据中的可靠数字在图纸中也应该是可靠的；测量数据中的存疑数字在图线中可以是估画的。图线中坐标的最小分格应该对应测量值中可靠数字的最后一位。



(4)在选择分度时，要尽可能使图线与 x 轴成 45° 角。图中的(a)和(b)是根据同一组实验数据画出的两幅图线。图(b)由于分度选得比较适当，因此曲线的主要部分与 x 轴的夹角接近 45° ，各曲线变化规律的差别也表现得比较明显。如果图线是一根直线，用图解法来求这根直线的斜率和截距，那么也是当图线与 x 轴成 45° 角的时候误差较小。

(5)确定了分度线之后，要在每根分度线旁标上数值，在坐标轴的末

端或坐标轴近旁标明所代表的物理量及单位。

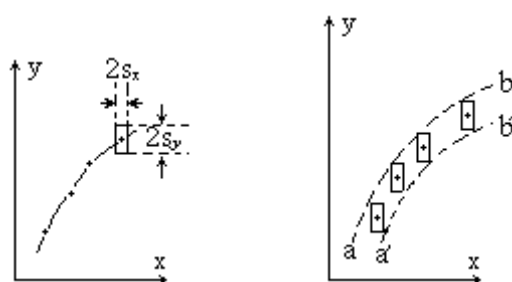
3. 根据数据描点

描点时，只要根据实验数据将各点画到坐标纸上即可。但如果要根据图线来进行一些较准确的测量，描点的要求就较高了。

(1) 每个点都要有一个中心和一个边框，中心点代表数据的最佳值，而边框则表示数据的误差。

(2) 如果自变量与因变量误差相等，可用圆“○”作数据点。其圆心代表最佳值，其半径代表两个变量相同的误差。

(3) 如果自变量与因变量的误差不相等，可用矩形“□”作数据点。矩形的中心代表最佳值，矩形的横边代表自变量的误差，竖边代表因变量的误差。下图用两倍的标准误差作为误差的合理范围作图。这样，理想曲线介于 ab 、 $a'b'$ 两曲线之间的概率有 95%。



(4) 在同一坐标纸上，如果有不同的图线，应该用不同的符号，如“○”、“+”等来标点。

4. 根据数据点拟合曲线

数据点作好以后，用直尺或曲线板等作图工具，拟合出一根直线或光滑的曲线。直尺或曲线板一定要透明，这样便于兼顾图线两边所有的点。除特殊情况（如校准曲线）外，绝不允许连成折线，也不允许连成“蛇线”。图线不一定通过每一个数据点，但要求数据点较均匀地分布在图线两旁。一般来讲，由于仪器及方法等原因，两端各点的精度可能较差，因此作图时可适当少考虑这些点。

根据数据点拟合图线是一件十分细致的工作，一定要有足够的耐心。要反复寻找最理想的图线，否则将使整个实验功亏一篑。如果作的是曲线，可按下列步骤进行：

- (1) 用肉眼或三角尺确定曲线应通过或靠近的一些点；
- (2) 通过所选各点，用铅笔轻轻将各点连接起来；
- (3) 作一些必要的修正，画出曲线的最后形式。

在用曲线板画出曲线时，应注意避免在连接处有突出的变化。检查连接点的好坏，最方便的方法是斜视法。将眼睛靠近图纸，顺着曲线看去，如接点处连接得不好，就会发现在连接处曲线的方向有明显的变化。

(三) 用图解法求直线的斜率

1. 图线的斜率和截距

如果图线为直线，其函数形式为 $y=kx+b$ ，那么可以从图线上解出其

斜率 k 和截距 b 。

(1) 在直线上任意取两点 $p_1(x_1, y_1)$ 和 $p_2(x_2, y_2)$ 。为了减小读数误差, p_1 和 p_2 不能靠得太近, 一般取在靠近直线两端的地方。

(2) 根据斜率的定义, 求出直线的斜率。

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

(3) 如果 x 坐标轴的起点为零, 可直接从图线上读取直线与 y 轴的交点的 y 坐标, 这个数值就是直线的截距 b 。如果 x 坐标轴的起点不为零, 则可以在图线上再取一点 $p_3(x_3, y_3)$, 有

$$y_3 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_3 + b,$$

$$b = y_3 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_3$$

要注意的是, 这三个点 p_1 、 p_2 、 p_3 都要从图线上取得, 不可用原来的实验数据。为了减小误差, 这三个点的 x 坐标可取整数, 读坐标时只要读取它们的 y 坐标即可。

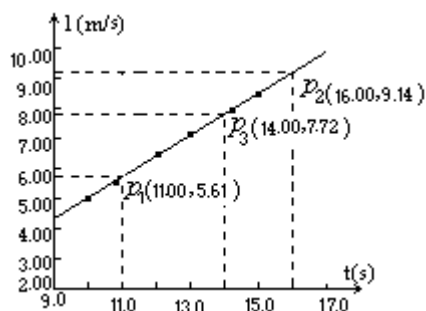
例 研究匀变速直线运动, 测得一组实验数据如下, 用图线法求物体的加速度和初速度 ($t = 0$ 时的速度)。

时间 t (s)	9.98	10.89	11.83	12.87	14.22	4.94	16.10
速度 v (m/s)	4.93	5.40	6.29	6.99	7.80	8.52	9.10

解: 因为匀变速直线运动的速度 $v = v_0 + at$, 所以 $v-t$ 图线的斜率可表示运动的加速度, 图线的截距可表示运动的初速度。作 $v-t$ 图, 在图线上选取 $p_1(11.00, 5.61)$, $p_2(16.00, 9.14)$ 两点, 算出图线的斜率即物体的加速度。

$$\begin{aligned} a &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \\ &= \frac{9.14 - 5.61}{16.00 - 11.00} \text{ 米/秒}^2 \\ &= 0.706 \text{ 米/秒}^2 \end{aligned}$$

因为图线的 x 坐标轴起点不为零, 所以在求截距时要再取一点 $p_3(14.00, 7.72)$, 算出图线的截距即物体的初速度。



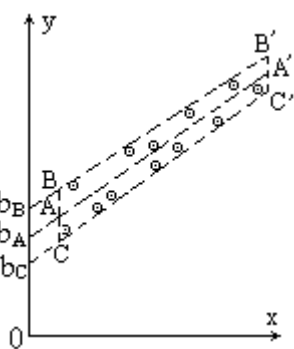
$$\begin{aligned}
 v_0 &= y_3 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_3 \\
 &= 7.72 \text{ 米 / 秒} - 0.706 \times 14.00 \text{ 米 / 秒} \\
 &= -2.16 \text{ 米 / 秒}。
 \end{aligned}$$

负号表示初速度方向与加速度方向相反。

2. 斜率和截距的误差

图线法是用眼睛看的方法拟合图线，在拟合过程中，人的因素难免要起作用。同一组实验数据，两个人拟合的结果一般不可能完全一样。也就是说拟合的过程又会给实验结果带来一些新的“误差”。因此，用图线法处理实验数据不是一种很严格的方法，对它的误差也只以作一个粗略的估计。

设有一组实验数据点如图所示。AA'是根据这一组数据点拟合出来的一条直线，其斜率是 k_A ，截距 b_A 。作梯形 BB'C'C 时，要将所有数据点都包含在内且梯形作得越小越好。连接对角线 BC'和 B'C，并延长 B'B、C'C 与 y 轴相交。求出 BC'和 CB'的斜率 k_B 和 k_C ，BB'和 CC'的截距分别是为 b_B 和 b_C 。可以粗略地认为 $[k_B, k_C]$ 就是 k_A 的误差范围， $[b_C, b_B]$ 就是 b_A 的误差范围。



(四) 改曲线图成直线图

在实验中，会遇到各种各样的函数形式。其中一次函数的图线是直线最容易精确绘制，而且可以从中直接求出它的参数（例如斜率和截距）。因此经常通过一些变换，将其他形式的函数化成一次函数（当然，在此过程中自变量和因变量的意义也发生了变化），也就是使函数的图象由曲线变成直线，简称“化直”。

图线类型	函数式	例子	物理公式
直线	$y=kx+b$	匀速直线运动	$v_t=v_0+at$
抛物线	$y=ax^2$	单摆	$l = \frac{g}{4\pi^2} T^2$
双曲线	$x \cdot y=a$	玻—马定律	$p \cdot V=c$
指数曲线	$y=a \cdot e^{-bx}$	阻尼振动	$A=A_0 \cdot e^{-t}$

物理实验中常用的图线，如上表所列的几种。

下面举例说明怎样将上表中的后三种曲线化为直线。

例 1 测定弹簧的倔强系数 K 。

解：由弹簧振子振动周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$ 可知

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{K} \cdot m_0$$

在实验中改变振子的质量 m ，依次测得一系列不同的周期 T 。然后作 $T^2 - m$ 图（这样，因变量由 T 变成了 T^2 ），拟合出一条直线，并测量出直线的斜率 k 。

$$\frac{4\pi^2}{K} = k, \text{ 则 } K = \frac{4\pi^2}{k}。$$

例 2 测定摩尔气体恒量。

解：由克拉珀珑方程 $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ ，可知

$$p = n \cdot R \cdot T \cdot \frac{1}{V}。$$

在实验中，保持温度为 T ，改变 n 摩尔气体的体积 V ，依次测得一系列不同的压强 p 。

然后作 $p - \frac{1}{V}$ 图（自变量由 V 变成了 $\frac{1}{V}$ ），拟合得到一条直线，并测量出直线的斜率 k 。

$$nRT = k, \text{ 则 } R = \frac{k}{nT}。$$

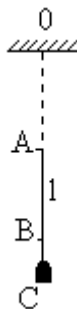
例 3 测定某一振动的阻尼因子。

解：将阻尼振的振幅与时间的关系 $A = A_0 \cdot e^{-\beta t}$ 两边取对数可得

$$\ln A = -\beta t + \ln A_0。$$

在实验中测出不同时间 t 的不同的振幅 A 。然后作出 $\ln A - t$ 图（因变量由 A 变成了 $\ln A$ ），拟合得到一条直线。测量出直线的斜率 k 。即有 $\beta = -k$ 。

从以上三个例子中可以看到，用图线法处理实验数据，一般总是设法把原来的函数式变换成 $y = kx + b$ 型的一次函数。式中 x 和 y 分别是实验中得到的自变量和因变量， k 和 b 经常是表达式。而实验需要的测量的量总是包含在这两个表达式中。下面再通过一个例子来说明图线法的用法。



例 4 从教室顶上垂下一根细绳，下面吊一个形状不规则的重物。测量工具只有一把米尺和一只秒表。根据以上所给的条件测出当地的重

力加速度及教室的大约高度。

参考答案：用单摆测重力加速度的方法来处理这个实验，但测量摆长的困难是教室顶太高；重物形状又不规则。为了避开这两个困难，可以采取如下方法：在细绳下部确定两个点 A 和 B，AB 的长度为 l 。设 OA 和 BC 的总长为 l_0 。在实验中，改变 AB 的长度 l ，(在此过程中 l_0 不变)，测得一系列不同的周期 T 。

$l(\text{m})$	1.00	0.900	0.800	0.700	0.600	0.500	0.400	0.300	0.200	0.100
$T(\text{s})$	3.757	3.703	3.648	3.592	3.536	3.478	3.420	3.360	3.300	3.208

根据单摆周期公式

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l_0 + l}{g}}$$

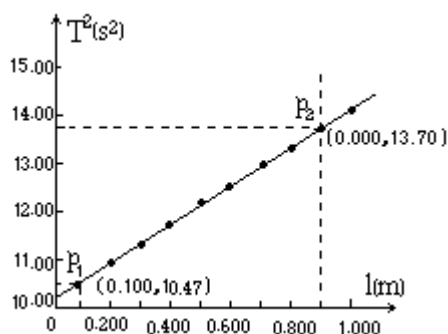
将上式写成

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} \cdot l + \frac{4l_0\pi^2}{g},$$

这是一个 $y=kx+b$ 型的一次方程，式中 $y=T^2$ ， $x=l$ ， $k=\frac{4\pi^2}{g}$ ， $b=\frac{4l_0\pi^2}{g}$ 。

因为 T^2 与 l 成线性关系，所以应该作 T^2-l 图。

$l(\text{m})$	1.00	0.900	0.800	0.700	0.600	0.500	0.400	0.300	0.200	0.100
$T(\text{s})$	14.12	13.71	13.31	12.90	12.50	12.10	11.70	11.30	11.90	10.48



在图线上取 $p_1(0.100, 10.47)$ 和 $p_2(0.900, 13.70)$ 两点，算出直线的斜率

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{13.70 - 10.47}{0.900 - 0.100} \\ = 4.04。$$

因为 $k = \frac{4\pi^2}{g}$,

所以 $g = \frac{4\pi^2}{k} = \frac{4 \times 3.14^2}{4.04} \text{米/秒}^2 \\ = 9.76 \text{米/秒}^2。$

从图上可以看出直线的截距 $b=10.09$ 。

因为 $b = \frac{4l_0\pi^2}{g}$,

所以 $l_0 = \frac{bg}{4\pi^2} = \frac{10.09 \times 9.76}{4.00 \times 3.14^2} \text{米} = 2.50 \text{米}。$

将 l_0 加上 AB 和重物到地面距离便可以估算出教室的大约高度。

(五) 图线法处理实验数据的局限性

用图线法处理实验数据有一定的局限性。

- (1) 它受图纸大小的限制，所以一般只有三到四位有效数字；
- (2) 图纸因印刷会存在误差，图线法因此也受影响；
- (3) 在描点过程中会引出新的“误差”；
- (4) 在图纸上拟合图线，有较大的主观随意性；
- (5) 图线法不是建立在严格的统计理论基础上的数据处理方法。

三 实验结果的函数表示法

实验数据还可以用函数式（经验公式）表示。用经验公式表示有以下几大优点。经验公式形式紧凑，适用范围大；经验公式将物理现象表示成了数学关系式，从而使一大批初等数学的运算方法都可以得到应用；用了经验公式，就可以对它进行微分、积分、内插、外推等数学处理方法。但是，由一组实验数据得到一个经验公式却不是一件容易的事情，本节主要讨论怎样完成这一工作。

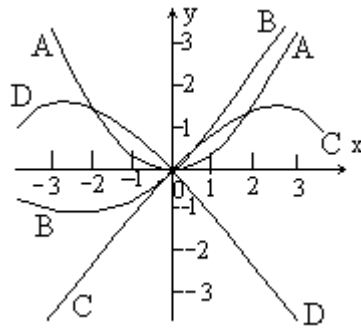
(一) 选择经验公式

一个理想的经验公式，既要形式简单（公式中的常数一般不要多于两个），又要能尽量准确地代表一组实验数据。

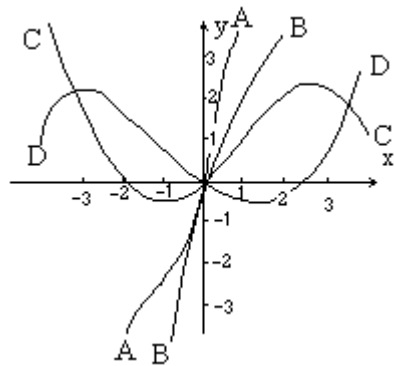
1. 用图象估计经验公式的形式

用图象估计的方法是先根据实验数据作出图线，然后按图线的形状，用解析几何的知识，估计经验公式的形式。

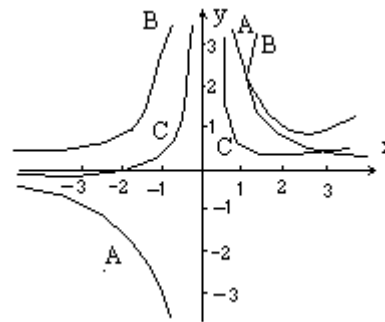
下面举了五种常见的函数图象，供读者选择参考。



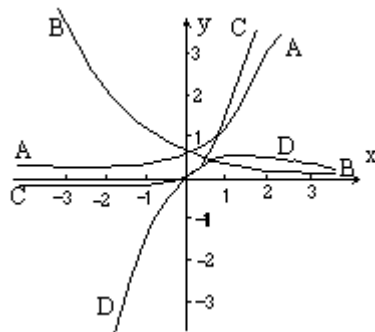
- (A) $y=0.5x^2$,
- (B) $y=x+0.2x^2$,
- (C) $y=x-0.2x^2$,
- (D) $y=-x-0.2x^2$.



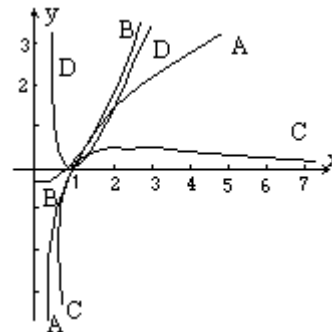
- (A) $y=x+0.2x^2+0.1x^3$;
- (B) $y=x-0.2x^2+0.1x^3$;
- (C) $y=x+0.2x^2-0.1x^3$;
- (D) $y=-x+0.2x^2+0.1x^3$.



- (A) $x \cdot y=2$;
- (B) $x^2 \cdot y=2$
- (C) $y=0.5\left(\frac{1}{x} + \frac{1}{x^2}\right)$.



- (A) $y=0.5ex$;
- (B) $y=0.5e^{-x}$



- (A) $y=2\ln x$;
- (B) $y=x \cdot \ln x$;

$$(C)y = 0.5xex; \quad (C)y = \frac{2}{x} \cdot \ln x;$$

$$(D)y = x \cdot e^{-x} \quad (D)y = (x - \frac{1}{x}) \cdot \ln x.$$

2. 用图线检验估计的经验公式是否正确

在初步估计出一个经验公式的形式后，还需要检验自己的估计是否正确。如果检验下来发现不够理想，就要重新估计，并再次检验，直至获得满意的结果为止。下面先介绍图象检验法。

图象检验法可分成三步：

(1) 将估计的经验公式 $f(x, y, A, B) = 0$ (其中 x, y 是实验中测得的变量， A, B 是经验公式中的常数) 变成 $Y = kX + b$ 的形式，其中 X, Y 中只能包含实验中测得的变量 x 和 y ，而 k, b 是常数 A, B 的函数。

(2) 选择四到五对 (x, y) 值，代入 X, Y 中，求出四到五对 (X, Y) 值。选择 (x, y) 时，尽量使得到的 (X, Y) 值差得远一点。

(3) 作 $Y-X$ 图，如果得到的是一条直线，则证明原先所估计的函数形式是正确的。

例 1 试检验下列实验数据是否可用 $y = A \cdot e^{Bx}$ 来表达。

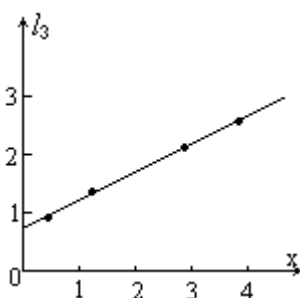
x	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
y	2.57	3.29	4.26	5.50	7.00	8.90	11.5	14.9

将原来估计的经验公式两边取对数

$$\ln y = Bx + \ln A.$$

$\ln y$ 相当于 Y ， x 相当于 X ， B 和 $\ln A$ 分别相当于 k 和 b 。选四点作 $\ln y-x$ 图。

x	0.50	1.50	3.00	4.00
y	2.57	4.26	8.90	14.9
$\ln y$	0.944	1.45	2.19	2.70



所得图象是一条直线，说明用 $y = A \cdot e^{Bx}$ 来表达原实验数据是正确的。

例 2 试检验下列实验数据是否可以用 $x^A \cdot y = B$ 来表达。

x	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
y	7.95	2.01	0.889	0.510	0.320	0.223	0.164	0.126

将原来估计经验公式两边取对数

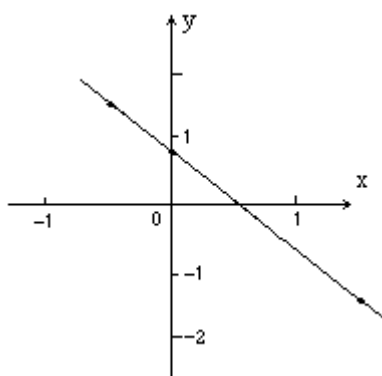
$$A \cdot \ln x + \ln y = \ln B,$$

$$\ln y = -A \ln x + \ln B.$$

$\ln y$ 相当于 Y , $\ln x$ 相当于 X , $(-A)$ 和 $\ln B$ 分别相当于 k 和 b 。

选四点作 $\ln y - \ln x$ 图。

x	0.50	1.00	2.50	4.00
y	7.95	2.01	0.320	0.126
$\ln x$	-0.69	0.0	0.916	1.39
$\ln y$	2.07	0.698	-1.14	-2.07



所得图线为一直线，说明用 $x^A \cdot y = B$ 来表达原实验数据是正确的。

例 3 试检验下列实验数据是否可用 $y = x + A + Bx^3$ 来表达。

x	0.0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50
y	0.0	0.56	1.31	2.27	2	5.27	7.62	10.14

将原来估计的经验公式变形：

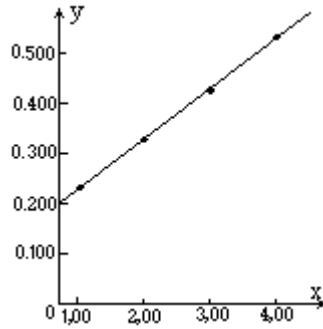
$$\frac{y}{x} = 1 + Ax + Bx^2,$$

$$\frac{y}{x} - 1 = Ax + Bx^2$$

$$\frac{y}{x^2} - \frac{1}{x} = A + Bx.$$

$(\frac{y}{x^2} - \frac{1}{x})$ 相当于 Y , x 相当于 X , B 和 A 分别相当于 k 和 b 。选择四

点作图 $(\frac{y}{x^2} - \frac{1}{x}) - x$ 图。



x	0.50	1.50	2.50	3.50
y	0.56	2.27	5.27	10.14
$\frac{y}{x^2} - \frac{1}{x}$	0.240	0.340	0.443	0.542

所得图线为一直线，说明用 $y=x+ax^2+bx^3$ 来表达原实验数据是正确的。

3. 用逐差法检验估计的经验公式是否正确

设一组实验数据可以用一个幂级数来表示，那么要确定幂级数的次数不是一件容易的事。而且从上面的例 3 中可以看到，用图象法来检验幂级数是比较麻烦的。特别是在常数较多情况的下，这个问题就更为突出。下面介绍一种适用于检验多项式的方法——逐差法。

设有幂级数 $y=A+Bx+Cx^2+Dx^3$ ，且自变量 x 等间距变化。那么，

$$y_1 = A+B(x_1) + C(x_1)^2 + D(x_1)^3$$

$$y_2 = A+B(x_1+h) + C(x_1+h)^2 + D(x_1+h)^3$$

$$y_3 = A+B(x_1+2h) + C(x_1+2h)^2 + D(x_1+2h)^3$$

$$y_4 = A+B(x_1+3h) + C(x_1+3h)^2 + D(x_1+3h)^3$$

$$y_2 - y_1 = (B \cdot h + C \cdot x^2 + D \cdot x^3) + (2C \cdot h + 3D \cdot x^2) \cdot h + 3D \cdot h^2 \cdot x$$

因为 h 是常数，所以上式可以写成

$$y_2 - y_1 = A' + B'x + C'x^2$$

式中 A' 、 B' 、 C' 为新的常数。重复上面的步骤

$${}^2y = A'' + B''x$$

$${}^3y = A'''$$

由此可见，若 h 为常数，幂级数的次数为 3 时，3 级逐差值 3y 为一常数。反过来，如果某一组实验数据 3 级逐差值为一常数，则可断定这一组实验数据可以用 3 次幂级数来表示。用同样的方法，可以得到更一般的结论：如果一组数据的 n 次逐差值是一个常数，那么这组数据可以用一个 n 次幂级数来表示。

例 4 试确定下列实验数据的经验公式的形式。

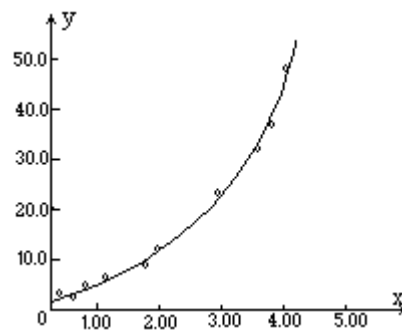
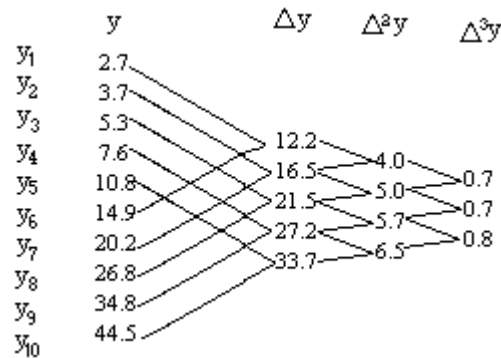
x	0.33	0.79	1.29	1.80	2.62	2.86	3.69	3.89	4.60	4.92	5.08
y	3.4	2.6	5.4	7.4	10.8	14.5	21.0	25.9	33.8	41.3	50.0

(1) 画出 $y-x$ 图。图线比较像抛物线，因此初步判断用幂级数来表达。

(2) 因为自变量 x 的间距 x 是不相等的, 因此要从图线上重新取出一组固定的 x 数据。

x	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
y	2.7	3.7	5.3	7.6	10.8	14.9	20.2	26.8	34.8	44.5

(3) 求逐差



在求第一组逐差 y 的时候, 将所有数据分成上下两个半组: y_1 到 y_5 为上半组, y_6 到 y_{10} 为下半组。然后将下半组中的每一个数减去上半组中相应的数, $y_6 - y_1, y_7 - y_2, \dots, y_{10} - y_5$, 求出 y 值。这样的做的目的是使 y 有较多的有效位数, 以便使最后的结果明显一些。如果数据组数足够多, 那么求 2y 、 3y 时也可以分组进行。

因为第三级逐差基本相等了, 因此经验方程应该是个三次幂级数, 可写成

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3。$$

(二) 确定经验公式中的常数

确定了经验公式的形式之后, 接下来的工作就是确定经验公式中的常数。

1. 图象法

在用图象检验法证实了经验公式的形式是正确的以后, 即可接着用图象法来确定经验公式中的常数。

例 1 确定上节中例 1 经验公式 $y = A \cdot e^{Bx}$ 中的常数。

解：求出 $\ln y-x$ 图线的斜率 k 和截距 b 。

$$k=0.70, \quad b=0.500;$$

则

$$B=k=0.70,$$

$$\ln A=b, \quad A=e^{0.70x}.$$

因此经验公式是： $y=1.65e^{0.70x}$ 。

例 2 确定上节中例 2 经验公式 $x^A \cdot y=B$ 中的常数。

解：求出 $\ln y-\ln x$ 图线的斜率 k 和截距 b 。

$$k=-2.0, \quad b=0.69;$$

$$-A=-2.0, \quad A=2.0;$$

$$\ln B=0.69, \quad B=e^{0.69}=2.0.$$

因此经验公式是： $x^2 \cdot y=2.0$ 。

例 3 确定上节中例 3 经验公式 $y=x+Ax^2+Bx^3$ 中的常数。

解：求出 $\left(\frac{y}{x^2}-\frac{1}{x}\right)-x$ 图线的斜率 k 和截距 b 。

$$k=0.10, \quad b=0.19;$$

则

$$A=b=0.19, \quad B=k=0.10.$$

因此经验公式是 $y=x+0.19x^2+0.10x^3$ 。

2. 选点法

确定了经验公式的形式后，如果经验公式中有 m 个常数，则可以选出 m 个数据点的数据代入经验公式中，得到 m 个方程。联立这 m 个方程，可解出 m 个常数。

例 4 用选点法确定上节中例 4 经验公式 $y=A+Bx+Cx^2+Dx^3$ 中的常数。

解：选择上节中例 4 中的四个数据点(1.00,3.7)、(2.00,7.6)、(3.00,14.9)、(4.00,26.8)代入经验公式中，可得

$$\begin{cases} 3.7 = A + B + C + D \\ 7.6 = A + 2B + 4C + 8D \\ 14.9 = A + B + C + 27D \\ 26.8 = A + 4B + 16C + 64D \end{cases}$$

解此线性方程组，可得

$$A=2.0, \quad B=1.0, \quad C=0.50, \quad D=0.20.$$

因此经验公式是

$$y=2.0+1.0x+0.50x^2+0.20x^3.$$

由于选点具有随意性，联立方程解出的常数可能因为选点的不同而不同，所以在选点的时候尽量选择那些比较靠近图线的数据点。

3. 平均法

选点法的最大缺点是选点存在随意性。为了克服这个缺点，可以将选点法改为平均法。根据误差理论，正负偏差出现的机会是相等的，因此将几个数据相加将有可能使大部分偏差抵消。

设一个经验公式中有 m 个常数，用平均法求这 m 个常数的步骤如下：

(1) 将所有 n 个数据点的值全部代入经验公式，得到几个方程。

(2) 将此 n 个方程分成 m 组，每组中所含方程个数尽量相等。

(3)将每组方程各自相加，共得到 m 个方程。

(4)解 m 个联立方程，得到 m 个常数的值。

例 5 用平均法确定上节中例 4 经验公式中的常数。

解：

(1)将上节中例 4 所有数据都代入经验公式 $y=A+Bx+Cx^2+Dx^3$ 中，得到十个方程：

$$2.7=A+0.5B+0.25C+0.13D$$

$$3.7=A+B+C+D$$

$$5.3=A+1.5B+2.25C+3.38D$$

$$7.6=A+2B+4C+8D$$

$$10.8=A+2.5B+6.25C+15.6D$$

$$14.9=A+3B+9C+27D$$

$$20.2=A+3.5B+12.25C+42.9D$$

$$26.8=A+4B+16C+64D$$

$$34.9=A+4.5B+20.3C+91.1D$$

$$44.5=A+5B+25C+125D$$

(2)将 、 、 三个方程分作第一组， 、 、 三个方程分作第二组， 、 两个方程分作第三组， 、 两个方程分作第四组。

(3)将四个组的方程各自相加，共得到四个方程：

$$\begin{cases} 11.7 = 3A + 3B + 3.5C + 4.51D \\ 33.3 = 3A + 7.5B + 19.3C + 50.6D \\ 47 = 2A + 7.5B + 28.25C + 107D \\ 79.4 = 2A + 9.5B + 45.3C + 216D \end{cases}$$

(4)解上面的方程组，可得：

$$A=2.0, \quad B=1.0, \quad C=0.50, \quad D=0.20。$$

结果与例 4 恰好相同。实践证明，用平均法时将实验数据按顺序代入，依次将方程分为 m 组，所得的结果最好。

4. 线性回归

前面几种确定经验公式中常数的方法，都带有一定的主观随意性，也就是说同一组实验数据，由不同的人来处理，很可能得出不同的结果。那么能否用严格的数学的方法来确定这些常数呢？线性回归可以解决这个问题。

假定变量 x 和 y 的函数关系为

$$y=f(x, a_0, a_1, \dots, a_m)。$$

式中 a_0, a_1, \dots, a_m 是 m 个常数。在实验中测得一组数据 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$ ，现在的问题是怎样根据这组数据确定这 m 个常数 ($m < n$)。为了理论上计算的需要，假定 (x_i, y_i) 中只有 y_i 是有误差的。在实际处理实际实验数据时，可以把这两个变量中相对来说误差较小的变量作为 x 。

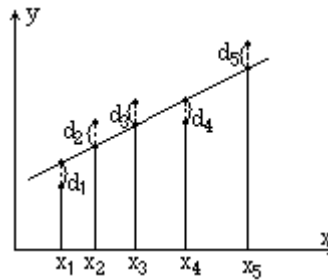
理想图线的要求是：从各数据点到图线的竖直距离的平方和为最小（如图）。也就是说，需要求出经验公式中的各个常数等于什么值时，

各据点到经验公式的图线的竖直距离的平方之和($d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2$)
最小。

(1) 一次函数

设有 n 个数据点可以用经验公式 $y=a_0+a_1x$ 来表达。令 (x_i, y_i) 代表某一个数据点, y'_i 代表将 x_i 代入经验公式之后计算出来的值, 即

$$y'_i = a_0 + a_1 x_i。$$



测量值与计算值的偏差为

$$\begin{aligned} d_i &= y_i - y'_i = y_i - (a_0 + a_1 x_i) \\ &= y_i - a_0 + a_1 x_i。 \end{aligned}$$

令

$$\sum d_i^2 = Q$$

则 $Q = (y_1 - a_0 - a_1 x_1)^2 + (y_2 - a_0 - a_1 x_2)^2 + \dots + (y_n - a_0 - a_1 x_n)^2$ 。

在这个方程中, x_1, x_2, \dots, x_n 以及 y_1, y_2, \dots, y_n 都是已知的测量值, 只有 a_0, a_1 两个是变量。为了求出当 a_0 和 a_1 等于什么时 Q 有极小值, 必须求 Q 对 a_0, a_1 的偏导数。

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial a_0} &= -2(y_1 - a_0 - a_1 x_1) - 2(y_2 - a_0 - a_1 x_2) \\ &\quad - \dots - 2(y_n - a_0 - a_1 x_n) \\ &= -2(\sum y_i - n a_0 - a_1 \cdot \sum x_i); \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} &= -2x_1(y_1 - a_0 - a_1 x_1) - 2x_2(y_2 - a_0 - a_1 x_2) \\ &\quad - \dots - 2x_n(y_n - a_0 - a_1 x_n) \\ &= -2(\sum x_i \cdot y_i - a_0 \sum x_i - a_1 \sum x_i^2) \end{aligned}$$

令

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} = 0, \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} \sum y_i - na_0 - a_1 \sum x_i = 0 \\ \sum x_i \cdot y_i - a_0 \sum x_i - a_1 \sum x_i^2 = 0. \end{cases}$$

解此联立方程，可得

$$a_0 = \frac{\sum (x_i \cdot y_i) \cdot \sum x_i - \sum y_i \cdot \sum x_i^2}{(\sum x_i)^2 - n \cdot \sum x_i^2},$$

$$a_1 = \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i - n \cdot \sum (x_i \cdot y_i)}{(\sum x_i)^2 - n \cdot \sum x_i^2}.$$

(2) 二次函数及其他形式的函数

设有 n 个数据点可以用经验公式 $y=a_0+a_1x+a_2x^2$ 来表达。

令

$$Q = \sum d_i^2 = (y_1 - a_0 - a_1x_1 - a_2x_1^2)^2 +$$

$$(y_2 - a_0 - a_1x_2 - a_2x_2^2) + \dots +$$

$$(y_n - a_0 - a_1x_n - a_2x_n^2)^2.$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_0} = -2(y_1 - a_0 - a_1x_1 - a_2x_1^2) - 2(y_2 - a_0 - a_1x_2 - a_2x_2^2) - \dots - 2(y_n - a_0 - a_1x_n - a_2x_n^2);$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_1} = -2x_1(y_1 - a_0 - a_1x_1 - a_2x_1^2) - 2x_2(y_2 - a_0 - a_1x_2 - a_2x_2^2) - \dots - 2x_n(y_n - a_0 - a_1x_n - a_2x_n^2)$$

$$= -2[\sum (x_i \cdot y_i) - a_0 \cdot \sum x_i - a_1 \cdot \sum x_i^2 - a_2 \cdot \sum x_i^3];$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_2} = -2x_1^2(y_1 - a_0 - a_1x_1 - a_2x_1^2) - 2x_2^2(y_2 - a_0 - a_1x_2 - a_2x_2^2) - \dots - 2x_n^2(y_n - a_0 - a_1x_n - a_2x_n^2)$$

$$= -2[\sum (x_i^2 \cdot y_i) - a_0 \cdot \sum x_i^2 - a_1 \cdot \sum x_i^3 - a_2 \cdot \sum x_i^4].$$

令

$$\frac{\partial Q}{\partial a_0} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_1} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_2} = 0.$$

即

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \cdot \sum x_i + a_2 \cdot \sum x_i^2 = \sum y_i \\ a_0 \cdot \sum x_i + a_1 \cdot \sum x_i^2 + a_2 \cdot \sum x_i^3 = \sum (x_i \cdot y_i) \\ a_0 \cdot \sum x_i^2 + a_1 \cdot \sum x_i^3 + a_2 \cdot \sum x_i^4 = \sum (x_i^2 \cdot y_i). \end{cases}$$

解这个有关 a_0 、 a_1 、 a_2 的线性方程组，即可求出 a_0 、 a_1 、 a_2 。

上面介绍了用线性回归来确定一次、二次幂级数中的常数的方法，更高级幂级数也可以用类似的方法来解决。

其他许多形式的函数可以用“化直”的方法先化成一次函数，然后再用线性回归来做。例如函数 $y=a \cdot b^x$ ，可以先对等式两边取对数，得

$$\ln y = \ln a + x \cdot \ln b,$$

用线性回归确定 a_0 和 a_1 ，可得

$$\ln a = a_0, \text{ 即 } a = e^{a_0};$$

$$\ln b = a_1, \text{ 即 } b = e^{a_1}.$$

(3) 一次函数的相关系数

一组实验数据通过线性回归求出一条理想线后，这组数据点和这条直线吻合得好不好呢？统计理论中给出一个叫做相关系数的量。这主要表征 x 、 y 两个变量相关的程度。从图线上来看，如果 x 、 y 的相关程度高，那么数据点都比较靠近拟合出来的图线；如果相关程度比较低，那么数据点比较分散。

为了将相关系数 r 和前面已经求出的 a_0 、 a_1 表示得简洁一点，令

$$s_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n},$$

$$s_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n},$$

$$s_{xy} = \sum (x_i \cdot y_i) - \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i}{n}$$

那么 a_0 和 a_1 就可以表示为

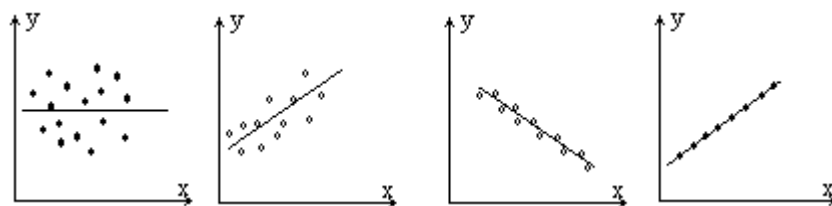
$$a_1 = \frac{s_{xy}}{s_{xx}},$$

$$a_0 = \frac{\sum y_i}{n} - a_1 \frac{\sum x_i}{n}.$$

相关系数 r 可表示为

$$r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx} \cdot s_{yy}}}.$$

当 x 与 y 完全不相关时， $|r|=0$ ；当 x 与 y 正相关，即理想直线的斜率为正时， $r>0$ ；当 x 与 y 负相关，即理想直线的斜率为负时， $r<0$ ；当所有数据点都在理想直线上时， $|r|=1$ 。所以， r 的数值只能在 (-1) 与 $(+1)$ 之间。下图说明了数据点分布情况不同时的相关系数。



对一个实际问题，只有当相关系数 r 的绝对值大到一定程度时，才可以用直线来近似地表达 x 与 y 之间的关系，即可以认为 x 与 y 成线性

关系。因此，要有一个标准。相关系数在这个标准之上，就可以认为 x 与 y 线性关系显著。例如在前面验证牛顿第二定律时，在质量不变的情况下，改变作用力 F ，可以测得一系列不同的加速度 a 。只要 a 与 F 的相关系数达到线性关系显著的标准，就可以认为 a 与 F 成正比。

线性关系显著的标准跟数据点的个数有关，下面给出的两个变量达到线性关系显著标准的相关系数的最小值。（此值还与显著性水平有关，这里列出显著性水平 $\alpha=0.01$ 时的相关系数的最小值。）下表中 n 为数据个数， r 为相关系数的最小值。

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11
r	1.000	0.990	0.959	0.917	0.874	0.834	0.798	0.765	0.735
n	12	13	14	15	16	17	18	19	20
r	0.708	0.684	0.661	0.641	0.623	0.606	0.590	0.575	0.561

(4) 一次函数中常数的误差和有效数字

由于用线性回归确定经验公式中常数的方法是建立在严格的统计理论的基础上的，因此可以用来计算经验公式的系数 a_0 和 a_1 的误差。这里只给出计算结果。

$$a_1 \text{ 的相对误差 } E_{a_1} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{r^2} - 1\right)}{n-2}},$$

$$a_1 \text{ 的绝对误差 } \Delta a_1 = E_{a_1} \cdot a_1,$$

$$a_0 \text{ 的绝对误差 } \Delta a_0 = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n}} \cdot \Delta a_1,$$

$$a_0 \text{ 的相对误差 } E_{a_0} = \Delta a_0 / a_0.$$

用线性回归得出的 a_0 和 a_1 ，可以根据它们的误差 Δa_0 和 Δa_1 来确定它们的有效位数。 a_0 、 a_1 的最低位应该分别和 Δa_0 、 Δa_1 的最高位相对应。例如某次计算结果以分别取成 $a_0=14.8$ ， $a_1=0.673$ 。

例 6 在测定电池的内阻和电动势的实验中，得到如下一组数据

$I(\text{A})$	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
$U(\text{V})$	1.39	1.33	1.25	1.21	1.13	1.07	1.03	0.95	0.89	0.85

解：

(1) 求 a_0 和 a_1 ：

$$s_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} = 1.2625 - \frac{10.5625}{10.0000} = 0.2062,$$

$$s_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} = 12.6274 - \frac{123.21}{10.0000} = 0.3064,$$

$$s_{xy} = \sum (x_i \cdot y_i) - \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i}{n} = 3.3565 - \frac{3.25 \times 11.1}{10.0} = -0.2510.$$

$$a_1 = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} = \frac{-0.2510}{0.2062} = -1.2173,$$

$$a_0 = \frac{\sum y_i}{n} - a_1 \cdot \frac{\sum x_i}{n} = \frac{11.1}{10.1} + 1.2173 \times \frac{3.25}{10.0} = 1.5056。$$

(2) 求相关系数 r 及 a_0 、 a_1 的误差

$$r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx} \cdot s_{yy}}} = \frac{-0.2510}{\sqrt{0.2062 \times 0.3064}} = 0.9985,$$

$$Ea_1 = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{r^2} - 1\right)}{n-2}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{0.9985^2}{10-2} - 1}} = 0.02,$$

$$\Delta a_1 = |E_{a_1} \times a_1| = |0.02 \times (-1.2173)| = 0.03,$$

$$\Delta a_0 = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n}} \times \Delta a_1 = \sqrt{\frac{1.2625}{10}} \times 0.03 = 0.01。$$

(3) 根据计算，可有以下结论

U 和 I 的相关系数为 $0.9985 > 0.765$ ，因此是线性相关，说明实验数据用一次函数来表达是合适的。

因为 $a_0 = 0.01$ ， $a_1 = 0.03$ ，所以 $a_0 = 1.51 \pm 0.01$ ， $a_1 = -1.22 \pm 0.03$ 。

根据公式 $U = -I \cdot r$ ，可知电动势 $\varepsilon = a_0 = 1.51 \pm 0.01$ 伏，内阻 $r = -a_1 = 1.22 \pm 0.03$ 欧。

以上介绍了四种确定经验公式中的常数的方法，其中以线性回归为最好。虽然线性回归的计算过程看起来比较复杂，但是在计算器使用日益普及的今天，让计算器来完成这样的工作是很方便的，

以 CASIO SUPER-FX 系列计算器 ($f_x-100D, f_x-115D, f_x-570AD, f_x-570CD, f_x-991D$) 为例，说明线性回归的做法：

(1) 按 $\boxed{\text{MODE}}$ $\boxed{2}$ ，使计算器进入线性回归工作状态，显示屏上方显示 LR 字样 (LLINEAR)。

(2) 按 $\boxed{\text{SHIFT}}$ $\boxed{\text{KAC}}$ 键后，可开始输入数据。输入 x_1 ，按 $\boxed{X_0Y_0}$ 键，再输入 y_1 ，最后按 $\boxed{\text{DATA}}$ 键，这样便完成了输入一组数据。用同样的方法输完所有数据。

(3) 按 $\boxed{\text{SHIFT}}$ \boxed{A} ，屏幕显示截距 b ；

按 $\boxed{\text{SHIFT}}$ \boxed{B} ，屏幕显示斜率 k ；

按 $\boxed{\text{SHIFT}}$ \boxed{r} ，屏幕显示相关系数 r 。

四 实验数据的内插和外推

(一) 内插法

通常一组实验数据中的各个数据点之间总是有相当大的间距的，而在实际应用中常需要知道实验中未测量出的中间数据。内插的方法就是解决怎样由一些已知数据求出它们中间的数据。本书介绍两种常用的内插法：图解法和方程法。

1. 图解法

图解法的步骤：

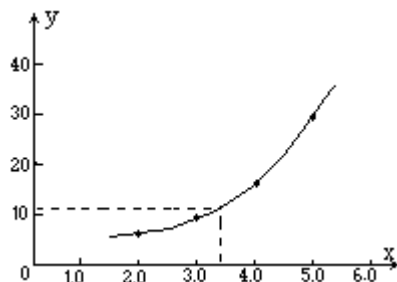
(1) 在一组数据中选择一些比较靠近内插点的数据点画在坐标纸上，并拟合出最佳曲线。

(2) 在曲线上读出内插点的函数值。

x	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
y	2.01	2.69	4.62	8.92	16.7	29.4	48.4	73.7

例 1 根据上表的实验数据，确定当 $x=3.40$ 时的 y 值。

解：选择 $(2.00, 4.62)$ 、 $(3.00, 8.92)$ 、 $(4.00, 16.7)$ 、 $(5.00, 29.4)$ 四个点作图。从图上可以看出，当 $x=3.40$ 时， $y=11.5$ 。



2. 方程法

方程法是先找出一个适合于部分数据点的公式 $y=f(x)$ ，然后将内插点的 x 值代入这个公式，求出内插值 y 。方程法步骤：

(1) 确定方程形式。在一般情况下，方程都可以选成幂级数形式

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2+\dots,$$

在内插范围不太大的情况下，上式一般只要取三项即可。

(2) 确定公式中的常数 a_0 、 a_1 、 a_2 。在内插点附近找三个数据点，将它们的值代入上式，即可确定 a_0 、 a_1 、 a_2 。

(3) 将内插点的 x 值代入方程，求出内插值 y 。

例 2 用方程法求上例的内插值。

(1) 选取方程的形式为

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2。$$

(2) 取 $(2.00, 4.62)$ 、 $(3.00, 8.92)$ 、 $(4.00, 16.7)$ 三点的数据代入方程

$$\begin{cases} 4.62 = a_0 + 2a_1 + 4a_2 \\ 8.92 = a_0 + 3a_1 + 9a_2 \\ 16.7 = a_0 + 4a_1 + 16a_2 \end{cases}$$

解得 $a_0=6.54, a_1=-4.40, a_2=1.74,$

因此方程是 $y=6.54-4.40x+1.74x^2$ 。

(3)将 $x=3.40$ 代入方程，得

$$y=6.54-4.40 \times 3.40+1.74 \times 3.40^2=11.7。$$

(二) 外推法

在有限的实验条件下，只能在一定的范围内取得一系列实验数据，而有时需要研究的实验数据在这个范围之外。要获得这样的数据，可用外推法。所谓外推，就是根据已有的实验数据，去设法获得一些原来实验范围之外的数据，这样可以拓宽实验结果的意义。本书介绍两种常用的外推法：图线法和公式法。

1. 图线法

先根据实验中获得的数据作出图线，然后根据图线的发展趋势，将其外延到需要的区域，这就是图线外推法。由于直线的发展趋势最明确，因此一般尽量用直线外推。如果原来的物理关系不是线性的，则可以先进行“化直”。

例1 落球法测定液体的粘滞系数。

根据斯托克斯公式，在无限深广的液体中，如果小球的半径 r 和小球的速度 v 都比较小，那么液体对小球的粘滞阻力

$$f=6\pi\eta\cdot v\cdot r。$$

式中 η 叫做液体的粘滞系数，它表征液体粘滞性的强弱。小球在液体中下落时，它在竖直方向上受到三个力：小球的重力 mg (m 是小球的质量)、液体对小球的浮力 $\rho_{液}gV$ (V 是小球的体积、 $\rho_{液}$ 是液体的密度) 和粘滞阻力 (其方向与小球运动方向相反)。当小球匀速下落时，上述三个力平衡，即

$$mg=\rho_{液}\cdot gV+6\pi\eta\cdot v\cdot r。$$

可得

$$\eta=\frac{(m-V\rho_{液})\cdot g}{6\pi\cdot v\cdot r}$$

只要在实验中测量出 m 、 V 、 $\rho_{液}$ 、 v 、 r 等量，就可以算出液体的粘滞系数。

斯托克斯公式只适用于在无限深广的液体中运动的球，但实验却不可能在这样一种理想的环境中进行。一般是用一只直径有限的量筒装满液体，让小球在量筒中降落，因此实验结果存在一定误差。

实验中分别用直径 d 不同的几种小球在同一个量筒中做实验。从测量结果可以看出，对不同直径的小球，由上式求出的 η 是不一样的。这就是因为容器壁对不同直径的小球产生的影响是不一样的。(如果是在无限深广的理想状态的液体中做实验，不论小球直径如何，测量出来的 η 都是一样的。)小球的直径越小，器壁对它的影响也就越小。当小球的直径趋向零时，量筒中的液体相对小球来说，也就成了“无限深广”的流体了。此时测量出来的 η 才是准确的。尽管直径趋向零的小球是无法找到的，但外推的方法却可以帮助我们“实现”这种理想的状况。

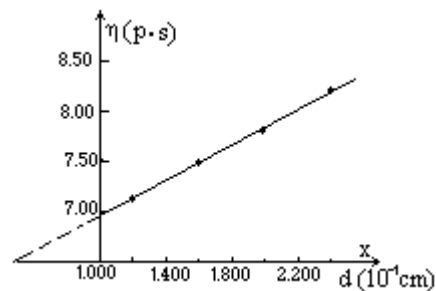
理论推导可以证明，在不考虑量筒的深度对落球的影响时，

$$\eta = \eta_0 \left(1 + 2.4 \frac{d}{D} \right)$$

其中 d 是落球的直径, D 是量筒的直径, η_0 是液体的真实粘滞系数, 是用落球法测量得到的粘滞系数。从上式可看出 η 和 d 成线性关系, 因此可以用 η - d 图线进行直线外推。当 $d=0$ 时, 可得到液体真实的粘滞系数 η_0 。

下表是在实验中换用直径不同的小球测得的粘滞系数

$d(\text{cm})$	1.73×10^{-1}	1.558×10^{-1}	1.977×10^{-1}	2.362×10^{-1}
$(\text{p} \cdot \text{s})$	7.62×10^{-1}	7.99×10^{-1}	8.37×10^{-1}	8.76×10^{-1}



作 η - d 图, 用图解的方法可以求出图线的截距是 0.652 帕·秒。此值就是当 $d=0$ 时的 η 值。

2. 公式法

根据原有的实验数据, 确定经验公式, 然后应用经验公式, 求出原来实验范围之外的数据, 这样的方法叫公式法。

例 2 用公式法求上例的结果。

解: 用最小二乘法求出直线方程。

$$s_{xx} = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} = 0.1329 - \frac{0.7070^2}{4.000} = 0.007938,$$

$$s_{yy} = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} = 2.687 - \frac{3.274^2}{4.000} = 0.007231,$$

$$s_{xy} = \sum (x \cdot y) - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n} = 0.58625 - \frac{0.7070^2 \times 3.274}{4.000} = 0.007573.$$

$$a_1 = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} = \frac{0.007573}{0.007938} = 0.9540,$$

$$a_0 = \frac{\sum y}{n} - a_1 \cdot \frac{\sum x}{n} = \frac{3.274}{4.000} - 0.9540 \times \frac{0.7070}{4.000} = 0.650(\text{帕} \cdot \text{秒}).$$

截距 a_0 的值就是当 $d=0$ 时的 η 值。

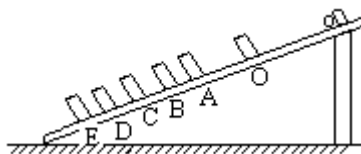
$$\text{相关系数 } r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx} \cdot s_{yy}}} = \frac{0.007573}{\sqrt{0.007938 \times 0.007231}} = 0.9996,$$

r 大于线性关系显著的标准是 0.990, 说明用直线来拟合是合适的。

将实验数据进行外推时, 要注意一个重要的问题。读者对函数的整

个外推区间内的情况要心中有数。要知道两个变量在外推区间中确实成线性关系（或者其他关系）时，才能用线性外推（或者曲线外推）。下面用一个例子来说明这个问题。

例3 为了测定小球滚到斜板上O点时的瞬时速度，在斜板上设置了六个光电门。让小球多次从斜板上滚下，毫秒计测出小球从O点滚到A、B、C、D、E各点的时间 $t_A t_B t_C t_D t_E$ 。



本实验用线性外推法处理实验数据，有两种方法。

(1)用 $\bar{v} \sim \Delta s$ 相关，求出 $\Delta s \rightarrow 0$ 时的速度就是O点的瞬时速度 $v_0(s)$ ；

(2)用 $\bar{v} \sim \Delta t$ 相关，求出 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的速度就是O点的瞬时速度 $v_0(t)$ 。

实验中测得的数据如下：

范围	OA	OB	OC	OD	OE
位移 $s(m)$	0.6000	0.7000	0.8000	0.9000	1.0000
时间 $t(s)$	0.5637	0.6232	0.6789	0.7311	0.7806
平均速度 $\bar{v}(m/s)$	1.064	1.123	1.179	1.231	1.281

(1)用线性回归作 $\bar{v} \sim \Delta s$ 相关，当 $\Delta s \rightarrow 0$ 时，

$$v_0(s) = 0.742 \text{ 米/秒},$$

相关系数 $r(s) = 0.9993$ ；

(2)用线性回归作 $\bar{v} \sim \Delta t$ 相关，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，

$$v_0(t) = 0.500 \text{ 米/秒},$$

相关系数 $r(t) = 0.9999$ 。

用上述两种处理方法得到的瞬时速度值 $v_0(s) = 0.742$ 米/秒和 $v_0(t) = 0.500$ 米/秒。两个数值差得较大，已超过实验的误差范围。这是因为

由运动学公式

$$s = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \cdot (\Delta t)^2,$$

等式两边都除 Δt ，有

$$\frac{s}{\Delta t} = v_0 + \frac{1}{2} a \cdot \Delta t,$$

则
$$\bar{v} = v_0 + \frac{1}{2} a \cdot \Delta t,$$

\bar{v} 与 Δt 成线性关系

$$\bar{v} - v_0 = \frac{1}{2} a \cdot \Delta t,$$

等式两边乘 \bar{v} ,有

$$\bar{v}(\bar{v} - v_0) = \frac{1}{2} a \cdot \Delta s。$$

\bar{v} 与 Δs 成非线性关系。由此可见,以 $\bar{v} \sim \Delta s$ 作线性外推是不恰当的。

它们的相关系数 $r(t)$ 和 $r(s)$ 却相差不多,而且都超过线性关系显著的标准($r > 0.959$)。这说明单以几个数据点来看它们的线性程度是不行的。因为在测量范围以外函数的图象有可能发生弯曲。所以必须在采用外推方法之前,先从理论上弄清楚函数的形式。

一 长度的测量

(一) 长度和它的单位

测量的实质是比较。单位、测量工具和测量方法是测量的基本要素。

1. 从“布手知尺”说起

人类在长度测量中，最早是用身体的某一部分作为标准的。传说夏禹治水时，用自己的身高作为一丈，“男子汉，大丈夫”的说法据说就由此而来。

古代中国，用手作长度的标准，“布手知尺”即是例证。古埃及和中国一样也是用手为尺的，古埃及人将人的肘部到中指指尖的长度定为一“腕尺”。埃及的胡夫金字塔，底为正方形。其底边长曾用古埃及王胡夫的腕尺测量，恰为 500 腕尺。

英国人则是手脚并用的，英文 foot 一词，脚与呎同字，这是用脚为尺的佐证。而在公元九世纪时英王亨利一世将手臂平伸，从他的鼻尖到指尖距离规定为一“码”，这则是以手为尺的明证。

不管是用手还是用脚为标准，都有极大的主观随意性。

我国是较早使用测量工具测量的国家之一。

远在商代，就有了制作较精细的象牙尺。现存两支，一支藏在中国历史博物馆，长为现在的 15.78cm，一支藏在上海博物馆，长为现在的 15.80cm。尺上都刻 10 寸，每寸内刻有 10 分。从这两支尺的长约为 16 厘米看，这是人手的一般长度，这一事实可以看出，它所使用的标准仍未脱离人体主观标准的范畴。春秋战国时期，天下纷争，度量衡也不统一，直到秦始皇兼并六国统一天下，才统一了度量衡。秦制规定长度单位为引、丈、尺、寸、分，均为十进位。这种长度单位的 1 尺约为现在的 23.2 厘米，沿用了两千年。

在 18 世纪法国大革命以前，世界各国的长度标准极为混乱，比如我国是市尺，日本用日尺，英国用英尺，俄国用俄尺。其长度不一致，进位制也不统一，有十进位、十二进位，还有五进位的，各行其是。这在国际经济、技术交往中，极为不便，随着科学技术的发展，交通运输工具的进步，国际交往变得日益频繁，亟城破国际间长度测量标准上的诸侯割据的局面。

在 18 世纪法国大革命以后，长度测量的客观标准是“米”。在这以后的两百年中，出现了各种各样的测量长度的仪器和各种各样的测量方法，测量范围越来越广，精度也越来越高。目前，最先进的是激光测长，精度可达 10^{-9} 米数量级。

2. “米”的三次定义

现行的计量单位制是米制。米制是 18 世纪末由法国人创立的，它以经过巴黎的地球子午线的四千万分之一作为长度单位，定名为“米”，并规定为十进位制。这个标准在当时是科学的。法国政府还在 1872 年和 1875 年召开了“国际米制公约”，目前已有近 50 个国家参加，我国是 1977 年 5 月 20 日参加该公约的。

1889年，在第一次国际计量大会上，决定正式采用“米”为长度单位。1927年第七届国际计量大会又严格确定了米的定义：“长度单位是米。它规定为国际计量局保存的铂铱尺上所刻的两条中间刻线的轴线在0时的距离”。这可以说是真正具有国际意义的长度单位的第一个定义。

现存巴黎国际计量局的铂铱尺叫做国际米原器，它是用含10%铱的铂铱合金制成，横截面是“X”形，全长1.02米，在距两端各1厘米处刻有一条极细的横线，在0时两横线中间的距离是1米。由于横线太细，寻找起来极为不便，于是在它们的外侧又刻有两道粗纹以便于寻找。各国计量局里保存的是它的复制品，复制品的复制品则存在各国的地方计量局里，并定期核定，这样一级一级地传递下去，这个标准就遍布了世界各地，全世界就有了一个统一的长度标准。

国际米原器作为米的主标准延用了七十一年之久，它的相对精度达到千万分之一，即一米的测量精度为 $0.1\mu\text{m}$ 左右。这个精度到了本世纪中叶已严重影响了自然科学的发展，不能满足精密机械制造的需要，后来又发现铂铱米尺本身的长度比相应的子午线的四千万分之一长了 0.23mm ，因此摒弃这一实物尺寸的长度基准势在必行。用什么做新的标准呢？科学家们注意到可见光波的波长这一自然基准。

1960年，在第十一届国际计量大会上，决定废除1889年生效的、1927年确定的“米”的定义，改为“米等于氪—86原子的 $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的光波的 1650763.73 个波长的长度”，这是米的第二次定义。

这一定义将一米的精度提高到了十亿分之四($4 \times 10^{-9}\text{m}$)，它意味着在长为5厘米的固体物质中不差一个原子间的距离或者一千公里的长度测量中误差不超过4毫米。这次定义的意义不仅在于将精度提高了两个数量级，而且还在于用自然基准代替了实物基准。

米的第三次定义是在1983年第十七届国际计量大会上做出的：“米是光在真空中在 $\frac{1}{29979258}$ 秒的时间间隔内运行的路程的长度”。这个米的新标准中仍保持了原来的9位有效数字，但准确度却提高了十倍以上。

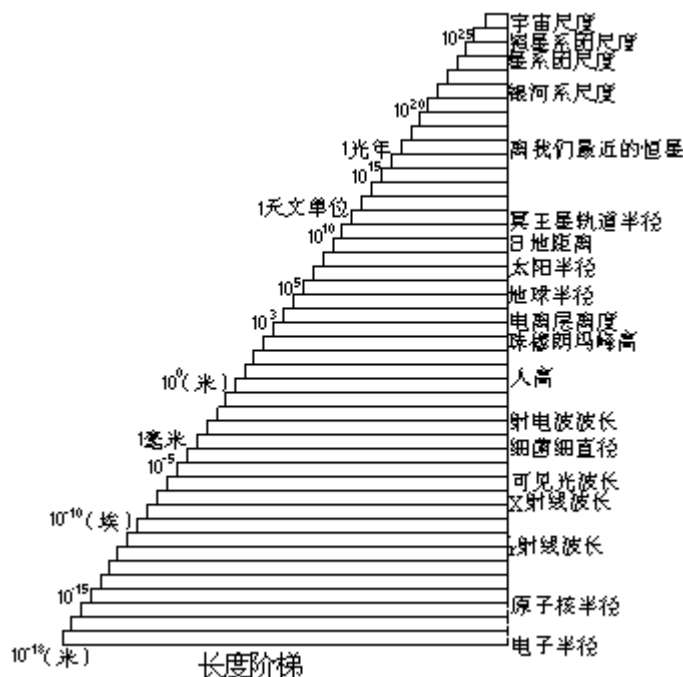
米定义的每一次变革，都是社会生产力和科学技术发展的必然结果，都比原来的更优越，精度更高。但米定义的变化并不影响米的实际长度，这就保证了它的延续性。

3. 长度阶梯 (10^{-18}m — 10^{26}m)

宇宙万物，大小千差万别。

往小处看，人体内的红血球细胞直径只有人身长的十万分之一，即 10^{-5}m 量级；组成细胞的原子、分子半径为 10^{-10}m 量级；原子核半径为 10^{-15}m 量级。这三个量级很有规律，都是相差十万倍。微观世界中最小的大概要算电子，尽管电子的真实大小尚未测出，但人们确信其大小不会超过 10^{-18}m 量级。

长度阶梯图



往大处看，地球的半径在 10^6m 量级；日地距离称为一天文单位，为 10^{11}m 量级；光在一年内走过的路程叫光年，在 10^{16}m 量级；银河系的尺度是 10^5 光年，在 10^{21}m 量级，即光从银河系的一端传播到另一端要十万年。现代天文学估计，宇宙的大小，在 10^{26}m 量级，以十倍为一个级差，从最小的电子到宇宙相差 10^{44} 量级，相差亿亿亿亿万倍，上页的图是把它从小到大排成一个以 10 倍为一个级差的阶梯。

(二) 测量长度的一般方法

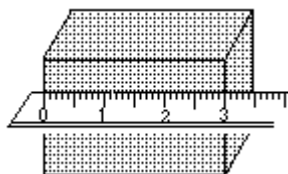
1. 用米尺测量长度

以米制标示分度的尺子叫米尺。米尺的分度值为 1 毫米，量程不等。常用的有木直尺、钢板尺和钢卷尺。米尺也常用作仪器的附属标尺。

在用米尺测量时，可以精确到毫米量级，读数到十分之一毫米。如： $L_1=15.37$ 厘米， $L_2=7.85$ 厘米，最后的一位 7 和 5 是估读的。

(1) 用米尺测长度的注意事项

将米尺侧立，尽量使米尺的刻度线紧贴被测物体（满足阿贝原则），阿贝原则可参阅（《长度计量》中国计量出版社 1986 年 6 第 1 版第 157 页）。这样做还可以避免视差，如图。



如尺的端面易磨损，应以尺上的某一刻度线为测量起点，以减小误差。

如要求较高精度，需进行多次测量时，应考虑到米尺刻度的不均匀性，可用米尺的不同部位进行测量后，再取平均值。

(2) 温度误差的消除方法

由温度引起的测量误差叫温度误差。这个误差对米尺测长影响较大，它的产生主要有两个原因：

被测物体与米尺的温度不同。

被测物体与米尺的线膨胀系数不同。

温度误差的计算公式 $L=L_0[a_2(t_2-20) - a_1(t_1-20)]$ 。式中： L 为被测长度； a_1 、 t_1 分别为米尺的线膨胀系数和温度； a_2 、 t_2 分别为被测物体的线膨胀系数和温度。式中出现 20，是因为我国规定以 20 为标准温度。

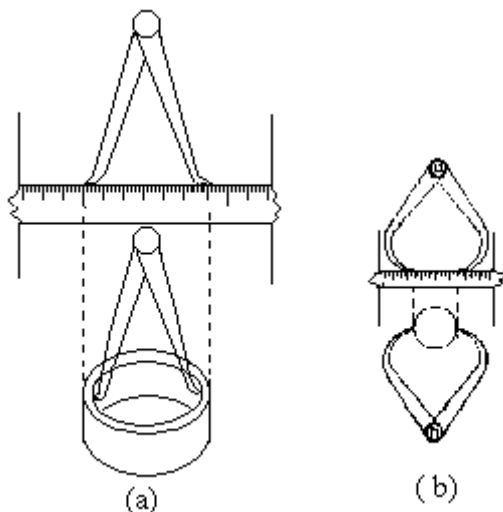
从温度误差公式可见，产生误差有两个原因，因此减小误差也可以从两个方面努力。首先是选用跟被测物线胀系数尽可能相一致的米尺，若 $a_1=a_2=a$ 则 $L=L_0 \cdot a \cdot (t_2-t_1)$ 。如果再将米尺和被测物置于同一温度环境下 ($t_1=t_2$)，则 $L=0$ 。这就是一般高精度测量都要求在恒温条件下进行的原因。

2. 用卡钳测量内、外径

卡钳是测量长度的辅助工具，它的测量精度取决于用作比较的直尺，所以也在 10^{-3}m 量级。

(1) 内、外径的测量方法

用内卡钳测内径如图(a)，用外卡钳测外径如图(b)。



测量时先将两卡脚张开。用内卡钳测内径，开口要比被测部分略小些；用外卡钳测外径，开口要比被测部分略大些。轻轻磕击其中一个卡脚，使开口微微张大（或缩小），直至两卡脚同时贴紧被测部位为止。再用直尺量出两卡脚的距离，即得被测部分的直径。

(2) 内、外径的判断

用卡钳量内、外径时，由于操作错误，量得的内、外径比实际值偏小一点，这是因为测量者错误地把弦长当作直径的缘故。

在用内卡钳量内径时，可绕一个卡脚轻轻转动另一卡脚，若出现空

隙或松动，说明量的不是直径，要略略张开卡脚，重新测量。

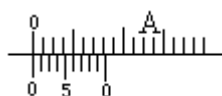
在用外卡钳量外径时，可沿图(b)中上下方向、前后方向移动卡钳，若感觉阻力较大，说明量的也是弦长而不是直径，应适当放大卡脚开口，直至只有直径处卡紧，其余地方都感觉松动为止。

3. 用游标卡尺测量长度

在一段米尺上附加一段能够沿米尺基准轴线方向滑动的小尺，就可以准确地读出1毫米的若干分之一（例如十分之一，二十分之一或五十分之一）。

这段滑动的小尺就是游标。带游标的尺很多，最常用的是游标卡尺。游标也可装在仪器上。除了长度游标外还有角游标。

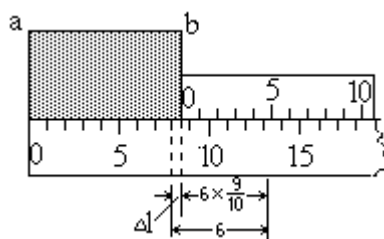
(1) 游标原理和用游标尺测量长度的方法



使测量精确到1/10分格的游标称为10分游标，如图所示。游标V是可沿主尺A滑动的一段小尺（称为游标尺），其上只有10个分格，是将主尺的9个分格10等分而成，因此游标上的一个分格的间隔等于主尺一分格的9/10。

右图是使用这个游标进行测量的示意图。测量时将被测物体ab的a端和主尺的零线对齐，若另一端b在主尺的第7第8分格之间，显然，物体的长度比主尺的7格大L。现将游标的零线与被测物的末端b相接，查出游标的第6条线与主尺的一条线对齐，则

$$\Delta L = 6 - 6 \times \frac{9}{10} = 6 \times \frac{1}{10} = 0.6 \text{ 主尺格，即物体长度为 } 7.6 \text{ 主尺格。}$$



从图上可以看出，游标是利用主尺和游标上每一分隔之差，达到提高测量精度的目的，此种读数法称为差示法，在测量中有普遍意义。

一般地说，游标将主尺的(n-1)个分格分成为n等分，称为n分游标。如主尺的一分格宽为x，则游标的一分格宽为 $\frac{n-1}{n}x$ ，两者的差 $\Delta x = \frac{x}{n}$ 叫游标精度。测量时，如果是游标的第K条线与主尺上某一刻度对齐，则所对应的L值为 $\Delta L = Kx - K \cdot \frac{n-1}{n}x = K \cdot \frac{x}{n}$ 即 $\Delta L = K\Delta x$ ，所以使用游标时，先要明确其游标精度。

要提高精度，可以制造等分n较大的游标。但n过大时，主尺和游标一分格间的差值又会过小，在实测中，反而分不清到度是游标上哪条

刻线与主尺刻线对齐,读起数来非常困难。所以一般实用的游标 n 为 10, 20, 50, 其游标精度分别为 0.1mm, 0.05mm 和 0.02mm。

(2) 读数方法

使用游标测量是时, 读数方法如下:

从游标零线的位置读出主尺格数, 记为 $l_{\text{主}}$;

根据游标与主尺对齐的刻线读出不足一分格的小数, 记为 l , ($l = K \cdot x$), 两者之和为测量值 $l_{\text{测}}$,

$$l_{\text{测}} = l_{\text{主}} + l。$$

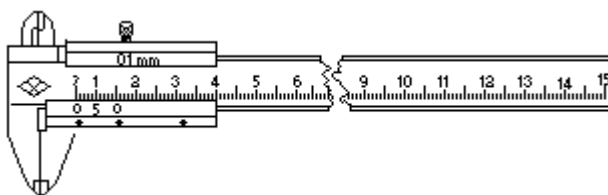
用游标读数, 可能出现游标的任一条线都不与主尺的某一刻度线相重合的情况。这时, 我们可以认定一对最相近的线作为二者重合, 这样最多只有半个分度的估计误差 (对十分游标尺 $x' = 0.05\text{mm}$)。根据仪器读数的有效数字规定, 读数最后一位应读数误差所在的一位, 因此, 若实例 $l_{\text{测}} = 7.6\text{mm}$, 用误差表示时也可写成

$$l_{\text{测}} = 7.60 \pm 0.05\text{mm} = 0.760 \pm 0.005\text{cm}。$$

(3) 游标尺的正确使用及注意事项

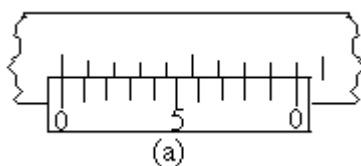
游标卡尺如图所示, 用它可以测量物体的长度和内、外直径。

测长度或外径时, 将物体卡在外卡脚之间, 测内径时, 使用内卡脚。不测量时, 应将卡脚闭合, 游标的零线这时与主尺零线是对齐的。

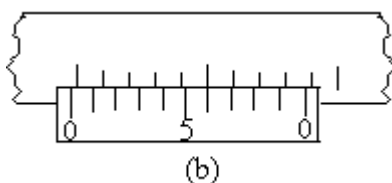


在测量前, 先将游标卡尺的卡脚靠拢, 检查主尺零刻线与游标尺的零刻线是否重合。可能出现以下三种情况:

① 游标尺的零刻线与主尺的零刻线重合, 无零误差。

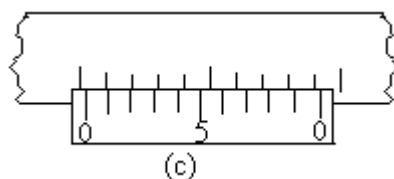


② 游标尺的零刻线位于主尺的零刻线左侧, 零误差为正, 应加在测出数值中。



③ 游标尺的零刻线位于主尺的零刻线右侧, 零误差为负, 应在测出

数值中减去。



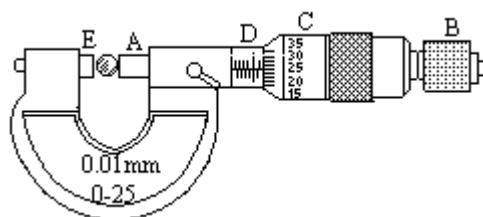
测量时，若用外卡脚，应使外卡脚间距略大于被测尺寸，若用内卡脚，应使内卡脚间距略小于被测尺寸，然后缓缓使卡脚与被测面贴合。读数时应使视线与尺垂直，避免产生视差。

不能用卡尺进行动态测量，防止撞击。

4. 用螺旋测微器测量长度

(1) 螺旋测微器原理和使用方法

将主尺刻度刻在一个圆柱体的母线上，而将游标尺刻在一个圆筒一端的圆周上。柱和筒（称微分筒）用螺旋吻合。如螺距为 x ，每转一周，圆筒将进（或退）一个螺距 x ，如转 $1/n$ 周，则移动 x/n 。因此借助螺旋的角位移可对直线位移进行精密测量。常用的螺旋测微器量程为 25mm ，准确度为 0.01mm ，即千分之一 cm ，所以又称千分尺。



螺旋测微器如图所示，图中 A 为测杆，它的一部分加工成螺距为 0.5mm 的螺纹，当它的固定套管 D 的螺套内转动时，会前进或后退。而 A 又是与 D 外面的活动套筒 C 连成一体，C 的周边等分为 50 个分格（C 即微分筒）。螺杆旋转的整数由固定套管 D 上间隔为 0.5mm 的刻线显示，不足一圈的部分由活动套筒 C 的周边的刻线显示。

螺旋测微器的使用方法很简单，只要将被测物夹在测杆 A 和砧台 E 之间，拧动尾端的棘轮装置 B，使测杆移动，当测杆与被测物接触后压力达到某一数值时，棘轮将滑动而发生咔、咔的响声，活动套筒不再转动，测杆也停止前进，这时就可以读数了。

(2) 读数方法

从固定套管 D 上的标尺（每格 0.500mm ）（即螺距为 $x=0.500\text{mm}$ ）上，用微分筒 C 的前沿作为读数准线，找出整格数 n_1 ，得 $l_{\pm} = n_1 \times 0.500\text{mm}$ ；

从固定套管上的横线所对活动套筒上的分格数 n_2 ，读出不到一圈的小数，若活动套筒的线为 n 条等分线（比如 50 格），则得

$$\Delta l = n_2 \times \frac{x}{n} = n_2 \times \frac{0.500}{50} = 0.010n_2(\text{mm})；$$

两者相加即为被测物的长度

$$l_{\text{测}} = l_{\text{主}} + \Delta l = n_1 x + n_2 \frac{x}{n} = [0.500n_1 + 0.010n_2] \text{mm},$$

再算上 n_2 的估读的一位，即可读到 0.001mm，读数为

$$l_{\text{测}} = 0.500n_1 + 0.010n_2 + 0.001 \times \text{估读值}.$$

其中 n_2 在估读时，若是 3/10 格，则应取估读值为 3。

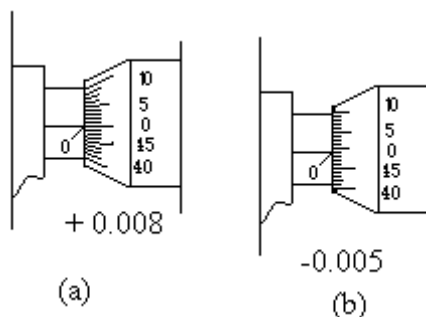
零点修正。在用螺旋测微器测长时，如遇上零点不准的情况，需要进行零点修正。

测量前要记下零点读数，做法和测量时一样轻轻地转动棘轮，让测杆 A 与砧台 E 接触，当听到一、二声咔、咔声即停，此时的读数即为零点读数。

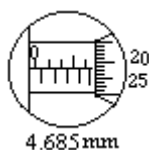
若零点读数记为 l_0 ，测量读数为 $l_{\text{测}}$ ，则被测物的实际长度 $l_{\text{实}}$ 为：

$$l_{\text{实}} = l_{\text{测}} - l_0$$

l_0 可正可负。如图(a)微分筒的零线未到固定套管上的横线，此时的读数为 0.008mm，相当于在测量前砧台和测杆间已夹入了长 0.008mm 的物体，所得 $l_{\text{测}}$ 比 $l_{\text{实}}$ 大了 0.008mm，这时 l_0 为 +0.008mm，应取正值。反之如图(b)，则 l_0 取负值。



下面举一例说明读数方法：



在图中： $n_1=9$ （若错误地只数上排即为 8），

$n_2=18$ ，估读值为 5。

$$\begin{aligned} \text{所以 } l_{\text{测}} &= [0.500 \times n_1 + 0.010 \times n_2 + 0.001 \times \text{估读数}] \text{mm} \\ &= [0.500 \times 9 + 0.10 \times 18 + 0.001 \times 5] \text{mm} \\ &= [4.500 + 0.180 + 0.005] \text{mm} \\ &= 4.685 \text{mm}. \end{aligned}$$

如果零点读数 $l_0=0.012\text{mm}$ ，则

$$l_{\text{实}} = l_{\text{测}} - l_0 = 4.685 \text{mm} - 0.012 \text{mm} = 4.673 \text{mm}$$

(3) 螺旋测微器的正确使用及注意事项

零位调整

测量前，可先校对螺旋测微器的零位。校对时应使两测量面接触，若零位不准可使用专用扳手，插入固定套管小孔，扳转固定套管，使其纵刻线与微分筒上零线对准。（也可不进行调整而在读数时进行零点修正）

使用时不能直接手持活动套筒去卡被测物体，特别当测杆 A 和砧台 E 快要夹紧被测物时，避免被测物受到压力过大而发生明显形变。否则会加快螺纹的变形和磨损，降低仪器的准确度。

螺旋测微器的测量轴的中心线要与被测物的被测长度方向相一致，不要歪斜。

要注意防止读错整圈数。在固定套筒上表示整圈数的刻线有上下交错的两排，每排相邻的两条刻线之间相差两圈，上、下两排间的两条刻线之间是一圈。如上例中 n_1 应为 9，常有人会错误地读成 8。

调节测杆时要慢慢转动微分筒和棘轮装置，不要握住微分筒挥动或摇动尺架，以免精密的测微螺杆变形。

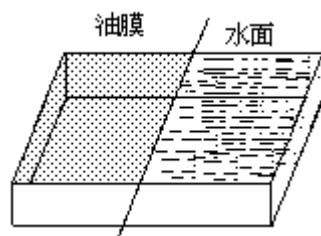
一般不能进行动态测量。（在某些场合，待测物体运动得较慢，测量者的测试技术不仅熟练而且动作迅速敏捷、从事快速测量有足够丰富的经验，那么用螺旋测微器作动态测量也是可以的。）

（三）测量长度的特殊方法

1. 用单分子膜法测分子直径

分子、原子的直径在 10^{-9} — 10^{-10} m 量级。体积 V 的单分子油膜，其面积若为 S ，则分子直径 $d=V/S$ 。

(1) 用单分子油膜测量油分子直径



取一个扁平的长矩形容器，盛满水，在容器的一端横放一根金属丝，使与水面接触。将一小滴油滴入该端，油就会布满这一端的整个水面。这时将金属丝向另一端缓慢地拉动，油层就会越来越薄，如图。在拉动过程中，由于光的干涉作用，我们会发现油膜的颜色按可见光谱的排列由红到紫地变化，出现紫色时，说明膜的厚度已近紫光波长，再使油层延伸下去颜色就会消失，但油面较水面为暗，仍能分辨，这时油膜的厚度已十分接近单个分子的厚度，再小心地拉动直至破裂，记下此时金属丝的位置，就可算出油膜的面积了。这种测量方法，肯定有误差，只要数量级符合就可认为测量正确了。

(2) 用单分子油酸膜测量油酸的直径

油酸，学名“十八烯—[9]—酸”，化学式为 $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ ，分子量 282 个原子质量单位，密度为 0.89 克/厘米³，其分子直

径的理论值为 8.75×10^{-8} 厘米。

一滴纯油酸可以在水面形成几个平方米和薄膜，不便测量。为此，可先配制 $1/400$ 的油酸酒精溶液，然后用 2 毫升注射器，安上 $4\frac{1}{2}$ 号针头，取该溶液 1 毫升。将针头向下，缓缓推出溶液，使它一滴一滴滴下，可得约 150 滴，即 1 滴该溶液中的油酸体积 $V = \frac{1}{150} \times \frac{1}{400}$ 厘米³。将一滴此溶液加在长宽各约 20 厘米，深约 1 厘米的清水盘中央部分，让其自由扩展可得一圆形薄膜。然后，测得此圆形薄膜平均直径 D 约为 15.0 厘米，面积 $S = \frac{1}{4} \pi D^2$ ，忽略油酸分子间的空隙，因此油酸薄膜的厚度 d 即油酸分子的直径为：

$$\begin{aligned} d &= \frac{V}{S} = \frac{4V}{\pi D^2} = \frac{4 \times \frac{1}{150} \times \frac{1}{400}}{3.14 \times 15.0^2} \text{厘米} \\ &= 9.43 \times 10^{-8} \text{厘米} \end{aligned}$$

与理论值比较，有一定误差，但都是 10^{-10} 米数量级。

2. 用激光测月地距离

用激光测月地的距离，这个原理十分简单，记下从向月球发射激光到返回地面的时间 t ，则月地距离 $l = \frac{1}{2} ct$ (c 为光速)。

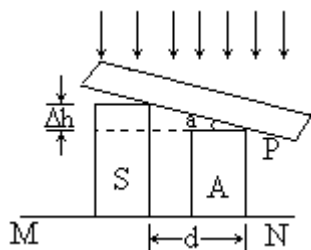
用光视差法测量月地距离准确度为 ± 3.2 公里；用脉冲雷达测量准确度可达 ± 1.1 公里；用 Q 开关红宝石激光脉冲测得的月地距离为 3.84401×10^8 米，准确度高达 ± 15 厘米。

这是因为激光脉冲的瞬时功率可高达 200 兆瓦，是其他器件难以企求的，激光方向性好，一束激光从地面射到月球上散开来不过一个足球场的面积，在阿波罗 11 号、14 号、15 号飞船登月后，先后在月球上不同的位置安置了成三角形的直角棱柱体的反射阵列，大大加强了回波讯号，月地距离的测量才达到如此高的精度。当然这个测量的难度是很大的，以 200 兆瓦功率计，每个激光脉冲有 10^{20} 个光子，经过大气的吸引、反射的损失，最后能收集到的只有 25 个光子。可见要不是“大大”加强月面反射的话，要达到如此高的准确度是不可能的。可以这样说，精确测量月地距离比起阿波罗登月本身毫不逊色的。

3. 用干涉法测量长度差

利用光的干涉测量长度差或长度的基本原理，是将待测的长度差或长度与一个空气膜的厚度联系起来，通过测定这个膜的等厚或等倾干涉，便可推知待测量的长度差或长度。

例如块规检测。如图所示。



在一标准平面 MN 上并排地放置标准块规 s 和待测块规 A，使它们与平面紧，并在它们上面放一块下表面 P 为标准平面的玻璃（平晶）。这样，平面 P 和 A、S 的上表面间就形成一楔形的空气膜。用单色光向下垂直照射，即可观察到气膜的等厚干涉条纹。若条纹间距为 a，由光

学知识可，a 等于半个波长，即 $a = \frac{\lambda}{2}$ ，若空气膜的楔角为 α ，则

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\lambda/2}{a} = \frac{\Delta h}{d}。$$

式中 h 表示 A、S 的长度差，d 为两块规间距离。

由上式可得长度差

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{d}{a}。$$

如用汞灯的绿光 ($\lambda = 5461 \text{ \AA}$)，测得 $\frac{d}{a} = 3.0$ ，则

$$\Delta h = 0.2731 \times 3.0 \mu\text{m} = 0.82 \mu\text{m}。$$

用这种方法可以测量小于微米级的长度差，即可精确到 10^{-7} 米数量级。

至于哪个块规长些呢？只需轻压平板玻璃靠近 A 的一端，若条纹间距变小，说明 α 变大了，就是 S 比 A 长；反之，若条纹间距变大，则是 A 比 S 长。

绝对长度的测量在技术上复杂一些，但同是利用光的干涉原理，所以其精确不会超过可见光波长的数量级。

二 质量的测量

(一) 质量和它的单位

1. 从“手捧为升”到电子秤

人们对质量这一概念的认识比长度和时间更晚，直到 18 世纪，才由牛顿最后确立了质量的概念。

古代，人们只能凭借感觉定量物体的多少，如以“手捧为升”量粮食。我国直到春秋战国时期，测量粮食的多少仍是用升、斗、合等来测量其容量，再逐步过渡到用石、钧、斤、两等测量其质量。

但是 测量质量的工具——天平的出现则可追溯到 7000 多年前的古埃及，那时古埃及就有了等臂天平，它配有石灰石琢成的砝码。我国的等臂天平出现在 2000 多年前的秦朝。1964 年 6 月在西安市郊秦始皇阿房宫遗址发掘出了一只秦代的生铁秤，当时叫秦石 (d4n) 权，重 301.35 牛，合为市斤 120.05 斤，正好跟秦代粮食每石规定重 120 市斤相等*，

由杠杆平衡原理可以推知，秦代的秤也是等臂天平。

经过数千年的发展演变，近代的天平要复杂得多，有底座、气泡水准仪、游码等，精度也大为提高，但其测量原理仍是沿用杠杆平衡原理，现代最精密的质量测量工具是电子天平，它的外形和工作原理与普通天平丝毫没有相似之处。其感量可达 $5 \times 10^{-11} \text{kg}$ ，相当于一个红血球的质量，但称量很小，只有 $2 \times 10^{-4} \text{kg}$ 。

2. 千克的两次定义

国际单位制中表示质量的基本单位是千克，符号是 kg，千克的现定义如下：千克是质量单位，等于国际千克原器的质量。

最初的质量单位“千克”是在 1791 年于法国做出的：1 立方分米纯水在最大密度时（4 时）的质量为 1“千克”，在这一定义下，质量与重量区别是不严格的。1799 年在法国根据这一定义制造了一个铂圆柱体砝码，作为当时的质量单位基准，保存在巴黎法国档案局，称为“档案千克”，它比定义值大 28mg。

因为 1791 年法国定义的“千克”牵涉到长度单位“米”，而当时用来定义“米”的地球子午线长度身有一定变化量，而它的准确计量也很困难。因此在 1878 年国际米制委员会制作了三个铂铱合金圆柱体砝码，KI、KII、KIII，并于 1880 年与“档案千克”比对，得出 KIII 与“档案千克”质量最接近，即以此为“国际千克原器”。在 1901 年第三届国际计量大会上澄清了质量与重量的概念后，明确地做出了现定义。因此现定的质量标准“国际千克原器”就是 1878 年制造的铂铱圆柱体砝码 KIII。其值准确到 1×10^{-9} 数量级。

3. 质量阶梯（从 $0-10^{50}$ 千克）

把物体的质量从小到大排成一个阶梯，如下图，在它的起点上站着一种特殊形式的物质，这就是光子。光子是一种基本粒子，它的静止质量为零。还有许多其他基本粒子，它们的质量均在阶梯的最初几级上，如中微子静止质量为 $6 \times 10^{35} \text{kg}$ ，电子质量为 $9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$ ，质子质量为 $1.66 \times 10^{-27} \text{kg}$ 。各种元素的原子核质量在 $10^{-27}-10^{-25} \text{kg}$ 之间，而大分子的质量则可大于 10^{-20}kg 。

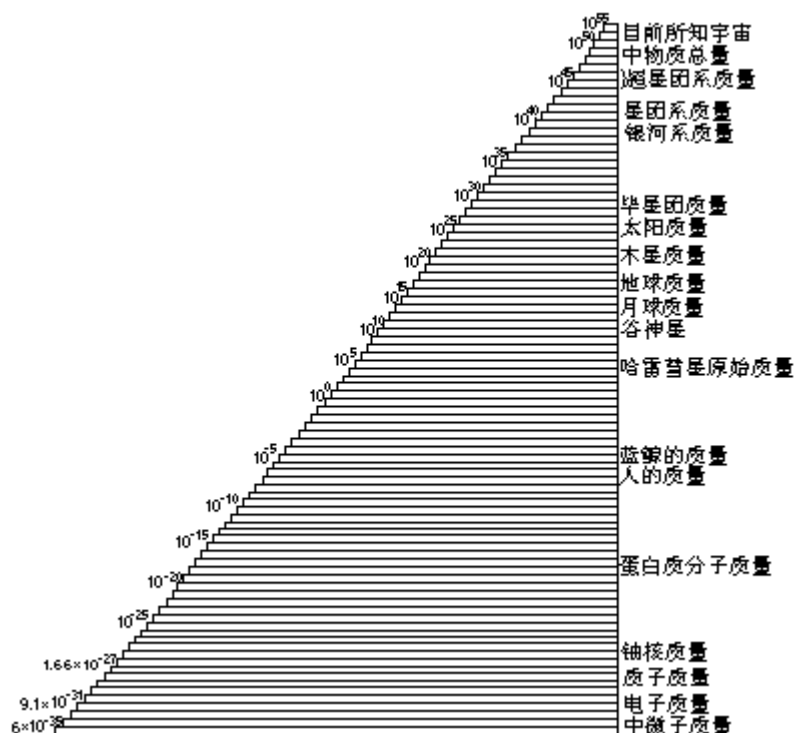
人的质量在质量阶梯的中层，为 10^0-10^2kg ，现代最大的动物蓝鲸，可达 10^5kg 。

质量天体的上层为各类天体所占据，地球的质量为 $5.98 \times 10^{24} \text{kg}$ ，太阳的质量为 $2.0 \times 10^{30} \text{kg}$ ，更上层的是星团，毕星团的质量约 10^{32}kg ，比星团大的是星系，其质量为 $2.0 \times 10^{30} \text{kg}$ ，更往上是星系团，而在质量阶梯的最上面，是目前所知宇宙中物质总量，约 10^{50}kg 以上。由于人类对宇宙的认识还极为有限，所以质量阶梯完全可

*秦代度量衡单位置值与现代米制单位比较为：1 尺=23.2 厘米，1 升=200 毫升，1 斤=256 克。

能还要升高。

质量梯图

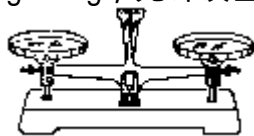


(二) 测量质量的一般方法

1. 用托盘天平称质量

天平有两个重要技术指标：称量表示最大测量值；感量为指针从平衡位置偏转到标尺 1 分度所需的最大质量。感量与灵敏度成反比，感量越小，灵敏度越高。

托盘天平灵敏度较低，有称量 1000.0g，感量 1g；称量 500.00g，感量 0.5g；称量 200.00g，感量 0.2g 等规格。托盘天平的结构如图。配用五等砝码，标称质量为 50mg-500g，允许误差为 $\pm 5\text{mg}$ - $\pm 120\text{mg}$ 。



(1) 横梁水平的调节：在桌面上将天平放平稳，取下两侧防止横梁摆动的垫圈，摆正托盘（有字码“1”的托盘放左边，有字码“2”的放右边）。将游码左移至刻度尺上的零处，观察横梁停止摆动时，指针是否指在标尺的正中央。如果不是，可调节横梁两端的调节螺母，直至指针停于标尺中央、或指针左、右摆动的幅度相同为止。此时可认为天平横梁已调节水平。

(2) 称量：将称量物轻放在左盘，往右盘加砝码，当增减到最小的砝码也不能使天平平衡时，移动游码，使指针到标尺刻度中央或左右摆幅相等。这时，砝码的总质量和游码读数之和即为物体的质量。

(3) 操作时的注意事项：

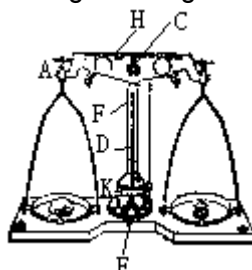
为防止天平生锈或腐蚀，应注意：不将潮湿物品或化学药品直接放在天平盘里；不要用手摸天平。

取放砝码或移动砝码要有镊子 称量完毕后砝码要直接放回砝码盒中原来位置，把游码移回到标尺零刻度处。

每架天平都有一定的称量范围，加在天平上的物体质量不得超过它的称量范围。

2. 用物理天平称质量

物理天平灵敏度较高，有称量 1000.00g，感量 100mg 和称量 500.000g，感量 20mg 等规格，其结构如图。配用四等砝码，其标称质量为 10mg-500g，允许误差为 $\pm 1\text{mg} - \pm 25\text{mg}$ 。



(1) 天平的调节 (分两步进行)

底座水平调节：对具有重锤线和小锤的天平，可调节底座螺钉，直到重垂线上挂的小锤的尖端跟底座上的小锤体的尖端正对，这就表示底座水平了。对具有水平仪的天平，可调节底座螺钉，直到水平仪的气泡在水平仪正中，这也表示底座水平了。

零点调节：先检查吊架是否正挂在横梁的刀口上，把称盘吊篮挂到吊架的上钩上（天平不用时，吊篮应挂在吊架的下钩里）。把游码拨回到刻度尺左边零刻度线。向右转动止动旋钮，使天平横梁慢慢升起，中央刀口要保持在浅槽内。观察横梁是否平衡，如不平衡，则向左拨动止动旋钮，放下横梁，使中央刀口离开浅槽（以免磨损刀口），再调节平衡螺母，直到横梁平衡。

(2) 称量方法与托盘天平称量方法同。

物理天平较托盘天平灵敏，摆动时间较长，可用平衡点测定法进行称量，当指针摆动幅度在刻度以内时即可认为天平已经平衡。其方法如下：记下连续三次指针摆动在标尺上的读数 L_1 、 L_2 、 L_3 ，对中央刻度是“0”

的天平，通常取左“—”右“+”，再按公式 $L = \frac{L_1 + 2L_2 + L_3}{4}$ 计算天平的零点（平衡位置），最后将 L 乘以天平的标称分度值（即感量）换算成质量。

例如：当读数时天平指针左摆极限位置是“-3”分度，则 $L_1 = -3$ ；指针右摆极限位置是“5”分度， $L_2 = 5$ ；指针再摆至“-3”分度处，

$L_3 = -3$ ，则 $L = \frac{-3 + 2 \times 5 - 3}{4} = 1$ （分度），设天平感量为 100mg（标称分度值为 100mg/分度），换算成质量 $m_3 = L \times \text{标称分度值} = 1 \text{ 分度} \times 100\text{mg/分度} = 0.1\text{g}$ ，当 L 值为负值， m_3 也为负值。

被称物体的质量 M 为砝码质量 m_1 ，游标读数 m_2 ，零点所示质量 m_3 之和，即

$$M = m_1 + m_2 + m_3。$$

对质量小于 1g 的物体，可直接用游码称量。

(3)操作时的注意事项：

与托盘天平同；

与托盘天平同；

与托盘天平同；

在调节天平、增减砝码、使用完毕后都必须将横梁止动，使刀口与刀承分离。旋动止动旋钮要轻、缓。

各天平之间不得互换零件和砝码。

注：

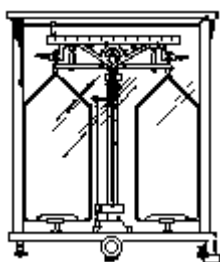
(1)指针上的感量砣是用来调节天平灵敏度的，出厂时已调好，一般不用调节。上（下）移动该砣可使天平横梁的重心上（下）移动，可提高（降低）天平的灵敏度。

天平横梁的重心在其中央刀口下方，以保证横梁处于稳定平衡。天平横梁不水平时，由天平横梁自身的重力产生一个回复力矩，由两边载物的质量差产生一个偏转力矩，当这两个力矩平衡时，天平指针不再停在中央刀口的正下方，而是偏转一个角度。若质量差记为 m ，则 $\frac{1}{m}$ 叫做天平的灵敏度。在称量时，由于盘内载物和加码，致使横梁重心下移，灵敏度要相应降低，要提高天平的灵敏度，可适当上移感量砣。

(2)载物台的用法：有的物理天平在支柱左边有一托盘，叫载物台。这是供搁置不被称量的实验器具（如烧杯）用的。借助载物台可测浮力，方法是将载物台移到左吊盘上方，放上盛液体的烧杯，将被测物体用细线挂在左吊钩上，调整载物台位置，使被测物体悬浮在液体中，即可用天平进行测量。

3.用分析天平称质量

分析天平比物理天平灵敏度更高，以 $\frac{1}{1000}$ g 的为例，其称量范围为 1mg-100.000g，感量 1mg。其称量误差：在称量 20-100g 时为 +1mg；称量 1-10g 时为 +0.6mg；5-500mg 时为 ± 0.3 mg；1-20mg 时为 ± 0.2 mg。其结构如右图。配用三等砝码，标称质量为 10mg-500g，允许误差为 ± 0.2 mg- ± 10 mg。



(1)天平的调节与物理天平同，

(2)称量方法与物理天平同，

(3)操作规则与物理天平同。

注：化学药品的称量方法：先称量容器的质量，平衡后，如要称取 5mg 药品，则在右边砝码盘中增加 5mg 砝码，然后用牛角匙轻轻将药粉慢慢撒入容器，直至天平平衡，容器中的药粉量为 5mg。

4. 横梁不等臂性所引起的误差

如果横梁不等臂，设 $L_1 > L_2$ （左臂长于右臂），左盘载物 M ，右盘放砝码 M_1 ，天平平衡时，

$$ML_1 = M_1L_2$$

$$\text{得 } M_1 = \frac{ML_1}{L_2}$$

用 L 表示两臂之差，即

$$L_1 = L_2 + L$$

$$\text{则 } M_1 = M \frac{L_2 + \Delta L}{L_2} = M \left(1 + \frac{\Delta L}{L_2} \right)$$

$$M_1 - M = M \frac{\Delta L}{L_2}$$

式表明不等臂性的误差跟被测物 M 及两臂差 L 成正比，跟臂长 L_2 成反比。

设分析天平的全称量为 200g，臂长约 70mm，两臂长之差 $L=0.001\text{mm}$ ，

附 1 天平称量范围和砝码配用表

天平称量范围和配用砝码		天平称量范围和配用砝码			
		分析天平	物理天平	托盘天平	
砝码称量范围和配用砝码		三等砝码	四等砝码	五等砝码	
天称称范围	砝码标称质量	允差(mg)	允差(mg)	允差(mg)	
1000g 以下	500g	± 10	± 25	± 120	
	200g	± 4	± 10	± 50	
	200g 以下	200g	± 4	± 10	± 50
		100g	± 2	± 5	± 25
	100g 以下	50g	± 2	± 3	± 15
		20g	± 1	± 2	± 10
		20g	± 1	± 2	± 10
	50g 以下	10g	± 0.8	± 2	± 10
		5g	± 0.6	± 2	± 10
		5g	± 0.6	± 2	± 10
		1g	± 0.4	± 2	± 10
	10g 以下	500mg	± 0.2	± 1	
		200mg	± 0.2	± 1	
		200mg	± 0.2	± 1	
100mg		± 0.2	± 1		
500mg 以下	50mg	± 0.2	± 1		
	20mg	± 0.2	± 1		
	20mg	± 0.2	± 1		
	10mg	± 0.2	± 1		
50mg 以下	5mg	± 0.2			
	2mg	± 0.2			
	2mg	± 0.2			
	1mg	± 0.2			
5mg 以下	5mg	± 0.2			
	2mg	± 0.2			
	2mg	± 0.2			
	1mg	± 0.2			

则将不等臂当做等臂时可能引起的最大误差为

$$\delta = M \frac{\Delta L}{L_2} = 200 \times \frac{0.001}{70} \text{g} = 0.00286\text{g} = 2.86\text{mg}。$$

对于 $\frac{1}{1000}$ g 的分析天平其感量为 1mg， $\frac{1}{10000}$ g 的分析天平其感量为

0.1mg，显然这一误差过大，不能忽略不计。须用下面的精密衡量法消除

误差。

5. 天平的精密衡量法

为消除或减小天平不等臂性造成的系统误差，可采用精密衡量法。

(1) 复称法：

先左盘载物，右盘加码，称量值为 M_1 ；然后对调，使右盘载物，左盘加码，称量值为 M_2 。设天平左臂为 L_1 ，右臂为 L_2 。

第一次平衡时： $ML_1 = M_1 L_2$ ，

第二次平衡时： $ML_2 = M_2 L_1$ ，

两式相乘并消去同类项 ($L_1 L_2$)， $M^2 = M_1 M_2$ ，

则 $M = \sqrt{M_1 M_2}$ 。

由于 L_1 、 L_2 相差极小，所以 M_1 、 M_2 相差也极小。

设 $M_2 = M_1 + \Delta M$ ，

$$\begin{aligned} \text{则 } M &= \sqrt{M_1^2 \left(1 + \frac{\Delta M}{M_1}\right)} \\ &= M_1 \left(1 + \frac{\Delta M}{M_1}\right)^{1/2}。 \end{aligned}$$

按二项式展开由于 $\Delta M \ll M_1$ ，可略去高次项，

$$\text{得 } M = \frac{M_1 + M_2}{2}。$$

(2) 交换法（高斯法）：

先左盘载物 (M)，右盘加码 (M_1)，设天平左、右臂长分别为 L_1 和 L_2 ，则天平平衡时有：

$$ML_1 = M_1 L_2$$

然后交换 M 、 M_1 的位置，由于 $L_1 \neq L_2$ ，故在左盘需适当添加一砝码 ΔM (ΔM 为微小的正、负量值)，天平才能恢复平衡，此时：

$$ML_2 = (M_1 + \Delta M) L_1$$

两式相乘

$$\begin{aligned} M^2 &= M_1^2 \left(1 + \frac{\Delta M}{M_1}\right)， \\ M &= M_1 \left(1 + \frac{\Delta M}{M_1}\right)^{1/2}。 \end{aligned}$$

考虑到 $\Delta M \ll M$ ，展开上式并略去高次项后得

$$M = M_1 + \frac{\Delta M}{2}。$$

(3) 替代法（波尔达法）：

左盘载物 (M)，右盘加平衡物（如废砝码等），使天平平衡；然后将 M 从左盘取出，并加上砝码 M_1 替代之，使天平重新平衡。显然， $M = M_1$ 。

此法可直接消除不等臂性的影响。

(4)减码法(门捷列夫法)：

将总质量等于天平全称量的一组砝码放在右盘，平衡物置于左盘，使天平平衡。然后将被称量物体(M)放在右盘内，同时从右盘取出一部分砝码(M_0)，使天平恢复平衡，则

$$M = M_0。$$

(三) 测量质量的特殊方法

1. 用振动法测物体质量

取一个已知倔强系数为 K 的弹簧，将待测物体(m)固定在弹簧的一端，在自由悬挂时使它振动，用秒表测定其振动周期 T，根据一定的数据处理方法，求得待测物体的质量 m_0 。

2. 用液压法测大质量

根据帕斯卡原理，可以制成液压秤，其原理如图。图中 m_Q 和 m_p 分别表示被称物体和标准砝码的质量， A_1 和 A_2 表示两个液压活塞的有效面积，平衡时有：

$$m_Q = m_p \frac{A_1}{A_2}。$$

若使 A_1/A_2 做得很大，就可称量大质量。

3. 用弹簧秤和天平测地球质量

根据万有引力定律，地球表面的物体 m 与地球间的万有引力

$$F_{引} = G \frac{M_{地} m}{r_{地}^2}。$$

粗略地测地球质量可以用弹簧秤称出物体的重力，并认为这个大小就是 $F_{引}$ ，再用天平称出物体的质量 m，代入上式，则地球质量

$$M_{地} = \frac{F_{引} r_{地}^2}{Gm}。$$

式中：G 为万有引力恒量， $G=6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。

$r_{地}$ 为地球半径， $r_{地}=6.37 \times 10^6 \text{m}$ 。

得目前公认的地球质量为 $5.977 \times 10^{24} \text{kg}$ 。

三 时间的测量

(一) 时间和它的单位

1. 从表圭到原子钟

(1) 表圭和日晷

所有计时器中，在中国最古老的要算表和圭了。

表的最原始形态就是根据日转影移的道理在地上立一根杆子，白天用它来测太阳的影长，夜晚可用来测恒星的上中天。表配上圭(就是测日影的尺)可使时间的测量更准确。后来的表圭越造越大，如郭守敬在公元 1276 年造于河南告成镇(古阳城)的周公测量景台表高 4 丈，天

安门前的华也是一例。

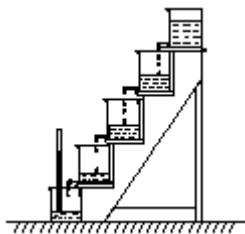
日晷测时，不像表圭那样用日影的长短，而是根据日影的方向。古代日晷上奇妙的图纹留下了许多至今未解开的谜。

(2)滴漏（水钟）

滴漏是最早不依靠太阳的测时器。我国在商初（公元前 1500 年）有了滴漏，而在此以前几百年古代巴比伦和埃及则早就有了滴漏。

滴水记时有两种办法。一种是利用特殊形式的容器，记录水漏完的时间（“泄水型”），另一种是底部无开口的容器，记录它用多少时间把水装满（“受水型”）。其后各种水钟都是在这两种类型的基础上加以改进的。图中装置，是一种级联方式。

我国古代的铜壶滴漏，用五个级联的铜水壶做成。每级的漏水速度不同，每级水面的绝对高度有其确定的意义。最后一个壶内有一根竖直的箭，箭上刻几条刻痕。根据水面对齐的刻痕可读出比时辰还小的单位，叫做“刻”。



(3)火钟

外出旅行的人用水钟极为不便，于是便出现了火钟。国外爱用蜡烛，我国多用盘香。在 17 世纪我国的盘香制造技术已相当高明，燃烧速度十分均匀，用它来计时比水钟还准，18 世纪的德国，火钟计时也颇为流行。

(4)砂钟

古代砂钟主要在国外流行。用细管连接两只容器，上面的一只装上干燥的黄沙，砂会在一定的时间内全部漏入下面的容器，漏完再翻转来。黄沙每次漏完的时间大体相等。

(5)摆钟

机械钟出现于 16 世纪的欧洲，一开始由滴漏发展而成，只是多了一个由齿槽带动齿轮而使指针转动的装置，它以水为动力。到伽利略发现了单摆的等时性后，海根利用重锤的势能转变为动能，用单摆加上一只擒纵轮制成了真正的机械钟。

(6)近代机械钟

海根的机械钟是一种挂钟，笨重而不便携带。将重锤换成发条，以摆轮和游丝替换单摆，用卡马换下擒纵轮，近代小巧玲珑的机械式钟表诞生了。一般来说，这种钟表每天的误差在 ± 30 秒以内。

(7)电子钟和原子钟

石英晶体在电脉冲刺激下的振荡频率极为稳定，每秒是 32768 次，耗电极省。20 世纪 60 年代，用石英的电振荡代替摆轮，以液晶显示代替指针，一种无机械损耗的新型电子表问世了。一般电子表每天的误差是 ± 0.5 秒。

更为准确的计时器当数原子钟。铯原子钟由美国哈佛大学的拉姆齐发明，并于 1952 年由美国国家标准局利用拉姆齐的分离振荡场方法造出

了第一台铯原子钟，它的精确度极高，30 万年只差 1 秒。拉姆齐因此而获 1989 年诺贝尔物理奖。

2. 秒的三次定义

随着机械钟的出现，人们有了“分”、“秒”的概念。

“秒”的第一次定义（1820 年）

“秒”最早由法国科学界在 1820 年提出，它以地球自转周期为标准。

到 19 世纪末，才正式规定：“秒是平太阳日*的 $\frac{1}{86400}$ ”，把此称作世界时秒（UT）。其复现精度为 10^{-8} 秒。

“秒”的第二次定义（1960 年）

由于地球自转运动有不规则变化，如 1872 年-1903 年间，平太阳日增长了 $\frac{1}{7000}$ 秒，而在 1903-1934 年间又减少了 $\frac{1}{5000}$ 秒。而且地球自转有长期减慢的趋势，每百万年慢 16 秒，三亿年前一年约 400 天，即现在的 10 秒是那时的 11 秒。于是在 1960 年第十一届国际计量大会上给出了秒的第二次定义：“秒是 1900 年 1 月 0 日历书时**12 时起算的回归年的 $\frac{1}{31556925.9747}$ ”，这就是回归

*地球自转一周的时间称为视太阳日（真太阳日）。一年中视太阳日的平均值定义为太阳日。

**历书时的时间单位是历书秒，它是从 1900 年初附近（年初附近是指 1900 年 1 月 1 日零时（年初）前的 12 时，即 1899 年 12 月 31 日 12 时，记作 1900 年 1 月 0 日 12 时）。

年秒，又称历书时秒（ET），它是以地球公转为标准的。其复现精度提高到 10^{-9} 秒。

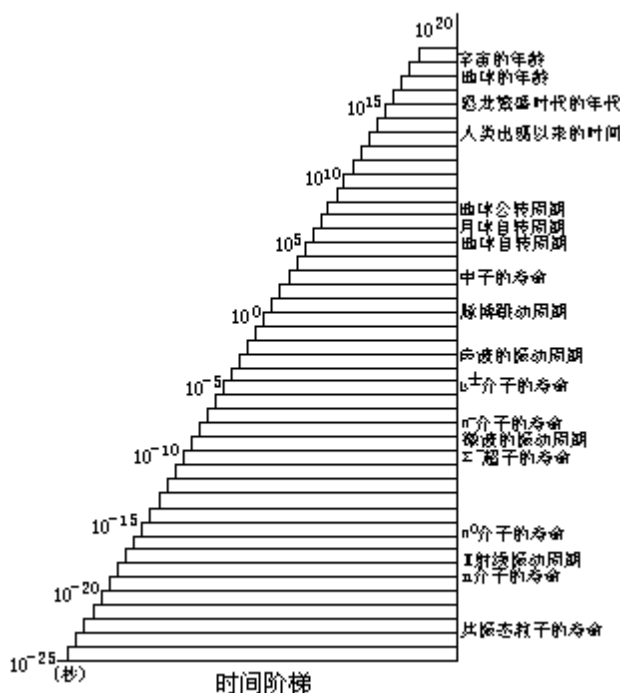
“秒”的第三次定义（1967 年）

由于宏观天体运动规律复杂，天文观测十分困难，随着原子物理学和电子学的发展，在 1967 年第十三届国际计量大会上给出了秒的第三次定义：“秒是与铯-133 原子基态的两个超精细能级间跃迁相对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间。”称为原子时秒，复现精度高达 10^{-13} 秒，即相当于 30 万年公差 1 秒

3. 时间阶梯（ 10^{-23} — 10^{37} 秒）

时间就是生命，时间蕴含在万事万物的生命历程之中。

时间阶梯图



在时间阶梯上，人的脉搏差不多每秒一次，在 10^0 秒数量级上，处于阶梯的中间位置。

沿着阶梯向上走，我们看到地球自转周期 86400 秒，其公转周期则在 10^7 — 10^8 秒数量级之间。走到第 10^{13} 秒数量级，是人类出现的历史年代。我们生活的地球年龄在第 17 个阶梯之上，约 50 亿岁，宇宙年龄与之相仿约 100-200 亿岁，目前已测得质子寿命约在第 10^{37} 秒数量级上，这是目前已知的最高级。

沿着时间阶梯往下走，我们看到的是一些寿命极短的基本粒子。寿命最短的仅仅只有 10^{-23} 秒数量级。差不多只有千万亿亿分之一秒。在胀宇宙论中，宇宙胀是发生在小于 10^{-35} 秒的时间内，这是目前所知的最低级。

(二) 测量时间的一般方法

1. 用机械停表测量时间

停表（秒表）是测量时间的常用仪表。机械停表表盘上有长的秒针和短的分针如图，秒针转一圈的时间通常有 30 秒和 60 秒两种。常用的停表最小分度值也有两种，一种是 0.2 秒，另一种是 0.1 秒。停表上端的按钮是用来旋紧发条和控制表针转动的。



停表使用方法：

用手握紧停表，大拇指按在按钮上，按停表分三步：第一次按下时，表针开始转动（启动），第二次按，表针停止转动（停止），第三次按下，表针弹回零点（回表）。

使用停表的注意事项：

(1)使用前先上紧发条，但不宜过紧，以免损坏发条；

(2)按表不要用力过猛，以免损坏机件；通常按钮先向下按到秒表即将产生动作的位置，当需要产生动作时立即再下按，以提高计时的准确性。

(3)回表后，如秒针不指零，应记下其数值（零点读数，指针过零点其值为正，指针不到零点其值为负），实验后从测量值中将其减去。

(4)要注意防止摔碰停表，不使用时应将其放回盒内。并让其继续走动，以放松发条。

有的停表在按左侧有一个弧形的制动装置，把这个装置往上推，表针就停止，再往下推，表针又继续走动。这样可以直接测出几次时间的累加数值。

用停表计时，误差主要来源有三个：

(1)秒针的初时刻不在 0.0 秒的位置。

(2)操作时，手按按钮有超前和滞后情况。

(3)当被测对象为运动物体时，判断位置时有误差。比如测量单摆的周期，对平衡点的位置判断有误。

测量时对第 1 种情况，只要在读数时减去初读数即可，而对第 2、3 种情况应特别注意，需通过反复训练、多次测量才能有效地减小这种偶然误差。

2. 用电子秒表测量时间

电子秒表走时比机械式停表更加准确，其分度值一般为 0.01 秒。但因为手动按表的误差一般在 0.1—0.2 秒之间，所以电子秒表上 0.01 秒的读数意义是不大的。

3. 用节拍器测量时间

机械节拍器的原理和结构

节拍器是利用摆的等时性计时的仪器。外形如图。外壳呈正四棱台状，壳的正面有一盖板。取下盖板，可见一根用扁钢片做成的倒置的摆杆。杆上有许多刻线，上密下疏，摆杆后面有一固定的刻度尺，刻度尺两边的数值与摆杆的刻度对应，用来表示拍率—每分钟的拍数。该数值的范围从 40—208，即节拍器的拍率可在 40 拍/分—208 拍/分间调节。摆杆上装有一个可上下滑动的摆块，调整摆块在摆杆上的位置，可改变摆杆摆动的拍率。摆块往下移，拍率值增大；往上移，拍率值减小。



节拍器外侧装有两个扣钮。下边的扣钮用来旋紧发条。上面的扣钮是鸣铃控制钮。把此钮拉出，可以在钮杆上看到标有“6”、“4”、“3”、“2”的刻度。若拉出钮杆，使“2”字露出，鸣铃就每 2 拍发声一次，拉出“3”字，鸣铃就每 3 拍发声一次，以此类推。

现在还有电子节拍器，节拍调节钮可以在较大幅度内调整。节拍声

由扬声器发出，精度比机械节拍器高。

测量方法：

(1)校验节拍

先上紧发条，取下盖板，调节摆块在摆杆上的位置，使其上缘或指针对齐摆杆上的某一刻线，记下该刻线所对应的刻度尺上的标称拍率 ρ_0 。轻轻拨动摆杆，使其起振，用停表测出 n 次全振动所需时间 t 分钟，则每分钟的实际节拍数

$$\rho = \frac{n}{t}。$$

将 ρ 与 ρ_0 对比，若 $\rho > \rho_0$ ，应将摆块上移，若 $\rho < \rho_0$ ，应将摆块下移，这样反复调节，直到 $\rho = \rho_0$ 为止，这时可以开始测量时间了。

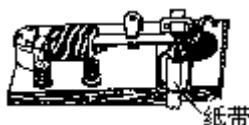
(2)拍数记时法

若标称拍率为 ρ_0 ，在某一物理过程中记录的拍数为 n 拍，则时间

$$t = \frac{n}{\rho_0}。$$

4. 用电磁打点计时器测量时间

电磁打点记时器的外形如图。它是由底座、通电线圈、振动片、振针、永久磁铁、垫板及限位孔等组成。测量时还需附有夹具、17.5mm 电报纸带和复写纸等。



电磁打点计时器振动打点的形式有两种。如 J0203 型电磁打点计时器的振动片及振针，是在交变磁场和永磁场的共同作用下振动打点的；而 J0203-1 型电磁打点计时器，则是在脉动直流电的磁场作用下振动打点的。

当电源频率为 50 赫时，电磁打点计时器的计时精度为 0.020 秒。

测量方法：

(1)安装调整

将纸带的一端固定在运动物体（实验小车、重锤）上，另一端通过电磁打点计时器导带槽，从振针下面的复写纸下面穿过。复写纸呈圆形，复印面向下，在纸带移动时，上面的复写纸能随之转动。

接通电源，（J0203 型用交流 4—6V50Hz，J0203—1 型，用交流 220V50Hz）。调整振动片的紧固螺丝，使振动片稳定地振动，再调节振针，以刚好能在纸带上打出点为好，尽量减少打点针与纸带的接触时间，以减小运动物体因打点而受到的阻力。

(2)打点

让打点计时器开始稳定地打点后，释放运动物体，纸带上就可得到一连串的小点。

(3)测定时间

打点计时器打点频率 $f=50$ 赫，即每隔 0.020 秒打一个点。因此，纸带上任意相邻的两点（除第一、二点以外）间所表示的时间间隔就是打点计时器的打点周期 T_0 ， $T_0=1/f=0.020$ 秒。如果纸带上任意两个点之间

有 n 个打点周期，则这两点间的时间 $t=nT_0$ 。

注意事项：

(1) 用电磁打点计时器测量时间时，整条纸带与打点计时器的导槽一定要尽量放平。

(2) 由于打点计时器没有同步装置，纸带上第一点与第二点间所表示的时间间隔不一定是一个打点周期，在处理纸带时，一般都避开用第一点。

5. 用简式计时器测量时间

简式计时器 (J0202 型) 可与 J2127 型斜槽轨道等配合，计时和计数。其计时量程， $\frac{1}{100}$ 秒档为 $0.01-0.99s$ ， $\frac{1}{10}$ 秒档为 $0.1-9.9s$ ；计数范围为 $0-99$ ；工作电压 $220V \pm 10\%$ ， $50Hz$ 。简式计时器 (J0202 型) 外面板如图。如果显示的数是机内时钟脉冲的个数，本仪器成为计时器；如果显示的数是光电门被遮光的次数，则为计数器。



测量时间时的误差。

测量误差由不同量程的精度和测量时间长短共同决定。

简式计时器在用 $0.01-0.99$ 秒档时，其测量时间的最大绝对误差为 $t=0.01$ 秒。因为计脉冲数时，最大的误差为一个脉冲，在 $0.01-0.99$ 秒档时，时钟脉冲周期为 0.01 秒，少计一个脉冲，时间误差为 0.01 秒。最大相对误差则为

$$E_t = \frac{\Delta t}{t}。$$

E_t 主要由测量时间 t 来决定，是一个变量，随测量时间的增大而减小。如某次测量 $t_1=0.35$ 秒， $t_2=0.25$ 秒，则

$$E_{t1} = \frac{0.01}{0.35} = 3\% ，$$

$$E_{t2} = \frac{0.01}{0.25} = 4\% 。$$

注意事项：

(1) 在许多电器一起使用时，其他电器的开关有可能干扰简式计时器的工作，因此在使用过程中要避免开关其他电器。

(2) 本仪器的 $1/100$ 秒时基信号，由 $50Hz$ 交流电转换而来。因此，在交流电频率波动时计时值随之产生系统性的误差。

6. 用数字计时器测量时间

数字计时器 (J0201-1 型) 与气垫导轨等配合，计时和计数。其计时量程， 1 毫秒档为 $0-0.999s$ ， 10 毫秒档为 $0-9.99s$ 。工作电压 $220V \pm 10\%$ ， $50Hz$ 。数字计时器 (J0201-1 型) 面板如图。



测量的误差：

数字计时器（J0201-1 型）在测量时间时的最大绝对误差，在用 1 毫秒档时 $t_1=0.001$ 秒，在用 10 毫秒档时为 $t_2=0.01$ 秒，相应的，若测量的时间为 \bar{t} ，则最大相对误差各为

$$E_{t1} = \frac{\Delta t_1}{\bar{t}},$$
$$E_{t2} = \frac{\Delta t_2}{\bar{t}}。$$

注意事项：

在多种电器联合使用时，其他仪器的开关可能使计数器跳字甚至瞬间时间断。因此，在测量过程中，要避免开、关其他电器。

（三）测量时间的特殊方法

碳钟 测定过去年代的方法

利用碳 14 测定文物的绝对年代可以测到几万年前。这是目前国内外应用最广、技术最完善的绝对记年方法，也是利用放射性衰变原理测定年龄的最精确的方法。这项技术的发明者是美国化学家利比。他因此获得 1960 年诺贝尔化学奖。

在碳的三种同位素中，只有碳 14 是不稳定的，在衰变后，蜕变成氮 14，它的半衰期为 5700 年。生物在活着的时候，一方面会持续不断地摄取碳 14，使体内的碳 14 得到补充；另一方面又由于生物的排泄和碳本身的衰变，体内碳 14 不断减少，达到动态平衡，所以生物活着时体内的碳 14 含量有一个恒定的比例。生物死后体内的碳 14 按照每过 5700 年减少一半的规律变化，据此，只要测出生物标本里的碳 14 的多少，并与现代标准样品中的碳 14 相比较，就可推算出它的年龄。

生物死后，残留在机体的碳 14 因衰变而按指数规律减少

$$I = I_0 e^{-\lambda t}。$$

式中 I_0 是现代碳 14 的比度，即每克样品每分钟蜕变的次数， I 是死亡的生物中碳的放射性比度； t 是从死亡到今的年代。是碳 14 的衰

变常数： $\lambda = 0.693 / T_{\frac{1}{2}}$ ， $T_{\frac{1}{2}} = 5700$ 年。

以马王堆古尸为例。测定古尸的年龄，实则是测定棺木的年龄，用放射性计数器测得棺木的放射性比度 $I=15.03$ ，而现代样品的放射性比度为 $I_0=19.68$ ，代入公式，求得 $t=2217$ 年，即古尸距今 2217 年。

“距今”的意思，按协调世界时（UTC）规定，以 1960 年 1 月 1 日零时为世界时起点，所以距今 2217 年实则为距 1960 年是 2217 年。

最后必须指出，大气样品的碳 14 含量并非绝对恒定，特别是在 19 世纪后半叶后，由于“原子弹—氢弹效应”和“工业效应”，碳 14 的含量增多了，在计算中要加以修正。

四 密度的测量

(一) 密度和它的单位

1. 密度测量和它的参考标准

密度的测量起源于冶金术和酿造业的需要，早期的测量局限于测量比重。

密度测量主要有三种方法：液体静力衡量法、比重瓶法及浮计法。

在物质密度测量中，水密度的测量是最重要的，它是密度测量的第一参考标准。

对水密度的研究已有漫长的历史，早在 1891—1907 年间，国际计量局 (BIPM) 使用静力称量法通过立方体浮子对纯水的最大密度 ρ_{\max} (4 时) 值作过几组精确测定。

同一时期，1900 年德国的帝国物理技术院使用两个高约两米保持于不同温度下纯水的圆柱体。装置下方连通形成 U 形，通过管内液柱静压平衡，测定两边高度差求得密度差的方法，在 0—42 内每隔 5 测一个点共测 9 个温度点得到 0—42 温度范围的拟合方程，求得水的密度数据。

到了 20 世纪 70 年代，国际上对水密度值上存在的分歧十分重视，又用绝对法 (基于质量和长度绝对测量的方法)，对纯水密度作为新的测定，但结果表明，在 40 时仍有 $4 \times 10^{-6} \text{kg/m}^3$ 的分歧。目前水密度公认的最大值为 $\rho_{\max} = 999.9720 \text{kg/m}^3$ 。

密度测量的发展目前主要有以下几个方面：

(1) 密度标准参考物质的精确测量

目前在水密度测量中在 4 或 20 时已达到 $1 \times 10^{-6} \text{kg/m}^3$ 的水平，而在 0—42 范围内仅有 $4 \times 10^{-6} \text{kg/m}^3$ 水平。为了提高准确精度，除改进现有的流体静力称量方法、装置以及研究它的热膨胀特性外，还对水的同位素、溶解空气、压强对纯水密度的影响等作进一步研究。

(2) 建立固体密度标准

建立固体密度标准既是研究测量液体密度和固体密度的统一基准 (现对单晶硅密度测量的准确度已达 $5 \times 10^{-7} \text{kg/m}^3$)，也对建立质量自然基准的研究有重要的科学价值。

(3) 密度测量的自动检测方法及其检测仪器的研究

自动连续测量是科学技术和工业生产的需要。近年来，在液态金属 (高温) 液态气体 (低温) 和二相流密度自动检测的方法和仪器研制方面等急需解决的问题都取得了明显进展。

2. 密度的定义和单位

(1) 单位体积的某种物质的质量，叫做这种物质的“密度”。密度是物质质量 m 与其体积 V 的比值，定义式为

$$\rho = \frac{m}{V}。$$

根据定义，在 SI 中，单位是千克每立方米 (kg/m^3)，量纲为 ML^{-3} 。

(2) 表现密度

多孔固体 (颗粒或粉末) 材料质量与其表现体积 (包括“孔隙”的体积) 之比值。

(3) 实际密度

多孔固体材料与其体积（不包括孔隙的体积）之比值。

(4)堆积密度

在特定条件下，在既定容积的容器内，疏松状（小块、颗粒、纤维）材料质量与所占体积之比值。

特定条件是指自然堆积、振动或敲击或施加一定压力的堆积等。

(5)标准密度

在规范规定的标准条件下的物质密度。比如，在温度为 273.15K(0)、压强为 101325Pa(1atm)下的气体标准密度；温度 20、压强(1atm)下的液体标准密度。

(6)参考密度

在规定的参考状态（温度和压强）下的物质密度。

(7)相对密度

在特定条件下，物质密度 ρ_1 与参考物质密度 ρ_2 之比值。定义式为

$$d = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

相对密度，过去常叫做“比重”。“比重”通常指某种物质的密度与纯水密度之比值，它已包含于上述相对密度的概念之中。历史上，“比重”还有一种定义， $D=G/V$ ，即单位体积的重量，这说明，“比重”这一概念本身就比较混乱，现在不再沿用。

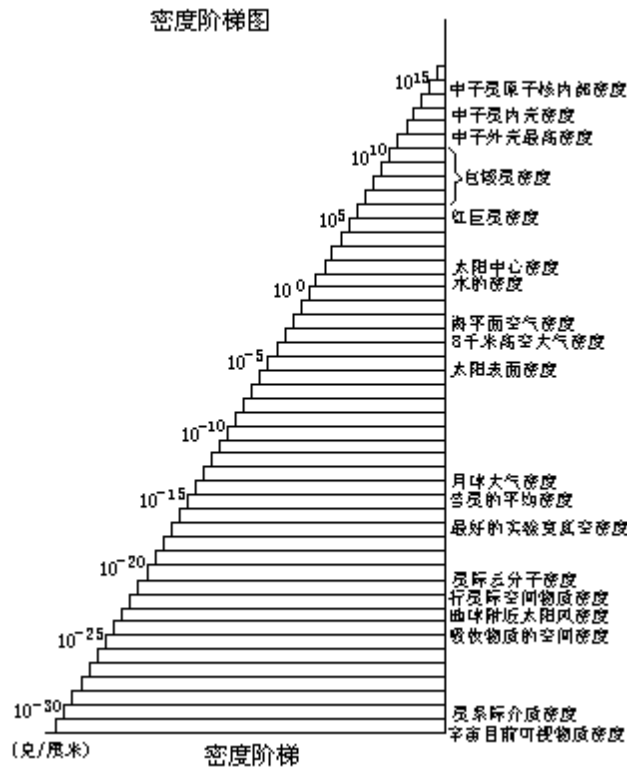
3.密度阶梯（ 10^{-31} — 10^{15} 克/厘米³）

在所有物质密度中，水的密度是 1 克/厘米³。它是我们衡量其他所有物质密度的参考标准。而人的皮肤组织的密度与之相同，它们都站在同一阶梯上，太阳的密度稍大一点为 1.4 克/厘米³，太阳系的九大行星都在 10^0 — 10^1 阶梯之间，它们中密度最大的是地球，地球的平均密度为 5.5 克/厘米³。

金属中铅的密度较大，为 11.3 克/厘米³，常温下为液态的水银，密度为 13.6 克/厘米³，在 10^1 级的阶梯上。往上走到 10^5 数量级是红巨星，密度达 3.2×10^5 克/厘米³，而白矮星则达到 10^6 — 10^9 克/厘米³。站在密度阶梯之颠的是中子星，其密度达到 10^{14} — 10^{15} 克/厘米³，其密度之大到了惊人的地步，如果将地球压缩成这一密度的球体，直径只有 222 米。中子星上像乒乓球大小的物质，要几万艘万吨巨轮才能运走。

重新回到水密度的起点沿着阶梯往下走三级是空气的密度，为 1.3×10^{-3} 克/厘米³，目前在实验室里能够得到的最好的真空密度可达 10^{-17} — 10^{-18} 克/厘米³，而宇宙中的星际介质的密度不超过 0.003 个氢原子/厘米³，即 2.7×10^{-30} 克/厘米³，就目前而论，宇宙中的可视物质，其密度低到 10^{-31} 克/厘米³，是今年密度的最低级别了。

（二）测量密度的一般方法



1. 用天平和量筒测固体密度

物体密度($\rho = m/V$)。可由质量和体积的测定来实现。

注：根据理论计算，宇宙中密度最大的实体应是“黑洞”，为 1.8×10^{25} 克/厘米³。

测量方法：

(1)用物理天平或托盘天平称出固体的质量 m ；

(2)在量筒中盛水，将待测物体放入量筒，浸没水中，量筒中水面刻度的增加量即为物体的体积 V ；

(3)将测量值代入公式 $\rho = m/V$ ，即得固体的密度。

2. 用天平和量筒测液体的密度

测量方法：

(1)先称出空烧杯的质量 m_0 。

(2)将待测液体倒入烧杯后，测出其总质量 m ，则液体质量为 $m - m_0$ ；

(3)将烧杯内的液体倒入量筒，量出其体积为 V ；

(4)计算求出液体密度

$$\rho = \frac{m - m_0}{V}。$$

减小误差的方法：

(1)产生误差的原因

将液体从烧杯倒入量筒中时，烧杯内必残留液体，即计算中的 m 与 V 不对应，导致产生误差；

在烧杯装进液体时是随意的，所以倒进量筒测体积时，一般必须估读，这是产生误差的另一个原因。

(2)减小误差的方法

在前述测量方法中，用量筒取代烧杯，先称出量筒质量 m_0 ，再注入整十、整百毫升的液体（注意最后注入时用滴管加注）记下体积 V ，再称出量筒和水的总质量 m ，则

$$\rho = \frac{m - m_0}{V}。$$

所得结果误差将大为减小。其次，待测液体的质量值，不宜取得太小，在允许条件下尽可能大些，最后该液体的密度相对误差会进一步减小。

3.用天平和量筒测量气体的密度

凡是不溶于水的气体，都可借助排水集气法，用天平、量筒测得其密度，其准确度取决于天平的感量和量筒的最小刻度。

测量方法：

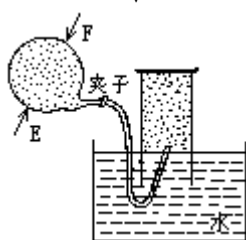
(1)取一球胆（或皮囊）接一根带夹子的胶管，盛满气体后，用天平称出其质量 m_1 。

(2)用如图的装置，用力挤压球胆，用排水集气法在量筒中收集气体。集气完毕后，拧紧夹子。上下移动量筒，使其内外水平面一样高，以保证气体压强为 1 个大气压强，然后由量筒刻度读出气体体积 V 。

(3)称出余下气体和球的质量 m_2 ，则气体的质量为 $m_1 - m_2$ 。

(4)代入公式计算气体在 1 大气压下的密度

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V}。$$



4.用流体静力称量法测量固体的密度

原理和方法：

这是一种利用天平的相对测量法。设物体的体积为 V ，质量为 m ，密度为 ρ ，则

$$\rho = \frac{m}{V}。$$

设物体在空气中的重力为 W_1 ，悬在水中的视重为 W_2 ，则物体所受水的浮力 F 的大小等于

$$F = W_1 - W_2。$$

根据阿基米德定律，物体在水中所受浮力的大小等于它所排开的水的重力，即

$$F = \rho_0 V g。$$

式中 ρ_0 为水的密度， V 为物体排开水的体积，亦即物体体积， g 为重力加速度，得

$$W_1 - W_2 = \rho_0 V g，$$

即
$$V = \frac{W_1 - W_2}{\rho_0 g}$$

又设物体在空气中称量时天平的砝码值为 m_1 ，利用天平的载物台，将物体挂在横梁左侧吊耳的挂钩上，并使其悬在置于载物台上的盛水烧杯中。称量时天平的砝码值为 m_2 ，则 $W_1 = m_1 g$ ， $W_2 = m_2 g$ ，所以

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_0}$$

再测出水的温度，从常数表中查出该温度下的水密度 ρ_0 值，物体密度 等于

$$\rho = \rho_0 \frac{m_1}{m_1 - m_2}$$

5. 用比重瓶测量液体的密度

原理和方法：

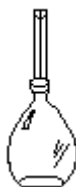
图所示为常用的比重瓶，它在一定的温度下有一定的容积。将待测液体注入比重瓶中后塞好塞子，多余的液体将从塞中的毛细管流出，比重瓶中液体将保持一定体积。毛细管的作用是提高比重瓶容积在重复测量时体积相等的精度。

设空比重瓶质量为 m_1 ，充满密度为 ρ 的液体时的质量为 m_2 ，充满同温度的纯水时的质量为 m_3 ，比重瓶在该温度时的容积为 V ，则

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad V = \frac{m_3 - m_1}{\rho_0}$$

其中 ρ_0 为水的密度，可得

$$\rho = \rho_0 \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1}$$



可见，只要用天平分别称量质量，即可得液体密度。

6. 用定容瓶测量空气密度

这是利用定容瓶、分析天平、抽气机、真空计较为精密地测量空气密度的方法。

原理：

定容瓶如图，密闭在定容瓶中的空气，混有水蒸气。设空气和水蒸气的密度、分压强和摩尔质量分别为 $\rho_{\text{空}}$ 和 $\rho_{\text{水}}$ ， $\mu_{\text{空}}$ 和 $\mu_{\text{水}}$ ，则由理想气体的状态方程，有



$$\rho_{\text{空}} = \frac{p_{\text{空}}\mu_{\text{空}}}{RT},$$

$$\rho_{\text{水}} = \frac{p_{\text{水}}\mu_{\text{水}}}{RT}。$$

利用天平测得的瓶内空气的密度，是这两者之和，即

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_{\text{空}} + \rho_{\text{水}} = \rho_{\text{空}} \left(1 + \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{空}}}\right) \\ &= \rho_{\text{空}} \left(1 + \frac{p_{\text{水}}\mu_{\text{水}}}{p_{\text{空}}\mu_{\text{空}}}\right)。$$

由于 $\frac{p_{\text{水}}\mu_{\text{水}}}{p_{\text{空}}\mu_{\text{空}}}$ 较小，可利用近似计算求出干燥空气的密度 $\rho_{\text{空}}$ ，

$$\rho_{\text{空}} = \rho \left(1 - \frac{p_{\text{水}}\mu_{\text{水}}}{p_{\text{空}}\mu_{\text{空}}}\right)。$$

再换算成标准状态下（即 0，1atm）时空气的密度

$$\begin{aligned}\rho_0 &= \rho_{\text{空}} \cdot \frac{760}{p_{\text{空}}} (1 + 0.00366t) \\ &= \rho \left(1 - \frac{p_{\text{水}}\mu_{\text{水}}}{p_{\text{空}}\mu_{\text{空}}}\right) \frac{760}{p_{\text{空}}} (1 + 0.00366t)，\end{aligned}$$

而 $\frac{\mu_{\text{水}}}{\mu_{\text{空}}} = 0.623$ ， $p_{\text{空}} = p - p_{\text{水}}$ ，代入上式，得

$$\rho_0 = \rho \left(1 - 0.623 \frac{p_{\text{水}}}{p - p_{\text{水}}}\right) \frac{760}{p - p_{\text{水}}} (1 + 0.00366t)$$

可知，只要利用天平测出瓶内空气密度，温度为 t 时的大气压强 p，和水蒸气压，代入上式即可得标准状态下的干燥空气的密度 ρ_0 而 $\rho_{\text{水}}$ 等于温度为 t 时的饱和蒸气压 p_t 乘以当时的相对湿度 H，这是可以通过查表获得的。

测量方法：

(1) 将定容瓶抽气至残留空气压强在 0.1mmHg 以下，按精密衡量法在天平上称出其质量 m_0 ， m_0 可认为是瓶的质量。

(2) 打开定容瓶活栓，让空气充满后，再测得质量为 m，则瓶中空气质量为 $m - m_0$ ，若定容瓶容积为 V，则测量的空气密度 $\rho = \frac{m - m_0}{V}$ 。

(3) 测量室温 t，大气压强 p(mmHg)，相对湿度 H，查表得到温度为 t 的饱和蒸气压 p_t ，则水蒸气的分压为 $p_{\text{水}} = p_t \times H$ (mmHg)。

(4) 代入公式

$$\rho_0 = \rho \left(1 - 0.623 \frac{p_{\text{水}}}{p - p_{\text{水}}}\right) \frac{760}{p - p_{\text{水}}} (1 + 0.00366t)，\text{则得 } 0，1\text{atm 时干}$$

空气的密度值，其公认值为 $1.293 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$ ，测量值的误差可以小于

1%。

(5)在要求不太高时，可认为 $\rho = \frac{m - m_0}{V}$ 是测量的最终结果，不再扣除水蒸气的分压，也不再进行温度修正。

7. 用密度计测量液体的密度

密度计是浮计的一种，分通用和专用两类，其测量范围大、精度高。

表 我国部分密度计技术规格（温度 20 °C）

名称	规格	用途	测量范围 (g/cm ³)	分度值 (g/cm ³)
通用密度计	一等	测量各种液体密度	0.65 — 2.00	0.0002 — 0.0005
	二等			0.0005
蓄电池密度计	精密型	测量蓄电池电解液密度	1.10 — 1.30	0.001
	普通型			0.002
海水密度计		测量海水相对密度	1.00 — 1.04	0.0001
酒精密度计		测量酒精密度	998.20 — 789.24	0.2

密度计的测量原理：

密度计由干管和躯体两部分组成，如图。干管是一顶端密封的、直径均匀的细长圆管，熔接于躯体的上部，内壁粘贴有固定的刻度标尺。躯体是仪器的本体，为一直径较粗的圆管，为避免底部附着气泡，底部呈圆锥形或半球状。底部填有适当质量的压载物（如细铅丸等），使其能垂直稳定地漂浮在液体中。某些密度计还附有温度计。

密度计的工作原理基于阿基米德定律。在图中可见，当忽略空气浮力和弯月面影响时，平衡方程为：

$$m_0 g = (V_0 + lA) \rho g,$$

$$\text{即 } m_0 = (V_0 + lA) \rho.$$

式中 m_0 为密度计质量， V_0 是密度计躯体部分的体积， l 为液面下干管的长度， A 为干管的截面积。由上式可知， l 和 ρ 是一一对应的，因此可用 l 来表示液体密度的大小。

测量方法：

(1)首先估计所测液体密度值的可能范围，根据所要求的精度选择密度计。

(2)仔细清洗密度计。测液体密度时，用手拿住干管最高刻线以上部位垂直取放。

(3)容器要清洗后再慢慢倒进待测液体，并不断搅拌，使液体内无气泡后，再放入密度计。密度计浸入液体部分不得附有气泡。

(4)密度计使用前要洗涤清洁。密度计浸入液体后，若弯月面不正常，应重新洗涤密度计。

(5)读数时以弯月面下部刻线为准。如图所示。读数时密度计不得与容器壁、底以及搅拌器接触。

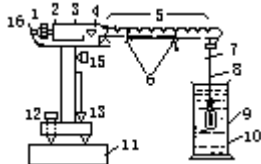
对不透明液体，只能用弯月面上缘读数法读数。

（三）测量密度的特殊方法

1. 用韦氏静力天平测量液体密度

韦氏（韦斯特法尔）天平，用于测量轻质、少量液体密度。它是流体静力天平的一种变型。其结构如图。

图中，10 是盛装试液的玻璃圆筒，9 是内封温度计的空心玻璃浮子（装试液用），3 是不等臂天平的横梁，由支承刀口 4 支承，右臂末端接挂浮子的吊钩 7，由它通过吊丝 8 与浮子 9 连接。由刀口 4 到吊钩 7 将右臂等分为 10 分，前 9 个刻线上方有挂游码 6 的“V”形槽。当两臂平衡时，指针 1 与固定指针 16 对齐。12 是水平调节螺钉。13 为铅锤，14 为支柱，15 为调节可动支柱的螺钉。



“U”形的游码四个一组，质量是 5g，500mg，50mg，5mg。质量比为 $1 : \frac{1}{10} : \frac{1}{100} : \frac{1}{1000}$ ，分别可称其为 1、2、3、4 号游码，相应表示小数第一、二、三、四位数。1 号游码质量最大，且等于浮子在规定的标准温度（常为 20℃）的水中全部浸没所排开水的质量，浮子体积为 5cm^3 。

测量方法：

(1) 天平在空气中挂有浮子但未放入水中时，应处于平衡状态，若不平衡，则需调节 2 使指针 1 与 16 对齐。

(2) 在 20℃ 时，（若 $t \neq 20^\circ\text{C}$ ，则结果要修正），将浮子浸入蒸馏水中，将一个 1 号游码挂在吊钩 7 上，天平应平衡。如不平衡，则需加减游码使之平衡。读出平衡数值以后，所有由天平得到的读数都必须用此游码平衡值除，才能得到液体的相对密度。

(3) 用待测液体替换圆筒中的水再将浮子浸入该液体中，用 1—4 号砝码分别试挂在右臂的“V”形槽内，使天平平衡。

(4) 读数（平衡时）

- 设 1 号砝码挂在挂钩 7 处记为 1，
- 1 号砝码挂在横梁上的刻度为 n_1 ，
- 2 号砝码挂在横梁上的刻度为 n_2 ，
- 3 号砝码挂在横梁上的刻度为 n_3 ，
- 4 号砝码挂在横梁上的刻度为 n_4 ，

则被测液体的相对密度为

$$1 + 0.1n_1 + 0.01n_2 + 0.001n_3 + 0.0001n_4。$$

- 如：1 号砝码在吊钩 7 上一个，刻度 3 上一个，
- 2 号砝码在刻度 7 上一个，
- 3 号砝码在刻度 9 上一个，
- 4 号砝码在刻度 9 上一个，

则读数为 $1 + 0.1 \times 3 + 0.01 \times 7 + 0.001 \times 9 + 0.0001 \times 9$ ，即 1.3799。它是该被测液体与水相比的相对密度。其密度为 $1.3799\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2. 用振动法测量液体的密度

对一定长度两端固定的管子，其固有频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

式中， K 为倔强系数，它取决于管子的材料和形状及大小。

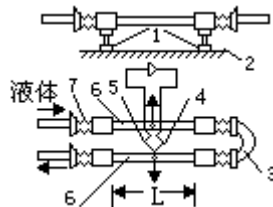
m 为管子质量。

若将管子做成空心的，内部用待测密度的液体填充，则可知，由于管子材料、尺寸等均已确定，则 f_0 为管内液体密度的函数。若能测定管子的固有频率即可测量液体的密度。

装置如图。

将两根平行放置且振动方向相反的两根谐振管和电气部分组成一个振动式密度计，则激励线圈使管子处于谐振状态，在数字式频率计上读出检测线圈输出的与管子谐振同频率的电脉冲频率，即固有频率。则液体密度 与该系统的固有频率 f 之间的关系可由下式计算：

$$\rho = \rho_0 \left[\left(\frac{f_0}{f} \right)^2 - 1 \right] \text{ 千克/米}^3$$



1. 支承 2. 底座 3. 可拆卸的“U”形接头 4. 激励线圈 5. 检测线圈
6. 谐振管 7. 柔性接头 L. 谐振管有效长度

式中， f_0 为填充 1 大气压的空气时的频率， f 为填充被测液体时的频率， ρ_0 为仪器常数， 千克/米^3 ， ρ 为管内被测液体的密度。

国产 SM 型振动式密度计测量范围在 $1.2\text{—}10^4 \text{ 千克/米}^3$ ，精确度为 $\pm 1 \text{ 千克/米}^3$ 。

五 力和压强的测量

(一) 力和压强

1. 力和压强的测量

力的测量方法很多，可归纳为力的动力效应（外部效应）和力的静力效应（内部效应）两种。利用动力效应测量力，是根据牛顿第二定律；利用静力效应测量力是根据胡克定律。当然，还可以根据和力成比例的各种物理现象，如压磁、压电等效应利用传感器将力转化为磁、电等物理量进行间接的测量。

压强的测量大致有液体平衡法、重力平衡法、弹性形变法，力—电转换法等。

目前，国际上利用液压法测力最高可达 2 千万牛，不确定度仅为 $2 \times 10^{-3}\text{—}3 \times 10^{-4}$ 牛。压强的测量，在我国已经建立，如在油缸外加压，以限制变形的可控间隙型活塞式压力计，最大压强可达 2.5Gpa ($2.5 \times$

10^9Pa)，其不确定度为 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 。在真空测量方面，我国也已建立了动态流导法真空标准装置。测量的下限远较静态膨胀法为优，测量范围可达 $10^{-7}-10^{-2}\text{Pa}$ ，在 $10^{-6}-10^{-2}\text{Pa}$ 时准确度为 5-3%，在 10^{-7}Pa 时也不过 10%。

目前高真空技术的发展已可得到 10^{-13}Pa 的极高真空度。

力和压强测量的发展方向是：

(1)统一国际单位，在 SI 中力的单位牛顿(N)，压强单位帕(Pa)将取代所有其他非标准单位。

(2)力和压强的测量往两极(超大量值和超小量值)发展，真空测量则向高真空方向发展，以适应现代科学技术和生产飞速发展的需要。

(3)为了实现测量的高速、高效、高精度，必须更广泛地使用传感器，以力值传感器为例，目前已达到 $\pm(0.003-0.005)\%$ 的准确度。同时，力值和真空测量还向着与电子计算机联机的方向发展。

2. 牛顿和帕斯卡

在国际单位制(SI)中，力的单位是牛顿(N)，其物理意义是，一个力，当它作用在质量为 1 千克的物体上时，将使物体产生 $1\text{米}/\text{秒}^2$ 的加速度，这个力就叫 1 牛顿。而压强的物理意义是：垂直并且均匀地作用于单位面积上的力。 $(p=F/S)$ ，其单位是帕斯卡(Pa)， $1\text{帕斯卡}=1\text{牛顿}/\text{米}^2$ 。

历史上压强最先是采用液柱单位高度 毫米汞柱(mmHg)作为真空度的测量单位。在 1927 年第七次国际计量大会通过标准大气压的定义，规定：在标准重力加速度 $9.80665\text{m}/\text{s}^2$ 下，760mm0 纯汞柱高的压强为一个标准大气压，符号用 atm，它与压强的关系是：

$$1(\text{atm})_{27} = 1013250.1443354\text{dyn}^*/\text{cm}^2,$$

$$1\text{mmHg} = 1(\text{atm})_{27}/760。$$

显然，这一定义依赖于汞密度的测量水平，后来发现汞有七种同位素，同一高度纯汞柱表现的压强并不是唯一的，就是说，标准大气压不标准。所以 1954 年第十次国际计量大会重新定义标准大气压为：

$$1(\text{atm})_{54} = 1013250\text{dyn}/\text{cm}^2。$$

德国最早把毫米汞柱命名为“托”(Torr)，“托”的定义如下：

$$1(\text{Torr})_{54} = 1333.22\text{dyn}/\text{cm}^2。$$

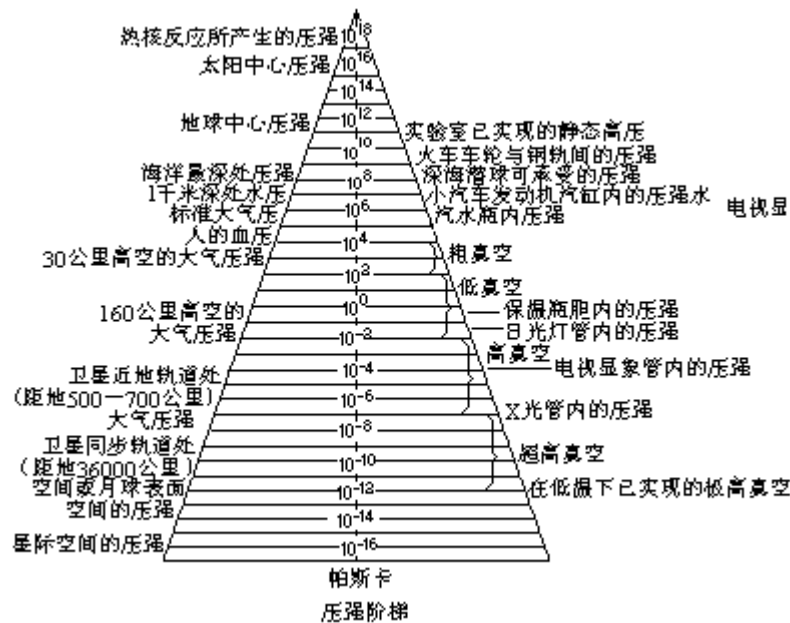
*dyn 是达因，1 达因 = 10^{-5} 牛顿。

由于这些单位目前仍被使用，现列出它们的换算关系。

表 常用压强单位与帕换算关系

压强单位名称	单位符号	与帕的换算关系
标准大气压	atm	1atm=101325Pa
巴	bar	1bar= 10^5 Pa
毫巴	mbar	1mbar=100Pa
托	Torr	1Torr=133.322Pa
毫米汞柱	mmHg	1mmHg=133.322Pa
毫米水柱	mmH ₂ O	1mmH ₂ O=9.80665Pa

压强阶梯图



3. 压强阶梯 (10^{-16} - 10^{18} 帕)

人类赖以生存的大气压强约为一个大气压 (10^5 Pa)，以 10 倍为一个阶梯，从地面的大气中进入水里，在水中每下降 10 米，增加一个大气压，海水最深处是马利亚纳海沟，约 1.1 万米，那里的压强将达到 10^3 大气压。在 10^4 — 10^5 大气压下，石墨可以变成钻石。在实验室已实现的静态高压为 10^6 大气压。地球中心压强为 10^7 大气压。现在已知的压强中，核爆炸的瞬间所产生的压强居于压强阶梯的最高峰，高达 10^{13} 大气压 (10^{18} Pa)。

沿着高山越往上，大气的压强越低，以海平面作基准，每升高 1 公里，大气压强约减小 1/10，珠穆朗玛峰的气压约为 1/3 个标准大气压。在低温下已实现的最低压强（极高的真空）为 10^{-7} 大气压 (10^{-12} Pa)。最低的压强（最高的真空）存在于星际空间，其数量级在 10^{-11} 大气压 (10^{-16} Pa)。

最高压强和最低压强之间相差 10^{34} 数量级。

(二) 测量力和压强的一般方法

1. 用弹簧秤测量力

弹簧秤的刻度有两种单位，标有单位符号“G”的表示克重，单位符号“N”则为牛顿。

测量方法：

(1) 零位调节。测量前如发现指针与零刻度不符，应调节顶端的螺母或上下拉动弹簧秤面板，以调节零位。

(2) 固定弹簧秤顶端上的圆环使被测力作用在挂钩上，待弹簧伸长处于静止时，从指针指示的刻度可读出力的大小。

使用注意：

(1) 被测力的方向应与弹簧同轴，弹簧和指针不与面板接触，否则会增大误差。

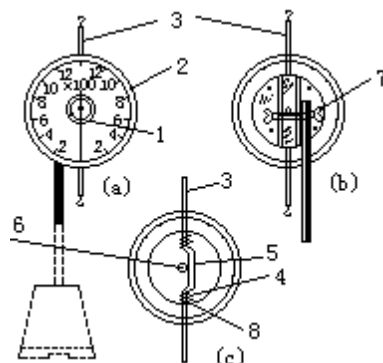
(2) 用毕应及时去掉挂钩上的负荷，使弹簧呈自由状态。秤应存放在

干燥处，避磁、避免腐蚀性气体。

2. 用圆形测力计测量力

圆形测力计的量程一般为 0-1200 克；最小分度值为 100 克/格。

结构 外形的正面如图(a)所示，外形背面如图(b)所示，内部构造如图(c)所示。



1. 指针 2. 圆盘 3. 支杆 4. 螺旋弹簧
5. 齿条 6. 齿轮 7. 连接杆 8. 调节器

它的主要构造是一对支杆 3 和齿条 5 连接起来。齿条又借上下两个螺旋弹簧 4 的弹力保持在平衡位置上。齿条和齿轮啮合，指针装在小齿轮轴上。当支杆在力的作用下移动时，齿条带动齿轮使指针偏转。

圆盘 2 上面的刻度是从零起向左、右各有 12 个分度，每分度表示 100 克。这个刻度表明圆盘测力计的测量范围是 1.2 千克。如果无力作用时刻度盘上的零刻线没有和指针对正，可以转动刻度盘来调整。

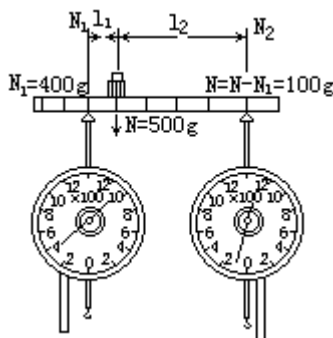
8 是调节器，转动调节器，可以改变齿条两端的螺旋弹簧的圈数，从而调整指针偏转角度大小与作用力大小之间的关系。

测力计背面有一根用螺纹旋进去的连接杆 7，它可便于用台座把测力计夹持在需要的位置上。

测量方法：

(1) 调整：先将测力计夹持好，旋转盘面使指针指零。然后给测力计挂一个已知重力的砝码，若指针的示数与砝码重力不一致时，旋转调节器进行调整。再用精确的砝码，从 100 克起，逐次增加 100 克，直加到 1200 克，逐次检查指针的示数是否与砝码的重力符合，如不符合，就要对刻度加以修正，不能再用调节器调整。

(2) 测量举例：测定重物放在梁上对两个支点所施的压力。



如图所示，在两个测力计的轴上装上支承刃，把工字梁搁在两个支承刃上并使梁的位置成水平。然后调整测力计的刻度盘使指针指正零刻线，这样，工字梁上放置重物以后测力计的读数既不包括工字梁本身的

重力，又可使工作简化。

然后把砝码放在工字梁上，这时两个测力计的读数，就是砝码对梁的两个支点所施的压力，两力之和就是砝码的重力。两个支点与砝码的距离和两个支点所受的压力成反比，即 $N_1 \cdot l_1 = N_2 \cdot l_2$ 。在图中， $N_1 = 400g$ ， $N_2 = 100g$ ，则 $N = 500g$ 。

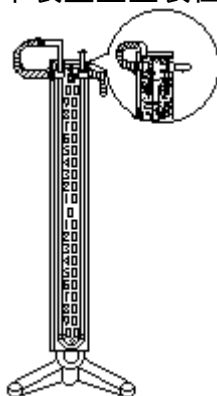
注意事项：

- (1)不得测冲击力。
- (2)存放时勿使连杆受外力变形，注意保持上下连杆的同轴度。
- (3)仪器内部机构要保持良好的润滑。

3. 用微小压强计测量压强

微小压强计的测量范围是 400 毫米液柱，其分度值为 1 毫米。

结构，如图。内径 3.5-4 毫米的玻璃管呈“U”形，固定在有毫米刻度的面板上。U形管的一个管口通过胶管跟压强计背面的 T 形三通管水平口相接，T形管的另一水平口供外接测量用。T形管的下管口接一小段胶管；胶管上夹有皮管夹；整个装置竖直装在三足支架上。



测量方法：

(1)把有色液体(水或酒精等)注入U形管中，液面高度为管的一半。加注液体时不得在液体中夹入气泡。

(2)将测量仪器用胶管接在T形管空着的水平管口上。

(3)先将T形管下口打开，使U形管两管液面均与大气相通，待U形管液面平稳后，封住T形管下口，再用测量仪器去感受待测压强。U形管两管液面将出现高度差。

(4)读数方法：

U形管两管液柱高度差 h 即为待测压强与大气压的差值，读数值精确到毫米级。设U形管内液体密度为 ρ ，则该压强值 $p = \rho g h$ 。

h 可正可负，在U形管开口端液面高时， h 为正，表示被测压强比大气压高 $p = \rho g h$ ；相反，当 h 为负，表示被测压强比大气压低 $p = | \rho g h |$ 。

4. 用托里拆利管测大气压强

托里拆利管为一端开口，长约一米，内径 4-7 毫米的玻璃管，附一透明的水银槽。加上一根有毫米刻度的米尺，一个铁架台，即可测量大气压强，准确到毫米汞柱高。

测量方法：

(1)向水银槽注入一半水银。将尺竖直固定在铁架台上，尺的一端可

直接插入水银槽的水银中。

(2)用漏斗将玻璃管注满清洁的水银。注入时若混入气泡，可用一细长铜丝插入玻璃管捅出气泡。

(3)用食指封住管口，慢慢倒过来，把管口浸没在水银槽的水银中后，再松开封口的食指*，使水银柱平行靠近尺的基准面。

(4)读出上下水银面的高度差，即得大气压值。

附录：水银清洁法

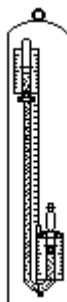
(1)用几层干净的布兜住水银，将布边捏在一起。用一只手抓住布边，另一只手不断旋拧布兜，使水银从几层布的纤维中挤出，就可清除混在水银中的灰尘等污物。

*水银蒸气有剧毒，实验时要特别注意食指不能有伤口，且实验时间要尽可能短。

(2)把过滤后的水银倒入稀硫酸溶液里，不断搅拌，可清除其中的铁、铜等金属及氧化物。

(3)吸出稀硫酸后，要用清水冲洗水银，除去表面的酸液。最后用吸滤纸吸去水银面上的残留水珠，水银就变得很清洁了。

5.用曲管气压计测量大气压



曲管气压计结构如图。U形玻璃管固定在长方形木板上。其中长管上端封闭，短管向上开口，在木板上装有刻度尺，长短两管均装有游标，用以指示水银面的位置。

测量方法：

(1)加入水银。

用细铜丝穿入玻璃管里直至封闭的一端，先将玻璃管竖直放置，管口向上，向短管中滴入水银，每注入5厘米左右，就转动细铜丝，使水银进入弯管部分。然后将玻璃管水平放置，使长管在下，短管在上，同时转动细铜丝，使水银流经弯管进入长管。最后用手堵住管口将玻璃管倒置，并将其上下摇动，利用水银的重力使水银全部落到封闭端。按照此法逐渐加入水银，直到水银注满长管，达到弯管部分为止。

(2)形成托里拆利真空：小心地竖起气压计，封闭端就会出现托里拆利真空，这时短管中水银面上升，若仍达不到下标尺中部，可再滴入少许水银，使水银面达到下标尺中部。

(3)测定大气压：移动上、下游标，与水银面对齐，在刻度尺上读取水银面的高度值。长管示值为 h_1 ，短管示值为 h_2 ，则当地大气压值 $h = h_1 - h_2$ 。

测量时要注意：

(1)曲管气压计应竖直放置。

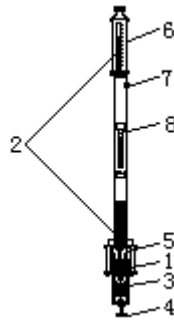
(2)托里拆利真空中不能混进空气。

(3)水银不清洁，玻璃管不干燥，有水气等原因都会造成误差。

6.用槽式气压计测量大气压

槽式气压计（福廷气压计）是在托里拆利管的基础上制成的。它能较精确地测定大气压强值，其准确度达0.2毫米汞柱。

槽式气压计的结构如图所示。一根长约1米，一端封闭一端开口的玻璃管2，注满水银后开口向下倒立在水银槽1里，其上端（封闭端）即形成托里拆利真空。水银槽的底部是一个皮囊3，皮囊下面有一个螺丝4，调节这个螺丝，即可使皮囊挺起或下垂，从而调节水银槽里水银的高度。水银槽上面有一个象牙针5，它的针尖向下指着槽的水银面，此水银面即为测量的基点。整个装置用一个金属套管罩着，套管在水银槽和玻璃管的顶部各开有一个玻璃窗，便于观察和读数。水银槽与金属套管之间装有皮垫，它使槽中水银既与大气相通而又不能流出。金属套管顶部的玻璃窗6的边沿，刻有毫米刻度，可读出管内水银柱的高度，为读出较准确的读数，在刻度尺上装有游标，旋转螺丝7可操纵游标尺上下移动，使读数准确到0.2毫米，它的原理和读数方法与游标卡尺相同。在金属套管的中部还附有一个温度计，用于进行温度修正。



测量方法：

(1)转动螺丝4，使槽内水银面刚好和槽上象牙针尖接触，再转动螺丝7使游标尺的下缘正好与水银面的凸弯月面相切。

(2)从前后两个窗口读出刻度尺和游标尺的刻度，相加即得大气压强值。

重力和温度修正：

在采用毫米汞柱做压强单位时，是指在标准状态下，即水银是0℃时的密度，重力加速度 $g_0 = 9.80665\text{m/s}^2$ 的条件下的汞柱高度，所以在较精确的测量中，要根据重力加速度和环境温度进行修正。

(1)重力修正

设在标准状态下，大气压强的值为 h_0 ；在当地重力加速度为 g_1 时，实际高度为 h_1 ，则

$$\rho h_1 A g_1 = \rho h_0 A g_0。$$

即得

$$h_0 = h_1 \frac{g_1}{g_0}$$

h_0 即为 h_1 在标准状态下(g_0)的修正值。

(2)温度修正

在 g 值不变（就是使用地点不变时），温度由0℃变到 t ℃，则

$$p_0 = \frac{G}{A} = \frac{\rho_0 H_0 A_0 g}{A_0} = \rho_0 H_0 g ,$$

$$p_t = \frac{G_t}{A} = \frac{\rho_t H_t A_t g}{A_t} = \rho_t H_t g .$$

要使 $p_0 = p_t$, 即

$$H_t = H_0 \frac{\rho_0}{\rho} .$$

由于 $\rho_t = \rho_0(1 - \beta t)$, 水银的体膨胀系数 $\beta = 1.8 \times 10^{-4} \text{ } ^{-1}$, 可得

$$H_t = H_0 \frac{\rho_0}{\rho_0(1 - \beta t)} = H_0 \frac{1}{(1 - \beta t)} .$$

在温度为 t 时, 读取液柱高度为 H_t , 可以换算成 0 时水银柱高度 H_0 , 即

$$H_0 = H_t(1 - \beta t) = H_t - \Delta H_0 .$$

所以, 可由测量值 H_t 减去下表中的 ΔH 值, 求出 H_0 .

Ht H t ()	720mm	740mm	760mm
6	0.7mm	0.7mm	0.7mm
8	0.9	0.9	1.0
10	1.2	1.2	1.2
12	1.4	1.4	1.5
14	1.7	1.7	1.8
16	1.9	1.9	2.0
18	2.1	2.2	2.2
20	2.3	2.4	2.5
22	2.6	2.6	2.7
24	2.8	2.9	3.0
26	3.0	3.1	3.2
28	3.3	3.4	3.5
30	3.5	3.6	3.7
32	3.7	3.8	4.0
34	4.0	4.1	4.2

注意事项: 槽式气压计应竖直悬挂在固定处, 不要随便搬动。如必须搬动, 要注意在搬动过程中保持竖直状态。

(三) 测量力和压强的特殊方法

1. 用扭秤测光压

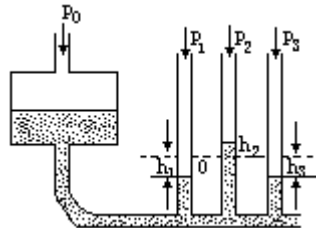
用扭秤测量光压的装置是用一根细石英丝悬吊一根很轻的横杆, 在横杆的两端各挂一个很轻的圆盘, 由它们组成一个极其灵敏的扭秤。为

排除空气干扰，将整个装置封闭在抽成高度真空的玻璃容器中。

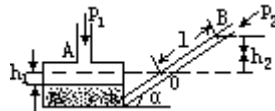
将待测光线照射在一个圆盘上，横杆在光压力矩的作用下将转过一个微小的角度，此时石英丝的扭矩与光压力矩平衡。测量出角，即可算出光压值。

2. 用多管压强计同时测量多点压强

液柱式多管压强计如图所示。用多根测量管与宽口容器连通，构成多管压强计。它可用于多点压强及真空的测量。由于宽口容器截面积比各测量管截面积大得多，其液面高度基本不变，所以只要根据各测量管液柱升降值，由公式 $p_i = p_0 \pm \rho g h_i$ 即得各测量值。



3. 用斜管微压计提高微小压强的测量精度



为了提高微小压强的测量精度，可采用如图所示的斜管微压计。液面原来在 0 点所在的平面上，如果将要比较的两个压强 p_1 、 p_2 分别作用于 A、B 两管口，则计示压强

$$p_1 - p_2 = \rho g h_2 = \rho g l \sin \alpha$$

式中， l 是斜管上的液柱长度（读数）， α 是斜管的倾斜角。因为， $l = h_2 / \sin \alpha$ ，可见斜管读数 l （零点在 0 处）比相应的 U 形管压强计读数 h_2 放大了 $1/\sin \alpha$ 倍，因而提高了读数的准确性。

在 p_1 的作用下，宽口容器液面下降的高度

$$h_1 = l \frac{S_2}{S_1}$$

所以，压强 p_1 的准确表达式为

$$p_1 = \rho g (h_1 + h_2) = \rho g \left(\frac{S_2}{S_1} + \sin \alpha \right) l$$

式中， S_1 、 S_2 分别表示宽口容器及测量管的横截面积。

斜管倾斜角度 越小，读数放大倍数越大，但 过小，则因斜管内液面拉长而增大了摩擦阻力，且易造成液柱断裂，因此 角一般不小于 15° 。斜管微压计的一般使用范围在 100-2000 帕之间。

六 温度的测量

（一）温度和它的单位

1. 从观察火候开始

对火的控制利用可以远溯到六千年前的仰韶文化（陕西半坡村出

土)和更早的河姆渡文化(浙江余姚出土)时期的新陶。河北唐山大城龙山文化遗址中也发现有红铜制成的铜器。随着火在制陶和冶金中的应用,温度测量的技术便诞生了。“火候”就是定性判断温度的方法。在《荀子·强国》篇中即把“火齐得”视为铸造青铜器的关键技术之一。这里的“火齐”即指“火候”。用观察“火候”来判断温度高低的依据是:物质温度变化时它的物理性质也会随之发生变化。这一科学思想一直延续至今,它是一切测温技术的基础。

随着人类对热现象认识的深入,16世纪末,发明了第一个温度计。1593年,伽利略利用气体热胀冷缩的性质,制造了世界上第一个气体温度计,形状如图。伽利略温度计的下端与大气相通,使得用作指示温度高低的玻璃管中的水位除受空心球中空气温度的影响外,还受大气压强的影响。为了克服这一缺点,伽利略的学生斐迪南用酒精为工作介质,于1654年制成了世界上第一支液体温度计。

但是酒精的沸点只有 78°C ,不能测量较高的温度,于是水银温度计(沸点 357°C)应运而生。但因水银在 -39°C 时要凝固,所以测低温时,仍用酒精温度计(酒精温度计的测温范围在 -114°C - 78°C)。



随着科学技术的进步,人们要求测量更高和更低的温度。在1854年,西门子发现了某些金属电阻有随温度变化的性质,于是造出了电阻温度计。后来杰别克又发现了热电现象,制造了热电偶温度计,这种温度计可以测量上千摄氏度的高温。

目前,还有一种辐射温度计可测量数千甚至上万摄氏度的高温。

新技术利用间接测温的光谱法,已能在远离被测物体的情况下测量几万开尔文甚至几十万开尔文的极高温了。

2. 温标和温度单位

温标是指度量温度高低的标尺,历史上曾出现过十多种温标。

(1) 经验温标

经验温标中在选定温度的参考点时,用得最多的是水的冰点和沸点。

在华氏温标(1709年德国华伦海特建立)中,规定在一个标准大气压下水的冰点为 32°F (华氏度),沸点为 212°F ,中间为180等分,每等分为1华氏度,用 $^{\circ}\text{F}$ 表示。

在摄氏温标(1742年瑞典摄尔修斯建立)中,规定在一个标准大气压下水的冰点为 0°C ,沸点为 100°C ,中间为100等分,每等分代表摄氏1度,用 $^{\circ}\text{C}$ 表示。

经验温标的缺陷是温度的读数与测温物质有关,如制成的温度计所用材料(如酒精、水银等)不同,则除了参考点的示值相同外,中间各点都不相同,换算十分麻烦。

(2) 热力学温标(1848年)

热力学温标(也称绝对温标,开尔文温标)是英国的开尔文在1848

年根据与工作物质无关的卡诺循环和热力学第二定律提出。热力学温标规定用单一固定点水的三相点（冰、水、汽三相平衡）来定义，并严格规定它的温度为 273.16K（开尔文），1K 规定为水的三相点的热力学温度的 $1/273.16$ 。

热力学温标只是一种理想温标，因为理想卡诺循环不可能实现，其实际应用通常是由理想气体温标和低压下近似于理想气体的氢、氦、氮等测温介质制成的气体温度计（如定容气体温度计）来实现。可以证明，在很大的测温范围内，理想气体温标和热力学温标是完全一致的，气体温度计装置十分复杂，使用极为不便，目前也只有少数国家的实验室才能进行该项测定工作。

(3) 国际实用温标（1968 年）

为了方便地实现热力学温标，在 1927 年第七届国际计量大会上出现了国际温标，它是近代第一个国际温标。

国际实用温标经 1948 年、1954 年、1960 年和 1968 年的修改后更加完善，现在使用的国际实用温标就是 1968 年第十三届国际计量大会通过的。我国于 1973 年开始使用该温标。

“1968 年国际实用温标”规定，以热力学温度为基本温度，符号为 T_{68} ，单位为 K（开尔文）。规定水的三相点热力学温度为 273.16K，定义 1K 等于水的三相点温度的 $1/273.16$ 。

还规定可以使用摄氏度单位，符号为 t_{68} ，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ，并定义， $t_{68} = T_{68} - 273.15$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）。

式中 t_{68} 为摄氏温度，单位 $^{\circ}\text{C}$ ， T_{68} 为热力学温度，单位为 K， $T_0 = 273.15\text{K}$ ， T_0 是水的冰点的热力学温度，它和水的三相点的热力学温度相差 0.01K。

在这个定义中，摄氏温标的零点与水的冰点并不严格相符，其原因是现在的水的冰点温度不再是在经验温标中人为规定的零点，而是热力学温标中的一个测量值。根据同样的道理，水的沸点也不再严格地等于 100°C 。实验表明，摄氏温标的零点和冰点的差值不超过万分之一，沸点与 100°C 的差则不超过百分之四。

按国际计量组织的最新规定，从 1990 年 1 月 1 日起，水的沸点的 newValue，在一个标准大气压下为 99.975°C 。

3. 温度阶梯（0- 10^{32} 开尔文）

在温度世界中，0 是将温度分为低温世界和常温、高温世界的主观标准。

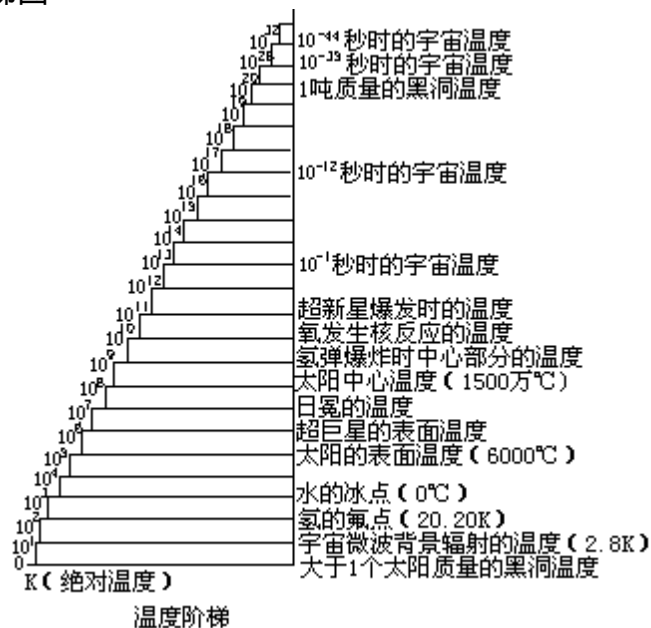
沿着温度阶梯，从 0 往下走一级，就进入了低温世界，南极夏天平均温度只有 -30°C ，冬天则可达到 -99.5°C ，许多行星上的温度更低，天王星的表面温度约为 -180°C 。太阳系中，表面温度最低的行星是海王星，约为 -230°C 。人类通过各种制冷方法，在 19 世纪已能使氦气（ ^4He ）液化，其沸点只有 4.2K，那是翁纳斯在 1908 年实现的。接着使氦的同位素中最难液化的氦 3（ ^3He ）液化，温度为 3.2K。在低温世界，许多物质的性质都会发生奇妙的变化，例如在极低的温度下，空气变成了蓝色的液体；面包、鸡蛋会发光；更吸引人的是低温下的超导和超流现象。

目前，人们利用减压降温法已获得了 0.3K 的低温；用稀释制冷法已

获得了 0.002K 的低温，而用绝热去磁法则可获得 0.00002K 的超低温，这是目前人工方法所能获得的最低温度。科学家预言，在宇宙空间，有一种大质量的黑洞，其温度可小于或等于 $10^{-8}K$ 。

从 0 开始沿温度阶梯往上走，就进入了常温世界，37 是人体的温度。再沿阶梯往上走，开始进入高温世界。在 100 时水开始沸腾，由液态的水变为汽；1000K 是火炉的温度；5000K 是电弧火焰的温度，这时所有的金属都将熔化为液态。目前人们已能获取的最高温度是使氘核和氚核实现热核反应的温度，高达 5×10^7K ；在宇宙空间，超新星爆发时的温度可达 $10^{10}K$ 。但这还不是温度阶梯的顶峰，许多科学家认为，在温度阶梯的最高层，应是宇宙历史最初瞬间所具有的温度，离这一时刻 10^{-44} 秒时，温度可高达 $10^{32}K$ ，也就是 1 亿亿亿亿度，这才是温度阶梯的最高层。

温度阶梯图



(二) 测量温度的一般方法

1. 用酒精温度计和水银温度计测量温度

酒精温度计和水银温度计都是液体膨胀式温度计。其常用规格如下：

酒精温度计，测量范围 -30—+70 ；

水银温度计，测量范围有 -15—+150 ， -25—+30 ， -30—+50 ， -10—+100 ， -15—+115 。

其测量精度决定于温度计的分度值。常见的有 1 和 0.1 两种。

测温原理：

玻璃液体温度是利用玻璃感温泡内的测温物质（酒精、水银等）受热膨胀后体积发生变化来测量温度的。

设 0 时温度计内液体的体积为 V_0 ，t 时为 V_t ，液体的膨胀系数为 β ，当忽略玻璃体积变化时有

$$V_t = V_0 + V_0 \beta t。$$

因温度升高液体增加的体积为

$$V_t = V_t - V_0 = V_0 \quad t。$$

在毛细管内液柱的高低将显示出 V_t 的变化，将此液柱的长度按温标分度，就可以指示出温度值。

液体温度计的结构如图。这是玻璃液体温度计的结构，玻璃液体温度计是由带毛细管的玻璃棒（硅硼玻璃或石英玻璃）和感温泡组成的。



温度计的玻璃外壳是直接和测温介质接触的，它要求玻璃加热后发生的形变要小。一般都选用特殊的耐热玻璃，例如硅硼玻璃。对测温上限在 500 以上的玻璃温度计，常用耐热很高的石英玻璃制造。

温度计的感温泡的主要作用是储存液体和感觉温度，要求它能很快地与被测温物体趋向热平衡。为使它传热快，多数感温泡是泡壁很薄的圆柱形或珠形泡。

毛细管是用来供液体膨胀用的，要求它细而直，内径要均匀。

安全泡是置于毛细管的顶部的一个膨胀室，用来防止温度过高时液体把玻璃管胀裂。

玻璃温度计内的液体，是感受温度变化的。要求它凝固点低，气化点高，这样，就能获得较宽的温度量限。管内的液体要纯净，不沾污玻璃，为获得较高的灵敏度，它的体膨胀系数要大。除酒精和水银外，常用的液体还有甲苯、煤油、戊烷等。

测量方法：

(1) 根据实验的要求选择量程合适的温度计，温度计不允许在测量范围以外的温度下使用，以防止温度计炸裂。

(2) 测温时，将温度计的感温泡置于被测液体中*，待热平衡后读数。

(3) 读数时温度计应留在被测液体中。

使用注意：

*特殊的浸入深度可见说明书。

液体温度计常见的故障是出现断柱现象（即毛细管内液柱断裂），这时切不可敲打，可以用手握住温度计的上端，急速地甩动或放在离心机上转动，使液体断柱现象消除。

水银温度计的误差分析：

(1) 读数误差

读数时，必须视线跟温度计刻度垂直，否则会引起读数误差。

(2) 零点位移

玻璃温度计的缺点之一是读数会随时间而发生变化。这是玻璃制造在冷却过程中，保持了永久应力所致。在永久应力作用下，经过较长时

间后，会使玻璃泡和毛细管因变形而改变体积，导致零点的移位。

(3) 外露液柱引起的误差

温度计上的刻度是在全部浸没或部分浸入（局浸式）中刻定的，如在实测温度的过程中浸没的液柱没有达到要求的深度会给读数带来误差。

2. 用热敏温度计测温

热敏温度计（J0301 型）与电流计配合，可以实现测温。

测温范围：0—100℃，

电源：直流 1.5V 或 3V，

配用电流计：电压灵敏度 S_u 在 80—100mV 之间。

用热敏温度计（J0301 型）测量温度，其准确度取决于热敏元件，由于热敏元件性能不很稳定所以配用的电流计精确度不宜太高。

结构 热敏温度计的外形如图。由测温元件和放大器两部分构成。



放大器装在盒内，盒面上有两个旋钮，左边的旋钮是校准调节旋钮，右边的旋钮是转换开关。两个接线柱分别标有“+”、“-”符号，供外接电流计用。仪器本身的电源在盒内，用干电池供电。

测温元件是点接触半导体热敏元件，外加一个铁管保护套。

测量方法：

(1) 配用电流计的选择 配用电流计的电压灵敏度应在 80—100mV 之间（如 J0401 型演示电流计），但一般电流计只标有电流灵敏度 S_i ，还要根据表头内阻 r_0 来计算 S_u 。 $S_u = S_i \cdot r_0$ ，如 J0401 型演示电表 $S_i = 200\mu\text{A}$ ，其 $r_0 = 500\Omega$ ，计算得出 $S_u = S_i \cdot r_0 = 200 \times 10^{-6}\text{A} \times 500\Omega = 0.1\text{V} = 100\text{mV}$ 。满足本仪器的使用要求。

(2) 温度指示盘的制作

将 J0401 型电表接到 500 μA 档，将表的接线柱与热敏温度计相应的接线柱相连，在表面上粘一张白纸。

将热敏温度计的 K_1 旋钮拨到 100℃，电流计指针会偏转，调节校准旋钮 W，使电流计指针满刻度，在指针所停位置标记为 100℃。此后 W 旋钮不可再动。再将 K_1 拨到“0℃”档，电流表指针所停位置记为 0℃。

最后将 K_1 拨到“测温”档，这时 R_t 被接入电路。将感温元件 R_t 与一标准温度计靠在一起，同时放入冰水中。边测边缓慢加热，就可把相应的温度值一一标记在电流表指针位置上。由于温度的上升是一个动态过程，标记温度要快速、敏捷（可每 5 刻一格）。值得注意的是由于热敏电阻是非线性元件，所以刻度是不均匀的。

(3) 测量

用感温元件的尖端接触待测物体，电表指针偏转。待指针稳定时，所示读数即被测温度值。

注意事项：

(1) 用毕应将开关拨到“关”的位置，切断仪器内部的电源。

(2)长期存放时应将电池取出，以免电池漏液腐蚀盒内元件。

(3)在连续长时间使用后，由于电源电压降低，示值偏低，需随时调节校准旋钮，调整的方法是在 100 时使指针满偏。

(4)本仪器一经制作完成，则感温元件，配用电表及温度刻度盘只能原物配套使用。

(5)本仪器不能在高电压、强电流、强磁场的环境下使用。

(三) 测量温度的特殊方法

1. 用亮度测量高温

亮度法是用得最多的一种测温方法，测温范围为 800—4000 ，其中，窄带光谱光电高温计是目前间接测温技术中最准确的一种，如金的凝固点温度可测到 1064.43 ，它的准确度可达 0.04 。

亮度测温的理论基础是普朗克定律。它定量地描述了绝对黑体的光谱辐射亮度与其温度以及波长之间的函数关系：

$$L_{\lambda, \tau} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left[\exp \left[\frac{C_2}{\lambda T} \right] - 1 \right]^{-1}。$$

式中 $L_{\lambda, \tau}$ 为绝对黑体在温度为 T ，波长为 λ 时的单色辐射亮度； C_1 为第一辐射常数，等于 $2hc^2$ ， C_2 为第二辐射常数，等于 $1.4388 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ ； T 为绝对黑体的热力学温度，单位为 K ； λ 为波长。由上式可知，绝对黑体的光辐射亮度 $L_{\lambda, \tau}$ 是温度和波长的函数。

但实际测量的物体不是黑体，其辐射波长也非单一波长，因此，引入亮度温度和有效波长的概念。将黑体辐射在某一波长下所发射的光辐射亮度温度 T_s ，转化为同一波长下真实物体辐射的亮温 T ，并在定义某一温度点时使用极限有效波长的概念。

这样处理之后，亮度温度计在计量真实物体温度时，虽然直接得到的是亮度温度，根据物体的光谱发射系数，可将其修正到真实温度。

在 4000K 以下，利用维恩公式取代普朗克公式，并引入有效波长概念，最后可得下式，

$$\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda_e}{C_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda_e, T}}。$$

式中， T_s 为被测物体的亮温 (K)， T 为被测物的真实温度 (K)； λ_e 为有效波长； $\epsilon_{\lambda_e, T}$ 为 λ_e 下的物体光谱发射率。

2. 用二极管温度计测量低温

测量范围：1—400K，精确度为 0.1K。

测量电流：> 10uA。

配用仪器：恒流源，数字电压表。

二极管温度计是利用 P-n 结二极管流过一定恒定电流时，其正向压降随温度降低而上升的原理测量温度的。多用砷化镓和硅二极管制成低温感温元件，当测量电流为 10uA 时，电压灵敏度为 77K 时约为 3mV/K。

测量时用一台恒流源供电，由于其测量电流受电噪声的干扰，要求大于 10uA。因此，其热损耗在液氦温区就显得很严重，而使测量误差较

大。将数字电压表的输入端正、负极与二极管正负极相连，即可进行测量。

七 直流电学量的测量

(一) 电流强度和它的单位

1. 从雷电观察说起

人们对电的认识，最早是从雷电开始的，在我国，早在殷商时代的甲骨文中，已有“雷”字，西周时代的青铜器上也已有了“电”字。王充《论衡·雷虚篇》中有“云至则雷电击”的记载，当时人们已有雷电的观察和记录。

对于静电的认训，则可追溯到公元前六世纪，那时，古希腊的哲学家塞利斯(Thales)已经发现了摩擦过的琥珀能吸引轻小物体的现象。我国东汉时期的王充《论衡》一书中也已有“顿牟掇芥”的记录，与塞利斯的观察相同。

而对电的测量则迟至 16 世纪，最先是从小静电的测量开始的。英国女皇伊丽莎白一世的御医吉尔伯特作了开创性的工作，他用金属制成指示器，放在支架的尖端。如果摩擦过的琥珀接近指示器一端，指示器就会转动。以此检测电的存在。

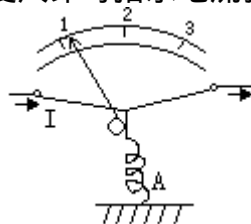
到了 18 世纪中期，荷兰莱顿市的穆兴布罗克在 1745—1746 年间发明了莱顿瓶，在此基础上里奇曼制作了静电指示器，这是世界上第一台测量电的仪器。它由金属条上拴一根亚麻绳构成，当金属条带电时，亚麻绳会偏向一边，偏角的大小则由固定在金属条旁边的刻度盘测定。到了 18 世纪后期，意大利牧师贝内特发明了金箔验电器。

真正第一个使电的研究从定性走上定量化的人是法国的物理学家库仑(1736—1806 年)，在 18 世纪 80 年代，库仑利用自己发明的库仑扭秤，确定了静电相互作用的库仑定律^{*}。此间，库仑第一次引入了“电量”的概念，并确定了电荷之间的相互作用力正比于它们的电量。

18 世纪 80 年代开始，意大利的医生伽伐尼制造了人类第一个直流电源——伽伐尼电池。以后新的化学电池一个接一个地出现，为电流的研究和测量奠定了基础。

随着电流的热效应、化学效应、磁效应、力的效应和光的效应的发现，电流测量技术也愈来愈进步。

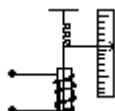
热线电流计是利用电流热效应原理制成的，结构如图。在电流流过的细导线中部，用一绝缘线拉住，绝缘线绕过一个带有指针的滑轮而与弹簧 A 相连。当电流通过时，导线受热伸长，A 就把导线向下拉，因此指针被滑轮带动向右转。刻度尺即可指示电流强度值。



电解定律指出了电解时在电极上析出的物质质量跟电流强度和通电

时间都成正比，而电解时析出的物质质量是可以非常精确地测定的，据此制作的库仑计和电量计，通过电解时析出物质的质量来测定电流强度和电量。

根据电流的磁效应制造了动铁式电流计，其示意图如图。还制造了正切电流计。



今天运用得最广泛的是电磁式和磁电式电流计，它们都建立在磁场对通电导体作用的基础上。

对交流电的测量是在 1904 年英国的费莱明发明了二极管之后，利用二极管的整流作用将交流电转变成单向脉动电流而得以实现的。

*实际上，卡文迪许在 18 世纪 70 年代已用实验方法确定了电荷之间的相互作用定律，但当时没有公布，直到 19 世纪由麦克斯韦公布后才为后人所知。

2. 安培

安培是国际单位制中表示电流强度的基本单位，它的符号是 A。

电流强度单位安培的定义经历了一百多年的历史。在真空中，截面积可忽略的两根相距 1m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 $2 \times 10^{-7} \text{N}$ ，则每根导线中的电流为 1A。

(1) 厘米、克、秒制单位

1851 年，韦伯根据电磁现象可以分别用两个磁极之间作用力或两个电荷之间作用力这两种相互独立的方程系来描述，提出了电磁和静电的厘米、克、秒单位制。电磁系单位制规定：两个同样大小的电流，当它们相距为 1 厘米，相互作用力为 1 达因时，这时的电流强度为 1 毕奥，这个单位是静电系单位 1 夫兰/秒的 3×10^{10} 倍，这一数值有非常重要的意义，因为 3×10^{10} 厘米/秒恰好是光速。

静电系和电磁系都是以厘米、克、秒制展开（即 CGS 制）的系统方法。每一个相继的方程只包含一个新的量，这样所有量值的单位便能从方程中一个接一个地导出。在静电系中第一个方程是库仑定律

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2}。$$

其中取 $K = 1$ 时，电荷的单位叫夫兰(Franklin)。在电磁系中第一个方程是安培定律

$$\frac{F}{L} = r \frac{2I_1 I_2}{d}，$$

其中取 $r = 1$ 时，电流的单位则为毕奥。

这两种单位都是绝对单位或称理论单位，因为它们是逻辑思维的产品，没有特定的明确的标准为依据。

(2) 国际安培(1908 年)

1881 年第一届国际电学大会决定引入绝对实用电学单位制，它的实用电流单位为安培，1 安培等于电磁厘米·克·秒单位制的电流单位的 1/10。1908 年在伦敦举行的国际电量单位大会上确定了这个单位制，并

定义国际安培为：在 1 秒时间间隔内从硝酸银溶液中析出 1.11800 毫克银的恒定电流。

(3) MKSA 制的安培 (1954 年)

乔吉第一个认识到如果三个基本单位用米·千克·秒来替换，那么焦耳(等于 10^7 尔格)将在所有领域内成为功和能的自然单位，而且欧姆、安培、瓦特将成为新的单位制中的自然单位。

乔吉提出这一新的单位制中有四个基本单位，除米·千克·秒外还应有一个电量单位。这就是 1935 年国际计量委员会通过的 MKSA 制，其中 M 表示米，K 表示千克，S 表示秒，A 表示安培。并于 1940 年作为一个新的单位制而生效，只是由于第二次世界大战的影响，直到 1954 年第十届重量和计量会议上才使 MKSA 制正式合法化。

在 MKSA 制中，是利用安培定律的方程来定义安培的。

(4) SI 中的安培

我们现在所使用的安培定义是 SI 的定义。在 SI 中，库仑定律和安培定律的系数 K 和 r 必须写成 $\frac{x}{4\pi}$ 和 $\frac{y}{4\pi}$ 的形式，通常 x 写成 $\frac{1}{\epsilon_0}$ ， y 写成 μ_0 ，这样 ϵ_0 的值应该约为 8.85×10^{-12} 库²/牛·米²， μ_0 应为 4×10^{-7} 牛/安²，系数 ϵ_0 和 μ_0 称为真空介电常数和真空磁导率。

(二) 电测量指示仪表的一般知识

1. 电测量指示仪表是测量各种电学量的仪表，通常简称为电表。其主要作用是将被测电学量变换成仪表活动部分的偏转角位移。所以，电表在结构上可分为两部分：

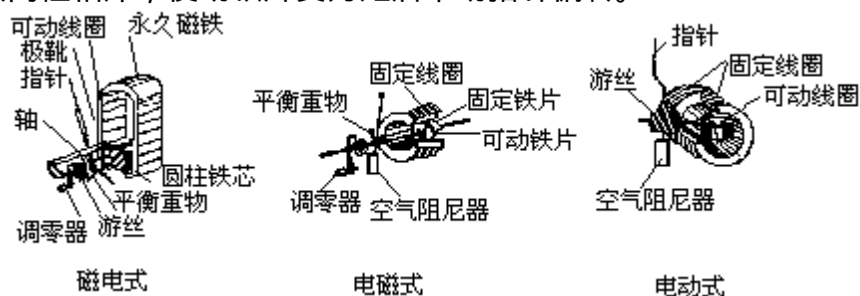
(1) 测量电路 作用是将被测电学量(如电流、电压等)转换为适合测量机构(也称表头)直接测量的电学量。如分压、分流、整流等。

(2) 测量机构 通称表头，作用是将被测的电学量转换成仪表可动部分的偏转角位移。

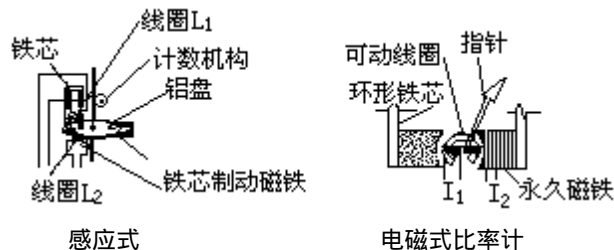
2. 五种常见表头的结构及原理

(1) 磁电式(动圈式) 可动线圈处于永磁铁的气隙磁场中，如图。当线圈中有电流通过时，它在磁场中会受到力矩而带动指针偏转。同时，游丝产生反力矩，当两个力矩平衡时，指针就停在某一位置上，指示被测电学量的数值。

(2) 电磁式(动铁式) 在固定线圈内有一块固定铁片和一块可动铁片，如图。当线圈中有电流通过时，两铁片都被磁化并呈同一极性。因磁极同性相斥，使动铁片受力矩后带动指针偏转。



(3) 电动式 在固定线圈内有一可动线圈，如图。当两组线圈都有电流通过时，由于载流导体相互作用，使动圈受力而带动指针偏转。固定线圈与可动线圈中电流的大小都能影响指针偏转角度。



(4) 感应式 图中当线圈 L_1 、 L_2 分别通过交变电流时，在铁芯气隙中产生移进磁场，使铝盘处于气隙的部分产生涡流。涡流在磁场中受力使铝盘转动，同时铝盘切割制动磁铁磁力线便会受到一个力，这个力随转速增大而增大。当两力矩平衡时铝盘就会匀速转动。转轴上的涡轮带动计数机构指示被测数值。

(5) 磁电式比率计 两个可动线圈交叉装在同一轴上。有电流通过时，两线圈在磁场中所受力矩方向相反。指针的偏转角度决定于两线圈中通过电流的比值 (I_1/I_2)。由于没有游丝，所以不用时指针将停在表盘任意位置上。

3. 电表的阻尼方式

指针偏转后，由于惯性，需要一定的时间才能稳定下来。为了使电表灵敏，电表的可动部分机械摩擦很小，这样带来的新问题就是指针不易稳定。为了既不影响指针摆动的灵活性，又能使指针在偏转后迅速稳定下来，电表可动部分常设有阻尼装置。常见的阻尼方式有磁电阻尼和空气阻尼两种。

磁电式表头通常采用磁电阻尼器。这种阻尼器是一个铝框，构成闭合回路放置在气隙磁场中。电表的线圈就绕在铝框上。测试时，线圈带动铝框一起偏转摆动，使铝框切割磁力线产生感生电流。这一感生电流在气隙磁场中的受力方向总是与线圈摆动方向相反，因而能使线圈（带着指针）较快地稳定下来。也有些磁电式仪表用首尾相接的多匝线圈代替铝框，以增强阻尼作用。

空气阻尼器通常是装在指针下面的一个薄铝片，在铝片随着指针摆动时，其所受空气阻力总是与摆动方向相反，因而起到加速指针稳定的作用。

阻尼时间是电表电流灵敏度高低的一个重要参数，指从指针开始偏转到稳定下来所需的最长时间。通常用“不大于 x 秒（或 x 秒）”表示。阻尼时间愈小，指针稳定所需时间就愈短。

测量机构的主要作用是：

(1) 产生转动力矩 要使仪表的指针转动，在测量机构内必须有转动力矩作用在仪表的活动部分上。转动力矩一般是由磁场和电流（或铁磁材料）的相互作用产生的，而磁场的建立可以利用永久磁铁，也可以利用通有电流的线圈。磁电仪表是利用固定的永久磁铁的磁场与通有直流电流的可动线圈间的相互作用产生转动力矩的；电磁仪表是利用通有电流的线圈的磁场与铁片的相互作用（或在磁场中的两个铁片的相互作用）产生转动力矩的；电动仪表是利用通有电流的固定线圈的磁场与通

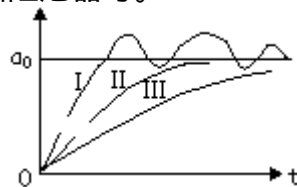
有电流的可动线圈的相互作用产生转动力矩的；感应仪表是利用通有交流的固定线圈与在可动铝盘中所感应的电流的相互作用产生转动力矩的。

(2)产生反力矩 如果仪表只有转动力矩作用在活动部分上，则不管待测量为何值，活动部分都会偏转到满刻度位置。所以，仪表的测量机构内还必须有反力矩作用在仪表的活动部分上，其方向与转动力矩相反。

测量时，转动力矩作用在仪表活动部分上，使它发生偏转，同时反力矩也作用在活动部分上，且随偏转角度的增大而增大，当转动力矩与反力矩大小相等时，指针就停止转动，指示出被测的电学量的大小，这就是电测指示仪表的基本原理。

仪表中的反力矩是利用机械力（例如利用游丝在变形后产生的弹性力）电磁力、磁场中导体的涡流作用等产生的。一般而言，仪表的刻度不一定是线性的。

(3)产生阻尼力矩 从理论上说，在仪表中，当转动力矩和反作用力矩相等时，仪表指针应静止在某一平衡位置。但实际上，由于仪表活动部分具有惯性，仪表通电后，指针不是立刻就停止在平衡位置上，而是在平衡位置的两边来回摆动，见图曲线 I，这就造成读数困难。为缩短摆动时间，必须加上阻尼力矩，使仪表活动部分能更快地静止在平衡位置上。但阻尼力矩必须设计合适，如果阻尼过强（见图曲线 II），等待读数时间更长。而临界阻尼状态（见图曲线 III），到达平衡位置 θ_0 所需的等待读数时间最短。但理想的是近临界的欠阻尼状态见图曲线 IV，这可使仪表指针围绕最后稳定位置稍作左右摆动后再停止。既便于读数，又不易引起错误判断。产生阻尼力矩的装置称为阻尼器，常见的有空气阻尼器，磁感应阻尼器和油阻尼器等。



4. 电测量仪器的级别

它表示仪表的准确度等级。级别数值愈大，准确度愈差。

级别有三种标注方式：

(1)只标级别数字，没有其他记号，如：1.5。这种标注方式是以量限乘以级别的百分数来表示可能产生的最大误差。误差的计算公式 $\Delta = D \cdot a\%$ ，式中 D 为量限。若仪器的量限 D 是 200V，则表示可能产生的最大误差为 $200V \times (\pm 1.5\%) = \pm 3V$ 。如果我们要测的电压是十几伏，用上述 200V 量限的表测误差可能达到 3V，而用同样级别的 20V 量限的表，则误差就在 0.3V 以内。可见，标有这类级别的仪器，使用时要选择适当的量限，被测值一般要大于量限的 2/3 左右为好。

(2)级别数外加一圈，如：0.5。其误差与量限无关而与测量时的示值 x 有关。误差以示值乘以级别的百分数表示，计算公式是 $\Delta = x \cdot a\%$ 。不同的示值 x 允许的误差也是不同的。

(3)级别数下加“V”，如 $\frac{1.0}{V}$ 。为得标注方式的误差以标尺长度乘

以级别的百分数表示，公式是 $\Delta = l \cdot a\%$ 。l 为标尺长度。有些刻度不均匀的标尺，如万用表欧姆档常用上述方式表示准确度。

5. 仪表的误差及其表示

仪表的误差描述了仪表读数与被测量实际值的接近程度，即准确度。根据引起误差的原因，仪表的误差可分两种：

(1) 基本误差—仪表在规定的正常条件下进行测量时其示数的误差。它是由仪表结构和制作技术不完善（如轴承的摩擦和刻度的不准确）等原因产生的。

仪表的正常工作条件是指

仪表指针调整到零位置；

仪表按规定的位置安放；

环境的温度是 20℃，或是说明书标明的温度；

除地磁外，外来电、磁场可忽略；

对交流仪表，电流为正弦波、频率是所规定的频率值。

(2) 附加误差—除基本误差以外，当仪表不是在正常条件下工作时，还会出现“附加误差”。

6. 表头的灵敏度

表头的灵敏度是电表的主要技术参数，有电流灵敏度 (S_i) 和电压灵敏度 (S_u)。它们之间的关系是 $S_u = S_i r_o$ ，式中 r_o 为表头的内阻。通常所说表头的灵敏度是指电流灵敏度 (S_i)，是指针偏转满度时通过表头的电流值（满偏电流）。如表头灵敏度是 50uA，即表示当表头中通过 50uA 电流时指针偏转到标尺满度位置。电压灵敏度 (S_u) 是使指针偏转满度时，加在表头内阻上的电压值（满度电压）。电流灵敏度和电压灵敏度的数值越小，表头的灵敏程度越高。

此外，还有一种用电流灵敏度 S_i 的倒数来表示灵敏度的方式：

$$\text{如 } S_i = 50\mu\text{A} = 50 \times 10^{-6}\text{A}$$

$$\text{又 } 1\text{A} = \frac{1\text{V}}{1\Omega}$$

$$\text{将式代入式，} S_i = \frac{1\text{V}}{1\Omega} \times (50 \times 10^{-6}) \text{ 则 } \frac{1}{S_i} = \frac{1\Omega}{50 \times 10^{-6}\text{V}} = 20\text{k}\Omega$$

/V。它的物理意义是：在电表两端加 1V 电压时，使指针满度所要求电表的总内阻 R_i （表头内阻与附加电阻之和）的大小。这种表示方法的特点是数值越大，灵敏度越高，也便于计算。如要将上述表头设计成 100V 量程的电压表，其总内阻 $R_i = 100\text{V} \times 20\text{k} / \text{V} = 2.0\text{M}$ （兆欧）。万用表常采用这种灵敏度的表示法。

7. 仪表的变差

对于指针式仪表来说，当被测量由零向上限方向平稳增加与由上限向零方向平稳减少时，对应于同一分度线的两次被测量的实际值之差称为“示值的升降变差值”简称“变差”，即

$$\Delta = |A_0'' - A_0'|$$

式中， A_0' 为平稳增加时的实际值。

A_0'' 为平稳减少时的实际值。

一般来说，升降变差不应超过其基本误差的绝对值。

为保证测量结果的准确、可靠，必须按下面几个基本要求选择和使用仪表。

(1)适当的灵敏度和准确度；一般应使待测量的大小为仪表量程的1/2到2/3以上；

附表一 仪表的工作原理与结构图形标记

图形标记	结构型式	图形标记	结构型式
	磁电式		电动式
	磁电式比率计		感应式
	电磁式		静电式
	动磁式		热敏式

附表二 仪表变换器的图形标记

图形标记	变换器名称	图形标记	变换器名称
	光电管变换器		接触式热电变换器
	机械整流器		半导体整流器
	不接触式热电变换器		电子管变换器

(2)变差小；

(3)严格按照仪表规定的适用条件使用或尽量减少外界因素影响；

(4)电流表工作在近临界的欠阻尼状态；

(5)要有良好的读数装置；

(6)要有足够的绝缘电阻、耐压能力和过载能力。

8. 使用保养常识

(1)使用常识：

对被测电量要三清楚：何种电学量要清楚；交流还是直流要清楚；数值范围要清楚。

选择仪器要三符合：用途符合；电学量性质符合；量限符合。

在仪器规定的工作条件下，按规定的接线法，将仪器接入电路。

(2)保养常识：电学测量仪器在搬运、使用及保管过程中，都要注意防潮，防腐蚀性气体，防高温；防剧烈振动。磁电式仪表要避开强磁场。灵敏电流计不使用时，两接线柱应用铜片短接。

附表三 仪表的其他符号标记

1. 电表种类符号		A. C	交流端
—	直流		接地端
	单相交流		接外壳端
	交流和直流		接屏蔽端
2. 工作位置符号			接仪表动圈端
	水平放置		调零器
	垂直放置	4. 绝缘强度符号	
	倾斜放置如 $\angle 60^\circ$, 表示与水平呈 60° 倾角。		耐压2千伏
	按箭头顺地磁场放置		不进行耐压试验
3. 接线端钮, 调零器符号			经过500伏耐压试验
—	负端		经过6千伏耐压试验
+	正端	5. 级别符号	
	公共端	1.5	只标级别数, 不加其它记号。误差以量限乘以级别的百分数表示。
*	电源端		在级别数外加圈。误差以示值乘以级别的百分数表示。
D. C	直流端		在级别数下加“v”误差以标尺长度乘以级别的百分数表示。

(三) 测量电学量的一般方法

1. 用灵敏电流计检测微弱电流、微小电位差的大小和方向

灵敏电流计的一般技术数据

测量量限 $\pm 300\mu\text{A}$,

表头灵敏度 (满刻度电流值) $\pm 300\mu\text{A}$,

内部电阻 约 9.5Ω ,

动圈内阻 $92\Omega \pm 10\Omega$ 。

灵敏电流计的结构:

以杭州电表厂 J—DB2XA 型为例, 表头为磁电式。外形如图。



指针在标尺中部指零。两接线柱分别标有“+”, “-”符号。表内设有附加测量电路, 调零旋钮在读数窗下面 (可用小旋凿调节)。该电表是一种低内阻检流计。

测量方法:

调零 将表座放平, 观察指针是否对准零位。若有偏差, 可用小旋凿旋动调零器, 把指针调至零位。

检测微弱电流大小和方向 把检流计串联在被测电路中, 以指针是否偏转来判断电路中是否有电流通过。若指针向右摆动, 说明电流方向从接线柱正端到负端; 若指针向左摆, 则电流方向是从接线柱负端到正端。电流大小由刻度读出。

检测微小电位差的大小和方向 把检流计并联在被测电路的两端, 电压方向判断与电流方向判断方法相同, 电压读数应将电流读数乘上电表内阻值, 即 $U_g = I_g r_g$ 。

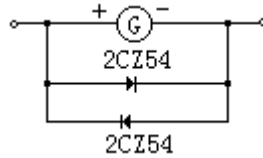
使用注意事项：

检流计使用时，指针偏转不能超过满刻度。若超过满刻度，应立即切断电源，以防撞坏指针或烧坏动圈。

搬运时需将接线柱短路，使电磁阻尼加强，以免因摆动过大而碰坏指针。

灵敏电流计动圈的简易过载保护：

用两只 2CZ54 二极管反向并联后，并联到动圈的两个引线端上，见图。



因为常用灵敏电流计的满刻度电压 $U_g = I_g R_g$ 均不超过 30mV，而在此电压下，正向偏置的二极管 2CZ54 处于截止状态，两管的分流作用可忽略不计。

表 几种国产磁电系灵敏电流计技术参数

生产厂	杭州电表厂	山东教学仪器厂		苏州市教学仪器厂	
型号	J-DB ₂ XA	J-DB ₂ XA	J0409	JHD-G*	J0409-1*
量限	±300μA	±300μA	(G ₀)±300μA ±300mV (G ₁)±750mV	±300μA	(G ₀)±300μA ±30mV (G ₁)±750mV
表头灵敏度	±300μA	±300μA	±300μA	±300μA	±300μA
动圈内阻	92Ω±10	95Ω±9.5	80-125Ω	100Ω	100Ω
动圈匝数	270.5	270.5	270.5	170	170
动圈线径	φ0.05mm	φ0.05mm	φ0.05mm	φ0.05mm	φ0.05mm
分压电阻			2.4-3.0K		2.4K
游丝规格	9 × 10	9 × 10	9 × 10	9 × 21	9 × 21
游丝电阻(单只)	0.9Ω	0.9Ω	0.9Ω	0.6Ω	0.6Ω
生产厂	北京西城电表厂	湖南长沙仪表厂			
型号	J-DB ₅ XB*	J-DB ₂ X	J0409		
量限	±200μA	±300μA	(G ₀)±300μA ±300mV (G ₁)±750mV		
表头灵敏度	±200μA	±300μA	±300μA		
动圈内阻	85Ω	95Ω±9.5	80-125Ω		
动圈匝数	180	270-275	270-275		
动圈线径	φ0.06mm	φ0.05mm	φ0.05mm		
分压电阻			2.4K		
游丝规格	(上)8 × 20 (下)8 × 16	9 × 10	9 × 10		
游丝电阻(单只)	(上)0.63Ω (下)0.7Ω	0.9Ω	0.9Ω		

*表为内磁式，其他均为外磁式。

当表头超载时，正向偏置的二极管即处于饱和导通状态，电流绝大部分由二极管分流。所以表头短时间超载时，表头动圈一般不会烧毁。

2. 用直流安培表测量直流电流

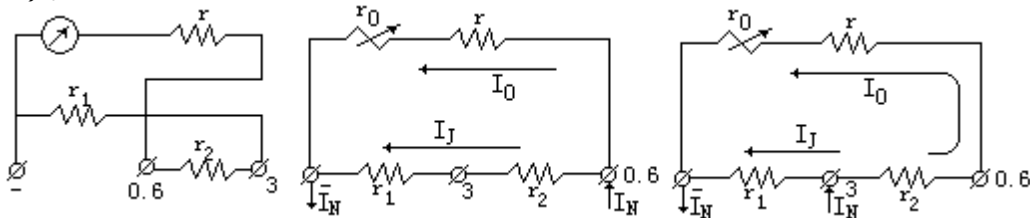
学生常用的直流安培表为 0-0.6A, 0-3A 双量程 2.5 级。以杭州电表厂的 J—DB₄XA 型为例，表头灵敏度为 3mA，动圈内阻为 8Ω。

结构：J—DB₄XA 外型如图。指针在标尺左边置零。标尺有上下两种刻度，分别为 0-3A 和 0-0.6A。调零器在读数窗口正下方，接线柱分别标有“-”，“0.6”、“3”标记，其中“-”接线柱为公共端。表头为磁电式。



测量原理：

安培表测量电路是由表头和附加电阻组成。表头内阻 r_0 ，附加电阻 r ， r_1 ， r_2 组成环形分流电路。当被测电流 I_N 由“0.6”端流入，从“-”端流出时（见图）， (r_0+r) 与 (r_1+r_2) 并联。当电流从“3”端流入，从“-”端流出时， (r_0+r+r_2) 与 r_1 并联（见图）。



电路中的 r 是温度补偿电阻，可减小因温度变化引起的误差。因为动圈的漆包线和游丝温度系数都较大，而康铜丝制成的 r_1 、 r_2 温度系数极小。在温度变化不大时， r_1 、 r_2 阻值的变化近于零。但表头内阻却有较大的变化。这样，就会使通过表头的电流发生较大变化而引起示值的较大误差。为减小这一误差，在表头上串联一个温度系数比 r_1 、 r_2 更小（或相同）的较大电阻 r 后，当温度变化时，虽然 r_0 变，但 r 、 r_1 、 r_2 不变，这样， R_0/R_f 的值变化就减小了。通过表头的电流变化也就减少了，因而起到减小误差的作用。从理论上讲， r 值越大， R_0/R_f 就越稳定。但 r 值过大会使通过表头的电流过小，并使电表总电阻增大。通常 r 为 r_0 的 1.5—2 倍。

测量方法：

(1) 调零和接线 将安培表安放在水平位置，调零后，将其串联入电路中，注意使电流由“3”（或“0.6”）端流入，从“-”端流出。

表 几种国产磁电系直流安培表技术参数

生产厂		杭州电表厂	山东教学仪器厂		苏州市教学仪器厂		北京西城电表厂	湖南长沙仪表厂	
型号		J-DB ₃ XA	J-DB ₃ X	J0407	JHD-A*	J0407-1*	J-DB ₅ XB*	J-BD ₃ X	J-0407
量限		0-0.6A 0-3A	0-0.6A 0-3A	-0.2-0 -0.6A -1-0-3A	0-0.6A 0-3A	-0.2-0 -0.6A -1-0-3A	0-0.6A 0-3A	0-0.6A 0-3A	-0.2-0 -0.6A -1-0-3A
表头灵敏度		3mA、75mV	3mA、75mV	3mA、75mV	25mA、75mV	10mA、75mV	16mA、68mV	2.5mA	2.5mA
动圈内阻		8Ω	8.5Ω	8.5Ω	1.2Ω	1.8Ω	1.35Ω	30Ω	6Ω
动圈匝数		88.5±2	88.5	88.5	13	15	10	86	88
动圈线径		φ0.1mm	φ0.1mm	φ0.1mm	φ0.21mm	φ0.15mm	φ0.21mm	φ0.05mm	φ0.1mm
分流电阻	r ₂	0.1Ω (φ0.7mm 康铜丝绕制)	0.1Ω (φ0.7mm 康铜丝绕制)	0.1Ω (φ0.7mm 康铜丝绕制)	0.098Ω (φ0.6mm 锰铜丝绕制)	0.095Ω (φ0.6mm 锰铜丝绕制)	0.12Ω (φ0.5mm 康铜丝绕制)	0.13Ω (φ0.8mm 锰铜丝绕制)	0.075Ω (φ0.7mm 锰铜丝绕制)
	r ₁	0.025Ω (φ1.8mm 康铜丝绕制)	0.025Ω (φ1.8mm 康铜丝绕制)	0.25Ω (φ1.8mm 康铜丝绕制)	0.027Ω (φ1.8mm 锰铜丝绕制)	0.024Ω (φ1.8mm 锰铜丝绕制)	0.035Ω (φ1.8mm 康铜丝绕制)	0.025Ω (φ1.8mm 锰铜丝绕制)	0.015Ω (φ1.8mm 锰铜丝绕制)
补偿电阻(r)		15Ω (φ0.12mm 锰铜丝绕制)	15Ω±0.5Ω (φ0.12mm 锰铜丝绕制)	15Ω±0.5 (φ0.12mm 锰铜丝绕制)	1.58Ω (φ0.2mm 锰铜丝绕制)	5.2Ω (φ0.2mm 锰铜丝绕制)	2Ω (φ0.2mm 锰铜丝绕制)		12Ω (φ0.12mm 锰铜丝绕制)
游丝规格		10.6 × 13	10.6 × 13 (剪去 1.5 圈)	10.6 × 13 (剪去 1.5 圈)	(前)9 × 80 (后)9 × 40	9 × 40	(上)8 × 36 (下)8 × 32	10.6 × 13	10.6 × 13
游丝电阻(单只)		1.1Ω	约 0.8Ω	约 0.8Ω	0.45Ω	0.45Ω	(上)0.49Ω (下)0.53Ω	1.1Ω	1.1Ω

说明：*表为内磁式，其他均为外磁式。

(2)选择量程 接线前应先估计待测电流大小,选择适当量程。可用3A 量程试触,即将“3”接线柱引线触接被测电路流入端。指针偏转小于0.6A,则改用0.6A 量程;指针偏转在0.6—3A之间,则用3A 量程。

(3)读数 用0.6A 量程,标尺每小格为0.02A;3A 量程,标尺每小格为0.1A。

(4)不允许将安培表与交直流电源短接或短路。直流安培表也不能用于测量交流电流。

安培表的误差分析:

对只标级别 a 的安培表,其结构误差(也叫级别误差或标称误差)计算公式为 $\Delta = D \cdot a\%$,式中 D 为量程。J—DB₄XA 为2.5级,所以在量程为0.6A 时,

$$\Delta_1 = 0.6 \times (\pm 2.5\%)A = \pm 15.0\text{mA};$$

量程为3A 时,

$$\Delta_2 = 3 \times (\pm 2.5\%)A = \pm 75.0\text{mA}。$$

3. 用直流伏特表测量直流电压

实验室测量低压直流电压通常用0-3V、0-15V 双量程伏特表。以J—DB₄XA 型(2.5级)为例,表头灵敏度为3mA,动圈内阻6.5Ω,表头内阻(动圈内阻与两端游丝电阻之和)为10Ω。

结构:

以杭州电表厂生产的J—DB₄XA 型为例,外型如图。指针在标尺左端置零。标尺有上下两种刻度,刻度分别为0-15V 和0-3V。调零器在读数窗正下方。接线柱分别标有“-”、“3”、“15”标记,其中“-”接线柱为公共端。表头为磁电式。



原理:

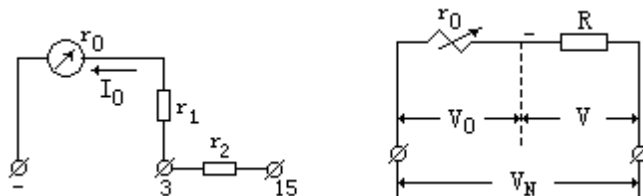
测量电路如图。可看成是由表头内阻 r_0 和外加电阻 R 组成的串联分压电路,其电压分配如图。

$$\text{因为 } V_N = V_0 + V,$$

$$\text{又 } V_0 = I_0 r_0,$$

$$V = I_0 R \quad (I_0 \text{ 为表头满刻度电流,对 J—DB}_4\text{XA 型而言, } I_0 \text{ 是 } 3\text{mA})$$

$$\text{所以 } V_N = I_0 r_0 + I_0 R,$$



$$R = \frac{V_N}{I_0} - r_0. \quad (r_0 = 10\Omega)$$

量程 $V_{N1} = 3\text{V}$ 时, $R_1 = r_1 = 990\Omega$ 。

量程 $V_{N2} = 15\text{V}$ 时, $R_2 = r_1 + r_2 = 4990\Omega$ 。

测量方法:

(1)调零和接线 将伏特表水平放置,调零后,并联入被测电路的两端,使电流从

“3”（或“15”）流入，从“-”端流出。

(2)选择量程 接线前先选择量程，可根据所用的电源电压，待测端的可能最大电压估算值，确定合适的量程，然后正确连接。在无法估计待测电压数值时，可用15V量程试触，即将“15”接线柱引线触被测电路电压高端，指针偏转小于3V则改用3V量程；指针偏转在3-15V之间则用15V量程。指针反转则说明接反；指针超过满刻度则应将测电压降到15V以内或改用大量限表。

(3)读数 用3V量程时，标尺每小格为0.1V；用15V量程时，标尺每小格0.5V。

伏特表误差分析：

对只标级别a的伏特表，其结构误差（也叫级别误差或标称误差）计算公式为

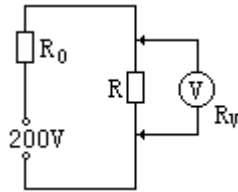
$$\Delta = D \cdot a\%$$

式中，D为伏特表量程。J—DB₄xA型为2.5级，所以在量程为3V时，

$$\Delta_1 = 3V \times (\pm 2.5\%) = 75\text{mV} \text{ , 用 } 0.08V \text{ 表示。}$$

量程为15V时，

$$D_2 = 15V \times (\pm 2.5\%) = 3.8 \times 10^2 \text{ mV} \text{ , 用 } 0.4V \text{ 表示。}$$



用伏特表测量电压时，内阻越大准确度越好高，如图所示电路，电源电压为200V，电源内阻 R_0 为2000 Ω ，负载电阻R为2000 Ω ，如果用一个内阻 R_V 为2000 Ω 的伏特表去测R两端的电压，则

$$\begin{aligned} U'_R &= \frac{200V}{R_0 + (R // R_V)} \cdot (R // R_V) \\ &= \frac{200V}{2000 + (2000 // 2000)} \cdot (2000 // 2000) \\ &= \frac{200V}{3000} \cdot 1000 = 66.7V \end{aligned}$$

若不用伏特表或伏特表内阻为无穷大时，R两端的电压值应为

$$U_R = \frac{200V}{R + R_0} \cdot R = \frac{200V}{4000} \cdot 2000 = 100V \text{。}$$

可见，即使准确度很高的伏特表，也会给测量结果带来很大的系统误差。所以，伏特表内阻应尽可能大于待测端间的电阻值，否则必须进行修正。

表 几种国产磁电系直流伏特表技术参数

生产厂		杭州电表厂	山东教学仪器厂		苏州市教学仪器厂	
型号		J-DB ₄ XA	J-DB ₄ XA	J0408	JHD-V*	J0408-1*
量限		0-3V 0-15V	0-3V 0-15V	-1-0-3V -5-0-15V	0-3V 0-15V	-1-0-3V -5-0-15V
表头灵敏度		3mA	3mA	1mA	2mA	1mA
动圈内阻		约 6.5Ω	8.5Ω	54Ω	60Ω	100Ω
动圈匝数		88.5±2	88.5	135.5	85	170
动圈线径		φ0.1mm	φ0.1mm	φ0.05mm	φ0.05mm	φ0.05mm
分压 电阻	r ₁	1K±1%	990Ω±1%	2.94K±1%	1.45K	2.9K
	r ₂	4K±1%	4000Ω±1%	12K±1%	5.97K	12K
游丝规格		10.6 × 13	10.6 × 13 (剪去 1.5 圈)	9 × 10	9 × 40	9 × 40
游丝电阻(单 只)		1.1Ω	约 0.8Ω	0.9Ω	0.45Ω	0.45Ω
生产厂		北京西城电表厂	湖南长沙仪表厂			
型号		J-DB ₅ XB*	J-DB ₄ X	J0408		
量限		0-3V 0-15V	0-3V 0-15V	-1-0-3V -5-0-15V		
表头灵敏度		1mA	3mA	1mA		
动圈内阻		185Ω	30Ω	60Ω		
动圈匝数		200	86	135		
动圈线径		φ0.04mm	φ0.05mm	φ0.05mm		
分压 电阻	r ₁	2.8K	970Ω±1%	2.94K±1%		
	r ₂	12K	4K±1%	14.94K±1%		
游丝规格						
游丝电阻(单 只)						

*表为内磁式，其他均为外磁式。

一般磁电系测量机构的灵敏度可达 2kΩ/V 以上，高的可达到 100kΩ/V，整流系仪表内阻稍低，一般在 2kΩ/V—20kΩ/V 之间。电子系电压表内阻很高，可达几兆欧。特别是数字电压表，其内阻可高达几十兆欧至百兆欧。

4. 用直流电位差计测量电池电动势和内阻

直流电位差计是用比较法精确测量干电池电动势的仪器，以 DC—I 型电位差计为例，可精确到 10⁻⁴V。

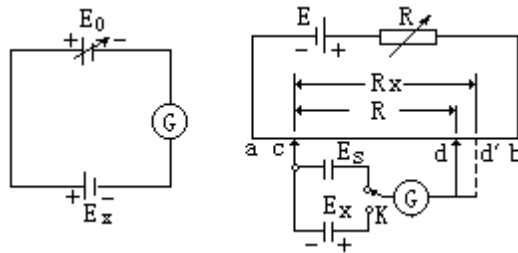
测量范围：

0-0.100V，

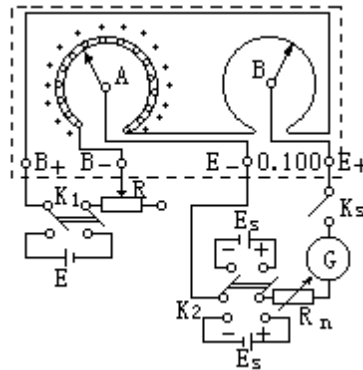
0.001-1.500V。

原理：

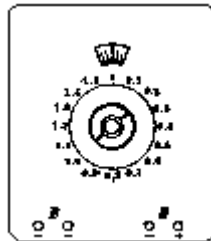
用电位差计测量电动势 E_x 是用电位比较法，也称被偿法，即用一个大于 E_x 的已知并可调的电压 E₀，连接成如图电路，调节 E₀，使检流计指零，就表示待测电动势 E_x 与此时的 E₀ 值大小相等，方向相反，这时电路达到补偿。



实际的电位差计，其电路如上图。由电源 E 、限流电阻 R 和标准均匀电阻 R_{ab} 串联而成闭合回路，称辅助回路。电检流计、标准电池 E_0 （或待测电池 E_x ）和 R_{ca} （或 R_{cd1} ）构成的回路称补偿回路。调节 R ，使 R_{ab} 上有一恒定的标准电流 I_0 通过。当变动滑动触头 d 的位置时， cd 间的电位差 U_{cd} 也随之改变，由于 R_{cd} 是可以精确知道的， I_0 是标准值，所以 U_{cd} 也能准确地知道。这样， U_{cd} 就可看成是一个可调标准电源 E_0 。由于在测量时 I_0 保持恒定不变，所以在实际的电位差计上都是把电阻的数值转换成电压数值刻在电位差计上的，把滑动头 cd 两端的电压 U_{cd} 引出来与未知电动势 E_x 比较。



结构：以 DC—I 型电位差计为例，其内部电路如图。图中两圆形电阻相当于原理电路中的 R_{ab} ， B_+ 和 B_- 两接线柱相当于 a 、 b 两点， E_+ 和 E_- 相当于 c 、 d 两点， A 圆总电阻 $R_A=150\Omega$ ，分为 15 段，每段为 10Ω ，用作粗调。 B 圆总电阻 $R_B=10\Omega$ ，用作细调。标准电流 $I_0=0.01A$ ，所以 A 圆上每段电阻上的电位降为 $0.1V$ ， B 圆上总的电位降为 $0.1V$ 。DC—I 型电位差计面板如图。是将 A 、 B 两圆做成内、外两个共轴的同轴圆。中心小旋钮为 A 圆，每转动一格，电压就改变 $0.1V$ ，外面大旋钮为 B 圆，均匀地分为 100 小格，每转过一小格，代表 $0.001V$ ，此大旋钮是连续变化的，加上估计一位，可读到 $10^{-4}V$ 。



使用 DC—I 型电位差计，必须加接外电路（结构电路图中虚框下部）。外电路接法如下， A 、 B 两圆标准电阻由 B_+ 、 B_- 两接线柱引出和外电路限流电阻 R ，电源 E 组成辅助回路。 cd 段电阻由 E_+ 和 E_- 两接线柱引出和外电路的待测电池 E_x （或 E_s ）、检流计、保护电阻 R_n ，单刀开关 K_3 组成补偿回路。 K_1 是电源开关， K_2 是为了方便 E_s 和 E_x 相互替换的， R_n 是可变高值电阻，用以保护检流计和标准电池的。

测量方法：

(1)连接电路

按结构电路连接外电路（已如前述），辅助回路中 E 用输出电压非常稳定的稳压电

源,电压取 6V, R 用电阻箱,以保证电位差计辅助回路上的标准电流 I_0 可调为 0.01000A。 E_s 为标准电池, $E_s=1.0186V$; E_x 为待测干电池,检流计可借用 QJ—23 型电桥上的检流计,用时将“内接”处短路铜片取下,从“内接”处接线柱引出使用。 R_n 为 47k Ω 的电位器。

(2) 校准电位差计

校准电位差计的的目的是使辅助回路里的电流值为 0.01000 安。方法如下:

调节辅助回路中的限流电阻 R,使 $R=440\Omega$,然后转动小旋钮 A 到 1.0,再旋转大旋钮 B,使其上方刻度数为 0.0186。旋动 R_n 使其阻值最大。

先合上辅助回路开关 K_1 ,再将 K_2 倒向 E_s ,再合上 K_3 ,调 R 使检流计指针偏转为零。

逐渐减小 R_n ,每减小一次,调 R 使 G 无偏转,直到 R_n 减为 0 检流计指针在 0 位置上为止,反复开合 K_3 ,要求达到检流计 G 的指针不发生偏转为止。此时, $I_0=0.01000A$,电位差计上所刻度的电压数值均为准确值。至此电位差计已校准完毕,可用来测量电动势或电位差了。注意在测量过程中 R 不能再调节,否则 I_0 值就不是 0.01000A 了,将导致电位差计刻度不准。

(3) 测量电池电动势 E_x

打开 K_2 、 K_3 ,将干电池接在图中 E_x 处,根据干电池的近似值初步旋好 A、B 盘上的数据,然后将 R_n 调到最大,将 K_2 合向 E_x ,再合 K_3 ,调节 A、B 盘上数值,直到 R_n 为 0 时反复开合 K_3 ,检流计指针均不偏转为止。此时,电位差计达到补偿。记下结果,如小旋钮 A 指示数为 1.4,大旋钮 B 指示数为 0.0758,则 $E_x=1.4758V$ 。重复多次,观察 E_x 的测量精度和准确度。

(4) 测量干电池内阻 r

接线

打开 K_2 、 K_3 ,将图中 E_x 换成如图所示线路,其余部分不变。 R' 为电阻值箱,取值 500 Ω 。

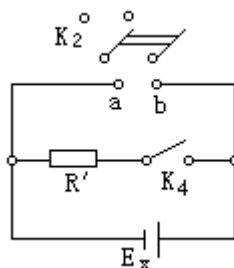
测量步骤同上,测得 E_x 。再合上 K_4 ,测得 R' 两端电压

$$E' = E_x - Ir = I \cdot R'$$

式中 r 即为待测干池电阻

$$r = \frac{E_x - E'}{I} = \left(\frac{E_x}{E'} - 1 \right) R'$$

注意: K_4 只在测量 E' 时才合上,测量完毕应立即断开,以免干电池放电过多。



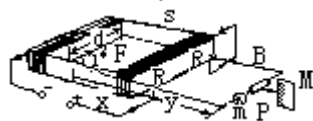
(四) 测量电流的特殊方法

1. 用电流天平测量电流

用电流天平测量电流是绝对测量。是直接根据安培的定义来进行测量的。

结构:

如图所示。电流天平 B 是用硬铜线制成的一个矩形线框，以便放入扁平螺线管 s。s 大约长 0.3m，300 匝以上。电流天平 B 用两个刀口或者刀片 R 支承和通电，纸带 m 作为重物。直流电源（0-12V），10Ω 的变阻器（额定电流大于 5A），安培表（0-10A）。



电流通过装在螺线管端部的两个固定刀口 R 引进线框。电流天平静止在刀口上（在导线上刻一个缺口），应能自由摆动，它在支撑点上稍微弯一点，使之稳定。电流仅仅通过线框在管内的部分，外面的臂上装一个带有指针 P 的绝缘套子，指针在标尺 M 附近运动，它指示电流天平的静止位置。

螺线管 s 内的导线长一些，可以使电磁力增大。

测量还需一个分析天平和一把毫米刻度尺。

原理：

安培（A）定义为能在两根相距 1m 的长直导线上每米导线产生 $2 \times 10^{-7} \text{N}$ 的力的电流。单股导线即使靠近在一块时这个力仍很小，难以测量。为了使力增大，通常的方法是用一个螺线管代替其中一根导线。在螺线管中心的导线上的力可以从安培的定义计算出来。用它来测量电流不必使用安培表。

螺线管和管内导线通过同样大小的电流（螺线管和管内部分导线是串联的）。测出导线上所受的力 F，由力 F 来算出电流。

在安培力 F 和纸带重力 mg 作用下电流天平平衡，两力产生的力矩平衡：

$$Fx = mgy。$$

如果视螺线管为无限长，载流为 I，管内的磁感应强度为 B，则

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{NI}{L}。$$

N/L 是单位长度内的匝数，L 是螺线管的长度，作用在长为 d 的导线上的力 F 为

$$F = BId。$$

将 B 代入

$$F = 4\pi \times 10^{-7} \frac{NdI^2}{L}。$$

得

$$I = \sqrt{\frac{FL}{4\pi \times 10^{-7} Nd}}，$$

式中

$$F = \frac{mgy}{x}。$$

测量方法：

(1) 调节电流天平平衡 在不通电的情况下，利用一小段导线缠在电流天平的一个臂上，使天平呈水平状态，记下指针 P 在标尺 M 上的位置。测量出从支点 R 到两臂间的距离 x 和 y。

(2) 力 F 的测量

断开螺线管线路，将电流天平和螺线管串联后接入线路。接通电源，观察螺线管内的导线是被力 F 推向下还是向上，若向上，则应改变电流的方向，使导线向下。在指针一端挂上几厘米的纸带或细丝作为平衡重物 m，调整 m 的质量大小，直至指针 P 恢复到通电前在标尺上的位置。

(3)称量平衡重物的质量 m

在精密的分析天平上称出用作平衡物的纸带或细丝的质量。

(4)数出螺线管 L 米上的匝数 N (L 至少 0.1m)。

(5)测量电流天平在螺线管内部的宽度 d 。

(6)代入公式计算电流 I 。

注意事项：

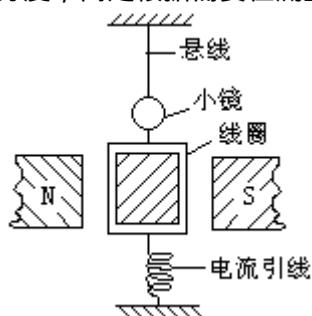
电流天平和刀片接触处产生的热量可能使刀片损坏，这会使电流波动，以致难以长久处于平衡，必要时可以换刀片。

2. 用灵敏电流计测量微小电流

灵敏电流计是高灵敏度的指示仪表，可以用来测量小于几十微安的电流。灵敏电流计与普通的磁电系仪表（如直流微安表、安培表等）虽然原理相同，都是载流线圈在磁场中受力矩作用而偏转，但因其结构的不同，有以下两点主要区别。

一是灵敏度高。普通磁电系仪表的线圈均安装在轴承上，用弹簧游丝来维持平衡，用指针指示偏转，由于轴承有摩擦，不能测量小于几微安的电流。而灵敏电流计则是用金属悬丝或张丝代替轴承，将线圈悬挂在磁场中，如图所示。悬丝或张丝细而长，反抗力矩很小，极小的电流流过线圈，就足以使线圈发生显著的偏转，所以灵敏电流计比普通磁电系仪表灵敏度高。

二是读数方法不同。普通的磁电系仪表都是直读式，能直接从表上读出电流（或电压），而灵敏电流计指示器上只能读出偏转的格数，不能直接读出被测量，即是说，它的标尺并不是按被测量的量分度，而是根据需要在测量前测定它的常数。

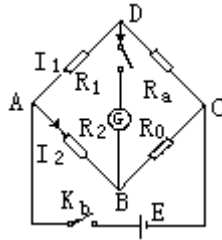


灵敏电流计可用于作指零仪表，用以确定电桥或电位差计是否平衡，也可用于测量微小电流、电压。

八 电阻的测量

(一) 用惠斯登电桥测电阻

惠斯登电桥能方便而准确地测量直流电阻，量限为 $1-10^6\Omega$ 。在 $10^2-10^5\Omega$ 范围内，对于一般惠斯登电桥，其准确度为 $\pm 0.2\%$ 。



原理：

惠斯登电桥的原理线路如图。它由四个电阻 R_1 、 R_2 、 R_0 和 R_x 组成一个电桥，每个电阻为桥的一臂，在对角线 AC 之间加电源 E，在对角线 BD 之间连接检流计 G。当电路中 B、D 点电位相等时，检流计中无电流通过，这时电桥平衡。当电桥平衡时，由欧姆定律有：

$$I_1 R_1 = I_2 R_2, I_1 R_x = I_2 R_0$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_0}$$

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0$$

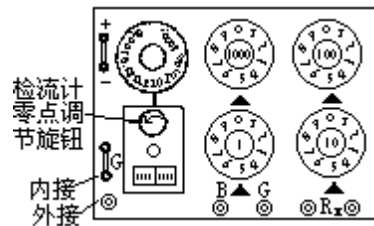
这样，就可以用三个已知电阻来测出一个未知电阻。

用电桥测量电阻的基本原理就是比较 B、D 两端的电位，它通过调节三个可变的标准电阻 R_0 、 R_1 、 R_2 和一个未知的被测电阻 R_x 进行比较，用检流计示零来判断电路的平衡。通常把 $\frac{R_1}{R_2}$ 称为比例臂，可变的

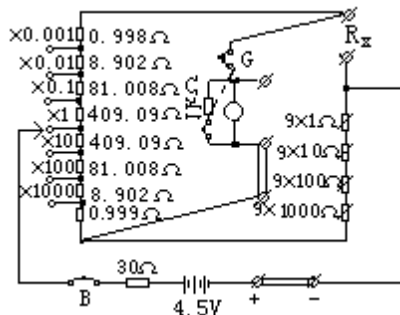
标准电阻 R_0 称为比较臂。

结构：

以 QJ—23 型惠斯登电桥为例。面板如图(a)，内部线图如图(b)所示。



(a)



(b)

QJ—23型惠斯登电桥的比例臂 $\frac{R_1}{R_2}$ 由面板上面左上角的旋钮调节，

它采用十进固定值，共分 0.001、0.01、0.1、1、10、100、1000 七个档次。标准可变电阻 R_0 由其余四个旋钮调节，其最小改变量为 1Ω 。检流计 G 有三个接线柱，分别标有“内接”和“外接”字样。测电阻时，应用它所备有的铜片将“外接”的两接线柱短路，这时，电桥接通内部检流计。使用完毕，将铜片接“内接”两接线柱，使内部检流计短路，可保护内部检流计不致在移动时指针过度摇晃。

在面板左上方标有“+”、“-”号的接线柱是用来外接电源，若电桥内部事先已装好电池（三节 2 号电池，4.5V），外接电源就应短路。

测量方法：

(1)先用万用表粗测待测电阻。

(2)确定比例臂的倍率（参照倍率选择附表）。

QJ—23 型电桥比较臂有四个旋钮，实测电阻值应当有四个有效数字，因此应选择合适的比例臂，使测量结果保证四位有效数字。

例：若万用表粗测为 200Ω 左右，比例臂应取 0.1 档， R_0 开始放在 2000Ω 左右，若电桥平衡时 R_0 指示值为 2056Ω ，则 R_x 数值为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 = 0.1 \times 2056 = 205.6\Omega。$$

注意：比例臂 R_1/R_2 的值保证有不少于四位有效数字的准确性。

(3)检流计调零。

用短路铜片接通检流计，缓慢、仔细地转动检流计的零点调节旋钮，使其指零。

(4)平衡调节。

接上待测电阻 R_x ，将短路铜片接通“外接”，使检流计和整个电桥处于测量状态。

按下开关 B（接通电源），再按下开关 G，接通检流计，指针指零，则电桥平衡，若指针偏向“+”侧，则可增加 R_0 的数值；反之，当指针偏向“-”侧时，可减少 R_0 的数值，使电桥平衡。（注意： R_0 值的选取先从“ $\times 1000$ ”旋钮开始，依次为“ $\times 100$ ”，直到“ $\times 1$ ”为止。）断开时，应先释放 G，使检流计断开，再释放 B 断开电源，这是为了防止过大的电流通过检流计，使其受到损坏。在测量有电感的电阻时更应注意这一点。

电桥平衡的判断可用下述方法进行：

反复通、断 G，看检流计指针是否偏转。

少量增减 R_0 ，即旋“ $\times 1$ ”旋钮直至发现检流计有不同方向的偏转。这样原来所得的 R_0 可定为是使电桥达到平衡的比较臂阻值，增减 R_0 的量可定为比较臂的误差。

(5)读数。

电桥平衡时，读取比较臂倍率 $K\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ 和 R_0 的数值，计算出 R_x 。
 $R_x=KR_0$ 。

(6)电桥使用完毕后，务必用钢片把“内接”接线柱连通，使检流计处于短路状态。同时要检查 B、G 按钮是否松开。

误差分析：

用电桥测电阻精确度较高，误差来自读数误差和电桥的灵敏度。读数误差很小，如 JQ—23 型，它的电流常数小于 $6 \times 10^{-7} \text{A}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，检流计最小刻度为毫米，人眼的分辨率约为 0.1mm，即可以辨认到 1/10 格，所以读数误差的影响不大。

误差主要来自电桥的灵敏度。电桥的灵敏度定义如下：当电桥达到平衡时，如果其中一个桥臂的电阻值 R 改变一个微小的值 ΔR ，会使检流计指针偏转 Δn 格，那么电桥灵敏度 S 为：

$$S = \Delta n / \frac{\Delta R}{R}。$$

灵敏度 S 越高，表示电桥越灵敏，测量误差越小。例如， $S=100$ 格表示

$$S=1 \text{ 格}/1\%，$$

也就是桥臂电阻改变了 1% 时，检流计可以有 10 格的偏转。人眼可以觉察的指针偏转为 0.1 格，所以当电阻改变 0.1% 时，人眼即可以从检流计上看出来。这样，由电桥的灵敏度的限制而带来的误差肯定小于 0.1% 据此算出由电桥灵敏度的限制带来的待测电阻的误差

$$\Delta R_x = \frac{\Delta n}{S} R_x。$$

取 $\Delta n=0.1$ 格（人眼的视力所带来的偶然误差）

则
$$\Delta R_x = 0.1 \frac{R_x}{S}。$$

可见，待测值 R_x 越大， ΔR_x 越大；灵敏度 S 越大， ΔR_x 越小。而相对误差

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{1}{10S}$$

只由灵敏度决定。

注意：待测电阻的准确度，应取 $\Delta n=1$ 格（或 1 分度）计算。

实验和理论的计算表明，影响电桥灵敏度的因素很多。一般说来，电源电压越高，检流计灵敏度越高，检流计内阻越小，桥臂电阻越小，则电桥的灵敏度就越高，测量的误差就越小。

附表 测量范围与倍率选择表

倍率 K	测量范围 (Ω)	检流计	准确度 (%)	电源电压 (V)
$X10^{-3}$	1-9.999	内附	±1	4.5
$X10^{-2}$	10-99.99		±0.5	4.5
$X10^{-1}$	10^2 -999.9		±0.2	4.5
X_1	10^3 -9999			6
X_{10}	10^4 - 4×10^4			15
	5×10^4 -99990	20		
$X10^2$	10^5 -999900	外接	±0.5	15
$X10^3$	10^6 -9999900		±1	

注：(1)外接检流计要选电流常数小于 4×10^{-7} A/mm 的表。

(1)用内附检流计和电源也能测超过上表规定的电阻，但不保证准确度。

注意事项：

(1)测感性电阻（如电机、变压器绕组）时，一定要先接通电源按钮“B”，再接通检流计按钮“G”，断开时先断“G”再断“B”。以防自感电动势过大损坏检流计。

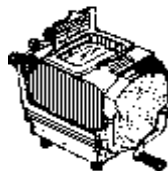
(2)电桥不用时应将检流计锁住，以免搬动时震断吊丝。

(3)单电桥一般不宜测量小于 0.1 欧的电阻。

(二) 用兆欧表测高值电阻

兆欧表又名摇表，用以测量用电设备的绝缘电阻值。

结构：常用的兆欧表由手摇高压发电机和磁电式双动圈流比计组成。外表如图。

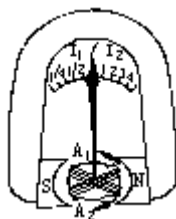


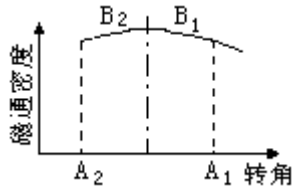
原理：

1、流比计工作原理

流比计的形式很多，常用的 5050 型、1010 型、311 型兆欧表均属交叉式流比计。

此种流比计具有两个形状相同、相交角为 50° (或 60°) 的可动线圈。两个线圈产生的力矩方向相反，由于采用椭圆形铁芯或偏桃形铁芯，使空气隙中的磁通密度中间较密，两边较稀，如图所示。





设线圈 A_1 所受的磁通密度为 B_1 ，电流为 I_1 ；线圈 A_2 所受的磁通密度为 B_2 ，电流为 I_2 。此测量机构的两个转矩可表示为

$$M_1 = K I_1 B_1, M_2 = K I_2 B_2,$$

M_1 和 M_2 方向相反。 M_1 顺时针方向， M_2 反时针方向。当 $M_1 = M_2$ 时，指针静止于平衡位置，这时

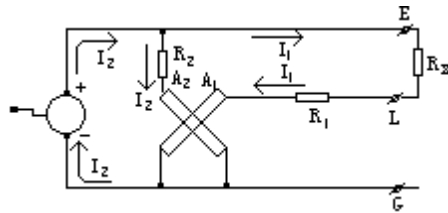
$$B_1 I_1 = B_2 I_2, \\ \frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2}{B_1}.$$

当两电流比值变化时，线圈所处新位置的磁通密度比值 B_2/B_1 也发生变化，使电流较小的线圈受到较大的 B 值。当两力矩相等时，可动体（指针）就平衡在新的位置上。

此类类比计采用 A_1 中的电流 I_1 为可变的，随被测电阻变动；而线圈 A_2 中的电流保持不变。

2、测量原理

测量电路如图。动圈 A_1 、 A_2 在同一轴上。摇动发电机手柄，发电机输出直流高压 U 。



R_2 、 A_2 回路中有电流 I_2 ，在磁场作用下产生转矩 M_2 ，使动圈带着指针往标尺“ ∞ ”方向偏转。若 E 、 L 两端开路，则 A_1 中无电流通过，指针指“ ∞ ”，表示电阻无穷大。若 E 、 L 两端接被测电阻 R_x ，则 R_x 、 R_1 、 A_1 构成回路，产生电流 I_1 。在磁场作用下产生与 M_2 相反的转矩 M_1 。当 $M_1 \neq M_2$ 时，指针就会偏转，直至 $M_1 = M_2$ ，指针停在某一位置上。 R_x 愈大， I_1 愈小，力矩 M_1 也愈小，指针向“ ∞ ”一边偏得较多，示值较大。反之，示值就小。当 $R_x = 0$ （短路）时， M_1 值最大，指针示零。

测量方法：

(1)兆欧表动圈轴端没有游丝，指针可停在任意位置上，不用调零。测量前应先在开路情况下摇动手柄，看指针是否指“ ∞ ”，短路时是否指“0”。检查无误再行测量。

(2)如将兆欧表的“接地端” E 接被测用电器的金属外壳， L 端接被测电路，即可构成测量用电器绝缘电阻的电路。

(3)摇动手柄逐渐加快，待指针停稳时不再加速。若指针指零应马上停转，以防烧坏动圈。

(4)额定电压在 500V 以下的电器应选用 500V500M Ω 以内的表。额定电压高于 500V 的电器选用 1000V1000M Ω 以上的表。初始值不是零而是 1M Ω 或 2M Ω 的表不宜量低压电器的绝缘电阻。因表的输出电压过高，可能击穿被测电器。

注意事项：

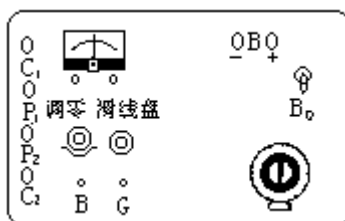
(1)接线柱连线应有良好的绝缘外皮，并要分成单股，不能绞在一起，以免因接线间绝缘不良引起误差。

- (2) 发电机输出电压较高，测量时不要用手触及导体部分。
- (3) 被测电路中若有电容器，在测量前、后都要充分放电。
- (4) 禁止在雷电时或附近有高压设备处测量。只有在电器不带电而又不可能受其他带电体感应带电的情况下才能测量。
- (5) 兆欧表要经常保持干燥、清洁，使自身有良好的绝缘。

(三) 用直流双臂电桥测低值电阻

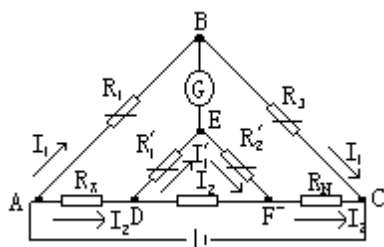
双臂电桥用于测量低值直流电阻

结构：以 QJ—44 型为例，面板控制旋钮如图所示。



- (1) 倍率旋钮分六档： $\times 100$ ， $\times 10$ ， $\times 1$ ， $\times 0.1$ ， $\times 0.01$ ， $\times 0.001$ 。
- (2) 比较臂变阻器大旋钮分十档：0.01—10 Ω 。
- (3) 比较臂滑线变阻器旋钮刻度：-0.00005-0-0.00050 Ω 。
- (4) 内附晶体管检流计。在基本量限内，滑线盘刻度转动 4 小格，检流计指针偏转不小于 1 格。
- (5) 测量范围：0.001—11 Ω （保证准确度范围：0.001—11 Ω ）。
- (6) 准确度：0.2 级。

原理：



在测量低值电阻尤其是小于 1 Ω 的电阻时，引线电阻和接触电阻就不能忽视了。这是低电阻测量的主要问题。用单臂电桥测量时由于引线电阻、接触电阻是串联在被测电阻上的，因此，当被测电阻很小时会引起很大误差。尽量减少因引线电阻、接触电阻所引起的误差，这就是双电桥的设计目的。其电路原理如图。

当检流计指零时，E、E 两点电位相等，这时 $I'_1 = I'_2$ 。

$$\text{即} \quad \begin{cases} R_1 I_1 = R_x I_2 + R'_1 I'_2 \\ R_2 I_1 = R_N I_2 + R'_2 I'_2 \end{cases};$$

$$\text{则} \quad \begin{cases} R_x I_2 = R_1 I_1 - R'_1 I'_2 \\ R_N I_2 = R_2 I_1 - R'_2 I'_2 \end{cases}$$

、 两式相除

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_1 I_1 - R'_1 I'_2}{R_2 I_1 - R'_2 I'_2} ,$$

当 $R_1 = R'_1$ ， $R_2 = R'_2$ 时，(3) 式可化为

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{R_1(I_1 - I'_2)}{R_2(I_1 - I'_2)} = \frac{R_1}{R_2}。$$

当 R_N 、 R_1 、 R_2 为已知电阻时，被测电阻

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N$$

计算公式与单臂电桥是一样的，不过多了先决条件，即 $R_1=R'_1$ ， $R_2=R'_2$ 。

在 ADE 及 EFC 电路中，因为串接了 R'_1 和 R'_2 ，它们的阻值较引线电阻、接触电阻大得多，一般为 10—100Ω，而引线电阻、接触电阻只有 10^{-2} — 10^{-4} Ω。这就使得引线电阻和接触电阻引起的电压降很小，只有 R'_1 和 R'_2 上电压降的万分之一到百万分之一，可以忽略不计。这就是双臂电桥的优点。

实际上常把 R_1 与 R_2 固定在一起， R'_1 与 R'_2 固定在一起，用一个旋钮同步调节，并保证调节过程始终 $R_1=R'_1$ ， $R_2=R'_2$ ，这就是倍率旋钮。

R_N 是标准电阻，实际应用上常把它做成一个具有很小步进值的变阻器和一个滑线变阻器的串联电路，以得到不同的 R_N 值。

测量方法：

(1) 将被测电阻 R_x 一端联在标有“ P_1 ”和“ C_1 ”的两接线柱上，另一端接在标有“ P_2 ”和“ C_2 ”的两个接线柱上。

(2) 参照附表选择不同的倍率 K 。

(3) 调整标准电阻 R_N 值时先调变阻器旋钮，再调滑线变阻器旋钮，直至检流计指针指“0”， R_N 的值为两变阻器示值之和。

(4) 断开 R_x ，用上述方法测一下 R_x 两端引线电阻值 r 。则 $R_x=K \cdot R_N - r$ 。

其余与单臂电桥相同

附表： 测量范围与倍率选择

测量范围 (Ω)	倍 率
0.00001-0.0005	× 0.001
0.0001-0.005	× 0.01
0.001-0.011	× 0.1
0.01-0.11	× 1
0.1-1.1	× 10
1-11	× 100

九 交流电学量的测量

(一) 用交流电表测量交流电流和电压

交流电表用于测量交流电流、交流电压的有效值。以浙江台州电表厂生产的 J04041—A 型交流电流表和 J04042—V 型交流电压表为例，可用以测量 50Hz 交流电流和电压。

测量范围：电流表量程（0-0.6A，0-3A）；

电压表量程（0-30V，0-300V）。

测量精度：2.5 级。

电压表表头电流为 1 毫安，表头压降不大于 30 毫伏。

结构：J04041—A 型、J04042—V 型交流电表为磁电系整流仪表，由表头、变换器和表壳三部分组成。表头为磁电式结构，电流表的变换器由电流互感器、桥式整流电路组成。交流电由输入电路输入后经过电流互感器、桥式全波整流电路后，输入表头；电压表的变换器由附加电阻和桥式整流电路后，输入表头。表壳上装有三个接线柱，三个接线柱下有对应的量程和“*”标志。

J04041—A 型和 J04042—V 型交流电表内部线路图如下：



测量方法：

- (1) 在测量前先要调零，再按电流表串联、电压表并联接入电路。
- (2) 估计被测电流、电压的大小，选用合适的量限。
- (3) 根据所选用的量限，记录到准确的数值，并确定该读数的测量误差。

(二) 用晶体管毫伏表测量正弦电压和电平

晶体管毫伏表采用放大—检波的形式，它具有较高的电压灵敏度和温度稳定性。用以测量音频和中频正弦电压的有效值，并可作电平测量。以 JY—16 型晶体管毫伏表为例，

电压测量范围：100 μ V—300V，分 1，3，10，30，100，300mV；1，3，10，30，300V 共十一档级。

电平测量范围：

-72db-+32db (0db=1mW，600 Ω) 被测电压的频率范围：

20Hz—1MHz。

交流准确度：

$\pm 3\%$ (300V 档 50Hz，其余各档 1KHz) 频率响应附加误差：

20Hz-100KHz $\leq \pm 3\%$ ；

100KHz-1MHz $\leq \pm 5\%$ 。

输入阻抗：

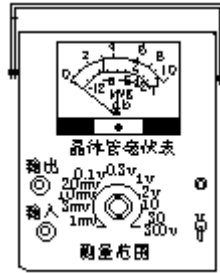
在频率为 1KHz 时输入电阻为 1.5M Ω ；输入电容不大于 70PF。

使用电源：

220V 50Hz 功耗为 2W。

结构：

小型手提式，外型如图。采用放大一检波式全晶体管电路，用磁电式 50 μ A 直流表头显示。



(1)机械调零：调表头上的调零器。

(2)零位调整：使输入端短路，用调零器把指针调到“0”位。此时指针稍有噪声偏转（1mV 档不大于满刻度值的 2%）是正常的。

(3)选择量程：按估计待测电压值选择合适量程，在不明电压时，先用 300V 档试测量，以确定量程。

(4)读数

电压读数，表盘上电压刻度标尺为上下两排，上排以 10V 为满刻度，下排以 3V 为满刻度，读数时估读一位，乘上量程档的倍率即为测量值。

电平读数：电平测量的标准档是 1V，可在标尺上直接读数。用其他各档要加上附加值。方法与“万用表测量电平”相同。

注意事项：

(1)所测交流电压中的直流分量不得大于 250V。

(2)晶体管毫伏表灵敏度高，测量时接地必须十分良好。其引出线是屏蔽线，外屏蔽接在机壳（接地端）上，测量时这一端（一般是黑色夹子）接在被测电路接“地”端。

（三）用示波器测量交流信号

示波器是用来显示和测量交、直流信号幅度、频率、周期等多种物理量的仪器，其种类繁多，以上海教学仪器厂生产的 J2458 型教学示波器为例。

基本性能：

1. 垂直 (Y) 放大器

(1)频带宽度：直流：0-2MHz \leq 3 db；交流：5Hz-2MHz \leq 3 db。

(2)灵敏度： \leq 20mV_{p-p}/格。

(3)输入阻抗：1M Ω //40PF。（相当于一个 1M Ω 电阻与 40PF 电容并联的回路。）

(4)衰减倍率：1，10，100、1000 四档， \pm 10%。

(5)输入耐压：400V (DC+AC_{p-p})。

2. 扫描系统 (x 轴)

(1)扫描频率：10Hz-100KHz，分四档。10Hz-100Hz；1000Hz-1KHz；1KHz-10KHz；10KHz-100KHz。

(2)同步：内正同步，内负同步两档。

3. 水平 (x) 放大器

(1)频率带宽：0-500KHz，-3db。

(2)灵敏度： \leq 64mV_{p-p}/格。

(3)输入阻抗：1M Ω //60PF。

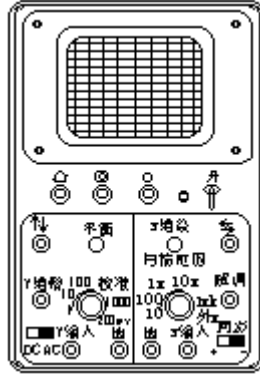
(4)校准电压：50Hz 方波，幅度为 $100\text{mV}_{\text{p-p}}\pm 5\%$ 。

(5)示波管：13SJ38J 型。显示有效面积为 8 格 \times 12 格（1 格=0.8cm）。


(6)使用电源：220V \pm 10%、50Hz。


结构：



面板如图所示，面板控制器的标志、代号及功能分述如下：




(1)“开”：电源开关；

(2)“”：辉度调节旋钮；

(3)“”：聚焦调节旋钮，调节显示图形的清晰度。

(4)“”：辅助调焦旋钮，与  配合使用。

以下 5-11 是 Y 放大器控制件。

(5)“”：垂直位移旋钮。顺时针转动可使图形上移；反之，下移。

(6)“Y 增益”：Y 放大器增益微调旋钮。顺时针旋转时，图形垂直幅度增大；反之，则减小。当需要定量测量时，本旋钮用以校准 Y 放大器的灵敏度。

(7)“Y 轴衰减”：Y 输入信号衰减倍率选择开关，共五档。其中标有 1、10、100、1000 的四档为衰减倍率。如“100”，指衰减 100 倍，即将 Y 轴输入信号幅度衰减为原来的 1/100。第五档标有“校准 100mV”，拨至此位时，机内 100mV 标准信号输入到 Y 放大器，用以校准 Y 放大器灵敏度。

(8)“DC、AC”：Y 放大器耦合选择开关。置“DC”位时，Y 轴输入信号直接输入，用示波器可测量输入信号的直流电压成份；置 AC 位时，信号经耦合电容 C_1 输入。 C_1 起着隔断被测信号中直流成份的作用，使显示波形位置不受直流影响。

(9)“平衡”：调节 Y 放大器第一级的平衡电位器，通常旋转轴档在中间位置。使显示图形不随“Y 增益”“Y 轴衰减”的改变而出现垂直位移。

(10)“Y 输入”：被测信号输入 Y 垂直放大器的接线柱。

(11)“地”：输入信号的接地端。

以下 12-18 是 x 轴系统。

(12)“x 增益”：x 放大器调节旋钮。顺时针旋转时，示波管显示图形的水平幅度增大；反之，则减小。

(13)“”：水平位移调节旋钮。顺时针旋转使图形右移；反之，则左移。

(14)“扫描范围”：水平扫描频率范围选择旋钮。共五档，前四档分别标有“10-100”、“100-1K”、“1K-10K”、“10K-100K”，为扫描频率范围，单位是 Hz。第五档“外 x”，置此位时，机内扫描发生器停止工作，输出端也被切断。外接信号可从“x 输入”端直接输入到 x 放大器。

(15)“微调”：扫描频率微调旋钮。微调比 ≥ 10 倍，可在不小于 K_4 所确定的频率范围内，连续调节扫描频率，以使显示图形稳定。

(16) “同步+ - ”：同步极性选择开关。置“+”时扫描发生器与Y轴输入信号的正半周同步；置“-”时与负半周同步，以获得初相位相反的显示波形。

(17) “x输入”：被测信号输入x放大器的接线柱。

(18) “地”：输入信号接地端接线柱。

仪器后板上有电源插座CZ₅，保险管座BX₁（内装0.75A保险管）。

测量方法：

本仪器使用220V，50Hz电源。开机后电源指示灯即亮。如要读测数据，需预热10分钟，待管子工作状态稳定后才能进行校准和使用。

1. 测量前的准备

(1)将Y轴衰减开关K₂拨到“校准100mV”位置。

(2)“扫描范围”开关K₄拨到“10-100”位置。

(3)调整标有“⊙”的辉度调节电位器W₄，使荧光屏有显示。

(4)调整标有“↓↑”和“↔”的旋钮，使显示位置适中。

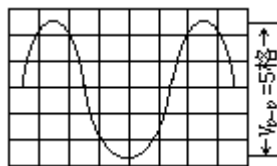
(5)调整“扫描微调”电位器W₇，使波形稳定。这时，如果显示波形在屏幕x轴上幅度不合适，可用螺丝刀调整“x增益”电位器W₈，使水平幅度适中。

Y 衰减倍率	Y 轴标尺示值			
	灵敏度	灵敏度	灵敏度	灵敏度
1	20mV/格	25mV/格	50mV/格	100mV/格
10	200mV/格	250mV/格	500mV/格	1V/格
100	2V/格	2.5V/格	5V/格	10V/格
1000	20V/格	25V/格	50V/格	100V/格

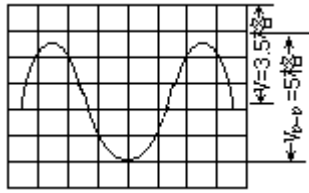
2. 测量举例

(1)信号幅值的测量：选择不同衰减倍率，校准不同的灵敏度，荧光屏标尺将代表不同的单位。其公式为：Y轴标尺示值=灵敏度×衰减倍率。参见上页表*。

如被测波形显示如图，峰、峰之间为5格，此时Y放大器灵敏度标准为20mV/格，Y衰减倍率为10。从表中查得标尺示值为200mV/格，则信号幅值 $V_{p-p}=5 \times 200 \times 10mV=10V$ 。



若信号中有直流分量，也可以将直流电位一起测出。方法是先将Y输入耦合开关K₁置“DC”位置，先不接被测信号，并将“Y输入”与“地”端短接。这时，光屏上会有一条水平亮线。调整“↓↑”旋钮使水平亮线对准标尺某刻度，则该刻度就是零电位线（见图）。将短接线拨去并加上被测信号。由于信号中有直流分量，整个波形显示如图。如果这时Y放大器灵敏度校准为50mV/格，“Y衰减”置“100”，查表标尺读数为50×100mV/格，信号幅度为5.0格，其交流分量峰峰值 $V_{p-p}=50 \times 100 \times 5.0mV=25V$ ，其直流分量为其中心线到零电位线的距离。信号波形是对称的，因此其中心线为峰峰幅度的一半，从上波峰往下数第2.5格为“直流分量”处，即中心线。中心线到零电位线距离为3.5格。所以直流分量 $V_{直}=3.5 \times 5.0=17.5V$ 。



需要说明的是，本仪器对直流和交流波形是正极性向上，负极性向下，因此，上述信号直流分量为+(17-18V)。这是一个幅值在 5V 和 30V 之间变化的正弦波。

注意：

在测量电压幅度时，不能调节“增益”旋钮，因为用已知电压分度时，通过“增益”调节 Y 轴的放大倍数已经确定，即电压灵敏度 V/格已定，若再调节“增益”旋钮时，灵敏度就会发生变化，以致计算出来的幅度不正确。因此测量时只能改变衰减的倍数，不能调节“增益”旋钮。通常示波器的标称灵敏度为 70mV/格。

Y 放大器输入耐压为 400V (DC+AC_{p-p})，因此输入信号的总幅度不要超过 400V。

相位差	显示图形			
0°				
45°				
90°				
频率比 $f_x:f_y$	1:1	1:2	1:3	2:3

*示波器的“示值”一般只取两位数字，除非采用专门的附加测量装置。

测量时通常将“地”端接线路的“地”端，将“Y 输入”端接被测点。

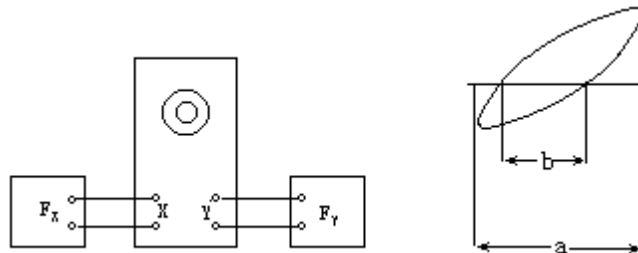
(2)信号频率的测量：测量正弦信号频率时，可将“扫描范围”开关 K_4 拨到“外 X 档”。将频率较精确的信号发生器的正弦信号 f_x ，输入“X 输入”端；被测信号 f_y 输入“Y 输入”端，并取合适的 Y 灵敏度。改变信号发生器的频率 f_x ，使示波管显示频率为简单整数比的利萨如图形。根据利萨如图形表可推算出被测信号频率 f_y ，并可知两信号之间的相位关系。

如示波管显示为表中第三行，左数第二个图形，可知 $f_x : f_y = 1 : 2$ 。从信号发生器标尺上得知 $f_x = 1000\text{Hz}$ ，则被测信号频率 $f_y = 2f_x = 2000\text{Hz}$ ，两信号相位差为 90° 。实际上， f_x 与 f_y 是两个独立振荡的频率，因此 f_x 与 f_y 的位相差不能保持不变，所以不可能得到稳定不变的利萨如图形。上述测试中，只得到一个在表中“1:2”上面三个图形间缓慢变化的图形，但是频率可相当稳定，并保持一段时间即可， K 为 $f_x : f_y = 1 : 2$ 。

(3)正弦波信号相位差的测量：测量线路如图。图中待测频率 f_y 接在 Y 输入端，已知频率 f_x 的信号作为标准正弦信号接在 X 输入端，“X 轴衰减”可拨在“1”或“10”或“100”位置，如果出现利萨如图形，则根据利萨如图形可以计算出两个信号的相位差，见图。

令

$$y = a \sin \omega t ,$$



$$x = a \sin(\omega t + \phi)。$$

即经衰减调节后的 f_x 、 f_y 信号幅度相等，均为 a 格。假定波形在 x 轴线上的截距为 b ，则 y 与 x 的位相差为 ϕ ，

$$\phi = \arcsin \frac{b}{a} \text{ 和 } \pi - \arcsin \frac{b}{a}。$$

如果图形长轴在一、三象限，则 ϕ 在一、三象限取 $\arcsin \frac{b}{a}$ ；二、四象限，取 $\pi - \arcsin \frac{b}{a}$ 。

例如， $b = 2.1 \text{ div}$ ， $a = 3.4 \text{ div}$ ，如果在一、三象限， $\phi = \arcsin \frac{2.1}{3.4} = 38^\circ 8' 40''$ 。

如果在二、四象限， $\phi_2 = 141^\circ 51' 20''$ 。用公式 $\phi = \arcsin \frac{b}{a}$ 和 $\pi - \arcsin \frac{b}{a}$ 计算 ϕ

时不能确定 y 比 x 超前还是落后，而且 ϕ 的有效数字最多只能取到 38.1° （或者 141.9° ）止。

注意事项：

(1) 被测信号幅度范围不清时，应先将“Y 衰减”放到“1000”位置，如显示波形幅度很小，再逐级减少衰减倍率。以防过大信号直接输入，烧毁元件。

(2) 长时间使用时，应尽量减少显示时间。显示完后即将辉度旋钮向反时针方向旋到底，需再显示时，再旋亮。这样可以延长示波管的寿命。应避免频繁地开关电源，否则会降低电子管的使用寿命。

十 万用电表测量多种电学量

万用电表以测量直流电流、电压、正弦交流电流、交流电压、电阻为主，并可用于判断晶体二极管的正、负极性。有的还可以测量电平、电容、电感和晶体三极管的主要直流参数。

(一) 万用表的结构

1. 测量机构：通常采用磁电式表头。其表盘上有各种量程刻度，并标有相应的电量符号。图为U-101型万用表的面板图。

2. 测量电路：由直流电源、整流器、电阻等组成多量程的电阻、电流、电压测量电路。

3. 转换装置：由转换开关(选择测量量的种类和量程用)和标有各种符号的旋钮、插孔组成。

图略

(二) 多种电学量的测量原理

1. 电路转换原理

图(a)所示电路为多种测量电路的组合。当转换开关 K_2 拨到不同的位置时，便接通了相应的测量电路。

2. 直流电流的测量电路

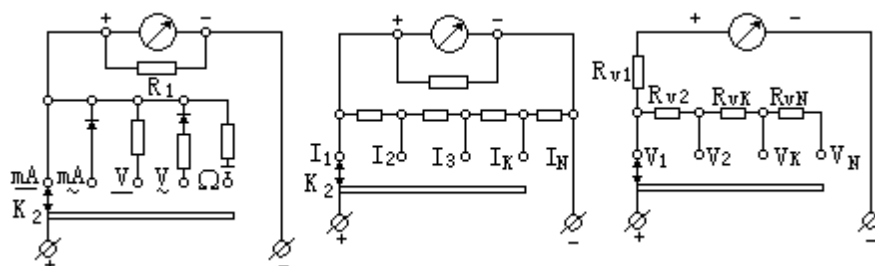
在电路转换原理图中，转换开关 K_2 拨到“mA”位置时，就构成单量程分流电路。

图(b)就是经常采用的闭路式多量程分流电路，其原理与安培计相同，只是将多个接线柱变换量程改为用转换开关换量程。

3. 直流电压的测量电路

在电路转换原理图中，将转换开关 K_2 拨到“V”位置时，就构成单量程直流分压电路。

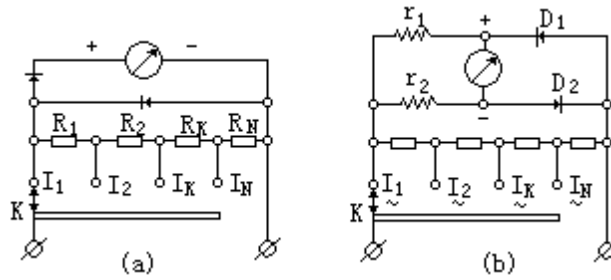
图(c)是一种经常采用的多量程直流分压电路，其原理与直流伏特计相同，只是将多个接线柱变换量程改为用转换开关变换量程。



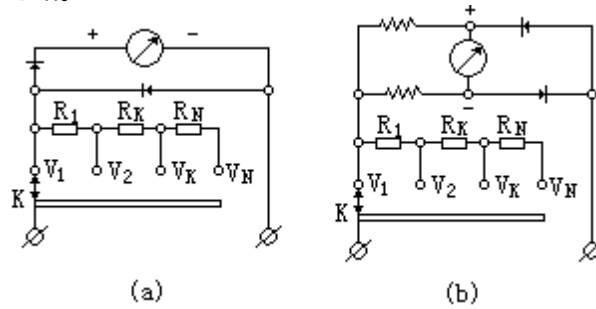
4. 交流电流和交流电压测量电路

在电路转换原理图中，将转换开关 K_2 拨到“ \underline{mA} ”或“ \underline{V} ”位置时，就构成了单量程的交流分流或交流分压电路。所以其实质是在磁电式表头上加上整流电路组成，称为磁电整流式表头，简称整流式表头。

在整流式表头上再加上直流安培计一样的分流电路，就成了多量程交流电流测量电路。见图(a)、(b)。(a)是多量限半波整流交流电流测量电路，(b)是多量限全波整流交流电流测量电路。



在整流式表头上加一个与直流伏特表一样的分压电路，就构成了多量程交流电压测量电路。见图(a)、(b)。(c)是多量程半波整流交流电压测量电路，(d)是多量程全波整流交流电压测量电路。



5、电阻的测量电路

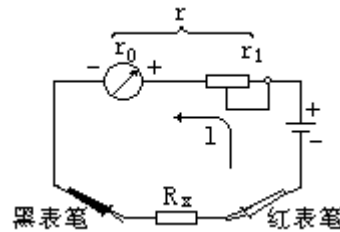
电路原理如图。通过表头的电流 $I = \frac{U}{r + R_x}$ ，

U 为电源的输出电压；

r 为表头内阻 ($r = r_0$ 和 r_1 之和)；

R_x 为被测电阻。

测量电阻实际上通过测量电流实现的。



其表盘刻度原理如下：

(1) 两表笔短路， $R_x = 0$ ， $I = \frac{U}{r}$ ，此时电流值最大，可调整 r_1 使指针满度；

这时， $I = \frac{U}{r} = I_0$ (表头的满度电流)。指针所指的满度位置对应 $R_x = 0$ ，

定为 0Ω 。

(2) 两表笔开路， $R_x = \infty$ ， $I = 0$ ，指针不动。

(3) 当被测电阻 R_x 等于表的总内阻时， $I = \frac{U}{R_x + r} = \frac{U}{2r} = \frac{1}{2} I_0$ 。通过表头的电流 I 只有满刻度电流 I_0 的一半，指针指标尺正中。这时被测电阻的值称为欧姆表的中心值 r_2 ， $r_2 = r$ 。

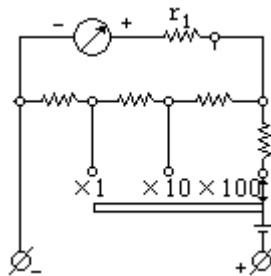
中心值是欧姆表设计和刻度的标准。

(4) 分档刻度

由于 $I = \frac{U}{R_x + r}$ ，即 I 与 R_x 是非线性关系。一般地说，只有 R_x 在 $0.1r - 10r$ 之间，读数才准确。 $R_x \ll r$ 时， I 变化太小， $R_x \gg r$ 时， I 值太小表头受本身灵敏度限制，不易分辨。所以欧姆表的标尺规定长度的 10%-90% 之间为有效工作刻度。这样一来，一个档次的量程就不能覆盖 $0 - \infty$ 欧姆的所有值，必须用不同的量程来测量不同的电阻值。

为了使不同量程的各档共用同一标尺，所以一般都以 $R \times 1$ 档的中心值为标准，成 10 倍地扩大，构成其他各档量程。

如果 $R \times 1$ 档中心值是 10Ω 。即此时表头内阻为 $r=10\Omega$ 。当 $r=100\Omega$ 时，表的中心值为 100Ω ， $R_x=100\Omega$ 时指针指向标尺正中刻度“10”的位置，读数就应乘以 10，这就是 $R \times 10$ 档。

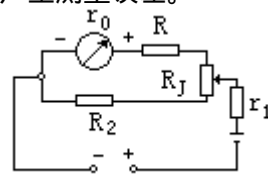


扩大欧姆表的量程就是扩大总内阻 r 的值。其常用电路如图。由 $I = \frac{U}{R_x + r}$

可见，要使工作电流在各档量程与中心值电阻对应均保证为 $\frac{1}{2}I_0$ ，有两种办法可以实现，一是改变电源电压（路端电压） U ，即在不同的量程档使用不同电动势的电源，许多万用表就配有两个电源；二是改变欧姆表的内电阻 r 。

(5) 调零电路

如果干电池的电动势发生变化，其输出电压也会随之变化，那么将两表笔短路时，指针就不会指“0”欧姆，这一现象称为电阻档的零点偏移。最简单的克服方法是调节限流电阻 r_1 的阻值，使表头指针仍回到“0”欧姆处。但是，这个方法却使中心电阻值发生较大的变化，不可避免地要产生测量误差。



为了不产生较大的附加误差，可选用恰当的电路来补偿零点偏移，在如图所示的电路中，在表头回路中增加了一个调零电位器 R_j ，电位器上的滑动触头把 R_j 分成两部分，一部分与表头串联，其余部分与表头并联。

当电池的电动势高于标称值时，流过表头的电流偏大，可将滑动触头下移，以增大与表头串联的阻值，同时减小与表头并联的阻值，使分流增加，从而减小流经表头的电流。当电动势低于标称值时，可将滑动触头上移，增大流经表头的电流。总之，在电动势变化时，调节电位器 R_j ，可使万用表短路时表头的电流保持满刻度，即 R_j 对零点偏移起到了补偿作用。在调节 R_j 时，整个表头回路的等效电阻 R' 可发生变化，因而中心值 $R_{中} = r_1 + R'$ 也要发生变化，如果尽可能地将限流电阻 r_1 取得大一些，表头回路等效电阻 R' 的变化对中心值电阻的影响就可以很小。

6. 功率测量原理

主要测量音频*功率。测量功率时，将万用表交流电压档并联在待测电路两端，测量其交流电压，再用下式换算

$$P = \frac{U^2}{Z} ,$$

式中，P为功率；Z为阻抗；U为端电压。

7. 电平的测量原理

信号在电线传输过程中的衰减或增益，常用电平计量。电平就是输出功率(P_2)与输入功率(P_1)比值的常用对数值。若用分贝(db)为单位，则

$$\text{功率电平} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} ,$$

这是“相对电平制”。在万用表中应用的是“绝对电平制”，常取负载 $R_z=600\Omega$ ，功耗 $P=1\text{mW}$ 为 0 分贝。此时电压

$$U = \sqrt{PZ} = \sqrt{10^{-3} \times 600} = 0.775\text{V}。$$

把交流 0.775V 刻度标为 0db；大于 0.775V 刻度为正分贝，表示增益；小于 0.775V 刻度为负分贝，表示衰减。

可见，用万用表测电平，实际上是测交流电压，并把相应的电压刻度换算成分贝值。

*目前大多数万用表测量的音频频率，最高为 1KHz。

在负载阻抗不变时，换算公式如下：

$$10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 10 \lg \frac{U_2^2}{U_1^2} = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} \text{ (db)} \quad \text{电压电平，式中 } U_1 = 0.775\text{V}。$$

交流电压档量程扩大时，每档间有一个固定的倍率 $K = \frac{V_n}{V_0}$ (V_n 扩大后的量限， V_0 基准量限)。读数时把基准读数乘以 K。电平因为是取对数，扩大量程后读数应在基准读数上加一个固定的分贝值。计算公式为：

$$X_{ab} = 20 \lg \frac{V_n}{V_0} (X_{ab} \text{ 附加分贝值})。$$

如万用表电平测量的基准档 $V_0=10\text{V}$ ，那么表上的电平刻度是以 10V 档为基准的。如果使用 100V 档测，读数时附加值为

$$X_{ab} = 20 \lg \frac{V_n}{V_0} = 20 \lg \frac{100\text{V}}{10\text{V}} = 20\text{db}。$$

假设测量时指针指“5db”，那么实际值=5db+ X_{ab} =5db+20db=25db。

8. 电感、电容的测量原理

利用电感、电容在交流电路里的分压作用，可测量电感值和电容值。

在纯电感、纯电容电路中，交流电流的欧姆定律有如下形式

$$I = \frac{U}{Z_L} \quad \text{或} \quad I = \frac{U}{Z_C}$$

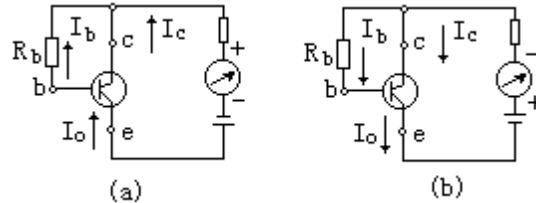
式中， $Z_L = 2\pi fL$ ， $Z_C = \frac{1}{2\pi fC}$ 。

可见，当电压 U、频率 f 为常数（不变）时，电流 I 与电感 L 成反比，与电容 C 成正比。即

$$L = \frac{U}{2\pi fI}, C = \frac{I}{2\pi fU}。$$

常用的万用表的电感、电容刻度是以 $U=220V, f=50Hz$ 的市电为基准换算的。可见，万用表测电感、电容，常常是测交流电流。而测量交流电流的方法又使用测量已知阻值上的交流电压值换算出来的。

9. 晶体管直流参数测量原理

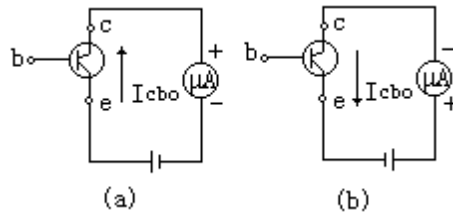


(1) 直流放大倍数 $\beta(h_{fe})$ 的测量电路，是一种固定偏置电路，见图。实

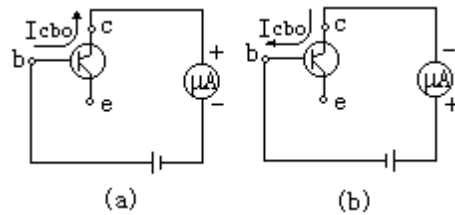
际通过表头的直流电流为 I_c ，因为 $I_b \ll I_c$ ，所以 $I_c = I_e$ ， $b = \frac{I_c}{I_b} = \frac{I_e}{I_b}$ 。

由于在饱和导通*时， I_b 值主要取决于 R_b ，而 R_b 是固定的，所以 I_b 也近似固定不变。这样， β 值可近似正比于 I_e 。把电流表所示 I_e 值换算成 β 值，并刻在表盘上，就可测量 β 值了。

(2) 集电极—发射极反向截止电流 (I_{ceo}) 的测量电路如图，是一种将集电极 c 和发射极 e 直接串联入微安表的测量电路，通过微安表可直接读出 I_{ceo} 值。



(3) 集电极—基极反向截止电流 (I_{ebo}) 的测量电路如图，原理与 I_{ceo} 测量电路相同。



(三) 多种电学量的测量方法

调零后，将红表笔接“+”插孔，黑表笔接“-”插孔。

1. 交、直流电流的测量

转动选择开关至“mA”（或“ μA ”）位置，选择适当的量程，将表笔串联在被测电路中，测量直流电流时，红表笔为电流输入端，黑表笔为电流流出端。通过标有“mA”（或“ μA ”）的标尺读数，再乘以不同量程的倍率取值。以 MF-30 型为例，其直流电压降为 0.75V，准确度为 2.5 级。

*晶体管饱和导通指的是，集电极与发射极间的电压很低，约为 0.150-0.70 伏。

2. 交、直流电压的测量

转动选择开关位置至“V”（或“ \sqrt{V} ”）位置，选择适当量程，两表笔并联于被测端，

测直流电压时，红表笔接电压高端，黑表笔接电压低端。通过标有“V”（或“ \overline{V} ”）的标尺读数，再乘以不同量程的倍率取值。以 MF-30 型为例，直流电压灵敏度为 $20\text{k}\Omega/\text{V}$ ，准确度为 2.5 级，交流电压灵敏度为 $5\text{k}\Omega/\text{V}$ ，准确度为 4.0 级。

3· 电阻的测量

(1) 将万用表规定的干电池按“+”、“-”标记装入电池盒，不可反接，以防表头指反转。

(2) 调零。两表笔短路，用零欧姆调节器使指针指在“ Ω ”标尺的“0”刻度上，每换一次量程都要重调一次。

(3) 倍率选择，用两表笔接触电阻的两端就可以测量电阻值，通过标有“ Ω ”的标尺读数，将基准读数乘以所选用的量程倍率即为实测值。

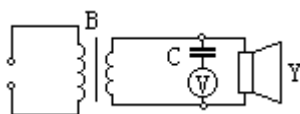
测量电阻时应尽量在刻度盘中间部分进行，这就要求适当选取倍率，这样可减少测量误差。

注意在测电路中的电阻时，切不可在电阻未从电路上取下时测量，那样测得的是表笔两端的等效电阻，若电路在工作，等效电阻两端存有电压有可能损坏万用表欧姆计。

4· 音频功率测量

将转换开关拨至“ \overline{V} ”位置，在一个表笔上串联一个 $0.5\text{-}1\mu\text{f}$ 的电容器（作为隔直流用），然后和测量交流电压一样测量，再换算成功率。

例 测量音圈总阻为 4 欧的扬声器功率按图接线，若测得交流电压为 2V，则扬声器功率为 $P = \frac{U^2}{Z} = \frac{2^2}{4} = 1(\text{W})$ 。

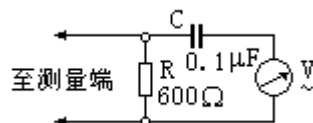


5· 音频(20Hz-20KHz)电平测量

(1) 负载电阻的确定

在万用表盘的左下角注有 0 分贝标准，如 U-101 型表其左下角注有 $0\text{db}=1\text{mW}/600\Omega$ ，则负载电阻 $R=600\Omega$ 。

(2) 测量电路的联接



将转换开关拨至“ \overline{V} ”位置，取 $R=600\Omega$ 电阻一个和 $0.1\mu\text{F}$ 电容器一个（作隔直流用）接成如图线路。

(3) 读数

在万用表表盘的右下角注有各档量程的附加分贝值 X_{ab} （又称起步分贝），以 U-106 型为例，左表说明，测量时，因基准量限 $V_0=10\text{V}$ ，若用 50V 量程，则 $X_{ab}=14\text{db}$ 。用 100V 量程， $X_{ab}=20\text{db}$ ，用 200V 量程， $X_{ab}=28\text{db}^*$ 。

A — C	+
50	14db
100	20db
200	28db

直接用基准量程测量时可直接读数。

选用其他量程测量时则应在“db”标尺读数的基础上加上附加分贝值，取为实测分贝值。

如U-106型，用50伏交流电压档测出的示数为30伏，30V刻度对应的“db”标尺读数为17.8db，而50V档的附加分贝值为+14.0db。

选用量程：基准量程 $\left(\frac{V_n}{V_0}\right)$	附加值 (db)	选用量程：基准量程 $\left(\frac{V_n}{V_0}\right)$	附加值 (db)
1 : 1	0	1 : 1	0
2 : 1	+6	1 : 2	-6
2.5 : 1	+8	1 : 2.5	-8
3 : 1	+9.55	1 : 3	-9.55
4 : 1	+12.05	1 : 4	-12.05
5 : 1	+14	1 : 5	-14
10 : 1	+20	1 : 10	-20
20 : 1	+26	1 : 20	-26
50 : 1	+34	1 : 50	-34
100 : 1	+40	1 : 100	-40
200 : 1	+46	1 : 200	-46
300 : 1	+49.55	1 : 300	-49.55
400 : 1	+52	1 : 400	-52
500 : 1	+54	1 : 500	-54
1000 : 1	+60	1 : 1000	-60

*根据万用表测量交流电压的准确度，14，20，28db最好写成：14.0，20.0，28.0db。

所以 实测电平值=分贝刻度读数+附加分贝数

$$=17.8db+14.0db$$

$$=31.8db。$$

万用表无分贝刻度时，可用算法求出。因为分贝与电压之间关系是对数关系。有公式

$$DB = 10 \lg \frac{P_2(\text{输出功率})}{P_1(\text{零分贝功率})}$$

$$DB = 20 \lg \frac{U_2(\text{输出电压})}{U_1(\text{零分贝电压})}$$

以上两式都是在输出端阻抗等于输入端阻抗条件下应用的，而且换算时要先定出

零分贝时的阻抗和功率数。

以上例用 U—106 型万用表 50 伏档测量时指针指 30 伏为例，可用第二个公式计算。首先求出零分贝时的电压值。因为 0db 时的功率为 1mW，阻抗为 600Ω，所以

$$U = \sqrt{P_1 \cdot R} = \sqrt{0.001 \times 600} \text{V} = 0.77 \text{V}。$$

所以 $DB = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} = 20 \lg \frac{30}{0.77} \text{db} = 31.8 \text{db}$ ，计算结果与直接读出的数值

相同。

附加分贝值可查表。（164 页表）

（四）万用表使用的注意事项

1. 万用表各交流档都是按正弦交流电设计的，因此不能用来测非正弦电量。
2. 被测电路中如有大电容器，应当充分放电后再进行测量。
3. 万用表存放时，转换开关不能停在“Ω”档位置，以防电池漏电。若长期不用应将电池取出。

附 万用表欧姆档误差分析：

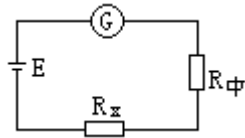
欧姆档原理如图，其中 $R_{\text{中}}$ 为中值电阻，包含了电表内所有电阻。流经表头的电流

$$I_x = \frac{E}{R_{\text{中}} + R_x}，$$

$$R_x = -R_{\text{中}} + E / I_x。$$

在上式中 $R_{\text{中}}$ 和 E 都是定值，由 I_x 的误差 ΔI_x （包括 I_x 的系统误差和偶然误差）引起了 R_x 的误差 ΔR_x 。

下面讨论 ΔI 对 ΔR 的影响。



对上式求导：

$$\frac{dR_x}{dI_x} = \frac{-E}{I_x^2}，$$

$$dR_x = \frac{-E}{I_x^2} \cdot dI_x，$$

两边除以 R_x ：

$$\frac{dR_x}{R_x} = \frac{-E}{I_x^2} \cdot \frac{dI_x}{(-R_{\text{中}} + E / I_x)}，$$

写成 $E_{R_x} = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{-E \cdot \Delta I_x}{I_x^2 (-R_{\text{中}} + E / I_x)} = \frac{-E \cdot \Delta I_x}{-I_x^2 R_{\text{中}} + I_x E}。$

将 $I_x = \frac{E}{R_{\text{中}} + R_x}$ 代入上式，可得

$$E_{R_x} = \left(\frac{R_{\text{中}}^2}{R_x} + R_x + 2R_{\text{中}} \right) \frac{\Delta I_x}{E}。$$

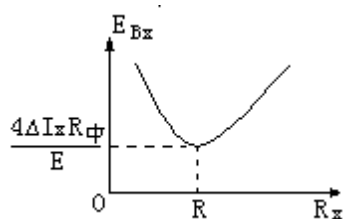
为了求当 R_x 等于多少时 E_{rx} 有极小值，将 E_{rx} 对 R_x 求导，并令

$$\frac{dE_{rx}}{dR_x} = \left(-\frac{R_{\text{中}}^2}{R_x^2} + 1 \right) \cdot \frac{\Delta I_x}{E} = 0。$$

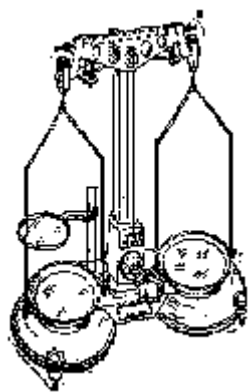
解得 $R_x = R_{\text{中}}$ 。

当 $R_x = R_{\text{中}}$ 时， E_{rx} 有极小值 $\frac{4\Delta I_x}{E} \cdot R_{\text{中}}$ 。用图线来表示如图所示。

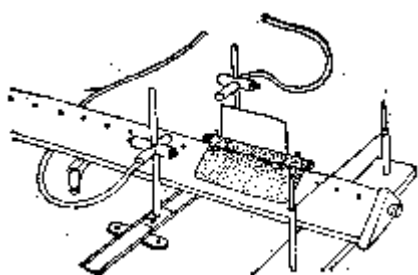
可见测量 R_x 时，选择合适的量程，尽量使指针处于刻度中央或附近，可以减小误差。



实验篇



力学



物体的重心 1

重心是物体各部分所受重力合力的作用点。重力的作用点不易直接观察，一般是用施加外力并分析外力的作用线是否通过重心的方法来寻找重心位置的。方法一、二、三中的外力分别是细线的拉力、手指的弹力和水的浮力。

方法一

目的 确定任意形状薄木板重心的位置。

器材 细线，重锤，刻度尺，小铁钉，薄木板等。

操作

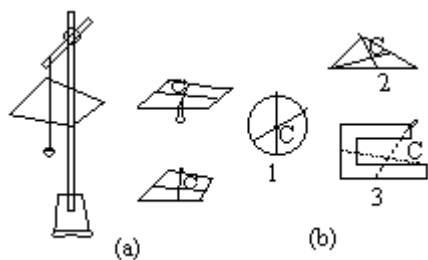
(1)在木板边沿某处钉一个小铁钉，将一根细线和一根重锤线绑在铁钉上。

(2)拉住细线将木板吊起。当木板静止后，沿着重锤线在木板上画一条直线(图 a)。

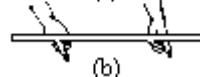
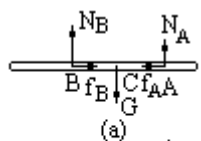
(3)改变小铁钉的位置，用同样的方法在木板上画下另一条直线，两条直线的交点 C 就是木板的重心。

(4)用小铁钉顶在上述交点 C 处，如果木板呈水平状态，证明 C 点确是木板的重心。

(5)本实验可测定(图 b)中各种形状薄板的重心，它们的重心可以在板上也可以在板外。实验结果证实，圆形木板 1 的重心在它的圆心上，三角形木板 2 的重心在它三边中线的交点上，任意形状的木板 3 的重心在板外。



方法二



目的 测定杆状物体的重心。

原理 两个支点 A、B 支承一根杆状物体时(图 a)，如果 $CA > CB$ (设 C 为杆的重心)，则 $N_B > N_A$ ， $f_B > f_A$ 。当两个支点的距离缩小时，一定是摩擦力小的一边先滑动。所以 A、B 两支点一定相遇在重心 C 处。

器材 杆状物体。

操作 把杆状物体水平搁在两手食指上，两手慢慢地靠拢，直至碰到(图 b)。相遇处就是杆的重心。

注意 杆状物体的表面性质要基本一致。

方法三

目的 检验木轮的重心是否在其圆心上。

器材 粘泥，木轮。

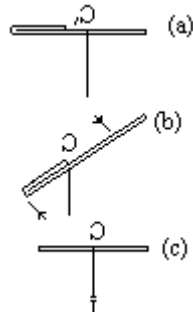
操作

(1)将木轮平放在水面上。当木轮静止后，如果木轮呈水平状态，说明它的重心在圆心上；如果木轮向一边倾斜，则说明它的重心偏向位置较低的一边。

(2)将粘泥加在木轮位置较高的一边，直至木轮呈水平状态为止。设木轮、粘泥受的重力分别为 G_1 和 G_2 ，粘泥离圆心的距离是 R ，则木轮重心偏离圆心的距离

$$s=RG_2/G_1。$$

方法四



目的 说明物体的重心与它的质量分布有关。

器材 铁丝，细线。

操作

(1)将铁丝理直，用细线悬吊其中点 C ，铁丝呈水平状态，说明铁丝的重心在 C 点上（图 a）。

(2)将铁丝在右侧的一半对折起来，细线悬吊位置不变。尽管左右两部分铁丝所受重力仍然相同，但铁丝却失去平衡。由此可见物体的重心与它的质量分布有关（图 b）。

(3)将细线的悬吊点逐渐向左移动，可以找到新的一个悬吊点 C ，这就是铁丝此时的重心（图 c）。

显示物体的微小形变 2

任何物体在力的作用下都会产生一定的形变。以下各实验是通过各种不同的方法将物体的微小形变加以放大来显示力的作用效果的。

方法一

目的 显示桌面受力时的微小形变。

器材 平行光源(2501), 小平面镜 2 面, 铁架 2 只, 铁夹 2 只等。

操作

(1) 将中心开孔的黑纸片放在平行光源的透镜前面, 使平行光线从纸孔射出。

(2) 调整两平面镜的位置和方向(两平面镜的距离尽可能远一些), 使上述光线经过两平面镜反射后, 在屏幕或墙上得到一个明亮的光斑。

(3) 在两平面镜中间向桌面施加向下的压力, 可以明显地见到光斑向下移动; 撤去压力光斑又移回原处。说明桌面受力时发生了肉眼无法觉察到的微小形变。

说明

(1) 放两块平面镜是为了增加光斑移动的距离。

(2) 如果将氦氖激光器放在桌面上, 使它的光直接射向较远的屏幕或墙面上, 向桌面施加压力时光点也会移动, 同样能说明桌面发生了微小形变。



方法二

目的 显示木板受力时的微小形变。

器材 自制微小形变显示器。

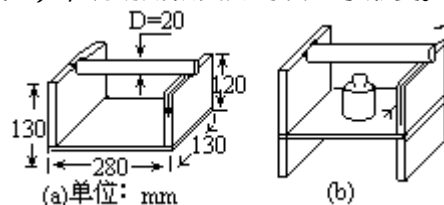
微小形变显示器的制作方法

木架由两块侧板(厚约 10mm)和一块底板(厚约 5mm)构成。左侧板上开一小槽, 使金属棒能嵌入其中。将一根金属丝弯成直角形, 一头做成箭头状作为指针。在右侧板前沿画一条竖线为基线。

操作

(1) 将金属棒一端嵌在左侧木板小槽中, 另一端自由地搁在右侧板上的金属丝(指针)上, 使指针与基线重合(图 a)。

(2) 将微小形变显示器搁在两个支撑物上, 用重物或手压底板, 可看到指针偏转(图 b), 说明底板受力时发生了形变。



注意

(1) 金属棒要重些, 指针要轻些, 这样可以防止针在偏转中跟棒打滑。

(2) 指针直径要细些。因为在形变一定时, 直径越小, 偏转角越大。

方法三

目的 显示玻璃瓶受力时的微小形变。

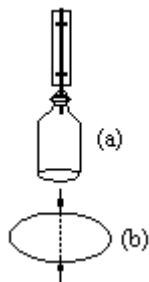
器材 椭圆形大号墨水瓶，带孔橡皮塞，细玻璃管等。

操作

(1)将大号墨水瓶装满红色水，并塞上带玻璃管的橡皮塞(图 a)。

(2)用手沿墨水瓶横截面的短轴方向捏墨水瓶(图 b)，瓶的容积变小，玻璃管中的液面升高，说明玻璃瓶发生了形变。

(3)用手沿墨水瓶横截面的长轴方向捏墨水瓶，瓶的容积变大，玻璃管中的液面降低说明玻璃瓶发生了形变。



注意

(1)瓶中必须装满水，不能留有气体，否则玻璃管中液面高低变化不明显。

(2)玻璃管的内径越小，管中液面高低变化越明显(可利用温度计的玻璃管)。

说明 两次从不同的方向捏玻璃瓶，玻璃管中的液面发生了不同的变化，说明操作(2)中液面的上升确实是由于玻璃瓶体积变化而产生的，而不是由于手传给水的热量使水发生热膨胀而导致的。

弹性形变产生弹力 3

物体发生弹性形变将产生弹力，弹力是物体内部分子力的合成表现，它企图恢复并保持物体原来形状。弹性形变主要有拉伸(或压缩)、扭转和弯曲三种形式。由于弹力就是通常所讲的恢复力，所以它的方向总是跟形变的方向相反。

方法一

目的 说明物体被拉伸或压缩时会产生弹力。

器材 橡皮筋，小车，弹簧等。

操作

(1)将橡皮筋一端固定在小车上，另一端固定在墙上，用手拉小车使橡皮筋伸长一定长度，然后释放小车，可以看到小车由静止开始向墙作加速运动，说明伸长了的橡皮筋产生了弹力，弹力方向和形变方向相反。

(2)将弹簧压在小车与墙之间，压缩弹簧后释放小车，可以看到小车离墙作加速运动，说明被压缩的弹簧产生了弹力，弹力方向和形变方向相反。

方法二

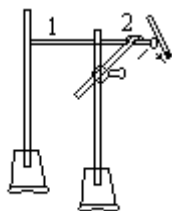
目的 说明物体被扭转时会产生弹力。

器材 细钢丝，橡皮筋，细竹片，粘泥，细竹管(内径4—6mm，长约40mm)，6毫米垫圈4个等。

操作

(1)如图所示安装好器材。

(2)用手顺时针转动竹片，绕紧橡皮筋，然后释放，可以看到竹片像飞机的螺旋桨一样逆时针旋转起来。说明橡皮筋被扭转时产生了弹力，弹力的方向与形变的方向相反。



1、橡皮筋 2、细竹管

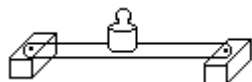
方法三

目的 说明物体弯曲时会产生弹力。

器材 钢锯条1根，砝码，方木等。

操作

(1)将钢锯条的两头搁在两个方木块上，锯条中间放一个砝码，锯条向下弯曲后达到平衡(如图)。说明弯曲的锯条产生了弹力，弹力方向跟弯曲方向相反。



(2)在锯条上再增加一个砝码，可以看到锯条弯曲程度增大。说明弯曲的程度越大，产生的弹力也越大。

胡克定律 4

在研究胡克定律的实验中，应该在弹性限度内使物体的形变尽量大一些，这样可以减少该物体自重等因素带来的误差。

方法一

目的 研究弹簧的伸长与它所受的外力之间的关系。

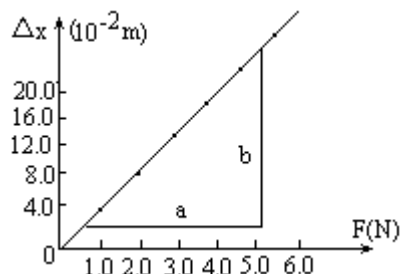
器材 弹簧，钩码(100g)10个，刻度尺，铁架台等。

操作

(1)将弹簧一端固定在支架上，旁边固定一把竖直的刻度尺。在弹簧下端固定一个砝码，从刻度尺上读出弹簧的长度，作为它的原始长度。

(2)逐次增加挂在弹簧下面的砝码，每增加一个砝码，得到一个作用外力 F ，并读出相应弹簧的长度，然后减去原始长度得到该砝码作用时的伸长 x 。

(3)在方格纸上作 $x - F$ 图。每读出一组数据，就在 $x - F$ 图上画出一个相应的点。



(4)弹簧下端所挂砝码的个数，视实验过程而定。如果挂上五至七个砝码后，已经可以明显地看出弹簧的伸长 x 随外力 F 变化的规律，即可停止实验。反之，则需要在弹性限度内继续增加砝码进行实验。

实例 某次实验的数据

$F(N)$	0.98	1.96	2.94	3.92	4.90	5.88
$\Delta x(cm)$	3.2	6.4	9.7	12.7	16.0	19.3

从 $x - F$ 图中可以看出，六个点子的线性程度很好，并且图线经过原点。因此，已经可以得出结论：弹簧的伸长跟它所受的外力成正比，不必继续进行实验。用图解法可以求出 $x - F$ 图线的斜率 $k=b/a=15.9 \times 10^{-2}/4.9=3.2 \times 10^{-2}$ ，这根弹簧的倔强系数 $K=1/k=31N/m$ 。(用线性回归法可以得到：斜率 $k=3.27$ ，截距 $b=-0.013$ ，相关系数 $r=0.9999$ ，说明线性很好。)

注意

(1)实验过程中弹簧的伸长不能超过它的弹性限度。

(2)将悬挂一个砝码的长度作为弹簧的原始长度，可以避免因松弛弹簧的自然弯曲而带来的误差。

(3)实验要重复做三次，然后观察重复性，无突变并且稳定性较好可取三次实验的平均值作为实验结果。这样既可减小测量弹簧伸长的误差，又可以检验在实验过程中弹簧的伸长有没有超过它的弹性限度(如超过弹性限度，两次结果必然相差较多)。

方法二

目的 研究钢丝的伸长跟它所受的外力之间关系。

器材 钢丝（可用小提琴最细的一根弦）。自制游标尺，0.3—0.5kg 的槽码 8 个，铁架等。

游标尺的制作方法

用照相缩微技术印制两张照片，一张主尺照片上有十格，每格 1.00mm，另一张游标尺照片上有十格，每格 0.90mm。把主尺照片粘在一金属片上，再将金属片固定在铁架上，将游标尺照片粘在另一金属片上，即制成一游标尺。

操作

(1) 将钢丝一端固定在铁架上，再把粘有游标尺照片的金属片固定（焊接或粘接）在钢丝下部，尺的高低和主尺相当。

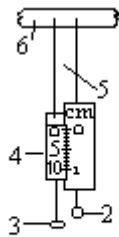
(2) 在钢丝下端挂上槽码盘和一个槽码，从游标尺上读出读数，作为钢丝的原始长度。

(3) 逐个增加槽码盘上槽码的个数，每增加一个都读出钢丝伸长的长度，直至加上全部（8 个）槽码。

(4) 逐个减少槽码盘上槽码的个数，每减少一个都读出钢丝伸长的长度。

(5) 检查两组读数是否基本一致，如略有差异可取平均值。

(6) 用图线法得到钢丝的伸长与它所受的拉力成正比的结论，并求出钢丝的倔强系数（具体过程可参考方法一）。



1、主尺 2、重物
3、槽码 4、游标尺
5、钢丝 6、铁架

注意

(1)、(2) 同方法一。

(3) 由于挂上去的槽码质量较大，因此铁架要足够牢固，使它发生的形变远小于钢丝的伸长。

(4) 主尺与游标尺的刻度必须靠拢，这样才能准确地读出数值。

方法三

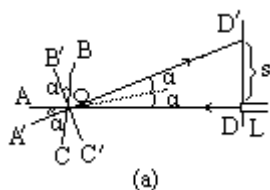
目的 同方法二。

原理 硬杆 AO 和平面镜 BC 构成一个光杠杆，可共同围绕 O 点转动。当 A 点没有发生位移时，激光器 L 的光束垂直入射在平面镜上，且沿原路返回 D 处。当 A 点发生了一个微小的位移 x 到达 A' 时，平面镜成了 B' C' 位置，因而使激光束反射到 D' 处（移动了距离 s）。根据反射定律，如果 $\angle AOA'$ 是 θ ，则 $\angle DOD'$ 是 2θ 。因为 θ 是一个很小的角，所以有 $\tan \theta \approx \theta$ ， $2 \tan 2\theta \approx 2 \cdot 2\theta = 4\theta$ ，即

$$DD' / OD = 2AA' / AO,$$

$$x = s \cdot AO / (2 \cdot DO).$$

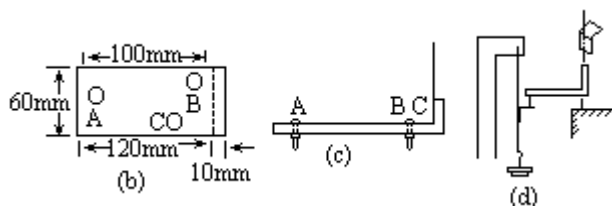
只要分别测量出 s, AO 和 DO，就能得到微小位移 x 的值，这就是光放大的原理。



器材 激光器，自制光杠杆，槽码 8 个，刻度尺，钢丝，铁架等。

光杠杆的制作方法

在金属板上打三个孔如图(b)，并将右端 10mm 一段折成直角。在三个孔里分别固定三个已被砂轮打尖螺丝头的螺丝。用胶水将平面镜镜面向外固定在折起的一段金属板上(图 c)，光杠杆即制成。



操作

(1)将钢丝的一端固定在铁架上，另一端挂上槽码盘和一个槽码。用薄金属片弯成一个 L 形的直角后固定(焊接或粘接)在钢丝下部。将光杠杆的单脚搁在金属片上，双脚支撑在垫高物上。调整垫高物的高度，使光杠杆水平(图 d)。

(2)将激光器放在八到十米开外的地方，激光器旁边竖直放置一杆毫米刻度尺，使激光束经光杠杆的平面镜反射后落在直尺上与激光器等高的地方。

(3)逐个增加槽码盘上槽码的个数，每增加 1 个都读出光点移动的距离，直至加上全部(8 个)槽码。

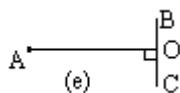
(4)逐个减少槽码盘上槽码的个数，每减少一个都读出光点移动的距离。

(5)检查两组读数是否基本一致，如略有差异可取平均值。

(6)将光杠杆的三个尖脚在练习本上按一下，留下 A、B、C 三个点迹(图 e)，连接 BC，过 A 作 BC 的垂线 AO，仔细地量出 AO 的长度(精确到 0.1mm)。再用皮尺量出光杠杆的镜子到直尺的距离 OD(精确到 1cm)。

(7)用公式 $x = s \cdot AO / (2 \cdot DO)$ 计算出钢丝每次的伸长。

(8)用图线法得出钢丝的伸长跟它所受的拉力成正比的结论，并求出钢丝的倔强系数(具体过程可参考方法一)。



注意

(1)、(2)、(3)同方法二。

(4)增减槽码要小心谨慎，固定在钢丝上的金属片只能上下移动，使光杠杆双脚的位置保持不变，否则将出现较大的误差。

分析

因为 $x = s \cdot AO / (2 \cdot DO)$ ，

所以 $E_x = E_s + E_{AO} + E_{DO} = \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta AO}{AO} + \frac{\Delta DO}{DO}$ 。

AO 较小(约为 10cm)，因此减小实验结果误差的关键是设法减小 AO，AO

不能大于 0.2 毫米（可以用游标卡尺来测量）。如果钢丝与槽码选配得好，s 约为 30—40cm，所以测量 s 的误差 Δs 不能大于 0.5mm。而 D0 的数值较大，因此可以有 1—2cm 的误差，故不必测量得太精确。

假如 $s=0.5\text{mm}$ ， $A0=0.2\text{mm}$ ， $D0=1\text{cm}$ ，则

$$E_x = \frac{0.5}{300} + \frac{0.2}{100} + \frac{0.01}{10}$$

$$=0.002+0.002+0.001=0.5\%$$

s、A0、D0 三项测量的相对误差相差不多，符合测量的有利条件。

增大和减小摩擦的方法 5

摩擦力的本质是一个至今尚有争论的问题。主要有两种学说。一种是啮合说，该学说认为摩擦的产生是由于物体表面粗糙不平，两个物体接触挤压时，接触面上的凹凸部分就互相啮合阻碍运动。另一种是粘合说，该学说认为两个物体接触挤压时，接触点只占总面积几百分之一到几万分之一。因此压强非常大，致使两物体之间的分子距离已小到分子引力的作用范围内，从而产生了粘合作用，阻碍物体运动。

方法一

目的 证实摩擦力的大小跟压力以及接触面粗糙程度的关系：摩擦力随压力的增大(减小)而增大(减小)，随接触面粗糙(光滑)程度的增大而增大(减小)。

器材

空啤酒瓶，毛巾，浓肥皂液少量(或洗洁精)等。

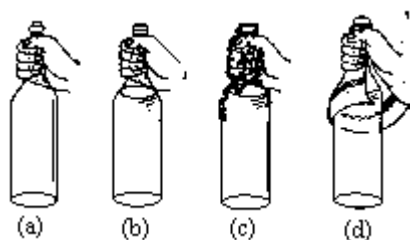
操作

(1)手握空瓶瓶颈，用较小的压力产生的摩擦力便可以将空瓶提起(图a)。

(2)瓶内装满水，显然瓶和水的重力大于空瓶，只有手对瓶压力增大，产生较大摩擦力，才能将满瓶提起(图b)。

(3)手沾肥皂液，或在装满水的酒瓶瓶颈四周涂满肥皂液。肥皂液使接触面变得很光滑，减小“啮合”和“粘合”使摩擦力大为减小，瓶不易被提起(图c)。

(4)用毛巾将涂肥皂液的瓶颈处包裹起来，由于毛巾吸取了肥皂液使接触面变得粗糙，摩擦力增大，瓶就非常方便地被提起(图d)。



方法二

目的 显示润滑措施的作用。

器材 自行车气门芯，小胶管，拉链，石蜡等。

操作

(1)把竹筷和胶管都在肥皂水中浸一下后将竹筷塞进胶管中。

(2)为了防止漏气，套在自行车胎气门芯外的小胶管内径做得很小。换小胶管时常将气门芯和小胶管在皂液(或清水)中浸一下，就能比较顺利地套上去。这是因为液体能减小啮合和粘合，起了润滑作用。

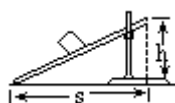
(3)当衣服、书包上的拉链滞涩难拉时，可用石蜡块在拉链的正反面涂擦两遍，再拉起来就十分滑溜了。这是因为固体石蜡起了润滑作用。

测定滑动摩擦系数 6

在做测定滑动摩擦系数的实验时，实验结果与实验器材有很大的关系。例如本实验中测定的木块与木板之间的滑动摩擦系数，就和木头的种类、木头表面的光洁程度、木头的干燥程度等因素有很大的关系。因此，不同的实验，结果可以有较大的差异。

本实验共介绍了六种方法。方法一和方法二要求木块在木板上作匀速运动；实验中鉴别木块是否作匀速运动，是一个难点。方法三则较好地解决了上述困难；方法四、五是根据滑块在外力和摩擦力作用下，通过运动规律的变化求得滑动摩擦系数值的，其测试技术较简单；方法六是给滑块一个初速，在摩擦力作用下从运动到静止的规律中寻找滑动摩擦系数的大小。以上六种方法是由简单到复杂，而形式上都是在运动中研究摩擦力的作用。

方法一



原理 木块放在斜面上时，

下滑力 $F = G \sin \theta$ ，

对斜面的正压力 $N = G \cos \theta$ 。

如果木块匀速下滑，则

$f = F = G \sin \theta$ ，

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{F}{N} = \tan \theta。$$

器材 木块，木板，刻度尺，支架等。

操作

(1) 将木板搁在支架上形成一个斜面。

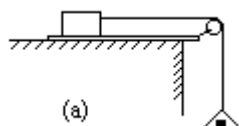
(2) 调节木板的倾角，使木块获得一个初速度后能自行匀速滑下（目测判断木块是否作匀速运动）。

(3) 用刻度尺测出斜面的高度 h 和斜面在水平面上的投影长度

s （如图），即可由公式 $\mu = \frac{f}{N} = \frac{h}{s}$ 算出木块与木板之间的滑动摩擦系数。

注意 目测判断木块的运动是否匀速是不容易的，所以每次给予木块的初速度要尽量相同，以减少判断的错觉，而且实验要多次进行，使判断尽可能正确。

方法二



器材 带定滑轮的木板，木块，细绳，小盘，托盘天平，砝码，槽码等。

操作

(1) 木板水平放置，细绳跨过定滑轮，一端连着木块，另一端拴上小盘（如图）。

(2) 调节小盘中的砝码，使木块被轻推一下后能向右作匀速运动（目测）。测

量出小盘与砝码所受的总重力，即木块所受的滑动摩擦力 f ；测量出木块所受的重力，即木块与木板之间的正压力 N 。

(3)将槽码放在木块上，增大木块与木板之间的正压力，重复操作(2)。共重复九到十一次。

(4)以横轴表示木块与木板之间的正压力 N ，纵轴表示木块受的滑动摩擦力 f ，作 f - N 图。

(5)用图解法求出图线的斜率，即木块与木板之间的滑动摩擦系数。

注意 同方法一。

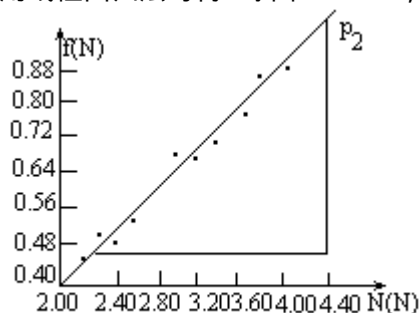
实例 某次实验的数据

$N(N)$	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.20
$f(N)$	0.45	0.51	0.50	0.56	0.66	0.70	0.71	0.73	0.78	0.87	0.89

作 f - N 图，在直线上取两点 $p_1(2.40, 0.48)$ ， $p_2(4.40, 0.95)$ ，求出直线的斜率

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{0.95 - 0.48}{4.40 - 2.40} = 0.24 .$$

用线性回归法可得：斜率 $k=0.22$ ，相关系数 $r=0.986$ 。



(b)

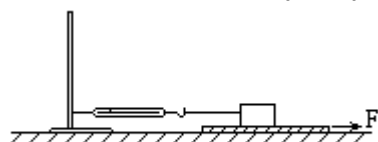
从图象上可以看出，数据点比较分散，相关系数不是很高，这主要是因为目测造成的误差较大。

方法三

器材 弹簧秤，细绳，木块，木板，槽码，托盘天平，砝码等。

操作

(1)将木板放在水平桌面上，木块放在木板上，木块通过细绳与弹簧秤相连，弹簧秤另一端固定在桌面上(图 a)。



(a)

(2)用手拉动木板，同时读出弹簧秤的读数，即木块与木板之间的滑动摩擦力 f ；测量出木块所受的重力，即木块与木板之间的正压力 N 。

(3)将槽码放在木块上，增大木块与木板之间的正压力 N ，重复(2)的操作。共重复 7—9 次。

(4)以横轴代表木块与木板之间的正压力 N ，纵轴表示木块受的滑动摩擦力 f ，作 f - N 图。用图解法求出图线的斜率，即木块与木板之间的滑动摩擦系数。

实例 某次实验的数据

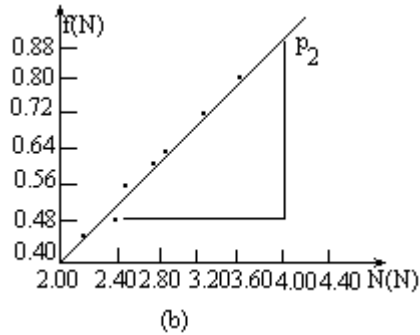
N(N)	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00	3.40	3.80
f(N)	0.47	0.50	0.55	0.61	0.63	0.71	0.79

作 f-N 图，在直线上取两点 $p_1(2.40, 0.50)$ ， $p_2(4.00, 0.84)$ 。求出直线的斜率

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{0.84 - 0.50}{4.00 - 2.40} = 0.21$$

用线性回归可得：斜率 $k=0.20$ ，相关系数 $r=0.997$ 。

从图象上可以看出，数据点与直线符合得比方法二要好，相关系数也比较高。



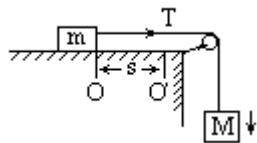
注意

- (1) 为了使弹簧秤的读数在实验中稳定，可在木板上表面贴一张绘图纸。
- (2) 操作时尽量使木板以较小的速度匀速前进。

分析 这个方法的误差比前两个方法的误差要小一些，主要因为滑动摩擦力的大小在一定范围内与相对运动的速度大小无关，因此对木板的运动不必严格要求匀速。

方法四

目的 利用物体在拉力和摩擦力的合力作用下运动的规律来推求物体与木板之间的滑动摩擦系数。



原理 当水平台面上的物体 m 受到重物 M 向下运动的拉力时将会作匀加速直线运动，运动方程为

$$Mg - T = Ma$$

$$T - mg\mu = ma$$

式中 T 为绳子拉 m 时的压力， a 为作加速运动的加速度， μ 为 m 与木板间的滑动摩擦系数。由于绳子拉力 T 不易求得，所以将 式中的 T 用 式代入，可以写出与 μ 有关的表示式，即

$$\mu = \frac{Mg - (M + m)a}{mg}$$

上式中的加速度，可通过测量 m 的滑动距离 s 和滑动所需的时间来求得。 m 用 O 点开始滑动，作匀加速直线运动，到 O' 点结束，需要时间用 t 表示，则 $a=2s/t^2$ 。因而 式变为

$$\mu = \frac{Mg - (M + m) \cdot 2s / t^2}{mg} = \frac{M}{m} - \left(\frac{M}{m} + 1\right) \cdot 2s / (gt^2)$$

式可用作测量滑动摩擦系数 μ 的依据。在 s 、 M 、 m 都不变的条件下重复测量多次就可得到平均滑动摩擦系数值。

器材 米尺，秒表，天平附砝码，细绳，滑轮（质量轻并且转动非常灵活），滑块，重物等。

操作

(1) 安装滑轮和滑块，重物，注意拉力应在水平方位，并取 s 约 1m 左右，并做好 0 和 0 点刻线记号，用天平测量滑块和重物的质量，精确到 0.02g；

(2) 测试 m 由 0 开始滑动到 0 点的时间 t ；

(3) 重复十次，并求得时间的平均值 \bar{t} ；

(4) 根据式求出平均滑动摩擦系数 $\bar{\mu}$ 。（式中的 t 改为 \bar{t} 时， μ 改为 $\bar{\mu}$ 。）

注意

(1) 拉力务必保持水平方位。可用米尺在 0 和 0 两点处测量拉绳跟桌面的高度，它们应该相等，否则可调节滑轮的倾斜角度；

(2) 秒表必须准确计时，不能出现动作滞后的弊病；

(3) 如果 M 质量太小，拉不动滑块 m 时，需要重新配置 M 的大小；

(4) 本实验误差的主要来源是时间 t ，适当调节 M 或者 m 值，使 t 值至少有两位有效数字，如果用光电门测量，那么误差较小；

(5) 由于滑动摩擦系数与诸多因素有关，因此大量增加重复次数，其平均值的标准差不会有显著变小；

方法五

目的 改变物体所受拉力，来推求物体与木板之间的滑动摩擦系数。

原理 参看方法四，滑块作加速运动时有关系式

$$\mu = \frac{M}{m} - \left(\frac{M}{m} + 1\right) \cdot 2s / (gt^2) .$$

如果 M 值取多种确定的值，那么相应的时间 t 值也随之变化。在这种实验里求得的 μ 应该具有更普遍的意义。为了求得可靠的 μ 值，采用作图法，既方便又直观，如果用线性回归法， μ 的有效数字位数不变，但其值较为准确，计算较麻烦，但可信度更高。

将上式变换后可得到如下形式

$$\frac{2s}{gt^2} = \frac{M - m\mu}{M + m} .$$

采用分比定理，可得到

$$\frac{2s}{gt^2 - 2s} = \frac{M - m\mu}{M + m - M + m\mu} = \frac{-m\mu + M}{m(1 + \mu)} = -\frac{\mu}{1 + \mu} + \frac{1}{m(1 + \mu)} M .$$

$$\text{如果令 } y = \frac{2s}{gt^2 - 2s}, x = M, A = -\frac{\mu}{1 + \mu}, B = \frac{1}{m(1 + \mu)},$$

则上式变为： $y = A + Bx$.

横坐标取重物M为变量坐标，即自变量；纵坐标取特殊量 $\frac{2s}{gt^2 - 2s}$

为坐标，是因变量。由许多组实验数据(M,t)变换为 $(M, \frac{2s}{gt^2 - 2s})$ 后，

在xoy坐标里将画出一条不过零的直线。根据直线的截距可求出 μ 值，由直线的斜率可求出滑块的质量 m 值，如果 m 值与天平称量值 m_0 基本一致，说明本方法及数据处理是准确的，由此得到的 μ 值也是可信的。因此可写出

$$\mu = \frac{A}{1-A}$$

$$m = \frac{1}{B(1+\mu)} = \frac{1-A}{B}, E_m = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\%$$

式中 A、B 是由实验得到数据求得的截距和斜率。

器材 米尺，秒表，天平附砝码，细绳，滑轮，滑块，重物（用钩砝，加片码）等。

操作

(1) 安装滑轮和滑块以及钩码，注意拉力应在水平方位，取距离 s 约为 1m 左右，做好 0 和 0 点刻线记号，用天平测量滑块的质量，精确到 0.02g。

(2) 取钩码的最大质量为 M_1 ，测试 m 由 0 开始滑动到 0 点的时间 t，重复测量三次，取其平均值，用 t_1 表示。

(3) 钩码质量逐渐减少，每次减少 20 克，一直到重物拖不动滑块为止。注意，每改一次重物即钩码质量 M_i 都要按 (2) 相同的方法测三次相应的时间，取平均 t_i 。

钩码质量的种类不能少于五种，种类越少画出的直线可靠性越差，反之则好。

(4) 作 x-y 曲线，并求出斜率和截距。

(5) 求出滑动摩擦系数 μ 和滑块质量 m_0 。

(6) 将 μ 与木质材料间的滑动摩擦系数 (0.2—0.4) 进行比较，是否在此范围内，同时计算出 E_m ，检验本方法的准确度。

数据

$m_0 =$ (g), $s =$ (m), $g = 9.79(m/s^2)$

M(g)							
$t_1(s)$							
$t_2(s)$							
$t_3(s)$							
$t_4(s)$							

注意

(1) 滑块滑动时，在滑块和木板间由于电子得失会产生静电现象，静电力的作用使正压力原来为 mg μ 应改为 $(mg+Ee)$ μ ，所以会使最后求得的 m 值比天平测到的值 m_0 来得大，用验电器检查时会发现金属箔张得很大，这是系统误差产生的主要原因之一；

(2) 由于时间测量是本实验的关键，因此有可能时，用光电计时会得到很理想的结果；

(3) 本实验中滑块与木板接触滑动有很大的偶然性，所以偶然误差甚大，已掩盖了滑轮、细绳等各种因素的影响，但 μ 的有效数字位数与各种资料发表的数据定

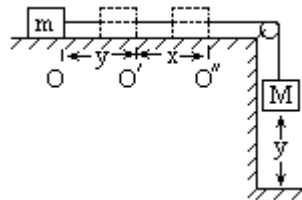
较好地符合。

(4)如果用线性回归法计算，相关系数不少于两个九，回归系数算得的 μ 和 m 也只有二至三位数，读者可根据第一篇中涉及的内容检验和比较。

方法六

目的 利用摩擦力使运动的滑块减速直到静止的整个过程来测量滑动摩擦系数。

原理



将质量为 m 的滑块放在水平台面上，由重物 M 通过细绳绕过滑轮将 m 连结起来，见图所示。台面上的 O 点、 O' 点、 O'' 点分别表示起始点、拉力终止点和滑块停止点。当重物 M 下降 y 距离时，正好碰地，滑块 m 到达 O' 点后将作匀减速直线运动，再经过 x 距离后就停止在 O'' 点。减速的原因就是在这段过程中，滑块在水平方位仅受到滑动摩擦力的缘故。

根据上述的讨论不难列出滑块在 y 距离内运动的动力学方程：

$$Mg - mg - \mu(M + m) = (M + m)a_1$$

式中 M 、 m 分别是重物、滑块的质量， μ 是滑块与台面间的滑动摩擦系数， a_1 是 M 与 m 在 y 距离内运动的加速度。滑块在 O' 点的速度应是

$$v_0'^2 = 2a_1y = 2y \frac{Mg - mg - \mu(M + m)}{M + m} = 2yg \frac{M - m\mu}{M + m}$$

滑块 m 在 x 距离内的动力学方程为

$$-\mu mg = ma_2;$$

即

$$a_2 = -\mu g$$

速度由 v_0' 降为零，则 $-v_0'^2 = 2a_2x$

将 代入 并与 比较得到

$$\mu = \frac{yM}{my + Mx + mx}.$$

只要量得距离 y 、 x 和称得质量 m 、 M 就可算出 μ 值。

器材 米尺，天平附砝码，滑轮，细绳，木滑块和钩码等。

操作

(1)安装滑轮和滑块以及钩砝，注意拉力应在水平方位，取 y 约为 $0.5—0.6m$ ，即 M 底部与地面的距离为 $0.5—0.6m$ ，在台面做好 O 、 O' 等记号，并用米尺测量 y 的精确值；

(2)将滑块移到 O 点，放手后开始滑动，当滑块停止后用米尺量度 x 距离，重复测量三次，如果三次 x 值相差较大，通常还需多次重复测量，次数不少于十次为宜，最后将平均值的 x 距离代入 式，算出平均滑动摩擦系数；

(3)改变 y 值重复(2)的测量， y 值可取 $0.2—0.8m$ 范围内的三种值，算出的各种平均滑动摩擦系数应是相同的，但是有效数字位数有所区别；

(4)改变钩码质量重复(3)的测量, M 值可取三种值, 最小能拖动的值, 最大的 M 值(即使滑块快速滑动), 最后取中间值, 试比较三种 M 时的平均滑动摩擦系数;

(5)改变滑块的质量, 可采用 m 上增加砝码的方法重复(2)的测量, 同样取三种不同值, 使滑块运动在快、慢、中三种状态, 然后测到三种 m 时的平均滑动摩擦系数。

注意

(1)本实验的所有内容和要求都假设台面是水平安置的, 最好能有水准仪分别在 0、0 和 0 三点处检查台面的水平程度;

(2)如果能用测高仪测量 y 值, 显然可以提高本实验的精确度;

(3)如果取 M 值为自变量, x 值为因变量, 进行如下变换, 可用作图法和线性回归法求出平均滑动摩擦系数。

由于 $My = (M+m)\mu x + my\mu$ 设法使自变量 包含有 M, 因变量 包含有 x 值, 组成新的变量(,), 而新的变量成线性关系, 以此来求得 μ 和有关的量。具体方法如下:

将上式变换成 $\frac{x}{y} = \frac{M - m\mu}{(M + m)\mu}$, 利用合比定理(将分母与分子相

加, 并定为分母)则有关系式

$$\frac{x}{x+y} = \frac{M - m\mu}{M(1+\mu)} = \frac{1}{1+\mu} - \frac{m\mu}{1+\mu} \cdot \left(\frac{1}{M}\right).$$

令 $\eta = \frac{x}{x+y}$, $\frac{1}{M} = \frac{1}{M}$, $A = \frac{1}{1+\mu}$, $B = -\frac{m\mu}{1+\mu}$, 则上式变为: η

$= A + B$ 。即 η 与 $\frac{1}{M}$ 成为线性关系, A 是直线的截距, B 是直线的斜率。

由实验值在 $\eta - \frac{1}{M}$ 坐标里能画出一条直线, 直线的截距为 A, 那么根据

$$A = \frac{1}{1+\mu} \quad \text{可得到} \mu = \frac{1-A}{A},$$

直线的斜率为 B, 根据

$$B = -\frac{m\mu}{1+\mu} \quad \text{可得到} m = \frac{A^2 B}{A-1}.$$

用天平可以精确地测量滑块的质量 m_0 。可计算用以上方法得到的 m 其准确度为

$$E_m = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\% .$$

在同一个实验里, 可以认为 E_m 和 E_μ 是相同的。因此最后的结论是用上述方法得到的平均滑动摩擦系数的准确度为 E_μ , 其值为 μ 。如果用线性回归法, 则 A 和 B 值更加准确, 其思想方法与作图法完全一致, 读者可仿照第一篇的有关内容作为对作图法的进一步核对。

7 静摩擦力

方法一

目的 显示米粒的静摩擦力。

器材 杯子，筷子，米若干。

操作

(1)将筷子插在空杯子中心，逐渐向杯中加米，一边加一边压紧，直到杯中加满米。

(2)向杯中加少许水，等一会后，拿住筷子就可以把装满大米的玻璃杯提起来。

建议 采用下列不同的方法进行实验，并对结果进行讨论：

(1)加米时不是边加边压，而只是倒满为止；

(2)先加满米，并压紧，用手捂住米，从手指缝里将筷子插入；

(3)先加满米并压紧，不用手捂米就将筷子插入；

(4)用竹筷和光滑的玻璃筷分别做此实验。

方法二

目的 显示纸张的静摩擦力。

器材 二百页左右的书两本。

操作

(1)将两本书逐页交叉契合后水平放置，要用很大的力才能将书拉开(如图)。



(2)在契合后水平放置的两书上再压两个一千克重的砝码，就几乎无法将两书拉开。

注意 两书互相契合部分至少要占书宽的三分之二。

方法三

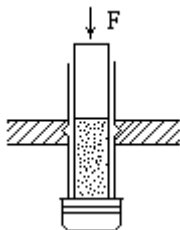
器材 长40cm、直径约6cm的竹筒(中间有一个节子)，直径略小于竹筒内径的圆木棍，牛皮纸，细绳，木架，细砂等。

操作

(1)利用竹筒中间的节子将竹筒竖直搁放在木板架的孔中。

(2)在竹筒下边平整地蒙上一层纸，并用细绳扎紧。用手托住纸缓缓地向筒内装入细砂(约略多于半桶)。

(3)将圆木棍插入竹筒内，此时木棍顶端可压上一个很大的力(例如坐上一个人)，筒底的纸却不会破裂(如图)。



(4)将细砂倒出，再将木棍放进竹筒内，单是木棍的自重就会使筒底的纸破裂。

注意

- (1) 砂柱宜长不宜短，筒内壁不宜光滑，可适当打毛一些。
- (2) 砂粒中不宜混有其他东西，以免影响压力的均匀分布。

8 静摩擦力的方向

判断静摩擦力的方向往往是学生学习中的一个难点。本实验用物体的形变(毛刷或细钢丝)来显示静摩擦力的方向,效果较好。

方法一

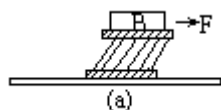
目的 显示几种不同情况中物体所受静摩擦力的方向。

器材 长毛刷4只,木板,木块,细绳等。

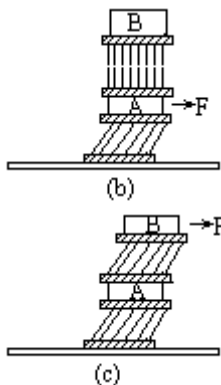
操作

(1)将两只长毛刷分别固定在木块A的上、下两个表面(毛朝外),第三只长毛刷固定在木块B上,最后一只毛刷固定在木板上。

(2)将B木块毛刷放在平板毛刷上,轻轻向右拉B木块,从毛的偏转方向可显示B木块受的静摩擦力方向向左,平板受的静摩擦力方向向右(图a)。逐渐增大F,毛的形变也逐渐加剧,说明当外力增大时静摩擦力也增大。

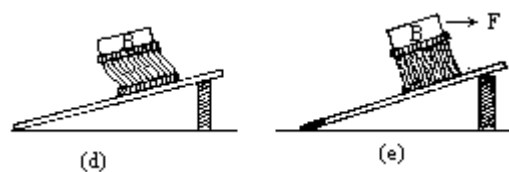


(3)将固定在A木块一个表面的毛刷放在平板毛刷上,再将B木块固定毛刷的一面放在A木块另一侧的毛刷上。先向右拉A木块,从毛刷的变形可显示A木块下侧受的静摩擦力向左,平板受的静摩擦力向右,而A、B之间不存在静摩擦力(图b)。如果向右拉B木块,从毛刷的变形可见B受到A向左的静摩擦力,A上侧受到B向右的静摩擦力,下侧受到平板向左的静摩擦力,同时平板受到A向右的静摩擦力(图c)。

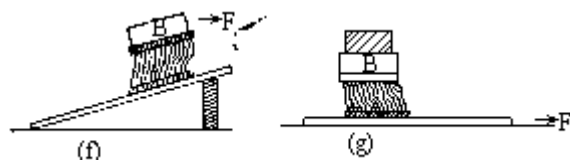


(4)将木板搁成斜面,B木块的毛刷放在斜板的毛刷上,从毛刷的变形可见斜板对B的静摩擦力方向沿斜板向上,而B对斜板的静摩擦力沿斜板向下(图d)。

(5)用一个适当的力拉B木块,可以使上下毛刷的毛都不发生形变,说明此时不存在静摩擦力(图e)。增大拉力,可以见到木块跟斜面所受的静摩擦力和(图d)中相反了(图f)。



(6)将B木块放在平板毛刷上,拉着平板向右作加速运动,可以看到平板对B的静摩擦力向右,而B对平板的静摩擦力向左[此实验如毛刷形变不够明显,可在B木块上加上一个适当的重物如图(g)]。



注意

- (1) 宜选用毛较大的毛刷。
- (2) 所选的 A、B 两木块的轻重应该与所选用的毛刷毛的软硬相配合，毛越硬，木块应越重。
- (3) 为了使毛的形变易于观察，可将毛刷的毛染成逐行相间的不同颜色。

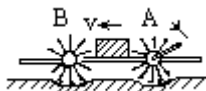
方法二

目的 显示车子的主动轮和从动轮所受静摩擦力的方向。

器材 自制钢丝轮小车，重物，橡胶垫等。

钢丝轮小车的制作方法

将 15mm 长直径为 0.5mm 的细钢丝插在直径约 10mm 的小木轮上，做成直径约 30mm 的钢丝辐条车轮。把四个车轮装在木板上，并且在同一根轴上装上摇手柄（作为主动轮），即成为钢丝轮小车。



操作 将小车放在橡胶垫上，并在小车上放一个大小适当的重物。逆时针摇动主动轮 A 的摇手柄，从钢丝弯曲的情况可以见到主动轮 A 受地面的静摩擦力向前，而从动轮 B 受地面的静摩擦力向后。

注意 为了使辐条弯曲明显，可以在从动轮 B 的轮轴和轴承之间用橡皮卡紧。以增大小车前进的阻力。

测定静摩擦系数 9

测定静摩擦系数一般要在物体将动未动的状态下测量（如方法一）。方法二不受上述条件制约，各有巧妙之处。

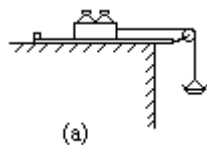
方法一

目的 用图线法测定两木质表面间的静摩擦系数。

器材 带定滑轮的木板，木制摩擦块，砝码盘，砝码，物理天平，细绳等。

操作

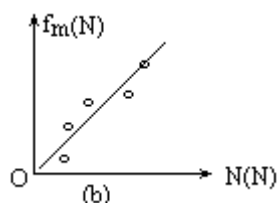
(1) 将木板水平地放置在桌面上，使滑轮伸向桌沿外，用适当长度的细绳将砝码盘和摩擦块连在一起，使砝码盘悬吊在滑轮上（如图 a）。



(2) 向砝码盘放入砂子，使木块刚好在木板上开始滑动。然后在砝码盘中减少微量砂子，使木块刚好不动。用天平测量并且计算、记录木块所受的重力 G 及砝码盘和砂子所受的重力 F 。

(3) 逐次在摩擦块上加放不同数量的砝码，改变摩擦块的质量。重复步骤(2)，取得 5 组以上数据。

(4) 将绳子拉木块的力 F 和木块对木板的正压力 N （大小等于 G ）的数据列表，并作出 $F-N$ 图线（如图 b）。



(5) 用图解法求出图线的斜率。图线的斜率就是静摩擦系数。

注意

(1) 实验中应注意使两木质表面光滑情况保持不变。并使摩擦块尽可能在木板上同一段路程上滑动。

(2) 本方法测得的静摩擦系数是粗略的。

方法二

目的 测定木块和桌面间的静摩擦系数。

原理 质量均匀、底面边长为 a 的长方体，置于水平桌面上。如果在离桌面 h 的高度上给长方体施一个水平拉力 F ，则高度 h 必然存在一个临界值 h_0 。当 $h > h_0$ 时，只能使长方体翻倒；当 $h < h_0$ 时，只能使长方体滑动。

根据刚体平衡条件，在 $h=h_0$ 时

$$\begin{cases} F = f_m = \mu mg ; \\ F \cdot h_0 = mg \cdot \frac{a}{2} . \end{cases}$$

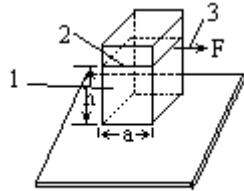
联立两式解得： $\mu = \frac{a}{2 \cdot h_0}$ 。因此，只要测出长方体的临界高度 h_0

和底边长 a ，即可求得长方体和桌面间的静摩擦系数。

器材 长方体木块，橡筋，细线，刻度尺等。

操作

(1)如图所示，适当调节橡筋的位置，找到能使木块翻倒的橡筋最低位置。



1.木块 2.橡筋 3.细线

(2)测出此时橡筋离桌面的高度 h_0 和木块底边长 a ，即可由公式 μ

$= \frac{a}{2 \cdot h_0}$ 求得木块和桌面的静摩擦系数。

注意

(1)通过细线对木块施加拉力 F 时，细线应与木块侧面垂直且保持水平。

(2)拉力应由小到大逐渐变化。

力的平行四边形法则 10

能完成本实验的方法很多。只要能直接或间接测定三个力的大小和方向，都能验证平行四边形法则。方法一的分析部分介绍了一种图象处理误差的方法，方法二、三、四可参照应用。

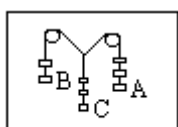
方法一

目的 验证力的平行四边形法则。

器材 木板，滑轮，刻度尺，细绳，钩码，砝码等。

操作

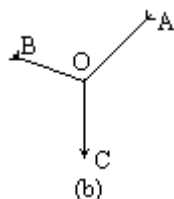
(1)在木板上覆盖一层白纸，然后将两个滑轮的轴固定在木板上。把三根细绳的一端结在一起，一根细绳的另一端直接挂一串钩码，另外两根细绳跨过定滑轮再各挂一串钩码（图 a）。



(a)

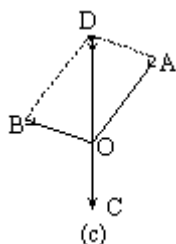
(2)系统平衡后，在白纸上记下三根细绳的交点 O 的位置以及三根细绳的方向。

(3)根据砝码的多少和细绳的方向，在白纸上作出三个力的图示 OA、OB、OC（图 b）。



(b)

(4)以 OA 和 OB 为邻边作平行四边形和对角线 OD（图 c）。如果 OD 和 OC 在误差范围内大小相等，方向相反，即可验证力的平行四边形法则。



(c)

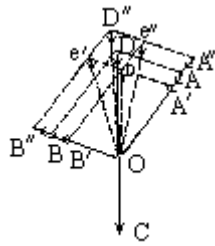
(5)改变钩砝数目，可以重复验证。

分析 以此实验为例，着重讨论“OD 和 OC 在误差范围内大小相等、方向相反”的含义。

系统平衡并记下结点 O 的位置之后，可以进一步考察三个力的误差范围。在 A 串钩码上逐步增加小砝码，直到用眼睛能判断结点的位置已发生了变化为止，增加上去的砝码的重力即为 F_A 。用同样的方法可确定 F_B 。

以图(b)为基础，在 OA 及其延长线上确定 A 点和 A 点，使 $AA = AA = F_A$ 。用同样的方法确定 B 和 B。以 OA 和 OB 为邻边作平行四边形，得到对角线 OD，以 OA 和 OB 为邻边作平行四边形，得到对角线 OD，以 OA 和 OB 为邻边作平行四边形得到对角线 Oe，以 OA 和 OB 为邻边作平行四边形得到对角线 Oe

(图 d)。



如果 $OD \approx OC \approx OD'$ ，可认为 OD 和 OC 在误差范围内相等，如果 CO 的延长线在 $e'Oe$ 之内，可认为 OD 和 OC 在误差范围内方向相反。

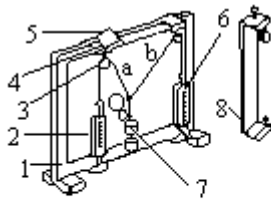
方法二

器材 木制板架，滑轮架（滑轮架上端悬有定滑轮，下端带铁钩，可在板架上左右移动），弹簧秤两只，钩码若干，细绳，白纸，铅笔等。

操作

(1) 将白纸固定在板架上。

(2) 将细绳穿过滑轮连接弹簧秤 A、B 和钩码，两弹簧秤竖直倒置并分别固定在左右滑轮架下端的铁钩上（图 a）。

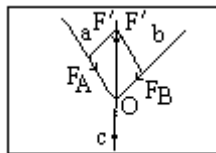


- (a)
- 1. 板架 2. 弹簧秤 3. 滑轮
 - 4. 滑轮架 5. 紧固螺丝 6. 弹簧秤B
 - 7. 钩码 8. 滑轮架

(3) 待整个装置稳定后记下两弹簧秤的读数，并用铅笔在白纸上做下 O 、 a 、 b 、 c 四个记号，绳结正后方为 O 处，各细绳正后方为 a 、 b 、 c 三处。

(4) 取下白纸沿 Oa 、 Ob 、 Oc 方向分别作射线，确定标度后根据弹簧秤 A、B 的读数以 O 为原点在 Oa 和 Ob 上作力 F_A 、 F_B ，用力的平行四边形法则作出合力 F 。

(5) 根据钩码所受的重力以 O 为原点沿 oc 方向作力 F' ，如果 F 和 F' 在误差范围内小大相等，方向相同即可验证两个共点力合成的平行四边形法则（图 b）。



(6) 改变两个滑轮架在木板架上的位置或改变钩码的多少，可重复验证。

方法三

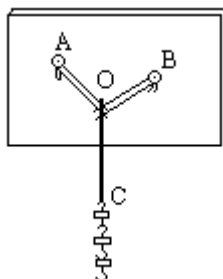
器材 航模用橡筋 3 根 [规格 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$]，100 克钩码若干只，弹簧秤，刻度尺，木板（绘图板或小黑板均可），白纸，图钉等。

操作

(1) 将三根橡筋的一端对齐后用棉线扎紧作为三力共同作用点 O 。从 O 处开始

用直尺在三根橡筋上分别量出相同长短的一段，折转后用棉线扎紧。折转处可穿过图钉的针尖或钩码的挂钩。

(2)木板铺上白纸后竖直放置，将两根橡筋的端点用图钉固定于木板上任意两点(A、B)。第三根橡筋的端点挂上钩码(如图)。



(3)平衡后用铅笔在白纸上点出O点的位置。用直尺按橡筋张紧的方向画出三条力线的方向。

(4)用手指按住O点，拔去图钉，用弹簧秤先后牵引两根橡筋使它们的端点分别回到A点和B点。根据钩码数和弹簧秤的读数可知三个力 F_A 、 F_B 、 F_C 的大小。

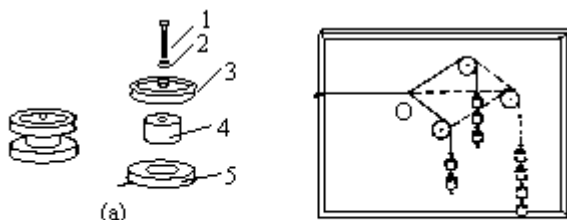
(5)按相同比例画出三个力的矢量图示。以任意两力为邻边作平行四边形，对角线即它们的合力，观察此合力和第三个力的大小和方向的关系，即可验证平行四边形法则。

(6)改变钩码数目或A、B两点的位置，可重复验证平行四边形法则。

建议 此实验如果不用弹簧秤，可以用直尺量出三根相同长度的橡筋的增长量，根据胡克定律，按比例作出三力的矢量图示。此方法简单易行。

方法四

器材 自制磁座滑轮3个，磁性黑板，钩码，橡皮筋，细线等。



1. 木螺丝 2. 垫圈 3. 胶木滑轮
4. 木轴 5. 磁钢

磁座滑轮的制作方法

将木螺丝穿过垫圈、滑轮紧固在木轴上，再把木轴紧配在磁钢(可用外磁式喇叭的磁钢)的中空内。

操作

(1)将橡皮筋的一端固定在磁性黑板的左侧另一端扎上两根细绳，细绳通过滑轮悬挂两组砝码(使用磁座滑轮可任意改变拉力的方向)。装置如图(b)实线所示。

(2)调整细绳的角度，使橡皮筋在水平方向保持平衡。记下结点的位置O，并画出两个力的图示。

(3)改用一条细绳、一组砝码沿水平方向拉橡皮筋，调整砝码的数量使橡皮筋的结点仍拉至O点。如图(b)虚线所示。因为后一个力对橡皮筋的作用效果跟前二个力的共同作用完全相同，可认为该力是前二个力的合力。画出合力的图示。

(4)以前面两个力的图示为邻边构成平行四边形，作出过O点的对角线。如果

此对角线在误差范围内与合力的图示重合，即可说明两个共点力合成符合平行四边形法则。

(5)改变分力的大小和方向，重复实验。

注意

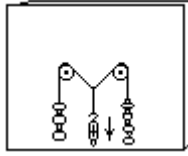
本实验要求磁性滑轮能载荷一定的拉力。在开始使用时，磁性黑板与磁钢摩擦力较大，拉力作用时滑轮不会发生滑移。但使用时间长了，两表面磨光以后，滑轮载荷会随之下降。故使用时不要随意在黑板上拖动滑轮，以减少磨损。当两表面磨光以后，可以涂上一层极薄的硅橡胶胶水来增大摩擦。

合力的大小与分力夹角的关系 11

器材 木板，滑轮两个，弹簧秤，钩码，细绳等。

操作

(1)在木板上固定两个滑轮。两条细绳跨过滑轮，绳一端各挂一串钩码，另一端结在一起固定在弹簧秤上(如图)。



(2)保持两串钩码个数不变，逐渐向下拉弹簧秤，可以看到弹簧秤的读数变大了而两个分力的夹角变小。说明两个分力的大小不变时，它们的夹角越小，合力越大。

12 平行力的合成

平行力是指在某一方向上的力。当物体受到平行力的作用处于相对静止时，那么在某一方向上的合力为零并且各平行力的力矩之代数和为零。由于物体总受到重力的作用，所以实验时研究的平行力方向都是垂直地面的竖直方向。计算力矩时的转轴原则上可任意取，但习惯上为了方便都是取有较多平行力作用的点为转轴。并且注意“臂”指的是转轴到力线间的垂直距离。

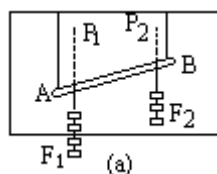
方法一

目的 验证同向平行力合成的法则。

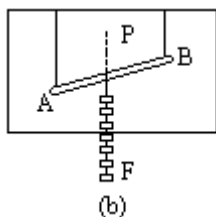
器材 橡筋，轻质木杆，木板，钩码，刻度尺等。

操作

(1) 将两根橡筋的一端固定在木板上方，另一端吊住木杆。在木杆上靠近两端的地方各悬挂一串钩码（即对木杆的作用力分别为 F_1 和 F_2 ），平衡后在木板上记下木杆的位置 AB 和两串钩码的拉力的作用线 P_1 、 P_2 （图 a）。



(2) 取下原来的两串钩码，改用一串钩码来代替它们（即对木杆的作用力为 F ）。反复调节这一串钩码的个数和它对杆拉力的作用线 P 的位置，直至木杆的平衡位置仍在 AB 时为止（图 b）。



(3) 根据钩码个数，很容易看出

$$F = F_1 + F_2;$$

用刻度尺测出 P 到 P_1 、 P_2 的距离 s_1 、 s_2 ，可以看到

$$F \cdot s_1 = F \cdot s_2。$$

这就是同向平行力合成的法则。

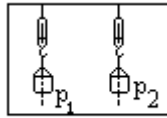
注意 实验中忽略了木杆所受的重力，因此尽量选用轻质木杆，同时钩码的个数适当多一些。

方法二

器材 弹簧秤，木板，轻质木杆，砂筒，刻度尺，黄砂若干。

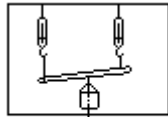
操作

(1) 将两个弹簧秤的上端分别固定在木板上方，下面各悬挂一个内装黄砂的砂筒（图 a）。平衡后记下两个弹簧秤的读数 F_1 、 F_2 和它们的作用线 P_1 、 P_2 的位置。



(a)

(2) 取下砂筒，在两个弹簧秤下面悬挂一根轻质木杆，在木杆上悬挂一个砂筒。反复调节砂筒中黄沙的多少和它对杆拉力的作用线 P 的位置，直至两个弹簧秤恢复到原来的读数（图 b）。称出这砂筒所受的重力 F。



(b)

(3) 根据三个砂筒所受的重力，很容易看出

$$F = F_1 + F_2;$$

用刻度尺测出 P 到 P₁、P₂ 的距离 s₁、s₂，可以看出

$$F \cdot s_1 = F \cdot s_2。$$

这就是同向平行力合成的法则。

注意 实验中忽略了木杆所受的重力，因此尽量选用轻质木杆，同时砂筒中加黄沙的量适当多一些。

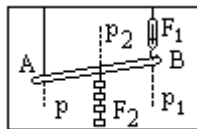
方法三

目的 验证反向平行力合成的法则。

器材 橡筋，弹簧秤，轻质木杆，木板，砂筒，黄沙，钩码，刻度尺等。

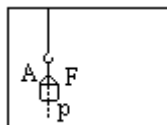
操作

(1) 将弹簧秤和橡筋的一端固定在木板上方，它们的另一端分别吊住木杆的两端。在木杆中部悬挂一串钩码（图 a），平衡后记下弹簧秤的读数 F₁ 和钩码所受的重力 F₂ 以及这两个力的作用线 P₁、P₂ 的位置。再记下橡筋下端点的位置 A。



(a)

(2) 取去木杆，弹簧秤和钩码，将砂筒悬挂在橡筋下端，逐渐向筒中加黄沙，直至橡筋下端仍然到 A 点（图 b），用弹簧秤测出砂筒所受的重力 F，并记下橡筋拉力的作用线 P。



(b)

(3) 根据三个力的大小，很容易看出

$$F = F_2 - F_1;$$

用刻度尺量出 P 到 P₁、P₂ 的距离 s₁、s₂，可以看到

$$F_2 \cdot s_2 = F_1 \cdot s_1。$$

这就是反向平行力合成的法则。

注意 同方法一。

三角支架的受力分析是静力学问题中的一个难点。本实验为剖析难点列举了三个方法。方法一、二演示三角支架中受力的方向，方法三可测定三角支架中受力的大小。

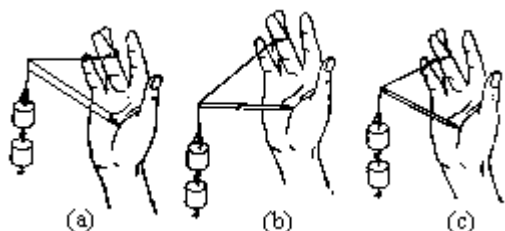
方法一

目的 显示三角支架中受力的方向。

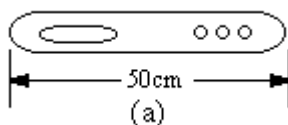
器材 铅笔，细绳，重物等。

操作

- (1)如图(a)手上可明显地感觉到手指受的是拉力，手掌受的是压力。
- (2)调节细绳的长度，可以组成不同形状的三角支架。如图(b)，(c)。



方法二



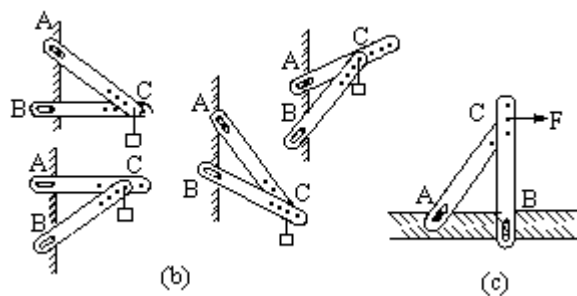
器材 自制支架臂 2 条，螺钉，重物，细绳等。

支架臂的制作方法

在木板条的一端开一条长 8cm，宽稍大于螺钉直径的槽，另一端打 3—4 个能穿过螺钉的孔，孔的间距各约 7cm (图 a)。

操作

(1)用螺钉构成如图(b)所示的各种三角架，在 C 点挂上重物。从静止后支架臂上槽的位置，可清楚地判断每条臂上受力的方向。A 点螺钉静止在槽的远端，因此 AC 臂受的是拉力；B 点螺钉静止在槽的近端，因此 BC 臂受的是压力。



(2)构成如图(c)所示的三角架，用水平力F向右拉C点，静止后即可看出AC受的是拉力，BC受的是压力。

注意 重物所受的重力要比支架所受的重力大得多。

方法三

目的 定量分析三角支架的受力情况。

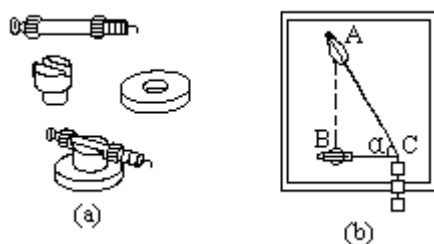
器材 自制磁座弹簧秤2个，磁性黑板，自行车辐条，细绳，钩码，量角器等。

磁座弹簧秤的制作方法

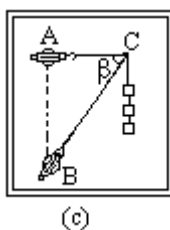
用环形磁钢作基座，截取两块有机玻璃将J2103型弹簧秤胶合在磁性基座上(图a)。

操作

(1)将磁座弹簧秤A、B分别固定在磁性黑板上。BC之间用自行车辐条，AC之间用细绳连接，C点悬挂一串重力为G的钩码(图b)。平衡后再适当地调节A、B两个磁座弹簧秤的位置，使A弹簧秤和细绳完全平行；B弹簧秤和辐条完全平行，以减小摩擦力。



(2)用量角器测出辐条与细绳的夹角 α 的度数，读出A弹簧秤的读数，看AC受的拉力是否与 $G/\sin \alpha$ 基本一致；读出B弹簧秤的读数，看BC受的压力是否与 $G \cdot \cot \alpha$ 基本一致。



(3)按照操作(1)的方法在磁性黑板上构成另一种三角支架(图c)。

(4)用量角器测出辐条与细绳的夹角 α 的度数。读出A弹簧秤的读数，看AC所受的拉力是否与 $G \cdot \cot \alpha$ 基本一致；读出B弹簧秤的读数，看BC受的压力是否与 $G/\sin \alpha$ 基本一致。

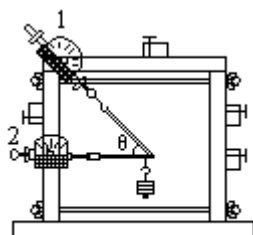
方法四

目的 同方法三。

器材 高中静力学演示教具(J2143型)。

操作

(1)按仪器说明书装好实验框架。按图(a)将测力计 1 装在横梁的滑块上，使有拉钩的一端指向右下方，测力计 2 装在左立柱的滑块上，使有压杆的一端向右。再用长、短支杆各一根构成一个三角支架。



(a)

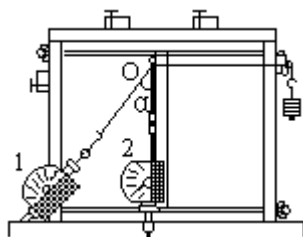
(2)旋转测力计的调零螺母，使两个测力计的读数均为零，以消除支杆自重的影响。

(3)在三角支架的连接点挂上适量的槽码（所受重力为 G ），测力计 1 指针向右偏转，表明斜支杆受的是向右下方的拉力；测力计 2 指针向左偏，表明水平支杆受的是向左的压力。

(4)用量角器测出两根支杆之间的夹角 θ ，看测力计 1 的读数（即斜支杆上受的拉力）是否与 $G/\sin \theta$ 基本一致；测力计 2 的读数（即水平支杆上受的压力）是否与 $G \cdot \cot \theta$ 基本一致。

(5)改变两个测力计在横梁或立柱上的位置，可构成其它形式的三角支架，再重复实验。

(6)在实验框架中间装上滑杆，在框架的左立柱和滑杆上分别装上测力计 1 和测力计 2，用长短支杆各一根，演示电线杆受力的情况(图 b)。



(7)在框架右立柱上与两支杆交点 O 等高的地方固定一个滑块，装一个滑轮。细绳一端连接 O 点，另一端跨过滑轮挂上适量槽码（重力为 G ）。从两个测力计指针的偏转方向可看出斜支杆受的是拉力，竖直支杆受的是压力。

(8)用量角器量出两支杆的夹角 θ ，看竖直支杆受的压力是否与 $G \cot \theta$ 基本一致，斜杆受的拉力是否与 $G/\sin \theta$ 基本一致。

注意

(1)系统初步平衡后，要反复调节两个测力计的方位使支杆和测力计的杆在一直线上。

(2)所有力都要尽量在一个平面内。

(3)挂上槽码后，应在测力计上轻轻地敲几下，以减小摩擦力的影响。

斜面上物体重力的分解

14

斜面上的物体除了受到重力之外还存在摩擦力和斜面对物体的弹力。只有当物体没有对斜面压力时，弹力和摩擦力都不存在，所以斜面上物体重力的分解实际上是共点力作用下物体处于平衡的一种特殊情况。如果物体是可滑动的小车，可忽略其与斜面的摩擦力，那么小车对斜面的正压力可用台秤测量。

目的 观察斜面上物体重力的分解。

器材 可变角度的斜面，弹簧秤，实验小车（铝质），铁架台等。

操作

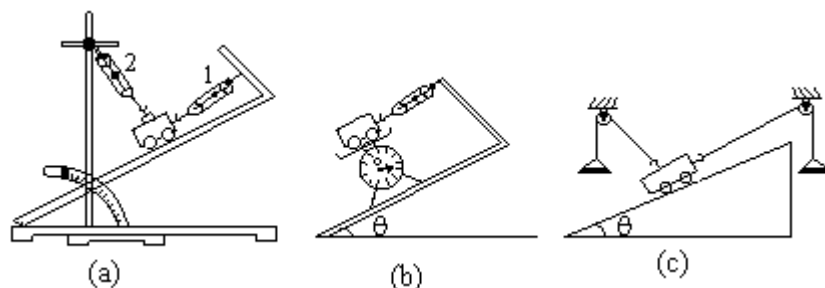
(1)使斜面取某一角。将实验小车放在斜面上，用弹簧秤 1 沿平行于斜面的方向拉住小车，弹簧秤的一端固定在斜面顶端，当斜面的倾角发生改变时，观察弹簧秤 1 的读数的相应变化。每当小车平衡时，弹簧秤 1 的示数就等于小车所受的重力平行于斜面方向的分力。

(2)用弹簧秤 2 沿着垂直于斜面的方向拉住小车，适当调节铁架台位置以及铁架上固定弹簧秤 2 所用的复夹高度，使得小车恰好接触斜面而不对斜面施加压力，每次改变斜面倾角后，都得重新调整弹簧秤 2 的悬挂位置，读出在不同倾角时弹簧秤 2 的读数。每当小车平衡时，弹簧秤 2 的示数就等于小车所受重力垂直于斜面方向的分力。

(3)分析在不同倾角时，弹簧秤 1、2 的示数变化，可得出当斜面倾角改变时，放在斜面上的物体所受重力的平行于斜面方向的分力和垂直于斜面方向的分力的变化规律。

建议

(1)若斜面采用涂塑装饰面板，摩擦较小，则可从已知斜面倾角 θ ，已知小车所受重力 G ，用实验验证 $F_1 = G \sin \theta$ ， $F_2 = G \cos \theta$ 。



(2)实验中所用弹簧秤 2 也可用台秤代替(图 b)，小车的重力垂直于斜面方向的分力应等于台秤的读数，这种方法比较方便，当斜面倾角改变时，不需要调节弹簧秤位置。

(3)实验也可用定滑轮挂砝码的方法显示斜面上的物体重力的分解(如图 c 所示)。但当倾角改变时，两个定滑轮的位置均需作调整，实验时要始终保持悬吊小车的两根绳子互相垂直。

方法一

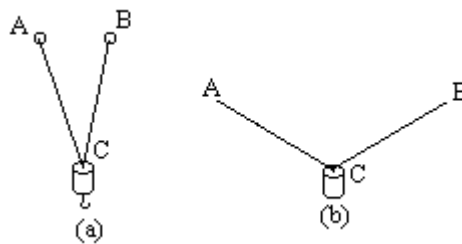
目的 显示分力的大小与夹角的关系。

器材 橡筋，钩码，刻度尺，细绳等。

操作

(1)用细绳将钩码挂在橡筋的中点C，橡筋两端A、B靠拢(图 a)，用刻度尺测出AC和BC的长度。

(2)将A、B两端渐渐分开，可看到橡筋逐渐伸长。分开到某一角度时，再用刻度尺测出AC和BC的长度。从AC、BC长度的变化上可看出：当合力的大小不变时，分力之间的夹角越大，分力越大。



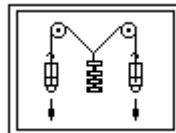
方法二

目的 定量显示分力的大小与夹角的关系。

器材 滑轮，弹簧秤，木板，钩码，细绳等。

操作

(1)将两个滑轮固定在木板上，构成如图所示的装置。



(2)两个弹簧秤同时慢慢向下拉，且观察弹簧秤的读数。当两个分力的夹角逐渐增大时，弹簧秤的读数也随着增大。当两分力夹角约为 120° 时，两分力的大小跟钩码所受的重力基本相同，此后两个分力就比合力大了。当两个分力的夹角大到一定程度时，弹簧秤将达到满刻度。此过程说明，当合力的大小不变时，分力之间的夹角越大，分力的数值也越大。

方法三

目的 演示分力大于合力的情况。

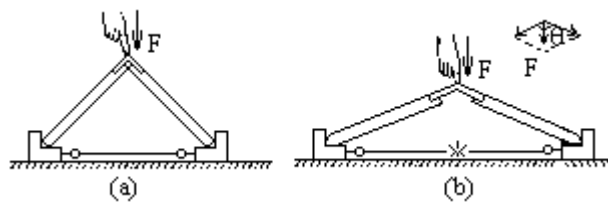
器材 细铁丝（长约20cm），羊眼螺丝2只，小木块2块，人字形支架（用铰链连接两根长约12cm的木条做成，张角可以调节）。

操作

(1)如图(a)所示，拴好铁丝，放好两块木块及支架（两支架夹角约为 90° ），然后用一只手指在人字形支架的铰链处用力往下按，铁丝未被拉断。

(2)换一根长一些的同样规格的铁丝，使两支架的夹角增大到 150° 以上，如图(b)。再用同样的方法在支架铰链处向下一按，铁丝被拉断了。由此可见在合力不变的情况下，分力的大小与夹角有关，当夹角接近 180° 时，分力可以比合力大

得多。



注意

- (1)木块、木杆都要用硬质木料制成。
- (2)桌面要尽可能光滑。

方法一

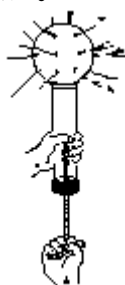
目的 演示液体能把压强向各个方向传递。

器材 帕斯卡球（J2111 型）一个。

操作

(1) 旋下帕斯卡球，把透明圆筒浸入水中，提起活塞，将水抽进筒的下部。然后把帕斯卡球也放进水中，让水自然灌满球，并在水中将球旋至筒上。

(2) 用力向下压活塞，使水从球的小孔中向各个方向喷出（如图），说明液体能够把它所受到的压强向各个方向传递。



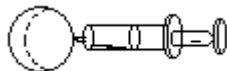
注意 装水时，尽量使球和筒中不要留有气体。

方法二

器材 自制帕斯卡球。

帕斯卡球的制作方法

用在酒精灯上加热后大头针在塑料球四周戳若干个间距约为 10mm 的小孔，再用 20W 内热式电烙铁在塑料球上烫一个略小于注射器颈部直径的圆孔，乘塑料还未冷却时把注射器的颈部插入，塑料球冷却时即紧扣注射器（如图）。



操作

(1) 把塑料小球浸入水中，抽动注射器活塞，使球内灌满水。

(2) 推动注射器的活塞，水就从小孔向各个方向射出。

注意

(1) 注射器和塑料球的接口不能漏气。

(2) 如果没有塑料球也可用乒乓球代替。

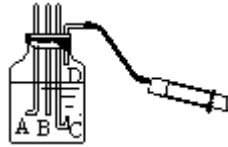
方法三

目的 表明液体向各个方向传递的压强是相等的。

器材 自制帕斯卡定律演示器。

帕斯卡定律演示器的制作方法

将四根玻璃管在酒精喷灯上弯成如图所示的形状，在大口瓶的橡皮塞上开四个直径略小于玻璃管外径的孔，分别插入四根玻璃管，方向如图所示。D 管的另一端通过胶管跟大号注射器相连。



操作

(1)在瓶中装适量有颜色的水，浸没 A、B、C 三管的管口，D 管口在空气中。

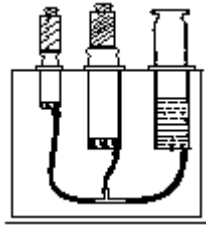
(2)塞紧瓶盖后用注射器向瓶中打气，可以看到 A、B、C 三根玻璃管中的水面升到同一高度。表明液体向各个方向传递的压强是相等的。

注意 瓶口与瓶塞之间，瓶塞与玻璃管之间都不能漏气，否则液面将不能稳定。

方法四

目的 表明液体传递的是压强而不是压力。

器材 100ml 针筒 2 个，5ml 针筒，玻璃三通，胶管 3 根，200g 砝码 2 个，木架等。



操作

(1)将 A(100ml)，B(100ml)，C(5ml)三个针筒固定在木架上，三个活塞的侧壁涂上润滑油后塞进针筒中。

(2)在 A 针筒中吸入 100ml 红色水后，用胶管和玻璃三通将三个针筒连接起来。连接时针筒、胶管、三通中的空气应尽量排尽，接头处也不能漏气。

(3)在针筒 B、C 的活塞上各压上一个 200g 的砝码，用手慢慢将 A 针筒的活塞向下压，可以看到当 B 针筒的活塞将砝码顶起时，C 针筒活塞没有动。这说明液体并不是将压力以原来的大小向各个方向传递，而是将压强以原来的大小向各个方向传递。因 B 针筒活塞的截面积比 C 针筒大，因而 B 针筒获得的压力比 C 针筒大。

方法一

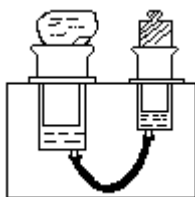
目的 说明液压机的工作原理。

器材 50ml 针筒，2ml（或 5ml）针筒，200g 砝码，重物，胶管，木架等。

操作

(1) 将两个针筒固定在木架上，注射口由一胶管相连。针筒内装适量的水或薄质的油。

(2) 将重物放在大针筒活塞上，将砝码放在小针筒活塞上，可见到小针筒活塞徐徐下降，将重物顶起。



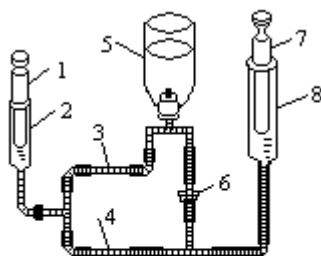
注意

- (1) 为了减小针筒壁与活塞的摩擦力，实验前要将针筒与活塞在液体中湿润。
- (2) 为了使摩擦力对实验的影响小一些，重物和砝码宜大一些。

方法二

目的 演示液压机的整个工作过程。

器材 50ml 针筒，5ml 针筒，玻璃三通，单向阀 2 个，无底玻璃瓶，止水夹，胶管等。



- 1. 小针筒活塞 2. 小针筒
- 3、4. 单向阀 5. 贮水瓶
- 6. 止水夹 7. 大针筒活塞
- 8. 大针筒

操作

(1) 装置如图。其中单向阀 3 只让水向左流，单向阀 4 只让水向右流。整个装置的管道中不能留有气体。

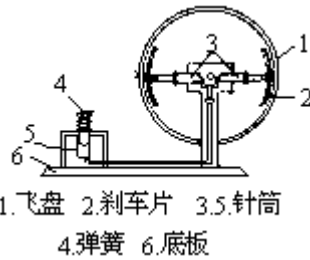
(2) 关闭止水关，在大针筒的活塞上压一重物。一次一次地压小针筒的活塞，能看到大针筒的活塞将重物缓缓顶起。

(3) 松开止水夹，大针筒活塞被重物缓缓压回来位置。

液压刹车

目的 显示液压刹车的原理和工作过程。

器材 自制流压刹车演示器。



液压刹车演示器的制作方法

在玩具飞盘中心打一个孔，用一个螺钉把它固定在立柱上，并让它能灵活转动（作为车轮）。将两个5ml 针筒水平固定在立柱上（高度和车轮轴相同），在针筒活塞头上粘上两块刹车摩擦片（用塑料片或硬质纸片制成）。调节小针筒的水平位置，使摩擦片和车轮内缘距离约为5mm。将20ml 针筒固定在左边木架上，活塞套上一个弹簧后塞进针筒。在大针筒里抽进红色水后用胶管、三通将三个针筒连通（尽量将里面的空气排尽）。

操作

(1)用手拨动车轮使之转动，然后向下压大针筒的活塞，小针筒的活塞推着刹车摩擦片向两边伸出，跟车轮内缘接触，靠摩擦力对车轮制动。

(2)释放大针筒活塞，由于弹簧的作用，活塞向上运动。这样，两个小针筒的活塞向内收回，摩擦片跟车轮分开，制动结束。

液体内部的压强是由于液体受到重力而引起的，除了液体的密度之外某处的压强还与该处的深度有关，本实验介绍了五种方法。它们通过不同的途径比较液体内部的压强。方法一、二、三、四为定性比较，方法五是一个定量实验。

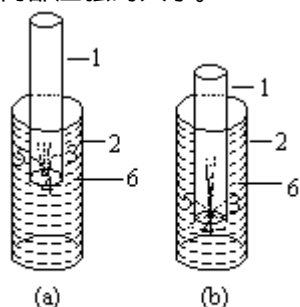
方法一

目的 显示液体内部各个方向都有压强，并且压强大小随液体深度增加而增大。

器材 透明塑料筒，大玻璃筒等。

操作

实验按图(a)、(b)步骤完成。几个孔喷泉，说明液体内部各个方向都有压强；底部孔4喷泉的高低显示液体内部压强的大小。



1.塑料筒 2.大玻璃筒
3.4.5.针孔 6.液体

注意

- (1)用力F要适度，塑料筒插入液体内时速度不宜太快。
- (2)针孔不宜过大（约0.3mm—0.5mm）
- (3)尽量选用透明度好上部开口的塑料筒。

方法二

目的 演示液柱的压强和液体的深度、密度有关。

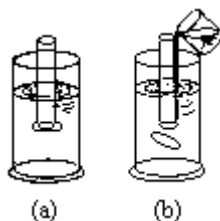
器材 玻璃管（直径30—40mm，长25cm），大量筒，塑料片，酒精，烧杯等。

操作

(1)用塑料片严密地挡住玻璃管的一端，用手按住塑料片把玻璃管竖直插入装有水的量筒中(图a)。

(2)用烧杯将染成红色的水慢慢倒入玻璃管中；直到管内外液面相平，这时塑料片上下表面受的压强一样，塑料片掉下来。说明液体的压强与液柱的深度有关。

(3)重复操作(1)，然后用烧杯将染红的酒精慢慢倒入玻璃管中。当管内酒精液面跟量筒内水面相平时，塑料片仍不下落。一直到酒精液面高出水面一定高度时，塑料片才下落。这说明液体的压强不但跟液柱的深度有关，还跟液体的密度有关。



方法三

目的 演示液体压强跟液体的密度和深度有关。

器材 玻璃管(内径 10mm、长 20cm)，去底透明塑料小口瓶(口内径 10mm)，橡皮筋，乳胶膜，水银等。

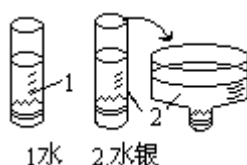
操作

(1)将两块乳胶膜分别用橡皮筋蒙在玻璃管口和大口塑料瓶口上,松紧尽量一致。

(2)将适量水银倒入竖直的玻璃管中,直至乳胶膜明显胀大,但不要破裂。

(3)在管壁上记下水银柱的高度后,将这些水银全部倒入大口塑料瓶中,瓶口的乳胶膜未见明显胀大。这说明液体的压强跟液体所受的重力没有直接关系,而和液体的深度有关。

(4)在玻璃管中倒入同样深度的水,乳胶膜几乎不发生形变。这说明液体的压强除了和液体的深度有关外,还和液体的密度有关。



注意 选用有弹性的乳胶薄膜。

方法四

目的 显示液体内部的压强与深度的关系。

器材 微小压强计(J2114),液体内部压强演示器(J2113),胶管,高玻璃筒,铁架台等。

操作

(1)把微小压强计竖直固定在铁架台上,将染成红色的水注入U形玻璃管内,使液面高度为管长的一半。

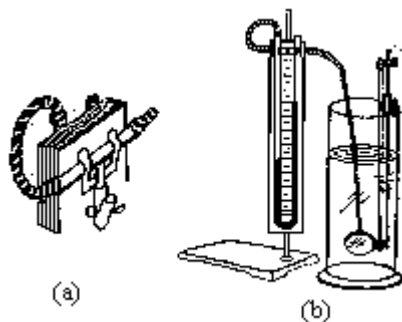
(2)将乳胶薄膜套在液体内部压强演示器的圆盒上,用胶管将圆盒的管嘴与微小压强计连通。用手指按下乳胶膜,若U形管两侧液面形成明显的高低,说明微小压强计工作正常。

(3)打开微小压强计T形管的下口(图a),待两管液面相平后再用夹子关闭T形管。

(4)把金属圆盒浸入水中,可看到U形管两液面出现了高度差,这表明液体内部存在压强。金属盒浸入水中越深,U形管中液面差越大(图b),这表明液体内部压强随深度的增加而增大。

(5)将液体内部压强演示器的支杆固定在玻璃筒上,使金属圆盒深度不变,旋转旋轮,使膜面向各个方向转动,可看到U形管中液面差保持不变。这表明液体内部同一深处各方向的压强都相等。

(6)将金属圆盒固定在水中靠近底部的地方。向水中加进食盐,使其成盐水。可看到U形管中的液面差略有增大。这表明液体内部的压强与液体的密度也有关。



注意

(1) 由于金属圆筒上乳胶膜形变产生一个附加压强，因此U形管两边液柱高度差所显示的压强不等于金属圆筒所处液体内部的压强。所以本方法只宜定性地显示液体内部压强大小的变化，而不宜定量地讨论。

(2) 进行操作(6)时，玻璃筒中的水应深一些，制成盐水的浓度应大一些，否则压强变化不够明显。

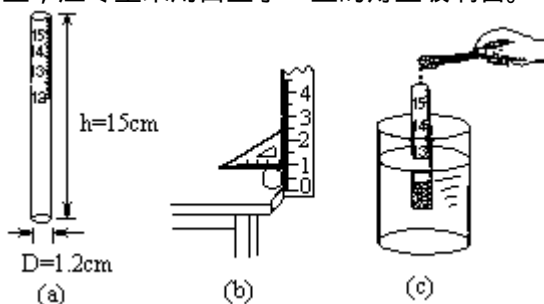
方法五

目的 研究液体压强与深度和密度的关系。

器材 刻度尺，三角板，托盘天平和砝码，大烧杯(500ml)3个，自制平底玻璃管(或塑料管)，角匙，盐水，酒精，硫酸铜溶液，铅粒等。

平底玻璃管的制作方法

将带有刻度的纸条竖直粘贴在玻璃管的内壁上(图 a)。为了使玻璃管易于竖直浮在液体中，应取外径小一些、长度大一些的玻璃管。为了使几次实验中液面到管口的距离差大一些，应尽量采用自重小一些的薄壁玻璃管。



操作

(1) 测出玻璃管直径D(图b)，用 $S = \frac{\pi}{4} D^2$ 算出它的底面积。

(2) 往玻璃管中加铅粒直至玻璃管刚能够竖直浮于水中，读出玻璃管底部浸入水中的深度 h 。

(3) 取出玻璃管擦干，用天平称出玻璃管和铅粒的总质量 m ，用 $G = m \cdot g$ 算出它们所受的重力 G ，这个重力就等于水对玻璃管底部的

压力 F ，用 $P = \frac{F}{S}$ 算出水对玻璃管底部的压强。

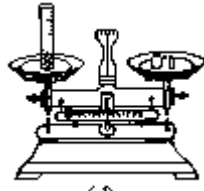
(4) 向玻璃管内增加一些铅粒，重复操作(2)、(3)。共做五到六组数据。

(5) 以深度 h 为横轴，液体压强 p 为纵轴，作 $p-h$ 图，可得到一根过原点的直线，说明当液体密度不变时，压强与深度成正比。

(6) 玻璃管中铅粒的数量，使玻璃管分别浸入酒精、水、盐水、硫酸铜溶液中时能平衡在同一深度的地方，重复操作(3)。

(7) 以液体密度 ρ 为横轴，液体压强 P 为纵轴，作 $P-\rho$ 图，可得到一根过原点

的直线，说明当深度不变时液体压强与液体密度成正比。



(d)

板会落下吗？ 20

目的 演示重力相同，但密度不同的液体对圆台容器底部的压力。

原理 圆台体积 $V = \frac{1}{3}(S_{\text{上}} + S_{\text{下}} + \sqrt{S_{\text{上}} \cdot S_{\text{下}}})h = \frac{m}{\rho}$ ，式中 $S_{\text{上}}$ 、 $S_{\text{下}}$

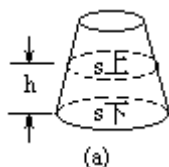
和 h 分别表示圆台形液体的上、下底面积和(图 a)， m 和 ρ 表示液体的质量和密度。所以

$$p h = \frac{3m}{(S_{\text{上}} + S_{\text{下}} + \sqrt{S_{\text{上}} \cdot S_{\text{下}}})}$$

液体对圆台形容器下底的压力

$$\begin{aligned} F &= P_{\text{下}} \cdot S_{\text{下}} = p h S_{\text{下}} \\ &= \frac{3m g S_{\text{下}}}{(S_{\text{上}} + S_{\text{下}} + \sqrt{S_{\text{上}} \cdot S_{\text{下}}})} \end{aligned}$$

对质量相同，但密度不同的液体来说， m 、 g 、 $S_{\text{下}}$ 相同，但 $S_{\text{上}}$ 不同（密度 ρ 越大， $S_{\text{上}}$ 越大），所以密度越大的液体对圆台底的压力越小。

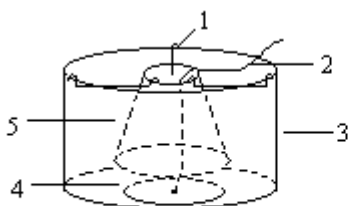


器材 自制压力演示器，水，氯化铜溶液，酒精，托盘天平，烧杯等。

压力演示器的制作方法

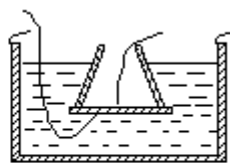
材料：有机玻璃；螺丝 3 根（长 8cm），螺母 9 个，蜡线 1 根（长 15cm）。

制作：(1)用有机玻璃制成无上下底的圆台（上底直径 3cm，下底直径 10cm，高 8cm）和一块直径为 11cm 的圆板。圆板中心处钻一小孔，穿入蜡线打一结，能将圆板吊起。再用一小片有机玻璃，粘在圆板下面，将圆板小孔封住。选择一个大小适当的透明容器。在圆台侧壁上方打三个孔（互成 120°），用三根硬铁丝将圆台固定在透明容器中(图 b)。



(b)

1.铁丝 2.线 3.透明容器 4.圆板 5.圆台



(c)

操作

(1)拉住线头，使圆板封住圆台下底，在水槽中注入水，圆板被水压住，记下水面的位置(图 c)。

(2)用天平测出烧杯及烧杯中水的质量，将烧杯中水缓缓注入圆台内，使圆板刚好下落。测出注入水的质量。

(3)倒掉水槽中的水，重复操作(1)，使水面达到原来高度。

(4)用天平测出氯化铜溶液的质量与操作(2)中注入水的质量相同，然后将氯化铜溶液缓缓注入圆台，圆板不会下落。

(5)重复操作(3)、(4)，将氯化铜溶液换成酒精，圆板在酒精未倒完前就下落了。

注意

(1) 必须将圆台在水槽中固定牢。

(2) 圆板与圆台下底之间不能漏水，可将圆台底磨平，圆板平面磨毛。

说明 如果将圆台倒置演示，结论正好相反。

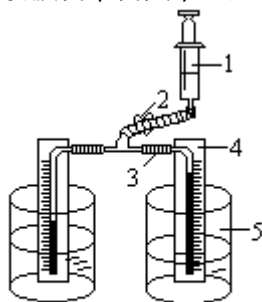
测定液体的密度

21

本实验介绍的两种方法，其共同特点是采用比较的方法测量液体的密度。即将待测密度的液体和已知密度的液体进行比较。这类方法有利于减小测量的系统误差。

方法一

器材 10ml 针筒，玻璃三通，玻璃管（内径 6—10mm、长 40cm）2 根，毫米刻度尺(50cm)2 把，烧杯 2 个，乳胶管，管夹，已知密度的对照液体等。



1.针筒 2.管夹 3.三通
4.直尺 5.烧杯

操作

(1)将两根玻璃管固定在两把直尺上，然后用乳胶管、三通将针筒和玻璃管连接成如图的测量系统，连接处都不能漏气。

(2)抽动针筒的活塞，使两玻璃管中的液面上升到适当的高度后，用管夹夹住上面的乳胶管。

(3)从刻度尺上读出玻璃管中待测液柱的高度 h_x 和对照液柱的高度 h_0 ，设待测液体的密度为 ρ_x ，对照液体的密度为 ρ_0 ，则

$$\rho_0 g h_0 = \rho_x g h_x ,$$

$$\rho_x = \frac{h_0}{h_x} \cdot \rho_0 .$$

注意

(1)两根刻度尺和玻璃管要竖直放置。

(2)为了减少毛细现象的影响，玻璃内径不能太小。

分析

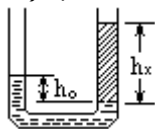
$$\text{因为 } \rho_x = \frac{h_0}{h_x} \cdot \rho_0 .$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } E_{\rho_x} &= E_{h_0} + E_{h_x} + E_{\rho_0} \\ &= h_0/h_0 + h_x/h_x + \rho_0/\rho_0 \end{aligned}$$

由此可见，读准两玻璃管中液柱的高度是做好实验的关键。在可能的情况下， h_0 和 h_x 大一些能减小结果的误差。

方法二

器材 U 形管（臂长 25cm 以上），刻度尺，已知密度的对照液体等。



操作

(1)将密度较大的一种液体注入U形管中。调整U形管的位置，使静止后两管中液面等高，然后设法固定U形管。

(2)将密度较小的一种液体注入U形管的另一侧臂，使两种液体的分界面尽量多下降些（如图），但轻质液体不要到达U形管的弯曲部分。

(3)平衡后用刻度尺测出液体分界面以上两臂液柱的高度 h_0 和 h_x ，设待测轻质液体的密度为 ρ_x ，对照液体的密度为 ρ_0 ，则

$$\rho_0 g h_0 = \rho_x g h_x ,$$

$$\rho_x = \frac{h_0}{h_x} \cdot \rho_0$$

注意

(1)此实验选用的对照液体必须不会和待测液体混溶。

(2)U形管要竖直放置。

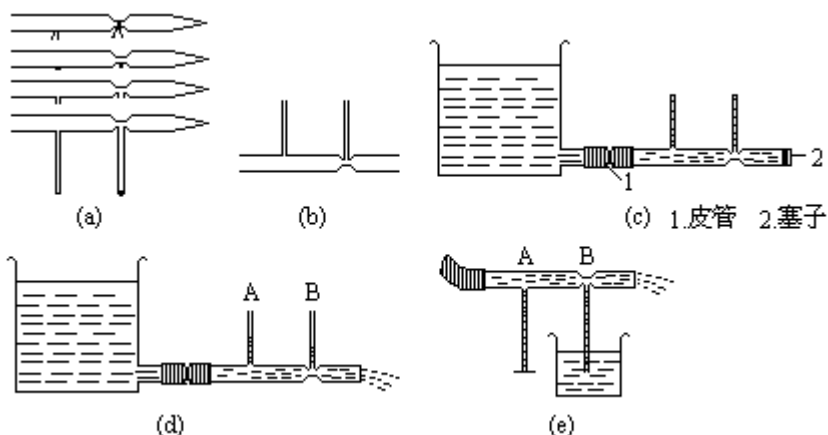
分析 见方法一的分析部分，为了减小测量误差，尽量选用臂长、直径大的U形管。

目的 说明液体流速大时压强小。

器材 粗细不同的玻璃管，酒精喷灯，水槽，橡皮管，小针，镊子等。

实验用玻璃管的制作方法

选用长约 25cm，内径约 1.5cm 的粗玻璃管，将需要缩细部分放在酒精喷灯的火焰上，边加热软化边慢慢拉，内径逐步缩细成约 0.5cm。将粗玻璃管一端加热软化，用镊子拉成封闭状（为了吹制的需要）。对粗玻璃管要接支管的地方加热吹成乳突状，再对乳突处加热吹成泡状。用针戳破玻璃泡，加热后扩大至适当大小。把要接上去细管的一端烧红（必要时接口处扩大），接上后在四周加热，使连接部分平整牢固（图 a）。最后把封闭端截开，成为如图（b）所示的玻璃管。



操作

(1) 演示液体静止时的压强：接成图（c）所示装置，两细管中液面与水槽中液面等高，说明粗管中各处压强相同。

(2) 演示液体流动时的压强：拔去粗玻璃管右边的塞子，水槽中的水经粗管流出（图 d）。可以看到细管 A 中的液面比细管 B 中的液面高，说明液体流速大时压强低。

(3) 将 A、B 两细管口朝下，进水口接在自来水龙头上。用手塞住 A 管，将 B 管放进装有红色水的小烧杯中，可看到红色水被吸进粗管中（图 e）。换用手塞住 B 管，将 A 管下口放进小烧杯中，红色水不会被吸进粗管中。这也同样能说明液体流速大时压强低。

注意

- (1) 用来拉制的粗玻璃管壁要稍厚一些。
- (2) 操作（3）中接的自来水龙头水压要高一些。

本实验用两种方法证明空气确实有质量。在设计本实验时不能忽略空气的浮力，因此要尽量保持容器的体积不变，使其所受空气的浮力不变。

方法一

器材 托盘天平，砝码，皮球，气针等。

操作

(1)皮球打足气后放在天平的左盘（球上放一气针）

(2)在天平的右盘加砝码，使天平平衡。

(3)把气针插入球嘴，使球内气体排出，天平失去平衡（如图），必须减少砝码才能使天平恢复平衡。减少的砝码数即为排出空气的质量。



注意

(1)皮球不宜太小，充气时气要尽量打足。

(2)放气后皮球的外形不能改变。

方法二

器材 托盘天平，砝码，两用气筒，薄壁大烧瓶(1000ml)，橡皮塞，玻璃管，螺旋夹，厚橡胶管等。

操作

(1)如图所示给烧瓶装上抽气管，用气筒抽去瓶中空气后用螺旋夹夹紧橡胶管。

(2)将烧瓶放在天平左盘上，右盘加砝码使天平平衡。

(3)松开夹子，让空气进入烧瓶中（可听到声音），天平失去平衡。增加右盘中的砝码，使天平重新达到平衡，增加的砝码数就是进入烧瓶的空气质量。



注意 烧瓶不宜小于 100ml。

说明 如果没有抽气的气筒，也可以用下述方法驱除烧瓶中的空气：在烧瓶中加少量水（不要多于 200ml），放在酒精灯上加热。让水沸腾几分钟后，用橡皮塞塞紧瓶口，同时移去酒精灯。等瓶体冷却后，瓶内的气压便明显低于大气压。

测定空气的密度

器材 皮球，打气筒，气针，量杯，水盆，天平，砝码，乳胶管，管夹等。

操作

(1)用气筒将皮球打足气，用天平秤出皮球的质量 m_1 。

(2)将量杯装满水后，倒放在水盆中，用气针和乳胶管将皮球中的空气引入量杯内，用量杯排水集气的方法排出皮球中的气体（如图）。如果量杯已集满气，而皮球中的空气尚未排完，可以夹紧管夹暂停放气，将量杯装满水后重新集气。

(3)排出皮球中一定量的空气之后夹紧管夹，拔出气针。用天平秤出皮球的质量 m_2 ，则排出空气的质量为 $m = m_1 - m_2$ 。

(4)从调换量杯的次数和最后一次量杯中气体的体积，可以知道从皮球中排出的空气在常压下的体积 V 。那么空气在常压下的密度 $\rho = m/V$ 。



注意 放气前后皮球的体积尽量不要变，这样空气对皮球的浮力就保持不变。

验证大气压强 25

大气压是由空气重力所产生的，因此只要制造一个空气相对稀薄的空间，用比较的方法就可明显地显示出大气压强的作用。本实验介绍的六种方法是通过不同的途径来造成一个大气相对稀薄空间的。读者可以举一反三地设计出许多其他的实验。

方法一

器材 熟鸡蛋，牛奶瓶（或锥形瓶）等。

操作

(1)将牛奶瓶浸放在 60—70 的热水中（水不进入瓶内），时间约 3—5 分钟。

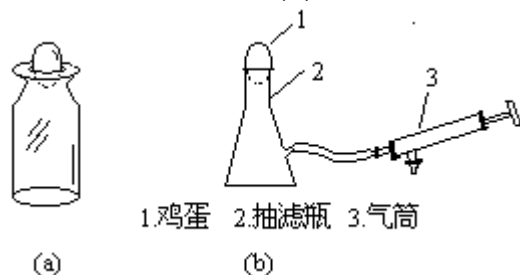
(2)取出空瓶（瓶内有热空气），将去壳的熟鸡蛋放置瓶口，如图(a)。鸡蛋会慢慢进入瓶内。

根据气态方程，瓶内气体，遵循 $\frac{PV}{T} = \text{常数}$ 的规律，所以，当 T

下降，V 没有明显改变时，P 会变小，由于大气压强没有变，所以有上述现象。

注意 瓶口应略小于蛋，但瓶的容积以大一些好。

说明 如有适当的器材，可采用如图(b)所示的方法完成本实验。



方法二

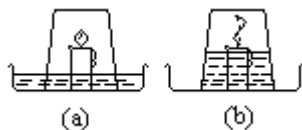
器材 玻璃杯，平底小盘，一小段蜡烛。

操作

(1)将小段蜡烛点燃，在小盘中央滴几滴刚熔化的蜡，迅速将点燃的蜡烛固定在上面。

(2)在盘中加入少量红色水，深约 1cm。

(3)将玻璃杯倒置在水中，罩住蜡烛(图 a)。等火焰熄灭时，可看到盘中的水被压入杯内(图 b)。这说明四周空间存在着大气压强。



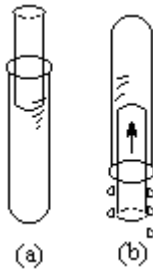
方法三

器材 大小试管各一只。

操作

(1)大试管装满水后将空的小试管轻轻放入大试管（约小试管长度的三分之一），如图(a)所示。

(2)两手拿住大小试管，迅速倒置后立即放掉小试管。可观察到大试管里的水慢慢流出，同时小试管在大试管中自行上升，如图(b)所示。



方法四

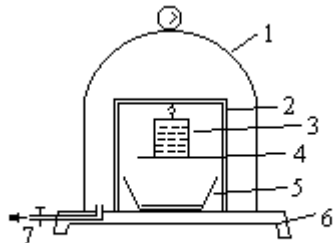
器材 可抽气钟罩，塑料杯，支架，塑料盘，塑料片，气泵等。

操作

(1)在底部有挂钩的杯子里盛满有色水(可用验证阿基米德定律实验中的塑料杯)，盖上薄塑料片，将杯子倒挂在支架上(如图)，水和塑料片不落下，说明存在大气压强。

(2)盖上玻璃钟罩后抽气，可看到水和塑料片落下。说明确实是由于大气压强压住了塑料片。

注意 钟罩口上要涂少许凡士林，以防漏气。



1.钟罩 2.支架 3.盛水的塑料杯 4.塑料片
5.塑料盘 6.底座 7.接抽气机

方法五

器材 马德堡半球，两用气筒。

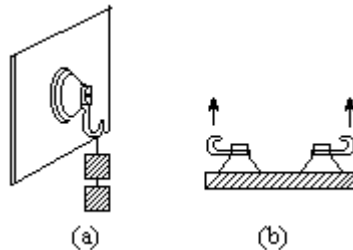
操作

(1)将马德堡半球的对口处涂上一些凡士林油，要把它们合起来，用力压实且相对转动一下，使对口处紧密不漏气。

(2)打开半球的活塞，用两用气筒抽马德堡半球中的空气。抽气完毕后，关闭活塞。两人无法将两半球拉开。

(3)打开活塞，让空气进入半球中，一个人即可轻松地将两半球分开。

说明 用压力衣钩可以模拟马德堡半球。将压力衣钩按在窗玻璃上，上面可以挂一串钩码(图 a)。将两个压力衣钩按在平板玻璃上，拉着钩子，可将玻璃提起。



方法六

器材 广口瓶，2根玻璃管，100ml 针筒，两用气筒，小气球，橡皮管等。

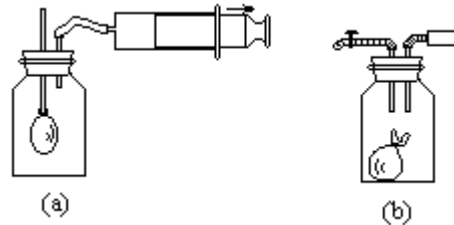
操作

在广口瓶塞上插两根玻璃管。

(1)将小气球套在一根玻璃管下，与针筒相连的橡皮管套在另一根玻璃管上(图 a)，塞紧瓶塞。

(2)用针筒向外抽气，可看到小气球被渐渐吹大，说明存在着大气压强。

(3)在广口瓶中放进一只充气不足的小气球。夹紧左管上的夹子后用两用气筒从右管内抽气(图 b)，可看到小气球慢慢胀大。这说明不和外界连通的球内留有的空气同样有大气压强。



(4)停止抽气，打开左管上的夹子，可见胀大的气球迅速缩小，这又是外界的大气压强作用的结果。

注意

(1)每次实验时橡皮塞一定要塞紧，必要时还可涂一些凡士林油。

(2)小气球的口要扎紧，不能漏气。

本实验及后面两个实验都用到水银。实验时一定要注意安全，人的皮肤不可与水银直接接触。实验环境的温度尽量低一些，以减缓水银的蒸发。在实验中万一不慎将水银洒落在桌面或地面上，一定要立即用硫磺洒在水银散落处，然后用硬纸片刮入畚箕，对于细小的水银球，可用锥形瓶，加橡皮塞，塞子上分别插入两根玻璃管，一根长管通到瓶底，另一端用橡皮管接一尖嘴玻璃管，如图所示。一根短管口接抽气机抽气，尖嘴口可将地上或板缝中的一些水银球吸入瓶中。瓶中放水是为了防止水银蒸发。



方法一

目的 测量大气压。

器材 托里拆利管，水银槽，刻度尺，细颈小漏斗，吸管，铅垂（垂锤），搪瓷托盘，泡沫塑料等。

操作

(1)在搪瓷托盘里装些水用来承接不慎撒落的水银，泡沫塑料放在盘底。将托里拆利管的管底放在泡沫塑料上，管身稍倾斜，通过细颈小漏斗将水银灌入玻璃管内。

(2)灌到水银面离管口1cm处，仔细检查水银柱，如管中有气泡，可用漆包线插入管中将附在管壁上的气泡引出。不可用裸铜丝或铁丝，以免发生化学反应而污染水银。

(3)用吸管继续向管中加水银，直到水银面高出管口为止。

(4)戴上乳胶手套后，用一手折食指堵住管口。然后两手协同，慢慢地将管子倒转过来（小心玻璃管折断），把管口浸没到水银槽的水银里，然后松开食指。可看到管中水银面下降到某一高度。

(5)用重锤作依据，使玻璃管完全竖直，然后用米尺量出管中水银柱的长度（即管内外水银面的高度差），就是此时的大气压强。

(6)将玻璃管稍上下移动（管口始终不离开槽中水银面），可看到管中水银柱的高度不变。由此可见水银柱的高度与玻璃管长短无关。

(7)将玻璃管倾斜一个角度，测量管中水银柱的竖直高度，仍和原来的高度一样。说明管中水银柱的高度跟玻璃管的位置无关。

(8)实验完毕将水银收回瓶内，加盖后存放在阴凉处。

方法二

目的 同方法一。

器材 内径约6mm、长约600mm一端带有活栓和小漏斗的玻璃管，内径约10mm、长约300mm的玻璃管，长约600mm的橡胶管，水银，支架，刻度尺等。

操作

(1)如图安装仪器，左边的玻璃管A固定，右边的玻璃管B可以上下移动。两根玻璃管的下端用橡胶管连通。因水银柱产生的压强较大，所以连接处一定要牢固，以防橡胶管脱落造成水银外流。

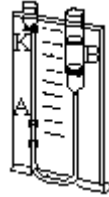
(2)打开活栓 K，从漏斗处慢慢灌入水银，直到左边玻璃管内约有一半水银为止。

(3)提起右边的玻璃管，使左边玻璃管内的水银面上升，当小漏斗中出现少量水银时关闭活栓。

(4)慢慢降低右边玻璃管的高度，直到左边玻璃管上部出现一段真空为止。

(5)用刻度尺量出左右两边水银面的高度差。

(6)继续降低右边玻璃管的高度，左右两边的水银面都下降，但左右两边水银面的高度差却基本不变。在某一位置再测量一次左右水银面的高度差，和前一次值取平均，作为大气压强值。



注意 实验中始终要保持整个装置竖直放置。

水银柱的高度与外界气压的关系

目的 说明托里拆利实验中水银柱的高度取决于外界的气压。

器材 托里拆利管，上面有孔的钟罩，带孔橡皮塞，两用气筒，水银槽，水银等。

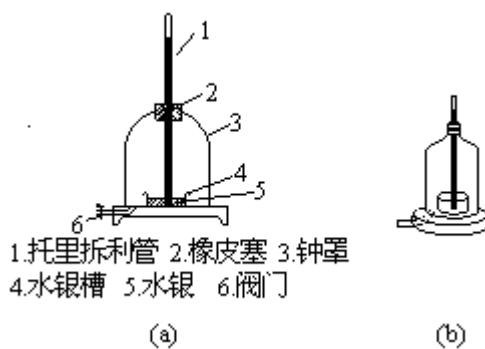
操作

(1)完成托里拆利实验后罩上钟罩，在托里拆利管与橡皮塞之间、橡皮塞与玻璃钟罩之间及钟罩与底座之间，都涂上凡士林油，以防漏气如图(a)

(2)用气筒从抽气嘴里往外抽气，可看到水银柱的高度随着钟罩内气压的降低而逐步下降。

(3)打开阀门，让外界空气进入钟罩，可看到水银柱又恢复到原来的高度。

说明 有洞的钟罩可以用去掉底的大玻璃瓶代替，但必须选用瓶壁较厚的玻璃瓶，以防抽气时破裂(图 b)



托里拆利实验中，水银柱以上的空间除了有极少量的水银蒸气外，不存在任何其他气体，即基本上是真空的。但一般很难通过演示说明这个空间确是真空。本实验用一个很简便且直观的方法，说明该空间确实是真空的。

器材 同实验 26 方法一（选用深一些的水银槽）。

操作

(1)、(2)、(3)、(4)同实验 26 方法一。

(5)向槽中注入适量红色的水，水全部浮在水银面上。

(6)提起玻璃管，使管口刚好露出水银面，但仍在水面下。随着管中水银全部流进水银槽，可见红色的水上升并充满整个玻璃管。从而说明托里拆利实验中水银面以上的部分确实是真空的。

建议

本实验还可用来说明当托里拆利实验中水银面以上部分如果混有少量空气，所测大气压值一定低于当地的标准值。在这种情况下，红色的水不会充满整个玻璃管，从而说明水银面以上部分实际上并不是真空。

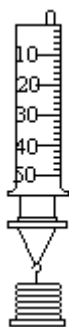
注意

(1)装有水银的玻璃管从水银中向上拉起时，必须缓慢且管口始终低于水面。这样，可让水缓缓倒灌入玻璃管中，没有空气漏入也可以保证上端不出现水沫。

(2)水银管不应太长，约 1m 左右。

估测大气压

器材 50ml 针筒，眼药水瓶，橡皮帽，槽码（约 6kg）等。



操作

(1)把 50ml 针筒的活塞推到顶端，用涂有少许凡士林的眼药水瓶橡皮帽将针筒注射口封闭，用手竖直握住针筒，然后在活塞颈上逐步增加槽码，直至活塞开始匀速下滑（见图）。

(2)用刻度尺量出针筒上 0—50ml 刻度线之间的距离。由公式 $S = \text{容量} / \text{距离}$ ，可计算出活塞面积。

(3)大气压强

$$p_0 = \frac{\text{槽码所受总重力}}{\text{活塞面积}}$$

注意

(1)橡皮帽与针筒之间不能漏气。

(2)针筒必须竖直。

(3)如针筒与活塞之间摩擦较大，可加少许润滑油。

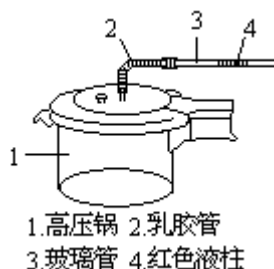
大气压随高度的变化 30

大气压随高度变化的规律是 $P = P_0 e^{-\frac{\mu g H}{RT}}$ 。式中 P 是高度为 H 米处的大气压， P_0 为海平面大气压， e 为自然对数的底， μ 为气体的摩尔质量（空气为 0.0289kg/mol ）， H 为高度， R 为气体普适恒量 $8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ， g 为当地的重力加速度， T 为开尔文温度。在实验中由于高度变化不会很大， g 可认为是个定值。从以上公式可以看出，大气压随高度的升高而减小。本实验用两个方法来证实大气压确实随高度增加而减小。方法一用气体体积的变化来显示大气压强的变化，灵敏度较高；方法二用液柱的高低来显示大气压的变化，可作高度计用。

方法一

目的 显示大气压随高度而变化的现象。

器材 内径 24cm 的高压锅，外径 9mm、内径 5.5mm 的乳胶管（长约 15cm），内径 4—6mm 的玻璃管（长约 30cm），市售饭锅保暖泡沫塑料套。



操作

(1) 将高压锅盖上的密封橡胶圈沾上水，然后盖上锅。将乳胶管一端紧套在锅盖顶部的放气管口上，另一端接上玻璃管，在玻璃管中部放入一段红色液体。用手对高压锅顶部稍施压力，可见红色液柱有明显移动，说明整个装置密封良好（如图）。

(2) 将高压锅装入泡沫塑料套内，减小环境温度对实验的影响。待红色液柱稳定不动后，在玻璃管上做好位置标记。

(3) 手捧泡沫塑料套，将整个装置从教室下部提升到天花板附近，可见红色液柱向外移动；装置下降时则向相反方向移动。

注意

(1) 整个装置的密封是实验的关键，各连接部分要仔细检查，并涂上凡士林油，防止漏气。

(2) 实验过程中玻璃管要始终保持水平。

(3) 除玻璃管内一段红色液体外，管道各个不能再有水柱，因为整个实验过程中大气压强变化仅数十帕，水柱与管道之间的阻碍作用会严重影响实验的效果，所以在实验过程中经常疏通管道，以防被水柱堵塞。

(4) 如实验时间不长，可不用泡沫塑料套，因为厚壁铝质高压锅的热容量较大，在短时间内可忽略外界温度对实验的影响。

分析 根据 $P = P_0 e^{-\mu g H / (RT)}$ 可知

$$dP = P_0 \cdot e^{-\mu g H / (RT)} \cdot \mu g / (RT) \cdot dH。$$

如果在海平面附近，在 20°C 的环境中高度增加 3.0m，则

$$P = P_0 \cdot H \cdot \mu g / (RT)$$

$$= 760 \times 3.0 \times 0.0289 \times 9.79 / (8.31 \times 293)$$

=0.26(mmHg)。

内径 24cm 的高压锅容积约为 71 根据玻意耳—马略特定律可以算出体积变化约为 2.4ml。如果采用内径 5mm 的玻璃管，可移动 10cm 以上。

方法二

目的 利用大气压随高度的变化来测量高度。

原理 若如图所示的容器中气体体积、温度基本不变，则可认为容器中气体的压强 P_1 是一个定值。外界大气在

$$P = P_1 - pgh,$$

$$P_0 e^{-\frac{\mu gH}{RT}} = P_1 - pgh_0$$

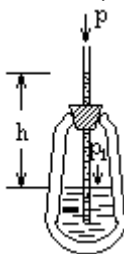
两边取微分 $P_0 e^{-\frac{\mu gH}{RT}} \cdot \frac{-\mu g}{RT} dH = -pgdh$ ，如果在海平面附近(H为

零)，环境温度 20 ，则

$$\begin{aligned} \Delta h &= \frac{P_0 \cdot \mu}{RTp} \cdot \Delta H \\ &= \frac{1.013 \times 10^5 \times 0.0289}{8.31 \times 293 \times 10^3} \Delta H \\ &= 1.20 \times 10^{-3} \Delta H_0. \end{aligned}$$

从以上讨论可看出， h 和 H 成正比，水柱每升高 1mm，说明高度升高了 0.83m。（也可以利用初中物理书上“每升高 12m，大气压强减小 1mm 高水银柱”的结论来导出以上结果。）

器材 热水瓶，长约 40cm 的细玻璃管，刻度尺等。



操作

(1) 在热水瓶中减少量冷水，软木塞上打一小孔插上玻璃管，一直伸到瓶中水面以下。

(2) 将软木塞塞紧后向瓶中吹适量空气，使玻璃管中的水面高出软木塞 5 厘米。

(3) 在水面处做标记后等一段时间，观察玻璃中水面是否下降。如水面逐步下降，表示软木塞接口处漏气，应设法密封。

(4) 等水面静止后，在玻璃管水面处向上每隔 12mm 画一条线。每一格代表 10m 高度。这样就可以用它来测量高度了。

注意

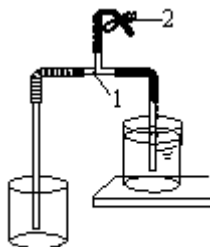
(1) 为了提高密封性能，可在木塞与玻璃管、木塞与热水瓶口之间涂上凡士林油。

(2) 测高过程中要保持玻璃管竖直。

方法一

目的 演示虹吸现象。

器材 玻璃管 2 根，玻璃三通，橡皮管 3 根，止水夹，大玻璃容器等。



1.玻璃三通 2.止水夹

操作

(1)如图连接成实验装置。

(2)在虹吸管内装满水，用手按住两端的管口，然后把管子的一端放入较高的盛满红色水的容器中，另一端放入较低的容器中，松开手指，就会发生虹吸现象。

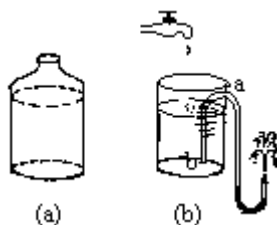
(3)松开止水夹 2，虹吸现象立即停止。

说明 虹吸现象是由于大气压的作用而产生的，如果虹吸管破损漏气，就不会发生虹吸现象。

方法二

目的 演示连通器原理及虹吸现象。

器材 塑料瓶（容量为 500—1000ml），橡皮管，玻璃管（长度为 10—20cm）等。



操作

(1)将塑料瓶截去瓶口部分（图 a）后，在其上部的侧壁上开一小孔，插入橡皮管，使小孔不漏水。

(2)把玻璃管在酒精灯上弯成 U 形，一端拉成尖口作为喷水口，另一端与橡皮管连接（图 b）。

(3)打开水龙头，将水注入瓶内（流量小一些），当水位上升到 a 处时，由于连通器原理，水从喷口喷出。

(4)当瓶内水面下降，由于虹吸作用，水仍能从喷口喷出，直至橡皮管 b 端露出水面，虹吸作用停止。

(5)由于水龙头不断注水，瓶内水位又开始上升，重复上述过程。这样每隔一段时间就会发生一次喷水现象，间歇时间可由水龙头的流量大小来控制。

方法一

目的 显示流体的流速和压强的关系。

器材 纸带，细玻璃管，烧杯，漏斗，乒乓球。

操作

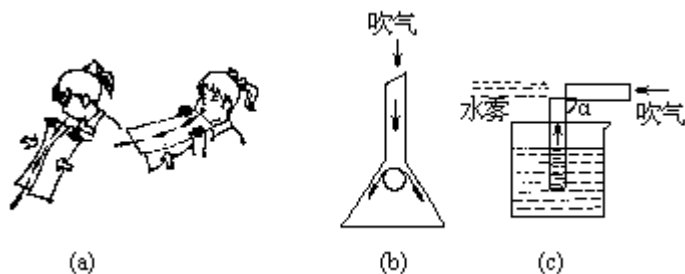
(1)如图(a)所示，向两纸带中间吹气，由于纸带间空气流速增大，压强减小，纸带向中间靠拢；同样理由，当沿下垂的纸面上方吹气时，纸带会向上飘起。

(2)如图(b)所示，从漏斗的颈部向下吹气，乒乓球上方空气流速大，压强小于大气压，乒乓球被“吸住”。

(3)如图(c)所示，当沿水平玻璃管吹气时，竖直玻璃管上方压强减小，管内液面上升，水成雾状喷出。

注意

(1)操作(2)中对漏斗颈吹气时须急速、有力，否则乒乓球仍会下落。



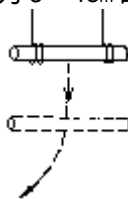
(2)操作(3)中的玻璃管不宜太细，管径5—8mm均可。水平玻璃管的下沿应低于竖直玻璃管口，让竖直玻璃管遮去半个孔（见图c）使气流在出口处速度更大。同时两管间角度应小于 90° ，以免气流向竖直管内倒流而使实验失败。

方法二

器材 自制纸筒，细线等。

纸筒的制作方法

取一张16K白纸，粘成一直径为3—4cm的圆纸筒即可。



操作

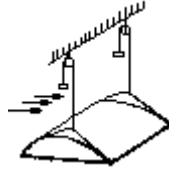
(1)手持纸筒保持水平状态。释放后，纸筒基本沿直线竖直下落。

(2)取两根长约0.5m的细线，按同一方向绕在该纸筒上。释放后纸筒将边旋转边下落。可发现这时纸筒并不竖直落下，而是沿弧线朝某一方面偏转。这是因为纸筒旋转时，会产生一随纸筒旋转的旋转气流，它与纸筒两侧的气流叠加后，会使纸筒一侧气流流速变大，另一侧则变小，于是就产生一个从流速小处指向流速大处的侧向力，使纸筒向一侧偏转。

(3)改变细线在纸筒上的绕向，重复上述实验，纸筒下落时偏转的方向随之改变。且纸筒旋转得越快，它落下时弧形轨迹就弯曲得越厉害。

方法三

器材 硬纸板，胶水，滑轮两个，细线数根，支架一个，电扇或电吹风一个，小砝码若干个。



操作

(1)用硬纸板、胶水自制一个凸形机翼，然后用砝码、细线通过滑轮使悬挂的机翼平衡，如图所示。

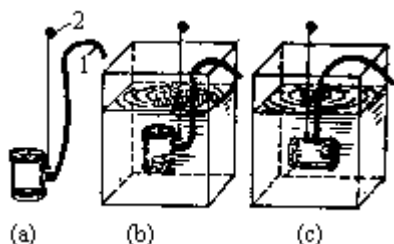
(2)用风扇按图所示的方向吹风。凸起的面向上时，机翼上升；凸起的面向下时，机翼下降。

本实验的五种方法从各个侧面显示了浮力产生的原因。方法一是用乳胶膜的形变来显示物体下底面受到液体的压力比上底面大；方法二是说明如果物体的下表面没有受到液体的压力，则不会产生浮力；方法三进一步说明如果物体下表面受到液体的压力较上底面小，也不会产生浮力；方法四设计了一个有趣的过程来间接说明浮力产生的原因。

方法一

目的 显示产生浮力的原因是液体对物体上、下底面的压力差。

器材 深玻璃水槽，硬质透明塑料圆筒（内径5—8cm、长度8cm左右），彩色乳胶膜2片，乳胶管，手柄等。



操作

(1)将塑料圆筒上下两开口端扎上彩色胶膜（先用橡皮筋箍住再用细线扎牢），两个表面膜的松紧要一样。筒壁中部开一个出气嘴，通过乳胶管1和大气相通。筒壁再装一个可旋转的手柄2，如图(a)所示。

(2)将圆筒竖直接入水槽中，让出气嘴的乳胶管口露出液面。观察上、下表面膜受液体压力作用而发生形变的情况，可见下底面膜向内凹陷程度较大。说明下底面受到水的压力较小，如图(b)所示。

(3)将圆筒转到水平位置，可见两边的膜凹陷程度一样，这表明水对圆筒的侧面压力相等，如图(c)所示。

方法二

目的 显示当物体的底部不受液体的压力时，液体对物体没有浮力。

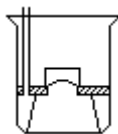
器材 烧杯，自制带支架的有机玻璃隔板，玻璃管（或塑料管），自制蜡制模型块等。

蜡制模型块的制作方法

取一块石蜡，切削成直径4—6cm，高度2—3cm的圆柱体，上底面平整，下底面呈凹形。下底和有机玻璃圆板接触的部分是平面，可先放在砂纸表面上磨平。

隔板和支架的制法

取3—5mm厚的有机玻璃制一圆板，外径与烧杯内径相配，圆板中心打一个直径为2cm的圆孔，另外再用氯仿固定四根支柱（如图）。在有机玻璃板边缘附近开一个小孔，插入一根细玻璃管，以便于隔板下方空气排出水面。



操作

(1)将蜡块置于融板中孔的上方，用细杆抵住蜡块，将红色水倒入烧杯。取走细杆，蜡块静置在融板上，这是因为蜡块下方不受液体的压力，所以不会产生浮力。

(2)烧杯上部的水经隔板缝隙缓慢流入下部，下部的液面逐渐升高。直到蜡块的下底面也受到了液体的压力，蜡块才开始上浮。

注意 本实验对密封要求很低，演示过程需要有一定的缝隙，让烧杯上部的水流入下部，产生浮力，使蜡块浮起。

方法三

目的 显示物体上、下表面受液体压强的大小和浮力的关系。

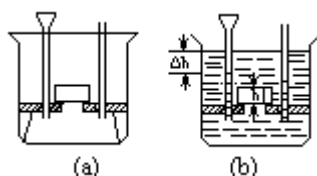
器材 大玻璃烧杯，自制带支架的有机玻璃隔板，玻璃管（或塑料管）2根，自制石蜡块等。

石蜡块的制作方法

取一石蜡块，切削成直径4—6cm，高5cm的圆柱体，上下底面要平整。

隔板和支架的制法

用3—5mm厚的有机玻璃制一圆板，外径与烧杯内径紧配，圆板中心打一个直径2cm的圆孔。另外再用氯仿固定四根支柱（如图a）。在有机玻璃边缘附近开两个小孔，插上两根玻璃管（或塑料管）。隔板与烧杯壁之间、玻璃管与隔板之间都要求密不漏水。



操作

(1)将石蜡块置于隔板中孔的上方，用细杆抵住（使石蜡块与隔板的接触处不漏水），将红色倒入烧杯，可见到石蜡块并不浮起。说明当物体的下表面不受液体的压力时，不受到浮力。

(2)将蓝色水从一根玻璃管中灌入，到蓝色水刚溢进玻璃管时暂停灌水。此时石蜡块下表面虽已受到蓝色水的压力，但它仍不浮起。说明当物体的下表面受到液体的压强较上表面小时，仍不受到浮力。

(3)继续向玻璃管中灌水，灌到玻璃管中的水面与烧杯中液面高度之差 h 等于石蜡块的高度 h 时，石蜡块仍不上浮(图b)。这是因为：(1)石蜡块本身所受的重力，(2)石蜡块下表面略小于上表面。

(4)再向玻璃管中灌水，直到石蜡块开始上浮。此时水对石蜡下表面的压力减去水对石蜡上表面的压力已大于石蜡本向受到的重力。

注意 各部分不漏水是实验成功的关键，必要时可涂凡士林增强各部分的密封性。

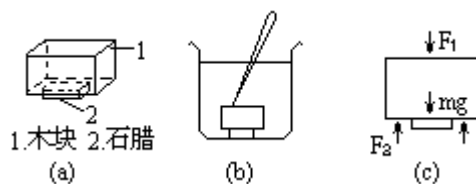
方法四

器材 平底透明水槽，长方体木块，长方体石蜡块，胶管等。

操作

(1)用粘合剂将石蜡块固定在木块表面（图a）。

(2)将木块与石蜡放在水槽底上（石蜡块下底面与槽密切接触），用细棒抵住木块，将水注满水槽(图b)。取走细棒，不见木块与石蜡块浮起。



(3)用胶管利用虹吸作用将水槽中的水往外抽。当水面下降到某一高度时，水块与石蜡块突然浮起。说明此时水对它们的浮力已大于它们受到的重力。

注意

(1)如玻璃槽底不够平，可用一块大小适当的5mm平板玻璃放在槽底，在上面涂上一层石蜡，并将它和石蜡块的下底面都仔细刮平，保证两个面紧密接触。

(2)要使实验成功，对各实验器材的大小有一定的要求（详见分析部分）。

分析 木块和石蜡块在上浮时受到三个力的作用：第一个是水对木块上表面的作用 $F_1 = \rho g H S_1$ ，方向向下（式中 H 表示木块上表面到水面的距离， S_1 为木块上表面的面积）；第二个是水对木块下底面的作用力 $F_2 = \rho g (H+h) S_2$ ，方向向上（式中 h 表示木块的高度， S_2 表示木块下表面的面积减去石蜡块上表面的面积）；第三个是重力 $G = G_{\text{木}} + G_{\text{蜡}}$ ，方向向下。木块和石蜡块受的向上的合外力为

$$F = F_2 - F_1 - G = \rho g (H+h) S_2 - \rho g H S_1 - G$$

$$= \rho g S_2 h - \rho g H (S_1 - S_2) - G$$

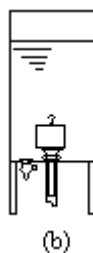
当 $H > (\rho g S_2 h - G) / [\rho g (S_1 - S_2)]$ 时， $F < 0$ ，木块和石蜡块不会上浮。

当 $H < (\rho g S_2 h - G) / [\rho g (S_1 - S_2)]$ 时， $F > 0$ ，木块和石蜡块将上浮。

实验中可取这样一组数据，木块大小为 $8 \times 8 \times 8 \text{cm}^3$ ， $S_1 = 0.0064 \text{m}^2$ ， $G_{\text{木}} = 2.56 \text{N}$ （设 $\rho_{\text{木}} = 0.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ）；石蜡块大小为 $4 \times 4 \times 3 \text{cm}^3$ ， $S_2 = 0.0048 \text{m}^2$ ， $G_{\text{蜡}} = 0.432 \text{N}$ （设 $\rho_{\text{蜡}} = 0.9 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ）。此时临界高度

$$H_0 = \frac{(10^3 \times 9.8 \times 0.08 \times 0.0048 - 2.99)}{10^3 \times 9.8 \times 0.0016} \text{m} = 0.049 \text{m}$$

建议 如有条件，可制作一个如图(d)所示的实验装置，水槽底固定一个针筒，针筒活塞上连一个木块。槽底再设一个排水阀门，用以降低水位。实验原理是类似的。



在研究阿基米德定律的实验中，液体的表面张力等因素会对实验结果有一定的影响，因此实验一般不采取高精度的测量工具。为了减少实验的相对误差，每次排开水的体积不宜太小。

方法一

目的 研究物体所受的浮力与它所排开液体所受重力之间的关系。

器材 弹簧秤 2 个，溢杯，烧杯，铁架台 2 个，胶木块等。

操作

(1)如图(a)装好实验装置。向溢杯中装稍过量的水，让部分水溢出到烧杯中。然后读出两个弹簧秤的读数，作为初读数。

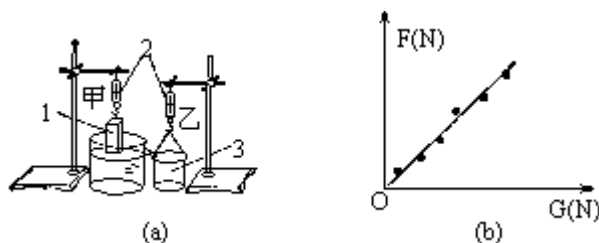
(2)降低左面铁架台夹具的高度，使部分胶木块浸入水中，甲弹簧秤减少的读数就是胶木块受到的浮力 F 的大小，乙弹簧秤增加的读数就是胶木块排开的所受的重力 G 的大小。

(3)再降低左边铁架台夹具的高度，重复操作(2)的过程，共记下五到六组 F 和 G 的值。

(4)以胶木块受到的浮力 F 代表纵轴，以胶木块排开的水的重力 G 代表横轴，作 F - G 图。

(5)如果 F 轴和 G 轴采用同样大小的分度，可看到 F - G 图是一根过原点的，与 F 轴、 G 轴都成 45° 角的直线(图 b)。说明胶木块受到的浮力总是等于它所排开的水所受的重力，这就是阿基米德定律。

(6)再以煤油代替水，石蜡块代替胶木块重复以上实验，可以得到相同的结论。



注意

(1)选择秤量适当的弹簧秤，在实验过程中弹簧长度的变化尽量大一些。

(2)实验中用的固体和液体的密度不能差得太多，否则将增大误差。

(3)物体刚下浸到液体时由于受到表面张力的影响和排开液体的体积很小等因素会产生很大的误差，所以作 F - G 图线时，应先根据较大的 (F, G) 值连线，然后逐渐向坐标原点延伸。

方法二

目的 同方法一。

器材 自制溢杯，弹簧秤，烧杯，铁架台，橡胶等。

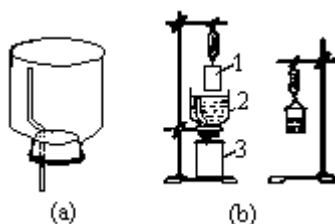
溢杯的制作方法

截去大口瓶的底，将细玻璃管弯成图(a)所示的形状，穿过橡皮塞安装在大口瓶中，即制成一个简易的溢杯。

操作

(1)如图(a)安装实验装置。向自制溢杯中装稍过量的水，然后用弹簧秤分别

测出胶块所受的重力和烧杯所受的重力，作为初读数。



(2)降低铁架台夹具的高度，使部分胶木块浸入水中，弹簧秤比初读数减少的读数就是胶木块受到的浮力 F 的大小。

(3)将溢杯下的烧杯拿出用弹簧秤测量它所受的重力：比初读数增加的读数就是胶木块排开的水所受的重力 G 的大小。

(4)再降低胶木块的高度。重复操作(2)、(3)的过程。共记下五到六组 F 和 G 的值。

(5)、(6)、(7)同方法一的(4)、(5)、(6)。

注意 同方法一。

说明 本方法只用一个弹簧秤测量 F 和 G ，这样可减小由于弹簧秤带来的系统误差。

方法三

目的 同方法一。

器材 定滑轮，溢杯，烧杯，铅块，细绳等。

操作

(1)如图装好实验装置。在溢杯中加稍过量的水，使部分水溢至烧杯中。再在烧杯中逐步加水，直至系统平衡为止。

(2)将一铅块逐步浸入溢杯的水中，可看到溢杯中的水不断地流进烧杯中，但系统却始终平衡。这说明铅块所受到的浮力 F 始终等于它所排开的水所受的重力 G ，这就是阿基米德定律。



注意 用滑轮指示平衡较为直观，但是灵敏度极低，为此要选择能灵活转动的轻质滑轮，才能说明问题。

物体沉浮的条件 35

改变物体沉浮的状态有两条途径：改变物体的自重或改变它所受的浮力。以下两种方法都是改变物体所受的浮力。方法一是通过改变物体排开水的体积来改变它受的浮力，方法二是通过改变液体的密度来改变物体受到的浮力。

方法一

目的 演示重力相同的物体，形状不同时可沉可浮。

器材 烧杯、水、橡皮泥等。

操作

把一块橡皮泥揉成团放在水里，由于橡皮泥的密度比水的密度大，所以橡皮泥

团在水里下沉。然后把橡皮泥捏成小碗，橡皮泥受到的重力没有改变，但却浮在水面上。说明只要物体排开液体所受的重力大于它本身所受的重力，就能浮在液面上。

说明 此实验也可用废牙膏壳来做。用剪刀先剪去管口部分。将剩余部分压扁，放入水中牙膏壳便下沉；如果设法引开上半部分并撑成圆管形（如图所示），再放入水中就不会沉下去了。



方法二

器材 鸭蛋，透明容器，盐等。

操作

(1)将鸭蛋放在淡水中，鸭蛋沉到水底。此时鸭蛋所受的重力略大于它受到的浮力。

(2)逐渐向水中加盐，边加边搅拌（使加入的盐完全溶解），使盐水的密度逐渐增大。达到某一密度时，可看到鸭蛋悬浮在盐水中，能静止在盐水中的任何一个位置上。此时鸭蛋所受的重力等于它所受到的浮力。

(3)继续向盐水中加盐，并加以搅拌，可看到鸭蛋浮到液面上。鸭蛋上浮时，它所受的重力小于它所受的浮力。

注意 操作(2)中的悬浮状态时间不宜太长，以防鸭蛋吸收了盐水中的盐之后，密度增加，重新沉到容器底部。为了防止这个缺点，可以将鸭蛋换用其他密度略大于水的固体，例如外面包有适量石蜡的铁块等。

浮沉子实验形式多样。一般都是通过外部压强的变化，改变浮沉子内部气体的体积，从而达到控制其沉浮的目的。制作浮沉子要掌握两个要点：第一，浮沉子内部必须有一定量的气体（因固体、液体的体积不易随压强的变化而变化）；第二，要控制好整个浮沉子的平均密度，使外界压强较小时，整个浮沉子的平均密度稍稍小于周围液体的密度。

方法一

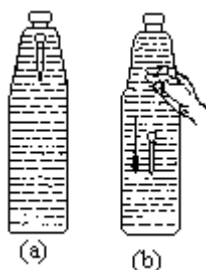
器材 1000ml 透明有盖塑料瓶，中号滴管等。

操作

(1)在滴管中吸入适量的水，使其恰好能浮在水面上（用手轻点滴管的橡皮头，滴管即会沉入水中，后又缓缓浮上）。

(2)塑料瓶装满水后将滴管放入，然后盖紧瓶盖（尽量做到不漏气）。（图 a）

(3)用力挤压塑料瓶，可看到滴管下沉（图 b）。撤去压力，可看到滴管上浮。用力得当，可使滴管停止在水中某一位置。



注意 瓶中水尽量装得满一些，残留的气体越少，实验效果越好。

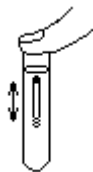
方法二

器材 火柴梗，细漆包线，试管，清水。

操作

(1)取一火柴梗，在其一端绕一小段细漆包线。调节漆包线的重力，使火柴梗恰能竖直悬浮在水面附近。

(2)用拇指按没试管口，使拇指和试管内水面间不留空隙。当用拇指向下压水时，火柴梗就会下沉；减小拇指压力，火柴梗又会徐徐上升（如图）。



注意 应选用木质火柴梗，因木质是多孔的，其中所附空气的体积会随拇指对水的外加压强而变化，从而成为一个简易的“浮沉子”。

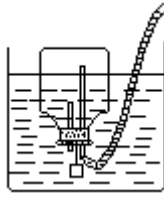
方法三

器材 广口瓶，木塞，玻璃管，盛水玻璃缸，乳胶管，铁块，细线，钻孔器等。

模拟潜水艇的制作方法

用钻孔器在木塞上钻两个小孔，然后紧紧塞住广口瓶瓶口，在小孔中分别插入一长一短两根玻璃管，并在较长玻璃管的一端连接一根乳胶管，在瓶口下方用细线挂上铁块，然后将整个装置倒置在盛满水的玻璃缸内，如图所示。以此作为潜水艇

的模拟实验器。



操作

实验时，从乳胶管中吸出空气，瓶内压强减小，水从另一玻璃管进入瓶内，重力大于浮力，瓶即下沉；若向瓶内吹气，瓶内压强增大，将水排出，至重力小于浮力时，瓶即上浮。

注意

- (1) 长玻璃管的上端应靠近瓶底。
- (2) 铁块的重力要适当，一般只要能使瓶口不致向上翻转就可以。

静力称衡法的实质是借助阿基米德定律测量物体的体积，进而得到它的密度。它比直接用量筒测量物体的体积精确度高。本实验中不用弹簧秤而用天平来测量物体的视重，是为了提高实验结果的精确度。

本实验的结果是通过四则混合运算得到的，所以在分析误差时用了误差传递的一般公式。有关公式可查阅本书基础篇的有关部分。

方法一

目的 测量密度大于水的固体的密度。

原理 金属块所受的重力为 G_1 ，忽略空气的浮力，它在空气中的视重也是

$$G_1 = gV$$

如果它在水中的视重是 G_2 ，则

$$G_2 = G_1 - \rho_{\text{水}} gV,$$

即

$$G_1 - G_2 = \rho_{\text{水}} gV$$

式除以 式，并加以整理可得

$$\rho = G_1 \cdot \rho_{\text{水}} / (G_1 - G_2)。$$

器材 物理天平，砝码，烧杯(500ml)，细线，待测金属块等。

操作

(1)用天平测出金属块在空气中的视重 G_1 。

(2)让金属块完全浸没在水中(但不能碰杯底)，测出金属块在水中的视重 G_2 。

(3)用公式 $\rho = \frac{G_1}{G_1 - G_2} \cdot \rho_{\text{水}}$ 计算出金属的密度。

分析 本实验结果的精确度取决于测量视重的精确度和金属块的重力。根据误差传递的一般公式

$$E_{\rho} = \left| \frac{\partial \rho}{\partial G_1} \right| \frac{\Delta G_1}{\rho} + \left| \frac{\partial \rho}{\partial G_2} \right| \frac{\Delta G_2}{\rho} + \left| \frac{\partial \rho}{\partial \rho_{\text{水}}} \right| \cdot \frac{\Delta \rho_{\text{水}}}{\rho}$$

因为实验中用同一架天平，所以可以认为 $G_1 = G_2 = G$ 。如果 $\rho_{\text{水}}$ 的误差可忽略，则

$$\begin{aligned} E_{\rho} &= \frac{G_2}{(G_1 - G_2)G_1} \cdot \Delta G + \frac{G_1}{(G_1 - G_2)G_1} \cdot \Delta G \\ &= \frac{G_1 + G_2}{(G_1 - G_2)G_1} \cdot \Delta G_0 \end{aligned}$$

从上式可看出，在实验所用的天平已选定(即 G 不变)的情况下，选用质量大一些的金属块，有利于减小实验误差。证明如下：根据金属密度的计算公式

$$\rho = \frac{G_1}{G_1 - G_2} \cdot \rho_{\text{水}}。$$

利用合比定理可得

$$\begin{aligned} \frac{G_2}{G_1} &= \frac{\rho - \rho_{\text{水}}}{\rho} = 1 - \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho}。 \\ G_2 &= G_1 \left(1 - \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho} \right) , \end{aligned}$$

$$\text{所以 } E_{\rho} = \frac{G_1 + G_2}{(G_1 - G_2)G_1} \cdot \Delta G = \frac{G_1(1 + 1 - \rho_{\text{水}} / \rho)}{G_1^2(1 - 1 + \rho_{\text{水}} / \rho)} \cdot \Delta G = \frac{2\rho - \rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{水}}} \cdot \frac{\Delta G}{G_1}。$$

由此可见 E 与 G_1 成反比。

实例

(1) 测一块金属的密度

$G_1 = 27.02\text{g}$, $G_2 = 17.06\text{g}$ 。

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{G_1}{G_1 - G_2} \cdot \rho_{\text{水}} = \frac{27.02}{27.02 - 17.06} \times 0.998 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3 \\ &= 2.71 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。 \end{aligned}$$

取 $G = 0.1\text{g}$ 。

$$\begin{aligned} E_{\rho} &= \frac{G_1 + G_2}{(G_1 - G_2)G_1} \cdot \Delta G \\ &= \frac{(27 + 17)}{(27 - 17) \times 27} \times 0.1 = 1.7\% \\ &= \cdot E = 2.71 \times 10^3 \times 1.7\% \text{kg} / \text{m}^3 = 0.05 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。 \end{aligned}$$

测量结果： $\rho = (2.71 \pm 0.05) \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3$ 。

(2) 将两块金属块绑在一起测量：

$G_1 = 54.03\text{g}$, $G_2 = 34.07\text{g}$ 。

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{G_1}{G_1 - G_2} \cdot \rho_{\text{水}} = \frac{54.03}{54.03 - 34.07} \times 0.998 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3 \\ &= 2.70 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。 \end{aligned}$$

G 仍然取 0.1g ，

$$\begin{aligned} E_{\rho} &= \frac{G_1 + G_2}{(G_1 - G_2)G_1} \cdot \Delta G \\ &= \frac{54 + 34}{(54 - 34) \times 54} \times 0.1 = 0.81\%。 \\ &= \cdot E = 2.70 \times 10^3 \times 0.81\% \text{kg} / \text{m}^3 = 0.03 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。 \end{aligned}$$

测量结果： $\rho = (2.70 \pm 0.03) \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3$ 。

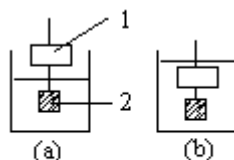
上述两例的结果也说明用质量较大的金属块测量出来的结果误差较小。

方法二

目的 测定密度小于水的固体的密度。

器材 物理天平，砝码，铁块，烧杯，细绳，待测石蜡块等。

操作



1. 石蜡块
2. 铁块

(1) 用天平测出石蜡块在空气中的视重 G_1 。

(2) 用细绳将石蜡块和铁块吊起来。

(3)用天平测出石蜡块在空气中，铁块在水中时总的视重 G_3 (图 a)。

(4)用天平测出石蜡块和铁块都浸没在水中时总的视重 G_4 (图 b)

(5)设石蜡块的体积是 V_1 ，铁块的体积是 V_2 ，铁块在空气中视重是 G_2 ，则

$$G_3 = G_1 + G_2 - \rho_{\text{水}} V_2 g$$

$$G_4 = G_1 + G_2 - \rho_{\text{水}} (V_1 + V_2) g$$

$$\text{— 得} \quad G_3 - G_4 = \rho_{\text{水}} V_1 g$$

$$G_1 = V_1 g$$

$$\div \text{得} \quad \rho_{\text{水}} = G_1 / (G_3 - G_4)$$

即可测出石蜡的密度。

分析 根据误差传递公式，

$$E_{\rho} = \left| \frac{\partial \rho}{\partial G_1} \right| \frac{\Delta G_1}{\rho} + \left| \frac{\partial \rho}{\partial G_3} \right| \frac{\Delta G_3}{\rho} + \left| \frac{\partial \rho}{\partial G_4} \right| \frac{\Delta G_4}{\rho} + \left| \frac{\partial \rho}{\partial \rho_{\text{水}}} \right| \frac{\Delta \rho_{\text{水}}}{\rho}。$$

因为实验中各个视重用同一架天平测量，所以可以认为各称量的误差相等，即 $G_1 =$

$G_3 = G_4 = G$ ，若 $\rho_{\text{水}}$ 值的误差可忽略，因此有

$$\begin{aligned} E_{\rho} &= \frac{\Delta G}{G_1} + \frac{\Delta G}{G_3 - G_4} + \frac{\Delta G}{G_3 - G_4} \\ &= \frac{G_3 - G_4 + 2G_1}{G_1(G_3 - G_4)} \cdot \Delta G_0 \end{aligned}$$

从误差分析的过程可以看出，在实验所用的天平已选定（即 G 不变）的情况下，蜡块选得大一些，可以使 $\frac{\Delta G}{G_1}$ 和 $\frac{\Delta G}{G_3 - G_4}$ 等三项都变小，这有利于减小结果的误差。而铁块的质量只要保证石蜡能浸没有水中，其大小与结果的误差是无关的。

实例

(1)测一块较小的石蜡块的密度

$$G_1 = 7.65 \text{g}, G_3 = 34.82 \text{g}, G_4 = 26.22 \text{g}。$$

$$\begin{aligned} &= G_1 \cdot \rho_{\text{水}} / (G_3 - G_4) \\ &= \frac{7.65 \times 0.998 \times 10^3}{34.82 - 26.22} \text{kg} / \text{m}^3 \\ &= 0.89 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。 \end{aligned}$$

取 $G = 0.1 \text{g}。$

$$\begin{aligned} E &= (G_3 - G_4 + 2G_1) \cdot G / [G_1(G_3 - G_4)] \\ &= (34.82 - 26.22 + 15) \times 0.1 / [7.65(34.82 - 26)] \\ &= 3.5\% , \\ &= \rho_{\text{水}} \cdot E = 0.89 \times 10^3 \times 3.5\% \text{kg} / \text{m}^3 \\ &= 0.04 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3 , \\ &= (0.89 \pm 0.04) \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。 \end{aligned}$$

(2)测一块较大的石蜡块的密度

$$G_1 = 17.86 \text{g}, G_3 = 61.36 \text{g}, G_4 = 41.20 \text{g}。$$

$$\begin{aligned} &= G_1 \cdot \rho_{\text{水}} / (G_3 - G_4) \\ &= \frac{17.86 \times 0.998 \times 10^3}{61.36 - 41.20} \text{kg} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

$$=0.88 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。$$

G 仍然取 0.1g ,

$$\begin{aligned} E &= (G_3 - G_4 + 2G_1) / [G_1(G_3 - G_4)] \\ &= (61 - 41 + 36) \times 0.1 / [18(61 - 41)] \\ &= 1.5\%。 \\ &= \rho \cdot E = 0.88 \times 10^3 \times 1.5\% \text{kg} / \text{m}^3 \\ &= 0.02 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。 \\ &= (0.88 \pm 0.02) \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。 \end{aligned}$$

上述两例的结果也说明用较大的石蜡块测量出来的密度误差较小。

方法三

目的 测定液体的密度。

器材 物理天平, 砝码, 金属, 烧杯, 细绳, 水, 待测液体等。

操作

- (1) 用天平测出金属块在空气中的视重 G_1 。
- (2) 用细绳吊住金属块, 用天平测出金属块在水中的视重 G_2 (如方法一)。
- (3) 用天平测出金属块在待测液体中的视重 G_3 。
- (4) 设金属块的体积是 V , 密度是 ρ_0 , 待测液体的密度是 ρ , 则

$$G_1 = \rho_0 g V$$

$$G_2 = \rho_0 g V - \rho_{\text{水}} g V$$

$$G_3 = \rho_0 g V - \rho g V$$

$$? : G_1 - G_2 = \rho_{\text{水}} g V$$

$$? : G_1 - G_3 = \rho g V$$

$$\div : \rho = (G_1 - G_3) \cdot \rho_{\text{水}} / (G_1 - G_2)$$

即可测出待测液体的密度。

分析 根据误差传递公式

$$E_{\rho} = \frac{(G_3 - G_2) \cdot \Delta G}{(G_1 - G_2)(G_1 - G_3)} + \frac{\Delta G}{G_1 - G_2} + \frac{\Delta G}{G_1 - G_3} = \frac{2 \cdot \Delta G}{G_1 - G_3}。$$

从分析结果可以看出, 金属块选得大一些, 使 $(G_1 - G_3)$ 大一些有利于减少 E 。

实例

(1) 用一块较小的金属块做实验

$$G_1 = 27.10 \text{g}, G_2 = 17.14 \text{g}, G_3 = 18.64 \text{g},$$

$$\begin{aligned} &= (G_1 - G_3) \cdot \rho_{\text{水}} / (G_1 - G_2) \\ &= \frac{(27.10 - 18.64) \times 0.998 \times 10^3}{27.10 - 17.14} \text{kg} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

$$= 0.85 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。$$

$$E = 2 \cdot \Delta G / (G_1 - G_3)$$

$$= 2 \times 0.1 / (27 - 19) = 2.5\%。$$

$$= \rho \cdot E = 0.85 \times 10^3 \times 2.5\% \text{kg} / \text{m}^3$$

$$= 0.03 \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3,$$

$$= (0.85 \pm 0.03) \times 10^3 \text{kg} / \text{m}^3。$$

(2) 用一块较大的金属块做实验

$$G_1=54.14\text{g}, G_2=34.20\text{g}, G_3=37.20\text{g}.$$

$$\rho = \frac{(54.14 - 37.20) \times 0.998 \times 10^3}{54.14 - 34.20} \text{kg/m}^3$$

$$= 0.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3,$$

$$E = 2 \times 0.1 / (54.14 - 37.20) = 1.2\%,$$

$$= \rho \cdot E = 0.85 \times 10^3 \times 1.2\% \text{kg/m}^3$$

$$= 0.01 \times 10^3 \text{kg/m}^3,$$

$$= (0.85 \pm 0.01) \times 10^3 \text{kg/m}^3.$$

上述两例的结果说明用体积较大的金属块来做实验误差较小。

也可以从有效数字运算法则推出同样的结论：

$$\rho = \frac{G_1 - G_3}{G_1 - G_2} \cdot \rho_{\text{水}}$$

在实验里，假定 $\rho_{\text{水}}$ 值有效数字位数足够多，当 G_1 值取得越大，相应的 G_2 和 G_3 值也越大，则 $G_1 - G_3$ 和 $G_1 - G_2$ 的有效数字也越多，最后 ρ 值的有效数字位数越多。

方法四

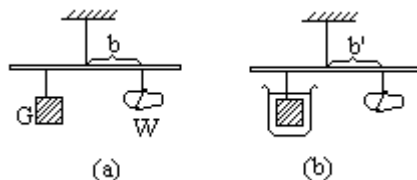
目的 测金属块的密度。

器材 刻度尺，重物，烧杯，细绳，待测金属块等。

操作

(1) 用悬挂法测出刻度尺重心的位置，在重心处用细绳悬挂起来。尺的一头悬挂待测金属块 G ，另一边悬挂重物 W 。调节两侧力臂，使尺平衡（如图 a）。读出此时重物一侧力臂的长度 b 。

(2) 使待测金属块浸到水中，调节重物一侧力臂的长度，使刻度尺重新平衡（图 b）。读出此时重物一侧的力臂长度 b' 。



(3) 设待测金属块一侧力臂长 a ，金属块体积为 V ，密度为 ρ ，则有

$$gVa = Wb$$

$$(gV - \rho_{\text{水}}gV) a = Wb'$$

$$\div : \quad \rho_{\text{水}} / \rho = b' / b,$$

$$= b \cdot \rho_{\text{水}} / (\rho - \rho_{\text{水}}).$$

即可测出金属块的密度 ρ 。

分析 根据误差传递公式，

$$E_{\rho} = \left| \frac{\partial \rho}{\partial b} \right| \frac{\Delta b}{\rho} + \left| \frac{\partial \rho}{\partial b'} \right| \frac{\Delta b'}{\rho} + \left| \frac{\partial \rho}{\partial \rho_{\text{水}}} \right| \frac{\Delta \rho_{\text{水}}}{\rho},$$

因为同一刻度尺的读数误差相同，所以 $\Delta b = \Delta b'$ ，不考虑 $\rho_{\text{水}}$ 的误差。因此

$$E_{\rho} = \frac{b'}{(b - b')b} \Delta b + \frac{1}{b - b'} \Delta b = \frac{b + b'}{(b - b')b} \Delta b.$$

从以上分析结果可看出：在实验中待测金属块的体积大一些，刻度尺长一些，重物质量小一些（使 b 和 b' 大一些），有利于减小实验的误差。

目的 证实物体在空气里受到浮力。

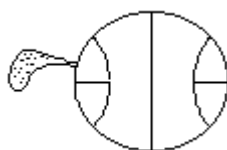
器材 篮球，打气筒，气针，玩具气球，1000g 托盘天平，砝码，细线等。

操作

(1)用打气筒将篮球打足气。把玩具气球套在气针尾端，用细线扎紧，针头微微插入篮球打气孔中（此时，篮球中空气不可进入气球），使篮球、气针、玩具气球组成一个“篮球整体”，如图所示。

(2)将“篮球整体”放在天平左盘，在天平右盘中加法砝码，使天平平衡。

(3)把“篮球整体”上的气针头进一步插入篮球内胆，篮球内空气迅速充入玩具气球，把气球胀大。随着“篮球整体”浸在空气中的体积变大，天平左盘上翘，而“篮球整体”的质量没有变化，证实物体在空气里也受到浮力。



说明 用杠杆和钩码替代托盘天平和砝码同样可做本实验。

方法一

器材 4号保鲜袋,直径0.39mm的漆包线(长度分别为620mm、300mm和20mm),棉花,酒精等。

操作

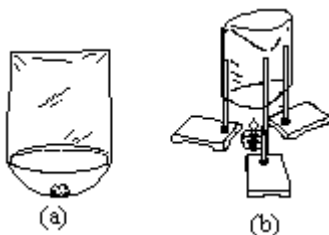
(1)将620mm长的漆包线像缝衣服似地缝在4号保鲜袋袋口上,并整成圆形。把300mm和20mm的两根漆包线在中间绞合成十字形,在十字交叉处装上黄豆大小的棉花一团。再把300mm的漆包线整成半圆形,两端各弯一个小钩,装到保鲜袋口上,如图(a)。整个装置的总质量不超过2.5g。

(2)一手拎住保鲜袋底,在棉花上滴上数滴酒精,点燃酒精棉,可看到保鲜袋逐渐膨胀直至徐徐上升,并可在空中停留十几秒。待酒精将近燃完时又自行降落。

注意 在实验过程中,酒精的量应控制在0.5g左右。过多会使保鲜袋未升空前已被烘坏,过少则不能升空。

说明 此实验有一个更简便的做法。

用三只铁架台,摆成三角形的位置,把保鲜袋套在铁架台的三根立柱上,在袋口下方用一只酒精灯加热空气(如图b),塑料袋亦能上升1m多高。但它的缺点是上升高度有限,并且容易倾翻。



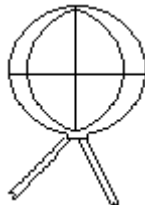
方法二

器材 半透明纸若干张,道林纸,绸带两条,煤炉,铁皮做喇叭形烟囱,胶水若干。

操作

(1)用半透明纸做成一个直径约为1.5m的纸球,下端用道林纸做一个圆形的口,并挂上两条薄绸带。

(2)用一个烧旺的煤炉,将一个铁皮做成的喇叭形的烟囱,大口放在炉子上,小口对准纸球的口充气。当纸球充足热空气后即放手,气球可上升达数百米。



注意

- (1)充热空气时,温度不宜过高。
- (2)绸带起稳定作用,不宜过长过重。
- (3)外界气温越低,效果越显著。

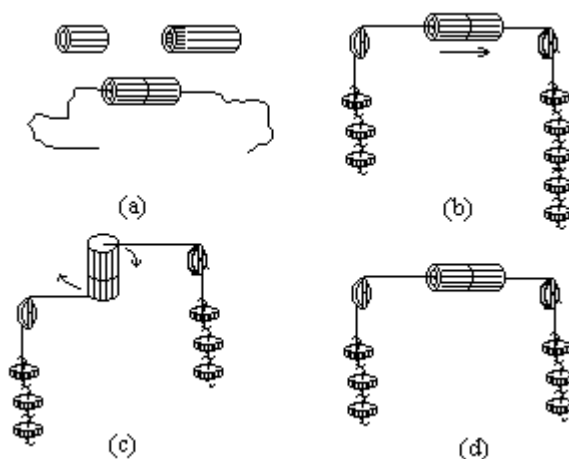
目的 通过分步演示，逐步归纳得出二力静平衡的条件。

器材 自制蜡纸筒，定滑轮，100克钩码若干，铁钉，细线，带底座的竖直木板（或木支架）等。

蜡纸筒的制作方法

剪取两个小号蜡纸筒的端部（长3—4cm，底盖均保留）后，在其中一筒的开口处剪开长约1cm的数个瓣，使两纸筒容易对插在一起。再在两纸筒的底盖中心各系一条强度足够的细线（可用缝衣针把线穿过后在筒内打结），然后将两纸筒塞紧固定，如图(a)。

操作



(1)如图(b)所示，先用手捏住纸筒，使左右细线绕过定滑轮后分别悬挂300g和400g的钩码。放手时，整个纸筒向右方运动。再将从右边取下的100g钩码加到左边，则纸筒会朝左方运动。说明两个大小不等的力不能平衡。

(2)如图(c)所示，捏住纸筒使它处于竖直位置而左右两边细绳都悬挂300g钩码。放手时，整个纸筒会发生转动。说明两个作用线不在一直线上的力不能平衡。

(3)如图(d)所示，捏住纸筒让左右两边各悬挂300g钩码。放手后，整个纸筒静止不动，处于平衡状态。

(4)在操作(3)的基础上，再把两纸筒分离（只要将两纸筒略微旋松一拉），两纸筒就被拉开，说明作用在两个物体上的力不能平衡。

以上实验演示可得出如下结论：发生二力静平衡的两个力必须满足“等值”、“反向”、“共线”（作用在同一条直线上）、“同物”（作用在同一个物体上）这四个条件。

注意

(1)两个定滑轮应位于同一竖直平面内，其中图(b)、图(d)中的两个滑轮必须等高。滑轮与木板之间要有适当距离，以免演示时纸筒跟木板相接触。每个定滑轮的框架可预先用细线系在钉入木板的两枚长钉上。

(2)实验中应使细线对纸筒的拉力远大于纸筒的自重，因此每边所挂钩码的总质量宜尽可能大一些。否则不能确保图(b)、图(d)的演示中两边细线对纸筒的拉力基本上在一条直线上。

多个共点力的合成

本实验的分析部分介绍了一种验证性实验中处理数据的方法。

目的 验证多个共点力平衡的条件。

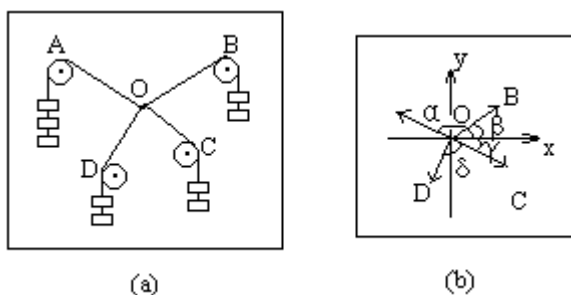
器材 滑轮，木板，刻度尺，量角器，细绳，钩码，砝码等。

操作

(1)在木板上覆盖一层薄纸，然后将四个滑轮的轴固定在木板上。把四根细绳的一端结在一起，另一端跨过滑轮，各挂一串钩码（图 a）。

(2)系统平衡后，在白纸上记下四根细绳的交点 O 的位置以及四根细绳的方向。

(3)根据钩码的多少和细绳的方向，在白纸上作出四个力的图示 OA、OB、OC 和 OD（图 b）。



(4)以 O 点为原点，作出水平方向 x 轴和竖直方向 y 轴。用量角器测出各个力与 x 轴正方向所成的角度 α 、 β 、 γ 和 δ 。

(5)计算 $F_x = OA \cos \alpha + OB \cos \beta + OC \cos \gamma + OD \cos \delta$ 和 $F_y = OA \sin \alpha + OB \sin \beta + OC \sin \gamma + OD \sin \delta$ 。如果 F_x 和 F_y 在误差范围内等于零，即验证了多个共点力平衡的条件。

(6)改变钩码数目，可以验证其他情况。

分析 现在解释“ F_x 和 F_y 在误差范围内等于零”的含义。

系统平衡并记下结点 O 的位置之后，可以进一步考察四个力的误差范围。在 A 串钩码上逐步增加小砝码，直至用眼睛能判断结点的位置发生了变化为止，增加上去的砝码的重力即为 F_A 。用同样的方法可确定 F_B ， F_C ， F_D 。

$$F_x = |F_A \cos \alpha| + |F_B \cos \beta| + |F_C \cos \gamma| + |F_D \cos \delta|,$$

$$F_y = |F_A \sin \alpha| + |F_B \sin \beta| + |F_C \sin \gamma| + |F_D \sin \delta|$$

如果 $F_x > 0 > F_x - F_A$ ，

$F_y > 0 > F_y - F_A$ ，

则可认为 F_x 和 F_y 在误差范围内等于零。

方法一

目的 验证杠杆平衡的条件。

器材 自制杠杆，铁架台，测力计，细绳，钩码等。

杠杆的制作方法

取约 80cm 长的均匀木条，在木条的正中间钻一小孔口为支点 O ，从 O 点向两侧每隔 10cm 画一长线，每两条长线中间画一条短线，即制成一支杠杆。

操作

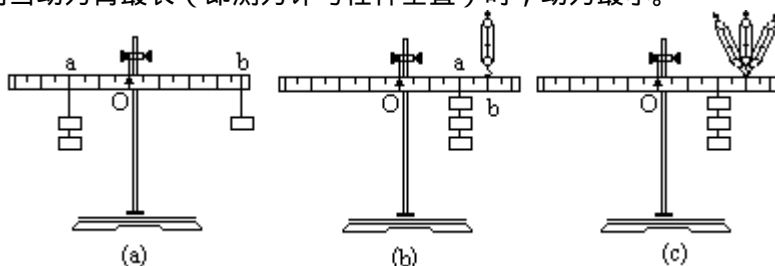
(1) 在杠杆 O 点穿一细绳，悬挂在铁架台上。若不平衡，可在杠杆两端粘橡皮泥，直至达到平衡。

(2) 在杠杆左侧 a 点挂上重力为 G_1 的钩码，在右侧挂上重力为 G_2 的钩码。移动右侧钩码的位置至 b 点时，杠杆平衡。此时有动力 \times 动力臂 = 阻力 \times 阻力臂。

(3) 改变 G_1 、 G_2 的大小和作用点，可以重复验证。

(4) 将阻力与动力的作用点移至支点 O 的一侧（图 b），改变钩码的重力及 a 、 b 点的位置，同样可以得到以上结论。

(5) 仍用图 (b) 装置，改变动力（即测力计对杠杆的拉力）的作用方向（图 c），可以看到当动力臂最长（即测力计与杠杆垂直）时，动力最小。



注意 杠杆中间悬挂孔 O 的位置应略高于木杆的重心（杠杆水平放置时），使杠杆悬挂时处于稳定平衡。但也不能高出过多，以免杠杆的灵敏度降低，实验误差增大。一般情况下，以 O 点高出重心数毫米为好。

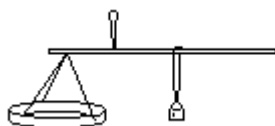
方法二

目的 利用杠杆平衡原理自制杆秤。

器材 细长木杆（长 35cm），重物（如废旧锁），刻度尺，100g 钩码等。

操作

(1) 在离木杆一端 1cm 和 6cm 处各钻一个小孔，分别挂上用废罐头盒制成的秤盘和穿一根较粗的线做提纽，再用细线吊一个质量约为 100g 的重物作为秤砣（如图）。



(2) 提起秤纽，移动秤砣的位置，使秤杆平衡。此时秤砣的位置 0 是刻度的零点，也叫秤杆的定盘星。

(3) 在秤盘里放上一个 100g 的钩码，移动秤砣使秤杆平衡，此时秤砣的位置就是 100g 的位置。再在秤盘中增加一个 100g 的钩码，移动秤砣使秤杆平衡，此时秤砣的位置就是 200g 的位置。用同样的方法确定 300g、400g、500g 的位置。用刻度尺量出从 0 点到这些点的距离，可看到这些距离和所称的质量成正比。

(4)测量秤杆上从零点到500g点的长度,除以10,便是每50g的长度。用刻度尺在秤杆上按这样的比例刻出其他质量的刻度线。

注意 各刻度点到0点的距离与它们所称的质量成正比,而到秤纽的距离与它们的质量不成正比。

方法三

目的 利用杠杆平衡条件测刻度尺的质量。

器材 刻度尺,铅笔,1分硬币等。

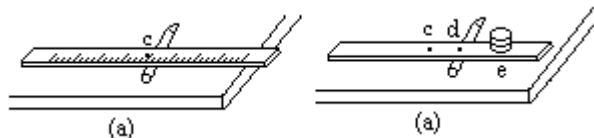
操作

(1)将刻度尺放在铅笔上,使它平衡(与桌面平行),记下此时刻度尺与铅笔的接触点c(即刻度尺的重心)。

(2)在刻度尺右部叠放三枚一分硬币(每个硬币质量 $m_0=2\text{g}$),调整铅笔在刻度尺上面的位置,使它重新平衡,记下此时刻度尺与铅笔的接触点d,硬币中心与刻度尺的接触点e。

(3)根据杠杆平衡的条件 $mg \cdot cd=3m_0g \cdot ed$,即可算出刻度尺的质量m。

(4)改变硬币在刻度尺上的位置,重复操作(2)、(3),测量三次,求出m的平均值。



注意 铅笔要保持与刻度尺垂直。

方法四

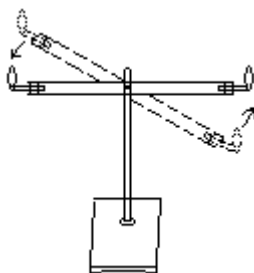
器材 杠杆,铁架台,规格相同的蜡烛两支,细绳等。

操作

(1)将两支蜡烛扎在杠杆两端,使任意一端稍下沉。

(2)点燃两支蜡烛,由于头朝下的一支蜡烛燃烧得较快,所以过一段时间之后,可看到朝下的一头慢慢抬起。

(3)由于相同的原因,以上过程可重复若干次。



注意

(1)尽量选用轻质杠杆。

(2)杠杆转轴处的摩擦力应尽量小。

器材 轮轴模型，测力计，铁架台，细绳，刻度尺，钩码等。

操作

(1)将轮轴模型固定在铁架台上，测量出轮和轴的半径 R 和 r 。

(2)在轮和轴上都系上细绳，在轴的细绳下端挂上质量为 m 的钩码。转动轮轴，使细绳卷绕在轮轴模型上。

(3)通过测力计拉住轮上的细绳，使轮轴平衡。可看到测力计不论在什么位置，其示数都是 F ，在误差范围内满足 $F = \frac{r}{R} \cdot mg$ (图a)。这表明，轮半径是轴半径的几倍，作用在轮上的动力就是作用在轴上的阻力的几分之一。

(4)将质量为 m' 的钩码改挂在轮上的细绳上，通过测力计拉住轴上的细绳，使轮轴平衡，可看到测力计不论在什么位置，其示数都是 F' ，

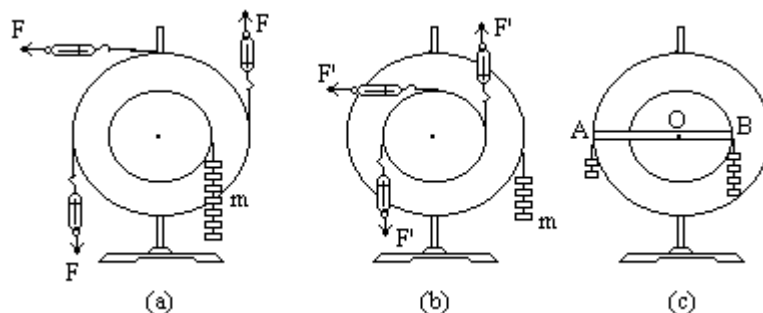
在误差范围内满足 $F' = \frac{R}{r} \cdot m'g$ 。

(5)在轴的细绳一端挂上质量为 m_1 的钩码，轮的细绳一端挂上质量为 m_2 的钩码，使 $m_1 r = m_2 R$ ，轮轴上的刻线 AOB 处于水平状态 (图c)，说明轮轴的平衡可当作杠杆平衡来处理。

注意

(1)为了减小轮轴摩擦力的影响，挂在轮轴上的钩码数量应适当多一些。

(2)轮轴平衡后，用手轻轻对它敲几下再读数，可减小静摩擦力的影响。



分析 现在解释“在误差范围内 $F = \frac{r}{R} \cdot mg'$ ”的含义。

轮轴达到图(a)的平衡后，可继续在钩码串下面逐渐增加小砝码，直至凭眼睛观察发现弹簧秤的读数发生了变化为止。如果加上去的小砝码的总质量为 m_0 ，则可认为钩码串所受的重力是 $mg \pm m_0g$ 。弹簧秤的误差 ΔF 可认为是它最小刻度的一半。

因此如果满足

$$\left| F - \frac{r}{R} \cdot mg \right| < \Delta F + \frac{r}{R} \cdot m_0g$$

可认为在误差范围内 $F = \frac{r}{R} \cdot mg$ (以上分析中没有考虑系统误差及测量

R 、 r 的偶然误差)。

器材 演示滑轮组 (J2121 型), 测力计, 铁架台, 细绳, 钩码等。

操作

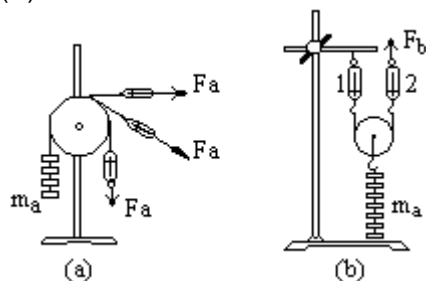
(1) 把一个定滑轮固定在铁架台上, 一根细绳跨过定滑轮, 一端挂一串质量为 m_a 的钩码, 另一端与测力计相连。

(2) 用测力计拉动绳子使钩码匀速升起, 可看到测力计从不同的方向拉, 示数 F_a 都相同, 而且在误差范围内 $F_a = m_a g$ (如图 a)。说明定滑轮不能省力, 只能改变力的方向。

(3) 将细绳的一端通过测力计 1 挂在铁架台上, 另一端跨过一个动滑轮后与测力计 2 相连, 动滑轮的轴上挂一串质量为 m_b 的钩码 (图 b)。

(4) 通过测力计 2 沿着竖直方向向上匀速拉动, 可看到两个测力计的示数 F_b 相同, 而且在误差范围内 $F_b = m_b g / 2$, 说明动滑轮可以省一半力 (但不能改变力的方向)。

(5) 用测力计测出滑轮组中动滑轮的重力 G 。再按图(c)安装好滑轮组。

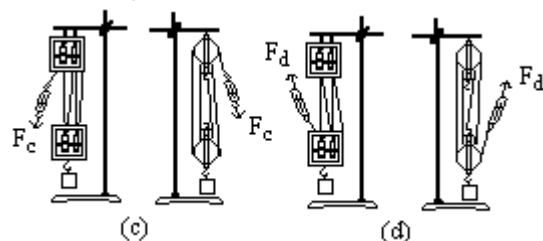


(6) 在滑轮组下面悬挂所受重力为 G' 的钩码。通过测力计匀速拉动细绳将钩码提起, 可以看到测力计的读数 F_c 在误差范围内等于 $(G+G') / 4$ 。

(7) 按图(d)安装好滑轮组, 滑轮组下面仍然悬挂重力为 G' 的钩码。通过测力计匀速拉动细绳将钩码提起, 可看到测力计的读数 F_d 在误差范围内等于 $(G+G') / 5$ 。

以上实验表明, 使用滑轮组时, 重物 and 动滑轮的总重力由几段绳子承担, 提起重物所用的力就是总重力的几分之一。

注意 在做动滑轮实验中如果不考虑动滑轮本身的重力, 那么所挂的钩码数量应适当多一些。



分析 可用与实验“轮轴的平衡”相类似的方法进行讨论。

本实验介绍了两种验证具有固定转动轴物体平衡条件的方法,还在方法一的分析部分介绍了验证性实验的误差处理方法。

方法一

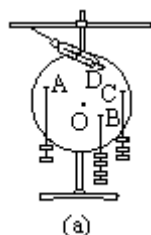
目的 验证有固定转轴物体平衡的条件。

器材 力矩盘,测力计,铁架台,横杆,细绳,钩码等。

操作

(1)将力矩盘的金属轴 O 水平地固定在铁架台上,使力矩盘面保持竖直。在盘的上方固定一根水平横杆。

(2)在盘面上覆一张白纸后再在适当的位置 A 、 B 、 C 、 D , 按上四个图钉,其中 A 、 B 、 C 三个位置上挂钩码,另一个 D 位置上拉测力计(图 a)。



(3)调整测力计在横杆上的悬挂点,使各串钩码拉力的作用线离 O 点都不要太近。系统初步平衡后,再轻轻地敲几下力矩盘,以减小摩擦力的作用。

(4)在白纸上记下转动轴 O 点的位置,并画出 F_A 、 F_B 、 F_C 和 F_D 四个力的作用线。根据转轴和四个力的作用线的位置,测出四个力的力臂 l_A 、 l_B 、 l_C 和 l_D 。

(5)根据各力的大小和力臂的长短,计算出各力的力矩 Fl 。将使转盘逆时针转动的力矩计为正,使转盘顺时针转动的力矩计为负,如果在实验误差范围内各力矩的代数和为零,即验证了有固定转轴物体平衡的条件。

注意

(1)实验前要检查力矩盘是否在任何位置都能平衡,如果达不到这个要求表明盘的重心偏离转轴,要加配重进行校正。

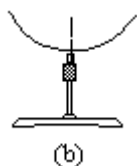
(2)由于测力计的测量精度比钩码的精度低,因此在实验中应尽量使测力计的读数大一些。以减小其相对误差。

(3)系统平衡时,各力的力臂都不能太小,否则将增大测量力臂的相对误差。

(4)实验时,应该用手扶持测力计,以减小因测力计自重下垂而带来的误差。

分析 下面解释“在实验误差范围内,各力矩的代数和为零”的含义。

系统平衡后可进一步考虑各个力的误差范围。在铁架台上固定一根小指针,白纸上指针的延长线处画一标志(图 b)。在 A 串钩码上逐渐增加小砝码,直到用眼睛能判断出力矩盘底部的指针与标志开始错开为止,增加上去的砝码所受的重力就是 F_A 。用同样的方法可确定 F_B 、 F_C 。取下测力计与横杆连接点,沿原方向逐步向外拉测力计,直到用眼睛发现指针与标志错开,读出测力计的读数 F'_D , $F_D = F'_D$? F_D 。



不考虑测量力臂的误差，则

$$\Delta M = |l_A \cdot \Delta F_A| + |l_B \cdot \Delta F_B| + |l_C \cdot \Delta F_C| + |l_D \cdot \Delta F_D|。$$

如果 $M? M < 0 < M + M$ ，

则可认为在实验误差范围内，各力矩的代数和为零。

方法二

目的 同方法一。

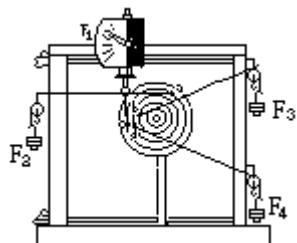
器材 高中静力学演示教具（J2143型）。

操作

(1)按仪器说明书组装好实验用的框架。在横架上安装一个测力计，两侧立柱上安装三个定滑轮。滑杆上安装轴承座，并在轴承上装上力矩盘，使盘能灵活地转动。

(2)在四根拉线的一端拴上开口销，分别插入力矩盘上四个孔 a、b、c、d 中。其中三根线分别跨过定滑轮悬挂槽码，另一根拴到测力计拉钩上。

(3)调节滑轮和测力计的位置，使测力计拉线为竖直方向，另外三根拉线都分别和某一个圆环相切（如图）。



(4)整个系统平衡时，记下测力计读数 F_1 ，三串槽码所受的重力 F_2, F_3, F_4 。盘上相邻两环间的距离为已知，可依次确定四个力的力臂分别为 l_1, l_2, l_3 和 l_4 。使力矩盘逆时针转动的力矩计为正，使力矩盘顺时针转动的力矩计为负，如果在实验误差范围内各力矩的代数和 $M = F_1 l_1 + F_2 l_2 + F_3 l_3 + F_4 l_4$ 为零，即验证了有固定转动轴物体平衡的条件。

方法三

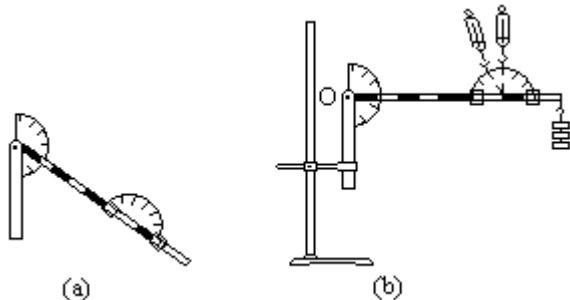
器材 自制力矩平衡仪，铁架台，测力计，细绳，钩码等。

力矩平衡仪的制作方法

用轻质木杆等制成（图 a），在杆上画红白相间等长的刻度。两个量角器用硬纸片自制，左边一个量角器的圆心固定在轴上，右边一个量角器可沿着横杆移动。

操作

(1)在力矩平衡仪上加钩码与测力计（图 b）。



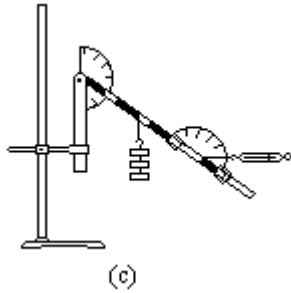
(2)固定木杆 OA 的位置，改变测力计的角度，根据钩码的重力和木杆的长度，可算出使木杆顺时针转动的力矩；又根据测力计的读数、OA 的长度及测力计作用力的方向与木杆的夹角，可算出使木杆逆时针旋转的力矩。看这两个力矩的大小是否

始终基本相等。

(3)同时改变木杆的方向和测力计的方向，根据钩码的重力、木杆的长度及木杆的方向，可算出使木杆顺时针旋转的力矩的大小；根据测力计的读数、OA 的长度及测力计作用力的方向和木杆的夹角，可算出使木杆逆时针转动的力矩的大小。看这两个力矩的大小是否始终基本相等。

(4)移动右边量角器在木杆上的位置（即改变 OA 的长度），重复以上实验。

(5)将钩码和测力计换成图(c)所示的位置，重复(1)、(2)、(3)、(4)的操作步骤。



注意

(1)实验过程中，测力计的作用力必须始终保持在竖直平面内。

(2)因实验中忽略木杆的重力，所以除了选择轻质木料制杆外，钩码的数量应适当地多一些，而且钩码的悬挂点不宜太靠近转轴。

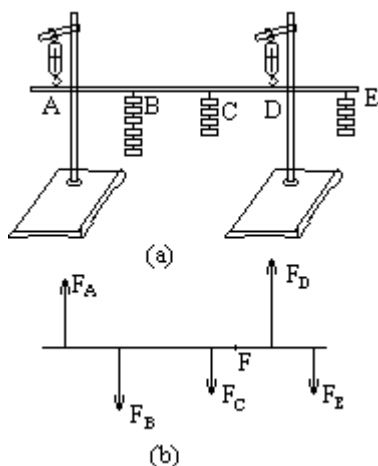
一般刚体平衡的必要条件是所受的合外力等于零，同时所有外力相对任何一个转轴的合力矩也等于零。在实验中，应注意观察刚体相对各个不同转轴所受合力矩的情况。

方法一

目的 验证一般刚体平衡的条件。

器材 测力计，铁架台，轻质木杆，刻度尺，细绳，钩码等。

操作



(1)按照图(a)安装好实验仪器。用刻度尺测出A、B、C、D、E各点之间的距离。

(2)根据钩码的个数和两个测力计的读数记下木杆所受5个力的大小，如图

(b)。

(3)计算 $F_{上}=F_A+F_D$ ， $F_{下}=F_B+F_C+F_E$ ，可看到 $F_{上}$ 和 $F_{下}$ 的大小基本相等。

(4)计算以A点为支点，木杆所受的合力矩 $M_A=F_B \cdot AB+F_C \cdot AC+F_E \cdot AE-F_D \cdot AD$ 。以同样的方法算出各力相对B、C、D、E各点的合力矩 M_B 、 M_C 、 M_D 、 M_E 。可看到以这些点为转轴，木杆所受的合力矩都基本为零。

(5)在杆上再任选一点[例如图(b)中的F]，用刻度尺测出A、B、C、D、E各点到F点的距离，计算各力相对F点的合力矩 M_F ，可看到 M_F 也基本为零。

以上步骤验证了一般刚体平衡的两个条件：所受诸外力的合力为零，取任意一点作为转轴，所受合力矩为零。

注意

(1)本实验忽略了木杆本身所受的重力，因此除了要选用尽量轻的木杆外，所挂的钩码还应适当多一些。

(2)如果因为木杆本身所受重力的影响使实验结果不够理想，则可测出木杆所受的重力和重心的位置，一并加以考虑。

方法二

目的 同方法一。

器材 测力计，铁架台，小黑板等。

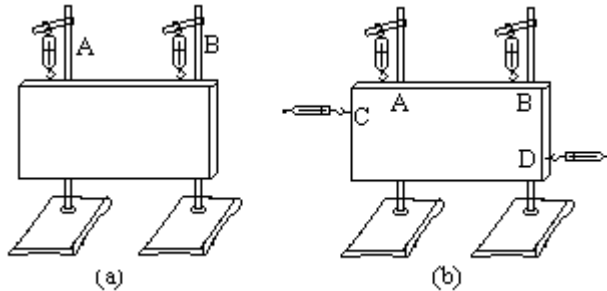
操作

(1)用悬挂法测出小黑板的重心(具体方法见实验1)，并用测力计测出小黑板所受的重力G。

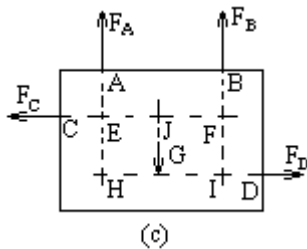
(2)用测力计A和B将小黑板挂在两个铁架台上(图a)，看两个测力计的读数

F_A 和 F_B 之和是否等于小黑板所受的重力。以垂直于小黑板的任意一条线为转轴，看所有作用力的合力矩是否为零。

(3) 在小黑板的左、右两侧 C、D 处再连接两个测力计。将测力计 C 水平向左拉，测力计 D 水平向右拉，并保持 A、B 两个测力计在竖直方向上 (图 b)。



(4) 此时小黑板共受到五个力的作用 (图 c)。看它竖直方向受的合外力 $F_y = F_A + F_B - G$ 是否为零；水平方向受的合外力 $F_x = F_C - F_D$ 是否为零。



(5) 在小黑板上过 A、B 两点作两条竖直方向的平行线，过 C、D 两点作两点水平方向的平行线，相交于 E、F、H、I。

(6) 以过 C 点垂直于黑板的直线为转轴，小黑板受到的合力矩 $M_C = F_A \cdot EC + F_B \cdot CF + F_D \cdot EH - G \cdot CJ$ 。以同样的方法求出以过 A、B、D、E 等点而垂直于黑板的直线为转轴的合力矩 M_A 、 M_B 、 M_D 、 M_E ，看它们是否为零。

(7) 当加上左右两个测力计后，可看到 A 测力计的读数比原来大了，而 B 测力计的读数比原来小了。这表明增加了一个逆时针方向的力矩 (由 F_C 和 F_D 形成) 后，其顺时针方向的力矩也必须增加 (由 F_A 增大、 F_B 减小形成)，只有这样才能保持物体的平衡状态。

方法三

目的 讨论桌子受到水平作用力时，桌腿所受弹力的变化。

原理 小桌静止在水平地面上时，A、B 两个桌腿受的弹力 $N_A = N_B = G/2$ (G 为小桌所受的重力)。如果在 B 桌腿上的 C 点作用一个水平外力 F_C (图 a)，两个桌腿将受到两个摩擦力 f_A 和 f_B 的作用，而且 N_A 和 N_B 的大小也会发生变化。以过 B 点且垂直于纸面的直线为转

轴，则有 $F_C \cdot BC + N_A \cdot AB = G \cdot \frac{AB}{2}$ ，可得 $N_A = \frac{G}{2} - \frac{F_C \cdot BC}{AB}$ ，又因

为 $N_A + N_B = G$ ，所以 $N_B = \frac{G}{2} + \frac{F_C \cdot BC}{AB}$ 。由此可见：当 C 点位置不变时， F_C 越大， N_A 越小， N_B 越大；当 F_C 的大小不变时，C 点位置越高 (即 BC 越大)， N_A 越小， N_B 越大。

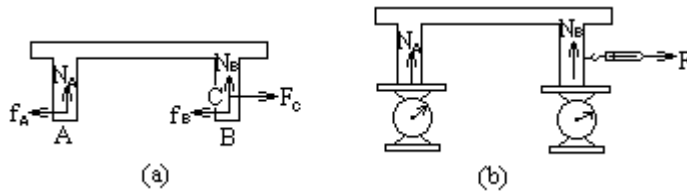
器材 托盘测力计，弹簧秤，小桌，细绳等。

操作

(1) 用测力计测出小桌所受的重力 G 。

(2) 将小桌放在 A、B 两个托盘测力计上，可看到两个测力计的读数基本相同 $N_A = N_B = G / 2$ 。

(3) 将细绳扎在小桌右腿上 C 点处，并与弹簧秤相连（图 b）。逐步增大水平向右拉弹簧秤的力 F，可看到 N_A 逐渐减小， N_B 逐渐增大。



(4) 弹簧秤的读数不变，逐步使 C 点向上移动，可看到 N_A 逐渐减小， N_B 逐渐增大。

方法一

目的 说明三种不同性质的平衡，它们的本质区别。

器材 钢球，弧形金属片（宽度稍大于钢球直径），平板玻璃(3mm)，弹簧，乒乓球，橡皮泥，铁架台等。

操作

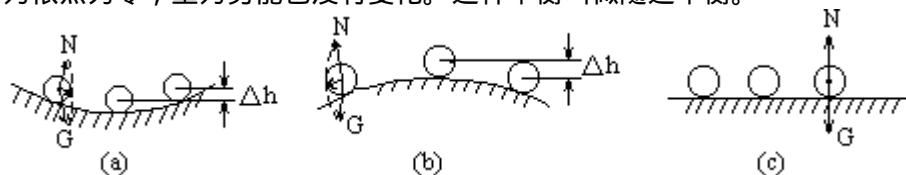
(1)用橡皮泥把弧形金属片的凹面向上固定在桌面上，前后两侧挡上玻璃，以防钢球向前后滚下。

(2)将钢球放在弧形片的最低点，小球很容易平衡。使小球偏离平衡位置，由于重力和支持力的合力是指向平衡位置的，所以小球会自动回到平衡位置(图 a)。不难看出小球偏离平衡位置之后，重心升高了 h ，势能增大，表明球在势能最小的状态时的平衡是稳定的。

(3)将弧形金属片的凸面向上固定在桌面上，前后两侧挡上玻璃。

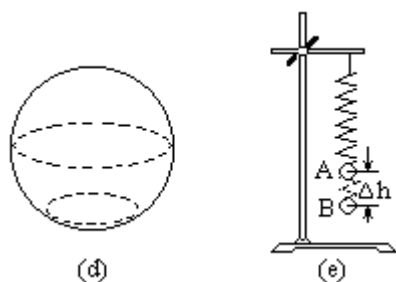
(4)将钢球放在弧形片的最高点，发现小球很难平衡。小球稍一偏离平衡位置，重力和支持力的合力就使它继续偏离，小球不能回到原来的平衡位置。不难看出，小球偏离了平衡位置之后，重心降低了 h ，势能减小(图 b)，表明球在势能较大的位置时的平衡是不稳定的。

(5)把平板玻璃平放在桌面上，用橡皮泥垫在它四个角下，将它调成水平。此时将小球放在玻璃上任何地方都能平衡(如图 c)。小球偏离平衡位置时它所受的合外力依然为零，重力势能也没有变化。这种平衡叫做随遇平衡。



(6)设法将乒乓球分成两半，把其中一半的底部粘上一小块橡皮泥，然后再把两半合上(图 d)。

(7)将这个特制的乒乓球放在平面上，可看到它处于稳定平衡状态。原因是它偏离原来位置时重心升高，势能增加。



(8)设法将小钢球连在竖直悬挂的弹簧下端。当小球平衡后，用手将小球向下拉(或向上托) h 。放手后，小球将回到原来的平衡位置，说明小球在平衡位置时处于稳定平衡(图 e)。

设小球所受重力为 G ，弹簧倔强系数为 K ，小球平衡位置为重力势能的零势能 E ，那么小球在平衡位置时的总势能

$$E_A = \frac{1}{2} K(G/K)^2 = G^2 / 2K。$$

小球从平衡位置下降(或上升)了 h 后的总势能

$$E_B = \frac{1}{2} K \left(\frac{G}{K} \pm h \right)^2 \mu G h$$

$$= \frac{G^2}{2K} + \frac{K h^2}{2}。$$

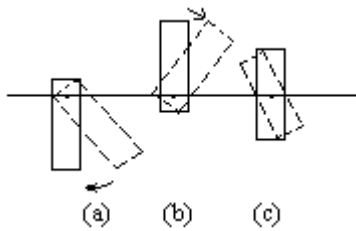
显然 $E_B > E_A$ ，所以不论小球从平衡位置下降了 h 还是上升了 h ，其总势能总是增加的，因此这时是稳定平衡。

方法二

目的 同方法一。

器材 矩形木板，铁架台，铁钉，橡皮泥等。

操作

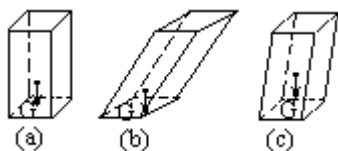


(1) 在矩形板的一端 A 点和对角线的交点 C 点各钻一个孔，孔径略大于铁钉直径。

(2) 将铁钉水平固定在铁架台上，然后把矩形木板的 A 孔和 C 孔按图(a)、(b)、(c)三种方式挂在铁钉上，可分别演示稳定平衡、不稳平衡和随遇平衡。

(3) 在图(c)中的木板上端粘一块橡皮泥，随遇平衡就变成了不稳平衡；在下端粘一块橡皮泥，随遇平衡就变成了稳定平衡。

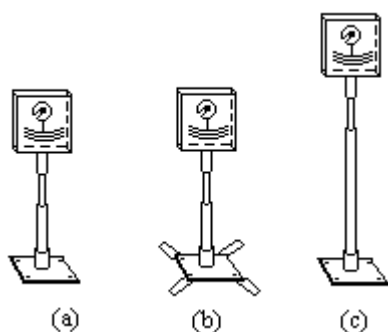
稳度通常指重心在支承面内时稳定的程度，如果重心不在支承面内，物体处于不稳定的状态，不能用稳度来描述，只能用不稳定性描述。例如可变形的六面体，图(b)的重心比图(a)低，但图(b)型属于不稳状态，因为重心已超出了支承面。不能泛指重心低就一定稳定，或者说稳度大。而图(c)的稳度相对图(a)来说要大，因为重心在支承面内时较低的缘故。



方法一

器材 高中静力学演示教具（J2143型）。

操作



(1)将短支杆有钩的一端朝下，牢固地插入稳度座中央的孔中。在透明塑料盒体中加入两上50g的槽码，用指针轴上的螺母夹紧。把有横槽的接头与盒体底面的槽配合卡紧，再把接头下面的香蕉插头牢固地插入与杆顶端孔中（图a）。

(2)使盒体侧偏一个角度，当它的重力作用线（可从指针上看出）超出稳度座的支面时，盒体将倾翻。

(3)将稳度座的加长板拉出，增大了支承面（图b）。使盒体侧偏和操作(2)相同的角度，盒体不会倾翻。表明支承面增大，稳度增大。

(4)收回稳度座的加长板，换用长支杆支持盒体，使重心升高（图c）。当使盒体侧偏比操作(2)小得多的角度时，盒体就会倾翻。表明支承面减小，重心升高，稳度减小。

方法二

器材 精装本书。

操作

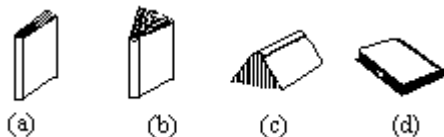
(1)将书如图(a)站立，稍晃即倒。

(2)将书如图(b)站立，支承面增大，稳度增大。

(3)将书如图(c)站立，重心变低，稳度更大。

(4)将书如图(d)平放，支承面更大，重心更低，稳度最大。

以上实验表明支承面越大，重心越低，稳度越大。



只要使物体组的重心移到支承面之下，就能形成稳定平衡，且能使物体立起。

方法一

器材 铅笔，带小刀的钥匙一串。

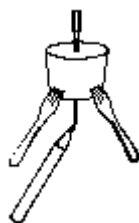
操作 将小刀打开成 90° ，刀尖扎在铅笔的木料中，要扎牢。铅笔就能稳定地立在手指上（如图）。如果手指稍加晃动，铅笔也会在手指上晃动起来，始终不会倒下来。这是因为此时，铅笔、小刀和钥匙串的总重心在手指与铅笔尖接触点的下方。



方法二

器材 保温瓶软木塞，餐叉，大号缝衣针，铅笔等。

操作 将缝衣针从软木塞中心穿过，且把两把餐叉插牢在软木塞上。铅笔头弄平一些之后，将针尖对准铅笔头，木塞带着两把叉子便能稳定地站立在铅笔头上（如图）。用手轻轻地碰一下叉子，木塞带着叉子晃几下，不会翻落。此时木塞和餐叉的总重心在铅笔尖的下方。

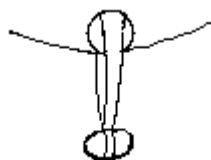


方法三

器材 钢球，布带，重物等。

操作 将布带做成一个环，让钢丝从其中穿过。布带环下面挂一个重物，上部将钢球压在钢丝上（如图），钢球就能站立在钢丝上了。

注意 布带环要用粗糙一些的布料做成，重物要适当地重一些。



研究匀速直线运动 50

匀速直线运动是一种特殊的直线运动，在实验室中要得到较好匀速直线运动是不容易的。方法一、二中当物体达到收尾速度时，作的是较好的匀速直线运动。方法三是采用适当的补偿方式，以期获得较好的匀速直线运动。

本实验的三种方法都应用图线法来研究物体运动性质。其优点：一是能全面地研究整个运动的过程，在较大的范围内考察物体是否作匀速运动；二是有利于发现和剔除个别粗差。

方法一

原理 小钢球在液体中下落时，在竖直方向上受到三个力：小球的重力 G ，液体对球的浮力 F 和液体的粘滞阻力 f 。根据斯托克斯公式 $f=6\pi\eta vr$ ，其中 η 叫液体的粘滞系数， v 是小球运动速度， r 是小球半径。当小球刚开始运动时，速度尚小，粘滞阻力也不大，因此小球作加速运动。当速度增大到一定值时，上述三个力达到平衡，小球开始作匀速运动。

器材 玻璃圆筒（高 30—40cm、直径 6—8cm），秒表（或节拍器），橡皮筋 8 根，小钢珠（直径 1mm）20 粒，蓖麻油（或洗涤精）等。

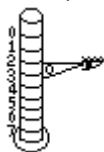
操作

(1) 将玻璃筒装满蓖麻油（或洗涤精）。筒身上每隔 5.00cm 扣一圈橡皮筋，作为标志线。橡皮筋圈在的平面要尽量与筒身轴线垂直。为了保证做到这一点，可将一把三角尺的一条直角边紧靠在筒身上，视线沿着三角尺的另一条直角边观察，调节筒前的橡皮筋挡住筒后的橡皮筋即可（如图）。

(2) 在圆筒口上蒙上一张纸，在纸中心处戳一个洞，能让小钢珠落下即可。这样可保证小钢珠每次都基本上沿圆筒轴线下落。

(3) 用镊子将一粒小钢珠从洞中放下，仔细观察当小钢珠到达标志点 0 时，是否已基本达到收尾速度。如果尚未达到收尾速度，则要将标志点 0 向下移。

(4) 用镊子从洞中放下一粒小钢珠，当它经过标志 0 点时开秒表，到达 1 标志点时停秒表；再放下一粒相同的小钢珠，经过 0 标志点 0 时开秒表，到达 2 标志点时停秒表；……如此重复七次，分别记下小钢珠从标志点 0 到各标志点的时间。



(5) 以标志点 0 到各标志点的距离 s 为纵轴，以小钢珠从标志点 0 到各标志点的时间 t 为横轴，在坐标纸上作 $s-t$ 图。如果图线是一条直线，而且在误差范围内通过原点，可以认为小钢珠的位移和时间成正比，即小钢珠作为匀速直线运动。图线的斜率就是小钢珠匀速运动的速度。也可以用线性回归法证实位移与时间成正比，具体方法见实验 61 按语。

注意

(1) 圆筒要竖直放置，尽量使小钢珠一直沿着圆筒的轴线下落。

(2) 因为液体的粘滞系数与温度有关，因此在整个实验过程中应尽量保持温度不变。

(3)为了减小计时的误差，每个标志点要重复一次，取两次计时的平均值作为时间 t 。

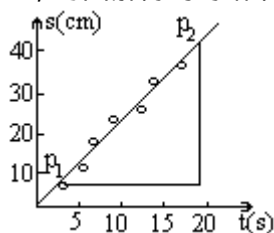
(4)如果计时条件允许，可以在小球一次下落的过程中，即记下小球从标志点 0 到各个标志点的时间。

实例 用直径为 1.977mm 的小钢珠做实验，得到的实验数据如下：

s(cm)	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0
t_1 (s)	2.9	6.0	8.0	11.1	14.8	16.6	20.3
t_2 (s)	3.0	6.2	7.8	10.9	14.4	16.2	20.7
t(s)	3.0	6.1	7.9	11.0	14.6	16.4	20.5

以 s 为纵轴， t 为横轴，作 $s-t$ 图（如图），得到一条过原点的直线。说明小钢珠的位移与时间成正比，也就是说小钢珠作匀速直线运动。在直线上取两点 $P_1(2.9, 5.0)$ ， $P_2(22.5, 39.5)$ ，求出斜率 $k=(39.5-5.0)/(22.5-2.9)=1.76$ ，可得小钢珠作匀速直线运动的速度为 1.76cm/s。

用线性回归法处理实验数据：相关系数 $r = 0.996$ ，大于线性关系显著的标准 0.874，说明 s 与 t 成线性关系；截距 $b=0.22$ ，小于截距的误差 $b=0.89$ ，说明回归直线在误差范围内过原点，即 s 与 t 成正比，同样可以得到小钢珠作匀速直线运动的结论。回归直线的斜率 $k=1.74$ ，与图解得到的结果基本相同。



说明

(1)此实验也可以不用橡皮筋而直接利用量筒上的刻度线作为标志线。为了保证视线与量筒轴线垂直，可以在量筒后面靠近量筒处竖立一面镜子。当眼睛看到刻度线与它在镜子中的像重合时，便说明视线已经与量筒轴线垂直（注意，镜面要与量筒轴线平行）。

(2)此实验也可用节拍器代替秒表来做：撤去玻璃筒上除标志点 0 之外的所有橡皮筋，准备一支能在玻璃上作标志的铅笔，将节拍器的周期调节为 1.0s。将小钢珠沿圆筒轴线放下，待它越过原来的标志点 0 后，每隔 3.0s 用铅笔记下小钢珠的位置，然后用米尺测量出从第一条线到其他各条线的距离，也可以得到系列 $s-t$ 的数据。所不同的只是前者是距离作为自变量，后者是时间作为自变量。

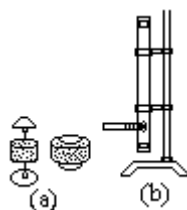
方法二

器材 玻璃笔（长 40cm，直径 2cm），橡皮塞（配玻璃管），磁铁，橡皮筋 8 根，小木块，图钉等。

操作

(1)取一块直径约 1cm 的圆柱形小木块，两边钉上两个图钉，用油漆漆成醒目的颜色（图 a）。

(2)将玻璃管装满清水，两头用橡皮塞塞紧（里面不要留有气泡），竖直固定在铁架台上。利用磁铁吸引小木块上图钉的作用力将小木块固定在玻璃管下端(图 b)。



(3)移开磁铁，小木块开始向上运动，很快接近收尾速度，得到一个较好的匀速直线运动。

(4)调节小木块上图钉的个数，可改变小木块的收尾速度。

(5)标志点的设置，实验的做法及数据处理方法与方法一完全相同。

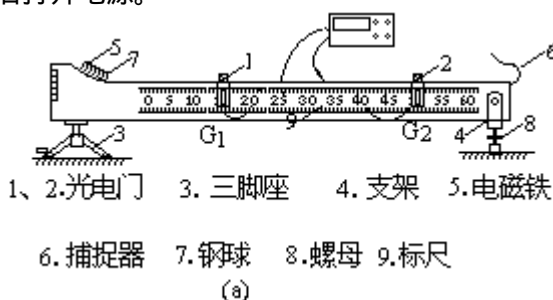
方法三

器材 斜槽轨道（J 2127 型），筒式计时器（J 2020 型）。

操作

(1)按仪器说明书安装好斜槽轨道和计时器（左边是光电门 G_1 ，右边是光电门 G_2 ，如图 a）。

(2)将计时器的“光控—同步”开关置在“光控”处，“计数—计时”开关置在“计时”位置，互换开关置“1”（如“1/10-1/100”开关，则置于“1/100”处），然后打开电源。



(3)将光电门 G_1 和 G_2 置于直轨道左部且相距 10cm。计时器上吸放开关置于“吸”位置，将钢球吸在斜槽轨道的电磁铁下。用置零按钮清零后将吸放开并拨向“放”位置，计下钢球通过 G_1 、 G_2 之间距离所用的时间 t_1 。再 G_1 和 G_2 移到直轨道右部，相距仍为 10cm，用同样的方法测出钢球通过 G_1 、 G_2 之间距离所用的时间 t_2 。反复调节三脚座和支架的高度，使 $t_1=t_2$ ，即可以为轨道已“调平”。

(4)把光电门 G_1 对准标尺上 10.0cm 刻线，光电门 G_2 对准 30.0cm 刻线。

(5)将计时器的吸放开关置于“吸”位置，让斜槽轨道上的电磁铁吸住小钢球。使计时器显示数复零后，将吸放开关拨向“放”位置，小球即滚下，依次通过 G_1 、 G_2 两个光电门，计时器下小球通过两个光电门之间距离 s 的时间 t 。

(6)光电门 G_1 位置不变，将光电门 G_2 向右移动 5.0cm，对准标尺上 35.0cm 的刻度线，然后重复操作(5)，再计下一个时间 t 。每计下一个时间后，都把 G_2 向右移 5.0cm，直到 G_2 退到标尺上 60cm 处为止。

(7)以 G_1 和 G_2 之间的距离 s 为纵轴，以钢球通过这段距离的时间 t 为横轴，在坐标纸上作出 $s-t$ 图。如果图线是一条直线，而且在误差范围内通过原点，可以认

为钢球的位移和时间成正比，即钢球作匀速直线运动。直线的斜率就是钢球匀速运动的速度。也可以用线性回归法证实 s 与 t 成正比，具体方法见基础篇第 57 页有关内容。

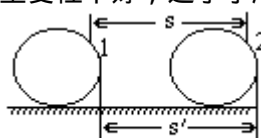
注意

(1) 轨道“调平”的工作不能用水平仪来调，因为轨道对钢球存在摩擦力，只有将轨道的右端；调得比左端略低，使钢球受的下滑力与摩擦力大致平衡，才能实现较好的匀速运动。

(2) 为了减小计时误差，对实验中每一个时间应重复测量几次取其平均值。根据统计规律，重复的次数可在 5—10 次中间选择。

(3) 为了减小时间测量的相对误差，被测时应适当长一些，因此最短的一段距离不要选得过短。

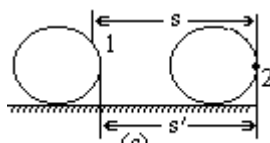
(4) 钢球从斜槽上滑下的高度要选得适当：过大了钢球在下滑过程中滑动的成分容易增加，造成实验的重复性不好；过小了摩擦力的影响将变得明显起来。



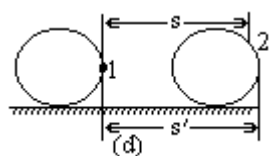
(b)

(5) G_1 不能离斜槽太近，以免钢球在通过 G_1 时还带有较明显的滑动。

(6) G_1 和 G_2 两个光电门上透光孔 1 和 2 的高度一定要相同，此时钢球两次挡光所经过的路程 s' 和两个光电门指示刻度线之间的距离 s 相等（图 b）。如果两个光电门透光孔高度不一样，则 s' 可能比 s 小如图(c)，也可能比 s 大如图(d)，这都要引起计时的误差。



(c)



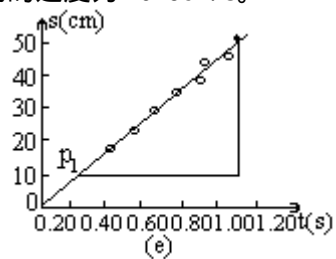
(d)

实例 一次实验得到的数据如下：

$s(\text{cm})$	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
$t_1(\text{s})$	0.51	0.63	0.71	0.88	0.99	1.07	1.22
$t_2(\text{s})$	0.50	0.60	0.74	0.82	0.96	1.05	1.26
$t_3(\text{s})$	0.48	0.62	0.76	0.83	1.02	1.11	1.20
$t_4(\text{s})$	0.49	0.61	0.73	0.84	1.01	1.08	1.26
$t_5(\text{s})$	0.48	0.58	0.74	0.85	1.00	1.06	1.24
$\bar{t}(\text{s})$	0.49	0.61	0.74	0.84	1.00	1.07	1.24

以 s 为纵轴， \bar{t} 为横轴，作 $s-\bar{t}$ 图（图 e）得到一条过原点的直线。

说明钢球的位移与时间成正比，即钢球作匀速直线运动。在直线上取两点 $P_1(0.24, 10.0)$ ， $P_2(1.30, 53.0)$ ，求出斜率 $k=(53.0-10.0)/(1.30-0.24)=40.6$ ，可得钢球作匀速直线运动的速度为 40.6cm/s 。



用线性回归法处理实验数据：相关系数 $r = 0.997$ ，大于线性关系显著的标准 0.874 ，说明 s 与 t 成线性关系；截距 $b=0.23$ ，大于截距的误差 $b=1.25$ ，说明回归直线在误差范围内过原点，即 s 与 t 成正比，可以得到钢球作匀速直线运动的结论。回归直线的斜率 $k=40.6$ ，与图解得到的结果相同。

互成角度的两个匀速直线运动的合成 51

本实验说明两个匀速直线运动可以用平行四边形法则合成。方法一简便易行，但两个分运动速度要互受牵连；方法二两个分运动互相独立，更具有一般性。

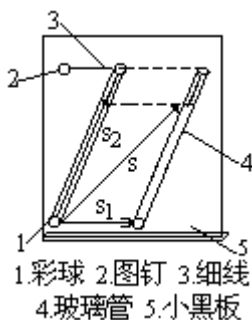
方法一

器材 长 0.8m 左右内径 1—2cm 的玻璃管（可用经稀盐酸清洗荧光粉后的日光灯管），直径稍小于玻璃管内径的彩色塑料球，1.5m 长的细线，小黑板，图钉等。

操作

(1) 装置如图，玻璃管不移动，匀速向上拉线，在黑板上描出小球沿管向斜上匀速直线运动的轨迹 s_2 。

(2) 将线端绕在管上，匀速右移玻璃管，在黑板上描出小球向右匀速直线运动的轨迹 s_1 。



(3) 将线端用图钉固定，向右匀速移动玻璃管，可见小球的运动是水平方向的匀速直线运动和沿管斜向上的匀速直线运动的合运动，在黑板上逐点描出小球的轨迹。

(4) 以 s_1 和 s_2 为邻边作出平行四边形，其对角线正好与球的合运动轨迹 s 重合，即可验证两匀速直线运动合成的法则。

(5) 改变管与水平线的夹角，就改变了球分运动的方向，可重复验证。

方法二

器材 直径为 1.5cm、长 35cm 的玻璃管，橡皮塞，带图钉的小木块，小磁铁（磁性黑板上使用的即可）。

操作

(1) 如图(a)所示，取一块直径约 1cm 的小木块（或软木塞），在其两侧按上图钉，用油漆涂成约色。

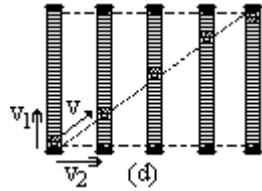
(2) 将长玻璃管的一端用橡皮塞塞住，从另一端注入清水，把带图钉的木块投入水中，然后再用橡皮塞密封（管内不要有气泡）。此时用小磁铁在玻璃管壁外将小木块吸住，使其置于管底位置（图 b）。若将磁铁用手指取下，带图钉的小木块便在水中上浮，由于水对木块的阻力作用。木块的上升运动几乎是匀速运动（图 c）。

(3) 演示运动的合成 [如图(d)所示]。

先使玻璃管不动，让小木块向上作匀速运动，表示第一分运动 v_1 ；再使小木

块被磁铁吸住不动，将玻璃管在水平方向上匀速移动，表示第二分运动 v_2 ；第三次在除去磁铁的同时将玻璃管在水平方向上匀速移动，可以发现小木块沿着由以 v_1 和 v_2 为邻边的平行四边形对角线方向运动，即可说明运动的合成遵循平行四边形法则。

(4)将管子倾斜演示两个分运动和小木块的合运动（图 e），可以说明小船渡河的各种情况。



注意

(1)本实验属于定性的演示实验，手做水平匀速运动比较难于掌握，实验前需作几次练习。

(2)木块到达管子顶部，只须用磁铁在顶部吸住木块，将管子倒个身之后即可进行第二次实验。

(3)增减小木块上图钉的个数，能改变它上浮的速度。

变速直线运动的平均速度和即时速度 52

物体作变速运动时， t 时间内的平均速度是 s/t 。当 t 趋向零时，平均速度就趋向某一时刻的即时速度。本实验的第一、二、三、四种方法都通过图象外推法，得到即时速度（方法一从大的方向推，方法二从小的方向推，方法三是两个方向同时推）。第四、五两种方法介绍另一种测量即时速度的途径：使作变速运动的物体，从某一点开始作匀速运动，它作匀速运动的速度，就是该点的即时速度。

方法一

原理 作匀变速运动的物体，其位移 $\Delta s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ ，两边都除以时间 t ，可得 $\bar{v} = v_0 + \frac{1}{2} a t$ 。取不同的时间间隔 t ，可测得一系列不同的 \bar{v} 。作 $\bar{v} - t$ 图，并作线性处理推到 $t = 0$ 处，即可得到当 Δt 趋向零时 \bar{v} 的极限值，就是该时刻的即时速度 v_0 。

器材 气垫导轨，数字毫秒计，气源等。

操作

(1) 在气垫导轨的单脚下垫上一块垫块，在导轨上放 A、B 两个光电门，在导轨高端固定好定位杆，并在滑块上装上挡光条（图 a）。毫秒计的功能选择开关用 s_2 档，时间选择开关放在 1ms 档或 10ms 档上。

(2) 让滑块紧靠定位杆后由静止释放，毫秒计记下滑块从 A 光电门到 B 光电门的时间 t ，从导轨的标尺上读出 A、B 光电门之间的距离 s ，得到一相（ t, s ）的值。

(3) A 光电门位置不动，将 B 光电门离 A 光电门的距离缩小一些，重复操作（2），得到另一组（ t, s ）值。共重复 5—7 次。

(4) 计算出每次的平均速度 $\bar{v} = s/t$ ，然后以时间 t 为横坐标，平均速度 \bar{v} 为纵坐标，作出 $\bar{v} - t$ 图。将图线外推到 $t = 0$ 处，即可得到滑块经过 A 光电门时的即时速度 v_A 。

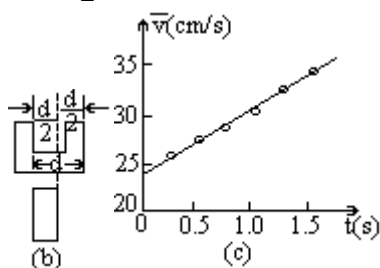
(5) 取下滑块上的挡光条，换上最窄的一种挡光框（例如 $d = 1.00\text{cm}$ ），毫秒计的时间选择开关放在最小档（例如 0.1ms 档），将光电门 B 拿下放在桌上。然后让滑块紧靠定位杆后由静止释放，滑块经过 A 光电门时用毫秒计记下时间 t ，则滑块通过 A 光电门时的即时速度 $v_A = d/t$ 。检验两种方法得到的 v_A 是否基本相同。

注意

(1) 从滑块上取下挡光条，换上挡光框时位置不能变。如果挡光框比挡光条宽，则应该将挡光框两个前沿的中间稍前一点对准挡光条的前沿（图 b）。

(2) 为了提高实验的准确性，每个距离可重复几次，重复的次数视数据一致性的好坏而定。

(3) 数据处理时只能将 $\bar{v} - t$ 图线作线性外推，而不能将 $\bar{v} - s$ 图线作线性外推。理由是：因为 $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ ，两边除以 t ，得到 $\bar{v} = v_0 + \frac{1}{2} a t$ ， \bar{v} 与 t 成线性关系。 $\bar{v} - v_0 = \frac{1}{2} a t$ ，两边乘以 \bar{v} ，得到 $\bar{v}^2 - v_0^2 = \frac{1}{2} a s$ 。由此可见， \bar{v} 与 s 不成线性关系。



实例 某次实验数据如下：

$s(\text{cm})$	60.0	50.0	40.0	30.0	20.0	10.0
$t_1(\text{s})$	1.68	1.44	1.21	0.98	0.70	0.38
$t_2(\text{s})$	1.65	1.47	1.24	0.97	0.72	0.36
$t_3(\text{s})$	1.66	1.48	1.23	0.97	0.72	0.37
$t_4(\text{s})$	1.69	1.45	1.22	0.98	0.71	0.38
$t_5(\text{s})$	1.67	1.44	1.24	0.96	0.70	0.37
$\bar{t}(\text{s})$	1.67	1.46	1.23	0.97	0.71	0.37
$\bar{v}(\text{cm/s})$	35.9	34.2	32.5	30.9	28.2	27.0

从上表最后一行可看出，滑块在不同的距离中的平均速度 \bar{v} 是不一样的。以 \bar{v} 为纵轴， \bar{t} 为横轴，作 $\bar{v} - t$ 图（图c），所得直线的截距是 24.0cm/s，说明滑块经过光电门 A 时的即时速度是 24.0cm/s。用线性回归法处理实验数据，常数项是 23.9cm/s。

将滑块上的挡光条换成两前沿相距 1.00cm 的挡光框，重新做实验，毫秒计显示的时间是 42.0ms，可算出滑块经过 A 光电门时的即速度是 $v = d / t = \frac{1.00}{0.0420} \text{cm/s} = 23.8 \text{cm/s}$ 。这与 $\bar{v} - t$ 图线作线性外推得到的结果基本相同。

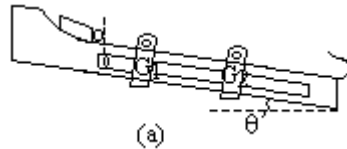
方法二

原理 同方法一。

器材 斜槽轨道，筒式计时器。

操作

(1) 先使轨道倾斜一个不大的角度 ($2^\circ - 3^\circ$)，再调节电磁铁的位置，使钢球的前沿对准标尺上的 0 刻度。将光电门 G_2 放在标尺 55.0cm 处 G_1 放在标尺 25.0cm 处。计时器放在光控计时状态（图 a）。



(2) 将吸放开关放在“吸”位置,让电磁铁吸住小球,然后将吸放开关扳到“放”位置,钢球便依次通过 G_1 、 G_2 两个光电门,计时器记下钢球通过两个门中间的时间 t ,从标尺上读出两个门之间的距离 s ,得到一组 (t, s) 值。

(3) G_2 位置不动,将 G_1 与 G_2 之间的距离 s 缩短 5cm,再重复操作(2),得到另一组 (t, s) 值。如此重复 5—7 次。

(4) 计算每次的平均速度 $\bar{v} = s / t$,然后以横轴表 t (以钢球经过 G_2 的时刻作为零),以纵轴代表 \bar{v} ,作出 $\bar{v} - t$ 图,将图线外推到 $t = 0$ 处,即可得到钢球经过 G_2 时的即时速度 v 。

(5) 取下光电门 G_1 ,将计时器的光控同步开关扳至“同步”位置。然后用吸放开关释放钢球,计时器记下钢球从 0.00cm 处到 G_2 所在 55.0cm 处的时间 t 。因为 $s = \frac{1}{2}at^2$,所以 $a = 2s / t^2$,又因为 $v = at$,因此 $v = (2s / t^2) \times t = 2s / t$,即可算出 v 的值。检验两种方法得到的 v 值是否基本相同。

注意

(1) 为了减小计时的误差,实验中每一个时间应重复测量几次,取它们的平均值。根据统计规律,重复的次数可在 5—10 次中间选择。

(2) 在操作(1)、(2)、(3)中, G_1 、 G_2 两个光电门上透光孔的高度要相同,在操作(5)中 G_2 的透光孔要与钢球的球心等高[详见实验 50 方法三注意(6)]。

(3) 只能用 $\bar{v} - t$ 图线作线性外推,不能用 $\bar{v} - s$ 图线性外推[详见方法—注意(3)]。

实例 某次实验数据如下:

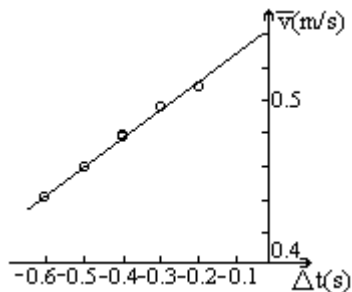
$s(\text{cm})$	-30.0	-25.0	-20.0	-15.0	-10.0
$t_1(\text{s})$	-0.68	-0.54	-0.40	-0.30	-0.19
$t_2(\text{s})$	-0.66	-0.53	-0.41	-0.31	-0.19
$t_3(\text{s})$	-0.67	-0.54	-0.42	-0.29	-0.20
$t_4(\text{s})$	-0.66	-0.53	-0.42	-0.30	-0.20
$t_5(\text{s})$	-0.67	-0.54	-0.41	-0.30	-0.20
$t(\text{s})$	-0.668	0.536	-0.412	-0.300	-0.196
$\bar{v}(\text{cm/s})$	44.9	46.6	48.5	50.0	51.0

从表中最后一行可以看出,钢球在不同距离中的平均速度是不一样的

的。以 \bar{v} 为纵轴， t 为横轴（以钢球通过 G_2 的时刻为零），作 $\bar{v}-t$ 图（图b），所得直线的截距是 53.9cm/s 。说明钢球经过 G_2 时的即时速度是 53.9cm/s 。钢球从0刻度处滚到 G_2 经过的时间是 2.06s ，可算出

钢球经过 G_2 时的即时速度是 $v = 2s/t = \frac{2 \times 55.0}{2.06} (\text{cm/s}) = 53.4\text{cm/s}$ ，

这与 $\bar{v}-t$ 图线作线性外推得到的结果基本相同。



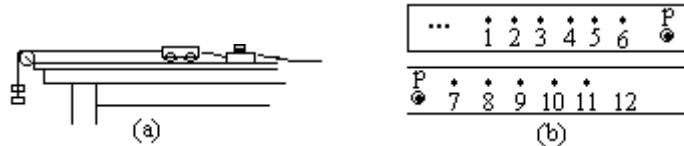
方法三

原理 同方法一。

器材 打点计时器，学生电源，斜面，小车，刻度尺，纸带，钩码等。

操作

(1)如图(a)装好实验装置。打点计时器接通电源后释放小车，小车在钩码牵引下拖着纸带做匀速运动，打点计时器就在纸带上打下一列点子(图b)。由于纸带较长，所以分两段画，上面一段的最后一点p，就是下面一段的第一点。



(2)用刻度尺测出1到6各点到p点的距离 s_1-s_6 ，以及p点到7到12各点的距离 s_1-s_{12} 。

(3)算出 $\bar{v}_1 = s_1 / (6T)$ ， $\bar{v}_2 = s_2 / (5T)$ ，…… $\bar{v}_6 = s_6 / T$ ，以及 $\bar{v}_7 = s_1 / T$ ， $\bar{v}_8 = s_8 / (2T)$ ，…… $\bar{v}_{12} = s_{12} / (6T)$ （打点计时器的 T 为 0.020秒 ）。

(4)以横轴代表时间 t （以P点经过打点计时器的时刻作为零），以纵轴代表平均速度 \bar{v} ，作出 $\bar{v}-t$ 图，直线在纵轴上的截距（即 t 趋向零时 \bar{v} 的极限值），就是p点经过打点计时器时小车的时速度。

	1	2	3	4	5	6
t(s)	-0.120	-0.100	-0.080	-0.060	-0.040	-0.020
s(cm)	-7.82	-6.73	-5.62	-4.34	-3.02	-1.55
\bar{v} (cm/s)	65	67	70	72	76	78
	7	8	9	10	11	12
t(s)	0.020	0.040	0.060	0.080	0.100	0.120
s(cm)	1.66	3.42	5.22	7.21	9.23	11.41
\bar{v} (cm/s)	83	86	87	90	92	95

实例 某次实验数据如上页表中所列。

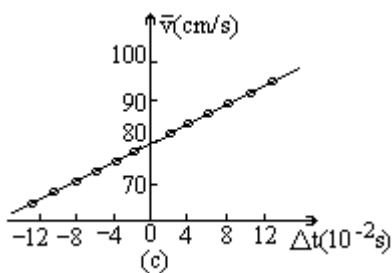
从上表可以看出，小车在不同的距离中平均速度 \bar{v} 是不一样的。

以 \bar{v} 为纵轴，以 t 为横轴，作 $\bar{v}-t$ 图（图c），所得直线的截

距是80cm/s。说明当纸带p点所在位置经过打点计时器小车的即

时速度是80cm/s。用线性回归法处理实验数据，常数项是

80.1cm/s。



方法四

原理 同方法一。

器材 长木板（长 180cm、宽 15cm）2 块，节拍器，钢球，木块等。

操作

(1)将木板一端架在木块上，木块高度约是木板长度的3%左右（图 a）。把节拍器的频率调节成 2.0Hz。

(2)在木板上端附近画一条线，使小球静止在画线处。听到节拍器某一次响声，立即释放小球，接着每听到节拍器响一声，就在木板边沿记下小球该时刻的位置（图 b）。



(3) 测出1到6各点到第7点的距离 s_1, s_2, \dots, s_6 ，根据节拍的频率，算出小球在这些距离中的平均速度 $\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_6$ 。

(4) 以时间 t 作为横坐标（取小球滚到第7点的时刻为零），以平均速度 \bar{v} 为纵坐标，作 $\bar{v}-t$ 图。将图线外推到 $t=0$ 处，即可得到 \bar{v} 在 t 趋向零时的极限值，也就是小球在第7点处的即时速度 v_7 。

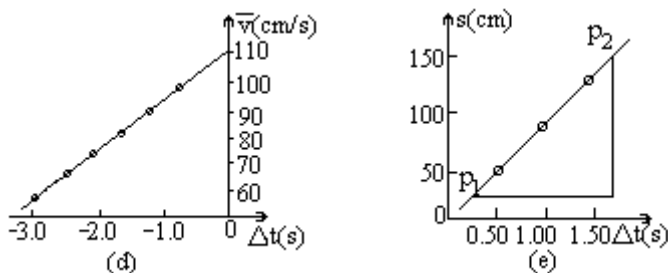
(5)将第二块木板接在第一块木板的第7点处。第二块木板的接头处要削成斜口，使小球能平滑地滚到第2块水平放置的木板上（图c）。

(6)再重复前述实验，当小球滚到第二块木板上后继续根据节拍器的声音，记下小球位置8、9、10。测出8、9、10三点到第7点的距离 s_8 、 s_9 、 s_{10} 。



(7)以时间 t 为横坐标（取小球滚到第7点的时刻为零），以小球相对第7点的位移 s 为纵坐标，作 $s-t$ 图。图线的斜率就是小球在第二块板上作匀速运动的速度，也就是小球在第一块板上滚到第7点时间的即时速度 v_7 。比较两次求出的 v_7 是否相同。

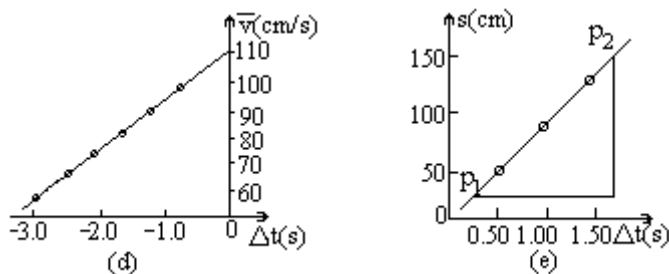
从表中可以看出，小球在不同距离中的平均速度是不一样的。以 \bar{v} 为纵轴， t 为横轴（以小球通过第7点的时刻为零），作 $\bar{v}-t$ 图（图d），所得直线的截距是 $1.1 \times 10^2 \text{ cm/s}$ 。说明小球通过第7点时的速度是 $1.1 \times 10^2 \text{ cm/s}$ 。用线性回归法处理实验数据，常数项是 $1.11 \times 10^2 \text{ cm/s}$ 。



实验操作(5)、(6)得到数据如下：

$s(\text{cm})$	55	109	163
$t(\text{s})$	0.50	1.00	1.50

以 s 为纵轴， t 为横轴，作 $s-t$ 图（图e）。在图线上取两点 $p_1(0.22, 25)$ ， $p_2(1.74, 189)$ ，可得到直线的斜率



$$k = \frac{(189 - 25)}{1.74 - 0.22} \text{ cm/s} = 108 \text{ cm/s},$$

这与 $\bar{v}-t$ 图线外推得到的结果基本相同。

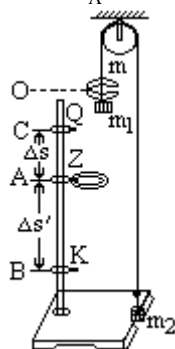
方法五

器材 滑轮，物理支架，秒表，刻度尺，铁架台，钩码，槽码，细绳，橡皮泥等。

操作

(1)把滑轮固定在较高的物理支架上端，在跨过定滑轮的细两端各拴一个质量为100g的钩码 m_1 和 m_2 。在 m_1 下面粘一些橡皮泥来克服摩擦力的作用，使 m_1 和 m_2 在获得一个初速度后能作匀速运动。利用铁架台在 m_1 的正下方固定一个铁环Z，它的孔径比 m_1 大，但比槽码 m 小。在铁环上下两处各固定一个标志物Q和K(如图)，用刻度尺测出 s 和 s' 的长度。

(2)在 m_1 上加一个片状槽码后由O点释放，系统便开始作加速运动。当 m_1 和 m 运动到A处，槽码被铁环Z托住后， m_1 和 m_2 又开始作匀速运动。用秒表记下槽码从C到A所经过的时间 t ，可以算出它在这段距离中的平均速度 $\bar{v} = s / t$ 。再用秒表记下 m_1 从A到B所经过的时间 t' ，可以算出 m_1 作匀速运动的速度 $v = s' / t'$ ，这个速度也就是 m 在A处的即时速度 v_A 。



(3) 改变Q标志物的位置，可看到槽码在AC中的平均速度 \bar{v} 是不一样的，但始终小于 v_A 。Q越接近Z， \bar{v} 就越接近 v_A 。

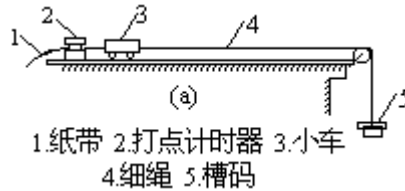
注意

(1)定滑轮要挑选摩擦小，转动平稳的。

(2)槽码的大小要适当，过小了运动不易平稳，过大了计时不易准确。

研究物体的运动规律 53

本实验应用了一些研究物体运动性质的一般方法。读者应该在阅读了基础篇的有关内容之后再此实验，这样可以加深对逐差法、平均法等重要方法的理解。

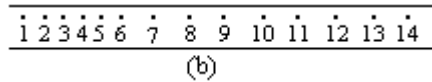


器材 小车，打点计时器，带定滑轮的木板，刻度尺，槽码，细绳等。

操作

(1)按图(a)安装好实验器材。

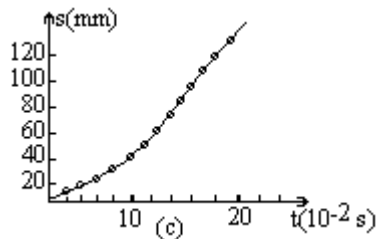
(2)将小车拉到打点计时器附近，手沿水平方向拉住纸带，使小车静止。然后释放纸带，让小车拉着纸带作加速运动，打点计时器在纸带上打了一系列点子(图b)。



(3)用刻度尺测量出从第1点到第2、3、……、14各点的距离。

(4)以横轴代表时间 t (以第1点的时刻为零)，以纵轴代表物体位移 s (以第1点为参考点)，作出 $s-t$ 图(图c)。

(5)因为图象是曲线，可以用多项式表示，最简单的是二次或三次曲线，而且自变量变化的间距是相等的，所以可用逐差法来检验是否是幂函数。又因为数据点比较多，因此用的是分组逐差。



因为二级逐差 $\Delta^2 y$ 基本相等了，因此 s 应该是 t 的二次幂函数，可写成 $s=a+bt+ct^2$ 。

(6)用平均法来确定函数式中的常数 a 、 b 、 c ，并将数据代入待定系数的公式中。

N	1	2	3	4	5	6
s(mm)	4.0	9.0	15.1	22.0	30.6	38.9
N	7	8	9	10	11	12
s(mm)	49.0	60.2	72.2	85.1	99.1	114.1

	y	Δy	$\Delta^2 y$
S ₁	4.0		
S ₂	9.0		
S ₃	15.1		
S ₄	22.0	45.0	6.2
S ₅	30.1	51.2	5.9
S ₆	38.9	57.1	6.0
S ₇	49.0	63.1	5.9
S ₈	60.2	69.0	6.2
S ₉	72.2	75.2	
S ₁₀	85.1		
S ₁₁	99.1		
S ₁₂	114.1		

$$4.0 = a + 0.02b + 0.0004c$$

$$9.0 = a + 0.04b + 0.0016c$$

$$15.1 = a + 0.06b + 0.0036c$$

$$22.0 = a + 0.08b + 0.0064c$$

$$30.1 = a + 0.10b + 0.0100c$$

$$38.9 = a + 0.12b + 0.0144c$$

$$49.0 = a + 0.14b + 0.0196c$$

$$60.2 = a + 0.15b + 0.0256c$$

$$72.2 = a + 0.18b + 0.0324c$$

$$85.1 = a + 0.20b + 0.0400c$$

$$99.1 = a + 0.22b + 0.0484c \quad (11)$$

$$114.1 = a + 0.24b + 0.0576c \quad (12)$$

将 12 个方程分成三个组，每组四个方程各自相加，得

$$\begin{cases} 50.1 = 4a + 0.2b + 0.0120c, \\ 178.2 = 4a + 0.52b + 0.0696c, \\ 370.5 = 4a + 0.84b + 0.1784c. \end{cases}$$

解上列方程组可得 $a=0.033$, $b=174$, $c=1.25 \times 10^3$ 。a 很接近零是可以预料的，因为前面是取第 1 点作为参考的。经研究，最后结论是：小车作匀变速运动，位移方程是

$$s = 17.5t + 125t^2,$$

该式的物理意义是：纸带的第一点经过打点机时小车的速度是 17.5cm/s，小车的加速度是 250cm/s²。

54 测定匀变速直线运动的加速度

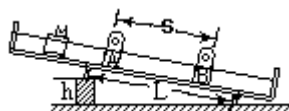
本实验提供了五种测量匀变速直线运动加速度的方法。其中方法一、二根据运动过程中两个点的测量数据算出加速度，操作简便易行；后三种方法对整个运动过程进行多点测量，实验结果的可信度和准确度均较高。

方法一

器材 气垫导轨，数字毫秒计，气源等。

操作

(1)将气垫导轨调水平之后（具体调平方法可参考实验 58 方法二），在单支脚下垫上高度为 H 的垫块。在导轨上 A、B 两处各放一个光电门 G_A 和 G_B ，滑块装上最窄的一种挡光框，两前沿之间的距离为 d 。数字毫秒计放在 s_2 状态，时间选择开关选最小的一档。



(2)让滑块从光电门 G_A 以上的任意位置开始滑下（初速不一定要为零），经过光电门 G_A 和 G_B 时，毫秒计分别记下挡光时间 t_A 和 t_B ，就可以算出两个挡光时间内的平均速度 $\bar{v}_A = d/t_A$ ， $\bar{v}_B = d/t_B$ 。由于挡光框的宽度 d 相对导轨的长度来说非常小，因此可以认为 \bar{v}_A 和 \bar{v}_B 是滑块通过 G_A 、 G_B 两个光电门时的即时速度 v_A 和 v_B 。

(3)从导轨的标尺上读出 AB 之间的距离 s ，即可算出滑块的加速度 $a = (v_B^2 - v_A^2) / 2s$ 。

(4)改变滑块的初始位置或初速度，重复上述操作；再改变 G_A 和 G_B 的位置，重复上述操作。最后求出各次所得加速度的平均值，作为测量最佳值，并计算误差。

(5)测量出垫块的高度 H 和导轨两支承脚之间的距离 L ，所测加速度的理论值是 $a_0 = g \cdot H/L$ 。检验实验值和理论值是否相等。

实例 某次实验中，挡光框两前沿之间的距离是 1.00cm，垫块高度是 2.00cm，导轨两支承脚之间的距离是 140.0cm，实验数据如下：

序号	s(cm)	t1(ms)	v1(cm/s)	t2(ms)	v2(cm/s)	a(cm/s ²)
1	50.0	27.4	36.5	19.1	52.1	13.8
2	50.0	29.3	34.1	19.8	50.5	13.9
3	60.0	32.0	31.2	19.4	51.5	14.0
4	60.0	34.4	29.1	19.8	50.5	14.2
5	70.0	35.9	27.8	19.0	52.6	14.2
6	70.0	37.6	26.6	19.2	52.1	14.3

加速度的平均值

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6}{6} = 14.1 \text{ cm/s}^2$$

$$a = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6}{6} \text{ cm/s}^2$$

$$= \frac{0.3 + 0.2 + 0.1 + 0.1 + 0.1 + 0.2}{6} \text{ cm/s}^2$$

$$= 0.2 \text{ cm/s}^2,$$

因此 $a = 14.1 \pm 0.2 \text{ cm/s}^2$ 。理论值 $a_0 = \frac{gH}{L} = \frac{9.79 \times 2.00}{140.0} \text{ m/s}^2$
 $= 14.0 \text{ cm/s}^2$

可见，实验值在误差范围内与理论值相等。

方法二

原理

(1) 物体从静止开始运动，经过 t 时间后，位移是 s ，则它的加速度 $a=2s/t^2$ 。

(2) 物体从 A 点由静止出发，经过 BC 的时间是 t_2 ，A 到 B、C 的距离分别是 s_1 和 s_2 ，则

$$s_1 = \frac{1}{2} at_1^2$$

$$s_2 = \frac{1}{2} at_2^2$$

式 ÷ 式： $s_2 / s_1 = t_2^2 / t_1^2$ ，即 $t_2 / t_1 = \sqrt{s_2 / s_1}$ 。

变换等式得

$$(t_2 - t_1) / t_1 = \sqrt{s_2 / s_1} - 1$$

设

$$t_2 - t_1 = t$$

则

$$t_1 = t(\sqrt{s_2 / s_1} - 1)$$

式代入 式得 $a = 2 s_1 (\sqrt{s_2 / s_1} - 1)^2 / t^2$ 。

器材 斜槽轨道，简式计时器等。

操作

(1) 使轨道倾斜一个不大的角度，光电门 G_1 放在导轨上。调整电磁铁的位置，使钢球被吸住时球前沿跟零刻度对准（图 b）。计时器同步、光控开关放在同步档。

(2) 给计时器清零后，控制吸放开关释放钢球，计时器记下钢球从被释放到经过 G_1 的时间 t 。从标尺上读出 G_1 的透光孔到 0 刻度的距离 s ，即可算出小球的加速度 $a=2s/t^2$ 。

(3) 改变 G_1 的位置，重复上述操作。最后求出各次加速度的平均值，作为测量值。

(4) 在斜槽轨道上放两个光电门，计时器的同步、光控开关放在光控档，装置如图(c)所示。



(5) 给计时器清零后，控制吸放开关释放钢球，计时器记下钢球从 G_1 到 G_2 所经过的时间 t 。从标尺上读出 G_1 、 G_2 的透光孔到 0 刻度的距离 s_1 、 s_2 ，即可算出加速度 $a = 2 s_1 (\sqrt{s_2 / s_1} - 1)^2 / t^2$ 。

(6) 改变 G_1 和 G_2 的位置，重复上述操作，最后求出各次加速度的平均值作为测量值。

注意

(1) 计时器使用同步状态时，光电门的透光孔要与钢球球心等高。

(2) 计时器使用光控状态时，两个光电门的透光孔要等高[参阅实验 50 方法三注意(6)]。

(3) 本实验的主要关键是 s_1 和 s_2 的测量，两个距离值尽可能相差得大些，才能使实验的测得加速度值较为准确和可靠。

方法三

原理 在匀速度运动物体的位移公式 $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ 等式两边除以

t ， $\frac{s}{t} = v_0 + \frac{1}{2} a t$ ，即 $\bar{v} = v_0 + \frac{1}{2} a t$ 。由此可见 $\bar{v} - t$ 图线是一根直线，它的截距是物体的初速度，它的斜率的 2 倍是物体的加速度。

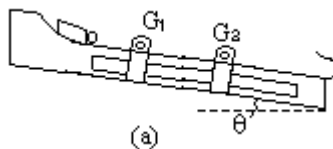
器材 斜槽轨道，简式计时器等。

操作

(1) 使导轨与水平面倾斜一个不大的角度，将光电门 G_1 放在标尺 10.0cm 的地方，将 G_2 放在标尺 30.0cm 的地方（图 a）。

(2) 控制计时器的吸放开关释放钢球，钢球先后经过 G_1 、 G_2 两个光电门，计时器便记下钢球在两个光电门之间运动的时间 t 。从标尺上读出两个光电门之间的距离 s ，得到一组 (s, t) 值。

(3) 每次将 G_2 向右移动 5.0cm，重复操作(2)，直至 G_2 移到 60.0cm 处。这样可以记下 7 组 (s, t) 值。



(4) 以纵轴代表平均速度 $\bar{v} = s / t$ ，以横轴代表时间 t ，作 $\bar{v} - t$ 图。用图解法（或线性回归法）求出图线的斜率 k ，钢球的加速度 $a = 2k$ 。

注意

(1) 光电门 G_1 和 G_2 的透光孔高度要一样[详见实验 50 方法三注意(6)]。

(2)为了提高计时的准确度，每个距离可重复测量几次。

(3)因为计时器可有0.01s的计时误差，因此 G_1 和 G_2 的距离适当地大一些，轨道倾斜的角度适当小一些，可减小计时的相对误差。

(4)本实验也可用计时器的同步状态（用一个光电门）来完成。

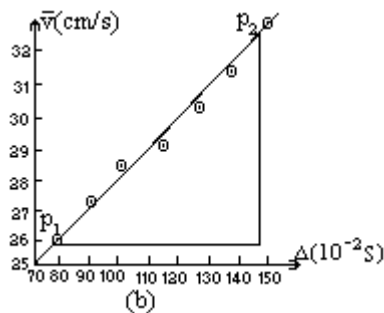
实例 某次实数据如下：

s(cm)	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
t_1 (s)	0.77	0.92	1.04	1.18	1.30	1.44	1.54
t_2 (s)	0.78	0.93	1.06	1.20	1.29	1.42	1.52
t_3 (s)	0.79	0.91	1.06	1.19	1.32	1.41	1.54
t_4 (s)	0.78	0.94	1.05	1.18	1.31	1.42	1.53
t_5 (s)	0.78	0.92	1.04	1.19	1.31	1.42	1.53
\bar{t} (s)	0.782	0.924	1.05	1.19	1.31	1.42	1.53
\bar{v} (cm/s)	25.6	27.1	28.6	29.4	30.5	31.7	32.7

以横轴代表 t ，纵轴代表 \bar{v} ，作 $\bar{v} - t$ 图（图b）。在图线上取两点 $p_1(0.813, 26.0)$ ， $p_2(1.50, 32.4)$ ，求出图线的斜率

$$k = \frac{32.4 - 26.0}{1.50 - 0.81} \text{ cm/s}^2 = 9.3 \text{ cm/s}^2。$$

可以算出钢球的加速度 $a = 9.3 \times 2 \text{ cm/s}^2 = 18.6 \text{ cm/s}^2$ 。用线性回归法得到的斜率是 9.27 cm/s^2 。钢球的加速度 18.5 cm/s^2 。从作图法和线性回归法得到的结果非常接近，但是加速度值的准确性还无法估计，所以要用多种方法测量，最后加以分析和组合，才能得到较为准确的数据。

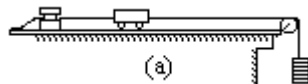


方法四

器材 打点计时器，带定滑轮的木板，小车，槽码，细绳，纸带等。

操作

(1)如图(a)安装好实验仪器，释放后槽码拉着小车和纸带作匀加速运动。打点计时器在纸带上打出一串点子，如图(b)所示（两个打圈的是同一个点）。



(2)根据这条纸带，可以求出小车的加速度。下面介绍四种求加速度的方法。

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
16	17	18	19	20	21	22	23									

(b)

纸带处理方法 1

把每打五次点的时间作为一个时间单位($T=0.02s \times 5=0.1s$)。测量出点 0 到点 5 的距离 s_1 ，点 5 到点 10 的距离 s_2 ，点 10 到点 15 的距离 s_3 ，……一直测到 s_8 。

根据 $a_1=(s_5-s_1)/4T^2$ ， $a_2=(s_6-s_2)/4T^2$ ， $a_3=(s_7-s_3)/4T^2$ ， $a_4=(s_8-s_4)/4T^2$ ，算出加速度的四个值，取它们的平均值 $a=(a_1+a_2+a_3+a_4)/4$ ，作为小车的加速度。

求出加速度的误差： $a_1 = |a_1 - a|$ ， $a_2 = |a_2 - a|$ ， $a_3 = |a_3 - a|$ ， $a_4 = |a_4 - a|$ ， $a = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4)/4$ 。

纸带处理方法 2

测出第 3 点到第 7 点间的距离 s_1 ，可知第 5 点处的即时速度 $v_1=s_1/4T_0$ (T_0 是打点的周期)；测出第 8 点到第 12 点之间的距离 s_2 ，可知第 10 点处的即时速度 $v_2=s_2/4T_0$ ；用同样方法可测出第 15、20、25、30、35 等点处的即时速度， v_3 、 v_4 、 v_5 、 v_6 、 v_7 。

以 0 点的时刻为零，可知与 v_1 、 v_2 …… v_7 相对应的 $t_1=5T_0$ ， $t_2=10T_0$ ， $t_3=15T_0$ ，…… $t_7=35T_0$ 。

以纵轴代表速度 v ，横轴代表时间 t ，作出 $v-t$ 图。

用图解法求出图线的斜率 k ，就是小车的加速度。

纸带处理方法 3

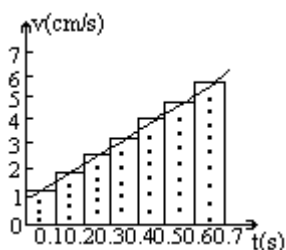
分别测量出从 0 点到第 5、10、15、20、25、30、35 个点的距离 s_1 — s_7 。

以 0 点的时刻为零，可知到第 5、10、15、20、25、30、35 个点的时间分别为 $t_1=5T_0$ ， $t_2=10T_0$ ，…… $t_7=35T_0$ (T_0 为打点周期)。

从 0 点到第 5、10、15、20、25、30、35 个点的平均速度分别为 $\bar{v}_1 = s_1 / t_1$ ， $\bar{v}_2 = s_2 / t_2$ …… $\bar{v}_7 = s_7 / t_7$ 。

以纵轴代表平均速度 \bar{v} ，横轴代表时间 t ，作 $\bar{v}-t$ 图。

用图解法求出图线的斜率 k ，小车的加速度 $a=2k$ 。



纸带处理方法 4

将纸带在 0 点，第 5、10、15、20、25、30、35 等点处剪开，并将剪开的纸带依次粘在 $v-t$ 图上 (图 c)。横轴每一个纸带的宽度代表 0.1s，纵轴每一厘米代表 1cm/s。

将每条纸带上缘的中点连接起来，得到的一条直线就是 $v-t$ 图线。
用图解法求出此直线的斜率，就是小车的加速度。

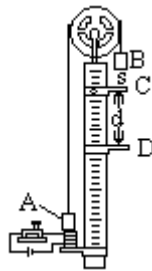
方法五

器材 阿脱伍德机，秒表，直流电源，开关，小砝码等。

操作

(1)如图安装好实验仪器。A、B 是两个质量都是 m 的砝码，C 是一个环形平台，D 是一个实心平台。

(2)在 B 砝码上加上质量为 m' 的片码（不能穿过 C 的中孔）。切断电磁铁中的电流后，系统由静止开始作匀加速运动。B 经过 C 时，由于片码被挡住，因此系统改作匀速运动（不考虑摩擦的影响），直到 B 碰到 D 为止。



(3)从标尺上读出系统匀加速运动的距离 s 和作匀速运动的距离 d 。用秒表记下系统作匀加速运动的时间 t 和作匀速运动的时间 t' 。B 经过 C 时的即时速度 $v=(d-h)/t'$ (h 是砝码 B 的高度)，这样可以得到一组 (t, v) 的值。

(4)将 C 和 D 向下移，增大 s 而保持 d 不变。重复以上操作，可得到另一组 (t, v) 值。共需要 5—7 组 (t, v) 值。

(5)以纵轴代表 v ，以横轴代表 t ，作 $v-t$ 图，得一直线。用图解法求出直线的斜率，就是系统的加速度。

(6)加速度的理论值是 $a=m'g/(2m+m')$ 。检验实验值和理论值是否基本一致。

注意

(1) d 的值要取得适当，过小了会增大 t' 的计时误差，过大了会增大摩擦带来的影响。

(2)由于实验中未考虑摩擦和顶轮的转动惯量的影响，因此实值略小于理论值是正常的。

(3)如果摩擦力的影响比较明显，可以在滑轮轴处加些润滑油或砝码 B 上预加一个抵消摩擦的砝码。

(4)为了减小滑轮的转动惯量的影响，砝码质量应取得适当的大一些。

用频闪法研究自由落体 55

频闪法是一种运动过程的等时记录法。它能够形象直观地记录物体运动的全过程轨迹和相等时间间隔的位置，便于研究运动的特征。一般频闪光源的时间准确度约为 1%—5%。方法一、二将运动过程记录在照片上，方法三将运动过程记录在屏幕上。本文最后还附有代用频闪光源的制作方法。

方法一

目的

- (1)说明自由落体是一种匀加速运动。
- (2)测定自由落体的加速度。

器材 频闪光源，摄影、冲洗、放大等设备，白色球（直径 6-8cm），2m 长的黑色幕布等。

操作

(1)在暗室中，使频率为 25Hz 左右的频闪光源的光源的光射向竖直悬挂的黑色幕布。照相机的光圈开到最大，快门拨在 B 档，对准焦距，取景器中要能看到整块幕布。手持白球放在幕布顶端，开启照相机的快门后立即释放白色球，白色球落地后尽快关闭快门。

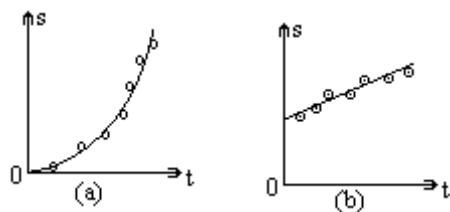
(2)将胶卷按常规冲洗、放大成照片（照片的反差尽量大一些）。

(3)测量白色球的直径 D 和照片上白色球像的直径 d ，可求出照片的比例 $K=D/d$ （ D 和 d 的值要多次测量）。

(4)舍去照片上面一开始几个因挤得太紧而不清楚的像，以第一个清晰的像为基础，测出以下各像相对它的位移 s 和时间 t ，得到一系列 (t, s) 值（ s 要换算成真实的位移）。

(5)以纵轴代表位移 s ，横轴代表时间 t ，作出 $s-t$ 图（图 a）。图象是一条曲线，最简单的描述是二次函数。因为 $t=0$ 时 $s=0$ ，可断定二次函数无常数项，又因为 $t=0$ 时，图线的切线不平行于横轴，可断定二次函数有一次项，即估计是 $s=at^2+bt$ 型的函数。

(6)以上设想是否正确，可以用图象法来检验：如果是 $s=at^2+bt$ 两边同除以 t 得 $s/t = at + b$ ， s/t 即平均速度 \bar{v} ，与 t 成线性关系。作 $\bar{v}-t$ 图，得到一条直线（图 b）。证实以上设想是正确的，因此自由落体是一种匀加速运动（此类函数也可以用逐差法检验，见实验 53）。



(7)用图解法求出 $\bar{v}-t$ 图的斜率 K ，自由落体的加速度 $a = 2k$ 。 $\bar{v}-t$ 图的截距就是白色球在基准点时的即时速度。

注意 为了更准确地确定照片的比例 K ，可在黑色幕布上贴两条相距 1.00m 的白色纸条，量出照片上这两条白纸条的像之间的距离 d ，则 $K=1/d$ 。实验时不球一

定要靠近幕布下落。

实例 可参阅实验 53。

方法二

目的

(1)说明自由落体是一种初速为零的匀加速运动。

(2)测定自由落体的加速度。

器材 频闪光源，平抛竖落同步器，摄影、冲洗、放大设备，2m 长的黑色幕布等。

操作

(1)在暗室的墙上挂上黑色幕布作为落球的背景，在幕布上端固定平抛竖落同步器。将照相机光圈开到最大，对准焦距，快门速度拨到 B 档。使取景框中能看到整块幕布。将频闪光源的频闪调到 10.0Hz。

(2)在暗环境中将一个落球从同步器下边的孔中送入，按下开关接通同步器的电源，球就被夹持在也中。

(3)开启照相机的快门后，使频闪光源开始闪光。当第一次闪光照射到同步器的光电三极管时，它内部的电路产生动作将球释放，小球开始自由下落（滞后时间不大于 0.002s）。待小球落地后，立即关闭照相机快门，使频闪光源停止工作。在底片上可摄得小球的五、六个像。

(4)将胶卷按常规冲洗，放大成照片（照片的反差尽量大些）。

(5)测量出落球的直径 D 和照片上落球像的直径 d ，可求出照片的比例 $K=D/d$ （ D 和 d 的值要多次测量）。



(6)从照片上端开始，测量出每两个像之间距离 s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 （如图），可看出 $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5=1, 3, 5, 7, 9$ 。这说明自由落体是一种初速为零的匀加速运动。

(7)设频闪光源的频闪周期是 T ，则 $a_1=(s_3-s_1)/(2T^2)$ ， $a_2=(s_4-s_2)/(2T^2)$ ， $a_3=(s_5-s_1)/(4T^2)$ 。求出它们的平均值作为落球的加速度 $a=(a_1+a_2+a_3)/3$ 。

(8)求出加速度的误差： $\Delta a_1 = |a_1 - a|$ ， $\Delta a_2 = |a_2 - a|$ ，

$\Delta a_3 = |a_3 - a|$ ， $\Delta a = (\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3) / 3$ 。最后用比 K 将 a 换算成真实的加速度。

注意 同方法一。

方法三

器材 频闪光源，自制恒速滴液瓶，刻度尺等。

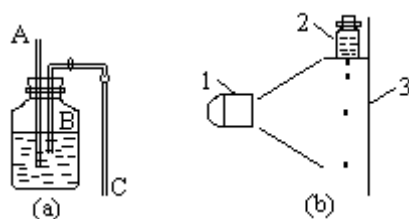
恒速滴液瓶制作方法

在橡皮塞中插入 A、B 两根玻璃管，B 玻璃管通过一根乳胶管与 C 玻璃管相连，在乳胶管上夹一个螺旋夹（图 a），即制成一个恒速滴液瓶。

操作

(1)恒速滴液瓶的 B、C 玻璃管和乳胶管中装满水后将 B 玻璃管插入瓶中水里，形成一个虹吸管。调节螺旋夹的松紧和 A 玻璃管下口的高低，可控制 C 玻璃管中液滴滴出的快慢。

(2)按图(b)安装好频闪光源，恒速滴液瓶和屏幕，屏幕上出现频闪光源照射下的液滴的影子。



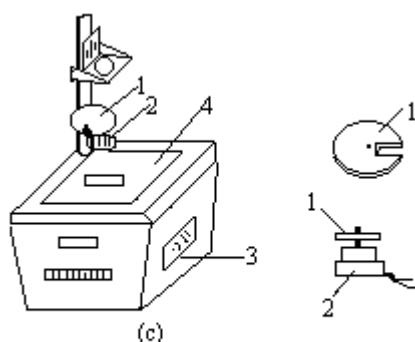
(3)调节频闪光源的频率和恒速滴液瓶滴液的频率，使两者恰好相等，屏幕上就会出现液滴不动的影子（使屏幕上液滴的影子数为 4—5 个）。

(4)调节液滴与闪光的相位关系：用手指堵住 A 管上口，在适当的时候释放，使屏幕上最边一个液滴的影子正好在 C 管口中。

(5)自上而下用刻度尺测量屏幕上相邻两个液滴影子之间的距离，如果比值为 1 3 5 7，说明自由落体是初速为零的匀加速运动。

注意 如果要测定自由落体的加速度，必须使液滴很靠近屏幕，并且将频闪光源适当放远一些。

附：代用频闪光源的制作方法



1. 遮光叶片 2. 电动机
3. 投影机 4. 硬纸片

如图(c)，用金属片制成遮光叶片固定在电动机的轴上，再把电动机固定在投影器的立柱上。电动机与滑动变阻器（50 Ω ，2A）串联后接在低压电源上。在投影器上放一个用硬纸片做成的条形光孔，使光线不受遮光叶片阻挡时在投光面上形成一条宽 20cm、长约 1.5m 的竖直光带。当电动机旋转时，只有光遮光叶片的窄缝与条形光孔对准时，投光面上才被照亮，形成一个频闪光源。调节滑动变阻器，

能控制电动机的转速，也就控制了闪光的频率，最后计算时的频率，还得用计时器或者计数器来校准和定标。

空气阻力对落体的影响 56

本实验说明当空气阻力很小时，轻重不同的物体下落的加速度是基本相同的。方法一是通过抽掉玻璃管中的空气来减小空气阻力，方法二、三都是通过减小下落物体的迎风面积来减小空气阻力。

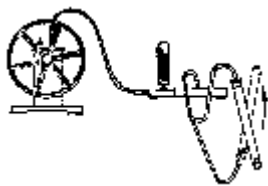
方法一

器材 牛顿管，抽气盘（附压强计），真空泵，厚橡皮管等。

操作

(1)打开牛顿管阀门，使管内充满空气，管内的金属圆片、软木塞和羽毛都停在底部。急速将管倒转 180° ，可看到三个物体下落的快慢不同，金属片最先落到底端，紧接着是软木塞，最后是羽毛，先后大约要差2秒钟。

(2)用厚橡皮管把牛顿管、抽气盘和真空泵连起来（如图）。开动真空泵，观察抽气盘上的气压计，当气压为 100mmHg 时，关闭牛顿管的阀门并关真空泵停止工作。倒转牛顿管，可看到仍然是金属片最先，软木塞次之，羽毛最后到底，但羽毛比金属片晚到的时间减少到大约 1s 左右。



(3)开启真空泵，打开牛顿管气嘴继续抽气。当气压为 50mmHg 时，羽毛大约比金属片晚到底 0.5s 。当气压抽到 20mmHg 以下后，三样东西几乎同时落到底。说明空气越稀薄，空气对运动物体的阻力越小，不同物体下落的加速度差别也越小。由此可以推理得知：在没有空气阻力的环境中，任何物体下落的加速度都是一样的。

注意

(1)停止抽气时，要先关闭牛顿管阀门，再停真空泵；重新开始抽气时，要先开启真空泵，再打开牛顿管阀门。

(2)三个物体下落时，要尽量使它们不与牛顿管壁接触，以减少由于管壁产生的摩擦。

(3)要用硬质的厚橡皮管，否则大气会将管压瘪，造成空气无法抽出。

(4)为了保证接口处密封，可在各接口处涂少许凡士林，但要防止油或水从牛顿管的气嘴进入管中，油或水把羽毛粘住会使实验失败。

方法二

器材

贰分硬币， $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 左右的薄纸片（可用信笺纸）等。

操作

(1)一手持硬币，一手拿纸片，让平放的硬币和纸片从同一高度同时由静止落下，可看到硬币比纸片落地快得多。

(2)将纸片分别折叠一次、二次、三次后，重复上述步骤，可看到随着纸片折叠次数增多，硬币与纸片下落时间的差别逐渐减少。

(3)将纸片揉成一团（使其直径与硬币直径差不多），重复实验，可看到纸团与硬币几乎同时着地。

方法三

器材

硬纸名片，铁片（面积与名片相等）。

操作

一手持名片、一手持铁片，将它们竖直放置，从同一高度同时由静止释放，因两者下落的迎面积减小到接近于一条线，它们受到的空气阻力很小，于是就几乎同时落到桌面。

注意 若所用名片较薄，为防止出现滑翔式的下落，可将名片卷成筒状，再让它竖直落下（如图）。



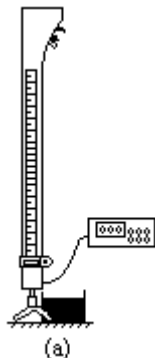
57 研究自由落体的运动规律

本实验的三种方法都是用图象法或逐差法来探索自由落体运动的性质，要掌握这些重要的实验方法可参阅基础篇的有关内容。三种方法采用了不同的计进方式：方法一用简式计时器计时；方法二用电磁打点器计时；方法三用同步电机扫描法计时。这些计时方式都具有相同级别的计时精度。另外，读者可以把方法一“建议”栏中介绍的改装使用毫秒计的方法，举一反三地在其他力学实验中使用。

方法一

器材 斜槽轨道，简式计时器等。

(1)调整电磁铁的位置，使它吸住钢球，且让钢球的前沿恰好与标尺上的零刻度线对齐。取下轨道尾端的捕捉器，用固定螺丝将支架固定在轨道的尾端，然后竖起轨道将支架立柱插入三角座的中心孔，并将其固定好，如图(a)。



(2)把光电门 G_1 装在轨道上 (G_2 放置不用)，计时器置于“同步”状态，时间选择开关置于“1/100”档，互换开关置“1”位置。

(3)把小重锤挂在电磁铁上，调节三角底座上的螺丝，将导轨调成竖直，同时要求钢球的球心与光电门的中心线在同一竖直线上，以保证钢球下落时其球心从光电门的中心线上通过。

(4)将光电门 G_1 放在标尺的 10.00cm 处，操纵吸放开关释放钢球，计时器记下钢球从被释放到经过光电门的时间，得到一组 (t, s) 值。

(5)使光电门到电磁铁的距离 s 增加 5.00cm，重复上述实验，得到另一组 (t, s) 值，共重复 6—8 次。

(6)为了研究自由落体运动的性质，作出 $s-t$ 图 (图 b)，图线可用幂函数表示。因为图线过原点，说明函数的常数项是零；又因为原点处图线的切线很像平行于 t 轴，说明函数的一次项也可能为零。因此将函数设为 $s=mt^n$ 。



(7)对上述估计的幂函数进行“化直”的常用方法是两边取对数 $1gs=1gm+n1gt$ 。再作 $1gs-1gt$ 图，以检验估计的正确性，如果 $1gs$ 和 $1gt$

成线性关系，说明上述估计的函数形式是正确的。同时也可以从 $1gs-1gt$ 图上求出所设函数中的常数 m 和 n 。

注意

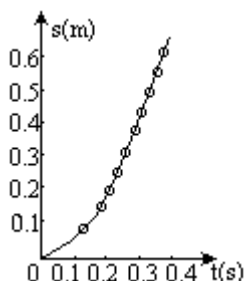
(1) 因为用筒式计时器计时可能有 $\pm 0.01s$ 的误，而本实验中钢球下落的时间都在 $0.4s$ 之内，因此计时可能产生较大的误差（只有 2 位有效数字）。为了弥补这个缺点，每个距离应重复计时 5 次以上。

(2) 为了减小电磁铁的剩磁对实验结果的影响，可在电磁铁的头上包上适当厚度的布，其厚度只要使通电时电磁铁恰好能吸住钢球即可。

实例 某次实验数据如下：

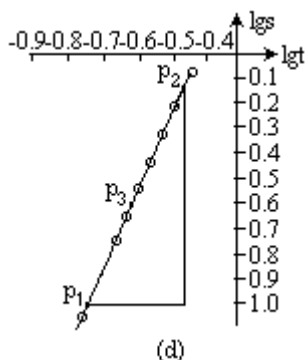
s(cm)	10.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	50.0	60.0
t1(s)	0.14	0.21	0.22	0.25	0.26	0.29	0.31	0.34
t2(s)	0.14	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.32	0.35
t3(s)	0.15	0.19	0.23	0.25	0.27	0.30	0.33	0.35
t4(s)	0.13	0.20	0.21	0.25	0.28	0.28	0.32	0.34
t5(s)	0.15	0.21	0.22	0.24	0.27	0.29	0.32	0.36
t6(s)	0.14	0.19	0.23	0.24	0.26	0.29	0.31	0.36
t7(s)	0.15	0.21	0.23	0.26	0.27	0.28	0.32	0.35
t8(s)	0.14	0.20	0.23	0.25	0.27	0.28	0.32	0.34
$\bar{t}(s)$	0.143	0.201	0.224	0.248	0.268	0.286	0.319	0.349

作出 $s-t$ 图（图 c）。图线过原点，而且在原点处的切线平行于 t 轴，因此设函数为 $s=mt^n$ 。两边取对数，得到以下数据：



$1gt$	-0.845	-0.697	-0.650	-0.606	-0.572	0.544	-0.496	-0.457
$1gs$	-1.00	-0.699	-0.602	-0.522	-0.456	0.398	-0.301	-0.222

再作 $1gs-1gt$ 图（图 d），得到一条直线。这说明原来的估计是正确的。在直线上任取三点 $p_1(-0.821, -0.950)$ 、 $p_2(-0.470, -0.250)$ 和 $p_3(-0.667, -0.650)$ 。用 p_1 和 p_2 算出直线的斜率



$$k = \frac{-0.950 + 0.250}{-0.821 + 0.470} = 1.99。$$

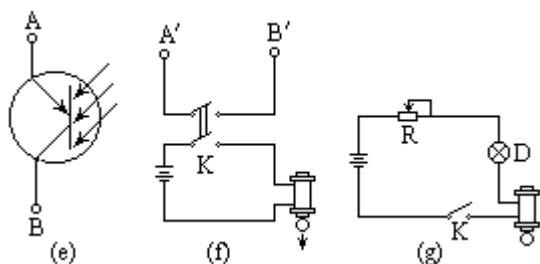
再用 p_3 可以求出图线的截距

$$b = -0.650 - 1.99 \times (-0.667) = 0.677。$$

因为 $10^{0.677} = 4.75$ ，所以自由落体 s 与 t 的关系是 $s = 4.75t^{1.99}$ ，和理

论公式 $s = \frac{1}{2}gt^2$ 吻合得比较好。

建议 由于本实验所测量的时间最长不超过 0.4 秒，因此提高计时的精度成为实验的关键。除了以上介绍的增加测量次数的方法之处，还可以选用更精密的计时工具，如和气垫导轨配套的数字毫秒计，它的计时精度可以达到 $\pm 1\text{ms}$ 甚至 $\pm 0.1\text{ms}$ 。但因为一般的毫秒计不具备相当于筒式计时器“同步”状态的功能，因此须加以改装。毫秒计的光电接收器主要是一个光敏器件（例如光敏三极管）。被光照身时，A、B 间呈低阻状态（图 e）；无光照射时，A、B 间呈高阻状态。根据这个原理，可接成如图(f)所示的线路。取下 A 光电门的光敏三极管，用 A、B 两个头代替 A、B 两个头接到毫秒计上，毫秒计置示 s_2 档。K 选用一个按钮式的双刀常闭开关，另一个光电门 B 安装在电磁铁的正下方。按下 K 时，原来被电磁铁吸住的钢球落下，同时 A、B 之间由低阻变成高阻，毫秒计得到一个“光被遮断”的信号，开始计时。钢球落下遮断 B 光电门的光线时，毫秒计停止计时。另一种更简单的方法如图(g)所示，当常闭开关 K 闭合时，电磁铁吸住钢球，光电门 A 的灯泡 D 发光。K 打开的瞬间由于 D 熄灭，毫秒计开始计时，同时钢球落下。B 光电门置于钢球正下方，当钢球遮 B 光电门的光线时，毫秒计停止计时。用这两种方法都需要注意：在钢球遮断 B 光电门的光线之前，K 必须重新合上，因此 K 用按钮开关较好。

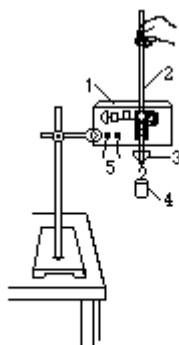


方法二

器材 打点计时器，学生电源，刻度尺，铁架台，纸带，重锤，夹子等。

操作

(1)如图(a)安装好实验器材。接通电源，打点器开始打点后释放纸带，重锤拉着纸带一起下落，打点器在纸带上打出一列点子。共打十根纸带。



1.打点计时器 2.纸带 3.夹子
4.重物 5.接电源

(2)用米尺测量十根纸带上从第一个点到第 21 个点之间的距离，选出一根距离最小的纸带。

(3)将第一个点作为 0 号点，以后依次作为 1、2、3、……号点。用米尺测量出从 0 号点到 2、4、6、……12 号点之间的距离 s_1 、 s_2 、…… s_{12} 。

(4)为了选择正确的函数式来表达 s 和 t 的关系，先作 $s-t$ 图估计经验公式的形式（图 b），由图估计是幂函数。



(5)因为自变量 t 是等间距变化的，所以可以用逐差法来检验估计的经验公式是否正确，并确定幂函数的次数。

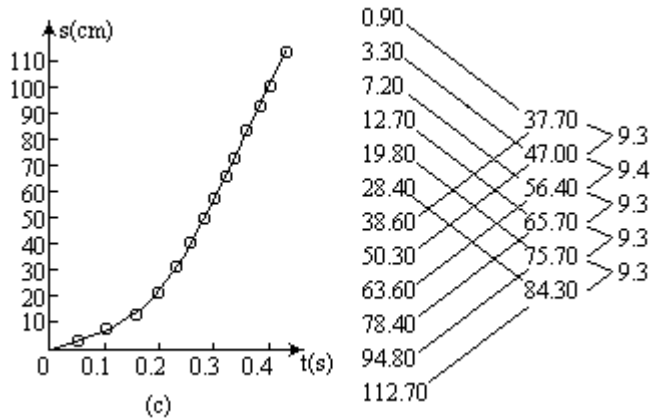
(6)用平均法确定经验公式中的常数。

注意 本实验方法的主要缺点是无法保证重锤开始下落的瞬间打点器正好在纸带上打一个点，操作(2)的目的就是要选一根较好的纸带。在理想情况下，从第一个点到第 21 个点之间的距离是 0.78m；不理想的情况下可达 0.86m，因此要在十根纸带中精心选择。如果十根中尚无理想的纸带，则要继续实验，直至找到较理想的纸带为止。

实例 在十根纸带中找到一根从第一个点到第 10 个点的距离为 0.784m 的纸带，可以认为是一根比较理想的纸带。测量这根纸带的 s_1 、 s_2 、…… s_{12} ，数据如下：

n	1	2	3	4	5	6
s _n (cm)	0.90	3.30	7.20	12.70	19.80	28.40
t(s)	0.040	0.080	0.120	0.160	0.200	0.240
n	7	8	9	10	11	12
s _n (cm)	38.60	50.30	63.60	78.40	94.80	112.70
t(s)	0.280	0.320	0.360	0.400	0.440	0.480

作 s-t 图 (图 c), 估计是幂函数。用逐差法检验幂函数是否正确, 并且确定幂函数的次数。



因为二级逐差 E 基本相等, 说明 s-t 函数是一个二次幂数, 可设为 $s=at^2+bt$ (因为当 $t=0$ 时 $s=0$, 所以常数项一定是零)。为了确定 a 和 b 的值, 将十二组 (t、s) 值代入方程中, 得到 12 个关于 a 和 b 的方程:

$$\begin{aligned}
 0.90 &= 0.0016a + 0.040b, \\
 3.30 &= 0.0064a + 0.080b, \\
 7.20 &= 0.0144a + 0.120b, \\
 12.70 &= 0.0256a + 0.160b, \\
 19.80 &= 0.0400a + 0.200b, \\
 28.40 &= 0.0576a + 0.240b, \\
 38.60 &= 0.0784a + 0.280b, \\
 50.30 &= 0.1024a + 0.320b, \\
 63.60 &= 0.1296a + 0.360b, \\
 78.40 &= 0.1600a + 0.400b, \\
 94.80 &= 0.1964a + 0.440b, \\
 112.70 &= 0.2304a + 0.480b.
 \end{aligned}$$

将前 6 个方程相加, 后 6 个方程相加, 得到

$$\begin{cases}
 72.30 = 0.1460a + 0.840b, \\
 438.40 = 0.8972a + 2.280b.
 \end{cases}$$

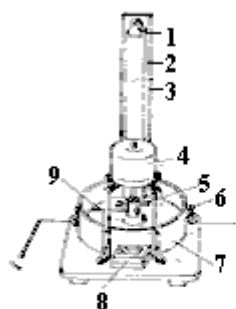
可以解得 $a=483, b=2.05$ 。

因此函数是 $s=483t^2+2.05t$,

与理论公式 $s = \frac{1}{2} \times 980t^2$ 吻合得比较好。

方法三

器材 如图(a)所示。



1. 夹具 2. 扁铁条(作落棍) 3. 纸带
4. 单向同步电机($T=0.02s$) 5. 落带长方孔
6. 调水平螺栓 7. 挡墨铁皮圈
8. 灯用开关 9. 圆珠笔芯

操作

与一般落棍实验相同。数据处理的思想、步骤跟方法二完全相同。

说明

(1)由于使用同步电机，周期稳定在 0.02 秒。电机功率不需很大，因它工作于轻载状态。

(2)改进了常规的转笔划线的留痕方式。将一支圆珠笔芯头上的圆珠剪去，装在电机转轴上。当圆珠笔芯高速转动时，甩出一股极细的油墨流，在落棍的纸带上留下细而清晰的痕迹。

(3)用便于置换的扁铁条外夹纸带代替笨重的落棍。

建议

如果以其他电机代用，可用以下两种方法：

(1)使用直流高速电机，用变阻器调速，在转轴上套一张两叶纸片，在小日光灯的频闪光的光照下调速，当看到高速旋转着的两叶纸片影像犹如停着一般不动时，如果电源频率为 50Hz，则 $T=0.020s$ 。

(2)使用单相异步电机时（例如普通的电风扇电机），则可用下述方法测定其转动的固有周期 T ：

$$\text{对于两极电机：} T = \frac{0.02}{1 - \frac{1}{t}} (\text{s}).$$

$$\text{对于四极电机：} T = \frac{0.04}{1 - \frac{2}{t}} (\text{s}).$$

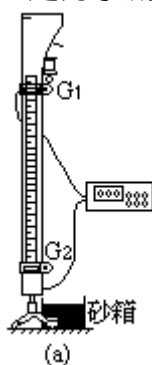
式中 t 为在日光灯频闪光下，观察圆珠笔芯影像慢速倒转 50 转的时间（推理略）。

58 测定重力加速度

本实验介绍了五种测量重力加速度的方法。做好实验的关键是减小时间测量的相对误差 $\Delta t/t$ ，方法一、二采用电子计时的方法以减小 Δt ，方法四、五采用累积的方法以增大 t 。实验中要适当选择物体运动的距离 s ，过短会使 $\Delta s/s$ 增大，过长则会增加空气阻力带来的影响。由于空气阻力无法避免，因此测量出的实验值比公认值略小是正常的。

方法一

原理 实验 57 方法一在研究自由落体运动规律的同时测出了重力加速度，实验采用增加测量次数的方法减小测量时间的偶然误差，但这种方法无法减小由于电磁铁剩磁等原因带来的系统误差。本方法的特殊设计正是为了减小这项系统误差。



实验装置如图(a)所示，计时器置“光控”位置。从标尺上可以读出钢球到光电门 G_1 、 G_2 的距离 s_1 、 s_2 ，计时器可以记下钢球从 G_1 到 G_2 的时间 t 。设小球从起始位置落到 G_1 、 G_2 的时间分别为 t_1 、 t_2 ，由于电磁铁剩磁等原因带来的时间误差为 Δt ，则

$$s_1 = \frac{1}{2}g(t_1 - \Delta t)^2$$

$$s_2 = \frac{1}{2}g(t_2 - \Delta t)^2$$

式除以 式并两边开方

$$(t_2 - \Delta t)/(t_1 - \Delta t) = \sqrt{s_2/s_1},$$

$$(t_2 - t_1)/(t_1 - \Delta t) = \sqrt{s_2/s_1} - 1.$$

因为 $t_2 - t_1 = t$,

所以 $t/(t_1 - \Delta t) = \sqrt{s_2/s_1} - 1,$

$$t_1 - \Delta t = t/(\sqrt{s_2/s_1} - 1)$$

将 式代入 式，可得

$$2s_1(\sqrt{s_2/s_1} - 1)^2 = gt^2, \text{ 改变 } s_1 \text{ 和 } s_2, \text{ 可测得不同的 } t. \text{ 以 } t_2 \text{ 为}$$

自变量， $2s_1(\sqrt{s_2/s_1} - 1)^2$ 为因变量作出图线，其斜率就是 g 。显然，这种实验方法的结果是不受 Δt 影响的。

器材 斜槽轨道，简式计时器，砂箱等。

操作

(1)调整电磁铁的位置，使钢球的前沿对准尺的零刻度。取下轨道尾端的捕捉器，旋上固定螺丝把支架固定在轨道的尾端。然后竖起轨道将支架支柱插入三脚座的中心孔，用螺丝固定好(图a)。

(2)把小重锤挂在电磁铁上，使其悬挂点与钢球的吸着点重合。调整三脚座上的调平螺丝，将轨道的平直部分调成竖直。然后再仔细调整光电门上的可调螺丝，使重锤线通过透光孔的中心线，确保钢球下落时其球心从光电门透光孔的中心线上通过。

(3)将光电门 G_1 置于靠近标尺零刻度的地方， G_2 放在标尺中部，从标尺上读出零刻度到 G_1 、 G_2 的距离 s_1 和 s_2 。

(4)将计时器放在“光控”位置，操纵“吸放”开关释放钢球，从计时器上读出钢球从 G_1 到 G_2 的时间 t 。共测量8到10次，取平均值。

(5)光电门 G_1 的位置不变，将 G_2 的位置向下移动5.0cm，重复以上实验操作。一共获得7组(s_1, s_2, t)数据。

(6)以纵轴代表 $2s_1(\sqrt{\frac{s_2}{s_1}} - 1)^2$ ，横轴代表 t^2 ，作图线。用图解法求出图线的斜率，此斜率就是重力加速度 g 。

注意

(1)如果下落过程中钢球球心没有从透光孔的中心线上通过，将给 s_1 、 s_2 带来较大的误差(如左右偏差1cm，会给 s 带来约0.6cm的误差)，因此操作(2)一定要认真做好。

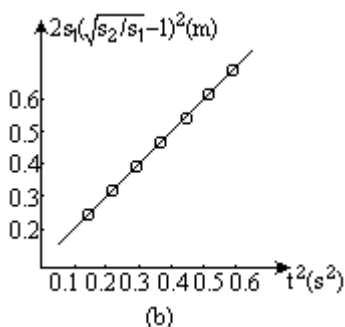
(2)时间测量的误差 $E_t = \frac{\Delta t}{t}$ ，计时器可有 $\pm 0.01s$ 的误差，当 t 较大时 E_t 较小，所以 G_1 和 G_2 的距离不能太近。但因受到轨道长度的限制， $t < 0.35s$ ，即 $E_t > 2.9\%$ 。因此本实验中的 t 不能用单次测量的方法，一定要多次测量以减小 t 的误差。

实例 某次实验数据如下表， $s_1=5.0cm$ 。

以纵轴代表 $2s_1(\sqrt{\frac{s_2}{s_1}} - 1)^2$ ，横轴代表 t^2 作图线(图b)。在图线上

取 $P_1(0.0201, 0.200)$ ， $P_2(0.0650, 0.635)$ 两点，求出图线的斜率

$$k = \frac{0.635 - 0.200}{0.0650 - 0.0201} \text{ m/s}^2 = 9.7 \text{ m/s}^2。$$



$s_2(\text{cm})$	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
$t_1(\text{s})$	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.25	0.26
$t_2(\text{s})$	0.16	0.18	0.20	0.22	0.23	0.26	0.25
$t_3(\text{s})$	0.17	0.19	0.21	0.23	0.23	0.26	0.27
$t_4(\text{s})$	0.17	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.27
$t_5(\text{s})$	0.15	0.17	0.19	0.22	0.24	0.25	0.26
$t_6(\text{s})$	0.17	0.19	0.21	0.21	0.23	0.25	0.27
$t_7(\text{s})$	0.17	0.19	0.21	0.21	0.23	0.24	0.26
$t_8(\text{s})$	0.17	0.19	0.20	0.22	0.24	0.24	0.26
$\bar{t}(\text{s})$	0.165	0.185	0.203	0.218	0.234	0.249	0.263
$t^2(\text{s}^2)$	0.0272	0.0342	0.0412	0.0475	0.0548	0.0620	0.0692
$2s_1(\sqrt{\frac{s_2}{s_1}} - 1)^2(\text{m})$	0.271	0.334	0.400	0.468	0.537	0.607	0.679

建议

(1)本实验上是借用了斜槽轨道的电磁铁和计时器及光电门，并没有用到轨道本身。因此也可以应用计时器独立做实验，只要用适当的夹具固定电磁铁及两个光电门即可。这样做的好处是 s_1 、 s_2 和 t 不受轨道长度的限制，这些数值可适当地取得大一些，以减小实验误差。

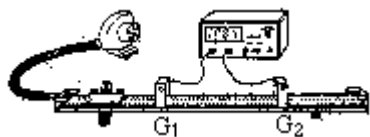
(2)为了提高计时的精度，可将筒式计时器换用数字毫秒计（ s_2 计时方式），计时精度可提高 1—2 个数量级。

方法二

器材 气垫导轨，数字毫秒计，气源等。

操作

(1)将气垫导轨放在水平桌面上。接通气源后，把滑块放在导轨上，调节单脚支撑螺丝，直至放手后滑块基本静止不动为止（如图）。



(2)将毫秒计置于 s_2 状态，轨道上安装两个光电门，在滑块上装上最窄的挡光框，时间选择开关用最小的一档（1ms 或 0.1ms）。给滑块一个初速度后，让它依靠惯性从导轨的单脚端滑向双脚端。细心地调节单脚支撑螺丝，直至毫秒计显示滑块经过两个光电门的时间之差不大于 0.3ms 为止（如果用计时精度为 1ms 的毫秒计，则时间显示应完全相同）。

(3)在单支脚下垫上高度为 h 的垫块，让滑块从导轨的单脚端滑向双脚端，毫秒计记下滑块经过两个光电门时的挡光时间 t_1 和 t_2 。如果挡光框两个前沿之间的距离是 d ，则两次挡光时间内的平均速度分别为 $v_1=d/t_1$ 和 $v_2=d/t_2$ 。因为两次挡光的距离相对整个距离来说很小，因此可以把这个速度看成是滑块经过两个光电门时的即时速度。从标尺上读出两个光

光电门之间的距离 s ，滑块的加速度 $a = (v_2^2 - v_1^2) / 2s$ 。

(4)保持两个光电门的位置不变，改变滑块滑行的初始位置或初速度，再重复测量一次加速度。

(5)改变两个光电门的位置，重复上述实验，共测出8—10个加速度值。

(6)应用公式 $g = a \cdot L/h$ ，算出8—10个重力加速度的值（ L 是气垫导轨单支脚与双支脚之间的距离）。

(7)求出重力加速度的平均值作为实验测出的重力加速度，并求出它的误差。

$s(\text{m})$	$t_1(\text{s})$	$v_1(\text{m/s})$	$t_2(\text{s})$	$v_2(\text{m/s})$	$a(\text{m/s}^2)$	$g(\text{m/s}^2)$	$g(\text{m/s}^2)$
0.500	0.0187	0.535	0.0142	0.704	0.210	9.80	0.05
	0.0165	0.606	0.0132	0.758	0.207	9.66	0.09
0.600	0.0141	0.709	0.0115	0.870	0.211	9.85	0.10
	0.0159	0.629	0.0125	0.800	0.204	9.52	0.23
0.700	0.0173	0.578	0.0126	0.794	0.211	9.85	0.10
	0.0155	0.645	0.0119	0.840	0.207	9.66	0.09
0.800	0.0166	0.602	0.0119	0.840	0.215	10.03	0.28
	0.0136	0.725	0.0108	0.926	0.208	9.71	0.04
0.900	0.0178	0.562	0.0120	0.833	0.210	9.80	0.05
	0.0151	0.662	0.0111	0.901	0.207	9.66	0.09

注意

(1)操作(2)中滑块只能从单脚端滑向双脚端调节，不必考虑反向滑动时的情况，这样可以抵偿滑块运动时受到的阻力。

(2)因空气对滑块的阻力与滑块的速度有关，因此实验中滑块的速度和调节时滑动的速度不要差得太大。

实例 实验数据和结果如上页列表，并可求出：

$$d = 0.0100\text{m}, h = 0.0300\text{m}, L = 1.40\text{m}.$$

$$\bar{g} = 9.75\text{m/s}^2, \Delta g = 0.11\text{m/s}^2,$$

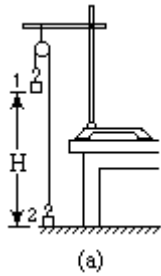
$$g = 9.75 \pm 0.11\text{m/s}^2, E = 1.4\%.$$

方法三

器材 秒表，米尺，定滑轮，铁架台，钩码，细绳，砝码，橡皮泥等。

操作

(1)如图(a)安装实验装置。跨过定滑轮的细绳两各悬挂一个质量是 M 的钩码。调节绳长，当钩码2接触地面时，钩码1在比较接近定滑轮的地方。



(2)在钩码 1 上粘适量的橡皮泥(质量为 m_0)，使系统获得一个初速度后能作匀速运动(目测)。

(3)用米尺测量出钩码 1 底部到地面的高度 H 。

(4)在钩码 1 上加上质量为 m 的砝码，手持钩码 2 保持系统静止。

(5)释放钩码 2 的同时开启秒表，直至钩码 1 底部碰地时停表，记下系统运动的时间 t 。

(6)用 $a=2H/t^2$ 算出系统的加速度。

(7)改变 m ，重复以上步骤，可测得一系列的 (m, a) 值。

(8)因为系统加速度 $a=mg/(2M+m_0+m)$ ，所以可以用 $g=a(2M+m_0+m)/m$ 计算出一系列 g 值。求出它们的平均值作为测量的重力加速度，并求出误差。也可以用图象法处理实验数据，以纵轴表示加速度，横轴表示 $m/(2M+m_0+m)$ ，可得一根直线，用图解法求出直线的斜率，就是重力加速度 g 。

注意

(1)要选用摩擦力小、转动稳定的定滑轮。

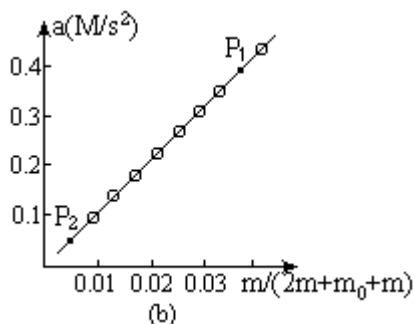
(2)用秒表计时较易产生误差，因此每改变一次 m 都要多次测量 t 。

实例 某次实验数据如下表：

$H=1.60\text{m}$ ， $m_0=0.0091\text{kg}$ ， $M=0.100\text{kg}$ ，表中的 t 是多次测量求得的平均值。

$m(\text{kg})$	$t(\text{s})$	$a(\text{m/s}^2)$	$g(\text{m/s}^2)$	$m/(2M+m_0+m)$
0.0020	5.9	0.092	9.7	0.0095
0.0030	4.8	0.14	9.8	0.014
0.0040	4.2	0.18	9.7	0.019
0.0050	3.7	0.23	10.0	0.023
0.0060	3.4	0.28	9.9	0.028
0.0070	3.2	0.31	9.6	0.032
0.0080	3.0	0.36	9.6	0.037
0.0100	2.7	0.44	9.6	0.046

可得 $g=9.74\text{m/s}^2$ ， $g=0.11\text{m/s}^2$ ，则 $g=9.74 \pm 0.11\text{m/s}^2$ 。也可以用图象法处理实验数据：以横轴表示 $m/(2M+m_0+m)$ ，以纵轴表示 a ，作出的图线是一条直线(图 b)，在直线上取两点 $P_2(0.005, 0.05)$ ， $P_1(0.041, 0.40)$ ，可以求出直线的斜率



$$k = \frac{0.40 - 0.05}{0.041 - 0.005} \text{ m/s}^2$$

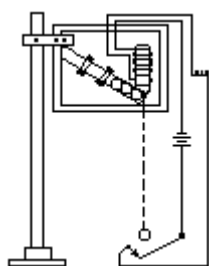
$$= 10 \text{ m/s}^2, \text{ 即重力加速度。}$$

方法四

器材 小钢球，贮放小钢球的倾斜玻璃管，控制释放小钢球的电磁铁（用铁氧体材料作铁芯），微动开关（常闭），碰撞开关（要求受小钢球碰撞时触点会分开，触点最好用废旧继电器上的触点制成），秒表，钢卷尺等。

操作

(1) 接通电源，将 10 个以上小球放入玻璃管中，第一个小球即被吸住（如图）。



(2) 轻触一下微动开关的同时，秒表开始计时。在线路断开的一瞬间，电磁铁失去磁性，第 1 只小球被释放自由下落，当它打击地面上的碰撞开关时，电路迅速断开一次，使吸住的第 2 个小球又被释放……，直到最后一只小球碰到碰撞开关时，停止计时。

(3) 将秒表记下的时间 t 除以小球的个数 n ，就可得到小钢球下落的平均时间 \bar{t} 。再用钢卷尺测量出从被吸住的小钢球的下沿到碰撞点的距离 h ，即可测到重力加速度 $g=2h/\bar{t}^2$ 。

注意

(1) 下落高度 h 不宜小于 2m，小钢球个数不宜少于 10 个。设实验者开、停秒表各有 0.1s 的误差（必须经过一定的训练才能达到这个水平），即 $t=0.2\text{s}$ ，在上述实验条件下， t 约为 6.3s，则计时误差 $E_t=0.2/6.3=3.2\%$ 。

(2) 电磁铁线圈的匝数和电流都要由实验测定。在能完成实验功能的前提下，磁性尽量弱一些，以减少剩磁的影响。

(3) 小钢球的大小可自由选择，钢球越小，下落过程中受空气影响越明显。当 h 不大于 2m 时，只要钢球直径不小于 1mm 即可。

建议 小钢球开始下落时由于电磁铁剩磁等因素可能延滞一段时间 t ，这会造成一定的系统误差。为了消除这个系统误差，可用下述实验

方法。

改变 h 做两次实验，则

$$\begin{cases} h_1 = \frac{1}{2}g(\bar{t}_1 - \Delta t)^2 \\ h_2 = \frac{1}{2}g(\bar{t}_2 - \Delta t)^2 \end{cases},$$

即

$$\begin{cases} \bar{t}_1 - \Delta t = \sqrt{2h_1/g} \\ \bar{t}_2 - \Delta t = \sqrt{2h_2/g} \end{cases}$$

两式相减，并整理出 g 的表达式为

$$g = 2(\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})^2 / (\bar{t}_1 - \bar{t}_2)^2。$$

说明用这种方法测出的 g 与 t 无关，即消除了由 t 带来的系统误差。

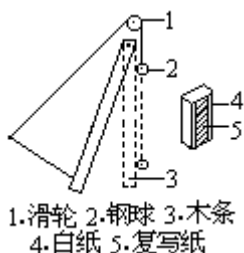
但值得注意的是，这种方法会增大由于计时不准带来的偶然误差。分析如下：设 $h_1=2.00\text{m}$ ， $h_2=1.00\text{m}$ ， $n=10$ ，那么 $t_1=6.3\text{s}$ ， $t_2=4.5\text{s}$ ，计时的相对误差为 $2(t_1 + t_2)/(t_1 - t_2) = 2 \times (0.2 + 0.2)/(6.3 - 4.5) = 44\%$ ，即使不考虑测量 h 的误差，实验结果也可能有 40% 以上的误差。减小这个偶然误差可以用的方法是：同一个 h 多次测量 t ，以减小 t ；增大 n 的数目；适当地增大 h_1 ，减小 h_2 。

方法五

器材 长方木条（长约 1.5m），钢球（直径约 1.5cm），秒表，细绳，复写纸，米尺等。

操作

(1) 在木条上端钻孔安装一转轴，做成一个摆。细绳吊着钢球跨过定滑轮悬挂起来。调整定滑轮的位置，使钢球与竖直悬挂的木条接触时，悬挂钢球的细绳也处在竖直位置（如图）。



(2) 在木条下端也固定一根细绳，用手同时拉住两根细绳头，使木条偏离竖直位置约 20° ，钢球在木条上端附近。

(3) 释放后注意观察钢球与木条相撞的位置，在此附近贴上一张长 20cm 的白纸条，在白纸上再覆盖一张复写纸。

(4) 恢复到原来位置，在木条上记下钢球的初始位置后再次释放，钢球与木条相撞后在木条白纸上留下点迹。重复 10 次，在白纸上留下十个点。作一个能包围这十个点的最小的圆。用米尺测量出钢球初始位置 and 这个圆的圆心之间的距离，就是钢球下落的距离 h 。

(5) 测出木条在小于 10° 角内摆动 10 次的时间 t ，然后求出木条的摆动周期 $T=t/10$ 。

(6)由 $h = \frac{1}{2}g(T/4)^2$, 可算出 $g = 32h / T^2$ 。

分析 因为 $g = 3200h / t^2$,

所以 $E_g = E_h + 2E_t$ 。

设 $\Delta h = 1\text{cm}$, $h = 1.20\text{m}$, $\Delta t = 0.2\text{s}$, $t = 20.0\text{s}$, 则 $E_g = \frac{\Delta h}{h} + \frac{2\Delta t}{t}$
 $= \frac{1}{120} + \frac{2 \times 0.2}{20} = 2.8\%$, 即测出的重力加速度可能有3%的误差。

59 物体的惯性

惯性是物体保持原来的运动状态的一种属性，实验通常是通过物体运动状态的改变来显示物体的惯性的。惯性是一种与物体的运动状态无关的量，应注意纠正速度快惯性大的错误观点。本实验方法一、二、三分别显示了固体、流体、气体的惯性。

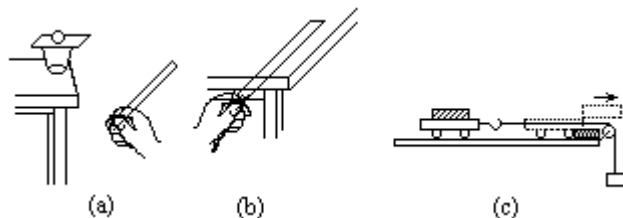
方法一

器材 玻璃杯，光滑塑料片，乒乓球，木棒，纸条，小车，金属块，木板，钩码等。

操作

(1)在普通玻璃杯上，搁一块光滑的塑料片（或木片），塑料片上放一只乒乓球（乒乓球放在杯子的正上方，为防止乒乓球滚动，可在乒乓球下加一个小垫圈）。

(2)用棒对准塑料片沿水平方向用力一击，可以看到塑料片突然飞出，乒乓球却安然地落在玻璃杯中。（图 a）



(3)将盛水的茶杯放在桌上的纸条上。手持纸条的一端慢慢地拉动，茶杯随纸条移动。如果迅速地将纸条抽走，茶杯安然不动。（图 b）

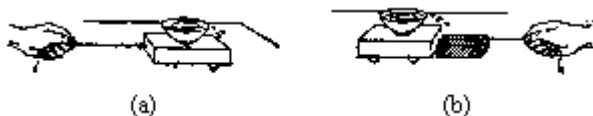
(4)将金属长方体放在小车上，钩码用细绳通过定滑轮拉着小车作加速运动（加速度应大一些），当小车遇到障碍物突然停止时，金属长方体就越过小车表面向前运动（图 c）。

方法二

器材 瓷碗，小车，细绳等。

操作

(1)将瓷碗内盛满水，放在小车上，突然急速拉动小车。碗内原来静止的水由于惯性，会向小车运动的相反方向泼出（图 a）。



(2)拉着小车在桌面上作匀速运动，小车遇到障碍物而突然停止，碗中原来运动的水由于惯性，会向小车运动的前方泼出（图 b）。

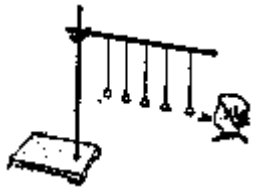
方法三

器材 铁架台，铁杆，细线，自制圆锥形薄纸筒若干个。

操作

(1)将铁杆水平固定在铁架台上，用细线将若干个圆锥形薄纸筒挂在铁杆上，高度相同。

(2)用嘴沿着纸筒排列的方向短促地吹一口气（如图），可看到近处的纸筒立即被吹动，随后远处的纸筒也被吹动。这说明虽已停止吹气，但被吹动的空气不会立即停止运动，它要依靠惯性继续向前运动。



60 牛顿第一定律

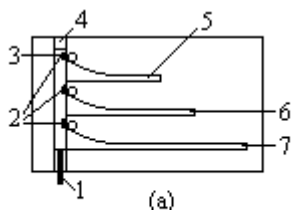
牛顿第一定律是以伽利略的理想实验为依据的。理想实验是以真实实验为原型的推理思维的结果，是一种研究物理规律的重要思想方法。本实验方法一用粗糙程度不同的表面做实验，推论到无限光滑的平面；方法二用不同倾角的光滑平面做实验，推论到完全水平的光滑平面。两种方法都用了与伽利略相类似的推理方法。

方法一

器材 投影仪，自制伽利略实验演示仪等。

伽利略实验演示仪制作方法

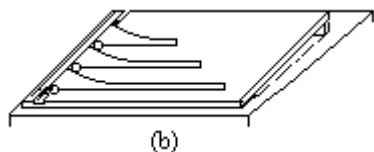
仪器由底盘、斜面导轨和控制器三部分组成[俯视图如图(a)]。底盘是一块 220mm 长、160mm 宽的有机玻璃，四边装有边框，四角装有调整螺丝。斜面导轨由 10mm 宽、150mm 长的三根木条组成，第一根木条上铺上毛巾，第二根木条上铺上粗布，第三根木条和导轨的表面都加工得非常光滑。三根导轨的左端装上等高的斜面，且平行地固定在底盘上。控制器由有机玻璃槽和抽条组成。在三根导轨的左边做一条槽，使有机玻璃抽条能在槽中抽动。制作 10mm 宽、120mm 长的有机玻璃抽条一根，在抽条上粘上三块磁性塑料，间隔距离与斜面导轨相同。把抽条放入槽中，在抽条上、下的底盘上粘好档板，使抽条能在槽中自由抽动而不脱出。



(a)
1.抽条把手 2.磁性塑料 3.抽条 4.抽条槽
5.铺毛巾木条 6.铺粗布木条 7.光滑木条

操作

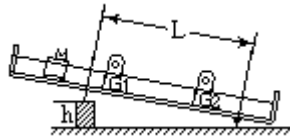
(1)调整好投影仪的聚焦，把伽利略实验演示仪平放在投影仪上，上端适当地垫高一些如图(b)。



(2)让小铁球被磁性塑料吸住后，拉动抽条把手，三只小铁球同时被释放。可以看到小铁球最后停在三根导轨上不同的位置，在毛巾表面上前进的距离最短，在粗布的表面前进的距离长些，而在光滑的导轨上前进的距离最长。推理可以得出如下结论：如果物体在运动中不受任何力的作用，它的速度将保持不变，永远运动下去。

方法二

原理 将长 L 的气垫导轨的一端垫高 h (如图)，如果不考虑阻力的作用，则滑块下滑的加速度 $a=g \cdot h/L$ 。逐步减小 h ， a 也将逐步变小，作出 $a-h$ 图，图中得到的是一条直线 (因为 $a \propto h$)。如果这条直线经过原点，即可推理得到结论：当 $h=0$ ，即滑块所受的合外力为零时，滑块将保持匀速直线运动的状态。



器材 气垫导轨，数字毫秒计。

操作

(1)分两步将气垫导轨调平[详见实验 58 方法二操作(1)、(2)]。

(2)在单支脚下垫上高度为 h (例如 6.00cm) 的垫块。让滑块从导轨的单脚端滑向双脚端，毫秒计记下滑块经过两个光电门时的挡光时间 t_1 和 t_2 。如果挡光框两个前沿之间的距离是 d ，则可认为滑块经过两个光电门时的即时速度分别是 $v_1=d/t_1$ 和 $v_2=d/t_2$ 。从标尺上读出两个光电门之间的距离 s ，则滑块的加速度 $a = (v_2^2 - v_1^2) / (2s)$ 。

(3)垫块的高度 h 不变，改变滑块滑行的初速度或初始位置，再重复测量两次加速度，将三次测量的平均值作为测量值 a 。

(4)将垫块的高度 h 减少 0.50cm，重复以上操作(2)和(3)，直至垫块的高度减到 3.00cm 为止。

(5)用线性回归法求出 $a-h$ 直线的截距 b 和截距的误差 Δb 。如果 $a-h$ 直线经过原点(即 $b = 0$)，则可以认为当 $h=0$ 时，滑块的加速度 $a=0$ ，即滑块作匀速直线运动。

实例 某次实验数据如下：挡光框宽度 $d=1.00\text{cm}$ ，两个光电门之间的距离 $s=75.0\text{cm}$ 。

序号	垫高 (cm)	t_1 (ms)	t_2 (ms)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	a (m/s ²)	a (m/s ²)
1	6.00	27.9	11.3	0.358	0.885	0.437	0.437
		24.1	11.0	0.415	0.909	0.436	
		25.3	11.1	0.395	0.901	0.437	
2	5.50	25.9	11.6	0.386	0.862	0.396	0.398
		26.2	11.6	0.382	0.862	0.398	
		24.4	11.4	0.410	0.877	0.401	
3	5.00	26.0	12.0	0.385	0.833	0.364	0.364
		25.7	11.9	0.389	0.840	0.370	
		26.2	12.1	0.382	0.826	0.358	
4	4.50	31.1	13.0	0.322	0.769	0.326	0.330
		29.1	12.8	0.344	0.781	0.328	
		27.2	12.5	0.368	0.800	0.337	
5	4.00	29.4	13.6	0.340	0.735	0.283	0.289
		33.0	13.7	0.303	0.730	0.294	
		28.6	13.4	0.350	0.746	0.290	
6	3.50	31.6	14.4	0.317	0.694	0.255	0.253
		34.5	14.7	0.290	0.680	0.253	
		35.5	14.8	0.282	0.676	0.252	
7	3.00	35.8	15.7	0.279	0.637	0.218	0.217
		34.7	15.6	0.288	0.641	0.219	
		37.2	15.9	0.269	0.629	0.215	

用线性回归法拟合出 $a-h$ 直线，截距 $b=-0.00071\text{m/s}^2$ ， $b=0.0031\text{m/s}^2$ ，相关系数 $r=0.998$ 。因为 $b \approx |b|$ ，说明 $a-h$ 直线过原点，因此可以认为当 $h=0$ 时，滑块的加速度 $a=0$ ，滑块作匀速直线运动。

注意

(1)、(2)同实验 58 方法二。

(3)垫块的高度 h 不要减少到太小，因为当 h 很小时，空气对滑块的阻力和气垫导轨残存的摩擦力会变得明显起来。

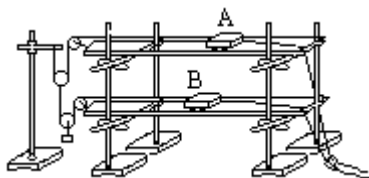
本实验讨论一个物体的质量不变时，它的加速度 a 和它所受的力 F 之间的关系。方法一、二、三只比较了两种情况，优点是可以抵消一部分系统误差。方法四作了更全面的讨论，并且用线性回归法来证实 a 与 F 成正比。

方法一

器材 带有定滑轮的木板，铁架台，小车，滑轮，钩码，大号铁夹，米尺，细绳，粘泥等。

操作

(1)用 5 个铁架台将两块木板架起，(如图)。由钩码和两个动滑轮组成动力系统，如果不考虑滑轮本身的质量，拉小车 B 的力是拉小车 A 的 2 倍，即 $F_1:F_2=1:2$ 。每辆小车后面拖一根细绳，绕过木板后竖直下垂被一固定在桌面上的大号铁夹夹住。



(2)用粘泥将两辆小车的质量调整得完全一样，用小车后面的细绳将小车拉到木板右端后用铁夹夹紧细绳，使小车静止。

(3)在小车的起始位置做上记号，然后松开铁夹，两小车便由静止开始作匀加速运动。过适当的时候，再夹住铁夹，使小车停止运动。

(4)测量出两小车运动的距离 s_1 和 s_2 ，可由 $s_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2$ ， $s_2 = \frac{1}{2} a_2 t_2^2$ 两式相除得 $s_1:s_2=a_1:a_2$ 。如果测得 $s_1:s_2=1:2$ ，可知 $a_1:a_2=F_1:F_2$ 。

(5)改变动滑轮上所挂的钩码的质量，重复以上实验，可以得到相同的结论：小车的加速度与它所受的力成正比。

注意

(1)要选用轻而且转动灵活、稳定的滑轮。

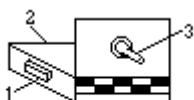
(2)大号铁夹的弹力要强一些，以免细绳在里面打滑。

方法二

器材 小车，电磁铁，小灯泡，微动开关，砝码盘，细绳，砝码，米尺，低压电源等。

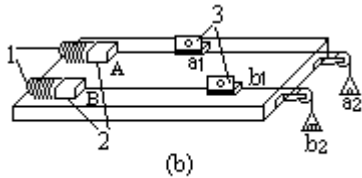
操作

(1)用木板，小灯泡和微动开关制成两个碰撞指示器(图 a)，使小车撞到木板后，小灯泡会发亮。



1.微动开关 2.木块 3.小灯泡

(2)如图(b)安装好实验装置。在小车上粘贴一块软铁，以使小车能被电磁铁吸住。



1.电磁铁 2.小车 3.碰撞指示器

(3)将两个砝码盘中都装上 20.0g 砝码，两个碰撞指示器固定在离电磁铁一样远的地方。释放小车，观察两辆小车是否同时到达碰撞指示器。如有先后，可用粘泥调整两个车的质量，直至两个碰撞指示器的小灯同时闪亮为止。

(4)在 a_2 、 b_2 两个砝码盘中分别放 20g 和 40g 砝码，将碰撞指示器 b_1 固定在靠近定滑轮处，反复调节碰撞指示器的位置，直至控制电磁铁释放两小车后，两灯同时闪亮。

(5)测量出碰撞指示器 a_1 离小车前沿的距离 s_1 ，可得 $s_1 : s_2 = 1 : 2$ ，即 $s_1 : s_2 = F_1 : F_2$ 。

(6)改变砝码盘中砝码的质量比，重复以上实验，可得到同样的 $s_1 : s_2 = F_1 : F_2$ 的结论。因为小车是从静止开始作匀加速运动的，有

$s = \frac{1}{2}at^2$ ，而 $t_1 = t_2$ ，所以， $a_1 : a_2 = s_1 : s_2 = F_1 : F_2$ ，即小车的加速度同时，它的加速度和它所受的力成正比。

注意

(1)为了不使学生产生错误的概念，实验中要说明用砝码的重力作为对小车的拉力是近似的。

(2)若没有恰当的电磁铁，可用两根细绳牵住小车，实验时只要同时释放即可。

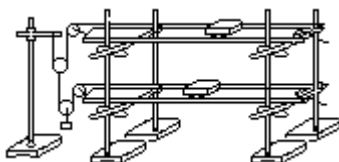
(3)因为在实验中未考虑小车所受的摩擦力，因此要尽量选用摩擦力小的小车。

方法三

器材 带有滑轮的木板，打点计时器，小车，滑轮，铁架台，细绳，钩码等。

操作

(1)装置与方法一相似，但在两块木板的后端安装两个打点计时器（如图）。



(2)将两辆质量调整得完全一样的小车，拉至木板尾端后释放，动力系统拉着两辆小车作匀加速运动，打点器在纸带上打出一列点子。

(3)从两条纸带上测量出两辆小车的加速度（具体方法可参阅实验 54 方法四）。 a_1 和 a_2 ，可得 $a_1 : a_2 = 1 : 2$ 。

(4)观察动力系统，可知 $F_1 : F_2 = 1 : 2$ 。所以， $a_1 : a_2 = F_1 : F_2$ ，即加速度和力成正比。

注意

(1)因小车与纸带都有摩擦，因此动滑轮下挂的钩码应适当地重一些。

(2)如果摩擦力很明显，可以预先将木板的尾端架得略高一些，使小车在不受拉力的情况下能拖着纸带匀速前进。

方法四

原理 本实验用线性回归法来证明两个量成正比。方法如下：

将 x 、 y 两个变量进行线性回归，求出回归直线的截距 b 、截距的误差 Δb 和相关系数 r 。如果 r 达到线性关系显著的标准，即证实 y 与 x 成线性关系；如果同时还有 $b = 0$ ，说明回归直线经过原点，就可证实 y 与 x 成正比。

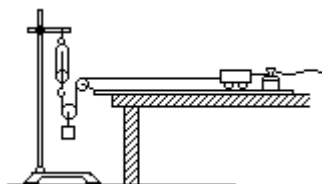
附：线性关系显著的标准（详见基础篇第 60、61 页）

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11
r	1.000	0.990	0.959	0.917	0.874	0.834	0.798	0.765	0.735
n	12	13	14	15	16	17	18	19	20
r	0.708	0.684	0.661	0.641	0.623	0.606	0.590	0.575	0.561

器材 带滑轮的木板，弹簧秤，小车，打点计时器，滑轮，细绳，铁架台，钩码等。

操作

(1)如图安装好实验器材，悬挂动滑轮的两根绳子要竖直。在不考虑动滑轮的转动惯量时，弹簧秤的读数就是拉小车所用力的大小。



(2)将小车拉至打点计时器附近，接通打点器电源后释放小车。当小车作匀加速运动时，从弹簧秤上读出拉小车的力 F 。

(3)取下小车后面的纸带，从纸带上测量出小车的加速度 a （具体方法可参阅实验 54 方法四）得到一组 (F, a) 值。

(4)改变挂在动滑轮下的钩码的质量，重复实验操作(2)、(3)，可测得不同的 F 值和 a 值。共测出 6 到 7 组 (F, a) 值。

(5)用线性回归法证实 a 与 F 成正比。

注意

(1)要选用表面性质比较一致的木板和转动灵活、稳定的滑轮，以便使弹簧秤的读数比较稳定。

(2)如果木板和打点计时器对小车的摩擦比较明显、可在板尾端填上适当高度的小木块，使木板形成一定的倾角。前后移动小木块的位置，使小车在不受拉力的情况下能拖着纸带匀速滑下。此时可认为小车受的阻力得到了补偿。

62 加速度和质量的关係

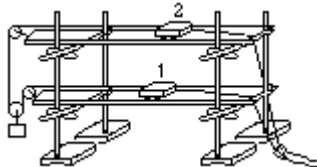
本实验讨论当作用力不变时，一个物体的加速度 a 和它的质量 m 之间的关系。方法一、二、三只比较两种情况，其优点是可以抵消一部分系统误差。方法四作了更全面的讨论，用图线法或线性回归法证实 a 与 $1/m$ 成正比。

方法一

器材 带有定滑轮的木板，铁架台，小车，滑轮，大号铁夹，米尺，天平，砝码，钩码，细绳，粘泥等。

操作

(1)用四个铁架台将两块木板架起（如图），由钩码和一个动滑轮组成动力系统，如果不考虑动滑轮的质量，那么作用在两辆小车上的力是一样的。每辆小车后面拖一根细绳，绕过木板后竖直下垂，被一固定在桌面上的大号铁夹夹住。



(2)用粘泥或砝码调整小车的质最，使小车 2 的质量是小车 1 的质量的 2 倍。用小车后面的细绳将小车拉到木板右端后用铁夹夹紧细绳，使小车静止。

(3)在小车的起始位置做上记号，然后松开铁夹，两小车便由静止开始作匀加速运动。过适当的时候，再夹住铁夹，使小车停止运动。

(4)测量出两小车运动的距离 s_1 和 s_2 ，可有

$$s_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2,$$
$$s_2 = \frac{1}{2} a_2 t_2^2.$$

两式 $s_1 : s_2 = a_1 : a_2$ 。如果测得 $s_1 : s_2 = 2 : 1$ 可知 $a_1 : a_2 = 2 : 1$ ，即 $a_1 : a_2 = m_2 : m_1$

(5)改变动滑轮上所挂钩码的质量，重复以上实验。

(6)改变两辆小车的质最比，重复以上实验，都可以得到同样的结论：作用力相同时，小车的加速度与它的质量成反比。

注意 同实验 61 方法一。

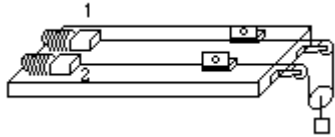
方法二

器材 小车，电磁铁，小灯泡，微动开关，定滑轮，动滑轮，天平，砝码，细绳，米尺，钩码，低压电源等。

操作

(1)用木块、小灯泡和微动开关制成两个碰撞指示器[见实验 61 方法二图(a)]，使小车撞道木块后，小灯泡会发光。

(2)如图装好实验装置，在小车上粘贴一块软铁，以使小车能被电磁铁吸住。



(3)用粘泥或砝码调节两小车的质量，使 $2m_1=m_2$ 。

(4)将碰撞指示器 1 固定在靠近定滑轮的地方。反复调节碰撞指示器 2 的位置，直至控制电磁铁释放两小车后，两灯泡同时闪亮。

(5)用米尺测量出两小车运动的距离 s_1 和 s_2 ，可得 $s_1:s_2=2:1$ ，即 $s_1:s_2=m_2:m_1$ 。

(6)改变滑轮下钩码的质量，重复操作(3)、(4)、(5)。

(7)改变两小车的质量比，重复以上实验，可以得到相同的结论 $s_1:s_2=m_2:m_1$ 。因为小车是从静止开始作匀加速运动的，有 $s=\frac{1}{2}at^2$ ，而 $t_1=t_2$ ，所以 $a_1:a_2=s_1:s_2=m_2:m_1$ ，即在作用力相同时小车的加速度和它的质量成反比。

注意

(1)若没有电磁铁，可用两根细绳牵住小车，实验时只要同时释放即可。

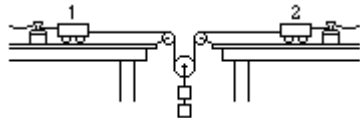
(2)因为在实验中未考虑小车所受的摩擦力，因此要尽量选用摩擦力小的车。

方法三

器材 带滑轮的木板，打点计时器，小车，滑轮，天平，砝码等。

操作

(1)如图安装好实验装置，在两块木板的尾端各装上一个打点计时器。



(2)将两辆小车拉至木板尾端附近后释放，动力系统拉着两小车作匀加速运动，打点器便在纸带上打出一列点子。

(3)从两条纸带上测量出两辆小车的加速度（具体方法参阅实验 54 方法四） a_1 和 a_2 。

(4)用天平测量出两辆小车的质量 m_1 和 m_2 ，可得 $a_1:a_2=m_2:m_1$ 。

(5)改变动滑轮下钩码的质量，重复以上实验。

(6)改变两小车的质量比，重复以上实验，都可得到 $a_1:a_2=m_2:m_1$ 的结论，即当作用力相同时，小车的加速度与它的质量成反比。

注意

(1)由于小车和纸带都有摩擦力，因此动滑轮下面的钩码应适当地重一些。

(2)如果摩擦力很明显，可以在木板尾端各垫一块适当高度的木块，使小车在不受拉力的情况下能拖着纸带作匀速运动。

方法四

器材 带滑轮的木板，弹簧秤，小车，打点计时器，滑轮，细绳，

天平，砝码，铁架台，钩码，粘泥等。

操作

(1)如实验 61 方法四图安装好实验器材。悬挂动滑轮的两根绳子要竖直。在不考虑滑轮的转动惯量时，弹簧秤的读数就是拉小车子力的大小。

(2)在小车上装上与小车质量相当的砝码，将小车拉至打点器附近，接通打点器电源后释放小车。当小车作匀加速运动时，从弹簧秤上读出拉小车的力 F 。

(3)取下小车后面的纸带，从纸带上测量出小车的加速度 a （具体方法可参阅实验 54 方法四），用天平测出小车的质量 m ，得到一组 (m, a) 值。

(4)改变小车的质量（减少若干砝码），将小车拉至打点器附近，不要接通打点器电源，释放小车，注意观察弹簧秤读数与原来是否一样。如果读数略有变小，可在钩码上贴上一些粘泥，使小车作匀加速运动时弹簧秤读数与原来相同。

(5)将小车拉至打点器附近，接通打点器电源后释放小车，在纸带上打下一列点子。从纸带上测量出小车的加速度 a ，并用天平测出小车的质量 m ，得到另一组 (m, a) 值。

(6)重复操作(4)、(5)，共测出 6 到 7 组 (m, a) 值。

(7)以横轴代表 $1/m$ ，以纵轴代表 a ，作 $a-1/m$ 图，得到一条过原点的直线，说明在作用力相同时，小车的加速度 a 与小车的质量成反比。也可用线性回归法证实 a 与 $1/m$ 成正比（详见基础篇章 57 页的有关内容）。

注意

同实验 61 方法四。

研究牛顿第二定律，是研究一个多变量函数的问题。处理这类问题的常用途径有两条：一是用多变量组合法；二是用多元回归法。本实验的五种方法都用第一条途径。五种方法采用相同的研究思想不同的实验方法测量物体的加速度。第一种方法用简式计时器计时；第二、三种方法用打点计时器计时；第四种方法用数字毫秒计计时，第五种方法用秒表计时。

多变量的组合法

依次研究每一个变量的变化规律后，要将几个单变量函数组合成一个多变量函数，此过程可称为“多变量的组合”。

(1)如果有二元函数 $f(x,y)$ ，当 x 不变时， $f \propto y$ ，当 y 不变时， $f \propto x$ ，那么一定有 $f \propto x \cdot y$ 。

由 x 不变时， $f \propto y$ 可得

$$\frac{f_1}{y_1} = \frac{f_2}{y_2}$$

由 y 不变时， $f \propto x$ 可得

$$\frac{f'}{x_1} = \frac{f_2}{x_2}$$

将 式代入 式消去 f'

$$\frac{f_1}{x_1 y_1} = \frac{f_2}{x_2 y_2}$$

即 $f \propto xy$ 。

(2)如果有 $f(x,y,z)$ ，当 y,z 不变时， $f \propto x$ ；当 x,z 不变时， $f \propto y$ ；当 x,y 不变时， $f \propto 1/z$ ，那么一定有 $f \propto xy/z$ 。

由 y,z 不变时， $f \propto x$ 可得

$$f_1/x_1 = f_2/x_2$$

由 x, z 不变时， $f \propto y$ 可得

$$f_1/y_1 = f_2/y_2$$

由 x, y 不变时， $f \propto 1/z$ 可得

$$f_1/z_1 = f_2/z_2$$

将 式代入 式消去 f ：

$$\frac{f_1 x_2}{x_1 y_1} = \frac{f_2}{y_2}$$

将 式代入 式消去 f ：

$$\frac{f_1}{(x_1 y_2 / z_1)} = \frac{f_2}{(x_2 y_2 / z_2)}$$

即 $f \propto x \cdot y/z$ 。

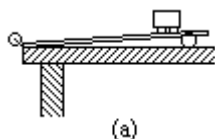
其他多变量的函数关系可用类似方法组合。

方法一

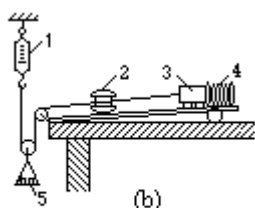
器材 带定滑轮的木板，小车，简式计时器，滑轮，天平，弹簧秤，砝码盘，砝码，米尺，细绳，钩码等。

操作

(1)在木板的后端垫上一块适当厚度的小木块。前后调节小木块的位置，使小车能在木板上匀速（目测）滑下（图 a）。



(2)在一般情况下，筒式计时器是和斜槽轨道配套使用的，但也可对筒式计时器作简单的改制，让它在其他实验中作计时器用。实验装置如图(b)所示。在小车尾部设法固定一个遮光片，当小车经过光电门时能遮断光线。再设法将光电门、电磁铁与筒式计时器连通，使计时器能产生与在斜槽上工作时相同的功能。



1.弹簧秤 2.光电门 3.小车
4.电磁铁 5.砝码盘

(3)操纵筒式计时器释放小车，在小车作加速运动的过程中，迅速读出弹簧秤的读数 F 。当小车遮断光电门的光线时，筒式计时器能记下小车运动的时间 t 。用米尺测量出从电磁铁到光电门的距离 s ，由 $a=2s/t^2$ 算出小车的加速度 a ，即可得到一组 (F, a) 的值。

(4)改变砝码盘中砝码的质量，重复操作(3)。共需要得到7—9组 (F, a) 值。

(5)以横轴代表拉小车的力 F （在不考虑滑轮的质量和摩擦时，弹簧秤上读出的就是拉小车的力），以纵轴代表小车的加速度 a ，作出 $a-F$ 图。如果图线是一条过原点的直线，说明加速度和力成正比。也可以用线性回归法来证实 a 与 F 成正比（详见基础篇章 57 页有关内容）。

(6)固定砝码盘中砝码的质量数，用操作(3)的方法测出小车的加速度 a 。用天平称出小车和砝码盘、砝码的总质量 m ，即可得到一组 (m, a) 的值。

(7)在小车上放置适量的砝码，改变小车的质量，重复操作(6)7—9次。得到7—9组 (m, a) 值。实验中应随时注意弹簧秤的读数有无变化。如果略有变化，可增减砝码盘中的砝码，使其恢复原来的值。

(8)以横轴代表小车的质量 m ，纵轴代表小车的加速度 a ，作 $a-m$ 图。将所得图线与基础篇第 49、50 页中各种关系图线比较，可以发现本图线与上述图中的 A 曲线比较相象，因此可估计 $a \cdot m=k$ 。

(9)以横轴代表 $1/m$ ，纵轴仍代表 a ，作 $a-1/m$ 图。如果图线是一条过原点的直线，说明加速度和质量的倒数成正比，即与质量成反比。也可以用线性回归法来证实 a 与 $1/m$ 成正比（详见基础篇第 57 页有关内容）。

(10)证实当 m 不变时 $a \propto F$ ；当 F 不变时 $a \propto 1/m$ 之后，用多变量组合的方法即可得出 $a \propto F/m$ （详见本实验按语）。

方法二

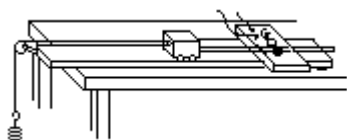
器材 打点计时器，纸带及复写纸，小车，附有定滑轮的长木板，

槽码和槽码钩，细绳，低压交流电源，导线，托盘天平（带有一套砝码），刻度尺等。

操作

(1)在长木板的一端下面垫一块木块，反复移动木块的位置，直至小车可以拖着纸带在斜面上作匀速运动。这时，小车受到的摩擦阻力恰好与小车所受的重力沿斜面方向的分力相等。

(2)如图安装实验器材。接通电源后释放小车，打点器在纸带上打出一系列点子。



(3)用天平测出悬挂的槽码钩和槽码的总质量 m ，使系统产生加速度的力 $F=mg$ 。从纸带上求出系统的加速度 a （具体方法见实验 54 方法四），得到一组 (F, a) 值。

(4)将槽码钩上的部分槽码搬到小车上，改变 F ，但保持系统的总质量不变，重复操作(2)、(3)，得到另一组 (F, a) 值。共重复 7—9 次。

(5)以纵坐标表示加速度 a ，横坐标表示作用力 F ，作出 $a-F$ 图。如果得到一条过原点的直线，便可证明当质量不变时，系统的加速度和它受的力成正比。也可以用线性回归法证实 a 与 F 成正比，具体方法见基础篇第 57 页的有关内容。

(6)保持槽码钩和槽码的总质量不变（即保持 F 不变），在小车上加重物，改变系统的总质量 M ，重复以上操作 7—9 次，得到 7—9 组 (M, a) 值。

(7)探索 a 和 M 的关系，方法同本实验方法一操作(8)、(9)。

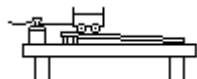
(8)用多变量组合的方法得出 $a \propto F/M$ 的结论（方法见本实验按语）。

方法三

器材 力学台车，长木板，打点计时器，加重物若干，天平，砝码，质地相同的橡皮筋 10 根等。

操作

(1)在长木板的一端下面垫一高度适当的小木块。反复移动小木块的位置，调节木板的倾角，直至力学台车能拖着纸带从木板上匀速滑下，如图。



(2)把一根橡皮筋挂在力学台车上，接通打点计时器的电源后，使橡皮筋保持一定的伸长，拉动小车作匀加速运动。

(3)增加橡皮筋的根数，重复操作(2)，注意橡皮筋每次伸长要一样。

(4)从纸带上求出小车各次运动的加速度（详见实验 54）。以横轴代表橡皮筋根数，纵轴代表小车的加速度，在坐标上作出数据点，如拟合出一根过原点的直线，即可证实加速度与外力成正比（也可用线性回归法来证实，方法见基础篇第 57 页的有关内容）。

(5)在力学台车上加重物可以改变小车的质量。用两根橡皮筋拉动不同质量的小车（每次橡皮筋的伸长要相同），从纸带上可以测量出小车

不同的加速度。

(6)探索小车的加速度和质量的关系，步骤同方法一操作(8)、(9)。

(7)用多变量组合的方法得出 $a \propto F/m$ 的结论(方法见本实验按语)。

注意 本方法在接通打点计时器电源正式操作之前，要进行多次训练，以确保橡皮筋的伸长基本相同。

方法四

器材 气垫导轨，气源，数字毫秒计，天平，砝码等。

操作

(1)接通气源后，将滑块放在导轨上，反复调节单脚端螺丝，直至滑块能基本静止在导轨上。

(2)在导轨上放两个光电门，滑块上安装一个最窄的挡光框，数字毫秒计置 s_2 状态，时间选择开关用最小的一挡(1ms 或 0.1ms)。给滑块一个初速度，使其从导轨的无滑轮端滑向有滑轮端，记下两次挡光的时间。反复调节单脚端螺丝，使两次挡光时间基本相等(如最小计时单位为 1ms 的，应完全相等；如最小计时单位为 0.1ms 的，时间差不能大于 0.3ms)，此时可认为导轨已调平。

(3)在砝码盘中放进适量的砝码，拉着滑块从导轨的无滑轮端滑向有滑轮端。前后两个光电门分别记下挡光时间 t_1 和 t_2 。测量出挡光框两个前沿之间的间距 d ，从导轨标尺上读出两光电门之间的距离 s ，即可求

出滑块的加速度 $a = \frac{(d/t_2)^2 - (d/t_1)^2}{2s}$ 。重复测量三次(滑块的初位置和初速度可变)，求出加速度的平均值。记下砝码盘和其中砝码所受的总重力 F 及加速度 a 。

(4)将砝码盘中的少量砝码(例如 1g)放到滑块上(保持系统的总质量不变)，重复操作(3)，可求出另一组 (F, a) 值。共需要求出 7—9 组 (F, a) 值。

(5)以横轴表示 F ，纵轴表示 a ，作 $a-F$ 图，如果图线是一条过原点的直线，可证实当质量不变时，系统的加速度与其受的合外力成正比。也可用线性回归法证实 a 与 F 成正比，方法见基础篇第 57 页的有关内容。

(6)固定砝码盘中砝码的总质量(使系统产生加速度的力不变)，用加重铁块加在滑块上改变系统的质量。共改变 7-8 次，每次都从毫秒计测出的时间中算出系统的加速度 a ，并用天平测出系统的总质量 M 。

(7)探索系统的加速度 a 和系统的总质量 M 之间的关系，步骤同方法一操作(8)、(9)。

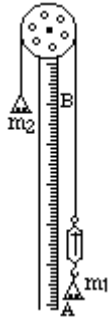
(8)用多变量组合的方法得出 $a \propto F/M$ 的结论(方法见本实验按语)。

方法五

器材 阿特武德机，测力计，砝码盘，砝码，天平，秒表等。

操作

(1)在阿特武德机的滑轮上跨一细绳，绳的左端挂一个砝码盘，右端连接一个测力计，测力计下端挂一个砝码盘，如图所示。



(2) 调节左、右两个砝码盘中砝码的质量，使测力计能拉着 m_1 向上作匀速运动（目测），然后将测力计的读数调成零。

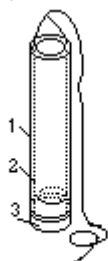
(3) 在左边砝码盘中增加适量的砝码，然后将右边砝码盘从 A 处由静止释放。用秒表记下右边砝码盘由 A 处运动到 B 处的时间 t ，即可由公式 $a=2AB/t^2$ 算出加速度 a 。在物体作匀加速运动的同时仔细地观察并记下测力计的读数 F ，这样可得到一组 (F, a) 的值。

(4) 继续增加左边砝码盘中的砝码，重复操作 (3)，得到另一组 (F, a) 值。总共需要 9 组 (F, a) 值。

(5) 用方法一操作 (5) 相同的方法得出 a 与 F 成正比的结论。

方法一

器材 一个直径约 3cm、长约 30cm 的塑料管，在离管底约 5cm 处的管壁上均匀地钻四个直径为 1mm 的小孔，下端用一个橡皮塞塞住，使它不漏水，上端用长约 1.5m 的细绳拴住（如图）。



1.塑料管 2.小孔
3.橡皮塞

操作

(1) 塑料管内注满水，小孔中有水射出。

(2) 手抓住绳的一端，让塑料管竖直落下。在下落过程中，水停止从小孔中射出，显示了水的失重现象。

(3) 当塑料管落到细绳恰好被拉直时，橡皮塞突然被冲出，这说明水对橡皮塞的压力突然增大，显示了水的超重现象。

注意 橡皮塞不要塞得太紧，以免当绳子张紧时，水不能把塞子冲出去。

方法二

器材 两块普通的砖，一条长约 1m、宽约 1cm 的纸条、吊篮等。

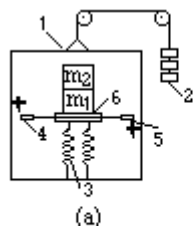
操作

(1) 将长纸条压在两块砖之间，把砖静置在桌上，用力抽纸条，纸条将被扯断。

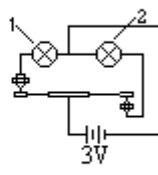
(2) 同样将长纸条夹在两块砖之间，再把它们平放在一个吊篮中，用纱线把吊篮悬挂于高处。用一只手抓住纸条，另一只手用点燃的火柴烧断纱线，让吊篮与两砖自由降落，抓住纸条之手可毫不费力地把纸条完好地抽出，此实验可显示砖的失重现象。

方法三

器材 整个实验装置如图所示，图(a)是实体图，图(b)是电路图。图中的平台是用一块较大的金属板制成，在其左右各焊接一小片金属触片。金属触片分别与两只可调节的螺钉接触，平台下面焊接四只足以承载实验器材的弹簧（四只弹簧的规格要相同）。



1.实验箱 2.钩码 3.弹簧
4.金属触片 5.调节螺钉 6.平台



1.绿灯 2.红灯

操作

(1)将物体 m_1 和 m_2 置于实验箱内的平台上，调节滑轮右边钩码的质量与滑轮左边整个实验箱的质量相等，整个系统处于平衡状态。调节两个螺钉的位置，使它们和金属触片都不接触，这时红、绿灯都不亮。如向物体 m_2 上放置适量的砝码，平台下降，右边的金属片与螺钉接触，红灯亮；如拿走 m_2 平台上升，左边的金属触片与螺钉接触，绿灯亮。上述结果说明：红灯亮，表示平台所受的重力增大；绿灯亮，表示平台所受的重力减小。

(2)重新让整个实验系统恢复平衡状态，在滑轮右边添加适量的钩码，使实验箱向上作加速运动。绿灯亮，说明物体平台处于“超重”状态。

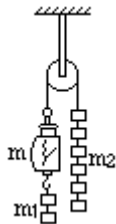
(3)减少滑轮右边的钩码，使实验箱向下作加速运动。红灯亮，说明平台处于“失重”状态。

方法四

器材 有记忆功能的测力计（如 J2138 型高中运动学、动力学组合教具中的双指针式测力计），定滑轮，钩码，细绳等。

操作

(1)细绳跨过定滑轮，一端通过质量为 m 的测力计悬挂一串质量为 m_1 的钩码，另一端直接悬挂质量为 m_2 的钩码（如图）。



(2)调整测力计，使其能记忆拉力的最大值，使 $m_2 > m + m_1$ 。用手托住右边钩码，使系统静止，从测力计上读出左边钩码的重力 G 。释放右边钩码，在系统作加速运动的过程中，测力计可记下左边钩码的“重力” G' 。由 $G' > G$ 可看出左边钩码处于“超重”状态。

(3)根据牛顿运动定律可知，在不考虑滑轮的质量与摩擦时， $G' = G + \frac{m_1(m_2 - m_1 - m)}{m_1 + m_2 + m}g$ 。检验实验值与理论值在误差范围内是否吻合。

(4)调整测力计，使其能记忆拉力的最小值。调整滑轮左右钩码的个数，使 $m_1 + m > m_2$ 。用手拉住右边钩码，使系统静止，从测力计上读出左边钩码的重力 G 。释放右边钩码，在系统作加速运动的过程中，测力计可记下左边钩码的“重力” G' 。由 $G' < G$ 可看出左边钩码处于“失重”状态。

(5)根据牛顿运动定律可知，在不考虑滑轮的质量与摩擦时， $G' = G - \frac{m_1(m_1 + m - m_2)}{m_1 + m_2 + m}g$ 。检验实验值与理论值在误差范围内是否吻合。

注意

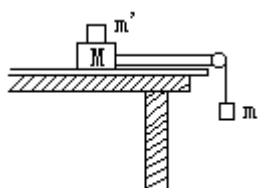
(1)系统的加速度宜大不宜小。这样，可以使“超重”和“失重”比较明显。

(2)如果没有能记忆的测力计，也可用普通的弹簧秤代替。用普通的弹簧秤时必须要在运动过程中观察，实验过程比较困难。

如果在实验中用一个力 F 拉着一物体在水平面上作匀速直线运动，则物体所受的摩擦力的大小等于 F 。但是在实验中要实现匀速直线运动是比较困难的，因此本实验的两种方法都在匀加速运动中测定滑动摩擦系数。两种方法都用图象法来处理实验数据。图象法可考察实验的全过程，能提高实验的可靠性。

方法一

原理 用如图(a)实验装置来测定木块 M 和水平木板之间的摩擦系数。 m 和 m_0 是质量可调的片码，细绳的质量，滑轮的摩擦与质量均忽略。



(a)

实验过程中，保持 $m+m_0 = m_0$ 不变，改变 m 的大小，求出系统不同的加速度 a 。根据牛顿第二定律，系统的加速度 a

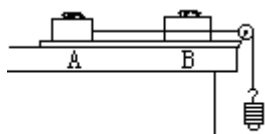
$$a = \frac{mg - \mu(M + m_0 - m)g}{M + m_0} = \frac{(1 + \mu)g}{M + m_0} m - \mu g_0$$

作出 $a - m$ 图，得到一直线，从图线上求出截距 b 即可得到 $\mu = -b/g_0$ 。

器材 待测木板（带定滑轮），待测木块，片码钩、片码若干，秒表，米尺，气泡水平仪，细绳等。

操作

(1) 按图(b)安装好实验装置，用气泡水平仪将待测木板调成水平状态。



(b)

(2) 在待测木板上划 A 和 B 两条线，用米尺测量出 A、B 之间的距离 s 。

(3) 在片码钩上置适当数量的片码，总质量为 m ，用手按住木块，使其前沿对准 A 线，保持系统静止。在释放的同时使秒表开始计时，当木块的前沿到达 B 线时停止计时，秒表记下木块由静止从 A 开始向 B 作匀加速运动的时间 t 。

(4) 由 $a=2s/t^2$ 算出木块的加速度 a ，得到一组 (m, a) 值。

(5) 将片码钩上的部分片码移到木块上，重复操作(3)、(4)，可得到另一组 (m, a) 值。一共要得到 7-9 组 (m, a) 值。

(6) 以横坐标代表片码钩以及挂在上面的片码的总质量 m ，以纵轴代表系统的加速度 a ，作出 $a - m$ 图，可得到一条直线。求出直线的截距 b ，即可用 $\mu = -b/g_0$ 得到待测木块和木板之间的滑动摩擦系数 μ 。

注意

(1) 因为 $a = 2s / t^2$, 所以加速度的相对误差 $E_a = \frac{\Delta s}{s} + \frac{2\Delta t}{t}$, Δs 和 Δt

一般来说是限定的, 因此 A、B 两条线之间的距离应该尽可能长一些, 而且系统的加速度不宜过大。

(2) 由于秒表计时的偶然误差较大, 因此每种情况时间 t 要重复测量多次, 然后求平均值。

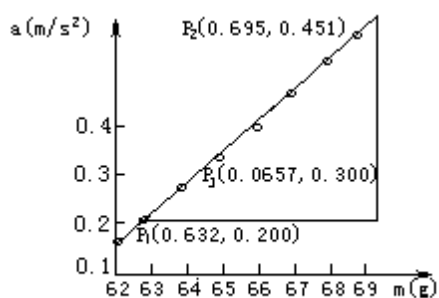
实例 在某次实验中, A、B 之间的距离 $s=0.700\text{m}$, 测量数据如下:

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$t_1(\text{s})$	2.9	2.6	2.5	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8
$t_2(\text{s})$	3.0	2.6	2.4	2.3	2.0	2.1	1.8	1.8
$t_3(\text{s})$	3.0	2.7	2.4	2.4	2.2	2.0	1.9	1.9
$t_4(\text{s})$	2.8	2.8	2.6	2.4	2.1	2.0	1.9	1.7
$t_5(\text{s})$	3.1	2.7	2.4	2.2	2.2	1.9	2.0	1.8
$t_6(\text{s})$	3.1	2.8	2.3	2.3	2.0	2.0	2.0	1.8
$t_7(\text{s})$	3.1	2.6	2.5	2.2	2.0	2.1	1.8	1.9
$t_8(\text{s})$	3.0	2.7	2.5	2.3	2.1	2.0	1.8	1.8
$\bar{t}(\text{s})$	3.00	2.69	2.45	2.29	2.09	2.01	1.89	1.81
$a(\text{m/s}^2)$	0.156	0.193	0.233	0.267	0.321	0.347	0.392	0.427
$m(\text{kg})$	0.062	0.063	0.064	0.065	0.066	0.067	0.068	0.069

以横轴代表 m , 纵轴代表 a , 作出 $a - m$ 图。用图解法求出此线的斜率和截距(图 c)

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{0.451 - 0.200}{0.0695 - 0.0632} = 39.8,$$

$$b = y_3 - kx_3 = (0.300 - 39.8 \times 0.0657)\text{m/s}^2 \\ = -2.31\text{m/s}^2。$$



(c)

因此滑动摩擦系数 $\mu = -b/g = 2.31/9.8 = 0.24$ 。

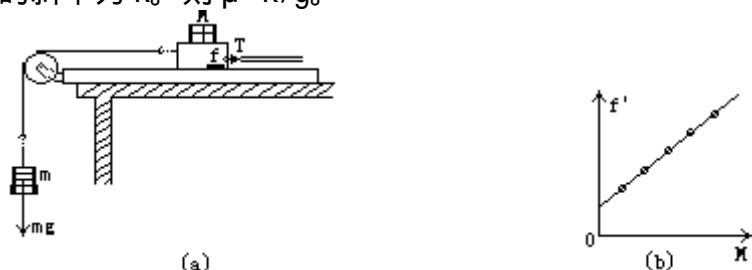
用线性回归法处理实验数据可得 $k=39.3$, $b = -2.28\text{m/s}^2$, $\mu = 0.23$ 。

方法二

原理

如图(a)所示实验装置, 记木块和它上面槽码的质量为 M , 槽码盘和

它上面槽码的质量为 m 。设木块作匀加速直线运动的加速度为 a ，受到木板的摩擦力为 f ，受到的纸带的拉力为 T 。在木块速度变化范围不很大时，可以认为 f 和 T 是恒定的。记 $f' = f + T = Mg\mu + T$ (μ 为待测的滑动摩擦系数)。实验中改变 M 的值，测量出对应的 f' 的值。以横坐标代表 M ，纵坐标代表 f' ，作出 $f' - M$ 图，可得一条直线 (图 b)。如果直线的斜率为 k 。则 $\mu = k/g$ 。



测定 f' 的方法如下：

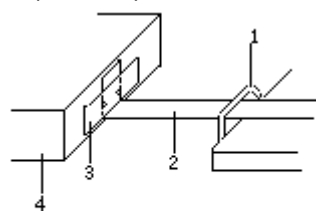
根据牛顿第二定律， $mg - f' = (M+m)a$ ，所以 $f' = mg - (M+m)a$ 。上式中的 a 可由打点计时器求出。

器材

附有定滑轮的待测长木板，待测木块，打点计时器，低压交流电源，托盘天平，砝码，刻度尺，气泡水平仪，槽码，槽码盘，细绳等。

操作

(1) 按图(a)安装好实验仪器。用气泡水平仪将长木板调至水平。用一块比纸带略宽的薄铝片，在上面打两个小孔，用图钉将打点计时器的纸带固定在木块上。要注意使铝片的下沿水平并与打点计时器的限位孔等高(如图 c)。



(c)
1. 限位孔 2. 纸带
3. 铝片 4. 木块

(2) 接通打点计时器电源后释放木块，系统作匀加速运动。由纸带求出系统的加速度 (具体方法参阅实验 54)。由 $f' = mg - (M+m)a$ 得到 f' 的值 (m, M 的值由天平秤出)。这样可以得到一组 (M, f') 的数据。

(3) 改变木块上槽码的质量，重复操作(2)，得到另一组 (M, f') 数据。共需要 7-9 组 (M, f') 数据。

(4) 以横轴代表 M ，纵轴代表 f' ，作出 $f' - M$ 图，可得到一条直线。

(5) 用图解法求出 $f' - M$ 图线的斜率 k ，即可由式 $\mu = k/g$ 求出滑动摩擦系数 μ 的值。

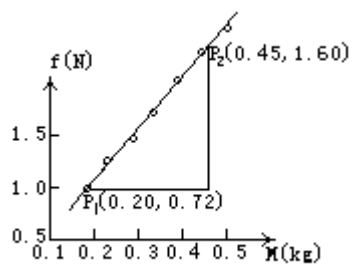
实例 某次实验得到如下实验数据：

序号	1	2	3	4	5	6	7
m(kg)	0.555	0.5.5	0.455	0.406	0.355	0.305	0.255
M(kg)	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.500
a(m/s ²)	6.29	5.24	4.51	3.66	2.64	1.79	1.02
f (N)	0.685	0.988	1.05	1.21	1.49	1.64	1.73

以横轴代表 M，纵轴代表 f，作出 f - M 图，(图 d)。在直线上取两点：p₁(0.20,0.72)、p₂(0.45,1.60)，求出图线的斜率

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{1.60 - 0.72}{0.45 - 0.20} = 3.52,$$

$$\mu = k / g = 3.52 / 9.8 = 0.36$$



(d)

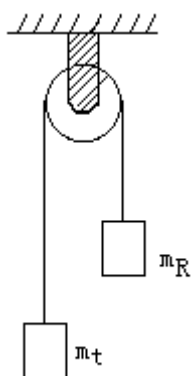
用线性回归法处理实验数据可得 $k=3.49$ 。

本实验的分析部分提出了两个对减小实验误差具有普遍意义的原则：第一是尽量通过改变实验条件后的多次测量得到实验结果；第二是在处理实验数据时，要尽量避免两个相近的测量值相减。

原理 在一个滑轮两边挂着两个质量分别为 m_L 和 m_R 的物体（设 $m_R > m_L$ ）（图 a）。从 m_L 上将质量为 m 的物体移到 m_R 上，然后用秒表和米尺测定出系统被释放后的加速度 a 。根据牛顿第二定律可知

$$a = \frac{m_R + \Delta m - (m_L - \Delta m)}{m_R + m_L} \cdot g,$$

$$a = \frac{2g}{m_R + m_L} \cdot \Delta m + \frac{m_R - m_L}{m_R + m_L} \cdot g。$$



(a)

这是一个 $y=kx+b$ 形的方程。变化 m ，重复多次实验后，可得到若干组 (m, a) 的值。以横坐标代表 m ，纵坐标代表 a ，作出 $a - m$ 图。

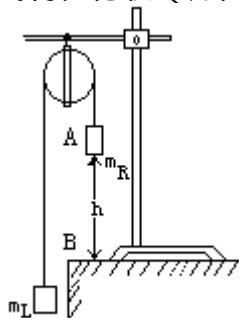
图线的斜率 $k = \frac{2g}{m_R + m_L}$ ，截距 $b = \frac{m_R - m_L}{m_R + m_L} \cdot g$ ，待测物体的质量

$$m_R = (b + g) / k, m_L = (g - b) / k。$$

器材 定滑轮，米尺，秒表，待测质量的砂袋，1.00g 片码 10 片，铁架台，细绳等。

操作

(1) 将两只砂袋中装上适量细砂（约 50–70g）后挂在定滑轮两边构成阿特伍德机（如图 b）。



(b)

(2) 将 10 片 1.00g 的片码放在左边的砂袋中，一起作为 m_L 。右边的砂袋作为 m_R 。

(3) 用米尺测量出 m_R 的初始位置 A 到某一固定平面 B 的距离 h 。

(4) 从 m_L 中取一片片码放到 m_R 中，然后从 A 点由静止释放 m_R ，系统开始作匀加速运动。用秒表记下 m_R 由 A 到 B 的时间，此时间要重复测量 5 次，取平均值作为测量值 t 。得到一组 (m, t) 值。

(5) 再从 m_L 中取一片片码放到 m_R 中，重复操作(4)，可得到另一组 (m, t) 的值。共需要取得 7-9 组 (m, t) 值。

(6) 由公式 $a=2h/t^2$ 可得到 7-9 组 (m, a) 值。

(7) 以横轴代表 m ，纵轴代表系统的加速度 a ，作出 $a - m$ 图。用图解法求出图线的斜率 k 和截距 b 。

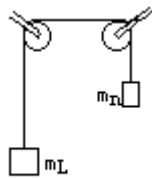
(8) 由公式 $m_R=(b+g)/k$ 和 $m_L=(g - b)/k$ 算出待测质量 m_R 和 m_L 。

注意

(1) 操作(4)的测量要反复练习，直到平均绝对误差 Δt 不大于 0.1 秒为止。

(2) 为了减小 t 和 a 的相对误差， h 宜取得大一些(1.2m - 1.5m)。

(3) 要尽量选用质量小和摩擦力小的滑轮。如果滑轮直径较小， m_L 和 m_R 在运动过程中要互相接触的话，可改用图(c)所示的装置。



(c)

分析

(1) 如果采用线性回归法处理实验数据，就可以估算测量结果的误差。设线性回归得到图线的斜率是 $k \pm \Delta k$ ，截距是 $b \pm \Delta b$ ，又因为 $m_R=(b+g)/k$ ， $m_L=(g - b)/k$ ，所以

$$\frac{\Delta m_R}{m_R} = \frac{\Delta(b+g)}{b+g} + \frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta b}{b+g} + \frac{\Delta k}{k},$$

$$\frac{\Delta m_L}{m_L} = \frac{\Delta(g-b)}{g-b} + \frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta b}{g-b} + \frac{\Delta k}{k}.$$

(2) 另外有一种实验方法如下：假定 $m_R > m_L$ ，第一次不加任何附加质量，测得系统加速度 a

$$(m_R - m_L)g = (m_R + m_L)a,$$

第二次在 m_R 上加上已知的附加质量 Δm ，测得系统的加速度 a' ，则

$$(m_R + \Delta m - m_L)g = (m_R + m_L + \Delta m)a',$$

联列上面两个方程，可以解得

$$m_R = \frac{\Delta m(g - a')(g + a)}{2g(a' - a)},$$

$$m_L = \frac{\Delta m(g - a')(g - a)}{2g(a' - a)}.$$

因为 m_R 和 m_L 的表达式中都有 $(a' - a)$ 一项，当 Δm 不是很大时， a' 和 a 是差得不大的，因此 $(a' - a)$ 这一项有效位数一定不多，因而导

致 m_R 和 m_L 的测量结果有效位数也很少。如果 a 和 a 的测量值再有较大的误差，则 m_R 和 m_L 的准确度就更差。所以这种由两个测量值决定实验结果的方法是粗糙的，是不足取的。

本实验的六种方法分别显示了摩擦力、弹力、浮力、磁场力的反作用力。方法一、二是定性的实验，显示了反作用力的存在；方法三、四、五、六是定量的实验，显示了作用力和反作用力方向相反且大小相等。

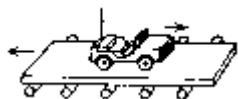
方法一

器材 无线电遥控玩具汽车，泡沫塑料平板，试管若干根。

操作

(1) 将几根试管垫放在泡沫塑料平板下面，把无线电遥控玩具汽车放在塑料板上。

(2) 当按下“前进”按钮时，可观察到汽车向前运动的同时，泡沫塑料板向后运动；当按下“后退”按钮时，可观察到汽车向后倒退的同时，泡沫塑料板向前运动。说明车辆运动时，轮子所受摩擦力的方向与地面所受的摩擦力方向总是相反的，这是一对作用力和反作用力。



说明

(1) 采用泡沫塑料板的好处在于板与车轮间的摩擦足够大，而整块板的质量较小，板向相反方向的运动明显。

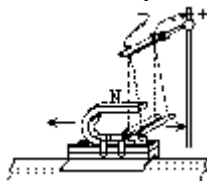
(2) 也可用电动玩具坦克代替无线电遥控汽车，因为电动玩具坦克价格低廉，它也有“前进”、“后退”两个动作，且橡胶履带与接触面间的摩擦也是足够大的。

方法二

器材 自制木支架，两端接有细铜丝的粗铜管（长 5-6cm），蹄形磁铁，阻尼电键，蓄电池组，导线若干，气垫导轨，气源等。

操作

(1) 将粗铜管两端的细铜丝连接在木支架的两个接线柱上，使粗铜管呈水平悬挂（如图）。



(2) 将磁铁用胶纸固定在气垫导轨的一个滑块上，适当调节滑块的位置，使得粗铜管平衡时恰好位于磁铁的磁极间磁性最强的地方。

(3) 调节气垫导轨成水平后，接通气源，在滑块静止的情况下，可观察到在通电粗铜管受安培力作用开始运动的同时，磁铁连同滑块向相反方向运动的现象。这是电流的磁场与磁铁的磁场相互作用的表现，由此显示了安培力的反作用效果。

注意

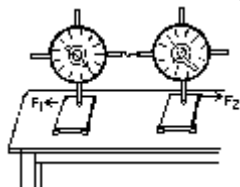
为使磁铁和滑块反冲效应明显，粗铜管（可利用收音机接收天线最粗的一节）的质量宜适当大些。

方法三

器材 结构、量程都相同的圆形测力计 2 只，铁架台 2 只。

操作

将测力计用铁架台固定在同一平面上（如图），用力向相反方向移动铁架台底座。测力计可显示两测力计互相的拉力（作用力与反作用力）大小相等、方向相反，在一条直线上。



说明

如果选用拉压两用的测力计，如高中运动学、动力学组合教具（J2138 型）中的测力计，可用同样的方法使两测力计的测力杆互相挤压，显示两测力计互相的推力（作用力和反作用力）大小相等，方向相反，在一条直线上。

方法四

器材 木块，泡沫塑料平板，测力计 2 个，试管若干根。

操作

(1) 将几根试管放在泡沫塑料板下面，木块放在泡沫塑料板上。两个测力计分别与木块、泡沫塑料板相连（如图）。



(2) 向左右两个方向拉两个测力计，逐步增大作用力（仍然保持木块和泡沫塑料板静止），可看到两测力计读数始终相同。说明木块对泡沫塑料板的静摩擦力和泡沫塑料板对木块的静摩擦力这一对作用力和反作用力始终大小相等，方向相反。

注意

泡沫塑料板尽量轻一些，以减小它与地面之间的摩擦力。

方法五

器材 托盘天平，砝码，烧杯，测力计等。

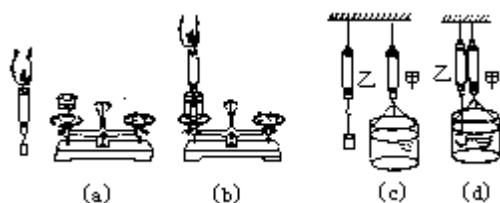
操作

- (1) 烧杯内盛水，置于天平上，调节天平，使之平衡。
- (2) 测力计下挂一物体，测力计的示数即为物体所受的重力（图 a）。
- (3) 将物体浸入水中，此时由于水对物体的浮力测力计示数变小，

减小的读数即为浮力的大小。增加砝码，使天平平衡，所增加砝码的重力就是物体对液体的作用力的大小(图 b)。这两个力是一对作用力和反作用力，其大小相同，方向相反。

说明

若不用天平，亦可用两个测力计做此实验。在甲测力计下面挂一个盛有液体的容器，乙测力计下面挂一个重物，记下两个测力计的读数(图 c)。然后将重物浸没到液体中。由于重物受到液体浮力的作用，乙测力计的读数变小；由于液体受到重物的反作用力，甲测力计的读数增大(图 d)。从两个测力计读数的变化量相等，可看出作用力与反作用力大小相等，方向相反。



方法六

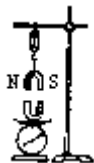
器材 两只质量和规格都相同的马蹄形磁铁，弹簧测力计，托盘测力计，支架等。

操作

(1) 两只磁铁先后分别放在托盘测力计上称量过，证明它们的重力相等。

(2) 按图装置起来(注意让磁铁上下对准)。从弹簧测力计和托盘测力计上分别读取示数。可发现弹簧测力计的读数比磁铁原有的重力大；而托盘测力计的读数却比磁铁原有的重力小，增大和减小的数值刚好相等。

(3) 改变上下两只磁铁之间的距离，可测量出另一组读数，但仍可得同样的结果。这说明作用力和反作用力总是大小相等，方向相反。



动量定理是研究力对时间的积累效应的定理，一般教材上都用牛顿第二定律和运动学公式推导出来，因此称之为“定理”。本实验的目的是从实验事实直接推导出同样的结论。动量定理中的作用力，可以是恒力，也可以是变力；作用时间可以极短，也可以较长，但测量极短的时间和变化的力都有一定的困难，因此本实验和实验 69 的几种方法都是讨论恒力作用较长时间导致物体动量发生变化的情况。

器材 打点计时器，小车，带定滑轮的木板，滑轮，测力计，纸带，钩码，铁架台，天平，砝码等。

操作

(1) 用一块小木块将带滑轮木板的尾端垫高，反复移动小木块的位置，使小车能拖着纸带在木板上匀速滑下（图 a）。

(2) 用细绳绕过两个滑轮将测力计和小车连接起来，在动滑轮下面挂适量的钩码（图 b）。如果不考虑动滑轮的转动惯量，则测力计的读数等于细绳拉小车的力。



(3) 接通打点计时器电源后，释放小车，使系统作匀加速运动，在纸带上打下一系列点子（图 c）。

(4) 舍去纸带前面太拥挤的点，从 A 点开始测定小车的速度 $v_A = s_{1-5}/(4T)$, $v_B = s_{4-8}/(4T)$, $v_C = s_{7-11}/(4T)$, $v_D = s_{10-14}/(4T)$, $v_E = s_{14-16}/(2T)$, $v_F = s_{17-19}/(2T)$, $v_G = s_{20-22}/(2T)$ 。上列式中 s 的下角 s_m 、n 表示从 m 点到 n 点的距离，T 表示打点器打点的周期。

(5) 研究当小车质量 m 和作用力 F 不变时，小车速度的增量 v 和力作用的时间 t 之间的关系。以 A 点为起始点， $v_1 = v_B - v_A$, $v_2 = v_C - v_A$, $v_3 = v_D - v_A$, $v_4 = v_E - v_A$, $v_5 = v_F - v_A$, $v_6 = v_G - v_A$; $t_1 = 3T$, $t_2 = 6T$, $t_3 = 9T$, $t_4 = 12T$, $t_5 = 15T$, $t_6 = 18T$ 。以横轴代表 t ，纵轴代表 v ，根据上述数据作 $v - t$ 图，如果得到一根过原点的直线，说明当 m 和 F 不变时， v 和 t 成正比。

(6) 改变动滑轮下所挂钩码的质量，重复操作(3)，每次都记下测力计的读数 F，并得到一条纸带。共重复 7-9 次。

(7) 从各条纸带上任取两个点，位置不限定，但相隔的点数一定要相同。例如都取相隔 12 个点，可取图(c)中纸带上的 B 点和 F 点，从各条纸带上求出两个点的速度的增量 v ，例如图(c)纸带上 $v = v_F - v_B$

$$= \frac{s_{17-19}}{2T} - \frac{s_{4-8}}{4T}。$$

(8) 以横轴代表 F，纵轴代表 v ，作出 $v - F$ 图。如果得到一根过原点的直线，说明当 m 和 t 不变时， v 和 F 成正比。

(9) 动滑轮下钩码的质量固定不变，增大小车的质量，重复操作

(3)。每次都要注意观察测力计的读数是否不变。如有变化要调整动滑轮下钩码的质量，使测力计读数保持不变。共要重复 7-9 次，每次都记下小车的质量 m ，并得到一条纸带。

(10) 用操作(7)的方法求出每条纸带上的 v 。

(11) 以横轴代表 m ，纵轴代表 v ，作 $v - m$ 图线，可得一条曲线。以此曲线与基础篇第 50、51 页中的各种曲线对照，可发现与反比曲线较相似，因此再作 $v - 1/m$ 图线，如果得到一条过原点的直线，说明当 F 和 t 不变时， v 和 m 成反比。

(12) 因为当 m 和 F 不变时， $v \propto t$ ；当 m 和 t 不变时， $v \propto F$ ；当 F 和 t 不变时， $v \propto 1/m$ ，因此用多变量组合的方法可得 $v \propto F \cdot t/m$ （具体方法见实验 63 按语），这就是动量定理的数学表达式。

注意

(1) 此实验也可不用测力计而用图(d)所示的简单装置，直接将悬挂钩码的重力作为 F ，这样可使实验简化。此时 m 应是小车和钩码的总质量。如果小车比钩码质量大得多，也可认为 m 就是小车的质量。



(d)

(2) 拖在打点计时器后面的纸带要用一块较光滑的长木块垫平，以减小纸带通过打点器时的阻力。

(3) 实验中各种单变量的正比关系，都可以用线性回归法来证实（具体方法见基础篇第 57 页的有关内容）。

本实验用五种方法验证动量定理。方法一、二、三是简单的定性实验，从三个不同的角度说明了动量定理，方法四、五是较严格的定量实验，用图线法证实 v 与 t 成正比，并且比例系数就是 F/m 。

方法一

目的 说明当作用力 F 不变时，作用时间越短，物体动量的改变量越小。

器材 墨水瓶，纸带，木棍，图钉等。

操作

(1) 将纸带压在墨水瓶底下（另一端露出部分不要太长）（图 a），用手慢慢地拉动纸带，可以看到墨水瓶随纸一起移动。说明纸带的摩擦力对墨水瓶产生了较大的冲量。

(2) 让墨水瓶与纸带恢复原样，将纸带的另一端用图钉钉在另一张桌子上，然后用木棍快速由纸带 P 点处往下打，可以看到纸带由瓶底抽出，而墨水瓶平稳地留在原处（图 b）。说明在摩擦力不变的情况下，由于时间很短，纸带对墨水瓶的冲量很小。



注意 墨水瓶的质量大一些好，因此应选用装满墨水的墨水瓶。

方法二

目的 说明当物体冲量的变化量一定时，力作用的时间越长，作用力越小。

器材 500g 砝码，细线，橡筋，支承架等。

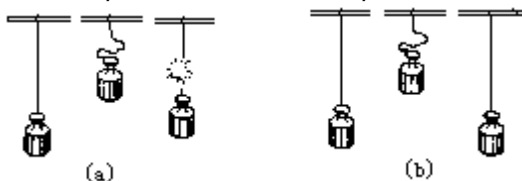
操作

(1) 一根细线一端固定在支承架上，另一端悬挂一个 500g 重的砝码。

(2) 将砝码抬高适当的高度后释放。由于细线从松弛到张紧的变化过程历时很短，因此细线因受到很大冲力而被拉断（图 a）。

(3) 用另一根细线，上端通过一根橡筋与支承架相连，下端仍然悬挂同一个砝码。

(4) 将砝码抬高相同的高度后释放。由于橡筋的缓冲作用，力作用的时间增长，细线没有被拉断，说明这时作用力较小（图 b）。



注意

- (1) 细线的强度，砝码的质量大小、抬高的高度应经过反复试验后确定。
- (2) 支承架要牢固。

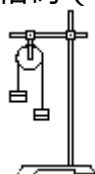
方法三

目的 说明如果作用时间较长，即使是较小的力也能产生较大的冲量；如果作用时间很短，即使是较大的力产生的冲量仍然不大。

器材 槽码钩 2 个，滑轮，细绳，槽码，坏试管，铁架台等。

操作

- (1) 将滑轮固定在铁架台上，跨过滑轮的细绳两端各挂一叠质量相同的槽码（如图）



- (2) 将坏试管轻轻地放在任一侧的槽码上，可看到系统慢慢地运动起来。这时虽然试管对槽码的作用力不大（约等于试管的重力），但由于作用时间较长，仍能使系统的动量发生明显的变化。

- (3) 取下试管，使两侧槽码恢复原样。手持试管后端用其前端迅速打击一下任一侧的槽码。可看到试管前端被击碎，而系统几乎不动。这时虽然试管对槽码的作用力很大（从试管被击碎可证实），但因作用时间很短，系统的动量未能发生明显的变化。

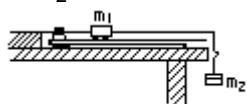
注意 槽码的质量大小应与试管的重力相配合，太大了，操作(2)不易运动；太小了，操作(3)试管不易破碎。

方法四

器材 带滑轮的长木板，打点计时器，天平，砝码，槽码，槽码钩，纸带，细绳等。

操作

- (1) 同实验 68 操作(1)。
- (2) 跨过定滑轮的细绳一端拉着质量为 m_1 的小车，另一端悬挂一叠质量为 m_2 的槽码（如图 a）。



(a)

- (3) 接通打点计时器电源后释放小车，槽码拉着小车作加速运动，在纸带上打下一系列点子（如实验 68 图 c）。

- (4) 同实验 68 操作(4)。

- (5) 研究当系统的质量 $M=m_1+m_2$ 和使系统动量发生变化的作用力 $F=m_2g$ 不变时，系统速度的增量 v 和力 F 作用的时间 t 之间的关系。

以 A 点为起始点, $v_1=v_B - v_A$, $v_2=v_C - v_A$, $v_3=v_D - v_A$, $v_4=v_E - v_A$,
 $v_5=v_F - v_A$, $v_6=v_G - v_A$; $t_1=3T$, $t_2=6T$, $t_3=9T$, $t_4=12T$,
 $t_5=15T$, $t_6=18T$ 。以横轴代表 t , 纵轴代表 v , 根据上述数据作出
 $v - t$ 图, 可以得到一根过原点的直线, 说明当 M 和 F 不变时, v
 t 。

(6) 用图解法得到 $v - t$ 图线的斜率 k 。在误差范围内, k 与 F/M 相等, 即验证了动量定理。

注意

(1) 同实验 68 注意(2)。

(2) 实验中 $v - t$ 的关系以及图线的斜率, 也可以用线性回归法来得到, 具体方法见基础篇第 57 页的有关内容。

(3) 如果只将小车作为研究对象, 即认为 $M=m_1$, $F=m_2g$, 实验将产生较大的误差。只有在 m_1 比 m_2 大得多时, 才可这样近似。

实例 实验中用的小车的质量 $m_1=0.290\text{kg}$, 槽码钩与槽码的总质量 $m_2=0.100\text{kg}$, 实验后得到一条如实验 68 图(c)所示的纸带, 测量后得到 $s_{1、5}=2.05\text{cm}$, $s_{4、8}=3.02\text{cm}$, $s_{7、11}=4.41\text{cm}$, $s_{10、14}=5.58\text{cm}$, $s_{14、16}=3.38\text{cm}$, $s_{17、19}=4.02\text{cm}$, $s_{20、22}=4.54\text{cm}$ 。

$$v_A = s_{1、5} / (4T) = \frac{0.0205}{4.00 \times 0.0200} \text{ m/s} = 0.256 \text{ m/s},$$

$$v_B = s_{1、5} / (4T) = \frac{0.0320}{4.00 \times 0.0200} \text{ m/s} = 0.400 \text{ m/s},$$

$$v_C = s_{7、11} / (4T) = \frac{0.0441}{4.00 \times 0.0200} \text{ m/s} = 0.551 \text{ m/s},$$

$$v_D = s_{10、14} / (4T) = \frac{0.0588}{4.00 \times 0.0200} \text{ m/s} = 0.698 \text{ m/s},$$

$$v_E = s_{14、16} / (4T) = \frac{0.0320}{2.00 \times 0.0200} \text{ m/s} = 0.844 \text{ m/s},$$

$$v_F = s_{17、19} / (4T) = \frac{0.0320}{2.00 \times 0.0200} \text{ m/s} = 1.01 \text{ m/s},$$

$$v_G = s_{20、22} / (4T) = \frac{0.0320}{2.00 \times 0.0200} \text{ m/s} = 1.14 \text{ m/s},$$

$$v_1 = v_B - v_A = (0.400 - 0.256) \text{ m/s} = 0.144 \text{ m/s},$$

$$v_2 = v_C - v_A = (0.551 - 0.256) \text{ m/s} = 0.295 \text{ m/s},$$

$$v_3 = v_D - v_A = (0.698 - 0.256) \text{ m/s} = 0.442 \text{ m/s},$$

$$v_4 = v_E - v_A = (0.844 - 0.256) \text{ m/s} = 0.588 \text{ m/s},$$

$$v_5 = v_F - v_A = (1.01 - 0.256) \text{ m/s} = 0.754 \text{ m/s},$$

$$v_6 = v_G - v_A = (1.14 - 0.256) \text{ m/s} = 0.884 \text{ m/s}.$$

$$t_1 = 3T = 0.060 \text{ s}, \quad t_2 = 6T = 0.120 \text{ s},$$

$$t_3 = 9T = 0.180 \text{ s}, \quad t_4 = 12T = 0.240 \text{ s},$$

$$t_5 = 15T = 0.300 \text{ s}, \quad t_6 = 18T = 0.360 \text{ s}.$$

以横轴代表 t , 纵轴代表 v , 作出 $v - t$ 图(图 b)。用图解

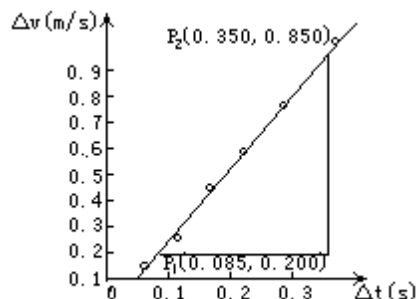
法求出图线的斜率

$$k = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$$

$$= (0.850 - 0.200) / (0.350 - 0.085) = 2.45。$$

$$F/M = (0.10 \times 9.8) / (0.29 + 0.10) = 2.5，$$

与 k 值基本相同。



(b)

也可以用线性回归法处理实验数据。相关系数 $r=0.998>0.917$ ，说明 v 和 t 成线性关系；截距 $b = -0.019\text{m/s}$ ，截距的误差 $b=0.019\text{m/s}$ ， b 与 b 的绝对值相等，可以认为图线过原点，因此 v 和 t 成正比关系。斜率 $k=2.52$ ，也与 F/M 值基本相同。

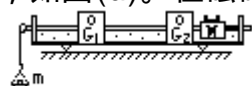
方法五

器材 气垫导轨，数字毫秒计，气源，天平，砝码等。

操作

(1) 按照实验 63 方法四操作(1)，(2)的步骤将气垫导轨调节成水平状态。

(2) 将滑块通过细线或尼龙带与砝码盘相连，在无滑轮一端装上定位杆，如图(a)。在砝码盘中放上适量的砝码。



(a)

(3) 在滑块上装上最窄的一种挡光框，并记下挡光框中心的位置。计时功能开关拨到 s_2 档，时间选择开关拨至最小档。将滑块紧靠定位杆后释放，当滑块通过光电门 G_1 、 G_2 时，毫秒计便记下两个挡光时间 t_1 和 t_2 。如果所用挡光框两前沿之间的距离是 d ，则滑块通过 G_1 、 G_2 时

的速度分别是 $v_1 = d / t_1$ 和 $v_2 = d / t_2$ ，速度的增量是 $v = v_2 - v_1 = \frac{d}{t_2} - \frac{d}{t_1}$ 。

(4) 将滑块上的挡光框换成挡光条，使挡光条的前沿对准原来挡光框中心的位置。如果挡光条与挡光框质量不等，应该用橡皮泥等物体加以补偿。适当地增大毫秒计的计时单位。使它能记下滑块从 G_1 滑行到 G_2 的时间。仍能将滑块紧靠定位杆后释放，测出它从 G_1 运动到 G_2 的时间 t 。这样便得到一组 (t ， v) 值。

(5) 改变两个光电门的位置及距离，重复操作(3)、(4)，可得到另一组 (t ， v) 值。共重复 7-9 次。

(6) 用天平称出滑块(包括挡光条或挡光框)的质量 M 和砝码盘(包括其中的砝码)的质量 m_0 。

(7) 以横轴代表 t ，纵轴代表 v ，作出 $v-t$ 图线，得到一条过原点的直线，说明当系统质量 $(M+m)$ 和作用力 mg 不变时， v 和 t 成正比。

(8) 用图解法求出图线的斜率 k ，如果 k 与 $mg/(M+m)$ 基本相同的话，可以认为动量定理得到验证。

实例 某次实验数据如下：

滑块质量 $M=0.223\text{kg}$ ，砝码盘(包括其中砝码)质量 $m=0.010\text{kg}$ ，挡光框宽度 $d=0.010\text{m}$ 。

$t_1(\text{ms})$	$t_2(\text{ms})$	$v_1(\text{m/s})$	$v_2(\text{m/s})$	$v(\text{m/s})$	$t(\text{s})$
24.8	11.2	0.403	0.893	0.490	1.10
24.5	12.2	0.408	0.820	0.412	0.981
24.9	12.8	0.402	0.781	0.379	0.919
24.7	14.1	0.405	0.709	0.304	0.734
25.0	16.3	0.400	0.613	0.213	0.507
24.6	17.4	0.407	0.575	0.168	0.392
24.8	18.3	0.403	0.546	0.143	0.336

以横轴代表 t ，纵轴代表 v ，作出 $v-t$ 图线(图 b)。用图解法求出直线的斜率

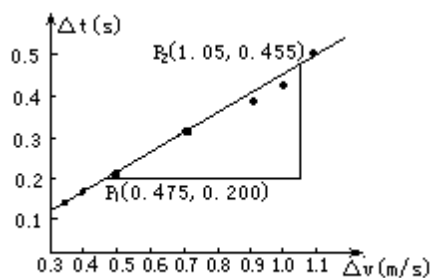
$$k = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$$

$$= \frac{0.455 - 0.200}{1.05 - 0.48} \text{ m/s}^2$$

$$= 0.477 \text{ m/s}^2,$$

$$mg / (M + m) = \frac{0.010 \times 9.8}{0.223 + 0.010} \text{ m/s}^2 = 0.420 \text{ m/s}^2,$$

与 k 值基本相同。



(b)

也可以用线性回归法处理实验数据。相关系数 $r=0.996>0.874$ ，说明 v 和 t 成线性关系；截距 $b = -0.006\text{m/s}$ ，截距的误差 $\Delta b = 0.013\text{m/s}$ ， $b > \Delta b$ ，可以认为图线过原点，因此 v 和 t 成正比关系。斜率 $k = 0.432\text{m/s}^2$ ，也与 $mg/(M+m)$ 值非常接近。

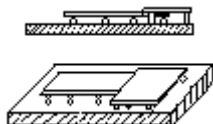
本实验介绍了六种方法，其中前三种方法是采用定性，或半定量的方法显示动量守恒。后三种方法是定量的实验。它们通过不同的途径来比较两个物体的速度，其中方法四是利用平抛运动的射程来比较速度；方法五是通过位移来比较速度；方法六是利用光电计时来比较速度。

方法一

器材 泡沫塑料（或薄木板），惯性小车，试管若干，自制平台，铁钉等。

操作

(1) 将试管垫在泡沫塑料下面，构成一个可动平台。可动平台的一头放在自制的固定平台下面（如图），两平台的高度要尽量接近，但可动平台要能够自由移动。



(2) 让惯性小车的车轮转动起来之后将小车轻轻地放在可动平台上，可看到小车向前运动而平台向后运动。它们获得的动量方向相反，显示总动量仍为零。

(3) 让惯性小车的车轮转动起来之后，将小车放在固定平台上，可看到小车从固定平台驶到可动平台上之后可动平台并不向后运动。因小车的动量没有变，可动平台的动量也保持不变，显示总动量守恒。

(4) 在可动平台小车前进的路线上插上三根铁钉。小车启动后从固定平台驶上可动平台，可动平台仍不动，但当小车撞上铁钉后，小车和平台一起向前运动，但速度明显减小，显示小车和可动平台的总动量守恒。

注意 泡沫塑料（或薄木板）与小车的质量比不宜大于 2，以免现象不明显。

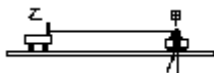
方法二

器材 小车 2 辆（质量相同），玩具马达，玻璃板，细线，橡皮泥等。

操作

(1) 将玩具马达固定在甲小车上，再将细线一端固定在马达轴上，另一端固定在乙小车上。用两根细软的导线给马达供电。在不放马达的小车上配置适量的橡皮泥，使两辆小车的总质量相同。

(2) 将两辆小车放在玻璃板上（如图），系统静止后接通电源，可看到两小车开始相向运动，碰撞后都静止，显示动量守恒。



(3) 将两小车恢复原状。用手按住乙小车后接通电源，让甲小车运

动一段时间后再释放乙小车，可看到甲小车比乙小车运动得快，碰撞后两车仍向左运动。因释放乙小车前系统已取得一个向左的动量，所以释放后系统始终有一个向左的动量，显示动量守恒。

(4) 用橡皮泥将两小车质量调节成 $m_{甲}=2m_{乙}$ 。系统静止后在玻璃板上记下两小车的位置，然后接通电源。可看到两小车相向运动，但乙小车运动得比较快，两小车碰撞后都静止。粗略测量一下两小车移动的距离， $s_{乙}$ 大约是 $s_{甲}$ 的 2 倍，说明乙小车的速度是甲小车的两倍，可显示动量守恒。

注意 两小车发生碰撞后要立即切断小马达的电源。

方法三

器材 玩具电动汽车，泡沫塑料板（长约 1m），试管，砝码，橡皮泥，纸旗，米尺，铁钉，天平等。

操作

(1) 测出电动玩具小车的质量 m_1 和泡沫塑料板的质量 m_2 。将泡沫塑料板搁在光滑桌面上的几根试管上，在板右端插上两根铁钉，与板左端齐平处的桌面上 O 点用橡皮泥固定一面小纸旗（如图）。



(2) 将已发动的小车放在泡沫塑料板左端，可看到小车向右运动，同时泡沫塑料板向左运动。当小车撞到板右端的铁钉后，系统恢复静止。用米尺测量出泡沫塑料板运动的距离 AO 和小车运动的距离 OB（相对地面）。因为小车的速度 $v_1=BO/t$ ，泡沫塑料板的速度 $v_2=AO/t$ ， $m_1v_1=m_1 \cdot BO/t$ ， $m_2v_2=m_2 \cdot AO/t$ ，所以只要 $m_1 \cdot BO$ 与 $m_2 \cdot AO$ 大约相等，便可显示动量守恒。

(3) 在小车上搁置适量的砝码，以改变 m_1 ，重复操作(1)、(2)，可显示其他情况的动量守恒。

注意 泡沫塑料板的质量 m_2 与小车质量 m_1 以接近为好，否则实验误差很大，因此宜采用薄一些的长条形泡沫塑料板。

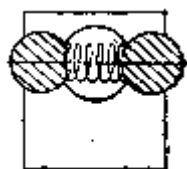
方法四

器材 相同的穿孔铁球 2 个，穿孔硬塑料球（或木球），弹簧（直径比球略小，可用日光灯安全灯座里的弹簧），塑料线（可用塑料窗纱）或尼龙丝，薄板，铁架台，天平，砝码，白纸，复写纸等。

操作

(1) 分别测出铁球和塑料球的质量。

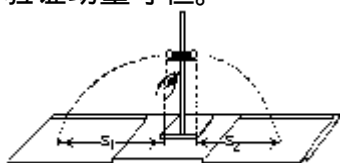
(2) 在一个穿孔铁球和一个穿孔塑料球中间夹上弹簧，用塑料线穿过两球的孔，使弹簧压缩后两端打结固定如图(a)。在薄板中间打一大孔，将装配好的球和弹簧正对孔放在板上。



(a)

(3) 用铁架台把薄板水平固定在适当高度上，桌上铺白纸，上覆复写纸。

(4) 用火由板下通过大孔将线烧断。球射出落在复写纸上(图 b)。测出两球的水平射程 s_1 和 s_2 。即可求出两球的速度比 v_1 $v_2=s_1$ s_2 和动量比 m_1v_1 $m_2v_2=m_1v_1$ m_2v_2 如果两个小球的动量大小相等，方向相反，即可验证动量守恒。



(b)

(5) 换成两个质量相等的铁球重复以上实验。可验证另一种情况的动量守恒。

注意

(1) 在能摺住小球的前提下，薄板应尽量小一些，以减小摩擦的影响。

(2) 选用的弹簧的质量要比两小球的质量小得多，特别是在两个小球质量不同的实验中。

(3) 宜选用短而倔强系数较大的弹簧。

说明

(1) 采用塑料窗纱是因为它容易烧断且断得干脆。

(2) 如果不用弹簧，也可用金属弹簧片或竹片代替，但板上需用金属丝做两条轨道，保证两小球反向弹开[图(c)为正视图，图(d)为俯视图]。



(c)



(d)

方法五

器材 小车 2 辆（其中一辆上装有弹簧片），天平、砝码，细绳，火柴，米尺，小纸片，水准仪，玻璃板等。

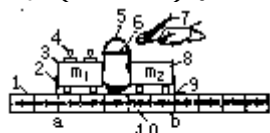
操作

(1) 将玻璃板放在桌面上，用水准仪将其校平（若发现不平可在玻璃板下填纸片）。

(2) 用天平测出两小车质量。

(3) 将一辆小车的弹簧片压缩起来用细线套系住。再将两小车之间用长约 80cm 的细绳连结起来，并靠近在一起，让弹簧片的可弹端接触另

一辆小车（如图 a）。

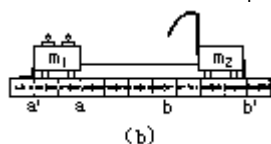


- (a)
1. 米尺
 2. 纸码
 3. 小车
 4. 砝码
 5. 弹簧片
 6. 线套
 7. 火柴
 8. 小车
 9. 纸码
 10. 连绳

(4) 在两车的端部玻璃板上放上直角纸码，并从米尺上记下纸片开始所在处的位置 a、b。

(5) 用火柴烧断系住弹簧的线套，使弹簧弹出，两小车分离，直到细绳张紧，系统恢复静止。

(6) 小车发生反冲运动时将纸码推到 a、b 位置（图 b）。量出 aa' 和 bb' 长度，这个长度就是两小车在相同时间内所经历的位移。由于玻璃板是光滑的，小车作匀速运动，则 aa' 和 bb' 可以代表两小车的运动速度大小。若有 $m_1 aa' = m_2 bb'$ ，则验证了反冲运动中动量守恒。



(7) 用较大的砝码改变一辆小车的质量再做实验，可以获得同样的结果。

注意

(1) 两小车的连绳要有适当的牢度，防止被绷断。开始时连绳应在中央向横向伸展，不要缠绕在一起，更不可压在小车的轮下。

(2) 记录位置的纸码尽量选用轻质小纸片，以减小摩擦和自身的惯性。

说明 如果没有弹簧片，可用竹片代替。

方法六

器材 气垫导轨，气源，数字毫秒计 2 台，天平、砝码，金属弹簧片，细线，火柴等。

操作

(1) 接通气源后，将滑块放在气垫导轨上。反复调节单脚端螺钉，直至将滑块由静止释放基本不动为止。

(2) 在气垫导轨上放置两个光电门，各与一个数字毫秒计连接。毫秒计功能开关置 s_2 状态，时间选择用最小的一档。在导轨上放置两个滑块，上面都置挡光框。

(3) 两滑块中间卡上一条被压缩的金属弹簧片后，用细线连接，不让它们弹开。两个光电门放在两滑块外侧。让滑块静止后用点燃的火柴将两滑块中间的细线烧断，两滑块向相反方向弹开。两数字毫秒计分别记下两滑块上挡光框的挡光时间 t_1 和 t_2 ，如挡光框的两前沿之间距离为 d ，则两滑块的速度分别为 $v_1 = d/t_1$ ， $v_2 = d/t_2$ 。

(4) 用天平称出两滑块的质量 m_1 和 m_2 ，可看到 $m_1v_1=m_2v_2$ ，说明两滑块弹开后的总动量仍然是零，即动量守恒。

(5) 用加重片改变两个滑块的质量，重复操作(3)、(4)，可验证其他情况下的动量守恒。



注意

(1) 金属弹簧片两个支撑点要在两滑块质心的连线上，否则弹开时将使滑块产生转动的趋势，会增大摩擦。

(2) 两个数字毫秒计要经过校正核对，如有系统误差要加以修正。

(3) 为了避免用两个毫秒计造成的系统误差，也可以用一个毫秒计。但实验中两滑块的位置要偏向某一个光电门，这样可避免两个滑块同时经过两个光电门。

本实验通过四种方法从不同的途径来测定碰撞体碰撞前后的速度。其中，方法一是利用摆的摆动角度来测量速度；方法二是利用平抛的射程来测量速度；方法三是利用打点计时法来测量速度；方法四是用光电计时来测量速度。这四种方法对实验的操作要求都较高，实验者应多次训练，以求达到操作的熟练和准确。

方法一

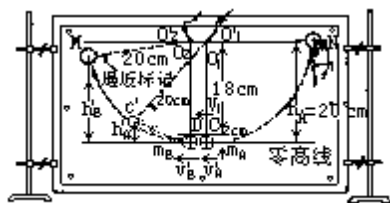
目的 验证各种碰撞中的动量守恒。

器材 制图板，大号象棋若干个，铁架台，白纸，细线，图钉等。

操作

(1) 用打孔或打孔后填进铁砂的方法制成几个质量不同的棋子，并在每个棋子直径的一端钉一个小铁钉，以便栓上细线。

(2) 用图钉把白纸平整地钉在图板上如图(a)，画好水平线 MN 和竖直线 O_1C 、 O_2D ，使 $O_1O_2=CD=d$ (棋子直径)。



(a)

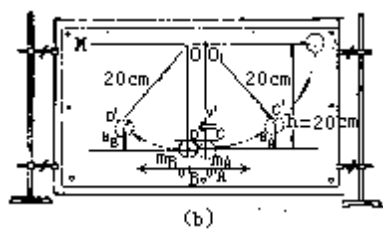
(3) 用两个铁架台固定图板，图板上端可以略为前倾，使摆棋只是刚好轻轻悬贴在纸上，将摩擦力减至最小。选用两个质量不同的棋子 A、B ($m_A > m_B$) 构成摆，将摆线缠绕在 O_1 、 O_2 上，使棋子的上沿与 CD 线相切。为了防止摆长变化，可以在 O_1 和 O_2 上端再按两个图钉 O_1 和 O_2 ，将摆线缠上按紧。

(4) 仔细调节图板左右两边的高低，使正面看上去两条摆线和图纸上的 O_1C 线和 O_2D 线完全重合。

(5) 将 A 摆向右拉至水平位置(使棋心在摆线的延长线上)后释放，A 摆落下和 B 摆发生碰撞。用“逐次逼近法”确定两摆上升的最高位置：先用目测确定摆线上升的最高位置，做出标记，然后再重复碰撞几次，逐次修正出准确位置。从图纸上测量出 h_A 、 $h_{A'}$ 、 h_B 的数值。

(6) 根据 $v_A = \sqrt{2gh_A}$ ， $v_{A'} = \sqrt{2gh_{A'}}$ 、 $v_B = \sqrt{2gh_B}$ 算出 A、B 两摆碰撞前后的速度。如果存在 $m_A v_A = m_A v_{A'} + m_B v_B$ 的关系，即可验证动量守恒。

(7) 换用两个棋子，使 $m_A < m_B$ ，重复操作(4)、(5)如图(b)。此时因 A 摆碰撞前后速度方向相反，所以如果存在 $m_A v_A = m_B v_B - m_A v_{A'}$ 的关系，即可验证动量守恒。



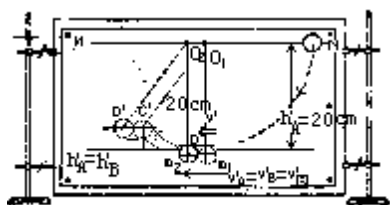
(b)

(8) 选择任意两枚棋子，在它们相碰的一个侧面贴上粘性较强的胶布如图(c)。



(c)

(9) 重复操作(4)、(5)，此时 $h_A = h_B = h$ 。如果存在 $m_A v_A = (m_A + m_B) v$ ，如图(d)即可验证动量守恒。



(d)

实例 一次实验的数据如以下三表所述：

(1) 碰撞后 A 摆和 B 摆分离并都继续向前运动

碰撞前				碰撞后			
$h_A(\text{cm})$	$v_A(\text{m/s})$	$h_B(\text{cm})$	$v_B(\text{m/s})$	$h_A(\text{cm})$	$v_A(\text{cm})$	$h_B(\text{cm})$	$v_B(\text{m/s})$
20.00	1.98	0	0	1.02	0.447	17.11	1.83
$m_A v_A + m_B v_B (\text{kg} \cdot \text{m/s})$				$m_A v_A + m_B v_B (\text{kg} \cdot \text{m/s})$			
$15.7 \times 1.98 \times 10^{-3} = 31.1 \times 10^{-3}$				$(15.7 \times 0.447 + 12.2 \times 1.83) \times 10^{-3} = 29.3 \times 10^{-3}$			

($m_A = 15.7\text{g}$, $m_B = 12.2\text{g}$.)

相对误差 $E = |29.3 - 31.1| / 31.1 = 5.8\%$ 。

(2) 碰撞后 B 摆向前，A 摆弹回

碰撞前				碰撞后			
$h_A(\text{cm})$	$v_A(\text{m/s})$	$h_B(\text{cm})$	$v_B(\text{m/s})$	$h_A(\text{cm})$	$v_A(\text{cm})$	$h_B(\text{cm})$	$v_B(\text{m/s})$
20.00	1.98	0	0	7.30	1.20	1.63	0.565
$m_A v_A + m_B v_B (\text{kg} \cdot \text{m/s})$				$-m_A v_A + m_B v_B (\text{kg} \cdot \text{m/s})$			
$7.98 \times 1.98 \times 10^{-3} = 15.8 \times 10^{-3}$				$(-7.98 \times 1.20 + 45.8 \times 0.565) \times 10^{-3} = 16.3 \times 10^{-3}$			

($m_A = 7.98\text{g}$, $m_B = 45.8\text{g}$.)

相对误差 $E = |16.3 - 15.8| / 15.8 = 3.2\%$ 。

(3) 碰撞后 A、B 两摆合为一体以相同速度向前运动

碰撞前				碰撞后			
$h_A(\text{cm})$	$v_A(\text{m/s})$	$h_B(\text{cm})$	$v_B(\text{m/s})$	$h_{A'}(\text{cm})$	$v_{A'}(\text{m/s})$	$h_{B'}(\text{cm})$	$v_{B'}(\text{m/s})$
20.00	1.98	0	0	5.82	1.07	5.82	1.07
$m_A v_A + m_B v_B (\text{kg} \cdot \text{m/s})$				$(m_A + m_B) v_{B'} (\text{kg} \cdot \text{m/s})$			
$15.7 \times 1.98 \times 10^{-3} = 31.1 \times 10^{-3}$				$(15.7 + 12.2) \times 1.07 \times 10^{-3} = 29.9 \times 10^{-3}$			

($m_A = 15.7\text{g}$, $m_B = 12.2\text{g}$ 。)

相对误差 $E = |29.9 - 31.1| / 31.1 = 3.9\%$ 。

方法二

器材 碰撞实验仪 (J2135-1 型), 天平、砝码, 白纸, 复写纸, 刻度尺等。

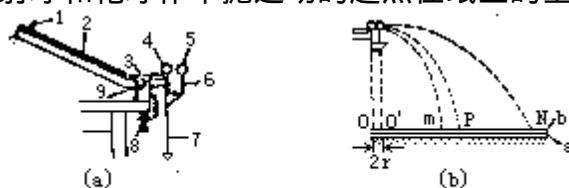
操作

(1) 用 C 形夹把碰撞实验仪固定在桌边, 松开水平固定螺母, 调节轨道位置, 直到钢球能在平直槽的任何部位静止不动, 然后旋紧水平固定螺母 (图 a)。

(2) 用天平测出两个小球的质量, 钢球的质量记为 m_1 , 玻璃球的质量记为 m_2 。

(3) 调节支球管的高度和位置, 使靶球与入射球的球心在同一高度, 并且从支球管中心线到槽口竖直面之间的距离等于两球半径之和。

(4) 在地上铺上一张白纸 a, 白纸上铺放复写纸 b (如果地面不平, 应将白纸和复写纸铺设在置于地面上的木板上)。利用重垂线在白纸上标绘出槽口中心的竖直投影点 O 和支球管的竖直投影 O' (图 b), 分别作为入射球和靶球作平抛运动的起点在纸上的垂直投影。



1.挡球板 2.轨道 3.水平轴 4.入射球 5.靶球
6.支球管 7.重锤线 8.C形夹 9.水平固定螺丝

(5) 将挡板固定在斜槽较高处, 不放靶球, 让入射球 (钢球) 自挡板处由静止滚下, 复复 10 次。钢球每次落地, 便在白纸上留下落地点的痕迹。用尽可能小的圆把所有 10 次落地点圈在里面, 圆心 P 就是钢球落地点的平均位置。

(6) 保持挡板位置不变, 把靶球 (玻璃球) 放在支球管顶上, 调整支球管左右位置, 使两球碰撞后靶球落地点也处于 OP 直线上 (此时两球发生正碰)。仍让入射球从挡板处由静止滚下, 在平直槽出口处与靶球发生碰撞, 重复 10 次, 用同样的方法标出碰撞后入射球的落地点的平均

位置 m 的靶球落地点的平均位置 N 。

(7) 用刻度尺测量出 OP (入射球在不发生碰撞时作平抛运动的射程), Om (入射球与靶球发生碰撞后作平抛运动的射程), ON (靶球作平抛运动的射程) 的长度, 依次记为 $s_1, s_{1'}, s_2$ 。根据平抛运动的规律, 初速度 $v = s / \sqrt{2h/g}$ 。如果存在

$$m_1 s_1 = m_1 s_{1'} + m_2 s_2$$

则有 $m_1 v_1 = m_1 v_{1'} + m_2 v_2$

的关系, 即验证了碰撞中的动量守恒。

(8) 改变挡板的位置, 重复 2 次实验。

注意

(1) 本实验成功的关键是既要使两球发生正碰 (如果发生斜碰将使两球碰撞后作斜抛运动, 给实验带来很大的误差), 又要使入射球碰撞后不受靶球支球管的影响。为了达到这个目的, 可以在支球管上端放一小片泡沫塑料, 上面放靶球。调节支球管高度, 使两球球心等高 (也就是使支球管顶略低于水平槽口)。在两球正碰后, 塑料片随靶球飞走。这样既保证了两球正碰, 又避免入射球与支球管碰撞。虽然塑料片要带走一些动量, 但因它质量很小, 对实验结果影响不大。

(2) 有的实验者不用支球管, 直接将靶球置于平直槽的末端, 认为这样既可保证两球正碰, 又可避免支球管对入射球的阻碍。这样做是有问题的。入射球因为与靶球相撞, 平动动量明显减少, 而转动动量基本不变, 因此入射球在与靶球相撞后的一段时间中与轨道产生相对滑动, 滑动摩擦力作用的结果增加了入射球向前的动量。所以这样做实验的结果往往是碰撞后的总动量大于碰撞前的动量 (有时可大出 20-30%)。

分析

本实验可给出允许的偶然误差的范围。

因为在式 (1) 中用 ms 来比较动量, 因此它的相对误差

$$E = E_m + E_s。$$

因 E_m 一般很小, 所以可认为

$$E = E_s = \Delta s / s = R / s,$$

式中 R 是落点圆的半径。例如可认为实验中 $m_1 s_1$ 一项的相对误差为

R_p / s_1 。由此可见, 式 (1) 左边的绝对误差为 $\Delta_{左} = (R_p / s_1) \cdot (m_1 s_2)$ 。式 (1)

右边的绝对误差为 $\Delta_{右} = (R_m / s_{1'}) \cdot (m_1 s_{1'}) + (R_N / s_2) \cdot (m_2 s_2)$ 。

根据实验结果, 式 (1) 左右两边的值一般不可能完全相等, 只要满足

$$| m_1 s_{1'} + m_2 s_2 - m_1 s_1 | \leq \Delta_{左} + \Delta_{右},$$

即可认为碰撞中动量守恒。

方法三

器材 打点计时器, 小车 2 辆, 低压交流电源, 天平, 砝码, 木板, 刻度尺, 槽码等。

操作

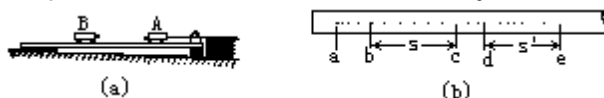
(1) 将木板的一端用木块垫高, 并装上打点计时器。反复调节木块

的位置，使得小车被轻推一下之后，拖着纸带从木板上匀速滑下（纸带上的点子基本上等距）（图 a）。

(2) 在木板上部放上小车 A，并拖上纸带，在木板中部放上小车 B。在两小车的相对碰撞端各粘上一块橡皮泥，使两小车能发生完全非弹性对心碰撞。

(3) 接通打点器电源后用手轻推小车 A，使它拖着纸带作匀速运动。当它以速度 v 行进一段距离后，与小车 B 发生完全非弹性碰撞，粘连在一起，以共同速度 v 做匀速运动。

(4) 在纸带上找出碰撞前后作较好的匀速运动的段落 bc 和 de，舍去推车和碰撞两个过程中的非匀速运动的段落 ab 和 cd（图 b）。在 bc 和 de 两个段落中分别取一段位移 s 和 s' ，用刻度尺量出它的长度、并通过数点分别计算出通过这两段距离所用的时间 t 和 t' ，即可算出碰撞前后小车的速度 $v = s/t$ 和 $v' = s'/t'$ 。



(5) 用天平测量出两辆小车（包括橡皮泥）的质量 m_A 、 m_B 。如果存在 $m_A v = (m_A + m_B) v'$ 的关系，即可证明在碰撞的过程中动量守恒。

(6) 在小车上装载槽码，改变两小车的质量，重复操作(3)、(4)、(5)，便可验证其他情况的动量守恒。

注意

(1) 拖在打点计时器后面的纸带要用光滑的木块垫平，以减小拉动纸带时的阻力。

(2) 两辆小车碰撞端上橡皮泥的位置，要尽量通过两小车碰撞时质心的连线，保持两辆小车发生正碰。

方法四

器材 气垫导轨，四路数字计时器（或普通数字毫秒计），气源，天平，砝码等。

操作

(1) 接通气源后，将一个滑块放在气垫导轨中间部位，反复调节单脚螺钉，直至滑块由静止释放后基本不动为止。

(2) 在气垫导轨上放上 G_1 、 G_2 两个光电门，分别与四路数字计时器的光电门 1、光电门 2 两个插座相连。功能选择旋钮放在“3”档时，时基选择放在“0.1ms”档。

(3) 将 1、2 两个滑块装上挡光框，并在两滑块的碰撞面上装上弹性金属片（或橡皮筋），分别由光电门 G_1 、 G_2 外侧相向而行，在 G_1 、 G_2 中间发生弹性碰撞（图 a）。 G_1 光电门记下滑块 1 碰撞前后两次挡光时间 t_1 和 t_1' ，分别显示在“I”、“II”两个屏上； G_2 光电门记下滑块 2 碰撞前后两次挡光时间 t_2 和 t_2' ，分别显示在“III”、“IV”两屏上，如果挡光框两前沿之间距离为 d ，则 $v_1 = d/t_1$ ， $v_2 = d/t_2$ ， $v_1' = d/t_1'$ ， $v_2' = d/t_2'$ 。如果设向左的方向为正，则 v_1 、 v_2 为正， v_1' 、 v_2'

为负。用天平称出两个滑块的质量 M_1 、 M_2 ，如果有

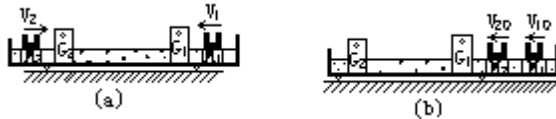
$$M_1v_1 + M_2v_2 = M_1v_1 + M_2v_2,$$

即验证动量守恒。

(4) 使两滑块从导轨的一端开始运动(图 b)，速度较慢的滑块 2 在前，速度较快的滑块 1 在后，滑块 1 在 G_1 和 G_2 中间追上滑块 2 发生碰撞，再先后通过 G_2 。 t_1, t_2, t_1, t_2 分别显示在 I、III、II、IV 四个屏上。 $v_1 = d/t_1, v_2 = d/t_2, v_1 = d/t_1, v_2 = d/t_2$ 。用天平称出两个滑块的质量 M_1 和 M_2 ，如果有

$$M_1v_1 + M_2v_2 = M_1v_1 + M_2v_2,$$

即可验证动量守恒[v 的正负取法同操作(3)]。



(5) 将两滑块碰撞面上的弹性金属片换成橡皮泥，再分别由光电门 G_1 、 G_2 外侧相向而行，在 G_1 、 G_2 中间发生完全非弹性碰撞，连成一体，再通过 G_1 或 G_2 。碰撞前两滑块的挡光时间 t_1 和 t_2 分别显示在“ I ”、“ II ”屏上，碰撞后两滑块的挡光时间 t_1 显示在“ III ”或“ IV ”屏上。 $v_1 = d/t_1, v_2 = d/t_2, v = d/t$ ，用天平称出两滑块(包括橡皮泥)的质量 M_1 和 M_2 ，如果有

$$M_1v_1 + M_2v_2 = (M_1 + M_2)v,$$

即验证动量守恒[v 的正负取法同操作(3)]。

(6) 使两滑块从导轨一端开始运动(图 b)，后面的滑块 1 在 G_1 、 G_2 之间追上前面的滑块 2 发生碰撞，连在一起后通过 G_2 。 t_1, t_2, t 分别显示在 I、III、II 三个屏上。 $v_1 = d/t_1, v_2 = d/t_2, v = d/t$ 。用天平称出两滑块的质量 M_1 和 M_2 ，如果有

$$M_1v_1 + M_2v_2 = (M_1 + M_2)v,$$

即可验证动量守恒。

(7) 用加重片改变两个滑动的质量，重复以上操作(3)、(4)、(5)、(6)，可验证其他情况的动量守恒。

注意

(1) 不论是弹性金属片还是橡皮泥，都要固定在两滑块质心的连线上，以保证两滑块的正碰。

(2) 滑块滑行的速度要大小适当，太小了由于滑行时间增长，导致摩擦力的冲量增加；太大了两滑块碰撞时容易与导轨接触。

说明

如果用两台普通数字毫秒计，可将与每台毫秒计相连的两个光电门各放一个在气垫导轨上，作为 G_1 和 G_2 ，另外两个就放在桌上不用。功能开关放在“ s_2 ”档。时基选择放在“ 0.1ms ”档。由于普通毫秒计只有一个显示屏，因此对同一个光电门的前后两次挡光时间或者先后显示在屏上(利用自动复零装置)或者在屏上累加起来，因此实验中必须由两人分别观察两台毫秒计。当然，也可以只用一台毫秒计连接 G_1 、 G_2 做上述

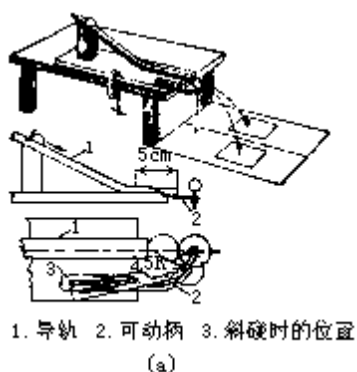
实验，但对实验者要求较高，必须控制好滑块的滑行时间和速度，使四次（或三次）档光先后进行，并且很快地把显示屏上显示的各个时间准确无误地记下。

做好本实验的关键是减小阻力和准确地测量速度。本实验两种方法都比较好地解决了阻力的问题，并且分别利用平抛运动的原理和能量守恒的原理较准确地测量出碰撞前后的速度。

方法一

器材 自制二维碰撞器（也可用现成的碰撞实验器），直径相同的钢球和玻璃球各 2 个，白纸，复写纸，三角尺，直尺，重垂线等。

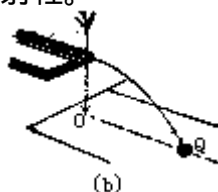
二维碰撞器可按图(a)自制，上图是直观图，中图是侧视图，下图是俯视图。



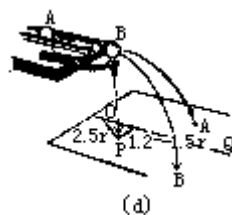
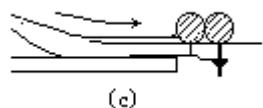
操作

(1) 将二维碰撞器用 C 型夹固定在桌上，用透明胶布将白纸固定在地面上（如地面凹凸不平，则要在纸和地面之间铺一层木板）。

(2) 借助重垂线在纸上描写轨道末端的投影点。将钢球从轨道上某一定点滚下，落在铺在白纸上的复写纸上，重复十次。然后用一个尽量小的圆将十个落点的痕迹圈在里面，圆心 Q 点就是落地点的平均位置（图 b）。OQ 就是入射球碰撞前运动的方向，OQ 的长度即是入射球作平抛运动的射程。



(3) 调节支持螺杆的高度，使钢球从斜面上的定点滚下时，刚好飞越支持螺杆的顶端，（图 c）。然后再调节支持螺杆的位置，使其在白纸上的投影 P 与 O 点相距球半径 r 的 2.5 倍，与 OQ 的距离为 $1.2 \sim 1.5r$ （图 d）。

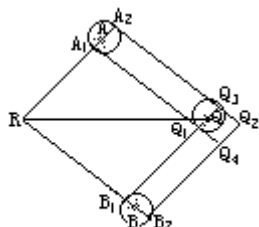


(4) 在支持螺杆上放上靶球 B（钢球），让入射球 A（钢球）从斜面

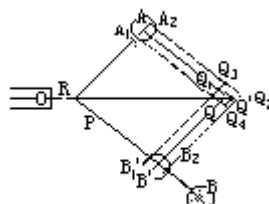
(1) 连接BP，延长BP交于OQ于R，在RB上截取RB = $\frac{m_B}{m_A} PB = \frac{27.3}{375}$

PB=0.73PB，并以B 为圆心作一误差圆，半径为B处误差圆半径的 m_B/m_A 倍（图g）。与RB交于B₁、B₂点。

(2) 连接RA，与A处误差圆交于A₁、A₂点。过A₁、A₂点作RB的平行线，过B₁、B₂点作RA的平行线，分别交于Q₁、Q₂、Q₃、Q₄四点。



(f)



(g)

(3) 延长OQ至Q，使RQ = OQ。从图上可明显看出RQ 的长度大于RQ₁而小于RQ₂，而且RQ 夹在RQ₃和RQ₄中间，因此可认为

$$RQ = RA + RB$$

即
$$RQ = RA + \frac{m_B}{m_A} PB。$$

因为平抛运动中射程与初速度成正比，且落地时间相同，所以

$$v = v_A + \frac{m_B}{m_A} v_B$$

即
$$m_A v = m_A v_A + m_B v_B$$

验证了二维碰撞中动量守恒。

方法二

原理 单摆的摆角小于5°时作简谐振动，简谐振动有 $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2}$

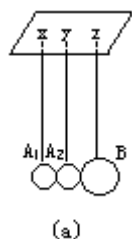
kA^2 即 $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{mg}{L} A^2$ 的关系（式中L为摆长，v为摆球在平衡位置时

的速度，A为振幅），因此 $v = \sqrt{\frac{g}{L}} A$ ，即平衡位置的速度与振幅成正比（两个摆长L相同的摆，比例系数也一样）。所以可以用单摆的振幅来表示它在平衡位置时的速度。

器材 小钢球，大钢球（质量约是小钢球的2倍），伸缩性很小的细绳，小木板，制图板，铁架台，天平，砝码，三角尺，白纸等。

操作

(1) 在小木板上钻x、y、z三个洞，x、y之间的距离等于小球的直径，y、z之间的距离等于大、小球半径之和。用细绳穿过三个洞将三个球吊起（细绳长度L在1-2m间都可以）。当小木板水平固定在铁架台上时，三个球自然接触，三个球的球心在同一水平面上，三根细绳互相平行（图a）。



(a)

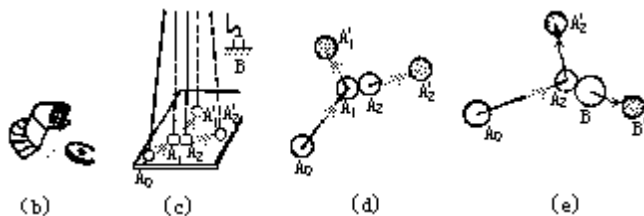
(2) 用图钉将白纸平整地覆在制图板上作为记录纸，制图板放在水平桌面上。调节小板的高度，使记录纸与小球尽量靠近，但不接触。

(3) 将大钢球 B 先搁起，在纸上记下 2 个小球静止时球心的投影 A_1 和 A_2 ，然后将 A_1 小球拉到 A_0 位置（使摆线与竖直方向的夹角不大于 5° ），用图(b)中的半圆形纸围粘在记录纸上，记下此时球的位置后释放 A_1 小球，让它和静止的小球 A_2 碰撞（图 c）。

(4) 重复碰撞几次后用目测法记下两个小球碰撞后的大致位置。在此大致位置略靠近碰撞点处放上可任意滑动的半圆形纸围（开口向碰撞点），重复实验，每次碰撞后的小球都将纸围稍稍推动，用图(b)中圆形硬纸片可确定球心的投影。共重复十次，可取得十个投影点，用尽量小的圆将这些点圈起来，圆心就是两球心碰撞后的位置 A_1' 和 A_2' （图 d）。

(5) 因为 $m_{A1}=m_{A2}$ ，所以如果有 $A_0A_1=A_1A_1'+A_2A_2'$ ，就有 $m_{A1} \cdot A_0A_1=m_{A1} \cdot A_1A_1'+m_{A2} \cdot A_2A_2'$ ，即验证了二维碰撞中的动量守恒。

(6) 将 A_1 球搁起， A_2 球作碰撞球，B 球作靶球。重复以上操作(3)、(4)（图 e）。如果有 $m_{A2} \cdot A_0A_2=m_{A2} \cdot A_2A_2'+m_B \cdot BB'$ 即可验证另一种情况的动量守恒。

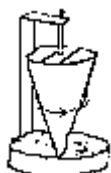


分析 同方法一。

方法一

器材 反冲水力机模型。

操作 如图，向漏半形容器中注入水，可看到在喷出水流的反冲作用下，漏斗形容器向相反方向转动。如果不断地注入水，保持注水量和出水量相等，转动可持续下去。



方法二

器材 漏斗，软橡胶管，弯曲玻璃管，铁架台等。

操作

(1) 在铁架台上装一个带橡胶管的漏斗 橡胶管的下端安一个弯曲的玻璃管（如图），用手捏住橡胶管后向漏斗中灌满水。



(2) 放开橡胶管，让水从弯曲玻璃管的管口流出，可看到玻璃管向水流相反的方向后退，使橡胶管倾斜。继续向漏斗中加水，即可维持橡胶管弯曲的状态。

注意

- (1) 尽量选用软质的橡胶管，橡胶管适当地长一些。
- (2) 弯曲玻璃管的出水口不能太细，以免水流量太小。

方法三

器材 气垫导轨，气源，玩具风扇，干电池等。

操作

(1) 接通气源后，将滑块放在气垫导轨上。反复调节单脚端螺丝，直至滑块由静止释放基本不动为止。

(2) 将玩具电风扇和干电池用胶带固定在滑块上（风扇轴平行于导轨）接通风扇电源后，可看到滑块沿导轨后退。

注意

(1) 风扇与干电池的总质量不能太大（一般不宜超过 200g），以免使滑块与导轨的摩擦增大。

(2) 风扇与干电池的位置要适当，使它们的质心在滑块中部，以免滑块的某一头与导轨发生接触。

曲线运动的速度方向(74)

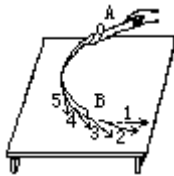
本实验可说明作曲线运动的物体在任意位置上的速度方向，从教学角度看，有一定的说服力。

器材 自制曲线运动投影器，直径8—10mm小钢球（可选用轴承弹子），普通教学投影幻灯机。

投影器制作方法

用厚度为3—4mm的透明有机玻璃板制作一块15mm×15mm的底板，底板上用薄锯条加工一条宽约0.5mm的光滑弧型缝。在弧型缝的一端用同样的有机玻璃板制作一个弧形斜槽轨道（有机玻璃在酒精上烘烤后可弯曲成弧形），将弧线相切。在底板下用有机玻璃板粘接两个支脚（如图）。用较厚的透明明胶片（可用精包装衬衣里衬领用的胶片）剪一块宽约10mm的带子嵌入底板弧形缝中，使明胶片高出底板面约6mm，形成一道透明的弧形轨道护拦。

操作



(1)把小钢球放在弧形轨道顶端，当脱手后可见钢球滚下沿底板弧形轨道作曲线运动，当滚到护拦末端B时沿该点切线方向滚出。

(2)拉动明胶带A端，使末端B处于曲线轨道上1、2、3、4……等任意位置，则作曲线运动的钢球总是沿1、2、3、4……等位置处曲线的切线方向运动，说明作曲线运动物体的速度方向是沿该位置运动轨迹的切线方向。

说明

如上课演示，可将上述投影器放置在幻灯投影器上，钢球的运动情况就能在银幕上显示出来。

(75) 验证平抛运动的规律

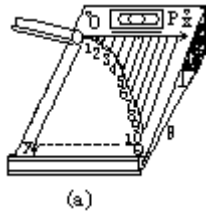
本实验用六种方法显示作平抛运动的物体的轨迹，并利用轨迹来验证平抛运动的一些规律。方法一是一种模拟的平抛运动，明显地减小了竖直方向的加速度，使轨迹上点的横坐标和纵坐标相差不是很大。方法二、三的共同特点是只要物体运动一次就可以得到清晰、准确的轨迹。方法四、五、六是对教材上实验的改进。

方法一

器材 木板，小球，气泡水平仪，白纸，图钉，墨水，刻度尺、三角尺，弧形槽轨等。

操作

(1)用图钉将白纸钉在木板上，用一物体将木板的一边垫高。在木板左上角固定一弧形斜槽轨，使斜槽末端的切线平行于木板上沿。在木板上沿平行地放置一气泡水平仪，反复调整垫高物的位置，使从斜槽上某点滚下的小球在靠近木板右下角处离开木板，这时水平仪的气泡一定要在水平仪的中央（图 a）。



(2)用软纸吸去在墨水中长时间浸泡过的木球表面多余的墨水，使木球表面均匀涂着一薄层墨水。然后把球从斜槽上某处滚下，球就在白纸上留下一条轨迹。

(3)以斜槽口的位置为坐标原点 O ，以平行于木板上沿的直线为 x 轴，过 O 点作 x 轴的垂线为 y 轴。

(4)取下留有轨迹的白纸，在轨迹上靠近末端处取一点 Q ，过 Q 作垂直于 x 轴的直线交 x 轴于 P 。把 OP 十等分。过各等分点作 x 轴的垂线分别与轨迹相交，各交点分别标上 1、2、3……10。用刻度尺量出各交点的横坐标 x_i 和纵坐标 y_i 。

(5)根据平抛运动的规律 $y = \frac{1}{2}at^2$ ，所以 $y_{10} = \frac{1}{2} \times a \times (10 \cdot t)^2$ 。（ t 为小球越过相邻两条竖线之间距离的时间）。 $a = 2y_{10} / 100 \cdot t^2$

因此 $y_i = \frac{1}{2}a(i \cdot t)^2 = \frac{1}{2}(2y_{10} / 100 \cdot t^2)i^2 \cdot t^2 = i^2 \cdot y_{10} / 100$ 。

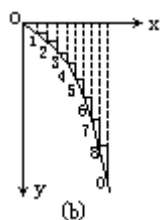
对照计算出来的 y_i 与实验测量的 y_i 是否相符。

(6)以 y 为纵坐标（单位用 mm ），时间 t^2 为横坐标（单位用 t^2 ），作出 $y-t^2$ 图，在图上得到一条直线，说明 y 和 t^2 成正比。用图解法求出此直线的斜率 k （单位为 mm/t^2 ）， k 的两倍就是 a_y 。

(7)过标号为 i 的点作平行于 x 轴的直线和运动轨迹的切线，这两条线与标号为 $i+1$ 的竖直线有两个交点，这两个交点之间的距离（单位用 mm ）可表示小球在 i 点时的竖直分速度 v_y 的大小（单位用 mm/t ）。用此方法测量出 1—10 各点的 v_y 的大小（图 b）。将这些值与用公式

$$v_y = at = 2k(i \cdot t)$$

算出的 v_y 值比较，看是否相符。

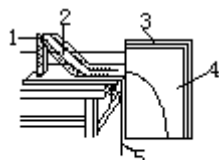


方法二

器材

斜槽，木板，小球，重垂线，白纸，图钉，红墨水等。

操作



1. 斜槽 2. 小球 3. 木板
4. 白纸 5. 重垂线

(1) 按图把斜槽和重垂线安装好，斜槽的末端必须水平。用图钉把白纸钉在木板上，贴近斜槽的一边纸要与木板的边对齐。木板一条竖直边靠在斜槽末端，并使其与重垂线平行。

(2) 把浸在红墨水中的小球取出放在斜槽上某一高度处释放，就可在白纸上得到了红色小球描出的平抛轨迹。

(3) 用与方法一操作(3)(4)(5)(6)(7)相同的方法处理图线。

注意

(1) 如果小球滚下时纸上没留下轨迹，可以调整木板的位置，并使木板的下端稍稍向前倾斜一点。

(2) 实验前可用有色小球在斜槽末端和白纸相接处作个记号（即平抛运动起始点），因为这点轨迹不易描出。

(3) 采用旧的铁球效果较好，因为它上面容易沾上红墨水。

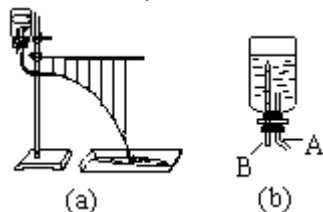
说明 本实验操作简便。一次能得到连续平抛轨迹，且误差较小。

方法三

器材 自制抛体运动演示器，细线，小球等。

抛体运动演示的制作方法

演示器如图(a)所示，由恒压贮水瓶、喷嘴、坐标杆和接水槽组成。恒压贮水瓶的详细结构见图(b)，当水从出水管A中流出时，瓶内气压减小，外界空气从进气管B进入瓶中，这样就使瓶内与B管上端等高处的压强始终等于大气压强。只要瓶子高度不变，水流速度就不会变。喷嘴用9号针头做成，孔径约为0.8mm。坐标杆用来悬挂小球，在它上面漆成等间距黑白相间颜色。



操作

(1) 让恒压贮水瓶中的水自水平方向的喷口中流出，形成稳定的水瓶。调节贮水瓶的高度（即调节水流喷出的速度），使水流的射程与坐标杆的长度基本相等。

(2)在坐标杆上每隔一小段悬挂一个小球，仔细地调节悬挂小球的细线的长度，使从正面看上去水流正好从各个小球前面流过。

(3)撤去喷水装置。将一块复上白纸的木板放在小球后面，在纸上画下小球的位置，再连成一曲线，即可得到平抛运动的轨迹。

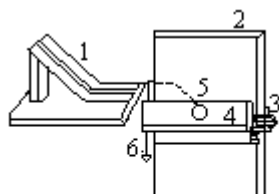
(4)用与方法一操作(3)(4)(5)(6)(7)相同的方法处理图线。

方法四

器材 斜槽，钢球，木板自制L形水平支架，铁皮夹子、三角尺，白纸，复写纸等 L形水平支架的制作方法

其长度与所用木板宽度相同，宽与高可取5cm左右。支架可用薄木板钉成也可用薄铁片或薄铝片折成。

操作



1. 斜槽 2. 竖直木板 3. 铁夹
4. 水平支架 5. 钢球 6. 重垂线

(1)将斜槽固定在水平桌面上，槽口紧靠竖直木板。木板上用图钉固定预先画有直角坐标系的白纸。用重垂线校正木板位置，使坐标系纵轴成竖直，横轴与钢球飞出的方向平行（如图）。

(2)在水平支架上固定一张白纸条，覆上复写纸。用铁皮夹子将支架固定在竖直木板上，使支架水平面比槽口低5mm。

(3)让小球从斜槽顶端由静止开始滚下，并重复三次。根据落点位置，用三角尺在坐标纸上作好标记。

(4)将支架移至比槽口低20mm、45mm、80mm、125mm、180mm、245mm、320mm等处，重复步骤(3)。在支架的白纸上得到一系列等间距的点，这说明每次增加的飞行时间是相等的，而竖直方向增加的位移之比为1:3:5:7……，符合平抛运动的规律。

(5)取下坐标纸，根据所作标记，画出小球作平抛运动的轨迹，用与方法一操作(3)、(4)、(5)、(6)、(7)相同的方法处理图线。

注意

(1)小球击中L形支架时，支架位置可能会有微小移动。因此，在重复做实验时，应注意水平支架复归原位。

(2)竖直木板的晃动会造成较大误差。因此，实验中须严格防止竖直木板摇晃。

(3)小球每次要从斜槽上的同一位置由静止滚下。

方法五

器材

小铁球（直径20mm），木板(40cm×50cm)，重垂线，有水平轨道的斜槽，铁架台，木条，铁夹，米尺，白纸，复写纸等。

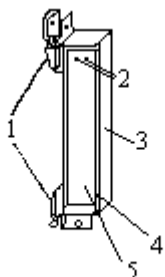
操作

(1)按图(a)制成记录挡板。

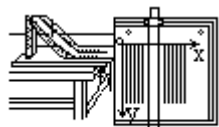
(2)把斜槽固定在水平桌面上（如图 b），再利用重垂线将复有白纸的木板固定于竖直位置。

(3)利用固定在记录挡板上下端的夹子将挡板夹在竖直放置的木板上，使挡板左边缘与槽口的水平距离为 5cm。

(4)小球从斜槽上某一位置由静止释放，小球离开水平槽后作平抛运动，并与挡板撞击。拉开复写纸，找到碰击点，并将此位置记录在白纸上。



1. 铁夹 2. 图钉 3. 木条 4. 白纸 5. 复写纸



(b)

(5)水平移动挡板，使其左边缘依次与槽口的水平距离分别为 10cm，15cm，20cm，……重复操作(4)，注意每次小球应在同一高度释放。

(6)测出挡板纸条上 0' 点（与 x 轴等高）到各碰击点之间的距离。可见从 0' 点到第 1、2、3、4……个碰击点的距离之比为 1：4：9：16……，符合平抛运动的规律。

(7)取下白纸，根据所做标记，画出小球作平抛运动的轨迹。用与方法一操作(3)、(4)、(5)、(6)、(7)相同的方法处理图线。

方法六

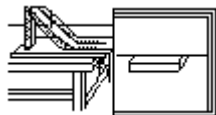
器材 小铁球，木板(40cm×50cm)，斜槽轨道，铁架台，自制砂槽，重垂线，白纸等。

砂槽的制作方法

用薄木板或铁皮制成砂槽，长 20cm，宽 3cm，深 3cm。

操作

(1)将斜槽轨道固定在桌面上，再利用重垂线将复有白纸的木板竖直固定在桌边上（如图）。



(2)在砂槽中装上砂，深度约占槽深的五分之四。

(3)将砂面刮平后把砂槽水平紧靠在木板上，使砂面到槽口的竖直距离为 5cm。

(4)小铁球从斜槽上某位置由静止释放，小球离开水平槽后作平抛运动落在砂槽内。用铅笔描下砂中小球的球心在白纸上的投影。

(5)移动砂槽的高度，使砂面与槽口的竖直距离依次为 10cm，15cm，20cm，……。重复操作(4)，注意每次小球应在同一位置释放。

(6)取下白纸，根据所作标记，画出小球作平抛运动的轨迹。用与方法一操作

(3)、(4)、(5)、(6)、(7)相同的方法处理图线。

(76) 分解平抛运动

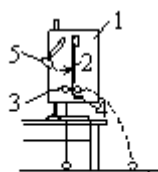
本实验用四种方法说明，可以把平抛运动分解成水平方向的匀速直线运动(速度与抛出速度相同)和竖直方向的自由落体运动来研究。方法一和方法二分别显示了竖直和水平方向的分运动的性质，方法三、四则作了综合的演示。

方法一

目的 显示平抛运动在竖直方向上的分运动是自由落体运动。

器材 平抛竖落仪，铁架台等。

操作



1. 底板 2. 弹簧片 3. 夹板
4. 托板 5. 重锤

(1)按图用铁架台将平抛竖落仪固定好，使仪器的底板在竖直面内，托板在水平面内。把竖落球 A 夹在弹簧片和夹板之间，平抛球 B 静止放在托板上，两球的球心在同一高度内。

(2)将重锤拎起到适当的高度后释放，重锤向下摆动，撞击弹簧片，使 A 球被释放而自由下落，同时弹簧片将 B 球水平推出作平抛运动。注意听两球各自的第一次落地声，可听到两个声音是合二为一的，说明平抛运动在竖直方向上的分运动是自由落体运动。

(3)改变平抛竖落仪的高度，可验证其他情况。

注意

(1)仪器底板要稳固，实验中不能晃动。

(2)重锤拉起的高度要适当，太高了，在它与弹簧片撞击的瞬间容易引起整个仪器的震动。

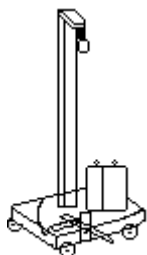
(3)托板一定要保持水平，否则 B 球作的不是平抛运动。

方法二

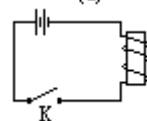
目的 显示平抛运动在水平方向上的分运动是匀速直线运动。

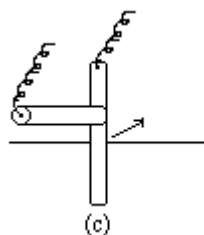
器材 自制平抛运动演示仪，带滑轮的长木板，细绳，砝码，砝码盘等。

平抛运动演示仪的自制方法



(a)





如图(a)所示，在小车立柱上装一个电磁铁，电磁铁由直径 5mm，长 40mm 的铁芯外包绝缘纸后用直径 0.51mm 的漆包线绕 300 匝而成。电源用两节一号电池串联，通过碰撞开关 K 向电磁铁供电，电路如图(b)所示。碰撞开关可用铜皮弯制而成，要求在很小的外力作用下即能碰开（图 c）。电磁铁的正下方装有盛球盒，它的直径比铁球直径稍大，底下垫一层泡沫塑料作缓冲用。

操作

(1)将碰撞开关接通，小铁球被吸在电磁铁下面。用手碰一下碰撞开关，小球自由落下正好掉在盛球盒内，说明电路工作正常，盛球盒位置要放准确。

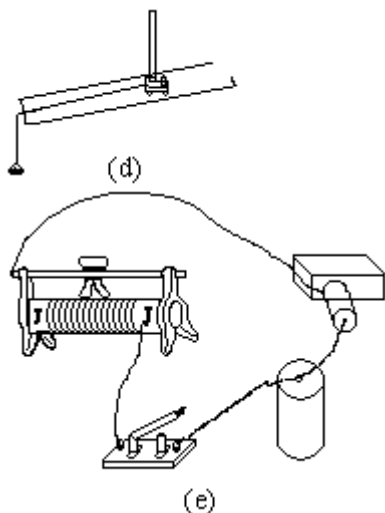
(2)在砝码盘中加适量的砝码，通过滑轮拉动小车作匀速运动（砝码多少要反复调整，直到目测认为确是匀速运动为止）（如图 d）。在木板边上固定一个能碰开碰撞开关的档条。

(3)接通碰通开关，电磁铁吸住小铁球，让细绳拉着小车作匀速运动。当小车运动到挡条处，开关被碰开，小球落下，可看到小球的运动轨迹成抛物线状，准确地落入行进着的小车的盛球盒中，说明作平抛运动的物体在水平方向上确实是以抛出时的初速度在作匀速运动。

(4)让小车改用较大的速度作匀速运动，重复操作(3)。

建议

(1)小车可用玩具马达减速后拉动，拉动速度可由小马达串联的滑动变阻器控制。



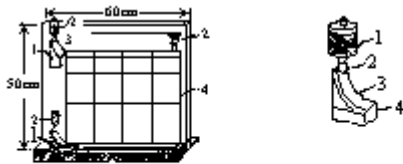
(2)碰撞开关可改用于簧管作传感器，这样可以完全不影响小车的运动。

方法三

目的 显示平抛运动在水平方向上的分运动是匀速直线运动（速度与抛出速度相同），竖直方向上是自由落体运动。

器材 自制平抛运动演示仪，干电池，导线等。

平抛运动演示仪的制作方法



1. 弧形轨道 2. 电磁铁 3. 碰撞开关 4. 背景板
1. 电磁铁 2. 小铁球 3. 弧形轨道 4. 碰撞开关

如图(a)所示,在背景板的左上角和左下角各固定一个同样尺寸的弧形轨道,在左下角的弧形轨道接着一条水平轨道。两个弧形轨道顶端各装一个电磁铁,上下两个电磁铁由同一开关控制。在背景板的右上角也装有一个电磁铁(可左右移动),由装在左上角轨道末端的一个碰撞开关控制(碰撞开关要轻巧灵活,基本上不妨碍铁球的运动)(图b)。左上角小铁球滚到弧形轨道末端时的高度要与右上角小铁球被电磁铁吸住时的高度一样。电磁铁的铁芯用一段直径8mm、高20mm的圆铁柱,线圈用0.25mm的漆包线绕500匝。电源用两节干电池。背景板上水平方向画上几条等间隔的竖直线,竖直方向上画上几条水平线,到起始水平线的距离之比是1:4:9:16。

操作

(1)接通电磁铁电源,在左上角、左下角两个电磁铁上各吸一个铁球。切断电源,可看到两球同时从弧形轨道口飞出,上面一个作平抛运动,下面一个在平直轨道上作匀速运动。在运动过程中,每一时刻两小球都在同一竖直线上,过一段时间后面两球相撞。说明平抛运动的水平分运动是匀速直线运动,速度与初始速度相同。

(2)接通电源,在左上和右上角两电磁铁下各吸一个铁球。切断左上角磁铁的电源,当铁球滚到弧形轨道末端时,碰断了右上角电磁铁的电路,使右上角铁球同时开始作自由落体运动。在运动过程中,每一时刻两球都在同一水平面上,过一段时间后,两球相撞。向左移动右上角电磁铁,重复以上实验,两球也能相撞。说明平抛运动的竖直分运动是自由落体运动。

(3)调节右上角电磁铁的左右位置,使操作(2)中两小球在底部水平轨道上相撞。

(4)接通电源,使三个电磁铁都吸住铁球,切断电源,可在右下角看到三球相撞的有趣现象。

注意

(1)下部水平轨道要光滑平整,如摩擦阻力较明显,可设法使其稍稍向右倾斜,以抵偿摩擦力。

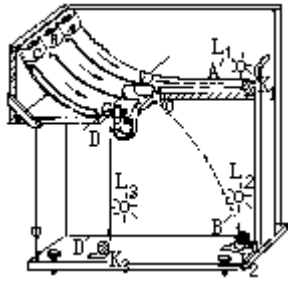
(2)铁球宜适当大一些,以减小碰撞开关和空气阻力的影响。

方法四

目的 显示平抛运动在水平方向上的分运动是速度为 v_0 的匀速直线运动,在竖直方向上的分运动是自由落体运动。

原理 如图所示,打开A、B、C三球的闸钩(铰链状闸门及其闸钩图中未画出),三球同时滚下:A球作匀速直线运动到达A'点撞击开关 K_1 ;B球水平抛出到达B'点撞击开关 K_2 ;C球滚到弧形轨道出口处撞击弹簧轧片E,使原来被E轧片轧住的D球同时下落,D球落下到达D'撞击开关 K_3 。学生可以观察到 K_1 、 K_2 、和 K_3 控制的三个电珠 L_1 、 L_2 、 L_3 同时点亮。

器材



如图所示，图中电源及三条电灯线的开关电路省去未画出。撞击开关 K_1 、 K_2 、 K_3 可以用弹簧铜片自制，也可以购置一般船形开关代替。但为了提高小球撞击开关时的命中率，应该适当扩大开关的迎球面积。

操作

- (1) 单置 B 球，演示平抛运动达 B' 点时撞击开关 K_2 ，使灯 L_2 亮。
- (2) 单置 A 球，演示匀速直线运动达 A' 点时撞击开关 K_1 ，使灯 L_1 亮；
- (3) 单置 C、D 两球，演示 D 球自由落体运动达 D' 点时撞击开关 K_3 ，使灯 L_3 亮；
- (4) 同时装上 A、B、D 四球，演示同时撞击开关，使灯 L_1 、 L_2 、 L_3 同时亮。

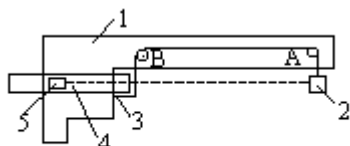
研究平抛运动(77)

平抛运动是一种二维的曲线运动。研究二维曲线运动的常用方法是将它分解成两上一维运动来考察。本实验三种方法都是将平抛运动分解成水平和竖直两个方向来研究，方法一是定性的研究，方法二、三分别研究物体在两个方向上的分运动的位移、速度、加速度与时间的关系。它们采用的都是等时间间隔记录法。

方法一

器材 射枪（可以用冲击摆实验中的弹簧枪也可以自制），钢球，光电开关，电磁铁，粘有小铁片的乒乓球，塑料网袋，连底座的木板(400mm×400mm)等。

射枪的制作方法



1. 枪身 2. 靶 3. 钢针 4. 玻璃管 5. 木塞子弹

用木材制作如图所示，枪身长约1m，枪身上安装两个滑轮A、B，枪管用直径约24mm，长为200mm的玻璃管，在管的右端正下方固定一个钢针，用铝圆柱体做靶子，靶系在细线的一端，线的另一端做成活绊依次绕过滑轮A、B，将活绊紧贴玻璃管右端管口套在钢针上。子弹用木塞制成圆柱形（长约2cm，直径比玻璃枪管的直径略小些）。

操作

将靶子的悬线依次绕过滑轮A、B，活绊紧贴枪口套在钢针上。子弹放在枪管左端。从枪管的左端观察子弹是否对准靶子，调整悬线长度，使子弹和靶在一直线上。从枪管左端用劲向子弹吹气，使子弹沿枪管射出。子弹冲出枪口时冲开活绊，子弹做平抛运动，靶子同时开始做自由落体运动，子弹在空中击中靶子。

方法二

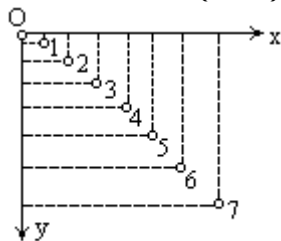
器材 运动轨迹显示仪（J2156型），誊写蜡纸等。

操作

(1) 打开前电极（铜丝网）板，在其内表面附一张誊写蜡纸，尽可能铺平张紧。将放电腔的长边调成水平。在平抛枪口中装入钢球，然后合上前电极板。接上高压脉冲电源。

(2) 接通高压脉冲电源的低压开关，频率选择旋钮置于50Hz档。在左手按下高压按钮的同时，右手扳动平抛枪机射出钢球。当钢球在放电腔内部作平抛运动时，可通过由铜丝网制成的前电极看到明亮的闪光点迹，这是一连串的弧光放电，在蜡纸上留下静电潜影。运动结束后放开高压按钮，高压自动消失。

(3) 打开前电极板，取下蜡纸，铺平在桌面上，洒一层绝缘色粉（仪器附带），再提起蜡纸，将多余的色粉抖落。在有静电潜影的地方吸附上色粉，显示出类似于频闪照片的运动点迹（图a）。



(a)

(4)在纸中找 8-9 个清晰的连续点迹，标上 0、1、2、3……等标号。以 0 点迹作为原点，水平方向作为 x 轴，竖直向下的方向作为 y 轴。第 1、2、3，……号点迹的 x 坐标分别为 x_1, x_2, x_3, \dots ，y 坐标分别为 y_1, y_2, y_3, \dots 。

(5)以横轴代表小球水平方向的位移 x，纵轴代表时间 t (同样以小球运动到 0 号点迹的时刻为 0)，作 x-t 图。得到一条直线，说明小球水平方向的位移与时间成线性关系，即小球在水平方向作匀速直线运动。用图解法求出直线的斜率，就是小球在 x 方向运动的速度。

(6)以纵轴代表小球竖直方向的位移 y，横轴代表时间 t，作 y-t 图。得到一条曲线，与基础篇第 50、51 页中各种曲线对照，经比较，像

$y = ax^2 + bx$ 的图线，试作 $\frac{y}{t} - t$ 图，得一直线，说明小球竖直方向的位

移与时间确实有 $y=at^2+bt$ 的关系，也就是说小球在竖直方向作匀加速运

动， $\frac{y}{t} - t$ 图线的截距 b 是小球的竖直初速度 v_0 ，斜率 k 的两倍是小球的加速度 a。

(7)从小球的竖直初速度和加速度，利用 $v_{yt}=v_0+at$ 可求出小球任意时刻的竖直速度，进而求出小球的合速度 $v_t=v_{xt}+v_{yt}$ 。

实例

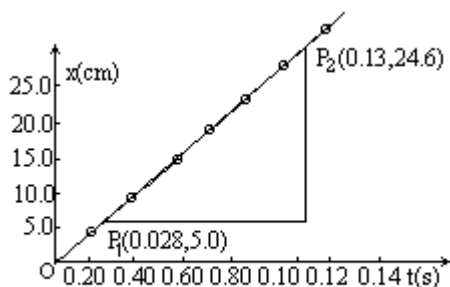
(1)从誊写蜡纸上测出点迹的 x 坐标如下：

标号	1	2	3	4	5	6	7
x(cm)	3.8	7.5	11.2	15.3	19.2	22.5	26.7
t(s)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14

作出 x-t 图 (图 b)，得到一条直线，说明小球在水平方向作匀速运动。用图解法求出图线的斜率。

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{24.6 - 5.0}{0.130 - 0.028} \text{ cm/s} = 192 \text{ cm/s},$$

即小球抛出的初速度。



(b)

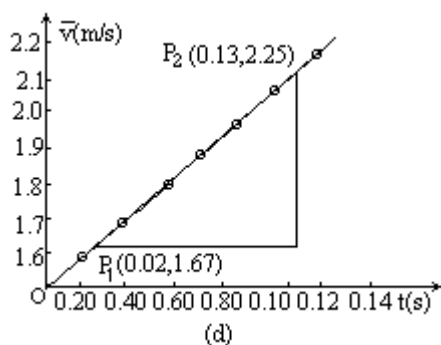
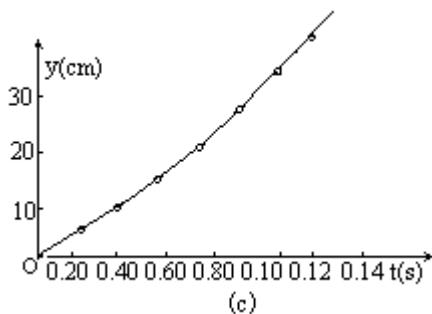
也可以用线性回归法处理实验数据：x 与 t 相关系数 $r=0.9998 > 0.874$ ，说明 x 与 t 成线性关系：斜率 $k=191 \text{ cm/s}$ 。

(2)从誊写蜡纸上测出点迹的 y 坐标如下：

标号	1	2	3	4	5	6	7
y(cm)	3.3	7.2	11.1	15.7	20.9	25.8	31.4
t(s)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14
y/t(m/s)	1.65	1.80	1.85	1.96	2.09	2.15	2.24

作出 $y-t$ 图 (图 c), 经比较像 $y=ax^2+bx$ 的图线, 因此再试作 $y/t-t$ 图, 得到一条直线 (图 d)。说明小球在竖直方向作匀加速运动。用图解法

求出 $y/t-t$ 图线的斜率 $k = \frac{\bar{v}_2 - \bar{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{2.21 - 1.67}{0.13 - 0.02} \text{ m/s}^2 = 4.9 \text{ m/s}^2$, y 方向的加速度 $a_y = 2k = 2 \times 4.9 \text{ m/s}^2 = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。



也可以用线性回归法处理实验数据, y/t 与 t 的相关系数 $r=0.994 > 0.874$, 说明 y/t 与 t 成线性关系。斜率 $k=4.84 \text{ m/s}^2$ 。 $a_y=2k=9.7 \text{ m/s}^2$, 截距 $b=1.58 \text{ m/s}$, 说明 0 号点迹处小球的竖直分速度为 1.58 m/s 。

(3) 求出某一点迹处小球的速度 (例如求第 4 点的速度 v_4)

$$v_{4x} = v_x = 1.92 \text{ m/s}.$$

$$v_{4y} = v_{y0} + at = (1.58 + 9.8 \times 4 \times 0.02) \text{ m/s} = 2.36 \text{ m/s}.$$

$$v_4 = \sqrt{v_{4x}^2 + v_{4y}^2} = \sqrt{1.92^2 + 2.36^2} \text{ m/s} = 3.04 \text{ m/s}.$$

方法三

器材 频闪光源 (PS-01 型), 平抛竖落同步器 (PST-01 型), 照相机, 黑色幕布等。

操作

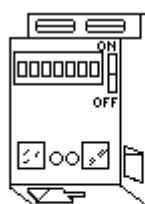
(1) 在暗室的墙上挂上黑色幕布作为落球的背景, 在幕布前适当的高度 (距地面约 1.1 m) 处悬挂平抛竖落同步器 (小球抛出方向与幕布平行)。将频闪光源的控制线接到照相机的闪光同步插口上, 用三角架将照相机固定。

(2)将照相机用三角架支撑好，光圈开到最大，快门速度用B门。调节相机到平抛竖落同步器的距离，要求能拍到整个平抛过程，并使小球在飞行过程中的各点到相机的距离尽量相同。调整焦距，使小球成像清晰。

(3)将频闪光源的闪光周期开关置于B档（即闪光周期为0.04s）。将一个白色球送入同步器左下侧的自由落体球孔，另一个球送入右下侧的平抛球孔，按下开关接通同步器的电源，球就被夹持在孔中（图a）。

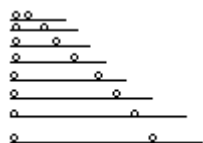
(4)按下照相机的快门，频闪光源就发出一定频率的闪光。当第一次闪光照到同步器的光电三极管上时，它内部的电路动作，将自由落体球释放，将平抛球弹出。待球落地后即释放照相机的快门，使频闪光源停止工作。

(5)将摄好的黑白底片按常规冲洗、放大（反差尽量大一些）。得到一张平抛与自由落体的照片（如图b）。



(a)

- 1.平抛球入孔 2.自由落体入孔
3.观察窗 4.发光管 5.光电三极管



(b)

(6)过自由落体球每个像的下沿作一条水平线，可看出平抛球在竖直方向上的运动与自由落体是完全相同的。

(7)按方法二操作(4)、(5)、(6)、(7)处理平抛球的频闪照片，可得出与方法二相同的结论。

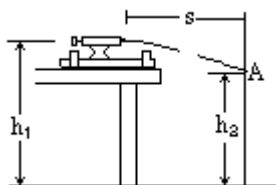
注意 因为频闪照片是将实物按一定比例缩小的，因此如果要测量小球真实的速度和加速度，可以采用以下方法：在黑幕上粘两条上下相距1m的细纸条，并让小球在尽量靠近黑幕处下落（但不能与黑幕接触）。洗出照片后测量出照片上两白条之间的距离s，将所有从照片上测出的速度和加速度按s：1的比例放大即可。

(78) 测量弹丸的速度

方法一

器材 冲击摆实验器，刻度尺，气泡水平仪等。

操作



(1) 取下摆块后将冲击摆实验器放在水平桌面上，调节底座的螺丝，用气泡水平仪进行检查，将底坐调成水平。

(2) 用左手压住弹簧枪或底座，右手扣动板机，用中速档发射弹丸，弹丸击墙上 A 点留下痕迹（如图）。

(3) 用同样的方法用中速档发射 10 次，在墙上留下 10 个痕迹。用一个尽量小的圆将 10 个痕迹圈在里面。用刻度尺测量出弹簧枪轴线的高度 h_1 和弹痕圆周心的高度 h_2 ，再测量出弹簧枪枪口到墙的距离 s 。

(4) 根据平抛运动的规律，可算出弹丸的速度：

$$v = s / t = s / \sqrt{2(h_1 - h_2) / g}.$$

注意 每次发射弹丸，冲击摆底座的位置不能移动。

分析

(1) 所测弹丸速度的误差

$$\text{因为 } v = s / \sqrt{2(h_1 - h_2) / g},$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } E_v &= E_s + \frac{1}{2} E_{(h_1 - h_2)} + \frac{1}{2} E_g \\ &= \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2(h_1 - h_2)} (E_g \text{ 可忽略}). \end{aligned}$$

式中 s 、 h_1 可取刻度尺的测量误差（例如最小刻度的一半）， h_2 可取弹痕圆圈的半径 r 。

(2) 实验的有利条件

$$\text{因为 } E_v = E_s + \frac{1}{2} E_{(h_1 - h_2)}, \text{ 所以应尽量满足 } \frac{1}{2} E_{(h_1 - h_2)} = E_s$$

$$\text{即 } \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2(h_1 - h_2)} = \frac{\Delta s}{s}.$$

实例 实验中测得 $s=2.63\text{m}$ ， $h_1=90.0\text{cm}$ ， $h_2=15.0\text{cm}$ ， $r=1\text{cm}$ ，取 $\Delta s=1\text{cm}$ ， $\Delta h_1=0.5\text{cm}$ 。

$$v = \frac{s}{\sqrt{2(h_1 - h_2) / g}} = \frac{2.63}{\sqrt{2(0.90 - 0.15) / 9.8}} = 6.7 \text{ m/s},$$

$$E_v = \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2(h_1 - h_2)} = 0.4\% + 1\% = 1.4\%,$$

$$\Delta v = v \cdot E_v = 6.7 \times 1.4\% \text{ m/s} = 0.1 \text{ m/s}.$$

所以测量结果： $v=6.7 \pm 0.1 \text{ m/s}$ 。

方法二

器材 冲击摆实验器，气泡水平仪，刻度尺，复写纸，白纸等。

操作

(1)同方法一操作(1)。

(2)用左手压住弹簧枪或底座，右手扣动板机。多次练习，使发射子弹速度的大小和方向都趋于稳定，子弹在地板上的落点比较集中（相距不要超过5cm）。

(3)在目测的落点处铺上一张白纸，上面再覆盖一张复写纸。

(4)用同样的方法射10次子弹，在白纸上留下10个痕迹。用一个尽量小的圆将10个痕迹圈在里面。用刻度尺测量出弹簧枪枪口在地上的投影到圆圈中心的距离 s ，以及弹簧枪筒轴线到地面的高度 h 。

(5)子弹在空中飞行的时间 $t = \sqrt{2h/g}$ ，子弹离开枪筒时的速度

$v = s\sqrt{g/2h}$ ，即可算出子弹的速度。

注意 同方法一。

分析

(1)所测弹丸速度的误差

因为 $v = s\sqrt{g/2h}$,

所以 $E_v = E_s + \frac{1}{2}E_g + \frac{1}{2}E_h = \frac{s}{s} + \frac{1}{2} \frac{h}{h_0}$

(E_g 可忽略)式中 h 可取刻度尺的测量误差(如最小刻度的一半)， s 可取痕迹圆圈的半径 r 。

(2)实验的有利条件

因为 $E_v = E_s + \frac{1}{2}E_h$ ，所以应尽量满足 $\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta s}{s}$ 。冲击摆子弹

的速度约在6—8m/s范围中，如果 $h=1\text{cm}$ ， $s=2\text{cm}$ ，则可取 $h=0.70\text{m}$ ，

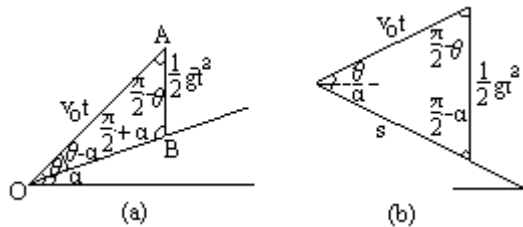
$$\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{h} = \frac{0.01}{2 \times 0.70} = 0.72\% , \quad \frac{\Delta s}{s} = \frac{0.02}{2.7} = 0.74\% .$$

(79) 斜抛运动的射程与射高

本实验用三种方法来观察斜抛运动的射程与射高和初速度、抛射角之间的关系。在实验中应选择适当的初速度。初速度过小了射程与射高的变化不明显；初速度过大了会使空气的阻力变得明显起来，使抛射体的运动轨迹由抛物线变成“弹道曲线”。

方法一

原理 讨论斜抛运动在斜坡上的射程时，将斜抛运动看成初速度方向上的匀速直线运动和竖直方向上的自由落体运动的合运动比较方便。



(1) 设一斜坡的仰角是 α ，斜抛物体的初速度大小是 v_0 ，与水平面之间的夹角是 θ (图 a)。将斜抛运动看成是匀速直线运动 OA 和自由落体运动 AB 的合运动。OA = $v_0 t$ ，AB = $\frac{1}{2} g t^2$ ，OB = s ，根据正弦定理，在三角形 OAB 中

$$\begin{cases} \frac{s}{\sin(\frac{\pi}{2} - \theta)} = \frac{v_0 t}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} \\ \frac{v_0 t}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} = \frac{g t^2}{2 \sin(\theta - \alpha)} \end{cases}$$

从 式可得：
$$t = \frac{2 v_0^2 \sin(\theta - \alpha)}{g \cos \alpha}$$

将 式代入 式：

$$\begin{aligned} s &= \frac{2 v_0^2 \sin(\theta - \alpha) \cos \theta}{g \cos^2 \alpha} \\ &= \frac{v_0^2}{g \cos^2 \alpha} [\sin(2\theta - \alpha) + \sin \alpha] \end{aligned}$$

上式中只有 $\sin(2\theta - \alpha)$ 一项随 θ 变化，当 $2\theta - \alpha = \frac{\pi}{2}$ ，此项有极大

值 1。由此可见当 $\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2}$ 时， s 有极大值 $\frac{v_0^2 (\sin \alpha + 1)}{g \cos^2 \alpha}$ 。当 α 为零时(即

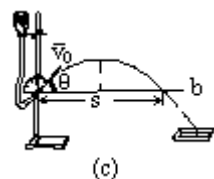
在平地上斜抛)，可得到熟悉的结论：当 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 时， s 有极大值 v_0^2 / g 。

(2) 设一斜坡的仰角是 $-\alpha$ (图 b)，用与原理(1)相同的方法可得当

$$\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \text{ 时， } s \text{ 有极大值 } \frac{v_0^2}{g \cos^2 \alpha} (\sin \alpha + 1)。$$

器材 玻璃瓶，带 2 个孔的橡皮塞，玻璃管 2 根，废 9 号针头，铁架台，刻度尺，塑料片，细木杆，接水盆等。

操作



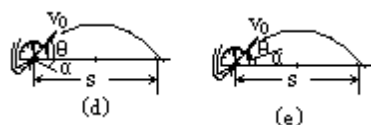
(1)按图(c)所示安装好实验器材。玻璃瓶的橡皮塞中穿两个玻璃管，以保持水流恒速（详见实验 75 方法三）。水流喷口用 9 号针头从根部截去后做成。划有刻度的半圆形塑料片固定在铁架台上，漆成黑色的细长木杆和喷口都可围绕固定点转动。

(2)调节玻璃瓶的高度，以选择适当的水流速度。将木杆固定在水平方向（图 c）。改变喷水嘴的仰角（即抛射角），使它由 0° 逐渐变化到 90° 可看到在开始阶段，随着 角的增大，射程 s 也增大，同时射高 h 也增大。当 超过 45° 之后，随着 角的增大，射高 h 仍然增大，射程 s 却减小了。当 等于 45° 时， s 最大，用刻度尺测量此时的 s_{45} 与 h_{45} ，大致的有 $s_{45}=4h_{45}$ 。当 等于 30° 时，用粉笔在木杆上记下射程 s_{30} ，调节到 60° 时，可以看到 $s_{30}=s_{60}$ 。调节到 90° 时， h 达到极大值 h_{90} ，用刻度尺测量出 h_{90} ，可有 $s_{45}=2h_{90}$ 。

(3)固定水管的仰角，改变玻璃瓶的高度以改变水流的初速度 v_0 ，可看到 v_0 增大时，水流的水平射程 s 和射高 h 都增大。

(4)改变木杆的方向，使它在水平方向之上与水平方向成 角，重复操作(2)，可看到水流射到木杆上的距离 s 不再是当水流射出角 $=45^\circ$

时最大，而是当 $=\frac{\pi}{4}+\frac{\alpha}{2}$ 时， s 最大(图d)。



(e)

(5)改变木杆的方向，使它在水平方向之下与水平方向成 角，重复

操作(2)，可看到当水流射出角 $\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2}$ 时，水流射到木杆上的距离 s

最大(图e)。

方法二

原理 同方法一。

器材 运动轨迹显示仪 (J2156 型)，誊写蜡纸，刻度尺等。

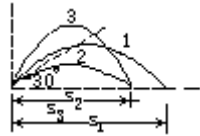
操作

(1)同实验 77 方法一操作(1)，只是将平抛枪改成斜抛枪，斜抛枪的仰角有三档： 30° ， 45° ， 60° 。

(2)与实验 77 方法一的操作(2)、(3)类似，以相同大小的初速度按以上三种仰角依次发射钢球，在同一张蜡纸上显出三条色粉连续径迹（如图）。

(3)用刻度尺测量三条径迹的射程 s_1 ， s_2 ， s_3 和射高 h_1 ， h_2 ， h_3 。可看出当仰角为 45° 时射程 s_1 最大，仰角为 30° 、 45° 、 60° 时的射高之比为 $h_2 : h_1 : h_3 = 1 : 2 : 3$ 。

(4)作一条仰角为 30° 的虚线，可看出径迹 3 在此“斜坡上”的射程比径迹 1 要大。



方法三

原理 同方法一。

器材 高中运动学、动力学组合教具 (J2138 型) 1 套。

操作

(1) 如图(a)安装好实验器材。

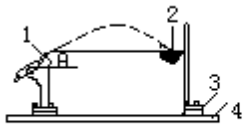
(2) 使枪管与水平方向 30° 仰角，调节球网与枪口等高。然后分别用枪的第一档 (低速档)、第二档 (中速档) 发射弹丸 (直径为 12mm 的小钢球)，并移动球网将球接住。可看到在抛射角一定时，初速度 v_0 大，射程 s 也大。

(3) 使枪管分别与水平方向成 30° 、 45° 和 60° 的仰角，都用第一档发射弹丸，同时用球网接住弹丸并测定它的水平射程。可看到在初速度 v_0 大小不变时，抛射角为 45° 时，水平射程最远，为 30° 和 60° 时，水平射程相同。

(4) 在球网升高 (或降低) 一定的高度，用第一档发射弹丸，反复调节滑块的位置及弹簧枪管的发射角度，使得只有一个角度能将弹丸打进球网内，发射角比此角度大一些或小一些的弹丸进不了球网 (图 b)。

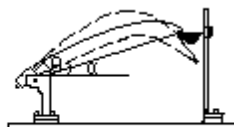
测量出枪口与球网连线与水平面的夹角 α ，弹簧枪的发射角 θ ，看是

否基本满足 $\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2}$ 的关系。



1. 弹簧枪 2. 球网 3. 滑块 4. 滑道

(a)



(b)

注意 枪口不要对着观察者，以免被弹丸误伤。

(80) 研究斜抛运动

斜抛运动是一种二维的曲线运动，研究一个较复杂的运动的常用方法是将它分解成两个较简单的一维运动来考察。本实验的方法一是将斜抛运动分解成水平方向的匀速运动和竖直方向的上抛运动；方法二是将斜抛运动分解成抛射方向的匀速运动和竖直方向的自由落体运动，分别研究物体在两个方向上的分运动的位移、速度、加速度与时间的关系。三种方法采用的都是等时间间隔纪录法。

方法一

器材 频闪光源，冲击摆，照相机，黑色幕布等。

操作

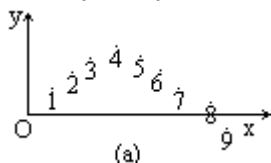
(1)在暗室的墙上挂上黑色幕作为背景。用一木块将冲击摆前端垫高，使弹簧枪筒与水平面约成 50° 角。用白漆将弹簧枪筒与子弹涂成白色。取下冲击摆的摆块，以免影响子弹的飞行。

(2)将照相机用三角架支撑好，光圈开到最大，快门速度用 B 门。调节相机到弹簧枪的距离，要求能拍到子弹的整个飞行过程，并使子弹在飞行过程中的各点到相机的距离尽量相同。调节相机焦距，使子弹成像清晰。

(3)将频闪光源的闪沅周期调节到 10Hz，并让其开始闪光。试验先弹射一次子弹，用眼睛可以看到由一个一个清晰的小白球连成的轨迹。

(4)重新装好子弹，使周围环境尽量黑暗。一手控制弹簧枪的板机，另一只手控制相机的快门，在打开相机的快门后立即按下弹簧枪的板机。等子弹飞出取景器的视野后尽快关闭快门。

(5)将摄好的黑白底片按常规冲洗、放大（反差尽量大一些），得到一张斜抛物体的频闪照片（如图）。



(6)在照片上找最左边的一个点作为坐标原点 0，其他点依次标上 1, 2, 3, ……。将水平方向作为 x 方向，竖直向上的方向作为 y 方向。第 1、2、3、……号点的坐标分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) ……。

(7)用米尺（如照片尺寸很小，可用读数显微镜）测量出各点的坐标。以横轴代表子弹水平方向的位移 x ，纵轴代表时间 t ，作 $x-t$ 。可得到一条直线，说明子弹在水平方向上的位移与时间成线性关系，即子弹在水平方向上作匀速运动。

(8)以横轴代表子弹在竖直方向上的位移 y ，以纵轴代表时间 t ，作 $y-t$ 图，可得到一条曲线。将此曲线与基础篇第 50、51 页中各种曲线比较，很像 $y=ax^2+bx$ 的图线 ($a < 0$)。于是再试作 $y/t-t$ 图，得到一条直线，说明子弹在竖直方向上的位移与时间确实有 $y=ax^2+bx$ 的关系，即子弹在竖直方向上作匀变速运动。

实例

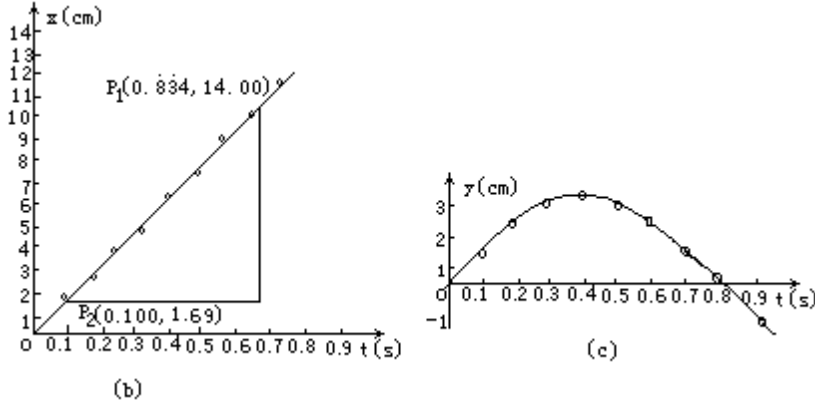
标点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x(cm)	1.68	3.36	5.64	6.82	8.40	10.68	11.76	13.44	15.12
y(cm)	1.46	2.44	3.08	3.30	3.26	2.68	1.64	0.34	-1.46
t(s)	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900

(1)从照片上测出子弹的 x 和 y 的坐标并作出 $x-t$ 图（图 b），得到一条直线，

说明子弹在水平方向上作匀速运动。用图解法求出图线的斜率：在图线上取两点 $p_1(0.100, 1.69)$ 和 $p_2(0.834, 14.00)$ ，图线的斜率。

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{14.00 - 1.69}{0.834 - 0.100} \text{ cm/s} = 16.8 \text{ cm/s}$$

也可以用线性回归法处理实验数据：x 与 t 的相关系数为 $r=0.998 > 0.798$ ，说明



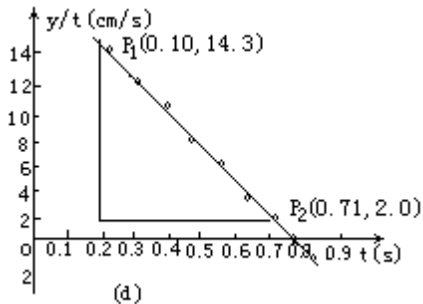
标点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t(s)	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900
y/(cm/s)	14.6	12.2	10.3	8.25	6.52	4.47	2.34	0.43	-1.62

x 与 t 成线性关系，斜率 $k=16.7 \text{ cm/s}$ 。

(2) 作出 y-t 图(图 c)，此图线比较像 $y=ax^2+bx$ 图线($a < 0$)，因此再试作 y/t-t 图，得到一条直线(图 d)，说明小球在竖直方向上作匀加速运动。用图解法求出图线的斜率：在图线上取两点 $p_1(0.10, 14.3)$ 和 $p_2(0.71, 2.0)$ ，图线的斜率

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{2.0 - 14.3}{0.71 - 0.10} = -20.2$$

也可以用线性回归法处理实验数据：y/t 与 t 的相关系数 $r=-0.9997$ ，说明 y/t 与 t 成线性关系，斜率 $k=-20.0$ 。



说明 如果要测量子弹飞行的真实速度，则必须确定照片的比例。

方法是测定照片上每个子弹的直径 \bar{D} ，然后求出它们的平均值 \bar{D} 。再用游标卡尺或螺旋测微器测出子弹的真实直径 D_0 ，即可确定照片的比例。

在以上实例中，测得 $\bar{D} = 0.480 \text{ mm}$ ， $D_0 = 1.20 \text{ cm}$ ，则照片的比例为

1 : 25。图(b)中图线的斜率 $k=16.8 \text{ cm/s}$ ，说明子弹在水平方向上的真实速度为 $16.8 \times 25 \text{ cm/s} = 4.2 \text{ m/s}$ 。图(d)中图线的斜率 $k=-20.0$ ，说明子弹在竖直方向上的加速度是 $20.0 \times 25 \times 2 \text{ cm/s}^2 = 10.0 \text{ m/s}^2$ ；截距 $b=16.3 \text{ cm/s}$ ，说明子弹在竖直方向上的初速度是 $16.3 \times 25 \text{ cm/s} = 4.08 \text{ m/s}$ 。

方法二

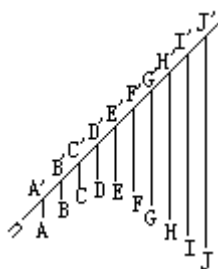
原理 斜抛运动可以看成是初速度方向上的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动的合运动。

器材 同方法一。

操作

(1)、(2)、(3)、(4)、(5)同方法一操作(1)、(2)、(3)、(4)、(5)。

(6)沿照片上弹簧枪筒的方向作一条直线。将照片上每个小球依次编为 A、B、C……J，过每一个小球作一条竖直线，分别与枪筒的延长线交于 A'、B'、C'……J'（如图）。



(7)分别测量出 A'B'、A'C'、A'D'……A'J'的长度 s。以横轴代表时间 t，纵轴代表 s，作出 s-t 图。可得到一条直线，说明子弹在枪筒方向上的位移与时间成线性关系，即子弹在枪筒的方向上作匀速直线运动。

(8)分别测量出 AA'、BB'、CC'……JJ'的长度 h。以横轴代表时间 t，纵轴代表 h，作 h-t 图可得到一条曲线。将此曲线与基础篇第 50、51 页中各种曲线比较，较像 $y=ax^2+bx$ 的图线。于是再试作 h/t-t 图，得到一条直线，说明 h 与 t 有 $h=at^2+bt$ 的关系，即子弹在竖直方向上作匀加速运动。

方法三

器材 运动轨迹显示仪（J2156 型），誊写蜡纸等。

操作

(1)打开前电极（铜丝网）板，在其内表面夹附一张誊写蜡纸，尽量将蜡纸铺平夹紧。

(2)将放电腔的长边调成水平。在斜抛枪口中装入钢球，再合上前电极板。接上高压脉冲电源。

(3)接通高压脉冲电源的低压开关，频率选择旋钮置于 50Hz 档。在左手按下高压按钮的同时，右手扳动斜抛枪机射出钢球。钢球在放电腔内部作斜抛运动时，可在蜡纸上留下静电荷潜影。

(4)打开前电极板，取下蜡纸，平放在桌面上，洒一层绝缘色粉。然后提起蜡纸，将多余的色粉抖落，即可在蜡纸上显示出类似于频闪照片的运动点迹。

(5)按方法一操作(6)、(7)、(8)的过程或方法二操作(6)、(7)、(8)的过程研究蜡纸上的运动点迹，即可得到与方法一、二相同的结论。

说明 斜抛枪的仰角有三档：30°、45°、60°，可重复研究不同抛射角的斜抛运动的规律。

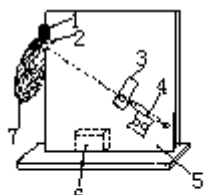
(81) 射猴

本实验能很形象地说明斜抛运动是一种初速度方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动的合运动。实验成功的关键：一是“子弹”的射出与“猴子”的下落要尽量同步，二是枪管的轴线要对准下落前的“猴子”。

方法一

器材 弹簧枪（可利用冲击摆实验中的弹簧枪），钢球，光电开关，电磁铁，粘有小铁片的乒乓球，塑料网袋，连底座的木板（400mm×400mm）等。

操作



- 1.电磁铁 2.乒乓球 3.光电门
4.弹簧枪 5.木板 6.光电继电器
7.网袋

(a)

(1)将各器材安装在木板上，如图(a)所示。光控电磁铁由光电门、光电继电器和电磁铁三部分组成。其电路的原理图见图(b)。光电门由红外发射二极管和红外接收三极管 (D_1 和 BG_1) 组成。在待用阶段， D_1 发出的红外光线照射到 BG_1 上，光电继电器使电磁铁吸住粘有铁片的乒乓球（猴）。

(2)将固定在木板上的弹簧枪管的轴线对准乒乓球，拉出枪的撞杆使弹簧被压缩到一定位置后被扳机卡住，将钢球放在枪口上。

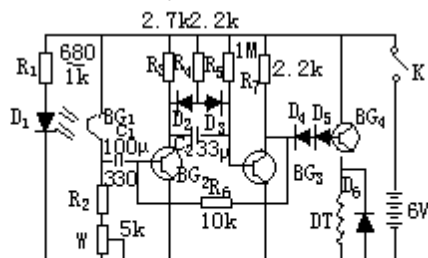
(3)用手扣动扳机，钢球从枪口射出的瞬时遮住光电门中 D_1 射向 BG_1 的光线，使电磁铁失电 1—2 秒钟，乒乓球在重力的作用下自由落下，在竖直下落过程中被飞来的钢球击中，一起落入网袋。

(4)改变弹簧枪的弹簧压缩程度的大小（即改变钢球初速度的大小），重复操作(2)。可看到两球相撞的位置发生了变化，但总能击中。

注意

(1)光电门内的红外发射，接收管相距约 2cm；仅容钢球穿过其中。

(2)为保证钢球击中乒乓球，除了枪管轴线瞄准乒乓球外，钢球的初速度方向也必须沿枪管轴线。但一般钢球较大，只能放在枪口，弹簧枪的撞杆中钢球的位置有时会发生偏差，致使钢球初速度方向有偏。可用略小于枪管内径的钢球，从枪口塞入枪管内，使击发后的钢球最初的运动是在枪管内进行，以保证钢球离开枪口的初速度方向与枪管轴线方向一致。



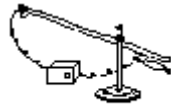
BG_2 · CS9014 BG_3 · C1815 BG_4 · CS9012 D_2 --D61N4148 W. 灵敏度调节

(b)

说明 光电开关原理

在图(b)中，晶体管 BG_2 、 BG_3 组成单稳态触发器，当 D_1 照射 BG_1 ，无触发信号，

BG₂ 截止、BG₃ 导通，BG₃ 集电极为低电平，使 BG₁ 导通，电磁铁 DT 得电，吸住乒乓球。当钢球瞬间遮住 D₁ 射向 BG₁ 的光线时，BG₁ 截止，一负向脉冲触发单稳态触发器，使 DT 失电 1—2 秒钟后再得电，又可进行下一次实验，这里的光电开关不宜采用普通的光电继电器，因为钢球遮光时间很短，极短的断电脉冲作用下电磁铁不易使乒乓球在重力作用下自由下落。



(c)

建议 如有条件，可制作一个如图(c)所示的演示器，能够很方便地演示各种不同方向的“射猴”。该演示器底盘要重，整个结构要牢靠，以免在击发过程中因装置晃动而导致实验失败。

方法二

器材 小方铁板，弹弓，细绳，石子，羊眼圈等。

操作

(1) 在墙上钉一只羊眼圈，细绳通过羊眼圈吊住铁板（如图）。



(2) 一手持弹弓架，另一手在捏住细绳端的同时拉开弹弓。弹弓瞄准铁板中心位置后射击（平射或斜射）。可看到石块总能击中铁板上画的猴子。

注意

(1) 画图案的小方板必须有一定的质量，如果用马粪纸之类较轻的东西制成，细绳阻力和空气阻力将有较明显的影响。

(2) 本实验的成功依赖于实验者熟练的操作技能，在演示前必须反复训练。

圆周运动速度的方向(82)

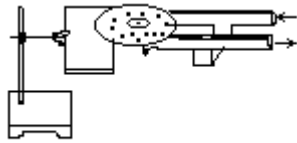
方法一

器材 手摇离心转台，木制圆盘（可用力矩盘代替），螺栓，螺母，铁架台，木板，白纸等。

操作

(1)将离心转台水平放在桌面上，螺栓穿过圆盘中心孔用螺母紧固后插入离心转台的套管中，用螺丝固定。在木板表面覆上白纸后，用铁架台水平固定在圆盘下面（靠近但不要接触）（图a）。

(2)用滴管向圆盘上滴一些红色水，然后摇动手柄使圆盘加速运动，直到盘边缘有若干水滴飞出落到白纸上为止。可看到纸上红色水的痕迹都是与圆弧相切的线条（图b）。说明作圆周运动物体的速度方向总是和圆弧轨迹相切的。



(a)



(b)

注意 圆盘上滴水不宜太多，以免痕迹过多过粗而看不清楚。

方法二

器材 小钢球，玻璃杯，白纸等。

操作

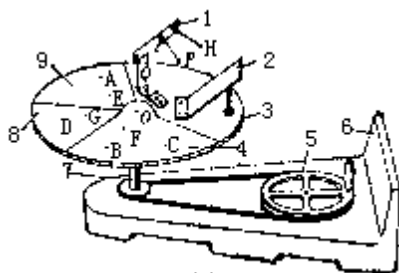
(1)将小钢球在红墨水中浸一下之后倒扣在玻璃杯内，用手摇动玻璃杯，使钢球在杯内作圆周运动，在纸上留下圆形轨迹印记（如图）。

(2)快速将杯子向上提起，可看到小球向外飞出。从钢球飞出时在白纸上留下的轨迹即可说明钢球作圆周运动时的速度向是和圆弧轨迹相切的。



(83) 向心力与哪些因素有关

方法一



(a)

器材 如图(a)所示, 1为摆球支架, Q、P、H都是金属摆球, 其中球Q用细绳悬挂, 恰好在转盘圆心O点的正上方, P、H两球用硬铜丝悬挂, 另一端弯成钩形, 挂在支架的小圆孔上, 使小球摆动灵活; 2为高度可调节的斜面; 3为转盘; 4这一部分上面有两层绒布; 5为带有手柄的转盘; 6为底座; 7为转盘的轴; 8这一部分上面有铁皮(马口铁); 9这一部分上面铺有光洁的白纸。转盘上A、B、C、D各点离转盘中心O点的距离相等。

另外还有几个实验用的小物块: 甲、乙、丙为三个相同的小橡皮块, 丁为质量大于甲、乙、丙的橡皮块, 丁的一面上还粘有一小段棉线。戊为圆柱形小磁铁(磁性不要过强)。

操作

下面各步骤, 都要求在转盘缓慢加速的过程中观察现象。

(1)取甲、乙两个小物块分别置于A、B两点, 可看到甲先脱离转盘, 说明光洁白纸对橡皮块的摩擦力较小。

(2)在丁物块的短棉线上涂上墨水, 并使棉线沿OC方向置于E点, 丁脱离转盘后可看到棉线留在纸上的痕迹一开始是沿着半径方向向外的, 说明惯性离心力是沿着半径方向的。

(3)取甲、乙、丙三物块分别置于O、F、B三点, 可看到丙、乙先后脱离转盘, 甲不会脱离, 说明在角速度与质量同时, 半径越大, 所需要的向心力越大。

(4)取甲、丁两物块分别置于B、C两点(丁物块用无棉线一面作底面), 可看到甲、丁同时脱离转盘, 说明在半径和角速度相同时, 所需要的向心力与质量成正比。

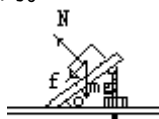
(5)挂一球于P位置, 可看到角速度越大, 偏角也越大(为悬线与竖直方向的夹角), 说明所需要的向心力与角速度正相关。

(6)Q、P、H三处均挂上小球, 可看到偏角 $H > P > Q=0$, 说明在角速度与质量一定时, 半径越大, 所需要的向心力越大。

(7)将斜面倾角调得较小, 使甲物体静止于斜面上, 可看到当角速度逐渐增大时, 甲会沿斜面上升直至飞出斜面。

(8)逐步增大斜面的倾角, 可看到要使甲物体块向上飞出所需要的角速度也越来越大。当斜面的倾角增大到某一角度后, 可看到无论怎样增大角速度, 也无法使甲向上飞出(原理见说明部分)。

(9)将底座竖放置, 把戊物块先后置于D、G两处, 可看到戊总是在最低点脱离转盘的。



(b)

注意 转盘适当地重一些, 有助于转动的稳定。

说明 当物体即将相对斜面向上运动时,受到三个力的作用:弹力 N 、重力 mg 和摩擦力 f (图 b)。根据牛顿第二定律可列出方程组

$$\begin{cases} N \cdot \cos \theta = f \cdot \sin \theta + mg \\ N \sin \theta + f \cdot \cos \theta = m\omega^2 r \end{cases}$$

经变换
$$\begin{cases} N \cos \theta - \mu \sin \theta = mg \\ N(\sin \theta + \mu \cdot \cos \theta) = m\omega^2 r \end{cases}$$

两式相除
$$\omega^2 = \frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\cos \theta - \mu \sin \theta} \cdot \frac{g}{r}。$$

当 $\cos \theta - \mu \sin \theta = 0$

即 $\theta = \text{tg}^{-1} \frac{1}{\mu}$ 时,

$\omega \rightarrow \infty$, 物体不可能向上飞出。

方法二

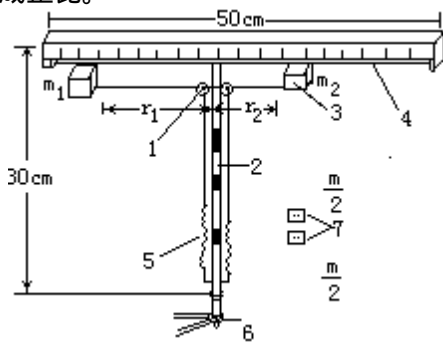
器材 自制转架式向心力演示器

转架式向心力演示器的制作方法

结构如图所示,由转架,滑块和测力计三部分组成,插在通用的手摇离心转台上使用。1 是同心轮轴(轮直径 40mm,轴直径 5mm),轴上绕拉滑块的细绳;2 是 T 形转架;3 是滑轮;4 是平行地装在横梁下的钢丝,支撑转体用;5 是测力弹簧;6 是手摇离心转台;7 是配重块(改变滑块质量用)。

操作

(1)将两个配重块插在左边的滑块上,使左边滑块的质量 m_1 等于右边滑的质量 m_2 的 2 倍,调节绕在轴上的绳,使两滑块作圆周运动的半径 $r_1=r_2$ 。转动手摇转盘,稳定时,从两个测力弹簧的伸长中可看到 $F_1=2F_2$,说明当 r 和 ω 相同时,向心力 F 与 m 成正比。



(2)卸下滑块上的配重块,使 $m_1=m_2$,调节绕在轴上的绳,使 $r_1=2r_2$ 。转动手摇转盘,当转盘稳定时,从两个弹簧测力计中可看到 $F_1=2F_2$,说明当 m 和 ω 相同时,向心力 F 与 r 成正比。

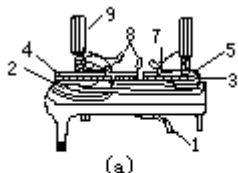
(3)保持 m 和 r 不变,以两种不同的角速度 ω' 和 ω'' 匀速转动手摇转盘,训练几次之后,尽量使 $\omega' = 2\omega''$ 。从弹簧测力计上可看到 $F' = 4F''$,说明在 m 和 r 不变时,向心力 F 与 ω 的平方成正比。

研究向心力(84)

器材 向心力演示器 (J2430 型)。

操作

(1) 将向心力演示器水平放置在桌面上，调节两测力器的标尺调零螺母，使在滑槽静止的情况下，两套筒的上沿都与标尺顶端对齐 (图 a)。

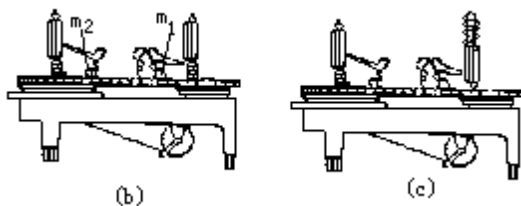


(a)
1. 摇手柄 2.3. 变速轮 4. 长滑槽
5. 短滑槽 6.7. 钢球 8. 横臂
9. 套筒 10. 标尺

(2) 将水平的传动皮带挂在两边半径相同的变速轮上，使两滑槽转动的角速度相同。将质量为 m_1 的铁球放在左边滑槽挡板处，质量为 m_2 的铅球放在右边滑槽挡板处 ($m_1=2m_2$)，使两球作圆周运动的半径相同。摇动手柄，随着两个滑槽转速的增加，两个测力计标尺上露出的格数也随之增加，但左边标尺露出的格数始终是右边的两倍 (图 b)，说明在 r 与 m 不变时，向心力 F 与质量 m 成正比。

(3) 传动皮带位置不变，将两个质量相同的铁球分别放在长滑槽中距转轴较远的挡板处和短滑槽中的挡板处，使两球作圆周运动的半径 $r_1:r_2=2:1$ 。摇动手柄，随着两个滑槽转速的增加，两个测力计标尺上露出的格数也随之增加，但左边标尺露出的格数始终是右边的两倍，说明当 m 与 r 不变时，向心力 F 与半径 r 成正比。

(4) 将传动皮带换到变速轮中间的两个轮子上 (两轮半径之比 $r_1:r_2=2:1$)，可使两轮的角速度 $\omega_1:\omega_2=1:2$ 。将两个铁球分别放在两个滑槽中半径相等的挡板处。摇动手柄，在两个滑槽转速增加的过程中左边标尺露出的格数始终是右边格数的四分之一。再将传动皮带换到变速轮最下面的两个轮子上，使得 $\omega_1:\omega_2=1:3$ ，重复以上实验，可见左边标尺的格数始终是右边的九分之一 (图 c)。说明在 m 和 r 不变时，向心力 F 与角速度 ω 的平方成正比。



(5) 利用操作 (2)、(3)、(4) 得到的结论，应用多变量组合的方法 (具体方法见实验 63 按语)，可得到向心力

$$F=K m \omega^2 r$$

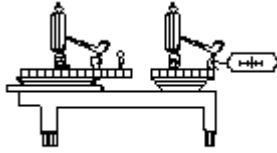
的结论。

(6) 将传动皮带挂在变速轮最下面两个轮子上 (角速度之比为 $1:3$)，将铁球放在短槽内 (长槽内不放球)，摇动手柄作匀速转动，用秒表测出长滑槽的转速 (转每分)。若长滑槽的转速为 n ，则短测槽的转速为

$3n$ ，即铁球的角速度 $= \frac{3n \times 2\pi}{60}$ 弧度 / 秒 $= 0.1n\pi$ 弧度 / 秒。测出铁球

圆周运动的半径 r 和铁球的质量 m ，代入 式可得

$$F=K m (0.1n\pi)^2 r$$



(d)

(7)按照图(d)用弹簧秤钩在横臂的线环上(为了消除弹簧秤自重的影响,应用手托平弹簧秤),沿滑槽方向向外拉挡板,使标尺露出的格数与匀速转动时相同,读出此时弹簧秤的读数 F' (可多测几次求平均值)。用

$$F' = Km(0.1n)^2 r$$

求出 K 的数值。

注意

(1)实验前应将横臂紧固螺钉旋紧,以防球和其他部件飞出造成事故。

(2)实验时,不宜使标尺出格数太多,以免由于球沿滑槽外移引起半径的误差过大。

实例

在操作(6)中测得长滑槽在 30s 内转 20.0 转(即 $n=40.0$),球作圆周运动的半径 $r=8.00\text{cm}$,铁球质量 $m=98.0\text{g}$,将以上数据代入式

$$\begin{aligned} F &= Km(0.1n)^2 r \\ &= K \times 0.0980 \times (0.1 \times 40.0 \times 3.14)^2 \times 0.0800(\text{N}) \\ &= 1.24\text{KN}。 \end{aligned}$$

在操作(7)中弹簧秤读数的平均值 $F'=1.20\text{N}$ 。

$$1.20\text{N} = 1.24\text{KN},$$

$$K = 0.968。$$

因此所有测量的量都取国际单位时, K 值可取成 1.0。

本实验用四种方法来验证向心力的公式，前三种方法都要求测量对象作匀速圆周运动，因此怎样尽量保持物体作匀速圆周运动并准确地测量其周期，是实验成功的关键。第四种方法巧妙地用变速圆周运动的瞬时状态来验证向心力公式，利用机械能守恒定律很方便地解决了测量速度的问题。

方法一

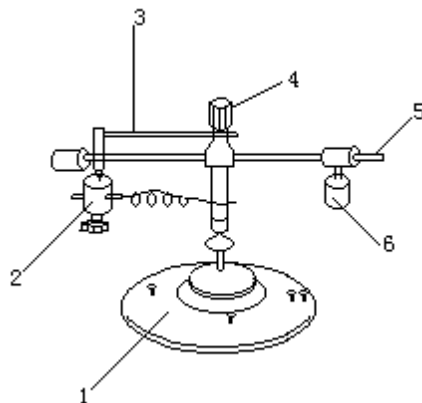
器材 向心力实验器，250g 测力计，刻度尺，秒表，天平，砝码等。

操作

(1) 调节底座上的三个螺丝，使底座水平，立柱竖直。

(2) 调节横杆右端的配重物，使横杆平衡，转动灵活（具体方法参阅仪器说明书）。

(3) 用手捻动转轴使立柱带着横杆旋转。当立柱旋转得比较快时，重物由于离心作用向外偏，指针偏下。由于仪器自身的阻力，转动速度逐渐减小，可看到指针渐渐上升。当指针进入两根标志线内时，启动秒表记下仪器转 n 圈的时间 t ，则它转动的周期 $T=t/n$ ，转动的角速度 $\omega=2\pi/T=2\pi n/t$ 。



1. 底盘 2. 重物 3. 指针
4. 捻轴 5. 横杆 6. 配重

(4) 使仪器停止旋转，用测力计沿水平方向拉着重物向外偏，使指针进入两根标志线内，此时测力计的读数就是重物作圆周运动的向心力 F 。

(5) 用手将指针维持在两根标志线内，然后用刻度尺量出从立柱中心到重物中心线的距离，就是重物作圆周运动的轨道半径 r 。

(6) 将重物卸下，用天平测出它的质量 m 。根据圆周运动向心力的公式 $F'=m\omega^2r$ 。如果 F' 与测力计测量的 F 基本相同，即可验证圆周运动的向心力公式。

(7) 改变 ω 、 r 或 m ，重复以上实验，可验证其他情况。

分析 本实验中 m 、 ω 、 r 等量的测量都是可以作得比较准确的，实验误差主要来源于仪器的摩擦等因素引起的向心力的测量误差，因此可以这样规定验证的标准：用测力计沿水平方向向外拉重物，先使指针指着上标志线，测力计读数为 F_1 ；然后使指针指着下标志线，测力计读数

为 F_2 。 F_1 到 F_2 就是 F 的误差范围，因此如果 $F_1 < m^2 r < F_2$ ，即可认为验证了向心力公式。

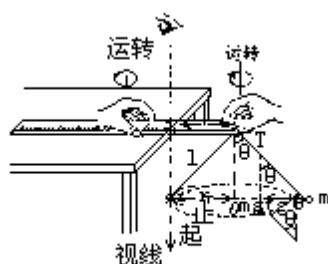
如果 m 、 r 等量的测量也有一定的误差，则可算出 $F = m^2 r$ 的误差

$$F = \left(\frac{m}{m} + 2 \frac{t}{t} + 2 \frac{n}{n} + \frac{r}{r} \right) \cdot m^2 r,$$

如果 $F_1 - F' < m^2 r < F_2 + F'$ ，即可认为验证成功。

方法二

原理 小球作圆锥摆运动，如图(a)所示。小球共受到重力和绳的拉力两个力，合力为 $F_{\text{合}}$ ，



(a)

$$F_{\text{合}} = mgtg = mg \frac{r}{\sqrt{l^2 - r^2}}.$$

圆锥摆运动物体因圆周运动所需的向心力值为 $F_{\text{心}}$ ，如果小球作圆周运动的周期为 T ，那么

$$F_{\text{心}} = m \frac{v^2}{r} = m \frac{4\pi^2 r}{T^2}.$$

因为 $F_{\text{合}} = F_{\text{心}}$ ，

所以，

$$mg \frac{r}{\sqrt{l^2 - r^2}} = m \frac{4\pi^2 r}{T^2}.$$

在实验中若能分别独立地测得上式左右两边数值相等的话，就验证了向心力公式。

器材 米尺（尺端钻有一很小的穿细线的小孔），天平、蜡线、带洞的小铁球、秒表等。

操作

(1) 将蜡线或丝线系好小铁球，再将线头穿过离尺端 2cm 处的针头细孔后打结固定。

(2) 两手捏住尺，在贴住桌面的情况下，同时运转尺身，带动小球由静止开始做圆锥摆运动。动作不要太急，应顺势使其幅度逐渐增加。一旦达到幅度适当的较理想的圆周运动时，即用力压住米尺，尺身不能摇晃，以确保圆周运动稳定。

(3) 事先确定需测圆周运动半径 r 的值，视线应沿所需 r 值之刻度处竖直地向下看去，耐心等待摆幅逐渐自然减小。在圆周运动半径还稍大于 r 之时开始计数和计时，用秒表记下锥摆运动 20 圈的时间 t 。圆周运

动的周期 $T=t/20$ 。

(4)用刻度尺测量出圆锥摆的摆长 l 。将测量得到的 r 、 T 、 l 代入式，如果左右基本相等，就验证了向心力公式。

注意

(1)本实验对实验者的操作技能有一定的要求，因此需要练习到熟练之后方能开始正式实验。

(2)在小球运动半径还稍大于事先确定的 r 值时就开始计数计时，这样做是因为 20 圈下来锥摆的 r 值不断在衰减，这样取平均值较为合理。

分析

要验证 $mg \frac{r}{\sqrt{l^2 - r^2}} = m \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ ，只要验证 $y = \frac{g}{\sqrt{l^2 - r^2}} - \frac{4\pi^2}{T^2} = 0$

即可。

$$\begin{aligned}\Delta y &= \left| \frac{\partial y}{\partial l} \right| \Delta l + \left| \frac{\partial y}{\partial r} \right| \cdot \Delta r + \left| \frac{\partial y}{\partial T} \right| \cdot \Delta T \\ &= \frac{gl}{\sqrt{(l^2 - r^2)^3}} \cdot \Delta l + \frac{gr}{\sqrt{(l^2 - r^2)^3}} \cdot \Delta r + \frac{8\pi^2}{T^3} \cdot \Delta T.\end{aligned}$$

(1)从上式不难看出，当 l 、 r 、 T 不变的情况下，将 l 取得大一些，有利于减小实验误差，提高验证的质量。

(2)用上式算出 y 后，只要

$$\left| \frac{g}{\sqrt{l^2 - r^2}} - \frac{4\pi^2}{T^2} \right| < y$$

即可认为验证成功。

方法三

器材 自制圆型薄板，质量不同的带洞小铁球若干，钓鱼用尼龙线若干，自制测力计，手摇离心转台，自制铁管（或硬塑料管）（内径略大于弹簧直径）等。

部分仪器的制作方法

(1)圆型薄板

将厚 1cm 左右的无色透明有机玻璃板做成半径约为 15cm 的圆形板，板面沿半径方向挖一条微凹的槽（槽口要尽量光滑），槽边上固定一把刻度尺，圆心处打洞（直径刚好能放进铁管）。

(2)测力计

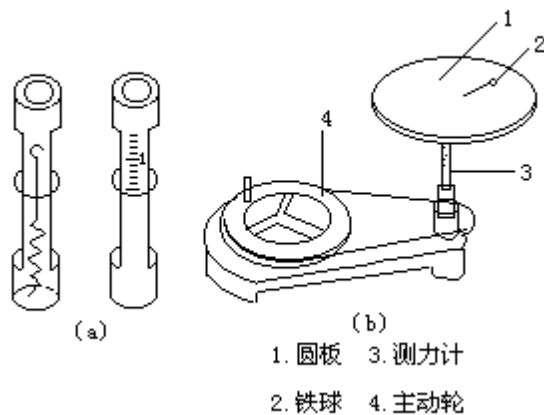
在铁管两测分别开两个长约 8cm 的槽，管内装倔强系数为 10—20N/m 的弹簧，弹簧下端固定，上端连一个圆环形指针，以便观察。铁管壁上用颜色漆划上刻度（见图 a）。

(3)铁管

将铁管上端部分用锉刀“打毛”后涂上万能胶或百得胶，紧密地嵌入圆型薄板的中心洞内。

操作

(1)如图(b)将仪器安装在离心转台上。



(2)将尼龙线的一端打一个圆圈空心结，从铁管上端伸入套住弹簧挂钩；另一端和质量为 m 的小铁球连结，将小铁球放在凹槽上。

(3)转动离心转台的手摇柄，使小铁球跟着圆板在水平面内作匀速圆周运动。待转速均匀后，用秒表记出主动轮转动 10 圈的时间 t 。如果主动轮的半径是 R_0 ，从动轮的半径是 r_0 ，则小球转动的角速度 $\omega = \frac{20\pi R_0}{tr_0}$ 。

同时从槽边的刻度尺上读出小球作圆周运动的半径 R ，从测力弹簧的圆形指针的位置读出小球的向心力。如果存在 $F = m \omega^2 R$ 的关系，即验证了向心力公式。

(4)换用质量不同的小铁球，或改变尼龙线的长度，或改变主动轮转动的速度，重复操作(3)，即可验证其他情况。

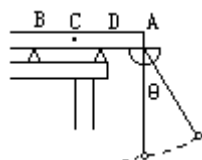
方法四

器材 米尺，细绳，三角木两块，质量不同的钢球若干个，天平，砝码，量角器等。

操作

(1)用天平分别测出米尺、量角器和钢球的质量，记为 M 、 M_0 和 m 。

(2)用适当的方式将量角器和细绳的一端固定在米尺的一端，细绳的悬挂点要与量角器的测量中心重合，然后将米尺置于桌面上的两个三角木上(如图)。



(3)用手将钢球向右拉开一个角度 θ 后由静止释放，仔细观察钢球通过最低位置时米尺的 B 点是否与三角木脱离。可逐渐将米尺向右移动(两个三角木不动)，或增大 θ ，直到当钢球通过最低点时米尺 B 点与三角木稍有脱离为止(此时米尺以 D 点为转轴的力矩平衡)。

(4)从米尺上读出 AD 的距离 L_1 和 DC (C 为米尺的中点) 的距离 L_2 。如果细绳的长度为 L ，则使米尺顺时针转动的力矩

$$M_1 = [(m + M_0)g + mv^2 / L]L_1,$$

式中 $v = \sqrt{2gL(1 - \cos\theta)}$ ，使米尺逆时针转动的力矩

$$M_2 = MgL_2。$$

如果有 $M_1 = M_2$ ，即可验证向心力公式。

(5) 改变钢球的质量 m 或改变细绳的长度 L 或改变拉开的角度，重复以上实验，即可验证其他情况。

注意 米尺的 B 点与三角木是否稍有脱离需要反复实验才能确定。因为钢球对米尺的拉力达到最大值只是一瞬间，随即又减小了。值得注意，所谓“米尺与三角木稍有脱离”应表现为它们只有一点很微小的相对运动，而不应该是米尺与三角木明显地分开甚至米尺向外翻出。

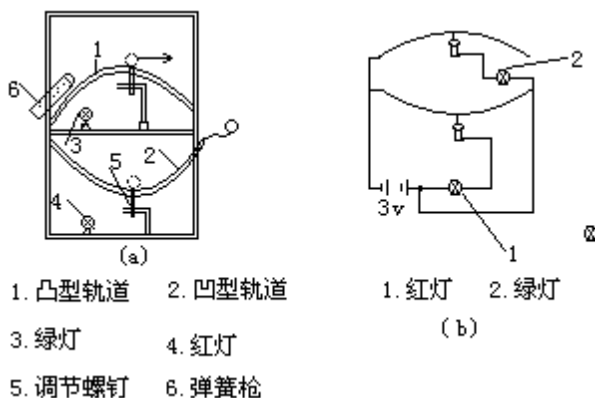
86 圆周运动中的超重和失重

本实验的难点是测量物体作圆周运动时的视重。除了本书介绍的两种方法外，还可以考虑选用应变片、光敏二极管，差动变压器等传感器件。

方法一

器材 自制演示装置。

演示装置如图(a)所示，图(b)是电路图。



用厚 1—2mm、宽 2cm、长约 50cm 的铁片弯成适当的圆弧形状，轨道两旁各焊上 1.5cm 高的相应形状的铁片为栏，防止小铁球在轨道上运动时出轨。小铁球直径约 1.8cm。凸形轨道起点的弹簧枪，可选用适当的玩具枪；凹形轨道的入口处须让轨道向斜上方适当延长，使小球滚到凹形轨道底部时能显示“超重”现象即可。红、绿灯可分别安装在实验板正面明显的位置。

操作

(1)设法把小钢球静止放置在凸形轨道的最高点，调节螺钉使绿灯恰好发亮，拿掉球，灯即熄灭。再把小钢球放在凹形轨道的最低点，调节螺钉使红灯恰好不发亮，而只要对小球稍加一点向下的压力，灯即发亮。

(2)把小钢球装进弹簧枪，让球以适当的初速度从凸形轨道的起点处沿着轨道射去，当小球通过最高点时，绿灯不发亮。这说明小球到达轨道的最高点时，它对轨道的压力小于其本身的重力，即小球处于“失重”状态。

(3)让小球从凹形轨道入口处自由滑下，可以观察到小球通过轨道的最低点时，红灯亮了。这说明小球到达轨道的最低点时，它对轨道的压力大于其本身的重力，即小球处于“超重”状态。

方法二

器材 超重失重演示器 (J2142 型)。

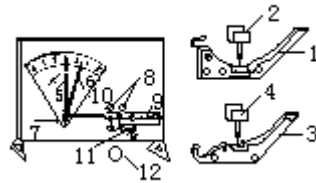
操作

(1)将凹桥轨道背后的两个插脚插入演示仪板上的两个插孔中，并用螺母紧固，再将活动桥面轨道 2 插入支架插孔中固定好。把钢球放在凹桥最低点，调节螺母 11 使压力指针指在中央刻度线上，再将记忆指针拨片转动到指针左侧，并使记忆指针靠近压力指针。

(2)让钢球从凹桥轨道右上端处滚下，当球滚到凹桥最低点时，可看到压力指针偏转到中央刻度线之右，并通过拨片带动记忆指针记下它偏移的位置。说明球通过最低点时，对桥的压力大于钢球的重力，即“超重”现象。

(3)取下凹桥轨道，将凸桥轨道插入中并固定好，再将活动桥面轨道4插入支架插孔中也固定住。把钢球放在凸桥中央，调节螺母11使压力计指针向右偏转到满刻度处，此时指针指示值表示球的重力。将记忆指针也转到此位置。

(4)让钢球由固定凸桥右上端处滚下，当球经过凸桥最高点时，可看到压力指针向右偏转不到满刻度处。说明球通过最高点对桥的压力小于球的重力，即“失重”现象。



1. 凹桥轨道
2. 活动桥面轨道
3. 固定凸桥轨道
4. 活动桥面轨道
5. 压力指针
6. 记忆指针
7. 记忆指针拨片
8. 插孔
9. 可动支承架
10. 支架插孔
11. 调节螺母和弹簧
12. 钢球

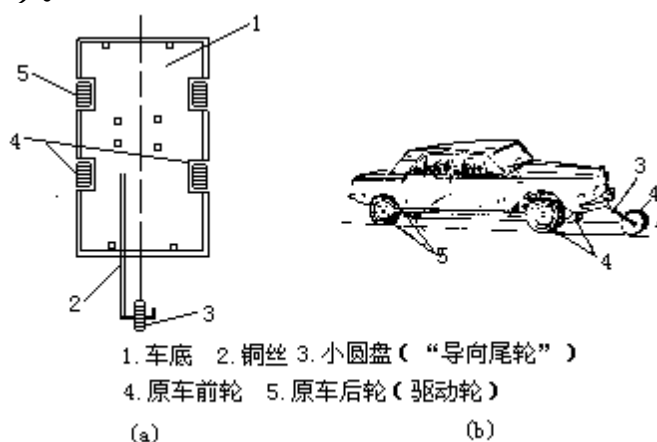
87 离心现象

方法一

器材 惯性小汽车或玩具小汽车，长约 10cm、直径为 2—3mm 的铜丝（或铁丝），直径约 2cm 的圆盘（如半导体收音机电位器上配用的小拨盘或棋子）等。

玩具汽车的改装方法

在车身下底面的铁皮上焊接铜丝，并让铜丝在原车头的一端向外伸出一段（约 6cm）。将小圆盘中心开孔套进铜丝后，把这段铜丝变折成“L”形，使小圆盘成为轮子，如图(a)。然后把玩具车正放在木板上，将铜丝略微下变使原车的两个前轮被架空，不再同板面接触。这样，演示时小圆盘便成为“导向尾轮”，而原车的两个尾轮（驱动轮）就变为前轮了（图 b）。



操作

(1)保持“导向尾轮”和车身前部的两个驱动轮平行，可看到车子启动后作直线运动。

(2)把“导向尾轮”偏转一个较小的角度（如 20° ），以较小的速度启动车子，可看到车子平稳地作圆周运动。

(3)导向尾轮的方向不变，以较大的速度启动车子，可看到车子向外侧翻倒，说明在半径不变时，速度越大，惯性离心力越大。

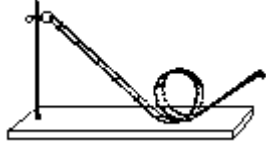
(4)把“导向尾轮”偏转一个较大的角度（如 40° ），以较小速度启动车子，也可看到车子向外侧翻倒，说明当速度不变时，半径越小，惯性离心力越大。

方法二

器材 离心轨道（J2134 型）。

操作

(1)将离心轨道放在水平桌面上（如图），让钢球从轨道的最高点由静止开始滚下，可看到球能顺利地通过圆环的最高点而不会坠下，说明作圆周运动的物体具有离心现象。



(2)逐步降低小球运动起始点的高度，可看到当它小于某一值时，球就不能达到和通过圆环的最高点，而在到达最高点之前某一点就脱离了轨道。这说明作圆周运动的物体所受的惯性离心力与它的速度有关，当半径不变时，速度越小，惯性离心力越小。

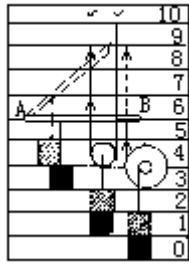
88 功的原理

方法一

目的 使用杠杆、轮轴和滑轮三种简单机械验证功的原理。

器材 五夹板（长 85cm 宽 50cm），白纸，杠杆，轮轴，动滑轮，弹簧秤，重物，细绳等。

操作



(1)在五夹板上复以白纸，在纸面每隔 8cm 画一条线。在第 4 与第 6 横道的适当部位安装两只螺丝，作为轮轴与杠杆的支点。演示板的顶端安装数只钩子。

(2)在杠杆 A 端钻孔后套入第 6 横道的轴心上，在杠杆靠轴心 $1/3$ 处吊上重力为 G 的重物，使重物的底部与第 3 横道吻合。

(3)通过弹簧秤匀速提起杠杆的 B 端，当重物底部上升到第 4 横道，即上升 1 格时，杠杆的尖端从第 6 横道上升到第 9 横道，抬高的距离为 3 格。抬高杠杆的力 F 可从弹簧秤上读出。如果在误差范围内 $F=G/3$ ，即可验证功的原理。

(4)卸下杠杆，装上轮轴（轮与轴的半径比为 4 : 1），通过弹簧秤匀速拉绕在轮上的细绳。当重物上升一格时，细绳头抬高的距离为四格。拉细绳的力 F 可以从弹簧秤上读出。如果在误差范围内 $F=G/4$ ，即可验证功的原理。

(5)卸下轮轴，装上动滑轮，通过弹簧秤匀速拉动绕过滑轮的细绳。当重物上升一格时，细绳头抬高的距离为二格。抬高细绳头的力 F 可从弹簧秤上读出。如果在误差范围内 $F=G/2$ ，即可验证功的原理。

注意 功的原理只有在不计摩擦，不计机械本身的重力时才能成立，因此在实验中应注意：

(1)杠杆在机械强度能满足要求的前提下应该尽量轻一些。

(2)一种机械的转轴处要适当地加一些润滑油，使摩擦力尽量小一些。

(3)重物的质量适当地大一些，以减小机械本身重力的影响，提高机械效率。

分析 如果需要比较严格地验证功的原理，可采用以下方法：

(1)测量出机械本身的重力 G 后，一同加以考虑。例如在“操作(5)”中，如果动滑轮的重力为 G ，则 $F \times 2 = (G + G) \times 1$ ， F 应该等于 $(G + G) / 2$ 。

(2)根据摩擦力的大小定出合理的误差范围。例如在“操作(5)”中，

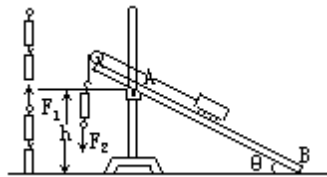
可以将拉着滑轮的弹簧秤稍放下一些，记下弹簧秤的读数，然后在重物上加小砝码，直到用眼睛可以观察到弹簧秤的读数发生了变化为止。如果加上去的砝码重力为 G ，则，只要 $|2F - (G + G)| < G$ 成立，即可认为功的原理得到了验证。

方法二

目的 用斜面验证功的原理。

器材 带滑轮的长木板，小车，弹簧秤，米尺，铁架台，细绳等。

操作



(1)木板由铁架支成一斜面（如图）。

(2)用弹簧秤将小车由地面匀速竖直向上拉到离地距离为 h 处，由弹簧秤上读出拉力为 F_1 ，用米尺测量出 h 的长度。

(3)用弹簧秤通过滑轮拉着小车由斜面底端 B 处匀速运动到 A 处（ A 处的高度为 h ），由弹簧秤上读出拉力为 F_2 ，用米尺测量出 AB 的长度。

(4)计算 $W_1 = h \cdot F_1$ ， $W_2 = AB \cdot F_2$ ，如果在误差范围内 $W_1 = W_2$ ，即可验证功的原理。

注意

(1)在操作(2)与(3)之间，要调整弹簧秤零读数，因为弹簧秤向上与向下使用时零读数的位置是不一样的。

(2)为了减小弹簧秤的读数误差，小车的质量应适当地大一些。

分析

此实验的误差主要来自木板和滑轮的摩擦，因此实验的误差可以用以下方法来确定：

设操作(3)中拉着小车匀速向上运动的力为 F_2 ，让小车停下，慢慢地向上释放弹簧秤，直至小车开始向下运动，此时弹簧秤的读数为 F'_2

可以认为摩擦力 $f = F'_2 - F_2$ 。因此只要 $\left| \frac{F_1 h}{AB} - F_2 \right| < f$ 成立，即可认为验

证了功的原理。

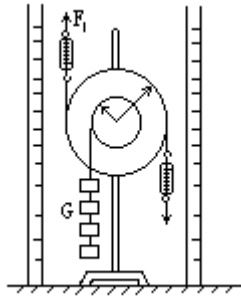
89 机械效率

方法一

目的 测定轮轴的机械效率。

器材 轮轴模型，铁架台，弹簧秤，钩码若干，细绳，米尺等。

操作



(1) 将轮轴模型固定在铁架台上（转动轴上不要加润滑油），小轮的绳端上挂若干个钩码（总重力为 G ），大轮的绳端与弹簧秤相连（如图）。

(2) 用力 F_1 （可从弹簧秤上读出）向上匀速拉动弹簧秤，从米尺上读出钩码上升的高度 H 和弹簧秤上升的高度 h ，即可测出轮轴的机械效率

$$\eta_1 = G \cdot h / F_1 \cdot h。$$

(3) 将大轮上的绳端绕到另一侧向下拉弹簧秤。重复操作(2)，可测出轮轴的另一个机械效率

$$\eta_2 = G \cdot h / F_2 \cdot h。$$

会发现 $\eta_1 > \eta_2$ ，这是因为向下拉弹簧秤增大了轮与轴之间摩擦力的缘故。

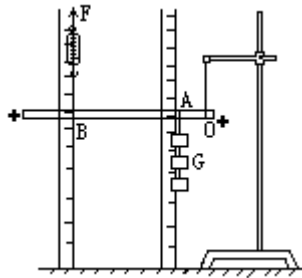
方法二

目的 测定杠杆的机械效率。

器材 杠杆，米尺 2 支，弹簧秤，钩码若干，铁架台，细绳等。

操作

(1) 用细绳悬挂杠杆一端的 O 点作为支点，在 A 点挂若干个钩码（总重力为 G ），在 B 点处连接一个弹簧（如图）。



(2) 拉着弹簧秤缓缓上升，在此过程中读出弹簧秤的读数 F_1 及 A 、 B 两点上升的距离 H_1 和 h_1 （尽量保持 O 点不动），即可测出杠杆的机械效率

率

$$\eta_1 = G_1 H_1 / F_1 h_1。$$

(3) 增加 G 的数值 (其他量不变), 重复操作(2), 可测出杠杆的机械效率会发现 $\eta_2 > \eta_1$ 。这是因为影响杠杆效率的主要因素是杠杆的自重 (支点的磨擦很小), 当 G 增大时, 杠杆自重的影响相对减小。

(4) 增大 OA (其他量不变), 重复操作(2), 可测出杠杆的机械效率

$$\eta_3 = G_2 H_3 / F_3 h_3,$$

会发现 $\eta_3 > \eta_2$ 。

(5) 将支点 O 向杠杆中心移动一些, 同时移动 A 点和 B 点, 使 G 、 OA 、 OB 都和操作(4)中一样, 重复操作(2)可测出杠杆的机械效率

$$\eta_4 = G_2 H_4 / F_4 h_4$$

分发现 $\eta_4 > \eta_3$ 。

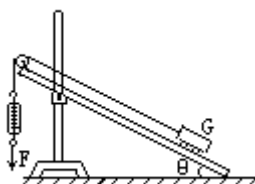
方法三

目的 测定斜面的机械效率。

器材 带滑轮的木板, 小车, 弹簧秤, 米尺, 天平, 砝码, 铁架台, 细绳等。

操作

(1) 如图, 用铁架台将木板支成斜面。



(2) 用弹簧秤拉着小车作匀速运动。从弹簧秤上读出拉力 F 的大小, 用米尺测量出弹簧秤下降的距离 h 和小车升高的高度 H_1 , 用天平测出小车的质量 m 。即可测出斜面的机械效率

$$\eta_1 = mgH_1 / F_1 h_1。$$

(3) 将小车翻转 (轮子朝上) 放在斜面上, 重复操作(2), 可测得

$$\eta_2 = mgH_2 / F_2 h_2,$$

会发现 $\eta_2 < \eta_1$ 。这是因为小车与斜面之间的摩擦系数增大, 使摩擦力增大, 因而机械效率明显降低。

(4) 增大斜面倾角 [其他条件同(3)] 重复操作(2), 可测得

$$\eta_3 = mgH_3 / F_3 h_3,$$

会发现 $\eta_3 < \eta_2$ 。这是因为小车与斜面之间的正压力减小, 使摩擦力减小, 因而机械效率提高。

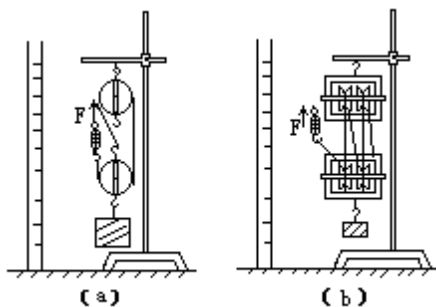
方法四

目的 测量滑轮组的机械效率。

器材 单滑轮 2 个，双并滑轮 2 个，弹簧秤，米尺，钩码（1000g）若干个，铁架台，细绳等。

操作

(1)将两个单滑轮如图(a)所示装好。



(2)手握弹簧秤向上匀速拉起钩码。从弹簧秤上读出拉力 F_1 ，从米尺上读出弹簧秤上升的高度 h_1 和钩码上升的高度 H_1 ，即可测出滑轮组的机械效率

$$\eta_1 = G_1 H_1 / F_1 h_1。$$

(3)改用两个双并滑轮（图 b），其他条件不变。重复操作(2)可测出滑轮组的机械效率

$$\eta_2 = G_1 H_2 / F_2 h_2。$$

会发现 $F_2 < F_1$ ，但 $\eta_2 < \eta_1$ 。这是因为影响滑轮组效率的主要因素是滑轮的摩擦和动滑轮的自重，改用双并滑轮后，这两者都增大了，使滑轮组的效率下降。

(4)增加挂在动滑轮下面钩码的质量。（其他条件不变），重复操作(2)，可测出滑轮组的机械效率

$$\eta_3 = G_3 H_3 / F_3 h_3。$$

会发现 $\eta_3 > \eta_2$ 。这是因为 G 增大，动滑轮自重的影响相对来说就小了。

提高简单机械效率的方法 90

目的 显示各种简单机械效率变化的规律。

原理

(1)图(a)所示的杠杆中，O 点为转动轴，F、G 和 G_0 分别为动力、阻力和杠杆重力， l_1 、 l_2 和 l_0 分别为动力、阻力和杠杆重力的作用点到 O 点的距离。当杠杆从水平位置缓缓地提升到与水平方向成 α 角时，如果不考虑转轴的摩擦，则

$$W_{\text{有用}} = G \cdot l_2 \cdot \sin \alpha,$$

$$W_{\text{总}} = F \cdot l_1 \cdot \sin \alpha = G \cdot l_2 \cdot \sin \alpha + G_0 \cdot l_0 \cdot \sin \alpha。$$

机械效率 $\eta = W_{\text{有用}} / W_{\text{总}} = Gl_2 / (Gl_2 + G_0l_0)。$

从上式可以看出当 G_0 减小或 G 增大或 l_2 增大，杠杆的效率 都会增大。

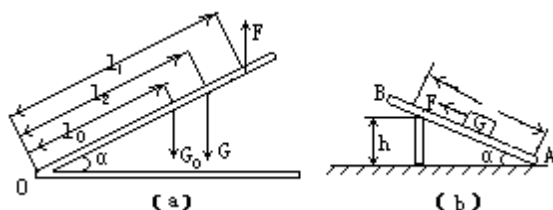
(2)图(b)所示斜面，当平行于斜面的力 F 拉着重物 G 匀速从 A 点运动到 B 点时

$$W_{\text{有用}} = G \cdot h = G \cdot L \cdot \sin \alpha,$$

$$W_{\text{总}} = F \cdot l = G \cdot l (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)。$$

机械效率 $\eta = W_{\text{有用}} / W_{\text{总}} = \sin \alpha / (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)$

$$= 1 / (1 + \mu \cot \alpha)。$$



从上式可看出，当重物与斜面的摩擦系数 μ 增大，或斜面的倾角减小时，斜面的机械效率都会降低。

(3)用上下各有 n 个滑轮的滑轮组将重物吊起 h 时，设重物重力为 G，动滑轮重力为 G_0 如果不考虑摩擦，则

$$W_{\text{有用}} = Gh,$$

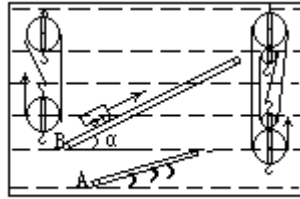
$$W_{\text{总}} = F(2n + 1)h = \frac{G + G_0}{2n + 1} \cdot (2n + 1) \cdot h$$

$$= (G + G_0)h。$$

机械效率 $\eta = W_{\text{有用}} / W_{\text{总}} = G / (G + G_0)。$

从上式可看出，当重物的重力 G 增加或动滑轮的重力 G_0 减小时，滑轮组的效率都会增大。

器材 高 50cm、宽 100cm 的木板一块，板上每隔 10cm 画一条水平线，将杠杆、斜面、滑轮组三种简单机械装在木板上（图 c）。小车，米尺，弹簧秤，钩码若干，天平，砝码等。



(c)

操作

(1)将木质杠杆的支点装在板上 A 处，将钩码挂在杠杆下面的钩子上，通过弹簧秤拉着杠杆缓缓转动。从弹簧秤上读出动力的大小，从板上的线条读出动力和阻力作用点的位移，即可算出机械效率。

(2)保持钩码个数不变，改变钩码挂在杠杆上的位置，可看到钩码离 A 点越远， η 越大；保持钩码位置不变，换用一根铁质杠杆（或在木质杠杆上放上一铁条），可看到 η 明显降低。

(3)用弹簧秤拉着小车沿斜面匀速上升。从弹簧秤上读出拉力，从板上的线条读出小车上升的高度，用米尺量出小车的位移，用天平测出小车的质量，即可算出机械效率。

(4)将小车翻个身，（四个轮子朝上），重复以上实验，可看到 η 明显降低；减小斜面的倾角 θ ，重复以上实验，可见 η 进一步减小。

(5)将一串钩码挂在左边的动滑轮下面，用弹簧秤拉着绳端使钩匀速上升。从弹簧秤读出动力的大小；从板上的线条读出动力和阻力作用点的位移，即可算出机械效率。

(6)换用右边的滑轮组，重复上述实验，可看到 η 变小。增加吊在滑轮下面的钩码的个数，其他条件不变，可看到 η 增大。

估测人跑上楼的功率 91

器材 秒表，皮尺等。

操作

(1) 被测人从底楼由静止开始全力向六层楼上跑，由两人配合用秒表记下他从底楼跑到二、三、四……层楼的时间 t_1 、 t_2 、 t_3 ……。

(2) 用皮尺测量出从底楼到二、三、四……层楼的高度 h_1 、 h_2 、 h_3 ……。

(3) 以横轴代表时间 t ，纵轴代表高度 h ，作出 $h-t$ 图。

(4) 用图解法求出图线的斜率，就是人在竖直方向上的速度 v_h 。假设楼梯与水平方向成 45° 角，可认为人的速度是 $\sqrt{2}v_h$ 。

(5) 如果人的质量是 m ，从底楼到六楼的高度是 h_5 ，人从底楼跑到六楼的时间是 t_5 ，那么人由静止开始从底楼跑上六楼增加的重力势能是

mgh_5 ，增加的动能是 $\frac{1}{2}m(\sqrt{2}v_h)^2 = mv_h^2$ ，人产生的功率 $(mgh_5 + mv_h^2)$

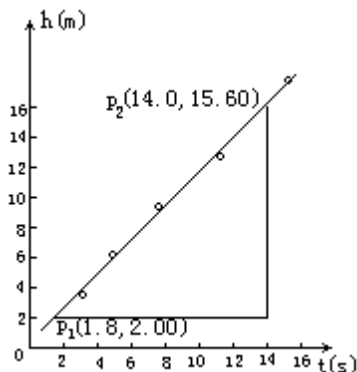
$/t_5$ 。

注意 为了便于计时，宜选用在平地上可以观察到每一层楼梯的楼房，计时者站在平地上计时。

实例 在某次实验中取得如下实验数据：

人的质量为 62.0kg 。

n	1	2	3	4	5
$h_n(\text{m})$	3.40	6.80	10.20	13.60	17.00
$t_n(\text{s})$	3.4	5.6	8.6	12.4	15.2



以横轴代表时间 t ，纵轴代表高度 h ，作 $h-t$ 图（如图）。在图线上取两点 $P_1(1.8, 2.00)$ 和 $P_2(14.0, 15.6)$ ，算出图线的斜率

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \\
 &= \frac{15.6 - 2.00}{14.0 - 1.8} \text{ m/s} = 1.11 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

人的实际速度

$$v = \sqrt{2}v_h = 1.11 \times 1.41 \text{ m/s}$$

$$= 1.57 \text{ m/s}$$

人的上楼的功率

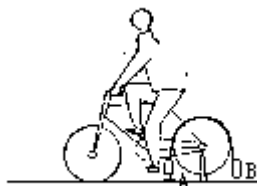
$$\begin{aligned} P &= (mgh + \frac{1}{2}mv^2) / t \\ &= \frac{(62.0 \times 9.79 \times 17.0 + 0.500 \times 62.0 \times 1.57^2)}{15.2} \text{ W} \\ &= 684 \text{ W}_0 \end{aligned}$$

方法一

器材 载重自行车，橡皮带（3—4cm 宽），测力计，秒表等。

操作

(1) 将载重自行车后轮内、外胎取下，撑起撑脚，使后轮离地。把橡皮带绕过后轮钢圈后通过 A、B 两个测力计固定在地面上。调节橡皮带的松紧程度，使它对后轮的阻力大小适当（如图）。



(2) 测出后轮的半径 R 和大小齿轮的传动比 K 。

(3) 慢慢地蹬动自行车脚踏板，至转速均匀后，用秒表测出大齿轮转动 n 转（例如 30 转）所用的时间 t ，同时记下两个测力计的读数 F_A 和 F_B 。即可用公式

$$P = Fv = (F_B - F_A) \cdot nK(2R) / t$$

算出人骑车的功率。

方法二

原理

一个人由静止开始骑车，经过时间 t 后，达到最大速度 v_m ，设人发挥的功率 P 不变，则

$$Pt = \frac{1}{2}mv_m^2 + W_f$$

式中 m 为人和自行车的总质量， W_f 为人克服空气阻力做的功。

空气对车的阻力 f 与车的速度 v 有关，一般可设

$$f = Kv。$$

式中 K 为一常数，如果自行车位移为 s ，则

$$W_f = \int_0^s f dx = \int_0^s K v dx = K \int_0^s v dx$$

在被积函数形式未知的情况下，可作出 $v-x$ 图，然后用数格子的方法

求出积分 $\int_0^s v dx$ 。当车子达到最大速度 v_m 之后

$$P = v_m f_m = v_m^2 \cdot K。$$

因此

$$K = P / v_m^2$$

将式代入式，可求出 W_f ，将 W_f 代入式，

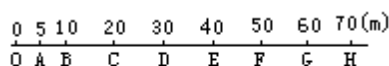
$$Pt = \frac{1}{2} m v_m^2 + \frac{P}{v_m^2} \int_0^s v dx$$

即可求出人骑车的功率 P 。

器材 自行车，秒表若干个。

操作

(1) 在一条直跑道上画出 A、B、……H 各条线，使 $OA=5m$ ， $OB=10m$ ， $OC=20m$ ，…… $OH=70m$ (如图 a)。一个骑自行车由 O 点从静止出发，记下他从 O 点到 A、B、……H 各点的时间 t_1, t_2, \dots, t_8 。



(a)

(2) 以横轴代表时间 t ，纵轴代表位移 x ，作 $x-t$ 图。求出图线后面的直线部分的斜率，即自行车的最大速度 v_m 。

(3) 作出 $x-t$ 图线上每个测试点处的切线，切线的斜率即自行车经过测试点时的速度 v 。

(4) 以横轴代表位移 x ，纵轴代表速度 v ，作出 $v-x$ 图。

(5) 用数格子方法测量 $v-x$ 图线和 x 轴之间包围的“面积”，即 $\int_0^s v dx$ 。将 v_m 、 t_0 和 $\int_0^s v dx$ 代入式，即可求出人骑车的平均功率 P 。

实例 实验中测得如下数据 (人车总质量为 $79kg$)：

$x(m)$	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0
$t(s)$	2.2	3.5	5.1	6.4	7.6	8.6	9.8	10.8

作出 $x-t$ 图 (图 b)，可看到在 $x > 40m$ 之后， $x-t$ 图趋向直线，说明自行车已趋向匀速。从图 (b) 中三角形 5 可求出自行车的最大速度

$$v_m = \frac{31}{3.4} m/s = 9.1 m/s。$$

用三角形 1、2、3、4 分别求出自行车在 $x=5m$ ， $10m$ ， $20m$ ， $30m$ 处的即时速度。

$$v_5 = 14/4.1 m/s = 3.4 m/s，$$

$$v_{10} = 19/3.5 m/s = 5.4 m/s，$$

$$v_{20} = 20/2.7 m/s = 7.4 m/s，$$

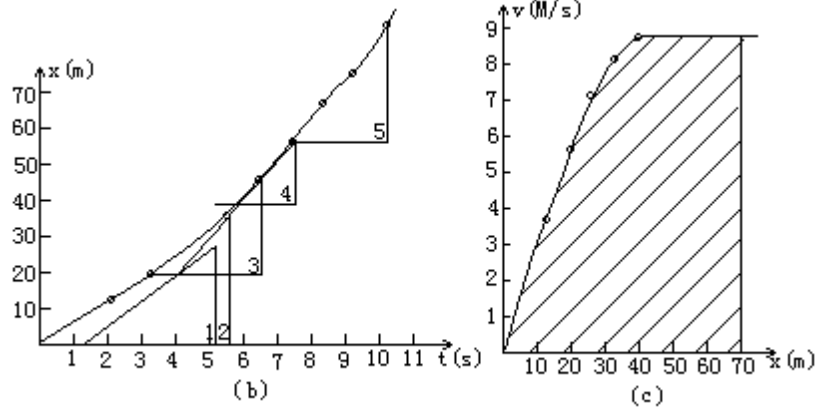
$$v_{30} = 20/2.3 m/s = 8.7 m/s。$$

根据以上数据作出 $v-x$ 图 (图 c)，用数格子方法测出 $v-x$ 图线和 $x=70$ 竖线之间包围的“面积”为 $538 m^2/s$ 。

将测得数据代入式

$$P \times 10.8 = \frac{1}{2} \times 79 \times 9.1^2 + 538 \times P / 9.1^2 ,$$

$$P = 761W_0$$



93 物体的重力势能与哪些因素有关

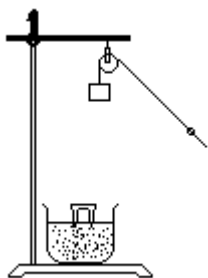
物体的重力势能无法直接测量。本实验两个方法都是先让其重力势能转变成动能，获得动能的物体能对其他物体做功，通过观察做功的多少来显示原来重力势能的大小。

方法一

器材 质量不同的重物各一块，滑轮，砂箱，模型小桌子，铁架台，细绳等。

操作

(1)将滑轮固定在铁架台上，细绳穿过滑轮吊住重物，小桌和砂箱放在重物的正下方（如图。）



(2)用细绳将质量较小的重物升高到一定的高度后放手，重物下落到小桌上做功将小桌打入砂中。小桌被打入砂中的深度可表示重物做功的多少，即重物原来重力势能的多少。

(3)将重物拉得高一些后再放手，可看到小桌被打入砂中的深度增加了，说明物体的重力势能与它的相对高度有关，在其他条件相同时，物体的相对高度越大，重力势能越大。

(4)换用一个质量较大的重物，拉到与操作(2)中相同的高度后放手，看到小桌被打入砂中的深度也比操作(2)中深了，说明物体的重力势能与它的质量有关，其他条件相同时，物体的质量越大，重力势能越大。

注意

每次实验前要将小桌从砂中拔出，把砂面拉平再将小桌重新轻轻地放在砂面上。

方法二

器材 高中运动学、动力学组合教具（J2138型），橡皮泥等。

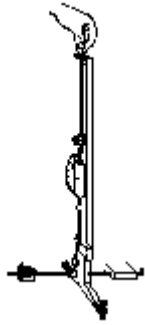
操作

(1)按图装配好仪器，滑块卡装在滑道中部，球装在滑道顶端。测力计背面的插头插入滑块孔中用螺丝固定，测杆上端的小圆平台上装上球斗，斗中央粘一小块橡皮泥，使下落的小球与球斗发生完全非弹性碰撞。

(2)使质量较小的胶木球从球台圆孔中自由下落（初速为零），小球撞击球斗后压缩测力计内部的弹簧做功，使指针发生偏转。从指针偏转角度的大小可看到做功的多少，即可表示小球原来重力势能的大小。

(3)换用质量较大的钢球（测力计位置不变）重复操作(2)。可看到记忆测力计的指针偏转角度变大了，说明了物体的重力势能与它的质量有关。在其他条件相同时，质量越大，重力势能越大。

(4)将测力计的位置向下移动，使小球下落的距离变长，（仍然用钢球）重复操作(2)，可看到记忆测力计的指针偏转角度更大了，说明物体的重力势能与它的相对高度有关，在其他条件相同时，物体的相对高度越大，重力势能越大。



94 研究弹簧的弹性势能与哪些因素有关

弹性势能无法直接测量。本实验的两个方法都是让弹性势能转换为物体的动能，然后通过测量物体的动能来比较原来弹性势能的大小。

方法一

器材 气垫导轨，气源等。

操作

(1)把两弹簧的一端与滑块连接，另一端固定在导轨的两端。在滑块上装上一个挡光框，待滑块静止后，将光电门放在平衡处（如图 a），使挡光框正好挡住光线。

(2)毫秒计的功能开关置 s_2 档，时间选择开关用最小的一档。使滑块偏离平衡位置 10.0cm（从导轨的标尺上可看出），由静止释放。滑块经过光电门时，毫秒计记下挡光时间 t ，如果挡光框两前沿之间的距离为 d ，则滑块经过光电门时的速度 $v=d/t$ 。如果滑块的质量是 m ，则滑块的

$$\text{动能} E_k = \frac{1}{2}mv^2 = md^2 / 2t^2。$$

(3)改变滑块偏离平衡位置的距离 x （例如 15.0cm，20.0cm……），重复操作(2)，得到若干组(x, E_k)值。

(4)作 E_k-x 图，得到一条曲线。与基础篇第 50、51 页中各种函数的图线比较，比较像 $y=Kx^2$ 图线，因此再试作 E_k-x^2 图线，得到一条过原点的直线，说明弹簧的弹性势能与它的形变的平方成正比。（也可以用线性回归法证明 E_k 和 x^2 成正比，具体方法参阅基础篇第 57 页的有关内容。）

(5)从胡克定律可以推得，同一根弹簧，当它的匝数变成原来的 $1/n$ 时，它的倔强系数就变成原来的 n 倍。滑块静止时，用一金属片在 C 点处卡住弹簧（图 b），保持金属片与导轨相对静止，AC 段弹簧不再起作用。如果 BC 段匝数是整个弹簧匝数的 $1/n$ ，便可认为 BC 段弹簧的倔强系数是原来弹簧倔强系数的 n 倍。保持滑块每次偏离平衡位置的距离 x 不变，使 BC 段弹簧匝数依次为原来匝数的 $9/10, 8/10, 7/10, \dots$ 重复操作(2)，得到若干组(K, K_k)值。



(6)作 E_k-K 图，得到一条过原点的直线，说明形变相同时，弹簧的弹性势能与它的倔强系数成正比。（也可以用线性回归法证明 E_k 和 K 成正比，具体方法参阅基础篇第 57 页的有关内容。）

(7)应用多变量复合的方法（参阅实验 63 的按语），得出弹簧的弹性势能 $E_p = Kx^2$ ，即 $E_p = aKx^2$ 的结论。如果操作(5)中滑块偏离平衡位置的距离是 x ，操作(6)中 E_k-K 图线的斜率是 k ，则可定出比例系数 $a=k/x^2$ 。

注意

(1)操作(5)中滑块的两端的弹簧的匝数要同时减少，而且变化的比例要完全一样。

(2)弹簧的匝数变化之后，要使光电门仍然处在滑块的平衡位置处。

说明

本实验中测量的所谓弹簧势能，都是相对滑块在平衡位置时弹簧的弹性势能为零而言的。下面说明这样处理的原由。

左右两根弹簧分别用 A、B 表示，设滑块处于平衡位置时，两根弹簧的伸长分别为 x_A 和 x_B ，有

$$K_A x_A = K_B x_B$$

滑块偏离平衡位置 x 后，（设 A 伸长，B 缩短）系统的机械能是

$$E_1 = \frac{1}{2} K_A (\Delta x_A + x)^2 + \frac{1}{2} K_B (\Delta x_B - x)^2,$$

滑块释放后运动到平衡位置时，系统的机械能是

$$E_2 = \frac{1}{2} K_A \Delta x_A^2 + \frac{1}{2} K_B \Delta x_B^2 + \frac{1}{2} mv^2$$

因为 $E_1 = E_2$ ，

所以 $\frac{1}{2} K_A (\Delta x_A + x)^2 + \frac{1}{2} K_B (\Delta x_B - x)^2$

$$= \frac{1}{2} K_A \Delta x_A^2 + \frac{1}{2} K_B \Delta x_B^2 + \frac{1}{2} mv^2,$$

$$K_A \Delta x_A x + \frac{1}{2} K_A x^2 - K_B \Delta x_B x + \frac{1}{2} K_B x^2 = \frac{1}{2} mv^2$$

将式代入式

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} (K_A + K_B) x^2,$$

设 $K_A + K_B = K$

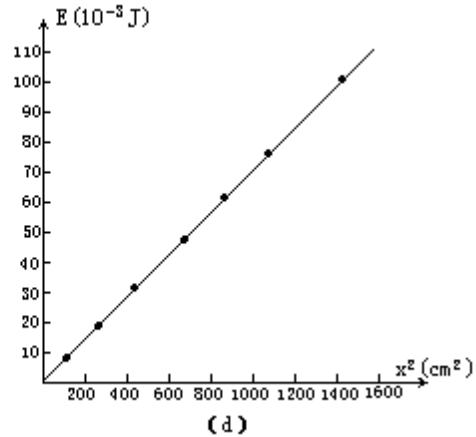
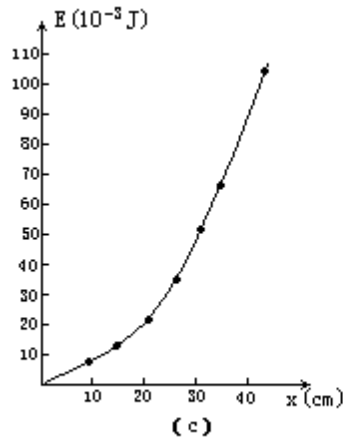
$$E_k = \frac{1}{2} Kx^2。$$

可见滑块的动能（等于弹簧的势能）与偏离平衡位置的路程 x 的平方及弹簧的倔强系数 K 成正比。

实例 某次实验中得到的实验数据：（ $m=0.21\text{kg}$ ）

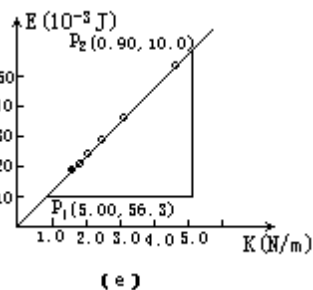
$x(\text{m})$	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400
$t(\text{ms})$	37.8	25.2	18.9	15.1	12.6	10.8	9.4
$v(\text{m/s})$	0.265	0.397	0.529	0.662	0.794	0.926	1.06
$E_k(10^{-3}\text{J})$	7.40	16.5	29.4	46.0	66.2	90.0	118

作 $E-x$ 图，得到一条曲线（图 c），与基础篇第 50、51 页中各种图线比较，估计是 $E=Kx^2$ 的关系。再作 $E-x^2$ 图，得到一条过原点的直线（图 d），说明弹簧的弹性势能与它的形变的平方成正比。



$X^2(m^2)$	0.0100	0.0225	0.0400	0.0625	0.0900	0.123	0.160	
$E(10^{-3}J)$	7.40	16.5	29.4	46.0	66.2	90.0	118	
$K(N/m)$	1.40	1.56	1.75	2.00	2.33	2.80	3.50	4.67
$t(ms)$	25.8	24.5	23.1	21.6	20.0	18.3	16.3	14.1
$v(m/s)$	0.388	0.408	0.433	0.463	0.500	0.546	0.613	0.709
$E(10^{-3}J)$	15.8	17.5	19.4	22.5	26.3	31.3	39.5	52.8

用改变弹簧匝数的方法改变弹簧的倔强系数，得到如下实验数据： $x=0.150m, m=0.210kg$ 作出 E_k-K 图，得到一条过原点的直线（图 e），说明形变相同时，弹簧的弹性势能与它的倔强系数成正比。在图线上取两点 $p_1(0.90, 10.0)$ 和 $p_2(5.00, 56.3)$ 求出图线的斜率



$$\begin{aligned}
 k &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \\
 &= \frac{(56.3 - 10.0) \times 10^{-3}}{5.00 - 0.90} \\
 &= 11.3 \times 10^{-3}。
 \end{aligned}$$

用多变量复合的方法可得到弹簧的弹性势能 $E_p = Akx^2$ (a 为比例系数) 的结论。比例系数 $a = k/x^2 = 11.3 \times 10^{-3} / 0.150^2 = 0.501$ 。此值十分接近

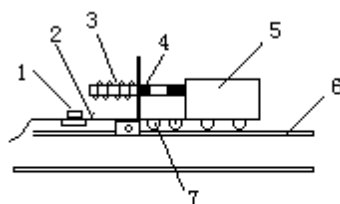
$$\frac{1}{2}, \text{ 即 } E_p = \frac{1}{2} Kx^2。$$

方法二

器材 高中运动学，动力学组合教具等。

操作

(1)如图所示，装配好实验仪器。调节轨道的角度，使小车拖着纸带在轨道上作匀速运动。



1. 打点计时器 2. 纸带 3. 测力计弹簧
4. 测力计推杆 5. 小车 6. 轨道 7. 车卡

(2)用小车将测力计推杆压入，使测力计变形为三个环，然后用车卡卡住小车。

(3)释放小车，打点计时器在纸带上打出一列点子，从纸带上求出小车脱离推杆后作匀速运动的速度 v 。

(4)改变测力计弹簧的形变 x （例如四个环，五个环，……），重复操作(3)，得到一系列 (x, v) 值。

(5)以横轴代表测力计弹簧的形变 x ，纵轴代表小车获得的速度 v ，作 $v-x$ 图，得到一条过原点的直线，说明小车的速度与弹簧的形变成正比。（也可以用线性回归法来证明 v 与 x 成正比，具体方法参阅基础篇第 57 页的有关内容。）

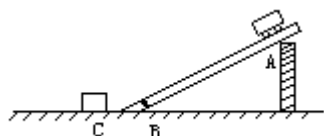
(6)因为弹性势能等于小车的动能，而小车的动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ，由此可知弹簧的势能和它的形变 x 的平方成正比。

方法一

器材 小车，木板，秒表，方木，米尺，粘泥若干等。

操作

(1)将木板的一端垫高，构成一个斜面。在木板上作两个标记点 A 和 B，并用米尺测量出 A 和 B 之间的距离 l 。在斜面的底端附近 C 处放一块方木（如图）。在方木近小车端粘上一块粘泥，以保证小车与方木发生完全非弹性碰撞。



(2)将小车在 A 点由静止释放，用秒表测出小车从 A 点到 B 点所用的时间 t ，小车到达 B 点时的速度 $v_B = 2l/t$ 。小车到达 C 点将方木向前推了一段距离后停下，用米尺量出方木前进的距离 s 。方木与桌面的摩擦力 f 是不会变的，因此小车推方木前进的距离 s 可以体现小车原来的动能大小。

(3)用粘泥粘在小车上，使小车的质量增大，重复操作(2)，可看到小车到 B 点时的速度 v_B 基本不变，但小车对方木作的功都增加了，说明物体的动能与它的质量有关。在其他条件相同时，物体的质量越大，动能越大。

(4)固定小车的质量不变，改变斜面的倾角，可改变小车到 B 点时的速度。重复操作(2)，可看到小车速度较大时，对方木作的功较多，说明物体的动能与它的速度有关。在其他条件相同时，物体的速度越大，动能越大。

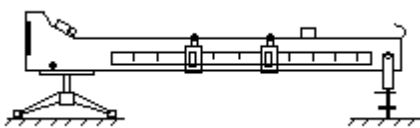
方法二

器材 斜槽轨道，简式计时器，铝质圆柱体（直径约 25mm，长约 30mm）等。

操作

(1)轨道调节水平，使小球能在轨道的平直部分作匀速运动。

(2)将两个光电门置于平直轨道上较靠近斜槽处。光电门后放一铝质圆柱体，能在槽轨上滑动（如图）。计时器采用“光控”计时，当小球通过第一个光电门时计时器开始计时，通过第 2 个光电门时停止计时，计时器记下小球通过两个光电门之间的时间 t 。从轨道的标尺上读出两光电门之间的距离 l ，即可算出小球在两光电门之间运动的速度 $v = l/t$ 。



(3)用电磁铁释放小铁球，小铁球通过两个光电门后将圆柱体推进一

段距离后停下来。因圆柱体和槽轨的摩擦力 f 可看成是一定值，因此圆柱体运动距离的长短可体现小铁球与圆柱体撞击前动能的多少。

(4)改变电磁铁位置的高低，改变小铁球的速度重复以上实验，可看到小铁球的速度越大，将圆柱体推得越远，说明物体的动能与它的运动速度有关。在其他条件相同时，物体的速度越大，动能越大。

(5)换用一个质量大一些的铁球，重复以上实验，仔细调节电磁铁的位置，使大铁球与小铁球在撞击圆柱体前的速度基本相同。可看到大铁球能将圆柱体推得较远，说明物体的动能与它的质量有关。在其他条件相同时，物体的质量越大，动能越大。

研究动能定理 96

动能定理叙述的是力对空间的积累效应和受力物体动能之间的关系。作用力可以是恒力，也可以是变力。为了测量方便，再加上中学数学知识的局限，本实验三种方法中的作用力均为恒力。因为应用牛顿第二定律和运动学公式可以直接推导出动能定理，所以在实验中应尽量避免使用数学推导，否则就失去了用实验研究动能定理的意义。方法一、二、三都是固定作用力 F ，改变 F 作用的距离 s ，得到一系列 (v^2 , E_k) 值，然后用图线法得出结论： v^2 与 W 成正比，比例系数约为 $m/2$ 。方法四先固定 F ，改变 s ，得到 s 和 E_k 成正比；再固定 s ，改变 F ，得到 F 和 E_k 成正比。最后用多变量复合的方法得出 $W=F \cdot s$ 与 E_k 成正比的结论。此方法更具有一般性。

方法一

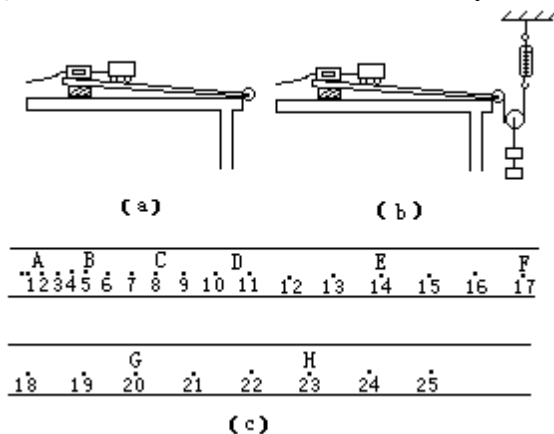
器材 带定滑轮的木板，打点计时器，小车，动滑轮，弹簧秤，钩码，细绳，刻度尺等。

操作

(1) 将打点计时器安装在木板的无滑轮端，并将此端适当地垫高，使小车获得一个初速度之后，能拉着纸带在木板上作匀速运动（图 a）。

(2) 按图 (b) 安装好实验装置。接通打点计时器的电源后释放小车，在小车运动的过程中读出弹簧秤的读数 F 。

(3) 取下纸带，从比较清楚的点子处开始，每隔相同的点数（例如 3 点）取一点，分别标上 A、B、C……H 等字母（如图 c），作为取样点。



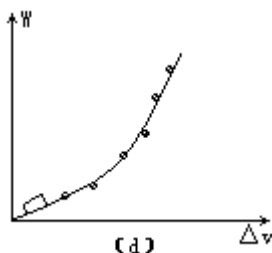
(4) 因为小车的加速度是恒定的，因此可以将取样点两边两个点之间的平均速度作为取样点处的取时速度。即 $v_A = s_{1,3}/2T$, $v_B = s_{4,6}/2T$, $v_C = s_{7,9}/2T$, …… $v_H = s_{22,24}/2T$ 。

(5) 用刻度尺测量出起始点（速度为零的点）到 A、B、C……H 各点之间的距离 s_1, s_2, \dots, s_8 。用天平称出小车的质量 m 。

(6) 计算出小车从起始点到 A、B、C……H 各点的过程中，拉力对小车作的功 $W_1 = F \cdot s_1, W_2 = F \cdot s_2, \dots, W_8 = F \cdot s_8$ 。

(7) 以横轴代表小车通过 A、B、C……H 各点时的速度 v 的增量（相

对起始点) v ，以纵轴代表 W ，作出 $W-v$ 图，得到一条曲线 (图 d)。



(8) 将 $W-v$ 图与基础篇第 50、51 页中各种函数关系的图线对照，初步估计是一条 $W=a \cdot v^2$ 曲线。因此再作 $W-v^2$ 图，得到一条直线。

(9) 用图解法求出 $W-v^2$ 图线的斜率 k ，可知在误差范围内 $k=m/2$ ，说明 $W = \frac{1}{2} m \Delta v^2$ ，即动能定理。也可以用线性回归法证实 W 与 v^2 成正比，并求出斜率 (具体方法见基础篇第 57 页的有关内容)。

注意

(1) 在点子密集区可以用 4 个 T 的位移来求速度。

(2) 为了减少测量力的误差，要选择适当量程的弹簧秤。

说明 此实验可说明将物体的动能定义为 $\frac{1}{2} mv^2$ 的原由。

实例 某次实验中测得

$$\Delta v_A = s_{1,3}/(2T) = \frac{0.0051}{0.0400} \text{ m/s} = 0.128 \text{ m/s},$$

$$\Delta v_B = s_{4,6}/(2T) = \frac{0.0112}{0.0400} \text{ m/s} = 0.280 \text{ m/s},$$

$$\Delta v_C = s_{7,9}/(2T) = \frac{0.0172}{0.0400} \text{ m/s} = 0.430 \text{ m/s},$$

$$\Delta v_D = s_{10,12}/(2T) = \frac{0.0231}{0.0400} \text{ m/s} = 0.578 \text{ m/s},$$

$$\Delta v_E = s_{13,15}/(2T) = \frac{0.0290}{0.0400} \text{ m/s} = 0.725 \text{ m/s},$$

$$\Delta v_F = s_{16,18}/(2T) = \frac{0.0350}{0.0400} \text{ m/s} = 0.875 \text{ m/s},$$

$$\Delta v_G = s_{19,21}/(2T) = \frac{0.0410}{0.0400} \text{ m/s} = 1.03 \text{ m/s},$$

$$\Delta v_H = s_{22,24}/(2T) = \frac{0.0470}{0.0400} \text{ m/s} = 1.18 \text{ m/s}。$$

$$s_1=0.0030\text{m}, \quad s_2=0.0150\text{m}, \quad s_3=0.360\text{m},$$

$$s_4=0.0660\text{m}, \quad s_5=0.1050\text{m}, \quad s_6=0.1520\text{m},$$

$$s_7=0.2070\text{m}, \quad s_8=0.269\text{m}.$$

$$m=0.221\text{kg}, \quad F=0.56\text{N},$$

$$W_1=F \cdot s_1=0.56 \times 0.0030\text{J}=1.7 \times 10^{-3}\text{J},$$

$$W_2=F \cdot s_2=0.56 \times 0.015\text{J}=8.4 \times 10^{-3}\text{J},$$

$$W_3=F \cdot s_3=0.56 \times 0.036\text{J}=20 \times 10^{-3}\text{J},$$

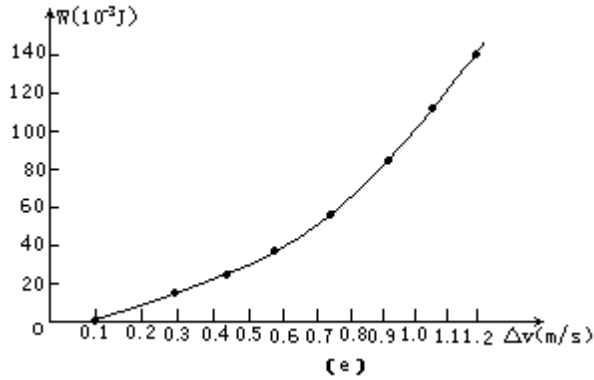
$$W_4=F \cdot s_4=0.56 \times 0.066\text{J}=37 \times 10^{-3}\text{J},$$

$$W_5 = F \cdot s_5 = 0.56 \times 0.105 \text{J} = 59 \times 10^{-3} \text{J},$$

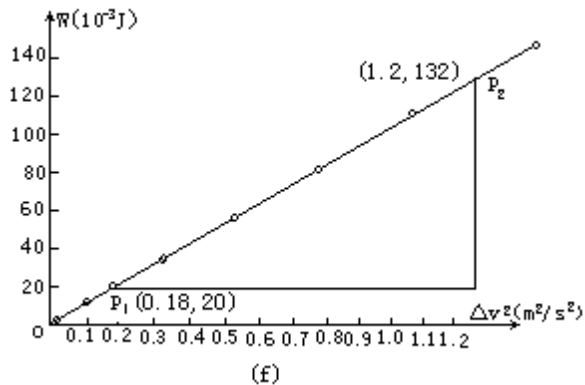
$$W_6 = F \cdot s_6 = 0.56 \times 0.152 \text{J} = 85 \times 10^{-3} \text{J},$$

$$W_7 = F \cdot s_7 = 0.56 \times 0.207 \text{J} = 116 \times 10^{-3} \text{J},$$

$$W_8 = F \cdot s_8 = 0.56 \times 0.269 \text{J} = 150 \times 10^{-3} \text{J}.$$



序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$v^2(10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2)$	16.4	78.4	185	334	526	766	1050	1381
$W(10^{-3} \text{J})$	1.68	8.4	20.2	37.0	58.8	85.1	116	150



以横轴代表 v ，纵轴代表 W ，作出 $W-v$ 图（图 e）。根据图（e）估计 W 和 v 成 $W=a \cdot v^2$ 关系，因此再作 $W-v^2$ 图（图 f），得一直线。在直线上取两点 $p_1(0.18, 20)$ 和 $p_2(1.2, 132)$ ，算出直线的斜率

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{(132 - 20) \times 10^{-3}}{1.2 - 0.18} \quad k = 0.110 \text{kg}.$$

说明初速度为零时合外力对小车做的功与小车速度平方成正比，比例系数接近小车质量的一半，即动能定理。

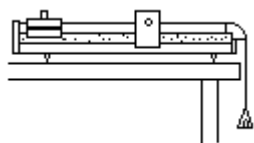
$$W = \frac{1}{2} m \Delta v^2.$$

方法二

器材 气垫导轨，数字毫秒计，天平，砝码等。

操作

(1)将气垫导轨调节水平（具体方法见实验 63 方法四）。



(2)如图安装好滑块，砝码盘和光电门，在滑块上装上最窄的挡光框。数字毫秒计功能开关置 s_2 ，时间选择开关选最小的一档。

(3)确定导轨上某一点作为滑块运动的起点，从导轨的标尺上读出光电门到起点的距离 s 。如果砝码盘和其中砝码的总质量为 m ，则在滑块从起点滑到光电门的过程中，合外力对滑块做的功 $W=mgs$ 。

(4)将滑块上的挡光框对准起点后，由静止释放滑块。当滑块经过光电门时，毫秒计记下挡光框挡光的时间 t 。如果挡光框两前沿之间的距离是 d ，则滑块经过光电门时的即时速度就是 $v=d/t$ 。滑块从起点开始到经过光电门的过程中速度的增量 $\Delta v=v$ 。

(5)改变光电门的位置，重复操作(3)、(4)，共重复 7 次，得到 7 组 (v, W) 的值。

(6)用方法一操作(7)、(8)、(9)相同的方法处理实验数据，得到动能定理。

注意 因为本实验近似地将砝码盘及其中砝码的总重力 mg 作为拉滑块的力 F ，因此系统的加速度宜小不宜大。

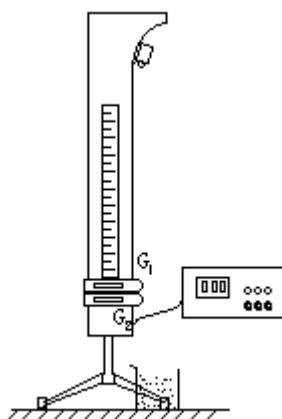
方法三

器材 斜槽轨道，简式计时器，天平砝码，弹簧秤等。

操作

(1)将斜槽轨道直立放置，用小重锤将轨道的平直部分调节成完全竖直。

(2)调整电磁铁的位置，使电磁铁吸住钢球时，球下缘恰好与标尺的零刻线对准。调整光电门的可调螺丝，使电磁铁中心与光电门中心线在同一竖直线上。（如图）



(3)用弹簧秤测出钢球的重力 F ，用天平测出钢球的质量 m 。将简式计时器的同步光控开关扳到光控档，使钢球经过光电门 G_1 时开始计时，经过光电门 G_2 时停止计时。计时单位选 $1/100$ 档。

(4)从标尺上读出两个光电门的位置，取两个位置的中点作为测量点。如果从零刻度线到测量点的距离为 s ，则在钢球下落过程中重力对钢球做的功 $W=F \cdot s$ 。

(5)用电磁铁释放钢球，如果两个光电门之间距离为 d ，简式计时器记下的时间为 t ，则可认为钢球经过测量点时的即时速度 $v=d/t$ 。钢球下落过程中速度的增量 $v=v$ 。

(6)改变两个光电门的位置，重复操作(4)、(5)共重复 7 次，得到 7 组 (v, W) 的值。

(7)用与方法一操作(7)、(8)、(9)相同的步骤处理实验数据，得到动能定理。

注意

(1)本实验中将钢球在两个光电门之间的平均速度作为钢球在两光电门中点的即时速度是近似的，因此两个光电门之间的距离应适当小一些。

(2)因 G_1 和 G_2 两个光电门放得较近，简式计时器的计时误差可能比较大，因此在光电门的同一个位置上要多次重复测量，求出平均值作为 t 。

(3)本实验不能将槽轨倾斜放置来做，因为钢球在槽轨上滚动时将有相当一部分能量转化为转动动能。

方法四

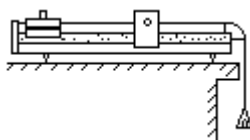
器材 气垫导轨，数字毫秒计，天平，砝码等。

操作

(1)按实验 63 方法四中的步骤将气垫导轨调节水平。

(2)把最窄的挡光框（两前沿之间距离为 d ）装在滑块上，用天平测出滑块的质量 M 。

(3)数字毫秒计的功能开关置 s_2 档，时间选择开关用最小档（1ms 或 0.1ms）。将两个光电门与数字毫秒计接通，把其中一个装在导轨上，另一个放在桌上不用。砝码盘通过一根细线拉动滑块（如图）。



(4)砝码盘和砝码的总质量为 mg ，滑块、砝码盘、砝码的总质量为 $M+m$ 。将滑块紧靠定位杆后释放，从毫秒计上读出挡光框两个前沿挡光的时间差 t ，即可算出滑块经过光电门时的速度 $v=d/t$ ，系统的总

动能为 $E_K = \frac{1}{2} (M+m)v^2$ ，从标尺读出挡光框从紧靠定位杆一直到经过光电门的位移 s 。

(5)固定砝码盘与砝码的总质量 m ，改变光电门的位置，重复操作(4)，可得到若干组 (s, E_K) 值。以横轴代表系统的位移 s ，纵轴代表系统动能的增量 E_K ，作 E_K-s 图，可得到一条过原点的直线。（也可以用线性回归法证实 E_K 与 s 成正比，具体方法见基础篇第 57 页的有关内容）

用图解法求出图线的斜率，在误差范围内与 mg 相等。

(6) 固定光电门的位置，改变 m ，重复操作(4)，可得到若干组 (m, E_k) 值。以横轴代表作用力 $F=mg$ ，纵轴代表系统动能的增量 E_k ，作 E_k-F 图，可得一条过原点的直线(也可以用线性回归法证实 E_k 与 F 成正比)。用图解法求出图线的斜率，在误差范围内与系统的位移 s 相同。

(7) 用多变量复合的方法将操作(5)、(6)的结论合起来。(具体方法见实验 63 的按语)，便可得到动能定理。

验证动能定理 97

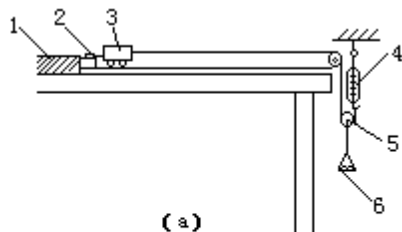
方法一经过多点测量后用图线法来得出实验结论，可以观察实验的整个过程，原理上优于只观察始末两个状态的“二点式”验证法（如方法二）。

方法一

器材 打点计时器，纸带，带定滑轮的木板，小车，动滑轮，弹簧秤，天平，砝码，刻度尺，砝码盘，细绳等。

操作

(1)如图(a)安装好实验仪器，打点计时器后面用垫块将纸带垫平，以减少拖进的阻力。调整砝码盘中砝码的质量，使小车能拖着纸带匀速前进，然后将弹簧秤读数调成零。（如弹簧秤的读数不可调，则可记下此时弹簧秤的读数作为初读数。）

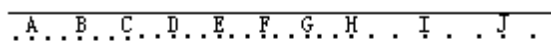


(a)

1. 垫块 2. 打点器 3. 小车
4. 弹簧秤 5. 动滑轮 6. 砝码

(2)在砝码盘中增加适量的砝码，释放小车，在细绳拉着小车作匀加速运动的同时，读出弹簧秤的读数 F 。重复三次，选一条最清楚的纸带待处理，取三次弹簧秤读数的平均值作为拉小车的力。如弹簧秤的初读数不为零，则要将平均值减去初读数作为拉小车的力。

(3)舍弃纸带中前面一些太拥挤的点，从某一点开始每隔两点选择一个点，分别标上 A、B、C……J 等字母（图 b）。用刻度尺测量出 B 到 C、D……J 各点的距离 s_1, s_2, \dots, s_8



(b)

(4)用刻度尺测量出 AC 的距离，除以 $6T$ (T 是打点器的周期)，即是 B 点的即时速度 v_1 。用同样的方法可以测出 C、D、E……J 各点的速度 $v_2, v_3, v_4, \dots, v_9$ 。

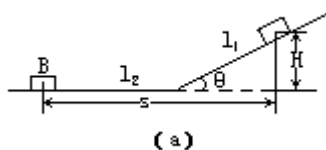
(5)用天平称出小车的质量 m ，即可用动能 $E_K = \frac{1}{2}mv^2$ 计算出小车在 B、C、D……J 各点的动能 $E_{K1}, E_{K2}, E_{K3}, \dots, E_{K9}$ 。将小车在 B 点的动能作为初动能，可以算出小车到 C、D……J 各点时动能的增量 $E_{K1}, E_{K2}, \dots, E_{K9}$ 。

(6)以横轴代表小车从 B 点开始经过的距离 s ，以纵轴代表小车以 B 点为基准动能的增量 E_K ，作 E_K-s 图，可得到一条过原点的直线，说明 E_K 与 s 成正比，即 $E_K=Ks$ （也可以用线性回归法证实 E_K 与 s 成正

比，具体方法见基础篇第 57 页的有关内容)。用图解法求出图线的斜率 k ，如果 k 在误差范围内与弹簧秤的读数 F 相同，即可验证动能定理 $E_k = F \cdot s$ 。

方法二

原理 一物体从斜面 (A 点) 滑到平面上 (B 点)，A 点的高度是 H ，斜面上滑行的距离是 l_1 平面上滑行的距离是 l_2 (图 a)。根据动能定理， $mgH = \mu mg \cdot \cos \theta \cdot l_1 + \mu mg \cdot l_2$ 。化简可得 $H = \mu s$ 即 $\mu = H/s$ 。



器材 表面情况基本相同的木板 2 块，小车，刻度尺等。

操作

(1) 将木板的一头垫高，使小车被推一下后能在斜面上匀速 (目测) 下滑。用刻度尺测量出斜面的水平长度 l 和垫高的高度 h ，即可知道小车的摩擦系数 $\mu = h/l$ (图 b)。

(2) 将两块木板对接放置成相连的斜面和平面的。将小车在斜面上 A 点由静止释放，一直滑行到平面上 B 点停下来。用刻度尺测量出小车运动的水平距离 s 和 A 点的高度 H (图 c)。如果在误差范围内 $\mu = H/s$ 即粗略地验证了动能定理。



动能与势能的相互转化 98

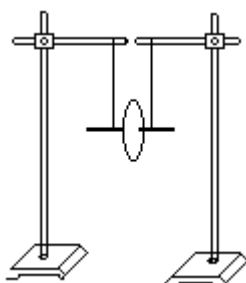
动能与势能相互转化的例子在日常生活中随处可见。实验中应使物体的动能和势能能多次相互转化。只要使摩擦力越小，物体的动能和势能相互转化的次数就越多，实验效果就越好。

方法一

器材 滚摆，细绳，铁架台。

操作

(1)在滚摆轴两端的小孔里系上细绳，并且细绳将滚摆悬挂在方座支架上，使滚摆摆轴成水平。两悬线上端的距离要略小于轴端两孔间的距离。



(2)转动滚摆的轴，使悬线依次（成单层紧密排列）绕在轴上，滚摆随之上升。当滚摆升到最高点后，让滚摆由静止开始下落，可看到滚摆旋转下降的过程中，滚摆的转速越来越大，当悬线完全放开时，转动的动能最大。此后由于滚摆继续旋转，又将悬线逐渐绕在轴上而上升，转速越来越小，一直上升到接近原来释放时的高度。然后再旋转下降，重复以上的过程，表明了重力势能和动能（主要是转动动能）的互相转化。

注意 滚摆由静止开始释放，滚轴的初始位置一定要与两悬点的连线平行，以保证滚摆稳定地作上下往复运动。

方法二

器材 气垫导轨等。

操作

(1)将气垫导轨大致调节水平，接通气源后将滑块放在导轨上，用两根弹簧将滑块与导轨的两端相连。

(2)将滑块拉到导轨一端后由静止释放，滑块在导轨上作往复运动。在导轨两端，滑块速度较小，弹簧形变较大；在导轨中间，滑块速度较大，而弹簧形变较小，显示了弹性势能和动能的互相转化。

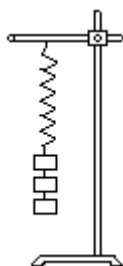
方法三

器材 弹簧，铁架台，钩码若干。

操作

(1)用弹簧将适量的钩码挂在铁架台上，钩码静止在平衡位置上。

(2)用手将钩码拉下适当距离后由静止释放，钩码作上、下往复运动，钩码的速度，弹簧的形变和钩码的高度都在变化，显示了动能和重力势能，弹性势能的相互转化。



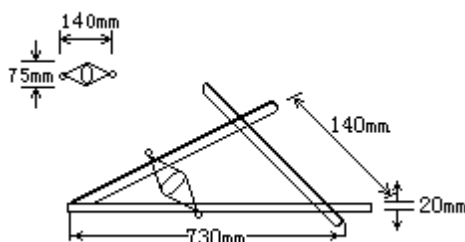
注意 在不损坏弹簧的前提下，钩码的质量适当的大一些，振动的振幅大一些，实验的效果较好。

自动上坡 99

这是一个很有趣的实验，看似滚动体会自动上坡，实质上滚动体质心下降，一部分重力势能转变成了动能。

方法一

器材 双锥体，木支架（规格见图），圆柱体木杆，刻度尺等。



操作

(1)将圆木杆放在木支架宽的一端，可见木杆自动滚下，说明木支架宽的一端高于窄的一端。

(2)将双锥体放在木支架窄的一端，可见双锥体自动地向上滚动。

(3)使双锥体分别静止在木支架的宽端和窄端，用刻度尺仔细测量锥端的高度，可揭示双锥体上坡的本质。

方法二

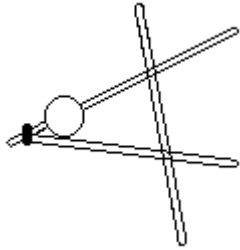
器材 铅笔3支，橡皮筋，小球，圆木杆等。

操作

(1)用橡皮筋将两支铅笔的一端扎紧，另一端拉开适当的距离后搁在第三支铅笔上，构成一个木支架，宽端略高于窄端。

(2)将圆木杆放在木支架的宽端，可见圆木杆自动滚下，说明木支架宽端略高于窄端。

(3)将小球放在木支架窄端，可见小球朝高端滚去。



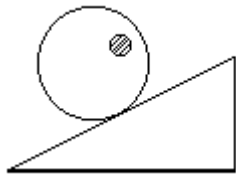
方法三

器材 自制木轮，斜面等。

木轮的制作方法

用轻质木料制成一个木轮，半径约 15cm。在木轮背面偏心处开一凹洞嵌入一重物（如铁块）。

操作 将木轮放在斜面上，正面朝观察者，重物在斜面低的一边（如图）。放手后，木轮会出人意料地朝上滚去。



验证机械能守恒定律

100

本实验的关键是减少各种阻力的影响，并且测准各个位置物体的速度。方法一、二用打点计时的方法测量物体的速度和高度的变化；方法三、四、五用光电计时的方法测量速度；方法六、七用间接的手段测量速度。另外还有一点注意的是，在方法一至五中，不能应用自由落体的公式，因为由这些公式直接可推导出机械能守恒的结论。

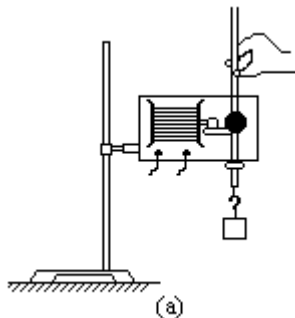
方法一

器材 打点计时器，学生电源，刻度尺，重锤，夹子，纸带，铁架台等。

操作

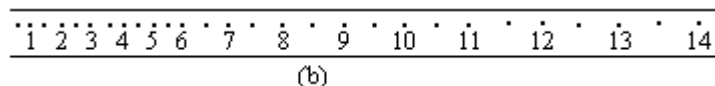
(1) 将铁架台放在桌边，打点计时器固定在铁架台上，使它的底板在竖直平面内。

(2) 取一纸带，下端用夹子夹住，夹子上挂上重锤，上端穿过打点计时器的限位孔，用手提着，使重锤静止在靠近打点计时器的地方（图 a）。



(3)接通打点器的电源，使打点器开始打点。放手释放纸带，让重锤拉着纸带一起下落，打点器便在纸带上打出一系列点子（如果打点不很稳定，可以多打几条纸带，选一条最清楚的供数据处理）。

(4)舍掉纸带上开头过于密集的部分，找一个点作为起始点。在起始点下面标上0，然后每隔一个点，选定一个取样点，次标上1、2、3……（图b）

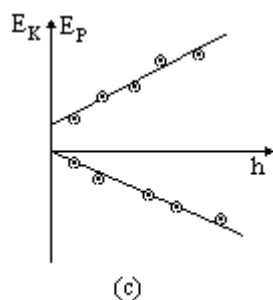


(5)用刻度尺测量出与每个取样点相邻的两个点之间的距离 d ，取样点处的即时速度 $v=d/(2T)$ （ T 为打点器的周期，一般可取为 $0.200s$ ）。

重锤在取样点处的动能为 $\frac{1}{2}mv^2$ 。

(6)用刻度尺测量出从起始点到各取样点之间的距离 h ，重锤取样点处的重力势能为 $-mgh$ （以起始高度作为零势能面）。

(7)以横轴表示 h ，纵轴表示重锤的动能 E_k 和重力势能 E_p ，作出 E_k, E_p-h 图（图c），A图线表示重锤动能增加的情况，B图线表示重锤重力势能减少的情况。用图解法测出两根图线的斜率。如果两根图线斜率的绝对值基本相同，说明 E_k 和 E_p 的变化率相同，即可验证在重锤下落的过程中机械能守恒。



注意

(1)打点器要固定得牢，在重锤下落过程中位置不能变化。

(2)重锤的质量应适当地大一些，这可以相对减少纸带阻力和空气阻力的影响。

分析

本实验的误差包含测量的偶然误差和由于阻力等因素引起的系统误差两部分，测量误差又包括测量动能的误差和测量势能的误差。

$E_p=mgh$ 的相对误差为 E_m+E_h ，

$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \frac{d^2}{t^2}$ 的相对误差为 $E_m + 2E_d + 2E_t$ 。

(1)测量重力势能的误差 设测量高度 h 的最大绝对误差为 $0.5mm$ （毫米刻度尺上最小刻度的一半），如果 h 值为 $50.0mm$ ，则势能最大相对误差为 $0.5/50.0 \times 100\%=1\%$ 。

(2)测量动能的误差 即时速度的测量误差包括用刻度尺测相邻两段位移 d 的误差及打点周期 T 的误差。前者跟测量 h 相类似，可将最大百分误差估计为 $2-3\%$ ；后者根据国家教委的有关技术标准规定，打点周期 T 的误差为 1% 。由于动能 E_k 正比于 $(d/2T)^2$ ，所以动能最大相对误

差为 $(0.02+0.01) \times 2 \times 100\%=6\%$ 。

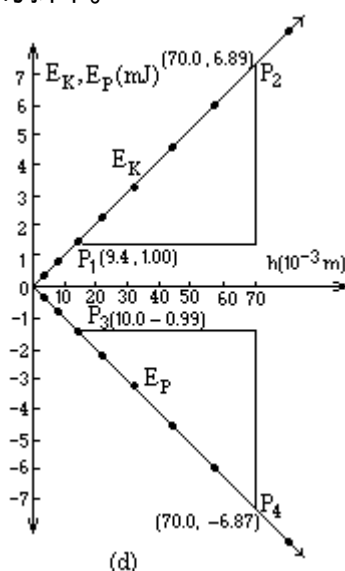
(3)由运动阻力产生的系统误差，如果操作正确，阻力一般可调节到小于3克力，重锤质量为300克，所以阻力产生的最大相对误差为 $3/300 \times 100\%=1\%$ 。

综上所述，如果整个实验的相对误差不大于8%，验证是成功的。

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$d_n(\text{cm})$	3.21	4.73	6.31	7.87	9.40	11.0	12.5	14.0	15.7
$v_n(\text{m/s})$	0.803	1.18	1.58	1.97	2.35	2.75	3.13	3.50	3.93
$E_k(\text{J})$	0.322	0.699	1.24	1.94	1.76	3.78	4.88	6.13	7.70
$h(\text{cm})$	2.5	6.50	12.0	19.0	27.6	37.8	49.5	62.7	77.5
$E_p(\text{J})$	0.245	0.637	1.18	1.86	2.70	3.70	4.85	6.14	7.60

实例 某次实验中得到如图(b)所示的纸带，测量后得到的数据如上一页表中所列。

以横轴表示重锤的高度 h ，纵轴表示重锤的动能 E_k 和势能 E_p ，作出 E_k, E_p-h 图(图d)，在 E_k-h 图线上取 $P_1, (9.4, 1.00)$ 和 $P_2 (70.0, 6.89)$ 两点，求出图线的斜率。



$$k_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{6.89 - 1.00}{70.0 - 9.4} = 0.0972。$$

在 E_p-h 图线上取 $P_3 (10.0, 0.99)$ 和 $P_4 (70.0, -6.87)$ 两点，求出图线的斜率。

$$k_2 = \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} = \frac{-6.87 + 0.99}{70.0 - 10.0} = -0.0980。$$

E_k-h 图线和 E_p-h 图线斜率的绝对值基本相同(仅相差0.9%)，说明在重锤下落过程中，它动能的增加率等于它重力势能的减少率，即它的机械能守恒。

方法二

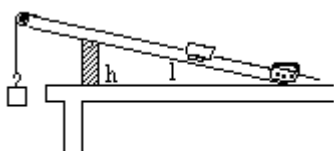
器材 带定滑轮的木板，小车，打点计时器，学生电源，重锤，天

平，砝码，刻度尺，垫块，细绳等。

操作

(1)用天平称出小车的质量 m_1 和重锤的质量 m_2 。

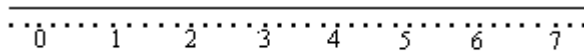
(2)把打点计时器安装在木板无滑轮端，用垫块将木板垫成斜面，重锤通过滑轮拉动小车，用手拉着纸带，使小车静止在靠近打点器的地方（如图 a）。



(a)

(3)接通打点计时器的电源后释放小车，让重锤拉着小车作加速运动，打点器便在纸带上打出一系列点子。

(4)舍掉纸带上开头过于密集的部分，找一个点作为起始点。在起始点下面标上 0，然后每隔四个点选定一个取样点，依次标上 1, 2, 3, ……（图 b）。



(b)

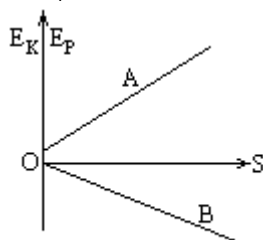
(5)用刻度尺量出以每个取样点为中心的五个点子之间的距离 d ，该取样点处的即时速度 $v=d/4T$ (T 为打点器的周期，一般可取为 0.200s)。

由小车和重锤组成的系统的动能 $E_K = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v^2$ 。

(6)用刻度尺测量出从起始点到各取样点之间的距离 s ，垫块的高度 h 和斜面与垫块接触点到底端的距离 l 。系统在取样点处的重力势能

$E_K = m_2gs = \frac{m_1gsh}{l}$ （设系统在起始点处重力势能是零）。

(7)以横轴表示 s ，纵轴表示系统的重力势能 E_p 和动能 E_K ，作出 E_p ， E_K - s 图（图 c）。A 图线表示系统动能增加的情况，B 图线表示系统重力势能减少的情况。用图解法测出两根图线的斜率。如果两根图线斜率的绝对值基本相同，说明 E_K 和 E_p 的变化相同，即可验证系统机械能守恒。



(c)

注意 重锤的质量应适当地大一些，这样可以相对地减小各种阻力的影响。

分析 同方法一，但考虑到增加了小车，滑轮的摩擦阻力及滑轮、小车轮的转动动能，允许的误差范围可适当放宽。

方法三

器材 气垫导轨，气源，数字毫秒计等。

操作

(1)按实验 63 方法四中的步骤，通过粗调和细调两步将气垫导轨调节水平。

(2)在导轨的一端垫上高度为 H 的垫块，导轨高端装上定位杆，光电门 G_1 置于导轨上， G_2 放在桌上不用。在滑块上装上最窄的挡光框。数字毫秒计的动能开关扳在 s_2 位置，时间选择开关放在最小档（图 a）。

(3)将滑块紧靠定位杆，从标尺上读出挡光框两前沿中点的位置作为初始位置。

(4)滑块紧靠定位杆由静止释放，当滑块经过光电门时，数字毫秒计记下挡光时间 t 。如果所用挡光框两前沿之间的距离是 d ，则滑块经过光电门时的即时速度就是 $v = d/t$ ，动能是 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 。

(5)从导轨标尺上读出从初始位置到光电门之间的距离 s ，如果导轨两脚之间的长度为 L ，则滑块从初始位置到光电门降低的高度 $h = sH/L$ ，滑块的重力势能 $E_p = -mgh$ （以滑块在初始位置时的高度为零势能面）。

(6)改变光电门的位置，重复操作(4)，(5)共得到 7 到 9 组 (s, E) 数据。

(7)以横轴代表 s ，纵轴代表 E_k, E_p ，作出 E_k, E_p-s 图。用图解法或线性回归法求出两条图线的斜率，如果它们的绝对值基本相同，说明滑块的动能增加率与重力势能减少率相同即验证了机械能守恒定律。

注意

(1)为了减小空气阻力的影响，垫块高度适当地高一些。

(2)导轨低端要垫上缓冲物，以免滑块弹回影响读数，也可避免损坏仪器。

实例 某次实验中得到如下数据：

$L=1400\text{mm}$ ， $H=60.0\text{mm}$ ， $d=10.0\text{mm}$ 。

$s(\text{mm})$	$t(\text{ms})$	$v(\text{m/s})$	$h(\text{mm})$	$E_k(\text{J})$	$E_p(\text{J})$	$E(10^{-3}\text{J})$
200	24.5	0.408	8.57	0.0833	-0.0840	-0.7
300	19.8	0.505	12.9	0.108	-0.126	2
400	17.5	0.571	17.1	0.163	-0.168	-5
500	15.1	0.662	21.4	0.219	-0.210	9
600	14.6	0.714	25.7	0.255	-0.252	3
700	13.2	0.778	30.0	0.287	-0.294	-7
800	12.3	0.813	34.3	0.330	-0.336	-6
900	11.4	0.877	38.6	0.384	-0.378	6
1000	10.8	0.926	42.9	0.429	-0.420	9

用线性回归法可求出 E_k-s 图线的斜率 $k_k=0.425$ ， E_p-s 图线的斜率 $k_p=0.420$ 。

因为 $k_k=0.008$ ， $|k_k-k_p| < k_k$ ，所以可以认为 $k_k=k_p$ ，说明滑块的动能增加率和重力势能减少率相同，即验证了机械能守恒定律。

方法四

器材 斜槽轨道，筒式计时器等。

操作

(1)将斜槽放置直立放置，用小重锤将轨道的平直部分调节成完全竖直。

(2)调整电磁铁的位置，使电磁铁吸住钢球时，球的下缘恰好与标尺的零刻度线对准。调整光电门的可调螺丝，使电磁铁中心与光电门中心线在同一竖直线上（如实验 96 方法三图）

(3)将筒式计时器的同步光控开关拨到光控挡，使钢球通过光电门 G_1 时开始计时，经过光电门 G_2 时停止计时。计时单位选用 1/100 挡。

(4)从标尺上读出两个光电门的位置，取两个位置的中点作为测量点。如果测量点的标尺读数为 h ，小钢球质量为 m ，则小钢球到测量点时的重力势能 $E_p = -mgh$ （以小钢球未下落时的高度作为零势能面）。

(5)用磁铁释放小钢球，如果两个光电门之间的距离为 d ，筒式计时器记下的时间为 t ，则可认为小钢球经过测量点时的即时速度 $v = d/t$

小
钢球的动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 。

(6)改变两个光电门的位置，重复操作(4)、(5)。共重复 7 次，得到 7 组 (h, E_p) 和 (h, E_k) 值。

(7)用与方法一操作(7)相同的步骤处理实验数据，验证机械能守恒定律。

注意 同实验 96 方法三。

方法五

器材 气垫导轨，气源，数字毫秒计算。

操作

(1)接通气源后将滑块放在导轨上，反复调节导轨至水平，直到由静止释放的滑块基本不动为止。

(2)用两根弹簧将滑块和导轨的两端相连，将滑块拉离平衡位置后，滑块可作往复运动。待滑动完全静止后，从导轨的标尺上记下它的平衡位置。用一块高度为 H 的垫块（ H 不要太小），将导轨的一端垫高，再记下滑块新的平衡位置。如果新、老平衡位置之间距离为 x ，导轨两脚之间的距离为 L ，则两弹簧共同的等效倔强系数 $K = \frac{mgH}{L \cdot x}$ （图a）。

(3)在滑块上装上最窄的挡光框。数字毫秒计的功能开关板在 s_2 档位置，时间选择开关放在最小档。在导轨上选定一个初始位置 A ，离平衡位置的距离是 s_0 ，将一个光电门放在离初始位置的距离为 s 的地方，另一光电门放在桌上不用。

(4)将滑块拉到初始位置处由静止释放，滑块经过光电门时，数字毫秒计记下挡光时间为 t 。如果挡光框两前沿之间的距离为 d ，则滑块经过

光电门时的即时速度 $v = d / t$ ，动能 $E_K = \frac{1}{2} mv^2$ 。经过光电门时，系统的弹性势能 $E_{P1} = \frac{1}{2} K (s_0 - s)^2$ ，重力势能 $E_{P2} = -mgsH / L$ （以滑块在初始位置时的高度为零势能面）。

(5) 改变光电门的位置，重复操作(4)，共重复 3—4 次，得到几组 (E_K ， E_{P1} ， E_{P2}) 值。

(6) 求出几次实验中的机械能 $E = E_K + E_{P1} + E_{P2}$ ，如果这几个值在误差范围内相等，即验证了机械能守恒定律。

方法六

器材 滑轮，秒表，钢卷尺，钩码若干，铁架台等。

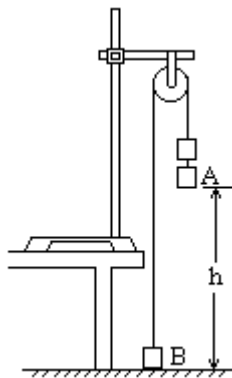
操作

(1) 如图安装好实验装置， $m_A > m_B$ ，用手拉住 B 物体，使它与地面接触。用钢卷尺测量出 A 物体底部到地面的距离 h 。

(2) 释放 B 物体，同时用秒表开始计时。当 A 物体碰到地面时，停止计时，记下系统运动的时间 t 。因为系统作初速为零的匀加速运动，因此 $\frac{v_t}{2} \cdot t = h$ ，即可求出 A 物体落地时的速度 $v_t = 2h / t$ 。系统在运动过程中增加的动能为 $E_K = \frac{1}{2} v_t^2 (m_A + m_B)$ 。

(3) 在系统运动过程中，系统减少的重力势能为 $E_P = gh(m_A - m_B)$ 。比较结果，可看出 E_P 和 E_K 基本相等。

(4) 改变定滑轮的高度，再重复以上实验，如果所得结果也相同，即可验证机械能守恒定律。



注意 引起本实验结果误差主要有三方面的因素：

滑轮的摩擦力，滑轮的质量，计时的误差。以下几种方法用以减少这些因素带来的误差。选用质量较好的金属滑轮并配合适当的润滑措施可减小滑轮摩擦力的影响。 m_A 和 m_B 适当发大一些可相对减小滑轮质量的影响。适当地增大 h 的值，并保持系统的加速度不要过大，可减小计时误差。

方法七

器材 铁架台，铁夹，铁杆，重垂，小螺帽，重垂线，米尺，大三

角板，挡板，木片，白纸和复写纸等。

操作

(1)如图所示，在铁架台的上部，用铁夹固定一根铁杆 2。将重垂 1 用两根细线悬挂在铁杆上。

(2)在铁架台下部用一个铁夹固定一块挡板 3，挡板的位置放在；当重垂竖直悬挂时，恰能被挡住大部分的地方。

(3)在挡板下悬挂一根重垂线 4，重垂线下面的小垂尖接近水平地面。

(4)在远离桌边处的地面上放一张白纸 5，纸上覆盖一张复写纸 6。

(5)在重垂 1 上放一颗小螺帽 7，用木片 8 将重垂和螺帽一起斜向托起，托起的高度 h 可由竖立在桌面的三角板上量出。

(6)实验时迅速放掉木片 8，让重垂自由下摆，当重垂摆至竖直位置时，被挡板阻挡，但螺帽因惯性将作平抛运动落地，在白纸上打下印记。用尺量出重垂升高的高度 h ，螺帽下落的高度 H ，水平抛出的距离 s 。

(7)根据机械能守恒定律，对重垂来说应当有

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

而重垂在最低点的速度 v 可以由螺帽作平抛运动求得，

$$v = \frac{s}{t} = s / \sqrt{\frac{2H}{g}} = s\sqrt{\frac{g}{2H}}$$

将 式代入 式得

$$mgh = \frac{1}{2}ms^2g / 2H,$$
$$h = s^2 / 4H。$$

只要证得 $s^2 = 4Hh$ ，即证明机械能守恒。

(8)改变重垂下落的高度重做几次实验。

注意

(1)为了较准确地读出重垂高度的变化（即读出 h ），应当在重垂的中部画一道标记线，通过这条线可以量准重垂重心位置的变化。

(2)木片托起重垂时应保持两条系线张紧且不扭转，螺帽应处在重垂在最前端，实验时应突然地、迅速地斜向下方松离，而不是抽动，防止重垂发生转动。

(3)在用复写纸记录螺帽落点位置之前，应先试做几次，待位置基本确定之后再盖上复写纸。

(4)铁架台受重垂撞击落点位置会有所变动，最后用夹紧具将它与桌边固定。

说明 本实验证明的是作曲线的变加速运动物体在势能和动能转化过程中机械能守恒，它跟用打点计时器研究自由落体运动中机械能守恒相比更能显示该定律的普遍性（自由落体运动中机械能守恒的验证，实际上只是验证自由落体运动的运动学公式 $h = \frac{1}{2}gt^2$ 而已）。本实验使用的

的仪器比较简单、可靠，而螺帽与重垂间的摩擦损耗，跟打点计时纸带的摩擦损耗相比要小得多，因而实验精度也较高。本实验采用悬挂方法而不采用让小球直接滚下的方法目的是为了减小滚动动能和摩擦损耗。

器材 金属摆球，木杆，长铁钉，铁架台，米尺，细绳等。

操作

(1)用细绳拴上金属摆球构成摆，细绳上端固定在铁架台上。将木杆水平固定在适当的高度上，作为摆球初始高度和末高度的测量标志。

(2)将摆球由它的平衡位置 B 拉高到一侧的 A 点（与木杆高度相同，细绳要绷紧）。由 A 点静止放球，可看到它经过 B 点后能运动到与 A 点等高的 C 点，说明摆球由 A 经 B 到 C 的过程中虽然发生重力势能和动能的相互转化，但总的机械能守恒。

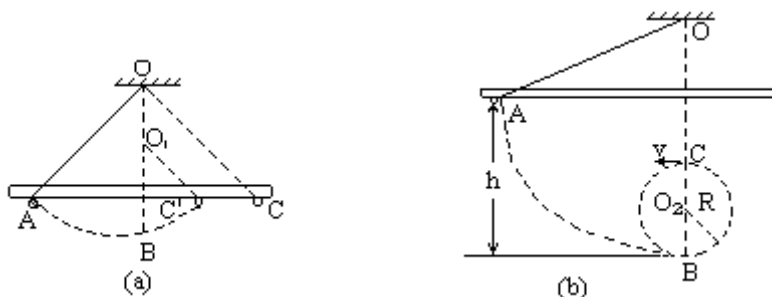
(3)改变水平木杆的高度，重复操作(2)。

(4)仍将摆球由 A 点释放，但在摆线悬点 O 的竖直下方 O_1 点用固定铁钉阻挡摆线。可看到摆球摆过 B 点后，改以 O_1 为圆心，沿半径为 O_1B 的圆弧上升到 C_1 点， C_1 点仍与木棍等高（如图 a），表明摆球由 A 经 B 到 C_1 的过程中机械能守恒。

(5)改变水平木杆的高度，重复操作(4)。

(6)如图(b)所示，将铁钉移到较低的 O_2 处，反复调节水平木杆的高度，使摆球从 A 点释放后，能围绕 O_2 点作圆周运动（如木杆再低一些，摆球就不能越过圆弧的最高点了）。用米尺测量出 A 点到 B 点的竖直高高 h 和 O_2 到 B 的距离 R ，检验在误差范围内 R 和 h 是否满足 $R = \frac{2}{5}h$ 的关系。

系。



说明

若要摆球顺利通过半径为 R 的圆弧最高点的最小速度应满足下列关系：

$$m = \frac{v^2}{R} \quad mg,$$

即

$$v^2 = gR$$

根据机械能守恒定律

$$\frac{1}{2}mv^2 + mg2R = mgh$$

由 、 两式得

$$R = \frac{2}{5}h。$$

用外力 F_0 去拉长同一根橡筋，会出现不同的伸长。当拉橡筋的外力 F 从大于 F_0 减小到 F_0 时橡筋的伸长，比 F 从小于 F_0 增大到 F_0 时橡筋的伸长要大，这一现象称为迟滞。在这个过程中，机械能有一定的损耗（因分子间距变化而转化成了分子的内能），称为迟滞能耗。

方法一

器材 橡筋带（长 12—14cm，宽约 3mm，厚 0.2—0.4mm），弹簧秤（称量为 500g 即 4.9N），白纸，图钉，铅笔等。

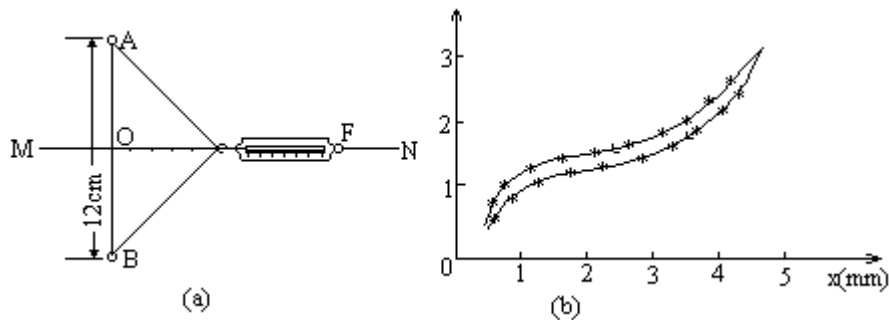
操作

(1) 将白纸铺在桌面上用图钉固定，再用两枚图钉把橡筋固定在纸面一边，图钉头要压紧橡筋，两图钉之间橡筋长 12.0cm。

(2) 在白纸上画出橡筋的中垂线 MN，并从 AB 的中点 O 开始，在 MN 上每隔 0.50cm 标出一点。

(3) 用弹簧秤钩住橡筋中点 O，沿 MN 直线拉。每拉动 0.50cm 都记下弹簧秤的读数，一直拉到弹簧秤钩位移 $x=6.00\text{cm}$ （图 a）。然后慢慢地将弹簧秤沿该直线退回，仍然每移动 0.50cm 记下弹簧秤读数（将会发现对同一位移 x ，拉力 F 值并不都相等）。

(4) 以弹簧秤钩的位移 x 作为横坐标，弹簧秤的读数 F 作为纵坐标，作为 $F-x$ 图。因为 $F-x$ 图线下面的面积能表示 F 力作的功，所以拉伸与回缩两条图线中间的面积即可表示迟滞能耗。



实例 某次实验中得到如下数据

位移 $x(\text{mm})$	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0
拉伸力 $F(\text{N})$	0.00	0.50	0.80	1.10	1.30	1.40	1.50	1.60	1.80	2.30	2.30	2.70	3.20
回缩力 $F(\text{N})$	0.00	0.40	0.70	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.50	1.80	2.10	2.50	3.20

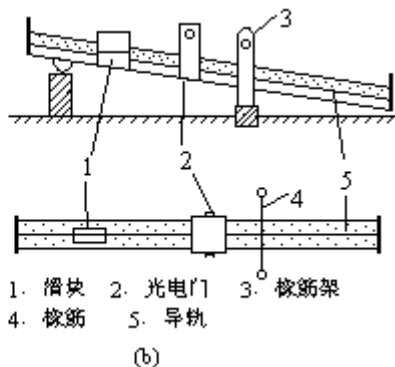
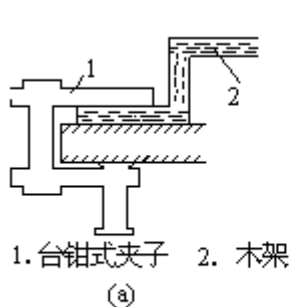
以横轴代表弹簧秤钩的位移 x ，纵轴代表弹簧秤的读数 F ，作出 $F-x$ 图（图 b）。图中上面一根图线表示橡筋伸长的过程，下面一根图线表示橡筋回缩的过程。两条图线之间的面积代表的功等于迟滞能耗。

方法二

器材 气垫导轨，气源，数字毫秒计（规格同方法一），台钳式夹子和木架（固定橡筋带用），天平，砝码等。

操作

(1) 将气垫导轨的左端垫高。在靠近右端的 $1/3$ 处的桌边上固定两个橡筋架（图 a），中间绷一根橡筋，在靠近橡筋处置一光电门[如图(b)上图，图(b)下图为俯视图]。



(2)在滑块上安装上最窄的挡光框，数字毫秒计的功能开关置于 s_2 档，时间选择开关用最小档。

(3)将滑块放在导轨左端让它自由滑下，经过光电门时，数字毫秒计记下时间 t_1 。如果所用挡光框两前沿之间的距离是 d ，则滑块下滑经过光电门的速度就是 $v_1=d/t_1$ 。滑块碰到橡筋后反弹又经过光电门(图 c)，数字毫秒计又显示时间 t_2 ，那么滑块反弹经过光电门的速度 $v_2=d/(t_2-t_1)$ (因两次计时间隔小，毫秒计不可能复零)。

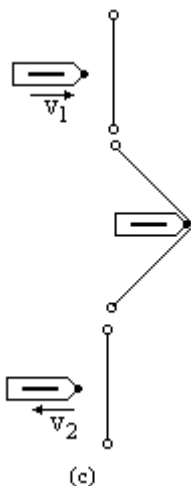
(4)用天平称出滑块的质量 m ，则迟滞能耗为 $\frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2)$ 。

注意

(1)为了减少其他能量损耗，橡筋一定要与滑块的质心等高，否则容易导致滑块在碰撞过程中与导轨摩擦。

(2)在来得及读出 t_1 的前提下，光电门应尽量与橡筋靠近。

(3)调节导轨的垫高和滑块的起始位置，使橡筋受到滑块冲撞时，中点的最大位移为 6cm 左右，这样可将方法一、二的迟滞能耗作一个半定量的比较。



用冲击摆测子弹的速度

103

本实验方法一的分析部分应用误差理论得出了减小实验误差的可行措施，读者可直接用其结论。方法二的主要优点是可以通过比较子弹质量的实验值和称量值，检验实验的准确程度。

方法一

原理 子弹与冲击摆的摆块发生完全非弹性碰撞时动量守恒

$$mv = (m+M)V_0$$

式中 m 和 M 分别是子弹和摆块的质量, v 和 V 分别代表子弹原来的速度和子弹、木块的共同速度。在子弹与摆块一起向上摆动时机械能守恒。

$$\frac{1}{2}(m+M)V^2 = (m+M)gl(1-\cos\theta),$$

式中 l 表示摆长, θ 表示最大摆角。在实验中测得 m 、 M 、 l 、 θ , 即可求出子弹的速度

$$v = \frac{2(M+m)}{m} \sqrt{gl} \sin \frac{\theta}{2}.$$

器材 冲击摆, 物理天平, 砝码, 米尺等。

操作

(1) 调节冲击摆摆块的位置, 使摆块静止时, 弹簧枪发射的子弹正好能击中它的空腔中心。

(2) 试射几次, 看子弹是否能很有把握地射入摆块空腔, 并记下摆线的最高位置。

(3) 将刻度指示针置于摆线的最高位置附近, 稍稍偏向平衡位置处, 以减小指示针对摆块的阻碍作用。

(4) 使摆块静止后, 击发弹簧枪, 让子弹和摆块一块向上摆动, 直至稍稍推动指示针。此时指示针指出的角度 θ 便是摆的最大偏角。

(5) 重复操作(3)、(4), 每次都记下角度 θ 。共重复 10 次到 20 次。如果由于子弹的冲击使摆块的静止位置发生了变化, 则要重新调节, 但尽量使摆长不要发生变化。

(6) 求出多次实验得到的角度平均值 $\bar{\theta}$ 。用天平测出子弹和摆块的重力, 用米尺测出摆长 l , 代入公式 $v = \frac{2(M+m)}{m} \sqrt{gl} \sin \frac{\theta}{2}$, 便可以求出子弹的速度 v_0 。

注意 冲击摆的枪体一定要固定牢固, 在重复实验中尽量避免过大的振动。

分析 因为 $v = \frac{2(M+m)}{m} \sqrt{gl} \sin \frac{\theta}{2}$, 所以子弹速度的相对误差

$$\begin{aligned} E_v &= \left| \frac{2v}{2m} \right| \cdot \left| \frac{m}{v} \right| + \left| \frac{2v}{2M} \right| \cdot \frac{M}{v} + \left| \frac{2v}{2g} \right| \cdot \frac{g}{v} + \left| \frac{2v}{2l} \right| \cdot \frac{l}{v} + \left| \frac{2v}{2\theta} \right| \cdot \frac{\theta}{v} \\ &= \frac{M}{(M+m)m} \cdot \frac{m}{v} + \frac{1}{M+m} \cdot \frac{M}{v} + \frac{1}{2g} \cdot \frac{g}{v} + \frac{1}{2l} \cdot \frac{l}{v} + \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \cdot \frac{\theta}{v} \\ &= \frac{m \cdot M + M \cdot m}{m(M+m)} + \frac{1}{2} \left(\frac{g}{g} + \frac{l}{l} + \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \cdot \theta \right). \end{aligned}$$

由于用天平测量的 M 和 m 的误差 ΔM 和 Δm 是很小的, g 也可以很小, 因此

$$E_v = \frac{1}{2} \left(\frac{l}{l} + \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \cdot \theta \right).$$

从上式可看出实验结果的误差主要来源于 θ 的测量误差, 因此实验一定要多次重复, 以提高测量 θ 的精度。此外, 如果有可能的话适当

地增大 m 或减小 M 、 l 对减小实验结果的误差也是有利的。

方法二

原理 由于 $v = \frac{2(M+m)}{m} \sqrt{gl} \sin \frac{\theta}{2}$ (式中 m 、 M 分别代表子弹和冲击摆摆块的质量, l 代表摆长, θ 代表摆受到子弹冲击后偏转的最大角度), 所以有

$$\frac{1}{\sin(\theta/2)} = \frac{2\sqrt{gl}}{mv} \cdot M + \frac{2\sqrt{gl}}{v}。$$

这是一个 $y = kx + b$ 型的函数式, 其中 $x = M$, $y = \frac{1}{\sin(\theta/2)}$,
 $k = \frac{2\sqrt{gl}}{mv}$, $b = \frac{2\sqrt{gl}}{v}$ 。实验中改变摆块质量 M , 可以测得一系列不同的 θ 值。以横轴代表 M , 纵轴代表 $\frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}}$, 得到一条直线。如果该直线的截距为 b , 则子弹的速度 $v = 2\sqrt{gl} / b$ 。

器材 冲击摆, 物理天平, 砝码, 米尺, 小垫圈等。

操作

(1)、(2)、(3)、(4)、(5) 同方法一操作 (1)、(2)、(3)、(4)、(5)。
(6) 在摆块的腔体中放进若干个小垫圈 (例如 5 个), 用一小块泡沫海绵塞住腔体, 使垫圈尽量不要动。然后重复操作 (2)、(3)、(4)、(5)。共改变 7—9 次摆块的质量, 可得到 7—9 组 (M 、 θ) 值。

(7) 以横轴代表摆块的质量 M , 纵轴代表 $\frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}}$, 作出 $\frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} - M$ 图。

用图解法求出图线的斜率 k 和截距 b 。

(8) 用米尺测出摆长 l , 即可由公式 $v = 2\sqrt{gl} / b$ 求出子弹的速度 v 。

(9) 由 $m = b/k$ 求出子弹的质量 m 。用天平测出子弹的质量 m_0 , 比较 m 和 m_0 检验实验的准确性。

104

匀速圆周运动的投影是简谐振动

本实验是通过一种已经比较熟悉的运动形式来研究另一种比较复杂的运动形式。这是一种重要的思想方法。

方法一

器材 电唱机, 投影幻灯片, 小球, 细绳, 粘泥, 铁架台等。

操作

(1) 用粘泥做成一根 5cm 左右高的柱子, 将 1 个小球固定在电唱机的转盘上 (如图), 转速调成 33 转/分。



(2) 将铁架台放在电唱机边上, 上面用细绳悬挂小球制成一个单摆, 要求单摆的平衡位置正好在电唱机转轴的正上方。仔细地调节单摆的摆

长 l ，使它的周期为 $60/33s$ (l 约为 $82cm$)。

(3)用投影幻灯机将单摆投影到屏幕或墙上(单摆的运动方向应垂直于投影光线)，可见运动轨迹是一条近似的水平直线。同样用投影幻灯机将随电唱机唱盘运动的小球投影到屏幕或墙上，可见运动轨迹是一条直线。

(4)将单摆摆球拉离平衡位置，距离等于唱盘上小球运动的半径，使电唱机唱盘转动。当唱盘上小球投影到达最大位移时释放单摆小球，两小球的投影便会作完全同步的运动，说明匀速圆周运动的投影是简谐振动。

方法二

器材 电唱机，投影幻灯片，小球，钩码，细绳，粘泥，支架等。

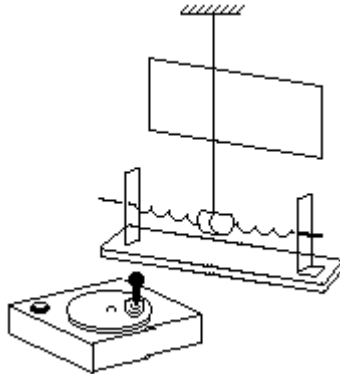
操作

(1)同方法一。

(2)用一根长尼龙线悬吊钩码，线上端固定在高处。钩码两端各连接一根弹簧，弹簧外端卡在支架上，使弹簧处于拉伸状态，构成一个可在水平面内作简谐振动的振子。

(3)如图所示放置仪器，使弹簧与屏幕或墙平行，将投影幻灯机放在 $2cm$ 以外，光束沿水平方向垂直照射屏幕，可将小球和振子都投影在屏幕上。转动电唱盘，使小球离屏幕最近(或最远)，然后调节电唱机的位置，使小球和静止的振子的投影重合。

(4)开动电唱机，可见小球的影子在屏幕上作往复运动。再使振子振动起来，并调节振子的振动周期(方法是改变卡在支架上的弹簧的位置，即改变弹簧的有效圈数，当有效圈数减少时，倔强系数增大；反之，则倔强系数减小)，使振子的周期和电唱盘转动的周期相同。



(5)用手将振子位到一侧适当的位置，使它在屏幕上的投影恰好与小球最大位移处的投影重合，然后在振子和小球的投影重合的一瞬间释放振子。可见到两个影子重合在一起振动，这表明匀速圆周运动的投影是简谐振动。

105

简谐振动的图象

运动离不开时间和空间。振动物体的位置按时间展开是振动图象；振动物体的位置按空间展开是波动图象。本实验的六种方法，都是将振动与一个匀速直线运动合成，达到将振动按时间展开的目的。

方法一

器材 马粪纸，细绳，细砂，薄板(长 $80cm$ ，宽 $25cm$)，铁架台等。

操作

(1)用马粪纸制成一个直径约8cm、深约10cm的圆锥形漏斗。在漏斗的连沿上钻三个洞，用细绳吊起如图所示。



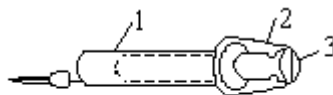
(2)用细绳将漏斗悬挂在铁架台上，构成一个摆，摆长40—50cm。

(3)在薄板的中央画一条与长边平行的中心线，漏斗中装满干燥的细砂后。让漏斗沿垂直于中心线的方向振动，振幅约为薄板宽度的1/3，从漏斗中漏下的砂在板上形成一条垂直于中心线的线。

(4)沿中心线的方向匀速拉动薄板，漏斗中漏下的砂就会在薄板上形成一条振动图线（正弦图线）。

方法二

器材 两种实验装置及所用器材见图(a)、图(b)所示。图(a)中1为底座，2为拖板（木质、长85cm、宽35cm、厚2cm左右），3为铁支架，4为挂钩，5为倔强系数是50N/m—120N/m的弹簧，6为喷水装置[详见图(b)]，7为铁球。



1. 针筒 2. 橡筋 3. 活塞

(b)

操作

(1)调整振动时喷嘴的稳定指向，使喷嘴在振动过程中始终垂直指向拖板。

(2)在针筒中装进红色水后，用橡筋拉动活塞将红水射出，然后让弹簧振子振动起来。

(3)待振动稳定后，尽量匀速地拉动拖板，红水便会在拖板上画出振动图线（正弦曲线）。

方法三

器材 单摆运动规律演示器，脉冲高压电源，低压电源等。

操作

(1)将实验器材如图所示安装好。脉冲高压电源的两根输出线分别接在细金属悬线的端头和底座上。

(2)接通电源，使脉冲高压源开始工作，脉冲频率选用50Hz一档。

(3)让单摆振动起来（振动方向与纸带走动方向垂直）然后按下脉冲高压源的高压输出按钮，由于两输出线输出15KV或25KV的高压脉冲，因此摆球上的针尖就和底板之间开始放电。

(4)用低压电源给小电机供电，小电机通过皮带带动从动轮转动从而使纸带匀速向前运动，电火花便在纸上打出一系列点子，构成单摆的振动图象。

注意 高压脉冲电压很高，通电后不得靠近或接触有电部分，以免触电。

方法四

器材 氦氖激光器，由小电动机带动的六角旋转镜，低压电源，滑动变阻器（50 Ω ，1.5A），废钢锯条，小平面镜，铁座，导线等。

操作

(1)将钢锯条下端固定在铁座上，上端固定一小块小平面镜。

(2)按图安装好仪器，使激光器射出的光，先水平射到钢锯条上端的小平面镜上，然后反射到旋转镜上，最后反射到白屏上。

(3)将小电机与变阻器串联后接到低压直流电源上，改变滑动变阻器的阻值，可调节电动机的转速。

(4)使钢锯条静止，接通电动机电源，使旋转镜转动。调节旋转镜的位置，使白屏上的光点沿水平方向扫描。

(5)断开电动机电源，使锯条振动起来（振幅不要太大）。调节锯条的位置，使白屏上的光点沿竖直方向上下振动。

(6)接通电动机电源，同时使锯条振动，可见到屏上出现不稳定的曲线。移动滑动变阻器的触头，调节旋转镜转动的速度，直至屏上出现一个稳定的正弦波曲线，即锯条的振动图线。

(7)继续调慢旋转镜的转速，使白屏上出现二个、三个完整的正弦曲线。

方法五

原理 压电陶瓷片由于压电效应而产生的电压正比于它所受的作用力（弹簧的弹力），而在简谐振动中，这个弹力又与振动物体偏离平衡位置的位移成正比，因此振动物体的位移可用压电陶瓷片产生的电压来表示。即示波器显示的电压-时间图可代表振动物体的位移-时间图。

器材 气垫导轨，气源，示波器，压电陶瓷片，厚塑料硬板，弹簧，导线等。

操作

(1)如图(a)所示，在硬塑料板上挖一个圆孔，孔径D要比压电陶瓷片的铜基片直径小2mm，然后用胶水把压电陶瓷片的铜基正对着圆孔粘在硬塑料板上。

(2)用小功率的电烙铁（20W），从压电陶瓷片上涂银的表面和铜基片上各焊出一根多股软线a和b，并将弹簧的一端垂直地焊在铜基片背面中心。

(3)按图(b)安装仪器，将粘有压电陶瓷片的塑料板固定在气垫导轨的一端。陶瓷片的引线a接到示波器的y输入端，铜基的引线b接到示波器的地。铜基片上所焊弹簧的另一端与滑块连接。

(4)将示波器的扫描频率置于“10—100”档，y衰减旋钮置于“1/10”或“1”档，输入耦合开关置于“DC”档。

(5)接通气源，让滑块在导轨上作简谐振动。调节示波器的有关旋钮，荧光屏上可出现稳定的正弦曲线，即滑块的振动图线。

方法六

器材 高阻抗耳机（800—2000 Ω ），带共鸣箱音叉，示波器，橡皮

锤，铁架台等。

操作

(1)将耳机的盖和振动膜片取下，并稳定地夹持在铁架台上，两根引出线分别接到示波器的“y 输入”和“地”端。

(2)将示波器的输入耦合开关置于“AC”位置，y 衰减旋钮置于“1/10”档，扫描范围旋钮置于“100—1000Hz”档。

(3)把音叉的一臂正对耳机。用橡皮锤敲击音叉使其振动，然后将音叉尽量移近耳机内的永磁体（不能接触）。调节示波器的有关旋钮，在荧光屏上看到一个稳定的近似正弦曲线，可认为是音叉的振动图线。

106

测定弹簧振子的周期

周期是一个时间量。测量时间量的相对误差 $E = \Delta t / t$ ，所以提高测量周期的精密度有两个途径：增大 t 和减小 Δt 。方法一采用增大 t 的方法，其主要是积累法，即测量多个周期 T 之和。方法二、三采用减小 Δt 的方法。如果是人工计时，计时的精密度主要取决于计时工具和计时操作水平；如果采用自动计时，则完全依靠计时工具。方法二、三，采用的光电计时，就是一种常用的自动计时方法。方法四是在自动计时的基础上再加以积累法，进一步提高计时精密度。

方法一

器材 弹簧，钩码，秒表，铁架台等。

操作

(1)将弹簧的一端固定在铁架台上，另一端挂上一只钩码。铁架台的竖杆上装上一个标志物，高度与静止的钩码相同。

(2)将钩码向下拉适当的距离后释放。待振动达到稳定状态后，在钩码某一次经过标志物时按动秒表开始计时。经过 n 个全振动后停止秒表计时。如果秒表的读数为 t ，则弹簧振子的周期 $T = t/n$ 。

分析 n 的具体数目可根据测量要求及秒表精度，实验人员的计时水平来确定。例如在某次实验中，要求测量周期的相对误差 E_t 小于 0.5%，实验人员开表和停表的误差不大于 0.2s，则由于开、停表可能带来的最大误差 $\Delta t = (0.2 + 0.2)s = 0.4s$ ，那么 $n = \Delta t / E_t = 0.4 / 0.5\% = 80s$ 。如果周期约为 0.8s，则 n 不小于 $80 / 0.8 = 100$ （次）。

方法二

器材 气垫导轨，气源，数字毫秒计（J0201-2 型）等。

操作

(1)将气垫导轨放在水平桌面上，滑块两端各连一根弹簧，弹簧的另一端固定在导轨的两端，构成一个弹簧振子（如图）。

(2)滑块上放上挡光条，接通气源，让滑块静止后，将 1 个光电门放在滑块的平衡位置处，使挡光条正好遮挡光束，另一个光电门放在桌上不用。

(3)将数字毫秒计的计时功能开关置于“T”档，时间选择开关置于适当位置（根据弹簧振子的周期决定）。

(4)将滑块拉离平衡位置后释放，弹簧振子完成 1 个全振动后，数字毫秒计即显示振动的周期。

(5)重复测量几个周期，取平均值作为振子周期的测量值。

注意 因为实验中的振动总是减幅的，因此光电门一定要放在振子的平衡位置处，否则测出来的周期会产生误差。

方法三

器材 气垫导轨，气源，数字毫秒计，自制长条挡光片。

操作

(1)将气垫导轨放在水平桌面上。滑块两端分别用一根弹簧连接到导轨两端。

(2)接通气源，让滑块静止后将一个光电门放在滑块的平衡位置处，另一光电门放在桌上不用。

(3)用薄型塑料片自制一挡光条（长约 20cm，宽约 2cm），装在滑块上（如图）。

(4)将数字毫秒计的计时功能开关置于 s_2 档，时间选择开关置于适当位置（根据弹簧振子的周期决定）。

(5)将滑块向右拉开约 15cm 后释放。当挡光条的左沿遮断光束后毫秒计开始计时，滑块运动到最左端，挡光条仍然遮断光束。当滑块向右越过平衡位置时，挡光条退出光电门，直到挡光条的左沿再次遮断光束，毫秒计才停止计时，记下的便是振子的周期。

(6)重复测量 n 次，取平均值作为振子周期的测量值。

注意

(1)同方法二。

(2)遮光条要尽量轻一些，因为它左右不均衡，看了容易增大滑块与导轨之间的摩擦力。

方法四

原理 数字毫秒计的光电传感系统的原理可用图(a)来说明：A、B 是两个光敏三极管，有光照射时显低阻；无光照射时显高阻。两个光电门都有光照射，C 点是高电平。两个光电门中的任意一个无光照射，C 点便是低电平。C 点输出的信号控制毫秒计开始或停止计时。如果在光敏管的两端并按一个开关 K，当 K 打开时，光敏管正常工作；当 K 合上时，光敏两端短路，相当于一直有光照射。

器材 气垫导轨，数字毫秒计，按钮开关等。

操作

(1)将气垫导轨放在水平桌面上，滑块两端分别用一根弹簧连接到导轨两端。

(2)接通气源，待滑块静止后，将 1 个光电门放在滑块的平衡位置处，另一个光电门放在桌上不用。在滑块上装上最窄的一种挡光条（如方法二图）。

(3)在导轨上的一个光电门的光敏管两端并接上一个按钮开关。数字毫秒计的计时功能开关置于 s_2 档，时间选择置于适当位置。

(4)将滑块向右拉开适当距离后释放，当滑块向左越过光电门时，毫秒计开始计时，然后即按下（合上）按钮开关。经过若干周期之后当滑块再次滑到光电门右边时放开按钮开关，毫秒计即记下 n 个周期的时间 t 。弹簧振子的周期 $T=t/n$ 。

注意 同方法二。

本实验主要研究弹簧振子的周期与振动的平衡位置、振动的振幅、振子的质量、弹簧的倔强系数等因素是否有关。在研究过程中，测量周期的方法可选用实验 106 中任何一种方法。

器材 气垫导轨，数字毫秒计，天平，砝码等。

操作

一、周期与平衡位置的关系

(1) 将气垫导轨放在水平桌面上，滑块两端分别用一根弹簧连接到导轨的两端，构成一个弹簧振子（如图 a）。

(2) 测出水平弹簧振子的振动周期 T_1 ，并记下振子的平衡位置。

(3) 将导轨的一端垫高，可看到振子的平衡位置发生了变化。再测出倾斜弹簧振子的振动周期 T_2 ，可发现 $T_1 = T_2$ ，说明弹簧振子的振动周期与它的平衡位置无关。

二、周期与振幅的关系

将水平弹簧振子从平衡位置拉开 40cm 后释放，随着振子的自然减幅，不断地读出振动的周期。可看到直至振幅减小到 10cm 左右，振动周期基本不变，说明弹簧振子的周期与它的振幅无关。

三、周期与振子质量的关系

(1) 用天平称出振子（即滑块）的质量 m ，并测出弹簧振子振动的周期 T 。

(2) 用气垫导轨配件中的加重块改变滑块的质量 m ，并重复操作(1)。共重复 7—9 次，得到 7—9 组 (m, T) 值。

(3) 以横轴代表滑块质量 m ，纵轴代表周期 T ，作出 $T-m$ 图。

(4) 将 $T-m$ 曲线与基础篇第 50、51 页中的各种图线对照，估计是 $y^2 = kx$ 图线。再作 $T - \sqrt{m}$ 图线，如果得一直线，可说明周期 T 与振子质量的平方根 \sqrt{m} 成正比。

四、周期与弹簧倔强系数的关系

(1) 测定弹簧振子的振动周期 T 。

(2) 在一块塑料片中间开一条窄缝（图 b）。将塑料片卡在导轨的弹簧上（图 c），改变弹簧的倔强系数 K （改变了弹簧的有效长度），重复操作(1)。共重复 7—9 次，得到 7—9 组 (K, T) 值。

(3) 从所得数据很容易看出 T 和 K 是负相关的。因此先作 $T-1/K$ 图（以横轴代表倔强系数的倒数 $1/K$ ，纵轴代表周期 T ）。将 $T-1/K$ 曲线与基础篇第 50、51 页中各种图线对照，估计是 $y^2 = kx$ 图。再作

$T - \sqrt{1/K}$ 图线，如果得一直线，可说明周期 T 与弹簧倔强系数倒数的平方根 $\sqrt{1/K}$ 成正比。

说明 如果图(c)中薄板左边弹簧的匝数是整根弹簧匝数的 $1/n$ ，整根弹簧的倔强系数是 K_0 ，则左边弹簧的等效倔强系数 $K = nK_0$ 。为了使计算方便，实验中滑块两边的弹簧改变的比例一定要相同。

实例

一、周期 T 与平衡位置无关

当导轨水平时， $T = 1.994s$ ；将导轨一端垫高 6cm，振子的平衡位置移动了约 3.8cm，周期 $T = 1.996s$ ；将导轨一端垫高了 10cm，振子的平衡位置移动了约 6.3cm，周期 $T = 1.995s$ ，说明周期与平衡位置无关。

二、周期 T 与振幅 A 无关

实验数据如下：

周期 T (s)	振幅 A (m)
1.994	0.404
1.994	0.366
1.996	0.314
1.996	0.265
1.997	0.235
1.992	0.198
1.992	0.177
1.997	0.144
1.998	0.109

说明弹簧振子周期 T 与振幅 A 无关。

三、周期 T 与振子质量 m 的关系

实验数据如下：

周期 T (s)	振子质量 m (g)	\sqrt{m}
1.255	100.0	10.00
1.404	125.0	11.18
1.783	200.0	14.14
1.891	225.6	15.02
1.994	250.9	15.84
2.092	276.5	16.63
2.174	301.9	17.38
2.270	327.3	18.09
2.369	352.6	18.78
2.458	378.1	19.44

作 T - m 图 (图d)，估计 T 与 m 成 $T^2 = km$ 的关系，因此再作 T - \sqrt{m} 图 (图e)，得到一条过原点的直线，说明 T 与 \sqrt{m} 成正比。

四、周期 T 与弹簧的倔强系数 K 的关系

实验数据如下：

周期 T(s)	倔强系数 K(N/m)	1/K(m/N)	$\sqrt{1/K}$
1.994	2.268	0.4409	0.6640
1.890	2.520	0.3968	0.6299
1.781	2.835	0.3527	0.5939
1.673	3.240	0.3086	0.5555
1.544	3.780	0.2645	0.5143
1.415	4.536	0.2204	0.4695
1.270	5.670	0.1764	0.4200
1.106	7.560	0.1323	0.3637
0.911	11.34	0.0881	0.2969

作 $T-1/K$ 图(图f),估计 T 与 $1/K$ 成 $T^2 = k(1/K)$ 的关系,因此再作 $T-\sqrt{1/K}$ 图(图g),得到一条过原点的直线,说明 T 与 $\sqrt{1/K}$ 成正比。

弹簧振子振动过程中能量的转换

108

器材 气垫导轨,气源,数字毫秒计,弹簧秤,天平,砝码等。

操作

(1)将气垫导轨放在水平桌面上,接通气源后,分两步将导轨调整到水平(具体方法见实验63方法四)。

(2)滑块上装上最窄的一种挡光框,用天平测出滑块的质量 m 。

(3)滑块两端各用一根弹簧连接到导轨两端,构成一个弹簧振子(如图a)。

(4)数字毫秒计的计时器功能开关置 s_2 档,时间选择开关置最小的一档。将一个光电门放在导轨上,另一个放在桌上不用。

(5)分别将光电门放在滑块的平衡位置,及平衡位置两边各5cm、10cm、15cm、20cm、25cm处,每次都把滑块拉到导轨单脚离平衡位置30cm处由静止释放。如果毫秒计记下的时间是 t ,滑块上挡光框两前沿之间的距离是 d ,则滑块经过光电门时的速度 $v=d/t$ 。

(6)通过弹簧秤将振子拉离平衡位置 x ,读出弹簧秤的读数 F 。使 x 分别为5cm、10cm、15cm、20cm、25cm、30cm、35cm,可得到7组(x, F)值。

(7)以横轴代表 x ,纵轴代表 F ,作 $F-x$ 图,得到一根直线,用图解法求出直线的斜率,即弹簧组的倔强系数 K 。

(8)以横轴代表滑块偏离平衡位置的位移 x (设定一个方向为正,另一个方向为负),纵轴表示弹簧振子的动能 $E_K = \frac{1}{2}mv^2$ 和弹性势能

$E_P = \frac{1}{2}Kx^2$,在一张图上作出 E_K-x 和 E_P-x 两根曲线。

(9)在 x 轴上等间距地选一些点(不一定是原来的数据点),从图线上读出这些点上的 E_K 值和 E_P 值,并求出弹簧振子的机械能 $E=E_K+E_P$ 。如果各点的 E 值在误差范围内相等,可说明弹簧振子振动过程中机械能守恒。

实例 某次实验中测得弹簧组的倔强系数 $K=3.50\text{N/m}$,并得到下列实验数据:挡光框宽度 $d=1.00\text{cm}$,滑块质量 $m=0.525\text{kg}$ 。作出 E_P-x 图(图b),从图上读出 $E=E_P+E_K$ 的值,从 $x=-30\text{cm}$ 开始,每隔 2.5cm 处的 E 值如下:

测量点标尺 读数(cm)	x(cm)	t(ms)	v=d/t(m/s)	$E_p = \frac{1}{2}Kx^2$ (J)	
90.0	-30.0	—	—	0.158	0.000
85.0	-25.0	23.5	0.431	0.109	0.049
80.0	-20.0	17.4	0.578	0.070	0.088
75.0	-15.0	15.2	0.661	0.039	0.115
70.0	-10.0	13.9	0.723	0.018	0.137
65.0	-5.0	13.4	0.750	0.004	0.148
60.0	0.0	13.2	0.761	0.000	0.152
55.0	5.0	13.4	0.750	0.004	0.148
50.0	10.0	13.9	0.723	0.018	0.137
45.0	15.0	15.2	0.661	0.039	0.115
40.0	20.0	17.7	0.568	0.070	0.085
35.0	25.0	23.8	0.422	0.109	0.047
30.0	30.0	—	—	0.158	0.000

机械能的相对误差为 1%，可认为在误差范围内各点的机械能相等，即弹簧振子在振动过程中机械能守恒，如下表：

x(cm)	-30.0	-27.5	-25.0	-22.5	-20.0	-17.5	-15.0	-12.5	
E_p (J)	0.158	0.130	0.109	0.087	0.070	0.053	0.039	0.027	
E_K (J)	0.000	0.026	0.049	0.067	0.088	0.101	0.115	0.128	
E_p+E_K (J)	0.158	0.156	0.158	0.154	0.158	0.154	0.154	0.155	
x(cm)	-10.0	-7.5	-5.0	-2.5	0.0	2.5	5.0	7.5	
E_p (J)	0.018	0.009	0.004	0.001	0.000	0.001	0.004	0.010	
E_K (J)	0.137	0.144	0.148	0.152	0.152	0.151	0.148	0.143	
E_p+E_K (J)	0.155	0.153	0.152	0.153	0.152	0.152	0.152	0.153	
x(cm)	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	30.0
E_p (J)	0.018	0.027	0.039	0.052	0.070	0.088	0.109	0.131	0.158
E_K (J)	0.137	0.128	0.115	0.101	0.085	0.065	0.047	0.024	0.000
E_p+E_K (J)	0.155	0.155	0.154	0.153	0.155	0.153	0.156	0.155	0.158

器材 气垫导轨，气源，四路数字计时器等。

操作

(1) 将气垫导轨放在水平桌面上，接通气源后，分两步将导轨调整到水平[具体方法见实验 63 方法四]。

(2) 滑块两端各用一根弹簧连接到导轨两端，构成一个弹簧振子。滑块上装一片最窄的挡光框（见实验 106 方法二图）。

(3) 将四路数字计时器的功能开关置“2”档，时基选择用 0.1ms 档。两个光电门 G_1 和 G_2 分别与插孔 1、2 连接。当滑块依次通过光电门 G_1 和 G_2 时，显示屏 I、II 分别显示出滑块通过光电门 G_1 、 G_2 时的挡光时间

t_1 和 t_2 ，显示屏 III 显示滑块从 G_1 到 G_2 的时间 t ，即可算出滑块在 G_1 和 G_2 之间运动的平均加速度。如果挡光框两前沿之间的距离是 d ，则平均加速度 $a=(v_2-v_1)/t=(d/t_2-d/t_1)/t$ 。

(4) 从弹簧振子的平衡位置开始，向单脚端方向每隔一定的距离确定一个测量点，共确定 6—7 个测量点。

(5) 以某一个测量点为中心，两边等距离地放置两个光电门 G_1 和 G_2 。将滑块拉到单脚端（图中右端）在所有测量点之外的某一处，由静止释放，当滑块越过 G_1 和 G_2 时，算出滑块在 G_1 和 G_2 之间的平均加速度，可近似地作为该测量点的即时加速度。

(6) 将光电门移到另一个测量点两侧，重复操作(5)（应注意每次释放滑块的位置不能变），直至所有测量点都测量完毕。

(7) 以横轴代表测量点偏离平衡位置的位移 x ，纵轴代表滑块的加速度 a ，作 $a-x$ 图，如果得到一根过原点的直线，即可说明 a 与 x 成正比。

注意 用光电门 G_1 和 G_2 之间的平均加速度作为 G_1 和 G_2 的中点的即时加速度是近似的，因此两个光电门要适当靠近一些。

测量弹簧的强系数和等效质量

110

原理 将一个质量为 m 的物体挂在一个倔强系数为 K 的弹簧下面，如果不弹簧的质量和空气阻力，振动的周期 $T = 2\pi\sqrt{m/K}$ 。如果考虑弹簧的等效质量是 m_0 。则振动的周期为 $T = 2\pi\sqrt{(m+m_0)/K}$ ，即

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{K} m + \frac{4\pi^2}{K} m_0。$$

本实验中改变 m ，测得一系列不同的 T ，然后作出 T^2-m 图线。如果图线的斜率是 k ，截距是 b ，则弹簧的倔强系数 $K=4\pi^2/k$ ，弹簧的等效质量 $m_0=b/k$ 。

器材 弹簧，秒表，天平，砝码，小盘，铁架台等。

操作

(1) 用天平测量小盘的质量 m_1 。

(2) 将弹簧的一端固定在铁架台上，另一端挂一只小盘，铁架台的竖杆上固定一个可以上下移动的标志物，作为记时的标志（图 a）。

(3) 在小盘中加上质量为 m_2 的砝码，使小盘静止。将标志物移到小盘的高度上。

使小盘振动起来，当小盘经过标志物旁时开始计时。测量出小盘振动 n 个周期的时间 t ，则周期 $T=t/n$ 。重复两次，求出周期的平均值。

(5) 改变小盘中的砝码质量 m_2 ，重复操作(3)、(4)。共重复 7—9 次，可得到若干组 (m, T) 值 ($m=m_1+m_2$)

(6) 以横轴代表 m ，纵轴代表 T^2 ，作 T^2-m 图。

(7) 用图解法求出直线的斜率 k 和截距 b ，即可求得弹簧的倔强系数 $K=4\pi^2/k$ ，弹簧的等效质量 $m_0=b/k$ 。

实例 某次实验得到下列数据。

$m(10^{-3}\text{kg})$	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00
$T(\text{s})$	$\frac{40.5}{50.0}$	$\frac{42.7}{50.0}$	$\frac{44.8}{50.0}$	$\frac{46.8}{50.0}$	$\frac{48.5}{50.0}$	$\frac{50.4}{50.0}$	$\frac{52.1}{50.0}$
$T^2(\text{s}^2)$	0.656	0.729	0.803	0.876	0.941	1.016	1.086

以横轴代表 m ，纵轴代表 T^2 ，作出 T^2 - m 图（图 b）。在图线上取两点 $p_1(3.10, 0.70)$ 和 $p_2(27.35, 1.05)$ 求出图线的斜率和截距。

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{1.05 - 0.70}{(27.35 - 3.10) \times 10^{-3}} = 14.4,$$

$$b = 0.656,$$

$$K = 4 \cdot 2/k = 2.74 \text{ N/m},$$

$$m_0 = b/k = 0.656/14.4 = 0.0456 \text{ (kg)}.$$

弹簧下面挂的片码钩的质量是 0.0426kg，所以弹簧的等效质量是 3.00g（弹簧的质量是 9.6g）。

单摆的周期

111

单摆的物理模型是在一根没有质量的细绳下面悬挂一个没有体积的重物，这样一个单摆当摆角趋向零时作简谐振动。但是实验中的单摆不可能完全符合单摆模型的要求，下面简单说明各种不符合因素对单摆周期的影响。

由振动的微分方程的二级近似解，再考虑到摆球和悬线的转动惯量以及空气的浮力和阻力，对实验中测得的周期 T 可有下列关系

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{1}{g} \left(1 + \frac{2r^2}{5l^2} - \frac{1m_0}{6m} + \frac{1}{8}\theta^2 + \frac{8\rho_0}{5\rho} \right).$$

式中 l 是摆长， r 、 m 是摆球半径和质量， m_0 是悬线质量， θ 是摆角， ρ_0 是空气密度， ρ 是摆球密度。如果要求实验中 T^2 的误差不大于 0.5%，只要上式括号中后面四项都不大于 0.1% 即可。

$$\begin{aligned} \frac{2r^2}{5l^2} & 0.1\%, & r & 0.05l; \\ \frac{1m_0}{6m} & 0.1\%, & m_0 & 0.006m; \\ \frac{1}{8}\theta^2 & 0.1\%, & \theta & 5.13^\circ; \\ \frac{8\rho_0}{5\rho} & 0.1\%, & \rho & 1.9\text{g/cm}^3. \end{aligned}$$

实验中可参照以上要求制作单摆和进行实验。如果在实验中有几项很小，则他项还可适当放大。

方法一

器材 单摆，秒表，铁架台，米尺，游标卡尺，小平面镜等。

操作

(1) 用游标卡尺测出摆球的直径 D （读到 0.1mm 即可）。

(2) 将单摆的摆绳上端固定在铁架台上。让摆球静止后用米尺测量摆绳的长度 l （也读到 0.1mm）。

(3) 当单摆静止时，在靠近摆绳处投置一块小平面镜，镜面平行于单

摆摆动的平面。在镜面中间用黑墨水笔画一条竖直的线（如图），作为标志线。

(4)将摆球拉离平衡位置后释放，先让单摆摆动几个周期渐趋稳定，然后当摆线越过标志时启动秒表，等单摆完成几次全振动后摆线再次越过标志时停止秒表。如果秒表读数是 t ，单摆的周期就是 $T=t/n$ 。

注意

(1)当摆线经过镜子前面时，可看到三条线：摆线、镜子上的墨线及摆线在镜子中的像。当这三条线重合时可作为摆线越过标志线的时刻。

(2)当启动秒表时应数“0”，而不能数“1”，否则容易少记一个周期。

分析 n 的大小可由测量周期的精度要求或有效数字位数来确定。设启动与停止秒表各可能产生 0.2s 的误差，那么 $t=(0.2+0.2)\text{s}=0.4\text{s}$ 。如果要求测量相对误差不大于 0.5% 则 $t = t/E_t = 0.4/0.5\% = 80\text{s}$ ，在周期约为 2s 的情况下，要求 $n > 40$ 。如果要求有四位有效数字，则 $t = 100.0\text{s} \times 4 = 400.0\text{s}$ ，要求 $n > 200$ 。

建议 在一些要求较高的实验中，为了提高测量周期的准确度，需要 $n > 1000$ 。要数 1000 个以上的振动，得花上半个多小时，这是一件十分乏味而又疲劳的工作，常常容易数错。为解决好这个问题，我们可以在实验中采用“渐近法”。先测量 100 个全振动所需的时间 $100T$ ，这段时间要尽量测得准确。将此测量结构作为第一个“预测时间”。然后正式开始测量周期，这时只须注视秒表，不必数振动次数，当秒表的读数最接近第一个“预测时间”时，在不停表的情况下，读出若干个全振动的的时间（可以相信单摆振动了 100 次），这时间作为第一个“实测时间”。将第一个“预测时间”和第一个“实测时间”相加，作为第二个“预测时间”，再实测出最接近第二个“预测时间”的第二个“实测时间”（单摆振动 200 次的时间）。将第一个预测时间和第二个“实测时间”相加，作为第三个“预测时间”，以此类推，将任何一次的实测时间加上第一个“预测时间”，作为下一个“预测时间”，直至到达最接近完成 1000 个全振动的“预测时间”时撤停秒表。将秒表的读数除以 1000 ，就是单摆的振动周期。在上述实验过程中，开表和停表要尽量准确，确保记下的时间是若干个全振动的的时间，而中间观察的时间只起检核和代替计数的作用，而且又是在不停表的情况下读出，因此允许有 $\pm 0.5\text{s}$ 的误差。必须注意，这种方法不可以从第一个“预测时间”直接算出 1000 个全振动的“预测时间”，这样有可能因第一个“预测时间”的误差而使最后结果相差一个全振动。

实例 某次实验的测量数据如下：

序号	振动次数	预测时间	实测时间	停表时间
0	0			0 00.0
1	100	3 17.6	3 18	
2	200	6 35.6	6 35.5	
3	300	9 53.1	9 53.5	
4	400	13 11.1	13 11	
5	500	16 28.6	16 29	
6	600	19 46.6	19 47	
7	700	23 4.6	23 4.5	
8	800	26 22.1	26 22.5	
9	900	29 40.1	29 40.5	
10	1000	32 58.1		32 58.1

$$\text{测量结果 } T = t / n = \frac{32'58.1''}{1000} \text{ s} = 1.9781 \text{ s}.$$

如果单从第一个“预测时间”3 17.6 直接算出 1000 个全振动的“预测时间”是 32 56，结果是误将 999 个全振动的时间当作 1000 个全振动的时间，会产生较大的误差。

方法二

器材 单摆，节拍器，小平面镜，数字毫秒计（或秒表），铁架台等。

操作

(1)用数字毫秒计或秒表测出节拍器的周期 T 。测量完毕之后，节拍器的频率控制旋钮不能再动。

(2)将单摆悬挂在铁架台上。在铁架台上固定一块小平面镜，画出标志线[具体方法见方法一，操作(3)]

(3)将摆球拉离平衡位置后释放，使单摆振动起来。边观察单摆的振动情况，边听节拍器的声音，发现某次节拍器响时摆线正好越过标志线（此种情况可称为“同步”），此时开始计数，直至下一次“同步”为止。如果在此过程中单摆摆了 n 次，节拍器响了 $n+1$ 次（或 $n-1$ 次），则

$$\text{单摆的周期 } T = \frac{n+1}{n} T \quad (\text{或 } T = \frac{n-1}{n} T).$$

注意

(1)此实验中 T 和 T 不能差得太大，否则可能长时间内找不到“同步”的情况。

(2)在实验中要注意观察，有时在两次“同步”之间，单摆振动的次数与节拍器响的次数之差可能不是一次，而是二次、三次或更多次。

说明 这种方法适用于实验室里没有足够多的计时仪器，所有实验者可共用一个节拍器。

方法三

器材 单摆，数字毫秒计，铁架台等。

操作

(1)根据实验 106 方法四中的方法改装数字毫秒计的光电系统(在光电管的两端并联一个开关 K)。

(2)在单摆的线上套一段长 15mm、粗 1—2mm 的塑料管,将单摆和改装好的光电门都固定在铁架台上,摆线上的塑料套管调到与光电门等高(如图)。

(3)将数字毫秒计的功能开关置于 s_2 档,时间选择开关置于“10ms”档,与光电门接通。(另一个光电门接通后放在桌上不用)

(4)闭合 K 后将毫秒计清零,使单摆振动起来。等单摆的振动稳定之后,挑选摆线某一次越过光电门之前断开 K,摆线第一次越过光电门时毫秒计即开始计时。摆线越过光电门后立刻闭合 K,使摆线第二次(与第一次反向)越过光电门时的遮光不起作用。在摆线第三次(与第一次同向)越过光电门之前再打开,使摆线第三次越过电门时毫秒计停止计时。毫秒计即显示出一个周期的时间。

(5)重复操作(4),测量出几个周期值。取它们的平均值,作为测量周期的结果。

注意

(1)光电门一定要放在单摆的平衡位置上,即当单摆静止时,摆线上的塑料管正好遮断光电门的光线,否则在测量中当单摆的振幅逐渐减小时,测出的周期将产生误差。

(2)用上述实验方法测出的周期误差不会大于 20ms(不考虑毫秒计的系统误差)。为了进一步提高测量精度,可将测量一个周期改为测量几个甚至 10 个以上的周期,只要适当地控制 K 打开的时机即可。如果测量 10 个周期的时间,就可以将测量误差减小到 2ms。

(3)当毫秒计停止计时后要抓住摆球或再次闭合 K,使振动周期值保留在显示屏上,否则毫秒计会再次开始计时。

(4)有一些功能更加齐全的数字毫秒计(如 J0201-2 型)具有测量周期 T 的功能。将毫秒计的功能开关置于“T”档,让单摆振动起来。等单摆振动稳定后,按一下复位按钮,摆线三次遮光之后,就可以测出一个周期。由于 J0201-2 型数字毫秒计的“T”档不能自锁,当测出一个振动周期后,如果单摆继续振动,第二个、第三个……振动周期会累加上去,然后可以求出周期的平均值。但是用这种方法减少误差的效果不如注意(2)中的方法好,因为毫秒计多次地开、停,必然无法减小毫秒计开、停带来的系统误差。

112 研究单摆的周期与摆长的关系

本实验研究单摆的周期与它的摆长有什么关系,实验时可用实验 111 中的任何一个方法测量单摆的周期。

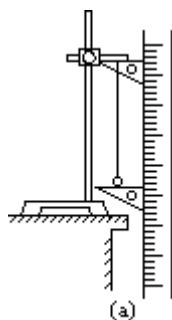
器材 单摆,秒表(或毫秒计),米尺,三角尺,游标卡尺,铁架台等。

操作

(1)用游标卡尺测量出摆球的直径 D(估读到 0.1mm 即可),然后将单摆固定在铁架台上。

(2)用米尺和三角尺测量出单摆的悬点到摆球最低点之间的距离 s(如

图 a),单摆的摆长 $l = s - \frac{D}{2}$ 。



(3)用适当的方法测量出单摆的周期 T 。

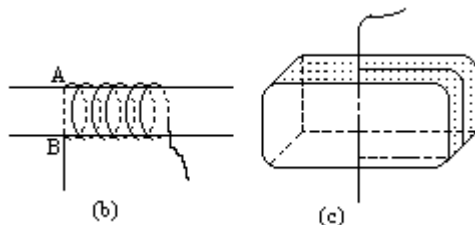
(4)改变单摆的摆长 l ，重复操作(2)、(3)，测量另一组 (l, T) 的值，共要测出 7—9 组 (l, T) 值。

(5)以横轴代表单摆的摆长 l ，纵轴代表单摆的周期 T ，作出 $T-l$ 图，得到一条曲线。

(6)将 $T-l$ 图线与基础篇第 50、51 页中的各种关系图线比较，可初步确定是 $T^2=kl$ 的关系，因此再作 T^2-l 图，如果得到一条直线，即可得知单摆的周期与摆长的平方根成正比。

注意 本实验中要多次地改变单摆的摆长，因此要设计一种既能方便地改变摆长，又能确保单摆在摆动过程中摆长不发生变化的装置，下面介绍两种方法。

(1)取一根直径 0.6—0.8cm 的金属管，用细钻头在上面打两个对穿孔 A、B，把单摆悬线穿过对穿孔，多余部分绕在金属管上固定(图 b)。将金属杆水平固定在铁架台上(A、B 两孔要在竖直线上)，改变摆长只要在对穿孔中拉动悬线再固定即可。



(2)取一块橡皮(3cm × 2cm × 1cm)，用锋利的剃须刀在中间切开一条，把单摆的悬线夹在里面(图 c)，然后将橡皮块放在铁架台的夹具里面夹紧，悬线即不会滑动。改变摆长只要松开夹具，拉动悬线即可。

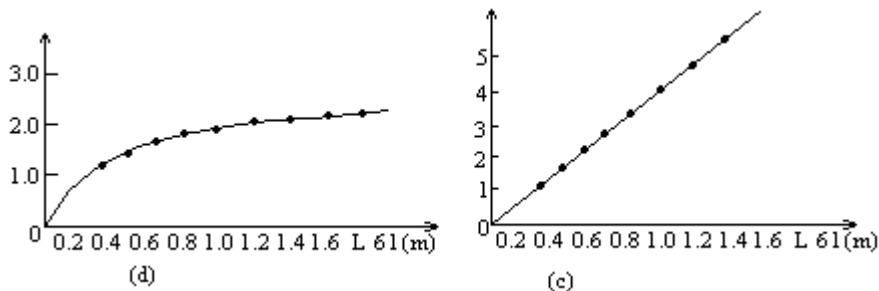
实例 某次实验中得到如下数据：

$l(\text{m})$	0.302	0.428	0.561	0.669	0.810	0.981	1.120	1.288	1.401
$T(\text{s})$	1.10	1.31	1.50	1.64	1.81	1.99	2.12	2.28	2.37
$T^2(\text{s}^2)$	1.21	1.72	2.25	2.69	3.28	3.96	4.49	5.20	5.62

作出 $T-l$ 图(图 d)，与各种函数的图象比较，估计是 T^2-l 的关系。

再作 T^2-l 图(图 e)，得到一条过原点的直线。说明 T 与 \sqrt{l} 成正比。

用线性回归法，可知 T^2 与 l 的相关系数达 0.9997，大于线性关系显著的标准 0.798。



113

单摆的周期与重力加速度有关

本实验模拟出一种改变重力加速度的情况。方法一只能模拟重力加速度增大的情况，方法二可以模拟重力加速度增大和减小两种情况。

方法一

器材 单摆运动规律演示器(J2210型),简式数字计时器(J0202-3型)等。

操作

(1)将单摆运动规律演示器固定在桌边,调节立杆成竖直方向。将光电门安装在立杆上适当的高度,使套在竖直静止的摆线上的塑料套管恰好能挡住光电门发光管发出的光线(如图)。

(2)接通J0202-3型数字计时器的电源,仪器背面的数字显示屏就自动显示“000”,同时发出连续的蜂鸣声。将光电门导线的插头插入计时器正面的光控插座,蜂鸣声停止,表示计时器进入工作状态。

(3)将计时器正面的功能开关置于“T”档,时间选择开关拨到1/10s档。拨动周期数预置开关的旋钮到“8”,按一下置零按钮,计时器背面右下角的小数字就显示“8”,表示计时器计满8个周期后会自动停止。

(4)将单摆由平衡位置位开一个小于 5° 的角度后释放,单摆开始摆动。每完成一个周期,显示屏右小角的小数字就减少1,当显示至“0”时,自动停止计时。显示屏上大数字显示的就是单摆8个周期的时间 t ,周期 $T=t/8$ 。

(5)将电磁铁放在摆球平衡位置的正下方固定住,使其铁芯上表面离摆球约5mm,铁芯的长方向与单摆的振动方向一致。然后拉开摆球让单摆振动,摆球振动的幅度不要超出铁芯上方的范围。

(6)将电磁铁接通6V直流电,使电磁铁产生磁场,再按一下计时器的置零按钮,显示屏大数字恢复成“000”,小数字恢复成“8”,重新开始计时,等小数字回到零后,大数字显示8个周期的时间 t ,周期 $T=t/8$ 。

(7)给电磁铁通上12V的直流电,重复以上实验,测出 $T_2=t_2/8$ 。比较三个周期,发现 $T_2 > T_1 > T_3$,可见重力加速度越大,单摆的振动周期越小。

说明 本实验也可用通用的器材来完成:自制1个大一些的电磁铁,上面再放一块大小适当的铁板,即可代替单摆运动规律演示器中的专用电磁铁,再配合普通的单摆,采用实验110任何一种测量周期的方法,就可以完成本实验。

方法二

器材

圆柱形磁块（可取舌簧喇叭上的磁块）4个，秒表，细线，木质支架等。

操作

(1)取一个磁块作摆锤，挂在木质支架上（图 a）。再将其余磁块捆扎在一起（使同名磁极位于一方），然后装入大小合适的纸盒内。

(2)使摆锤偏离平衡位置一个角度（小于 5° ）释放，演示单摆在普通情况下的摆动，用实验 110 中任何一种方法测出它的周期 T 。

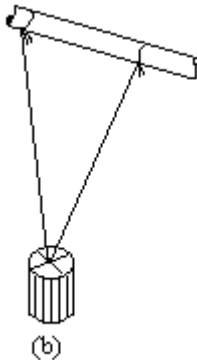
(3)把磁块盒按图(a)所示放在摆锤正下方适当的位置上，让盒内磁块上表面与摆锤下表面的磁极极性相反（模拟重力加速度增大的情况）。再测出单摆的周期 T_1 。可看到 $T_1 < T$ ，说明当重力加速度增大时，单摆的周期变小。

(4)将磁块盒上下表面倒置，使盒内磁块上表面跟摆锤下表面的磁极极性相同（模拟重力加速度减小的情况）。适当调节摆锤最低位置与磁块盒之间的距离，使摆锤受到磁斥力小于它受到的重力。再测出单摆的振动周期 T_2 。可看到 $T_2 > T$ ，说明当重力加速度减小时，单摆的周期增大。

注意

(1)为了防止摆动方向发生偏转，在磁性摆锤顶面中心引出两根等长的线，将线的另一头固定在支架的横杆上（图 b），单摆在垂直于横杆的平面内振动。

(2)在整个实验中，不宜让其他铁质物品接近实验装置。



本实验的关键是测准单摆的摆长与周期，而其中周期的测量更加重要。以下三种方法各有特色。方法一的分析部分提出了用单摆测定重力加速度应该达到的准确度的标准，并讨论了周期与摆长的关系。方法二经多次改变摆长后用图象法处理实验数据。方法三提出一种解决测量较长摆长的方法。

方法一

器材 单摆球（中心有一对穿孔），秒表，钢卷尺，米尺，尼龙线，铁架台等。

操作

(1)将长度为 2m 的细尼龙线一端穿过单摆球后打结固定，另一端悬挂在铁架台上。为了使摆长在振动过程中不会改变，又便于调节摆长，这里采用的方法是在摆线上端的悬点处用一个开夹缝的橡皮塞来夹牢摆线，再把橡皮塞夹紧在铁架台的烧瓶夹中（图 a）。

(2)为了便于观察摆线何时越过平衡位置，在铁架台的竖杆上固定一

个标志物（可用硬电线制成）在不妨碍单摆振动的前提下，标志物要尽量靠近摆线（图 b）。

(3)用米尺和三角尺测量出摆球的直径 D （图 c），用钢卷尺测量出悬点到摆球下沿的距离 s ，单摆的摆长 $l = s - \frac{D}{2}$ 。

(4)将钢球拉离平衡位置后释放，摆角不要太大。等单摆摆动稳定之后，用秒表记下单摆完成几个全振动的时间 t （开表和停表都选在摆线越过标志物时），单摆的周期 $T = t/n$ 。

(5)将操作(4)重复两次，取三次周期的平均值作为单摆的周期值。然后用 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 计算出当地的重力加速度 g 。

分析

(1)根据误差理论，测定的重力加速度的误差

$$E_g = E_l + 2E_T$$

如果测量摆长的误差是 2mm，摆长是 1m，开、停秒的误差各为 0.2s，测了 50 个周期（ $n=50$ ），那么

$$E_l = \Delta l / l = 0.002 / 1 = 0.2\%$$

$$E_T = \Delta t / t = 0.4 / 100 = 0.4\%$$

$$E_g = E_l + 2E_T = 1\%$$

$$g = g \cdot E_g = 9.8 \times 1\% \text{m/s}^2 = 0.1 \text{m/s}^2$$

也就是说实验中测量出的重力加速度值应该在 9.8 ± 0.1 的范围之内。

(2)如果实验对结果的误差有一定要求，则在实验前要进行误差分配。作出误差分配的结果后再决定实验的方案。例如，实验要求 $E_g \leq 2\%$ ，可分配

$$E_l = 0.2\%, E_T = 0.9\%$$

$$\Delta l = l \cdot E_l = 1 \times 0.2\% \text{m} = 0.002 \text{m}$$

这说明测量摆长允许有 2mm 的误差，那么，实验时只要用米尺或钢卷尺测量已可满足要求了，不必用更精密的测量仪器。如果开停表的误差 $\Delta t = 0.2\text{s}$ ，则

$$\Delta t = t \cdot E_T = 0.4 / 0.9\% \text{s} = 44.4 \text{s}$$

因此如果周期约为 2s，实验时只要测 25 个周期已可满足要求。

(3)当单摆的振幅趋向零时，其周期 $T_0 = 2\pi\sqrt{l/g}$ ，当摆角为 θ 时，其周期

$$T = T_0 \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\theta}{2} + \dots \right),$$

$$E_T = (T - T_0) / T_0 = \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\theta}{2} + \dots,$$

这就是由于摆角不为零造成测量 T 的系统误差。

	5 °	10 °	15 °	20 °	25 °	30 °
E_T	0.05%	0.2%	0.5%	0.8%	1.3%	1.8%

从上表可以看出，即使摆角大到 10°，也只会给周期带来 0.2% 的系统误差，还是明显小于测量的偶然误差。而且适当地增大摆角，可减少因环境干扰等因素带来的偶然误差。摆角大一些使摆线越过标志物时的

速度增大，对减少计时误差也是有利的，所以说，教材上强调摆角要小于 5° ，只是在一般的实验要求误差范围内。但这决不是绝对的，关键是由实验要求的误差大小来决定。

方法二

原理 单摆的周期 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ ，所以 $T^2 = \frac{4\pi^2}{g} \cdot l$ 。测定若干组

(l, T) 值后，可作出 $T^2 - l$ 图，图线斜率 $k = \frac{4\pi^2}{g}$ ，即可求出重力

加速度 $g = 4\pi^2/k$ 。

器材 单摆，秒表（或毫秒计），米尺，三角尺，铁架台等。

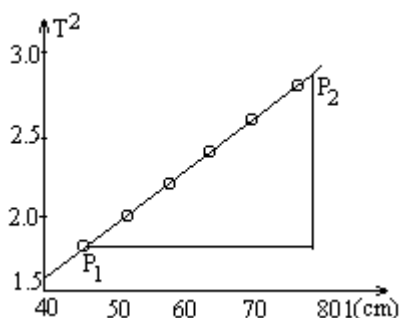
操作

(1) 用三角尺和米尺测出单摆摆球的直径 D [如方法一图(c)] 然后将单摆悬挂在铁架台上 [悬点采用方法一图(a)中所示的方法]。

(2) 用米尺测量出悬点到摆球下沿的距离 s ，单摆的摆长 $l = s - \frac{D}{2}$ 。

(3) 用实验 111 中任意一种方法，测定单摆的周期，得到一级 (l, T) 值。

(4) 改变单摆的摆长，重复操作 (2)、(3)，得到另一级 (l, T) 值。共重复 7—9 次。



(5) 作出 $T^2 - l$ 图。用图解法（或线性回归法）求出图线的斜率 k ，并计算出重力加速度 $g = 4\pi^2/k$ 。

$l(\text{cm})$	43.89	49.79	55.48	61.52	69.71	77.89
$t(\text{s})(100 \text{ 次})$	133.1	141.7	149.4	157.3	167.6	177.1
$T(\text{s})$	1.331	1.417	1.494	1.573	1.676	1.771
$T^2(\text{s}^2)$	1.772	2.008	2.232	2.474	2.809	3.136

实例 某次实验中得到如下数据。

以横轴代表摆长 l ，纵轴代表周期的平方 T^2 ，作出 $T^2 - l$ 图。在图线上取两点 $p_1(43.50, 1.750)$ ， $p_2(80.00, 3.220)$ 求出图线的斜率

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{3.220 - 1.750}{80.00 - 43.50}$$

$$= 0.04027 (\text{s}^2/\text{cm}) = 4.027 (\text{s}^2/\text{m})。$$

重力加速度 $g = 4\pi^2/k$

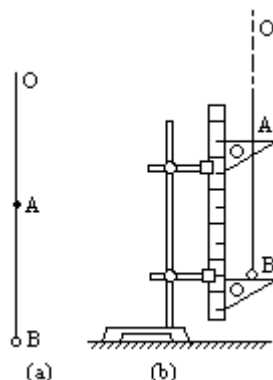
$$= 4 \times 3.142^2 / 4.027 \text{m/s}^2 = 9.806 \text{m/s}^2。$$

方法三

原理 为了提高测量周期的准确度,有些单摆实验中要测量 1000 个以上的周期,这样的单摆摆长必须做得较大(例如 2m 以上)。用米尺测量这样的摆长不方便,可采用下述方法:在摆线上选定一个点 A, A 到悬点的距离 $OA=l_0$ (不必测量具体数据,只要在实验过程中不变), A 点到摆球中心的距离 $AB=l$ (图 a)。改变 l , 测得不同的周期 T 。根据

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l_0 + l}{g}}$$

可有 $T^2 = \frac{4\pi^2}{g} \cdot l_0$ 。作出 $T^2 - l$ 图, 斜率为 k , 则 $g = 4\pi^2 / k$ 。



器材 长线单摆, 秒表(或数字毫秒计), 米尺, 三角 2 把, 铁架台等。

操作

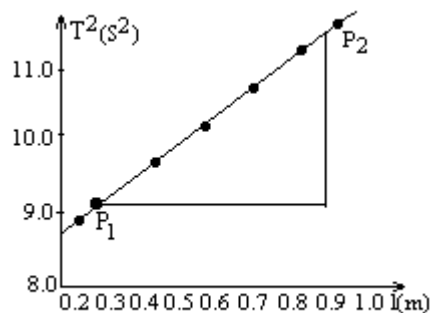
(1)用米尺和三角尺测量出摆球的直径 D [方法见实验 114 方法一图(c)]。然后将长线单摆悬挂起来, 在单摆边上固定一把米尺, 用三角尺读出悬线上 A 点在米尺上的读数 x_A (图 b)。

(2)用三角尺测量出摆球下沿在米尺上的读数 x_B , 从 A 点到摆球中心的距离 $l = |x_B - x_A| - \frac{D}{2}$ 。

(3)让单摆振动起来(摆角不要超过 5°) , 用实验 110 中任意一种方法测量单摆振动的周期 T 。

(4)改变摆长, 重复操作(2)、(3)。共重复 7—9 次, 得到 7—9 组 (l, T) 值。

(5)以横轴代表 l , 纵轴代表 T^2 , 作出 $T^2 - l$ 图, 用解法(或用线性回归法) 求出直线的斜率 k , 则重力加速度 $g = 4\pi^2 / k$ 。



(c)

实例 某次实验数据如下表:

以横轴代表从 A 点到摆球中心的距离 l ，纵轴代表周期的平方 T^2 ，作出 T^2-l 图(图 c)。在图线上取两点 $P_1(0.306, 9.00)$ 和 $P_2(0.900, 11.40)$ ，图线的斜率

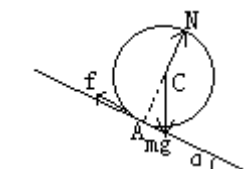
$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{11.40 - 9.00}{0.900 - 0.306} = 4.04,$$

$$g = 4\pi^2 / k = 4 \times 3.14^2 / 4.04 \text{ m/s}^2 = 9.76 \text{ m/s}^2。$$

$l(\text{m})$	0.2500	0.3120	0.4650	0.5000	0.7120	0.8270	0.9450
$T(\text{s})$	2.969	3.010	3.111	3.191	3.267	3.337	3.407
$T^2(\text{s}^2)$	8.815	9.060	9.678	10.18	10.67	11.14	11.61

测弧形面的曲率半径

原理 当小球从倾角为 α 的斜面上滚下来时，共受到三个力：重力 mg ，竖直向下，作用在质心 C 上；弹力 N ，垂直于斜面向上，作用在 A 点；摩擦力 f ，沿斜面向上，作用在 A 点(图 a)。根据牛顿运动定律，可列出四个方程



(a)

$$\begin{cases} mg \cdot \sin \alpha - f = m\alpha_C \\ N - mg \cos \alpha = 0 \\ f_r = I_C \cdot \beta \\ \alpha_C = r \cdot \beta \end{cases}$$

其中 α_C 、 β 、 I_C 、 r 分别表示小球的质心线加速度，质心角加速度，相对质心的转动惯量和半径。解此方程组可得到

$$\alpha_C = \frac{mr^2}{I_C + m^2} g \sin \alpha。$$

匀质小球相对球心的转动惯量 $I_C = \frac{2}{5} mr^2$ ，所以

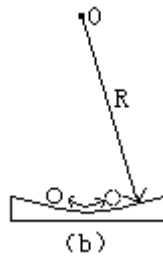
$$\alpha_C = \frac{5}{7} g \sin \alpha。$$

如果在半径为 R 的弧形面上

$$\alpha_C = \frac{5}{7} g \alpha = \frac{5g}{7R} \cdot x，$$

$$\text{周期 } T = 2\pi \sqrt{\frac{7R}{5g}}。$$

器材 凹透镜，小钢球，秒表等。



操作

(1) 当凹透镜平放在水平桌面上，将小钢球放在凹面内，小钢球静止在凹面的中心，用彩色水笔在透镜凹面上描出中心点，作为标志点。

(2) 让小钢球在凹面上围绕凹面中心以较小的振幅来回振动（如图 b），用秒表测出它振动 n 次的时间 t ，周期 $T=t/n$ 。重复三次，算出周期的平均值。

(3) 根据公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{7R}{5g}}$ ，可算出弧形的曲率半径 $R = \frac{5gT^2}{28\pi^2}$ 。

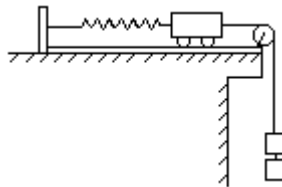
阻尼振动

方法一

器材 小车，弹簧，带定滑轮的木板，钩码，细绳等。

操作

(1) 小车一端连接一根弹簧，弹簧另一端固定在木板上。小车另一端的细绳跨过滑轮与钩码相连（如图）。



(2) 将钩码向下拉适当的距离后释放，小车在弹簧拉力和细绳拉力的作用下振动。由于车轮和滑轮的摩擦，小车的振幅逐渐减小，直至停下。

注意 钩码的个数要根据弹簧的倔强系数来定。弹簧的倔强系数大，钩码应多一些；反之则应少一些。

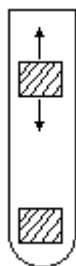
方法二

器材 圆柱形恒磁铁氧体小磁子，试管（内径比磁子略大）等。

操作

(1) 将一个小铁氧体磁子放在试管底部。

(2) 将另一个小铁氧体磁子从试管口放入，使下边一个磁子的上表面和上边一个磁子的下表面是同名磁极，上边一个磁子在重力和磁力的作用下振动（如图）。由于管壁摩擦力和空气阻力的作用，振幅逐渐减小，直至停下。



注意

- (1) 要选用磁性强的小磁子。
- (2) 试管要保持竖直，否则管壁对小磁子的摩擦太大，小磁子不会振动。

受迫振动和共振

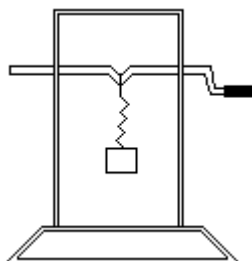
发生共振的条件是策动力的频率很接近或等于振动体的固有频率。因此实验中可以改变策动力的频率，也可以改变物体的固有频率，以满足共振的条件。本实验的方法一、五是改变策动力的频率；方法二、三是改变振动物体的固有频率；方法四既可改变策动力频率又可改变振动物体的固有频率。在实验时应注意振动物体的最大振幅不能超过其弹性形变的限度，否则将损坏实验器材。

方法一

器材 自制共振演示仪。

共振仪的制作方法

将直径为 2mm 的粗铁丝穿过木架上的两个洞后弯成如图形状，然后将一个弹簧挂在粗铁丝的凹口处，弹簧下端挂一个质量适当的钩码。



操作

(1) 将钩码从平衡位置向下拉一段适当的距离后释放，让它振动起来。此时它振动的频率就是弹簧振子的固有频率。

(2) 从弹簧振子处于静止状态时开始，以明显大于弹簧振子固有频率的频率转动粗铁丝手柄，可看到弹簧振子的振幅很小。

(3) 从弹簧振子处于静止状态时开始，以明显小于弹簧振子固有频率的频率转动粗铁丝手柄，同样可看到弹簧振子的振幅很小。

(4) 从弹簧处于静止状态时开始，以尽量接近弹簧振子固有频率的频率转动粗铁丝手柄，转动 7 到 8 圈之后，可看到弹簧振子的振幅一次比一次明显增大，这就是共振现象。

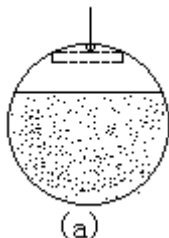
注意 观察到弹簧振子的共振现象后，要立即停止转动手柄，以免振子的弹簧振坏。

方法二

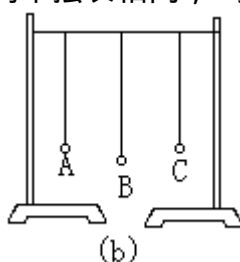
器材 乒乓球，铁架台，腊线，黄砂，火柴等。

操作

(1) 在三个乒乓球壁上各钻一个直径约 3mm 的小孔，灌入适量黄砂。将 1.5cm 左右长的火柴梗中部扎上蜡线后插入乒乓球小孔中横过来，使其横架在小孔里面（图 a）。



(2) 在两个铁架台中间横架一根蜡线，然后将三个乒乓球悬挂在横线上，构成三个摆。A、C 两个摆长相同，B 摆摆长较长（图 b）。



(3) 三个球静止时，将 A 球沿垂直于横线的方向拉离平衡位置后释放，让它振动。可看到 C 球由静止逐渐振动起来，而且振幅越来越大，几乎可达到 A 球的初始振幅（此时 A 球振幅很小），这是因为 A、C 两摆固有频率相同，发生了共振。而 B 球的固有频率和 A 球差得较远，因此 B 球振幅始终很小。

注意 三个摆球的质量尽量相同。

方法三

器材 自制共振演示仪，低压电源，滑动变阻器（10 Ω 、2A）开关，导线等。

共振演示仪的制作方法

(1) 在质量较好的小马达轴上装一个 3g 左右的偏心锤，锤和轴之间的距离可以调节。锤离轴心越远振动越强，但对马达的要求也越高，否则不易启动马达，而且在低速转动时容易停转。

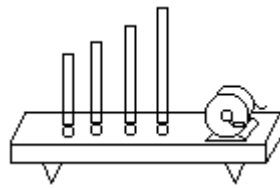
(2) 在长 360mm、宽 140mm、厚 20mm 的木板四个角下面各装一个橡胶垫脚，作为振动台。

(3) 用四根长度分别为 300、260、230 和 210mm，直径 2.3—2.5mm 的钢丝（或自行车辐条），按由长到短的次序固定在振动台上。再将小马达也固定在振动台上，如图（a）。

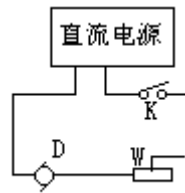
操作

(1) 将小马达，滑动变阻器，开关和电源接成如图（b）所示电路。

(2) 将滑动变阻器的滑动触头放在电阻最大的一端后，闭合开关。慢慢移动滑动变阻器的滑动触头，逐渐减小电阻，小马达开始转动。随着小马达越转越快。可看到四条钢丝由长到短依次发生共振现象。



(a)



(b)

注意

(1) 直流电动机要有足够的功率，才能保证在各种转速下都平稳地转动。

(2) 振源的振动是通过振动台传给共振棒的，因此橡胶垫脚的形状、硬软程度对实验效果都有直接的影响。

(3) 四根钢丝的一端紧固在振动台上，不能松动。

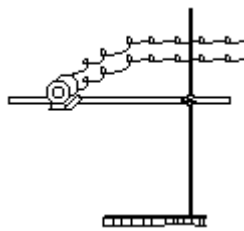
(4) 四根钢丝振动的固有频率相差尽量大一些（但应都在马达转速的可调范围内），以免两根一起共振。

(5) 调节滑动变阻器的滑动触头要缓慢，因为共振需要有一个积累能量的时间。

方法四

器材

玩具电机，钢锯条，偏心夹，低压直流电源（3—6V），滑线变阻器（0—50 Ω），钠架台等。



操作

(1) 按图装置器材，（电路同方法三）接通电源，电机轴上的偏心夹转动，形成策动力使锯条作受迫振动。

(2) 调节滑线变阻器阻值可改变电机转速，当转速达到某个值时，策动力频率与振动系统的固有频率相等，锯条振动最剧烈，产生共振现象。

(3) 调节玩具电机的相对位置，可改变振动系统的固有频率。重复操作（2）。

方法五

器材 双缸洗衣机等

操作

洗衣后将湿衣服放在离心式抛水中抛干。衣服抛干后，关闭抛水机

电源，在抛水机的转速减到某一频率时，可看到整个洗衣机剧烈地抖动起来，这就是共振现象。

横波的形成和传播

在张紧的线状物体中，横波传播的速度， $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ ，式中T为线状物

体上的张力， μ 为线状物体的线密度。为使线状物体上横波的形成与传播能看得清楚一些，要设法使T小一些， μ 大一些。方法一中将棉线强放在地上而不是水平张紧是为了减小T；方法二中穿在绳上的轻木棍和方法三中穿在绳上的小铅球，都可以起到增大 μ 的作用。

方法一

器材 棉线绳（直径约1cm，长4~5m）。

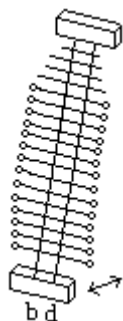
操作 将棉线绳放在水平的桌面或地面上，一人用手固定它的一端，另一个手持它的另一端迅速抖动一二下，可看到绳上形成一、二个周期的横波，向固定端传播。

方法二

器材 自制帘式横波演示器，铁架台等。

帘式横波演示器的制作方法

用两条相互平行的绳子穿上几十根等长的轻木棍，每根棍都与绳子垂直，互相之间间距相等，在棍的两端各装上一个塑料小球。绳的两端装上ac和bd两个木制拉手，靠近ac拉手处的绳上穿有逐渐减短の木棍，目的是减弱反射波（如图）。



操作

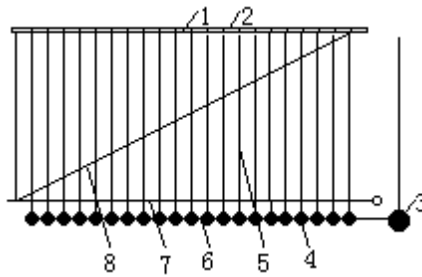
(1) 将帘式横波演示器竖直悬挂起来，拉手ac在上，bd在下。

(2) 用手拨动最下面的一个塑料球使它沿水平方向左右振动一次，可看到其余的球依次振动起来，形成自下向上传播的横波。

方法三

器材 自制横波演示器。

横波演示器的制作方法



仪器结构如图所示。图中 1 为金属杆，长 200cm，直径约 1.2cm。2 为内径约 1.6cm 的窗帘圈，共 28 只，互相之间用细线连接，间隔约 7cm。3 为弹簧振子，质量为 2kg，作波源用。4 为打孔铅球，外径 2cm，重约 100g，上端旋有羊眼螺丝，中间打一水平小孔。5、6、7、8 均为截面 $1 \times 1\text{mm}^2$ 的航模橡筋，其中 5 的长度约 30cm；6 为定位橡筋，穿过小球，用小木片与小球固定，使各小球保持一定的水平间距；7 起传能作用，穿过羊眼螺丝孔，两端固定；8 起阻尼作用，编扎在橡筋 5 上右端固定在金属杆的最右端，左端可上下移动，向上移阻尼小，向下移阻尼大。

操作

(1) 将右边的大振子向下拉适当距离后释放，大弹簧振子便振动起来，可看到横波自右向左传播。

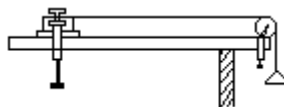
(2) 将橡筋 8 的左端上移，可观察到反射波，将橡筋 8 的左端下移，可观察到阻尼波。

(3) 用手将左、右两端的两个小球同时振动一次，可观察到两列相向传播的波相遇时互相叠加，相遇后又分开独立行进，互不干扰。

方法四

器材 打点计时器，频闪光源，学生电源，定滑轮，砝码盘，砝码，棉线等。

操作



(1) 将打点器上的打点基板卸去，将打点针调高，接上 6—8V 的交流电后，振动片即作简谐振动。振动频率等于交流电的频率。

(2) 如图安装仪器，用 U 形夹把打点器及定滑轮固定在实验桌上。棉线的一端系在打点针上，另一端跨过定滑轮挂一个砝码盘，打点针到定滑轮的距离为 2.0—2.5m。

(3) 接通打点器电源，打点针作为振源带动线端上下振动，在棉线上形成横波自左向右传播，遇到定滑轮后又反射回来。适当地左右调节打点器的位置或调节砝码盘中砝码的质量（改变线上的张力），可使线上形成振幅最大且稳定的驻波。

(4) 消除室内的自然光或普通灯光，打开频闪光源。当闪光频率等于横波频率 $f_{\text{波}}$ ，满足 $f_{\text{波}} = n \cdot f_{\text{光}}$ ($n=1, 2, 3, \dots$)，可看到静止不动的“横波”；当 $n f_{\text{光}}$ 稍小于 $f_{\text{波}}$ 时，“横波”缓慢前进；两者差值增大，“横波”行进速度增快；如果 $n f_{\text{光}}$ 稍大于 $f_{\text{波}}$ ，则“横波”向后退。

注意 此实验可十分清晰地观察“横波”缓慢地前进，但应指出，看到的不是线中真正的横波波速。

纵波的形成和传播

器材 纵波演示器（J2203-1型）（如图）。

1. 支架 2. 白色背景 3. 振子 4. 长弹簧 5. 吸收装置

操作

（1）用手迅速向左推一下振子，可看到弹簧中形成一个密的部分，自右向左传播。

（2）用手迅速向右拉一个振子，可看到弹簧中形成一个疏密相间的部分，自右向左传播。

（3）扳动振子，释放后让它振动起来，可看到弹簧中形成疏密相间的纵波，自右向左传播。

注意 要使弹簧中的纵波清晰，吸收反射波是一个关键。如弹簧左端产生反射波，可调节吸收装置的弯曲程度和长度，使它与接触的各圈弹簧之间的摩擦力自右向左逐渐增大即可。

波速、波长和频率的关系

方法一

器材 自制帘式横波演示器，秒表，铁架台等。

帘式横波演示器的制作：见实验 118 方法二。

操作

（1）将帘式横波演示器竖直悬挂起来，拉手 ac 在上，bd 在下（见实验 118 方法二图）。

（2）用手以较低的频率左右水平拨动最下面的一个塑料球，可看到横波以较长的波长自下向上传播。用秒表记下振动从最下面的球传到某一球的时间 t_1 。

（3）用手以较高的频率左右水平拨动最下面的球，重复操作（2）。可看到横波以较短的波长自下向上传播。并用秒表记下振动从最下面的球传到某球的时间 t_2 ，可发现 t_1 与 t_2 基本相同，说明在媒质不变时波速与频率基本无关。在波速恒定时，频率低则波长长，频率高则波长短。

（4）在 bd 把手下面适当地挂一些重物，增大绳子上的张力，然后重复操作（3），可看到波长变长了。并用秒表记下振动从最下面的球传到某球的时间 t_3 ，可发现 t_3 小于 t_2 ，说明波速变大了。在频率恒定时，波长越长，波速越大。

方法二

器材 自制横波演示器，秒表等。

横波演示器制作方法：见实验 118 方法三。

操作

（1）让传能橡筋 7 处于较松的状态，使右边作为波源的大振子振动起来，可看到横波自右向左传播。用秒表记下振动从最右边一个小铅球传到最左边一个小铅球的时间 t_1 。

(2) 用减小振子的质量(振子换用质量较小的球)或增大弹簧的倔强系数(将振子弹簧中部某一点固定)的方法,使弹簧振子 3 的频率变大。重复操作(1),可看到横波以较短的波长自右向左传播。用秒表记下振动从最右边一个小球传到最左边一个小球的时间 t_2 ,可发现 t_1 和 t_2 基本相同,说明媒质不变时,波速与频率基本无关。在波速恒定时,频率低则波长长,频率高则波长短。

(3) 将传能橡筋 7 张紧一张,重复操作(2),可看到波长变长了。用秒表记下振动从最右边一个小球传到最左边一个小球的时间 t_3 ,可发现 t_3 小于 t_2 ,说明波速变大了。在频率恒定时,波长越长,波速越大。

方法三

器材 纵波演示器(J2203-1型)(见实验 119 图),秒表等。

操作

(1) 扳动振子 3,释放后让它振动起来,可看到弹簧中疏密相间的纵波,自右向左传播,用秒表记下弹簧上某一较密部分从右端传到左端的时间 t_1 。

(2) 降低振子 3 的高度或减小它的质量,以增大波源的振动频率,重复操作(1),可看到弹簧上两个较密部分之间的距离(即波长)变小了。用秒表记下弹簧上某一较密部分从右端传到左端的时间 t_2 ,可发现 t_1 与 t_2 基本相同。说明在媒质不变时,波速和频率基本无关。在波速恒定时,频率低则波长长,频率高则波长短。

波的叠加和穿越现象

方法一

器材 乳胶管(长度 2m 以上),细绳等。

操作

(1) 将乳胶管中灌满水,两端用细绳扎紧,放在水平面上成一直线状。

(2) 两人用手各持乳胶管的一端,同时上下迅速抖动一下,使两边也各产生半个周期的横波脉冲(两者的振幅要一大一小,以便区别)。可看到两个横波在管上相向传播,相遇时发生波的叠加现象,当两个波峰恰好叠加成一个更高的波峰时,其幅度是两个波幅度之和。此后两个波仍像相遇前一样,各自保持原来的波形向原来的方向传播,即互相穿越而过,显示出波传播的独立性(如图)。

方法二

器材 自制横波演示器。

横波演示器的制作方法:见实验 118 方法三。

操作

(1) 两人同时手持左右两端两个小球,以相同的方向作一次全振动,可看到两个相向传播的横波相遇时互相叠加,然后又分开独立行进,互不干扰(为了区别,可使左、右形成的两个波幅度一大一小)。

(2) 将阻尼橡筋 8 向上移到顶,使其不起作用。用手握住最右边的

一个小球作一次全振动，可看到一个横波从右向左传播。到达左端后，产生一个明显的反射波。当反射波产生时，手持右边小球再作一次全振动，此时可看到两个相向传播的横波。相遇时互相叠加，然后又分开独立行进，互不干扰。为了区别，前一次振动幅度可小一些，后一次振动幅度可以大一些。

水波的衍射

方法一

器材 自制水槽，自制振源，自制挡板（2块），投影幻灯机，滑动变阻器，直流低压电源等。

水槽的制作方法

用木料或聚苯乙烯发泡塑料做框，玻璃镶底，深约4cm，大小以能放在投影幻灯机上为宜。内侧壁做成倾角约为 30° 的斜面，并贴敷一层软泡沫塑料，以减弱反射水波。

振源的制作方法

将一个玩具电机固定在木板上，电机轴上焊一段金属丝，弯制成偏心拨杆带动拨叉，使振子振动（图a）。

挡板的制作方法

(a)

1.可伸缩铁片 2.固定铁片 3.支持脚

(b)

如图(b)所示，挡板由固定铁片和可伸缩铁片构成，固定铁片的斜边角度要与发波水槽内侧壁角度相同，使之放在水槽中能吻合。

操作

(1)水槽中注入1—2cm深的清水后，放在投影幻灯机上。将槽底调成水平，使槽中各处水深相同（因水深度影响水面波的波速，水浅处波速将减小）。

(2)将单球振源安装在水槽边上，与滑动变阻器串联后接在电源上，使之振动。开启投影幻灯光源，观察水的波形，调节振子浸入水中的深度，使之向上振动时恰好不离开水面，直到获得清晰的波形为止（图c）。

(3)在水槽中放入两个挡板，两板间形成一个间隙。挡板不要离振源太近，间隙要接近水波的波长，可看见明显的水波衍射现象，如图(d)。

1.挡板 2.弹簧片 3.固定装置

(d)

(4)增大挡板间的距离使之大于水波长的3—5倍，水波的衍射现象就不明显（图e）。调节滑动变阻器，使振子振动的频率降低，水波的波长变长，又会出现比较明显的衍射现象。

(e)

(5) 取出挡板，在水槽中放入一个尺寸比波长小的障碍物（如金属圆柱），可看到明显的衍射现象。障碍物背后没有阴影区，如图(f)。更换一个比波长大几倍的障碍物，衍射现象就不明显了，如图(g)。如使水波波长增大，又可使衍射现象比较明显。

(f)

(g)

(6) 取下单球振子，换上平面振子，重复操作(4)、(5)，可看到同样的现象，如图(h)。

(h)

建议

可自制电磁振荡振源：由电磁振动器和晶体管振荡电源两部分组成。

电磁振动器如图(i)所示，在底座上固定一条软铁制的弹簧片和一块永久磁铁，磁铁两个极上、下放置，与弹簧片保持适当的距离。弹簧片上套一个固定在底座上的线圈（用直径为0.23mm的漆包线绕1500匝）。弹簧片前端装一个小型接线柱，作固定振子用。

(i)

(j)

振荡电源由多谐振荡器和脉冲放大反向器组成，用电磁振动器的线圈作为反向器的负载，电路图如图(j)所示。调节电位器，可使振荡频率在3—12Hz之间变化。

方法二

原理 用频率为 $f_{光}$ 的频闪光源照射频率为 $f_{波}$ 的向前传播的波。如果 $f_{光}=f_{波}$ ，可看到完全静止的波；如果 $f_{光}$ 略小于 $f_{波}$ ，可看到波缓慢地向前传播；如果 $f_{光}$ 略大于 $f_{波}$ ，可看到波缓慢地向后退。由于看到的波是静止的或是缓慢行进的。这就便于我们观察。

器材 频闪光源（或用自制频闪效应遮光器），普通发波水槽（或用自制水槽、振源和挡板）。

频闪效应遮光器的制作方法

如图所示，光源灯泡可用汽车照明灯，遮光叶轮可用硬塑料片或薄金属片制成，用变阻器调整小电机的转速可改变闪光频率。

1. 水槽
2. 光源灯泡
3. 穿过水槽的光束
4. 直流小电动机
5. 遮光叶轮（硬塑料薄片）

自制水槽、振源和挡板的制作方法：见方法一。

操作

(1) 按照说明书将发波水槽安装好（或用自制的水槽、振源和挡

板)，调节水槽成水平。调节振子的高度，使它振到最高点时恰好不离开水面。

(2) 消除室内的自然光和其他灯光，在频闪光源的照射下(或用频闪效应遮光器)重复方法一中的操作(2)、(3)、(4)、(5)、(6)。适当地调节频闪光源闪光频率，可看到完全静止的波或缓慢前进的波(应避免后退的波)。

方法三

原理 见方法二。

器材 TS-2 型发波水槽[外型如图(a)所示，光源盒如图(b)所示]。

1. 振杆 2. 振子 3. 水槽 4. 毛玻璃屏
 5. 光源盒 6. 频率调节旋钮 7. 立柱
 8. 振杆高度调节旋钮 9. 振子幅度调节旋钮
 10. 振源盒 11. 吸收网 12. 导线
 13. 平面镜 14. 框架 15. 水平调节足
- (a)

1. 紧固旋钮 2. 皮带轮
 3. 微电机 4. 弹簧带
 5. 外壳 6. 溴钨灯泡
 7. 遮光叶轮 8. 光敏管
- (b)

操作

(1) 按照说明书安装好 TS-2 型发波水槽。调节水平调节足使水槽中水的深浅相同。调节振子的高度，使它振到最高点时恰好不离开水面。

(2) 开启发波水槽的振子，光源和微电机，重复方法一中的操作(2)、(3)、(4)、(5)、(6)，可看到完全静止的各种衍射水波。

说明 TS-2 型发波水槽光源盒中的微电机经过皮带减速后带动遮光叶轮匀速转动遮光，使溴钨灯射出的光束为频闪光。闪光的频率由旋钮控制变阻器改变电机的转速来调节。在光源盒下部的的光敏管接收了脉冲光照射后产生电脉冲，经放大后控制振源盒中电磁铁簧片的振动，使光源的频闪频率和振子的振动频率完全相同，因此看到的波形完全静止。

水波的干涉

本实验介绍了四种水波干涉实验的方法。方法一简单易行，但可观察时间较短，范围也较小；方法二使用成品仪器，效果较好，但两个波源的频率不能分别调节；方法三、四的共同特点是两波源的频率可分开调节，因此可验证水波干涉的条件：两波源频率相同，相差恒定。本实验对实验用水槽的要求没有专门介绍，有关这方面的内容见实验 122 方法一。本实验方法二、三、四都可用频闪光源来观察“静止”的波。本实验的几种方法都可放在投影幻灯上显示，有关使用投影幻灯的注意点安排在方法三中介绍。

方法一

器材 音叉，相同的小玻璃珠 2 个，水槽，细线等。

操作

(1) 两根长度相同的细线的一端各连接一个小玻璃珠，另一端分别固定在音叉同一臂的两个位置上。将音叉固定在水平位置，使两个小玻璃珠的一半浸在水中（如图）。

(2) 用橡皮槌敲击音叉的另一臂，使两玻璃珠在音叉的策动下以相同的频率振动，在水面激起频率相同水波，即可观察到水波的干涉现象。

注意

(1) 水槽的内壁要选用倾斜的（如大号菜盆），并在内壁贴上软泡沫塑料或金属回丝等吸收波的物体，以减弱水波的反射。

(2) 音叉要固定牢（如用台虎钳固定）在敲击时不要让音叉发生移动。

方法二

器材 发波水槽，低压电源，滑动变阻器（200 Ω 、1.5A）等。

操作

(1) 安装好发波水槽后向槽中注入 1—2cm 深的清水，将槽底调节成水平，使槽中各处水的深浅相等。安装好双振子，浸入水中约 5mm。

(2) 接通电源，使振子振动起来，调节振子的高度和振动的幅度，即可看到清晰的水波干涉图形。

(3) 调节滑动变阻器，改变振子振动的频率，可看到干涉条纹的数目和疏密程度都发生了变化。当两个波源之间的距离恒定时，振源率越高，水的波长越短，干涉条纹的数目越多，条纹也越密集。

(4) 取下双振子，换上平面波振子。在水槽中振子前方 3—5cm 处放置排成一条直线的三块挡板，形成双缝。缝宽约等于波长，两缝相距为波长的 5—6 倍。接通电源后可看到水波双缝干涉的图形。改变振子振动的频率，同样可以改变干涉条纹的数目和疏密程度。

说明 本实验可以在消除自然光的条件下用频闪光源来观察，当频闪频率与振子频率完全相同时，可看到静止不动的波和干涉条纹；当频闪频率略小于振子频率时，可看到缓慢地向前传播的波和清晰的干涉条件。

方法三

器材 双变频电源，自制电动振子 2 个，水槽，投影仪及屏幕，铁架台等。

双变频电源由两个独立的振荡电路和放大电路构成。频率范围 0—100Hz 可调，输出功率 0—2W 可调。

电动振子的制作方法

将打点计时器的振针拆除。焊上钢丝和小球，如图(a)所示。由于打点器簧片的谐振频率是 50Hz，在使用过程中会出现共振现象。调节到某一频率时，振幅突然加大，水花飞溅，影响实验的效果，所以要打磨弹簧片，使其根部和中部变薄，以降低固有频率。

操作

(1) 将水槽置于投影仪上，两个电动振子用支架固定，变频电源输出端分别接上振子的接线柱。装置如图(b)所示。

(2) 将水槽的底面调节水平，并将两个振子调节在适当的高度上。

(3) 启动一个振子，在发波水槽中激起一系列环形波。换用另一个振子，形成另一列独立的环形波。

(a)

(b)

(4) 使两个变频电源频率相同，同时启动两个振子，原来的环形波被一个干涉图样所替代。其中某些区域振动加强，某些区域振动减弱，而且加强区域与减弱区域相互间隔。这说明波的干涉是波的叠加产生的一种特有现象。调节两电源的输出功率，可改变两振子的振幅，当两个振子振幅相同时，干涉图样最明显。

(5) 调节两个变频电源的频率，使两波源频率略有差别，干涉图样的腹线与节线均由一个波源向另一个波源的方向飘移。调节任一个波源的频率，可以使干涉图样获得稳定。如果两波源频率差得较大，则看不到清晰的干涉图样。

(6) 两个振子连接同一个电源，不论频率如何调节，干涉图样始终是稳定的。由此可以说明，获得稳定的干涉图样的条件是两列波频率相同，相差恒定。

(7) 仍使两个振子连接同一个电源，由低至高缓慢地调节波源的频率。波的干涉图样将逐渐发生变化。在频率较低时，由于波长较长，波腹区和波节区都较宽，在波腹区波的传播特征非常明显。随着频率的升高，波长变短，波腹区和波节区逐渐变狭，以至成线状。在波腹区的行波幅度逐渐变小。至高频时，波线细密，波腹区的波的传播已不易辨认。呈现出在日常生活中经常看到的水池或水盆中的水波涟漪的特征。

说明

(1) 双变频电源可用实验室现有的仪器组合，取用低频信号源 2 台、音频功率放大器 2 台。把前者的信号输入后者，经后者放大再输入电动振子即可。如图(c)所示。

(2) 如果实验室中备有频率计，在演示干涉条件时，可用频率计分别测出两波源的频率，获得稳定干涉图样时，两振子的频率相同。

注意

发波水槽实验用投影仪成像面积大、亮度高、方位好。但常常因调节不当，效果很差，这是没有掌握调节的原理所致。这可以用投影仪调焦的方法来调节。

(c)

(d)

发波水槽工作时，水面生成一系列波，波峰部分突起，产生凸透镜作用，波谷部分凹下，产生凹透镜作用，如图(d)所示。为了简化问题，图中把投影器集光镜的出射光线作平行光线处理。从波峰部分出射的光线将会聚，从波谷部分的出射光线将发散。此时若调焦在水面上，各部分都有光线出射，所成的像也是一片明亮。效果很差。

正确的调焦应在图示的虚线 或 的地方。虚线 是波峰出射光线的会聚点的集合，调焦在此成像，会聚处特别明亮，呈现了波峰的位置，而两相邻波峰的中间很暗，是对应的波谷。

虚线 是波谷出射光线的反向延长线的交点的集合。调焦在此成像，该交点处特别明亮，对应着波谷的位置，相邻波谷之间有较暗的波峰。但调节至 时，投影器的物镜离水面已经很近，投影范围明显减小。所以一般以调节到 为好。

实际操作可以先使发波水槽工作，然后慢慢地向上移动物镜，直至屏幕上的干涉图象最清晰为止。

方法四

器材 自制水波干涉振子 2 个，直流电源，滑动变阻器，水槽，投影幻灯机等。

水波干涉振子的制作方法

用薄铁皮（如包装木箱提旧铁皮）制成振动臂，长约 17cm。在振动臂上固定一只玩具电机，振动臂前可根据需要安装单振子或双振子（图 a）。在电机轴上固定一只偏心轮（图 b），调节偏心轮上螺帽的多少可改变它偏心的程度。

(a)

(b)

操作

(1) 水槽中放上适量清水后，放在投影幻灯机上，调节水平。将两个单振子固定在水槽边上，相距约 10cm，每个振子的玩具电机各串联一个滑动变阻器后接在低压直流电源上。

(2) 接通电源后，重复方法三操作（3）、（4）、（5）。（调节滑动变阻器的阻值，可改变电机转速，即改变振子频率；调节偏心轮的偏心程度或电机在振动臂上的位置，可改变振子振幅。）

(3) 改用一个水波干涉振子，振动臂前部换成双振子，重复方法三的操作（6）、（7）。

声波的干涉

进行声波干涉实验一般用两个声源。设两个声源到接收点的距离分别是 r_1 和 r_2 ，声波的波长为 λ ，当 $|r_2 - r_1| = k\lambda$ (k 为整数) 时，合振动最强，声音最响；当 $|r_2 - r_1| = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ 时，合振动最弱，声音最轻。在实验中先根据声音的传播速度和声音的频率计算出声音的波长，选择合适的位置，实验比较容易成功。实验可分为两大类，一类是声源移动，接收装置不动；另一类是声源不动，接收装置移动，都可以检测出合振动最强和合振动最弱的位置。

方法一

器材 附共鸣箱的音叉，金属杆（粗细与音叉柄相同），铁架台等。

操作

(1) 将音叉从共鸣箱上拨下,把金属杆插入共鸣箱的孔中,然后用铁架台将共鸣箱固定起来,其开口保持在竖直面内。

(2) 手持音叉,让音叉臂下垂,置于共鸣箱开口附近。用橡皮槌敲击音叉后,缓缓转动音叉柄,可清楚地听见声音强弱的变化,即声波的干涉现象(如图)。

(3) 将音叉转到声音最轻的位置时停止转动,用纸筒套住一个音叉臂,遮断这个臂产生的声波,立刻听到声音增强,抽去纸筒,声音又减弱,可进一步表明声波的干涉作用。

方法二

器材 500—100ml 量筒,两头开口玻璃管,音叉等。

操作

(1) 将发声音叉如图放在开口的玻璃管上方,缓慢上下移动盛水量筒中的玻璃管的位置(保持音叉与玻璃管的位置不变),当听到音叉发声最大时,将玻璃管固定。

(2) 将发声的音叉在玻管上方开口处缓缓转动,可以听到声音忽强忽弱变化,这就是声音的干涉。

建议 实验前可以根据声速、频率、算出声波的波长,再选择长短合适的玻璃管($L = \frac{1}{4}\lambda$),这样比较容易找到共鸣的位置。

方法三

器材 音频信号发生器,音频功率放大器,同种型号(2.5时、0.5VA)扬声器2只,长木板(长1m、宽0.1m),导线,转动支架等。

音箱的制作方法

根据场声器的尺寸制作小音箱,要求使扬声器的后部完全封闭起来,以提高声波的辐射效率。小音箱后面四周垫入吸音材料如腈纶棉等,用以吸收声波(图a)。

1. 扬声器 2. 音箱 3. 腈纶棉

(a)

操作

(1) 将长木板中点固定在转动支架上,木板两端各放置一个音箱(图b)。两个扬声器并联(注意+、-极)后接到音频功率放大器的输出端,音频信号发生器输出的正弦信号接到音频功率放大器的输入端。

1. 扬声器箱 2. 长板 3. 转动支架

(b)

(2) 接通电源,使音频信号发生器发出频率为1000Hz的信号。调整功率放大器,逐渐增大输出功率,使扬声器发出音量适当的1000Hz的声音。

(3) 转动木板,房间里每个人都能感受到声响起伏变化的声波干涉现象。

(4) 木板固定不动,人侧身站在木架前约5m处,一只耳朵对着扬

声器，另一只耳朵用手堵住，沿着与木板平等的方向慢慢走动，可明显地感觉到在空间不同位置声音的响度不同，呈周期性的变化。

(5) 人走到声音最弱处停下，断开一个扬声器的信号，反而感到声音响了；再接通信号，声音又轻了，可进一步说明声波的干涉现象。

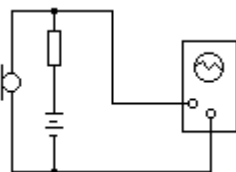
注意 尽量选用回声小一些的房间，扬声器的音量也不宜太大，以减少反射声波的干扰。

方法四

器材 示波器，小型驻极体话筒，6.8K 电阻，3V 电源，音叉等。

操作

按图连接器材。敲击音叉发声，将话筒围绕音叉转圈，（也可固定话筒，转动音叉）即可看到某些区域振动加强，某些区域振动减弱的声波干涉现象。



注意

- (1) 示波器用最灵敏一档，输入连线用屏蔽线。
- (2) 电阻阻值可作适当调整，取得最大灵敏度。
- (3) 连接驻极体话筒要注意极性，接反了不能工作。

方法五

器材 自制叉形声波干涉仪，录音机，规格机同的扬声器（4）2 个，话筒，示波器等。

叉型声波干涉仪的制作方法

用内径约 2cm 的硬塑料管制成“人”字型通道（图 a），AP 段和 BP 段的长度都是 68cm，其中 AP 段可在 M 处拆开，AM 段长 34cm，CP 段长 15cm。AP 与 CP 的夹角小于 20° 。A、B 端各装有一个喇叭型接口，口径与扬声器相同。

(a)

操作

- (1) 将 500Hz 的正弦声波录在录音磁带上。
- (2) 将两只扬声器 S_1 和 S_2 串联后[一定在顺串，如图 (b) 所示]，接在录放机的外接喇叭插孔内，将话筒 m 插入干涉仪的 CP 段导管或对准 C 口，话筒的两根线接到示波器的接地端与 y 输入端（图 c）。

(b)

1. 示波器 2. 录放机

(c)

- (3) 将一只扬声器 S_1 对准干涉仪的 A 端接口（ S_2 不要对准 B 端接口），开启录音机，调节示波器，使屏上出现三至四个正弦波，记下它的幅度。

(4) 将 S_2 也同时对准干涉仪的 B 端接口，可看到屏上波形的幅度增加了约一倍，说明两列声波由于相位相同，合振动得到加强。

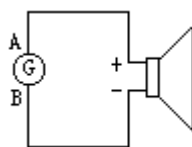
(5) 将干涉仪的 AM 段硬管取下，将喇叭型接口套在 MP 管上，再将 S_1 扬声器对准干涉仪的接口 M 端，可看到屏上波形的幅度明显减小（如果两只扬声器选择得好，波形可接近一条直线），说明两列声波由于相位相反，合振动被减弱。

(6) 将 S_2 扬声器从干涉仪的 B 端接口处移开，可看到波形又恢复了原先的大小，但相位相反，可进一步说明声波的干涉作用。

说明

(1) 500Hz 的声波在常温下的波长约为 68cm，因此将 AP 管的长度做成波长的一半 34cm。如果用频率高一些的声波进行实验，则 AM 管的长度还应做得短一些。

(2) 用下述方法可判断两个扬声器的同名端：将扬声器的音圈与一灵敏电流计接成一个闭合回路（图 d），用手迅速将扬声器纸盆向里按一下，记住电流计指针的偏转方向。然后用同样方法测试另一个扬声器。如果两次指针偏转的方向相同，则前后两次接到电流计 A 端上的是同名端；如果两次指针偏转的方向相反，则第一次接电流计 A 端和第二次接电流计 B 端的是同名端。



(d)

方法六

器材 自制环型声波干涉仪，音频信号发生器，音频功率放大器，小型扬声器等。

环形声波干涉仪的制作方法

如图所示，用两根 T 形玻璃管、三根直玻璃管（其中右边两根粗细稍有不同，恰能互相套进）和四段厚壁软管（如听诊器软管）构成。由于右边两根玻璃管要上、下调节，因此右边两段软管要长一些。在右边较细的管壁上刻上刻度。

操作

(1) 将音频信号发生器输出的音频信号接到音频功率放大器的输入端，再将小型扬声器接在音频功率放大器的输出端上。开启两台仪器，扬声器中就能发出一定频率的正弦声波，其频率由音频信号发生器控制，响度由音频功率放大器控制。

(2) 将扬声器扣在干涉仪的 A 端（如两者口径不一样，还要做一个喇叭形接口），适当地调节音频功率放大器的输出功率，人耳就可以在干涉仪的 B 端听到声音。

(3) 在 1000Hz 到 4000Hz 的范围内，连续调节音频信号发生器输出信号的频率，可在干涉仪 B 端听到周期性轻、响变化的声音。当左右两条通道的长度差 x 是声波波长的整数倍时，两列声波互相加强，听到最响的声音；当 x 是声波半波长的奇数倍时，两列声波互相抵消，听到最弱的声音。

(4) 固定音频(如 3000Hz),改变右通道的长度,也同样能听到周期性轻、响变化的声音。

(5) 从右通道玻璃管的刻度上,读出连续四个轻、响、轻、响的点的坐标 x_1, x_2, x_3 和 x_4 ,则可算出声波的波长。

$$\lambda = \left| \frac{(x_4 - x_2) + (x_3 - x_1)}{2} \right|。$$

音调和频率

方法一

器材 发音齿轮,手摇离心转台,硬纸片(或赛璐珞片)等。

操作

(1) 将发音齿轮(如图)安装在离心转台上。一只手匀速转动皮带轮,带动齿轮匀速转动,另一手持硬纸片,让纸片的一个侧边接触转动着的任一个齿轮,则硬纸片随着齿轮的轮齿振动,发出一定音调的声音。加带转动齿轮可听见纸片发出的声音音调变高,说明发声体振动频率升高时,它发出的声音音调变高。

(2) 匀速转动齿轮(转速不小于 5 转/秒),使纸片依次接触 40 齿、50 齿、60 齿、80 齿的齿轮,可听到纸片振动发出的音调逐步升高,近似于音符中的 1、3、5、i 四个音调,说明发音体振动的频率升高 1 倍,它发出的音调就提高八度(由 1 变为 i)。

方法二

器材 教学示波器,话筒(阻抗大于 1k Ω),音叉组(256Hz,320Hz,512Hz 各 1 支),共鸣箱,橡皮槌等。

操作

(1) 如图(a)安装好实验仪器,话筒线的屏蔽层接到示波器的“接地”端,芯线接到示波器的“Y”输入端。Y 信号置于最灵敏的位置,扫描频率置于“100—1K”档。

(2) 将共鸣箱的开口对准话筒,它们之间的距离尽量近。用橡皮槌敲 256Hz 音叉后将音叉插在共鸣箱上,可听到共鸣箱振动的声音。调节示波器,使屏上出现四个稳定的正弦波[如图(b)甲]。

(3) 依次换用 320Hz,284Hz,512Hz 音叉,重复以上操作,可听到音调逐个升高,屏上出现的正弦波的个数也逐个增多(分别是 5 个,6 个,8 个)如图(b)乙、丙、丁。说明声源振动的频率越高,发出的声音音调越高。当四个声音的频率之比为 4 5 6 8 时,听起来这四个声音就相当于音符中的 1, 3, 5, i。

方法三

器材 音频信号发生器,音频功率放大器,扬声器等。

操作

(1) 将音频信号发生器产生的音频信号接到音频功率放大器的输入端,同时接到示波器上(示波器与音频功放器并联)。把扬声器接在音频功率放大器的输出端上。

(2) 开启各台仪器后,将音频信号发生器调在某一频率上(如 400Hz),调节功放放大器增益倍数,可听到扬声发出一个声音。然后调节

示波器，在屏上调出四个稳定的正弦波。

(3) 调高信号发生器的频率，耳朵能听到扬声器发出的声音音调逐渐升高，眼睛可看到示波器屏上的波形逐渐增多，说明音调随着频率的升高而增高。

附：音阶的频率

音符	C	D	E	F	G	A	B	C_1
名称	1	2	3	4	5	6	7	1
	dou	rai	mi	fa	sou	la	si	dou
频率(H_2)	256	288	320	$341\frac{1}{3}$	384	$426\frac{2}{3}$	480	512

响度和振幅

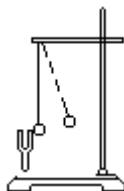
方法一

器材 音叉，橡皮槌，铁架台，硬泡沫塑料小球，细线等。

操作

(1) 用细线拴住硬泡沫塑料小球，悬挂在铁架台上。

(2) 用橡皮槌轻轻敲击音叉使它震动后，可以听到较轻的声音。让音叉一臂的外侧靠近并撞触小球（如图），可以看到小球被音叉弹开一个较小的角度。



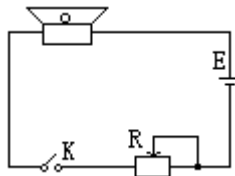
(3) 以橡皮槌用力敲击音叉，可听到较响的声音。且让音叉一臂的外侧接触小球，可看到小球被音叉弹开一个较大的角度。说明当声源振幅比较大的时候，音量较大；反之，则音量较小。

方法二

器材 动圈式扬声器（8 Ω），干电池，单刀开关，滑动变阻器（50 Ω、1.5A），乒乓球等。

操作

(1) 如图接好电路，扬声器平放在桌面上，纸盆口向上，乒乓球放在纸盆中。



(2) 将滑动变阻器的滑动触片放在阻值最大处，闭合开关K。在闭合的瞬间，可看到乒乓球有微小的跳动，并听到扬声器发出一声轻轻的“噼”声。

(3) 打开开关，将滑动变阻器的滑动触片放在阻值较小处，再合上开关，在闭合的瞬间可看到乒乓球有较明显的跳动，并能听到较响的“噼”声。说明当声源的振幅较大时，音量较大；反之，则音量较小。

方法三

器材 音叉（附共鸣箱），示波器，话筒（阻抗大于 $1k$ ），橡皮槌等。

(1) 按实验 125 方法二图(a)安装好仪器，并按该实验方法的操作(1)调好示波器。

(2) 敲一下音叉后将话筒对准共鸣箱的开口，距离尽量近一些，调节示波器的频率微调旋钮，在荧光屏上显现 3—5 个稳定的正弦波。

(3) 用力敲击一下音叉，可在荧光屏上看到幅度较大的正弦波同时听到较响的音叉振动的声音。随着音叉声音的逐渐减小，可看到荧光屏上正弦波的幅度也逐渐减小。说明声波的幅度较大时声音较响；反之，则声音较弱。

声波的反射

方法一

器材 机械手表，小号蜡纸筒 4 只，3mm 厚铝板等。

操作

(1) 各将两只蜡纸筒对接，制成两根长约 60cm 的纸筒。

(2) 一个手持手表和一只纸筒，另一人手持另一只纸筒和一块铝板，使两筒呈“八”字型位置（如图）。将手表靠近一只筒端，耳朵靠近另一只筒端，适当地调节两筒和铝板的位置，即可听到筒内传来手表走动的声音。

(3) 手表、耳朵、纸筒的位置不变，取走铝板，可以感觉到手表的声音明显减轻。再将铝板放在原来位置上，声音又增强了，说明铝板对声波有反射作用。

注意 手表和耳朵的直线距离不能太近，以免耳朵从纸筒外直接听到表的走动声音。

方法二

器材 音频信号发生器，自制吸声筒，高阻话筒，示波器，金属板，木板，塑料包装板等。

吸声筒的制作方法

用硬纸板卷成一个筒，内层粘上薄薄的毛毡，以利于吸声。

操作

(1) 将 65mm 口径的扬声器接在音频信号发生器的方波输出端上，调节信号输出幅度，使扬声器发出“嘟……”声响。把自制吸声筒罩在扬声器前方，把话筒连接在示波器输入端，如图所示。

(2) 将金属板放置在吸声筒前方，在适当方向上放上话筒，调节金属板的位置，直至荧光屏上出现清晰的方波。

(3) 移开金属板，可看到示波器上的方波幅度明显减小，甚至消失。再把金属板放回原处，又可看到清晰的方波，即可说明金属板对声波的反射作用。

(4) 换用其他的板重复上述实验，比较示波器上方波的幅度大小，可说明各种材料反射声波能力的区别。

声波的共鸣

方法一

原理 一列声波从固定面上反射回来。由于半波损失，相位恰好相反，因此离反射面距离 $l=(2n+1) \cdot \lambda/4$ 的地方，即 l 等于声波波长的 $1/4$ 、 $3/4$ 、 $5/4$ ，... 倍的地方，入射波与反射波互相加强，产生共鸣。

器材 保温瓶。

操作

(1) 把耳朵靠近保温瓶的瓶口，听到“嗡嗡”的声音。估测保温瓶的深度 h ，听到的大约是频率 $f=v/4h$ 的声音 (v 为空气中的声速)。

(2) 向保温瓶中灌一些水，再把耳朵靠近瓶口，听到“嗡嗡”声的音调变高了。这是因为保温瓶中灌水后，空气柱变短，与之共鸣的声波波长也就短了。

方法二

器材 音叉 3 个 (两个频率相同，一个频率相差较远)，阻值为 800 的耳塞，音频放大器，教学示波器，导线若干等。

操作

(1) 去掉耳塞的上盖，放在发声体上作为传感器，耳塞的振动铁片直接与发声体接触。

(2) 按图连接器材，低频放大器的输入端接传感器，输出端接示波器。

(3) 用橡皮槌敲击音叉 A，然后调节示波器上的各种控制旋钮，使示波器的屏上显示出稳定的正弦波，其振幅随音叉振动的衰减而逐渐减小。

(4) 取一个频率与音叉 A 不同的音叉 B，放在靠近音叉 A 处，使它们的共鸣箱开口相对。用橡皮槌敲击音叉 B，观察示波器屏上音叉 A 受迫振动后产生的声波图象。

(5) 换取一个频率与音叉 A 相同的音叉，重复操作 (4)，可看到音叉 A 受迫振动后产生的声波振幅显然要大得多，说明当频率相同时，两个音叉发生了共鸣。

用共鸣法测声音的波长和声速

方法一

原理 同实验 128 方法一。

器材 440Hz 音叉，橡皮槌，塑料管 (长约 90cm)，用以固定音叉与塑料管的木架，大量筒，铁架台，米尺等。

操作

(1) 用木架将音叉固定在塑料管上方，在大量筒中装适量的水后手持木架将塑料管插入量管中，如图(a)。

(a)

(b)

1. 橡皮管
2. 贮水漏斗
3. 音叉
4. 长玻璃筒
5. 米尺

(2) 用橡皮槌敲击音叉后，手持木架慢慢地提升塑料管，增大塑料管内空气柱的长度，当空气柱达到某一长度时，声音明显变响，说明空气柱与音叉发生了共鸣。

(3) 用米尺测量出共鸣时空气柱的长度（即从音叉到水面的距离） l ，根据 $\lambda=4l$ ，可估测出声波的波长。

(4) 将估测出的声波波长 λ 乘以音叉的固有频率 f 就可估测出声速。

建议 如果量筒和塑料的长度允许，可测量出接连两次发生共鸣时空气柱的长度差 l ，再用 $\lambda=2l$ 估算出声波的波长。这样做的好处是可以消除一部分系统误差。

说明 本实验还可以用图(b)所示装置来做，右边的长管可用废日光灯管改制，左边的漏斗可用大塑料瓶截底制成，此装置只要调节左边漏斗的高度就可以改变右边长管中空气柱的长度。

方法二

器材 大量筒、两端开口的玻璃管，低频信号发生器，喇叭，可调节高度的支架（自己装配），铁架台等。

操作

(1) 按图装置器材。

(2) 改变音频振荡频率，听到喇叭发出一定频率的声音。

(3) 调节支架高度（保持喇叭与玻璃管上端距离不变），改变空气柱长度。

(4) 当玻璃管内空气柱长度等于声波波长的 $1/4, 3/4, \dots$ 倍时，声音将显著地增强，发生共鸣现象。测出最短共鸣空气柱长度 l ，由 $\lambda=4l$ 可估算出声波的波长。

(5) 从低频信号发生器上读出声波的频率 f ，即可估算出声速 $v=f \cdot \lambda$ 。

(6) 多次改变声音的频率，重复操作（3），（4），（5），最后求出声速的平均值。

说明 本实验也可以用方法一的说明部分来完成。

方法三

器材 音频信号发生器，音频功率放大器，示波器，高阻话筒，光具座，扬声器（8 Ω ，0.25W），厚金属板（20cm \times 20cm）等。

操作

(1) 照图安装仪器，厚金属板固定在光具座一端，板面和导轨垂直。扬声器安装在导轨另一端，其纸盆正对金属板中心。话筒在扬声器和金属板中间任一地方，话筒的头部和扬声器，金属板中心等高。扬声器接在功率放大器的输出端，信号发生器接在功率放大器的输入端，话筒接到示波器的“y”输入端。

1. 扬声器 2. 音频功率放大器
3. 信号发生器 4. 示波器
5. 话筒 6. 厚金属板

(2) 使信号发生器产生 2000Hz 左右的正弦信号，调节信号发生器的频率或扬声器的位置使示波器屏上出现 2—3 个稳定的正弦波(此时已形成驻波)。如果屏上正弦波波幅太小，可调节功率放大器，适当增大扬声器的音量。

(3) 沿着导轨移动话筒，当示波器显示示波形幅度最小时，就是驻波的节点。从光具座的标尺上读出相邻两个驻波节点之间的距离 s 。

(4) 重复操作 (3)，测出几对相邻节点之间的距离，求出它们的平均值 \bar{s} 。声波的波长 $\lambda = 2\bar{s}$ ，从信号发生器上读出声波的频率 f ，声波波速 $v = \lambda \cdot f$ 。

注意

(1) 声音的频率要在 2000—3000Hz 之间选择，这样驻波的波节比较明显，可减少测量误差。

(2) 反射板要选用硬度大、光洁的厚金属板，尽量改善它对声波的反射性能。反射板安装要牢固，尽量和导轨完全垂直。

热 学

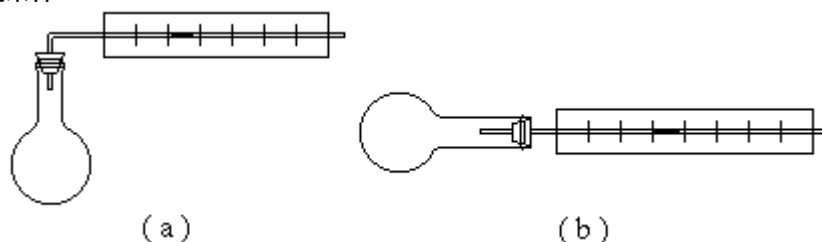
气体的热膨胀

气态物质的热膨胀相对的说是比较明显的，但却不容易直接观察到，这是因为常见的气体大多是无色透明的。因此，采用多种方式显示气体体积的变化，是设计气体热膨胀实验的一个基本要点。

方法一

器材 烧瓶 (250mL)，弯成直角形的细玻璃管 (内径 2mm 左右)，橡皮塞，画有刻度的白纸板，胶带纸，染色水等。

操作



(1) 在细玻璃管内滴入染色水，并将有关器具按图 (a) 所示组装在一起。

(2) 用双手握住烧瓶，给瓶内气体加热，会看到玻璃管内的小水柱向右移，表明空气受热膨胀；手离开后，瓶内气体温度降低。小水柱向左移，表明气体在温度降低时，体积减小。

注意

(1) 为防止小水柱在重力作用下流到瓶里，应使用弯成直角形的玻璃管；如用直玻璃管，可按图 (b) 放置，保持小水柱仍在水平方向。

(2) 烧瓶也可用废灯泡和其他玻璃瓶代替。但代用的玻璃瓶应具有

以下特点：瓶壁较薄；瓶的容积远大于玻璃管的容积。

(3) 可在玻璃管、橡皮塞及烧瓶口用凡士林（或石蜡）涂抹密封，防止漏气。

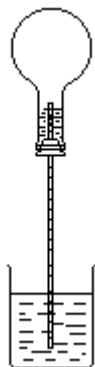
(4) 当环境温度接近人手的表面温度时，可用热毛巾缓缓给烧瓶加热。

方法二

器材 大烧瓶，细直玻璃管，橡皮塞，热毛巾，烧杯，染色水等。

操作

(1) 在烧杯内注入适量的染色水，再把装有橡皮塞和细玻璃管的烧瓶倒置，将玻璃管口浸入染色水中，如图所示。



(2) 用热毛巾给烧瓶加热，瓶内气体受热膨胀，可看到从玻璃管口向外冒气泡。

(3) 停止加热，烧瓶内的气体温度下降，体积收缩，染色水沿玻璃管上升，并有一部分进入瓶内。

注意 本实验成功的关键是防止瓶塞处漏气，必要时可用蜡把瓶塞处密封起来。

说明 本实验装置及现象常作为检查装置气密性的一种方法。

方法三

器材 大烧瓶，橡皮塞，玻璃管，酒精灯等。

操作

(1) 在烧瓶瓶塞上的玻璃管上扎一瘪的气球。演示时，用酒精灯给烧瓶均匀加热。这时瓶内气体受热膨胀，原来下垂的气球会胀大并竖立起来，如图所示。

(2) 停止对烧瓶加热并让它自然冷却，气球又会逐渐变小。

注意 本实验成功的关键是瓶塞、玻璃管和气球等结合处不能漏气。烧瓶也可用其他开口较小，容量较大的薄壁玻璃容器替代。

说明 本实验也可用乳胶薄膜扎在广口瓶口上，成为一密闭容器。把它置于热水（或冰水）中，由薄膜的外凸（或内凹）来显示气体的热胀冷缩现象。

液体的热膨胀

本实验介绍了三个实验方法。方法一显示了液体的热胀冷缩现象；方法二定性地比较了两种液体体胀系数的大小；方法三定量地测定一种液体的体胀系数。

方法一

器材 大烧瓶，细玻璃管（内径约 2mm），橡皮塞，铁支架，酒精灯，石棉铁丝网，红色水（温度在 4℃ 以上），白纸等。

操作

（1）在烧瓶内注满染成红色的水，塞紧瓶塞后使液面上升至细玻璃管内（如图）。把白纸条贴在细玻璃管后面，并在白纸上标记出液面的位置。

（2）用酒精灯对烧瓶加热，可观察到细管内液面上升；停止加热，让其自然冷却，液面下降。这表明 4℃ 以上的水具有热胀冷缩的性质。

注意

（1）演示时瓶内水温不能低于 4℃，因 0—4℃ 的水会发生反常膨胀。

（2）瓶塞与瓶口应密封，瓶内不能留有气泡。

（3）演示时，如发现管内液面先降一点，然后才持续上升，这是因瓶体先受热膨胀的缘故。玻璃的膨胀系数与液体相比，它的膨胀系数极小，因此不会影响实验结果。

说明 几种常见液体的体胀系数如下表：

液 体	体胀系数 (度 ⁻¹)	液 体	体胀系数 (度 ⁻¹)
水 银	1.82×10^{-4}	煤 油	1.0×10^{-3}
水 (20℃ 左右)	2.1×10^{-4}	酒 精	1.1×10^{-3}
甘 油	5.0×10^{-4}	苯	1.24×10^{-3}
硫 酸	6.7×10^{-4}	乙 醚	1.66×10^{-3}

用类似的装置也可用其他液体演示热膨胀现象。苯，乙醚虽有较大体胀系数，因它们有强挥发性，不宜应用。煤油体胀系数虽大，但着色较难。酒精染色较易，柴油有色无需再染。所以选用酒精或柴油演示，效果较好。用酒精或柴油演示，因其易燃，不要用火加热，通常采用热水浴就可看到它们体积的变化。

方法二

器材 大号试管，橡皮塞，细玻璃管，大烧杯、热水等。

操作

（1）两只相同的大号试管内分别注满水（染成蓝色）和酒精（染成红色），然后如图所示安装好。

（2）往大烧杯内注入 4℃ 以上的冷水。当试管内液体温度与冷水相

同时，再往试管内注入少量液体，使两根细管中的液面相平。

(3) 把大烧杯中的冷水换成热水，再把两只试管浸入热水中。可见装有酒精（红色）的细管液面上升得快，升得高。表明在相同条件下，不同液体的热膨胀程度是不同的。

说明 酒精的体胀系数（ $\beta_{酒精}=1.1 \cdot 10^{-3} \text{度}^{-1}$ ）约是水的体胀系数（ $\beta_{水}=2 \times 10^{-4} \text{度}^{-1}$ ）的 5 倍。

方法三

目的 测量液体的体胀系数。

器材 烧瓶，量杯（筒），吸量管（2mL），橡皮塞，温度计，加热器，待测液体等。

操作

(1) 在烧瓶内灌满待测液体并测出其体积 V 。把容量为 2mL 的吸量管倒插在烧瓶的橡皮塞孔里；橡皮塞另一孔中插入温度计。

(2) 调节吸量管插入橡皮塞的深度，使液面达 2mL 刻度 M 处，记下这时温度 t_1 。

(3) 用微火加热烧瓶里的液体，当液体受热膨胀液面升至吸量管顶时，再记下温度 t_2 。

(4) 计算。如已测得 $V=285\text{mL}$ ， $t_1=19$ ， $t_2=33$ 则 $T=t_2-t_1=33-19=14$ (K)，所以待测液体的体胀系数 为

$$\beta = \frac{\Delta V}{V \cdot \Delta T} = \frac{2\text{cm}^3}{285\text{cm}^3 \times 14\text{K}} = 5.0 \times 10^{-4} (\text{K}^{-1})$$

说明 一般实验中的液体总是装在容器中，当液体温度变化时，盛液体的容器的体积也会发生变化，这就给准确地测量液体体积的变化带来一些困难。但一般固体的体胀系数总是小于液体的体胀系数，例如玻璃的体胀系数要比酒精小两个数量级，因此可以忽略容器体积变化给实验带来的误差。本实验中的吸量管也可用其他定容量容器（如注射器筒）代替。

固体的热胀冷缩

固体的体胀系数是很小的，一般情况下人眼无法直接观察到固体的热膨胀。设法把这种微小的变化，放大到能明显看出的程度，是演示固体热胀冷缩现象的关键。方法一、二、三、四提供了一些利用轮轴、杠杆等原理将有关现象加以放大的教具；方法五、六则用以说明固体在温度变化时产生形变虽小，但阻碍这种形变时，却会产生很大的力。

方法一

器材 金属线胀演示器（J2261-2 型），酒精，毛巾，冷水等。

金属线胀演示器如图（a）所示。它由底座、两根不同的金属棒（铜和铁）、弹片、指针、刻度板和酒精碟等组成。金属右端插进支架的轴

上，并用螺丝顶住，左端穿过支架，可以自由伸缩。当金属棒长度增加时，左端向左伸出，并通过弹片带动指针偏转。金属棒伸长越多、指针偏转角度越大。

操作

(1) 调整演示仪右端支架的顶针螺丝，使指针正对零刻度。

(2) 在酒精碟里注入适量酒精并把它点燃，使金属棒受热，可以明显看到指针偏转角度不断增加，说明金属棒受热膨胀。

(3) 比较两根指针的偏转角度，铜棒比铁棒偏转角度大。表明同样受热，铜比铁膨胀大。

(4) 用碟盖把火焰盖灭，并在金属棒上盖上浸过冷水的毛巾，使它们温度降低，指针偏转角度减小，说明金属棒受冷收缩。

说明 另一种常见的金属线膨胀演示仪如图 (b) 所示。操作方法与上类同。

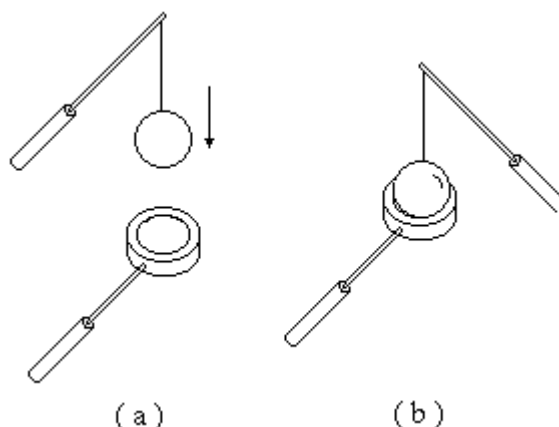
建议 可用简易器件替代线膨胀演示仪装置如图 (c)，把一根长约 0.5m 的黄铜（或其他金属棒）的一端用铁夹固定，另一端紧压在可滚动的木棍上，在木棍的一端固定一根红色塑料片（或麦秆）作为指针。当用酒精喷灯加热黄铜棒时，铜棒受热膨胀后就会使木棍在木块上微微滚动，引起指针明显的偏转。

方法二

器材 体膨胀演示器，酒精灯，湿毛巾等。

操作

(1) 体膨胀演示器如图 (a)。使铁环上、下移动，观察室温下的铜球能够通过铁环。



(2) 用酒精灯火焰加热铜球。2—3 分钟后，由于铜球受热膨胀，不能穿过铁环，如图 (b)。

(3) 加热铁环，或用冷湿毛巾使铜球冷却，则铜球又能通过铁环。

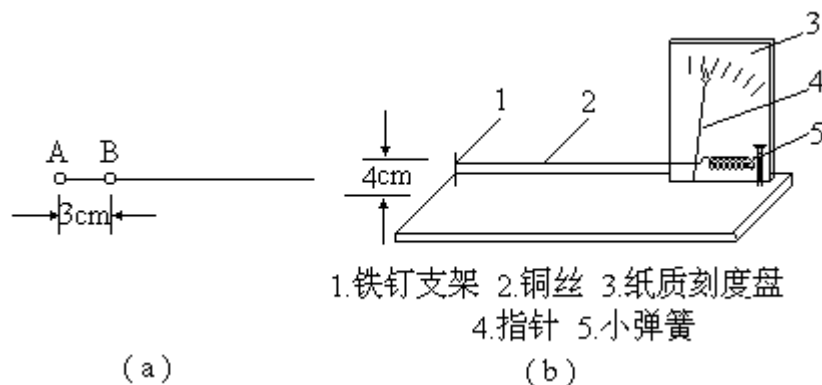
方法三

器材 自制固体热膨胀演示仪，蜡烛等。

固体热膨胀演示仪的制作方法

取长约 1m、直径约 1mm 的细铜丝（或铁丝），截分为 70cm 和 30cm 两段，其中 30cm 一段按图（a）所示加工成指针形，A 端套入一小铁钉并固定好，B 圈挂在弹簧钩上（弹簧呈拉伸状态），整个仪器按图（b）所示组装。

操作 用烛焰加热铜丝，由于热膨胀，铜丝伸长，指针将会以 A 为轴偏转；俟铜丝自然冷却后，铜丝收缩，指针同样能指示出来。



方法四

器材 自制固体热膨胀演示仪等。

固体热膨胀演示仪的制作方法

图中 1 为木板底座，2 为 3cm 左右的铁钉，3 为细铜丝，4 为支柱，5 为金属指针（可绕转轴 6 转动，其重心在转轴右端），7 为纸质刻度盘。按图装置好这些器材即可。

操作 把细铜丝系于指针左端的小孔和铁钉之间，处于张紧状态。点燃火柴烧细铜丝，铜丝热膨胀后，指针将顺时针偏转。停止加热后，指针将很快返回原位，现象十分明显。

注意

（1）指针的重力矩必须大于转轴对它的摩擦力矩。这样，当细铜丝受热放松时指针能靠重力顺时针转动。

（2）铁钉和支柱一定要固定牢。

方法五

目的 演示固体冷缩受阻时所产生的力。

器材 固体缩力演示器，加热器，湿布等。

固体缩力演示器的结构如图示。它由生铁座架、铁把手、生铁棍、钢棒等组成。生铁座架两边各有一个卡口以便承放钢棒，钢棒一端有圆孔可插入生铁棍。另一端螺纹上旋有一个铁把手。

操作

(1) 用加热器把钢棒加热至暗红色，在左端孔中穿入生铁棍后，放在座架两端的卡口内，旋紧铁把手。

(2) 让钢棒自然冷却（或用湿布蒙在钢棒上加速冷却）收缩，这时会产生巨大的力，使生铁棍断裂。

注意

(1) 不要把钢棒烧得过热，以减轻氧化程度，延长使用寿命。

(2) 生铁棍被拉断时、有时会飞出，应注意安全。

建议 本实验应选用生铁棍，因它比软铁棍容易折断。该生铁棍多次演示需要量较多，可取电焊用的生铁焊条作为代用品。

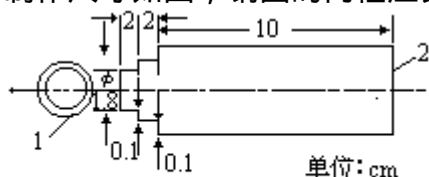
方法六

目的 观察物体的热胀冷缩现象；观察物体冷缩受阻产生很大的力；观察不同材料有不同的线胀系数。

器材 自制铁棒，铜圈，酒精灯，镊子，烧杯等。

铁棒的制作方法

制作尺寸如图，铜圈的内径应比 1.8cm 小 0.03—0.05cm。



1. 铜圈 2. 铁棒

操作

(1) 用镊子夹住铜圈，套不进铁棒细端。

(2) 用镊子夹住铜圈在酒精灯上烧热后能套入铁棒，浸入冷水里，铜圈将紧箍在铁棒细端上，很难退下。

(3) 手持铁棒，用酒精灯加热铜圈。用镊子就较易使铜圈从铁棒上退下。

注意

(1) 本实验成功的关键是保证铜圈内径比铁棒细端外径小 0.03—0.05mm。

(2) 铜圈套入铁棒边缘即可，便于再加热时易使铜圈退下。

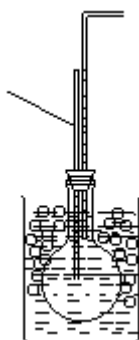
水的反常膨胀

方法一

器材 250mL 烧瓶，600mL 大烧杯，橡胶塞，温度计，细玻璃管，冰，纯水等。

操作

(1) 将温度计、细玻璃管（内径 2—4mm、长 30cm）、双孔橡胶塞装置在盛满纯水的烧瓶上，使细玻璃管保持有约 15cm 高的水柱，如图所示。



(2) 将烧瓶放在烧杯的冰水混合物中，达到热平衡后，烧瓶内的水为 0°C ，观察细玻璃管中水面位置，并留一标记。

(3) 将盛有冰水混合物的烧杯取走，让烧瓶中的水在室温中从 0°C 开始上升。可以观察到：当水温开始从 0°C 上升时，细玻璃管中水面下降得较快，反常膨胀明显，随着温度上升到 $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$ 时，细玻璃管中水面下降到最低点。在细玻璃管上再留一标记并记录下这时的温度。然后，随着水温的继续上升，细玻璃管中水面又随之上升，属正常膨胀。

注意

(1) 温度计和细玻璃管要紧密穿过双孔橡皮塞，并跟烧瓶塞紧，不能漏水；烧瓶内不能留有气泡。

(2) 实验中要用蒸馏水或其他较纯净的水，切勿直接在水中着色。

分析

反常膨胀的温度应是 4°C （严格说是 3.98°C ），但从实验过程可发现，细玻璃管中的液面下降到最低位置时的温度往往大于 4°C （约为 5°C 左右）。这是由于烧瓶的容积也随温度发生变化的缘故。（玻璃的体胀系数 $\alpha_{\text{玻璃}}=2.5 \times 10^{-5} \text{度}^{-1}$ ）。

如要消除由于烧瓶容积变化所带来的误差，可采用“容器膨胀补偿”办法达到实际容积不变或基本不变的要求。具体做法是：在玻璃容器中放入另一种体胀系数比玻璃大得多的固体，如铝块、硬橡胶球等，（ $\alpha_{\text{铝}}=6.9 \times 10^{-5} \text{度}^{-1}$ ， $\alpha_{\text{硬橡胶}}=2.3 \times 10^{-4} \text{度}^{-1}$ ）经过计算（或通过实验确定）小铝块（或硬橡胶）的放入量，就能在 4°C 使细玻璃管中水面恰好下降到最低点。

方法二

器材 自制水的反常膨胀实验仪，温度计，冰块，食盐，蒸馏水等。

水的反常膨胀实验仪的制作方法

如图(a)所示，在高 25cm 、半径为 4cm 的圆铁筒外焊接一半径为 10cm 的盛冰盘。圆铁筒上部和下部的侧壁各挖一孔，孔中配有橡皮塞并各插入一支温度计。

操作

(1) 在圆铁筒内注入 $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ 的蒸馏水（近满）。

(2) 在环形冰盘中放入碎冰块并掺入少量食盐，使筒内贮水逐渐冷却。

(3) 观察并比较上、下两支温度计的读数。当下端温度计指示值为

4 时，读数就不再下降，而上部温度计继续下降至零度左右，并在水中出现冰晶。这表明水在 4 时的密度最大。

建议 如制作上述实验仪有困难，可取一段长为 20cm、直径约为 2cm 的玻璃管或薄壁塑料管，另取一个可乐瓶截取上半部。把它们和温度计等按图 (b) 安装在一起，可达同样效果。

双金属片

方法一

目的 演示不同金属的热膨胀性能不同。

器材 双金属片（又称复棒），酒精灯等。

操作 双金属片是由两片线膨胀系数不同的金属片焊接或铆接而成。如图所示，用酒精灯给铜、铁双金属片加热，双金属片就向铁片那边弯曲，这表明当同样受热时，铜片膨胀比铁片大。

注意 按图所示演示后，应把双金属片翻过来，再对另一面加热，重新演示一次。即应将双金属正反两面各烧一次，结果都向铁片一面弯曲，证实双金属片弯曲确实是由于铜片比铁片膨胀大，以消除学生可能产生的其他猜疑。

方法二

器材 自制双金属片，酒精灯等。

双金属片的制作方法

取厚度相同的锌、铁（或铝、铁）薄片各 1 张，剪成长 12cm、宽 1cm 的条状，叠合后每隔 1cm 打一小孔把它们铆合在一起。为使用方便，可将双金属片固定在木柄上，如图所示。

操作

(1) 用酒精灯对平直的双金属片加热，则双金属片向铁片那边弯曲。

(2) 如将平直的双金属片浸在冰水中冷却，则弯曲方向与上述情况相反。

说明

制双金属片的两种金属最好用膨胀系数相差较大，比热较小的常见金属材料（如铁，铜，铝，锌等）。兹将它们膨胀系数列在下页表中。

现成的双金属片仪器是用铜片和铁片铆合而成，由于两者线胀系数相差不大，效果不够理想；若采用铁和锌，或铁和铝制成双金属片、演示效果较好。另外，铆合双金属片的铆钉数目不能太少，否则，加热后锌片会在两只铆钉间鼓起，但整条双金属片并不弯曲。

金属材料	铁	纯铜	黄铜	铝	锌
线胀系数(度 ⁻¹)	1.2×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.9×10^{-5}	2.38×10^{-5}	2.86×10^{-5}

方法三

器材 废日光灯启动器，小电珠，干电池，导线，火柴等。

操作

(1) 取去启动器外壳，把氖泡打碎，注意不要弄断其下端的金属丝，露出动触片和静触片。其中U形的动触片就是一双金属片。

(2) 按图连接电路。用点燃的火柴加热动触片，动触片使电路接通，电珠发光；火柴熄灭后，动触片自然冷却，离开静触片，切断电路，小电珠熄灭。

传 导

对金属来说，在热传导中起主要作用的是自由电子。这才使金属既是电的良导体，又是热的良导体。一般来说，金属的导热系数大，是热的良导体；冰、玻璃、气体等的导热系数小，是热的不良导体；而一般纯金属的导热系数又大于合金的导热系数（附录中列出了几种常见物质的导热系数）。

方法一

器材 金属棒，方座支架，酒精灯，凡士林油，火柴等。

操作

按图所示把金属棒固定在铁架台上，用凡士林在金属棒上粘几根火柴。然后用酒精灯给金属棒A端加热。可以看到，离A端最近的火柴先掉下，然后其他火柴依次掉下，离A端愈远的火柴掉下得愈迟。这表明，热是从金属棒的温度高的一端沿着金属棒传到温度低的一端的。

方法二

原理 氯化钴($\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 在空气中通常呈蓝色，含有2个结晶水，潮湿时它变成粉红色，含有6个结晶水。利用氯化钴得失水分时颜色发生变化的性质可演示热传导。

器材

铝片（或铜片，铁片），棉纸，酒精灯，氯化钴溶液，木块等。

操作

(1) 把铝片裁成半边弯半边直的片条，宽约2cm、长约30cm，然后把它嵌在木块支架的狭槽中，如图所示。

(2) 取棉纸（例如打字蜡纸上的棉纸）剪成与铝片相同的一弯一直

的形状，浸在氯化钴水溶液后贴在铝片条上（粘液不可太多并要均匀）。

（3）用酒精灯加热铝片条中部，片刻即可看到粉红色的纸条从加热处向两边依次逐步变成蓝色。这是由于由铝片传导的热将棉纸上的氯化钴溶液中的水蒸发掉，故颜色从粉红色变成蓝色。从而生动显示出热沿着物体从温度高的部分向温度低的部分传导。

说明 氯化钴，一般中学化学实验室均有，溶解于水后即成氯化钴溶液，呈粉红色。

附 几种常见物质的导热系数

物质	温度 ()	导热系数 W/(m · k)	物质	温度 ()	导热系数 W/(m · k)
空气	0	0.0239	铅	0	35.2
水	20	0.599	软铁	18	54.4
汞	0	11.9	黄铜	18	108.9
木材		0.126 ~ 0.419	铝	20	201.1
玻璃		0.838	铜	0	385.5
冰	0	2.30	银	18	421.5

*本表所示导热系数，凡温度与表中所温度相差 ± 10 时，基本都可适用。

物质的导热本领

方法一

器材 热传导演示器，酒精灯，黄油（或凡士林），火柴梗等。

热传导演示器（J2260型）的构造如图示。它由马蹄形三足支座、弯形支柱、铜接头、铜座头、及规格相同的铁棒、铜棒各一根组成。

操作

（1）将演示仪放在平台上，分别在铁棒和铜棒的六个圆凹内涂以少许黄油或凡士林（用量尽量相同），并在每个圆凹内插上一根火柴梗。

（2）用酒精灯加热铜接头，热量由铜接头、铜座头顺金属棒向上传递，片刻后即出现两金属棒上的火柴梗由靠近铜座头处起向外依次倒落的现象。且铜棒上的火柴梗先于铁棒上的倒落。这表明，铜棒和铁棒都能导热，但它们的导热性能不同。

注意：有些热传导演示器的导热棒有三根，分别为铜棒、铁棒、铝棒。铝棒的导热性能比铜差，比铁好。但应注意，纯铜（紫铜）、纯铝、黄铜、康铜的导热系数依次为 $386\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $202\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $109\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $23\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。可见纯铝的热传导性能比纯铜差，但比铜的合金好。（部分成品所用的铜质导热棒并非纯铜（紫铜），而是黄铜，实验结果将是铝棒比铜棒传热性能好。）自己设计有关教具，在选择导热材料时应注意到纯铜和铜的合金在导热性能上有很大差别。

方法二

器材 铜丝和铁丝各 1 根（长约 30cm、直径约 2mm），酒精灯，铁支

架，火柴梗，石蜡等。

操作

(1) 将铜丝的一端和铁丝的一端互相绞接后，两端各用铁支架固定。用蜡将火柴梗等间隔(3—4cm)的分别粘在铜丝和铁丝上，如图所示。

(2) 用酒精灯加热绞接处，粘在铜丝上的火柴梗比粘在铁丝上的等距离处的火柴梗先掉下，表明铜比铁导热性能好。

注意：铜丝最好选纯铜(紫铜)材料。纯铜的导热系数约为 $386\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，铁的导热系数约为 $54\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。

方法三

目的 演示液体能传导热，但不同液体传热的本领不同。

器材 紫铜棒，试管，酒精灯，钢珠，水，水银，凡士林油及铁支架等。

操作

(1) 将铜棒弯成“门”字形，两端分别插入装有水和水银的试管里，试管底端各用凡士林粘一小钢珠。

(2) 用酒精灯对铜棒中部加热，稍过片刻装有水银试管下的钢珠脱落，可是装有水的那支试管下的钢珠需较长时间才落下。说明水银的导热性能比水好。一般地说，除水银(金属)以外，其他液体都是热的不良导体。

水和空气是热的不良导体

方法一

器材 酒精灯，烧瓶，试管，小鱼，铁支架等。

操作

(1) 烧瓶里放一条小鱼，按图(a)那样给烧瓶瓶颈部的水加热，等一会儿上面的水已经沸腾可是下面的水还不烫手，小鱼仍在安然游动。这表明水不善于传热。

(2) 按图(b)那样让试管口斜向下方夹在铁支架上，给试管底部的空气加热，把手指放在试管口处。加热一段时间后，盖灭酒精灯，然后用火柴去接触刚才加热的试管底部，火柴即刻被点燃。这说明试管底部温度是很高的，也说明试管底部空气的温度也是较高的，但在管口的手指还不觉得热，这表明空气不善于传热。

方法二

器材 酒精灯，试管，铁支架，细铁丝，萘粒，冷水等。

操作

(1) 往夹在铁支架上的试管内注入约占试管容积 $3/4$ 的水。让一粒

萘丸沉入试管底部，另一粒萘丸用铁丝圈悬于水中靠近水面处（如图）。

（2）用酒精灯给试管上部的水加热。可发现，靠近水面处的萘丸很快熔解，而在水底处的萘丸在加热达半小时后仍未熔解。表明水不善导热。

方法三

器材 玻璃管（或破底试管），温度计，橡皮塞，酒精灯，铁支架等。

操作

（1）在玻璃管下端装一插有温度计的橡皮塞，往管内注入适量的水（如图 a）。用酒精灯对试管上部加热。当上部水呈沸腾状态时，下端温度计读数仍较低（仅几或几十摄氏度）。表明水是热的不良导体。

（2）在玻璃管两端各装一插有温度计的橡皮塞。用酒精灯加热管内上部的空气（如图 b）。当上端温度计示数达 90 左右时，下端温度计示数变化仍很小。表明空气不善于传热。

研究水的冷却规律

本实验介绍了一种探索、研究物理规律的方法。这种方法首先根据有关知识假设一种规律，然后取得所需要的实验数据，最后检验所设规律是否正确。这是一种具有普遍意义的方法。

方法一

原理 当物体的温度 T 高于周围空气的温度 T_0 时，物体将自然冷却。设在 t 时间内，物体放出的热量为 Q 。不难想象：物体的温度与周围的温度差得越大，热传递越快，因此 Q/t 首先与温差 $(T-T_0)$ 有关。另外，热传递的快慢也一定与物体的表面积、光洁程度、颜色和周围介质等因素有关。某一物体在某一特定环境中，这些因素都是不变的。因此可以假设

$$Q/t = E(T - T_0)^n$$

式中 E 为冷却系数，由冷却物体的性质及周围环境所决定； n 是一个待定的指数（ T 表示温度， t 表示时间）。

因为 $Q = mc \Delta T$ ，两边都除以 t ，可得到

$$Q/t = mc \Delta T / t$$

将 式代入 式，可以得到

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{E}{mc} (T - T_0)^n$$

对 式两边取对数

$$\ln(\Delta T / \Delta t) = n \ln(T - T_0) + \ln\left(\frac{E}{mc}\right)。$$

在实验中需要测出不同温差 $T-T_0$ 时的降温速率 $T/\ t$,只要 $\ln(T/\ t)$ 和 $\ln(T-T_0)$ 成线性关系,便可以证明 式的假设是正确的,并且可以求出 E 和 n 的值。

器材 温度计(0 —100 ,分度为 1) ,烧杯,酒精灯,铁架台,秒表,纱布等。

操作

(1) 将一块小纱布包裹在温度计的水银泡上。用酒精灯将烧杯中的水烧开后将温度计浸入沸水中,直至其读数升到接近 100 。

(2) 把温度计从沸水中取出,让它自然冷却(温度计尽量不要晃动)。每隔一定的时间间隔(例如 10s),记录一次温度 T 。直到在 10 秒钟内温度变化小于 2.0 时停止观察。

(3) 在实验前后各测一次室温,取它们的平均数作为室温 T_0 。

(4) 取 $\frac{T_{n-1} - T_{n+1}}{2\Delta t}$ 作为 $T = T_n$ 时的冷却速率

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_{T=T_n} = \frac{T_{n-1} - T_{n+1}}{2\Delta t}。$$

以横轴代表 $\ln(T - T_0)$,纵轴代表 $\ln(\Delta T / \Delta t)$,作出 $\ln \frac{\Delta T}{\Delta t} - \ln(T - T_0)$

图,可得到一条直线。

(5) 用图解法求出直线的斜率 k 和截距 b ,即可求出 式中的 $n=k$, $E=mce^b$ 。将 E 和 n 代入 式,得出冷却规律。

实例 实验中记录下的数据如下: 85.0 ; 79.1 ; 73.80 ; 69.0 ; 64.6 ; 60.6 ; 57.0 ; 53.7 ; 50.7 。时间间隔 $t=10s$,室温: $T=10.0$ 。

将 $\frac{85.0 - 73.8}{20.0} = 0.560$ 作为 $T = 79.1$ 时的冷却速率; 将 $\frac{79.1 - 69.0}{20.0} =$

0.505 作为 $T=73.8$ 时的冷却速率;, 可得到下表:

$T(^{\circ}C)$	79.1	72.8	69.0	64.6	60.6	57.0	53.7
$\Delta T/\Delta t$	0.560	0.505	0.460	0.420	0.380	0.345	0.315
$T-T (^{\circ}C)$	69.1	63.8	59.0	54.6	50.6	47.0	43.7
$\ln(T - T_0)$	4.24	4.16	4.08	4.00	3.92	3.85	3.78
$\ln \frac{\Delta T}{\Delta t}$	-0.580	-0.683	-0.777	-0.868	-0.968	-1.064	-1.155

作出 $\ln \frac{\Delta T}{\Delta t} - \ln(T - T_0)$ 图(如图),得到一条直线,说明前面的假设是正确的。

在直线上取三点 $P_1(3.82, -1.10)$, $P_2(4.20, -0.635)$ 和 $P_3(3.98, -0.900)$, 算出图线的斜率 k 和截距 b 。

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{-0.635 - (-1.10)}{4.20 - 3.82} = 1.22 ,$$

$$b = y - a \times x_3 = -0.900 - 1.22 \times (3.98) = -5.76。所以 n=1.22 ,$$

$E = mce^{-5.76} = 0.0032mc$, 即冷却规律为

$$Q/\ t = 0.0032mc(T - T_0)^{1.22}。$$

当然也可以用线性回归的方法处理实验数据：得到的结果是 $k=1.24$ ， $b=-5.83$ ， $r=0.9996$ 。相关系数 r 大于线性关系显著的标准 0.874 ，说明 $\ln \frac{\Delta T}{\Delta t}$ 和 $\ln (T - T_0)$ 成线性关系，也就说明 $\Delta Q / \Delta t = E (T - T_0)^n$ 的假设是正确的。

方法二

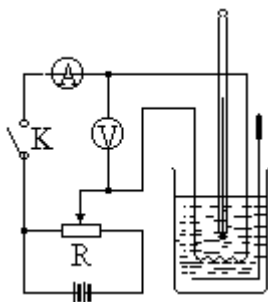
原理 让一个物体散热，同时又给它加热，使物体的温度保持不变。在这种情况下给它加热的功率就是这个物体单位时间内散失的热量。如果是用电给物体加热，便可以认为

$$UI = E (T - T_0)^n。$$

式中的 U 和 I 分别是电压和电流。（详见方法一的原理部分）。改变温度差 $(T - T_0)$ 的值，测量出相应的 U 、 I 值，便可以用与方法一相同的步骤求出 E 和 n 的值。

器材 电量热器，温度计，安培计，伏特计，滑动变阻器，直流低压电源，电键，秒表等。

操作



(1) 如图所示连接器材。将电量热器的内筒取出，内装适量的水。电热丝和温度计浸没在水中，不要碰到筒底，也不能互相接触。

(2) 接通电键，用电热丝给水加热。等水温比室温 T_0 高 5°C 时，适当地调节变阻器 R ，使水温维持在 $(T_0 + 5)^\circ\text{C}$ ，记下此时的 U 和 I 值。

(3) 调节滑动变阻器，增大 U 和 I ，使水温上升。等水温比 T_0 高 10°C 时，用同样的方法使水温维持在 $(T_0 + 10)^\circ\text{C}$ ，再记下此时的 U 和 I 值。如此重复，每次水温都增加 5°C ，至少测量 7 个不同的温度点。

(4) 以横坐标表示 $\ln (T - T_0)$ ，纵坐标表示 $\ln (U \cdot I)$ ，作出 $\ln (U \cdot I) - \ln (T - T_0)$ 图，得到一条直线。

(5) 用图解法求出图线的斜率 k 和截距 b ， $n=k$ ， $E=e^b$ ，即得出冷却规律。

注意

(1) 由于水是热的不良导体，因此加热时要经常搅拌，不断观察温度计。

(2) 在每一个温度点上，水温至少要稳定三分钟，才能记下 U 和 I 的值。

气体对流

方法一

器材 长玻璃圆筒（或煤油灯罩），蜡烛头，卡片纸板，蚊香，玻璃圆盘，清水等。

操作

（1）将点燃的蜡烛固定在玻璃圆盘中，并往盘内注入少量清水。

（2）在长玻璃圆筒的中间插入一卡片纸板（不插到底），把圆筒上端分隔成两部分。然后用玻璃圆筒罩在蜡烛上，且使蜡烛稍偏于卡片纸一侧。将点燃的蚊香置于圆筒另一侧上端，就会看到烟雾沿纸板一侧下降，由另一侧上升，形成对流现象（如图）。

（3）抽去纸板，筒内上述对流过程遭到破坏，蜡烛很快熄灭。

说明 圆盘底部注入少量水主要是为了防止漏气。

方法二

器材 自制空气对流箱，蜡烛，蚊香，火柴等。

空气对流箱的制作方法

如图所示：1 为玻璃或玻璃纸，2 为灯罩，3 为蚊香，4 为箱体，可用木板、铁皮或纸盒做成。

操作

（1）将点燃的蜡烛放入箱子中，正对某一个小孔的下方，关紧玻璃门。

（2）将点燃的两支蚊香分别放在玻璃罩的上方，从烟雾的飘移方向，可明显地显示出空气的对流情况（如图）。

注意 对流箱制成后，除上面两个孔外，其余地方尽量密封，可用油灰，橡皮泥等填满缝隙。

方法三

器材 铝箔，蜡烛，铅丝（头部磨成弹头形，离头部 3cm 处弯成直角，作支轴）。

操作

（1）把圆形铝箔面 6 等分，沿半径剪开 2.5cm，每片扭转一个角度，成六个叶片的风轮。

（2）圆心处用弹头形的物体压成一个小小的凹面，然后将弯成直角的铅丝顶在凹面中心处。

（3）在它下方点燃蜡烛，叶轮就会转动，如图所示。

方法四

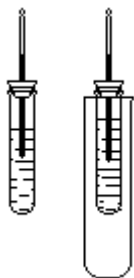
目的 观察并比较在有对流与无对流时空气中的散热现象，从而证明空气的主要传热方式是对流。

器材 小试管，温度计，软木塞，大试管，橡皮泥等。

操作

(1) 在两个小试管中注入等量的温度为 50 的热水，然后用两个插有温度计的软木塞将两个小试管口塞紧。

(2) 将一个安装好的小试管插入大试管，并用橡皮泥将小试管固定好，使大试管成为这个小试管的封闭外套（如图）。



(3) 每隔 1 分钟记录一次两温度计的读数。结果发现有封闭外套的小试管水温下降得很慢，另一试管水温下降得快，说明空气主要靠对流传导热量。

液体对流

方法一

器材 大烧瓶，铁支架，酒精灯，石蜡，高锰酸钾（ KMnO_4 ）晶粒，白纸屏等。

操作

(1) 把少许切成碎片状的石蜡和玻璃屑置入圆底烧瓶中，用酒精灯加热，待瓶中蜡片熔化后再将晶粒状高锰酸钾投入。使蜡凝固，并把高锰酸钾颗粒包裹在烧瓶底部。

(2) 往烧瓶中注入冷水。这时，水不会被高锰酸钾染红。

(3) 用小火焰加热烧瓶底部，随着蜡层的熔化，清水逐渐被高锰酸钾染红并显示出冷热水的对流现象。

说明 水的对流实验，传统的作法是直接往水中投入高锰酸钾晶粒，但这会使高锰酸钾晶粒在下沉过程中，就已溶解并把清水染成紫红色。以致对瓶底加热时不易看清冷热水对流的情况。本实验采取用蜡包裹的方式控制高锰酸钾晶粒溶解、扩散的时机，有助于消除以上弊端（加入玻璃屑是防止蜡层熔化后上浮。）

建议 为控制高锰酸钾晶粒溶解、扩散的时间，也可采用以下方式：

(1) 将高锰酸钾晶粒（线度约 3—4mm）一粒一粒投入蜡烛火焰下的“凹坑”中，使其表面浸上一层薄蜡后，立即用细棒拨出，冷却后即成为一涂有蜡层的高锰酸钾晶粒（注意：蜡层不能过厚，否则不能沉入水底）。演示时只需将涂蜡的高锰酸钾晶粒置入烧瓶底部即可。

(2) 取一长约 30cm 的细玻璃管（外径约 7mm，和胶头滴管外径相

当)，上端套上胶头滴管的橡皮套。用上述改制后的滴管吸几滴浓高锰酸钾溶液（或红墨水），演示时，只需将其插入盛有清水的烧瓶底部，按动橡皮套使高锰酸钾溶液排出。

（3）在烧瓶内插入一根两端开口的细玻璃管，使其下端触及烧瓶底。演示时，从上端管口加入高锰酸钾晶粒，当晶粒从玻璃管内落到瓶底后，再用手指按住玻璃管上端管口，取出玻璃管。

方法二

器材 大烧瓶，铁支架，酒精灯，塑料小颗粒，清水，酒精等。

操作

（1）按方法一的图装置仪器。

（2）在烧瓶内注入水和酒精的混合液，并放入适量的塑料小颗粒。调节水和酒精的混合比，使混合液的密度跟塑料粒子相近，即让塑料小颗粒悬浮在混合液中。

（3）对瓶底加热，塑料粒子的运动就可清楚且长时间的显示出对流的整个过程。

方法三

器材 带胶塞的广口瓶，长约 10cm 的玻璃管 2 根，冷水、热水、红墨水等。

操作

（1）先用打孔机把胶塞各打两个孔，插入玻璃管如图（a）安装。

（2）在两只瓶内分别注满热水和冷水，在热水（或冷水）中滴入红墨水。然后按图（b）把两瓶装在一起，注意将胶塞塞紧，使它不得漏水漏气。

（3）当然水在上，冷水在下时，不会发生对流。演示时，将两只瓶位置对调，使热水在下，冷水在上。稍许，便能看到带色热水沿较高玻璃管上升，不带色的冷水沿较低玻璃管下降，发生了对流。

说明 演示时，也可将两只玻璃瓶中都装冷水，并将其中一个瓶中的水染成红色。按上述方法装配。静置数分钟后，未见有对流现象发生，然后将下面盛红色水的瓶子浸没在热水中，不久便能观察到对流现象。

热辐射

热的辐射实质上是能的辐射，它是以电磁波的形式向外发散的。物体一方面以辐射的形式向外放出能量；一方面又吸收其他物体的辐射而获得能量。同一物体的辐射本领跟吸收辐射本领是相同的，即良好的辐射体一定也是良好的吸收体。

以下方法一至五着重介绍演示物体表面吸收热辐射的本领与颜色的关系，方法六则直接显示黑色表面物体的辐射本领比其他颜色强。

方法一

目的 研究物体表面吸收热辐射的本领与颜色的关系

器材 白炽灯（220V、100W），方座支架，黑漆，白漆，凡士林，火柴等。

操作

（1）取一只 100W 左右的白炽灯，分别用黑漆和白漆在其玻璃泡外壁相对的位置上涂上伍分硬币那么大的两块圆。在每块漆面的中央用凡士林粘住一根火柴，使火柴呈水平状态（如图）

（2）接通电源，经几秒钟时间，粘在黑漆上的火柴梗就下垂，滑落下来。而粘在白漆上的火柴，仍然不动，说明黑色表面的物体对热辐射的吸收本领比白色表面的强。

方法二

目的 同方法一

器材 如图。

操作

（1）把两只 150mL 的烧瓶如图固定，并将温度计插入其中，露出需读数的刻度部分。

（2）将红外线灯面对两只烧瓶，放在中间位置，与两瓶距离约 15cm。

（3）接通红外线灯电源。每隔 1 分钟，比较并记录两支温度计读数的变化情况。

实例（室温 5℃）

时间（分钟）	升高的温度（℃）	
	白 瓶	黑 瓶
1	1	3
2	2.5	9
3	4	13
4	5	18

方法三

目的 演示黑色表面的物体比白色表面的物体吸收热辐射的本领强。

器材 烧瓶，烧杯，铁架台，100W 白炽灯，玻璃管，橡皮塞等。

操作 实验装置如图所示，接通电源，白炽灯发光，通过对称的两个烧杯中冒出气泡的快慢，可说明物体表面颜色不同，吸收热辐射的本领也不同。

注意

- (1) 黑色与白色烧瓶离灯泡的距离要相等。
- (2) 两烧杯内水的多少大致相等，玻璃细管插入烧杯内的深度也要相同。
- (3) 玻璃细管通过橡皮塞插入烧瓶要密封，不能漏气。

方法四

器材 圆底烧瓶（100mL）2只，三通玻璃管，白炽灯（500W），U形管，夹子等。

操作

- (1) 将圆底烧瓶分别涂成黑色和白色，并按图（a）所示把有关器件组装起来，U形管内装的是染色水。
- (2) 松开三通玻璃管上的夹子，使U形管内红色液面相平，然后夹紧橡皮管。
- (3) 接通电路，白炽灯发光，可看到U形管内液面一端上升，一端下降。

注意

- (1) 灯泡到两个圆底烧瓶的距离要相等。
- (2) 整个装置要密不漏气。

方法五

器材 白色薄纸，会聚透镜，墨汁等。

操作

用墨将白纸的一部分涂黑、晾干。用凸透镜（或凹面镜）将太阳光聚焦。先使聚焦点落在纸面的涂黑部分，片刻之间，该处就冒起黑烟。而将聚焦点移至薄纸的白色部分，则需要较长时间才能使该处烧焦、着火。这表明，黑色表面吸热本领强。

方法六

目的 演示黑色表面的辐射本领比其他颜色表面强。

器材 250mL三角烧瓶，细玻璃管，25W白炽灯，500mL平底烧瓶橡皮塞，白纸屏等。

操作

- (1) 用三角烧瓶、细玻璃管（管中注入一小段红色水柱），画有横线的白屏等按图所示组装成两个空气温度计A和B。调节橡皮塞松紧，使玻璃管中水柱处于同一高度。
- (2) 用烟将平底烧瓶C的右半面熏黑，左半面面涂成白色（亦可不涂色）。往烧瓶C中注满沸水，置于A、B连线的中点，使它黑、白两面分别对着B和A。可看到瓶右侧（熏黑的一侧）温度计B中水柱上升得快。

说明

(1) 本实验用盛有热水的烧瓶作为热辐射源,旨在说明热辐射不一定以可见光形式进行,实际上绝大多数的热辐射不是以可见光的形式进行的。当然,用 25W 白炽灯(半面熏成黑色)作热源亦能达到满意效果。

(2) 如烧瓶 C 不涂色,而将 A 和 B 分别涂成黑色和白色,则可演示物体吸收热辐射本领与颜色的关系。

物质的比热

方法一

器材 锥形烧瓶(50mL),铁架台,石棉网,酒精灯,温度计,托盘天平,水,煤油,自制聚苯乙烯泡沫塑料瓶塞。

操作

(1) 按图所示,调配好两套装置。先在两锥形烧瓶中分别加入质量相等、初温相同的少量的水后,将插有温度计的泡沫塑料瓶塞塞好锥形瓶口,并调节好温度计高低。

(2) 用两只相同的酒精灯(灯芯和所加酒精多少都要尽可能相同)分别对两只锥形瓶加热 3—4 分钟,观察温升情况。如加热过程中,两温度计升温基本相同,即证明两套装置供热基本相同;若温升差别较大,则应作调整,在使酒精灯火焰尽量一致的情况下,可稍调节火焰与烧瓶之间的距离,使两者温升基本相同。

(3) 倒掉锥形烧瓶内已加过热水,再分别注入质量和初温都相同的水和煤油,按图所示同时对它们分别加热。

(4) 从开始加热时计时,每间隔 1 分钟记录一次 2 支温度计的读数,填入自行设计的表格中。

(5) 分析实验数据可知:质量相同的水和煤油在相等的时间内吸收相等的热量后,煤油升高的温度大约是水的 2 倍。这表明,水的比热大约是煤油比热的 2 倍。

注意

(1) 本实验采用对比的方式进行演示,关键在于要使水和煤油能在相同时间内吸收相同的热量。一般要求所选用的两套仪器尽可能相同(如烧瓶的大小和质量,酒精灯及其灯焰的大小,石棉网的大小、质量和厚度等)。演示时,要先在远处点燃酒精灯。然后同时放在两只烧瓶下去加热。

(2) 实验的末温不宜过高。否则,由于散热损失,影响实验结果。

方法二

器材 电炉(220V、300W),石棉网,铁架台,质量相等的烧杯(100mL),温度计,煤油和水等。

操作

(1) 按图所示把有关器材组装好,两只烧杯中分别装上质量相同的水和煤油。等煤油和水的温度都与室温相同时,记录温度计读数。

(2) 接通电源，用电炉给煤油和水同时加热。每隔 1 分钟记录一次两支温度计的读数。注意末温不要比室温高出太多。

(3) 比较两支温度计读数变化情况，可发现：经过相同的时间，水和煤油升高的温度不同，煤油温度的升高值大约是水的 2 倍。这表明，煤油和水的比热不同。

注意

(1) 两支温度计实验前应进行校准。

(2) 石棉网上的铁丝不要碰到电炉丝，以免发生短路及触电事故。

说明

(1) 本实验未采用 2 只酒精灯分别对煤油和水加热的传统方法，主要是为更好地保证对煤油和水同等均匀加热的条件。

(2) 对煤油和水加热，不宜采用水浴法。

方法三

器材 如图

操作

(1) 在两只 200mL 的烧杯中分别放 100g 水和 100g 黄砂，将两支温度计分别插入水和黄砂中（如图）。

(2) 将红外线灯放在与水、黄砂等距离处，从上向下照射 3 到 5 分钟，即可从温度计上观察到明显的温差，说明水和黄砂的比热不同。

说明 只用一个热源，可避免两个酒精灯分别加热时火力不同的缺陷。此实验还可模拟太阳照射，说明沿海地区与内陆地区温差明显的原因。

实例 环境气温为 8℃，红外线灯距离水和黄砂约 9cm。

时间（分钟）	升高的温度（℃）	
	黄 砂	水
2	1	0
4	5	1
6	12	3
8	17	5

方法四

器材 质量相同的铝块和铅块（可各取 70g），自制气体温度计 2 支，烧杯，酒精灯，天平等。

气体温度计的制作方法

取两根相同的弯成 U 形的细玻璃管，往管内注入适量的红色水。另取两只薄壁试管（或针剂瓶）作为测温泡。按图中所示，用乳胶管连接 U 形管和测温泡。当两只测温泡内空气温度不同时、空气膨胀不相同，就会通过 U 形管中红色水柱的高度差显示出来。

操作

(1) 调节两只气体温度计, 使 U 形管内的液面相平。两只杯子里注有质量相同的冷水。

(2) 从沸水中取出被加热的铝块和铅块, 迅速地分别投入两只烧杯中。达到热平衡后可观察到: 两支空气温度计红色水柱变化不同, 投入铝块烧杯内的温度计红色水柱变化显著(高度差大)。这表明铝和铅具有不同的比热。

说明

(1) 本实验选用的气体温度计, 具有灵敏度高, 可见度大等特点, 不足之处是不能作定量测量。

(2) 本实验选用铝块和铅块, 是因为两者的比热值相差较大, 铝的比热大约是铅的 7 倍。

物体吸收的热量与哪些因素有关

器材 量热器(装有电热丝的)、温度计, 万用表, 低压电源, 导线, 水等。

操作

(1) 如图所示, 取两只相同的、带电热丝的量热器(电热丝电阻要相同), 把它们串联后接在低压电源上。

(2) 量取质量为 m_A 的水装入量热器 A 中, 量取质量为 m_B 的水装入量热器 B 中, 且使 $m_B=2m_A$, 水温可稍低于室温。

(3) 测出水的初温 t_{0A} 、 t_{0B} 后接通电源, 两电热丝在相同时间内产生相同的热量, 这热量绝大部分被水吸收。每隔一定时间记录一次两支温度计的示数。

(4) 根据实验数据, 研究物体(水)吸收的热量与物体的质量、升高的温度之间的关系。先研究质量一定时吸热多少与温度的关系, 再研究温度升高量相同时, 吸热多少与质量的关系。

注意

(1) 两支温度计实验前要经过校对, 选取规格和校对值尽量接近的; 温度计的测温泡应位于水的中部, 不要太接近电热丝。

(2) 为了减少系统与外界热交换给实验结果带来的影响, 应选取水的初温低于室温, 末温高于室温, 且使其差值相当, 末温也不要比室温高出太多, 否则会加大误差; 另外, 适当缩短加热时间, 也可使内外交换热量减少。

(3) 为了减少量热器本身吸热对实验结果的影响, 除了应选用热容量小的内筒外, 还应适当增大水的质量 m_A 和 m_B , 使量热器所吸的热量和水所吸热量之比尽量小些。

实例 电热丝电阻均为 2.0Ω , 环境温度 19.0°C 。

由下页记录数据可看出:

(1) 同一量热器中, 每经过相等的时间间隔, 升高的温度大致相等。表明一定质量的某种物体吸收的热量 Q 与它升高的温度 t 成正比, 即 $Q \propto t$ 。

(2) 要使两只量热器中升高相同的温度，量热器 B 所用时间约是 A 的 2 倍，这表明物体吸收的热量 Q 与它的质量 m 成正比，即 $Q \propto m$ 。

(3) 采用多变量复合的方法可以得到 $Q \propto m \cdot t$ 的结论（具体方法见实验 63 的按语）。

次数	通电时间 (分)	量热器 A $m_A=75g$			量热器 B $m_B=150g$		
		初温 t_{0A} ()	末温 t_A ()	t_A ()	初温 t_{0B} ()	末温 t_B ()	t_B ()
1	3.0	19.4	21.5	1.9	17.3	18.3	1.0
2	3.0	21.5	23.5	2.0	18.3	19.4	1.1
3	3.0	23.5	25.5	1.9	19.4	20.4	1.0

验证热平衡方程

器材 烧杯（450mL），量筒（200mL），温度计，搅棒，聚苯乙烯泡沫塑料，热水，冷水等。

操作

(1) 用聚苯乙烯泡沫塑料为烧杯加工一个绝热外套和杯盖，杯盖上应留有温度计和搅棒插孔（如图所示）。

(2) 测得实验时的环境温度 t_0 。

(3) 量取质量为 m_1 ，温度低于环境温度的冷水注入有绝热外套的烧杯中；量取质量为 m_2 的热水（60—80℃）置于量筒中。

(4) 用两支温度计分别测出上述冷、热水的温度 t_1 和 t_2 ，然后立即把热水倒入冷水中，搅动后测出水升到的最高温度 t ，这就是混合后的共同温度。

(5) 分别计算冷水吸收的热量 $Q_{吸}=C_{水}m_1(t-t_1)$ 热水放出的热量 $Q_{放}=C_{水}m_2(t_2-t)$ ，如果在误差范围内 $Q_{吸} \approx Q_{放}$ ，即可验证热平衡方程。

注意

(1) 实验前应对温度计读数进行校验，选取读数尽量一致的两支温度计完成上述测量。

(2) 为了减小系统与外界热交换给实验结果带来的误差，应根据环境温度 t_0 （实验过程可以认为 t_0 不变），适当选取冷水与热水的初温度及用量（详见实例），使冷热水混合后的温度 t 与环境温度 t_0 相近。

实例 环境温度 $t_0=14.5$ ℃，实验数据见下页列表。

实验数据，未计烧杯本身所吸收的热量以及向周围环境散失的热量，结果尚在误差允许范围内，可认为热平衡方程得到验证。

分析 估算 $Q_{吸}$ 和 $Q_{放}$ 的误差，可以给出验证成功的标准。

$$E_{Q_{吸}}=Em_1+E_{(t-t_1)},$$

$$E_{Q_{放}}=Em_2+E_{(t_2-t)}.$$

实验数据							数据处理		
次数	A杯			B杯			Q _吸 Cal	Q _放 Cal	$\frac{Q_{吸}-Q_{放}}{Q_{放}}\%$
	m ₁ (g)	t ₁ (°C)	t (°C)	m ₂ (g)	t ₂ (°C)	t (°C)			
1	150	9	22	50	62	22	1950	2000	2.5%
2	200	10	19	40	64.5	19	1800	1820	1.1%
3	300	9	24.5	100	72	24.5	4650	4750	2.1%

设 $m=1g$, $t=0.2$, 质量和温度都采用实例中第一行的数据, 则

$$E_{Q_{吸}} = \frac{\Delta m}{m_1} + \frac{2\Delta t}{t - t_1} = \frac{1}{150} + \frac{0.4}{22 - 9} = 3.8\%$$

$$E_{Q_{放}} = \frac{\Delta m}{m_2} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t} = \frac{1}{50} + \frac{0.4}{62 - 22} = 3\%$$

实验结果如果能满足

$$\frac{|Q_{吸} - Q_{放}|}{Q_{放}} < E_{Q_{吸}} + E_{Q_{放}}$$

即可认为验证成功。实例中三次验证都是成功的。

测定物质的比热

本实验介绍了四种各有特色的方法。方法一根据误差理论给出了评价学生实验结果的标准；方法二利用外推的方法“实现”了热交换无限快的理想状况；方法三对系统散热进行了必要的修正；方法四利用“比较法”消除了大部分系统误差。

方法一

器材 量热器, 金属圆柱体, 温度计, 学生天平, 砝码, 烧杯, 酒精灯, 支架等。

操作

(1) 用细线拴住金属圆柱体, 悬挂在盛有水的烧杯中, 用酒精灯加热至水沸腾, 用温度计测出沸水的温度 t_2 。

(2) 用学生天平称出量热器内筒与搅拌器的质量 m_0 。在量热器内筒中倒入一定质量的水(使水温略低于室温), 称出水的质量 m_1 和测出水的温度 t_1 。

(3) 将圆柱体从沸水中提出, 迅速抖落其表面的水后, 放入量热器内筒, 盖好量热器上盖, 用搅拌器搅拌。当水温上升到最高时, 记下温度数 t 。

(4) 在学生天平上称出金属圆柱体的质量 m_2 。

(5) 根据热平衡方程

$$(m_0 c_0 + m_1 c_1)(t - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - t)。$$

计算出待测金属的比热

$$c_2 = (m_0 c_0 + m_1 c_1) (t - t_1) / [m_2 (t_2 - t)],$$

式中 c_2 、 c_1 、 c_0 分别表示待测金属、水、量热器内筒的材料的比热。

注意

(1) 水的初温和混合后的水温要尽量测量得准确。

(2) 所选金属块的质量和水的量要适当，金属块太小，水太多使混合后温度升高太少；金属块太大，水太少使水和金属块热交换不彻底，都会引起较大的实验误差。怎样选择这两者的质量尽量靠近实验的最佳条件，可参看基础篇第 25 页例 1。

分析

$$\text{因为 } c = (m_0 c_0 + m_1 c_1) (t - t_1) / [m_2 (t_2 - t)],$$

所以 $E_c = E_{(m_0 c_0 + m_1 c_1)} + E_{(t - t_1)} + E_{m_2} + E_{(t_2 - t)}$ 。

其中 m_0 、 m_1 、 m_2 都是用天平测量的，误差较小， c_0 、 c_1 是用的公认值，误差也忽略，所以

$$\begin{aligned} E_c &= E_{(t - t_1)} + E_{(t_2 - t)} \\ &= \frac{2\Delta t}{t - t_1} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t} \end{aligned}$$

按照学生实验的一般情况，设 $t - t_1 = 10$ ， $t_2 - t = 70$ ， $2\Delta t = 1$ ，则

$$E_c = \frac{1}{10} + \frac{1}{70} = 12\%。$$

如果再考虑实验过程中的散热等因素，误差可能还要更大一些，因此学生测量的实验结果与公认值比较，误差在 20% 之内的都可算是成功的。例如，铝在 100 时的比热的公认值是 $0.22 \text{Cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ ，那么学生测定出来的实验结果在 $0.18 - 0.26 \text{Cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ 之间的都可算是成功的。

建议：

如果有条件，可使用双层加热器加热待测金属（如图）。由于是用蒸气隔绝加热，因此可保持金属干燥。用双层加热器加热的金属以颗粒状为好。

方法二

原理 方法一中采用了绝热性能较好的量热器，并且尽量缩短交换的时间，但要做到实验系统与外界完全绝热是不可能的。本方法用外推的方法，“实现”系统内部热交换无限快的理解情况。作出实验系统温度随时间变化的图线（如图）。图中 AB 为预测段，BC 为系统内部热交换段，CD 为续测段。在预测段由于系统温度低于室温，因此系统温度逐渐升高；续测段由于系统温度高于室温，系统温度逐渐降低。AB、CD 线的斜率可分别代表系统升温 and 降温的速率。将 AB 线向前延长 CD 线向后延长再作垂直于 t 轴的直线 EF，使它们与实测曲线包围的两块面积 BEG 和 CFG 大小相等。图线 AEFD 就是系统内部热交换得无限快时的 T-t 图，T(E) 和 T(F) 可分别作为修正后的系统的初温和末温。

器材 量热器，待测金属，天平，砝码，烧杯，酒精灯，铁架台，温

度计，秒表等。

操作

(1) 用天平称出量热器内筒和搅拌器的质量 m_0 ，待测金属块的质量 m_2 ，从手册中查出前者的比热 c_0 。

(2) 在内筒中加入适量的温度略低于室温的水，并测量出水的质量 m_1 。

(3) 用温度计测量水与内筒的温度，每隔一分钟读一次温度，以便绘出预测段图线 AB。

(4) 将待测金属放在沸水中煮五分钟以上用温度计测量沸水的温度 t_2 。然后迅速将金属放入量热器内筒的水中（尽量不要将沸水带入），立即盖上量热器的盖后，边搅拌，边观察水温。在这段热交换时间内，每隔五分钟读取一个温度值，直至温度到最高值。

(5) 重新改为每隔一分钟读一个温度值，以便绘出续测段图线 CD。

(6) 以横轴代表时间 t ，纵轴代表温度 T ，作出 $T-t$ 图。将 AB 与 DC 线延长，作出竖直线 EF，尽量使 BGE 和 CFG 面积相等（目测）。

(7) 读出 E 点和 F 点的纵坐标 T_E 和 T_F 。根据热平衡方程

$$(m_0c_0 + m_1c_1)(t_F - t_E) = m_2c_2(t_2 - t_F),$$

计算出待测金属的比热

$$c_2 = (m_0c_0 + m_1c_1)(t_F - t_E) / [m_2(t_2 - t_F)].$$

方法三

原理 用如图所示的实验装置，可以测量待测液体的比热。如果在时间 t 内，待测液体（质量为 m_1 ）和量热器内筒（质量为 m_0 ，比热为 c_0 ）的温度由 T_1 升高到 T_2 ，这段时间内安培表和伏特表的读数始终为 I 和 U ，假设电热丝产生的热量全部被待测液体吸收，则有

$$U \cdot I \cdot \Delta t = (m_0c_0 + m_1c)(T_2 - T_1).$$

待测液体的比热

$$c = [UI\Delta t / (T_2 - T_1) - m_0c_0] / m_1.$$

上式假设实验系统是一个理想的绝热系统，但这种情况在实验中是不可能的。实际情况应当是

$$UI\Delta t = (m_0c_0 + m_1c)(T_2 - T_1) + \Delta Q$$

式中 Q 是系统与外界交换的热量，它的大小可由一个辅助实验来确定：实验装置完全相同，只是将量热器内筒中的待测液体换成蒸馏水。实验操作也完全相同，而且通过控制水的质量，尽量使辅助实验中系统的初温、末温、通电时间与原实验相同。这样便可以计算出辅助实验中的 Q 。又因为辅助实验与原实验过程基本相同，可以认为两次实验中的 Q 是一样的。最后用辅助实验中得到的 Q 去修正原实验中的热平衡方程，得出待测液体的比热。

器材 电量热器，低压直流电源，伏特表，安培表，温度计，秒表等。

操作

(1) 如图连接好实验装置，打开电键。记下温度计的读数 T_1 。

(2) 合上电键,同时让秒表开始计时。记下伏特表和安培表的读数 U 和 I 。同时用搅拌器轻轻地搅拌液体。

(3) 等待测液体的温度升高大约 25°C 左右时,打开电键,同时使秒表停止计时。仔细观察温度计,记下它到达的最高温度 T_2 。

(4) 用天平测出量热器内筒和搅拌器的总质量 m_0 以及待测液体的质量 m_1 。

(5) 将待测液体换成蒸馏水,重复操作(1)、(2)、(3)、(4)。调节蒸馏水的质量,尽量使 T_1 、 T_2 、 t 与原实验相同。

(6) 将操作(5)中得到的实验数据代入式,算出 Q 。最后再用操作(1)、(2)、(3)、(4)中得到的实验数据和 Q 代入式,得到待测液体的比热

$$c = [(UI \cdot \Delta t - \Delta Q) / (T_2 - T_1) - m_0 c_0] / m_1。$$

方法四

原理 实验装置如图所示。一个量热器中装待测液体,另一个量热器中装蒸馏水,两个量热器中的电阻丝串联后接到电源上。是一个双刀双位开关,当 AB 掷向 A B 时,伏特表测量 A 量热器中电阻丝上的电压 U_A ; 当 AB 掷向 A B 时,伏特表测量 B 量热器中电阻丝上的电压 U_B 。如果电流产生的热量全部被液体吸收,实验过程中系统与周围环境的热交换量是 Q , 则

$$U_A \cdot I_A \cdot t_A = (c_{\text{液}} \cdot m_{\text{液}} + c_A + m_A) \Delta T_A + Q_A,$$

$$U_B \cdot I_B \cdot t_B = (c_{\text{水}} \cdot m_{\text{水}} + c_B + m_B) \Delta T_B + Q_B。$$

式中 m_A 、 m_B 分别表示 A 、 B 两个量热器内筒(包括搅拌器)的质量, c_A 、 c_B 分别表示它们的比热。如果选用两个相同的量热器,使它们电热丝的电阻相同,就有 $U_A \cdot I_A \cdot t_A = U_B \cdot I_B \cdot t_B$ 即

$(c_{\text{液}} \cdot m_{\text{液}} + c_A \cdot m_A) \cdot \Delta T_A + \Delta Q_A = (c_{\text{水}} \cdot m_{\text{水}} + c_B \cdot m_B) \Delta T_B + \Delta Q_B$ 。
适当地选择待测液体和水的质量,使 T_A 和 T_B 基本相同,可认为 $Q_A = Q_B$, 那么

$$(c_{\text{液}} \cdot m_{\text{液}} + c_A \cdot m_A) \cdot \Delta T_A = (c_{\text{水}} \cdot m_{\text{水}} + c_B \cdot m_B) \Delta T_B,$$

$$c_{\text{液}} = \frac{(c_{\text{水}} \cdot m_{\text{水}} + c_A \cdot m_A) \Delta T_A / (\Delta T_B - c_B \cdot m_B)}{m_{\text{液}}}。$$

器材 电量热器,伏特表,低压直流电源,单刀双位电键,天平,砝码等。

操作

(1) 如图连接实验器材,记下两个温度计的初读数 T_A 和 T_B 。

(2) 合上 K_1 ,给两个量热器中的液体加热。加热过程中经常用伏特表通过 K_2 检查两个量热器电阻丝上的电压是否相等,经常用搅拌器轻轻搅拌,使液体温度均匀。

(3) 等液体的温度升高大约 25°C 时,断开 K_1 ,仔细观察温度计,

记下它们的最高读数 T'_A 和 T'_B 。计算 $T_A = T'_A - T_A$, $T_B = T'_B - T_B$ 。

(4) 用天平测出 m_A 、 m_B 、 $m_{液}$ 、 $m_{水}$ ，便可以算出 $c_{液}$ 。

注意

(1) 实验过程中 T_A 和 T_B 不能相差太多 (不应大于 3)，才能保证 $Q_A = Q_B$ 。如果 $|T_A - T_B| > 3$ ，要调整 $m_{水}$ 和 $m_{液}$ 后重新进行实验。

(2) 温度计不能太靠近电热丝。搅拌器、电热丝、量热器内筒之间不能短路。

用油膜法估测分子的大小 146

分子是非常小的，直接测量它的大小很困难。用油膜法可巧妙地估测分子的大小，其特点是：(1)利用油酸分子的特性使它在水面上形成单分子层的油膜；(2)用液滴和释的方法控制油膜的大小(0.01ml 的纯油酸在水面上所形成单分子油膜的面积可达 $7-8m^2$)；(3)用漂浮的粉粒来显示油膜的边界线。

原理 油酸分子($C_{17}H_{33}COOH$)可看作由两部分：一部分是 $COOH$ ，它对水有很强的亲合力；另一部分是 $C_{17}H_{33}$ ，对水没有亲合力。一滴油酸滴在水面上，它会在水面上形成一层薄膜。由于油酸分子是一个挨一个排列、直立在水面上(图 a)，所以可以称为单分子层。只测出该油膜的厚度，即为一个油酸分子的长度。油酸滴入水面后其体积 V 保持不变，因此油膜厚度 $D=V/S$ ，式中 S 为水面上油膜的面积。

器材 浅盘(4550 cm^2 矩形盘)，平板玻璃(面积略大于浅盘)，油酸酒精溶液，量筒(10ml、100ml 各 1 只)，移液称(1ml)3 支，水彩笔，坐标纸，铅笔，痱子粉等。

油酸酒精溶液的配制方法

用 2ml 注射器准确抽取 1.5ml 油酸，将其中 1.0ml 油酸注入 100ml 量筒中，加无水酒精至 40ml 刻度线，充分搅匀后取另一支 2ml 注射器抽取这种溶液 1.5ml，再将其中 1.0ml 与 49ml 无水酒精充分混合，即得体积比为 1 : 200 的油酸酒精溶液。

操作

(1) 测一滴油酸酒精溶液中油酸的体积。用注射器抽取 1ml 油酸酒精溶液，缓慢推动活塞使溶液一滴一滴滴下，数出 1ml 溶液共有多少滴，从而可算出一滴溶液中所含油酸的体积(V)。

(2) 测定油膜的面积。往浅盘内注入清水，水深 1—2cm。通过纱网把痱子粉薄而均匀地撒在水面上。用注射器在浅盘中央、水面上方约 1cm 高处，滴入一滴油酸酒精溶液。油酸在水面上散开后，形成大约是圆形的油膜(图 b)。将平板玻璃盖在浅盘上，在玻璃上摹绘出油膜轮廓形状。再把玻璃覆盖在坐标纸上，数出油膜所占格数并算出油膜面积(S)。

(3) 由 $D=V/S$ 计算出油膜的厚度，即为待估测的油酸分子的长度。

实例

油酸酒精溶液(纯油酸对溶液的体积比为 1 : 200)1ml 可滴 228 滴，一滴油酸酒精溶液所含纯油酸体积 $V = \frac{1}{200} \times \frac{1}{228} = 2.19 \times 10^{-5} (cm^3)$ 。

一滴油酸酒精溶液形成的油膜面积 $S=136(\text{cm}^2)$ 。则一个油膜分子长度（即油膜层厚度） $D=V/S=2.19 \times 10^{-5}/136=1.61 \times 10^{-7}(\text{cm})$ 。

油酸分子长度的公认值为 $1.12 \times 10^{-7}\text{cm}$ ，实验结果符合数量级要求。

注意

(1) 配制油酸酒精溶液的器皿必须保持清洁。由于油酸不溶于水，清洗器皿，可先用去污粉洗涤，再用酒精棉花擦洗。

(2) 汲取油酸、酒精及其溶液的移液管必须分别专用，最好各用标签区别。切勿混用。否则，误差会增大。

(3) 测量油酸的体积、油膜的面积要耐心、细致，可多次实验后取实验结果的平均值。

说明

由于测量 V 和 S 的数值都不精确，本实验只要求所测结果的数量级相符。

分子间有空隙 147

器材 玻璃管（一端开口、长约 1m，内径 0.5—1cm），橡皮塞，橡皮筋，清水，酒精（染成红色）等。

操作

(1) 往玻璃管内注入清水（近半），再沿管壁缓缓注入酒精，使酒精液面距管口约 5cm 处。

(2) 用橡皮塞塞紧管口，并用橡皮筋在管壁上标志出酒精液面的位置。

(3) 将玻璃管反复颠倒几次，使酒精和水混合，可发现混合后的液体上表面明显低于橡皮筋所标出的原液面的位置。这是由于分子间有空隙，酒精和水混合后分子重新排列，从而使总体积减小。

注意

(1) 应选用工业酒精（或化学纯酒精），不宜选用含水较多的医和酒精。否则效果不明显。

(2) 酒精不宜灌满，应在管口处留一段约 5cm 长的空气柱。这样，在上下颠倒玻璃管时有利于水和酒精充分混合。

148 分子间的引引

方法一

目的 演示固体分子间的引力现象。

器材 内聚力演示仪，锉刀，钩码等。

操作

(1) 用锉刀将两铅圆柱体（即内聚力演示仪）的接触面锉平，锉时应沿一个方向，使铅块表面平整、清洁。

(2) 如图(a)示，沿锉纹方向推压铅柱，边紧压边向前推进。由于分子引力，两者会结合成一体。然后把它们竖直提起，挂在铁支架上。

(3) 在铅圆柱体下端挂钩上加一定质量的钩码，不会将两铅柱拉开。

注意

(1) 为防止钩码突然下落，可在钩码下放一砂箱。

(2) 本实验成功的是使两铅块表面有尽可能多的点相接触。为此，每次实验前都应对铅表面进行平整处理，清除油污及氧化层。

(3) 如一次对接不成功，不要急于再次推压对接。应将铅块表面上突

起处（即在用力推压后铅块表面上呈现的颜色发灰处）刮削锉平后，再进行推压对接，直至成功。

说明

(1) 演示固体分子引力作用通常用铅块，是由于铅块在受同样作用力作用时比铜、铁等金属容易变形。这样，当两块表现洁净的铅块被紧压时，能有更多的点靠近接触。

(2) 对于铅块端面作平整处理，可用锉刀锉、车刀车，也可用刀刮。为了使两铅块密合在一起，对于扁平形状的铅块，如图(b)。可以利用台虎钳紧压，也可利用人体自身重力，用脚踩压相合的两铅块，且边踩边转，实验较易成功。如是长圆柱形铅块，也可先将两铅块合在一起，然后在用力紧压的条件下，将两铅圆柱体沿相反方向转动。旋转时，应朝某一方向转动，而不能来回转动。

方法二

目的 演示液体分子间的引力现象

器材 玻璃板，演示弹簧秤，水槽，铁架台，细线，清水等。

操作

(1) 玻璃板水平地挂在弹簧秤下(图 a)，观察弹簧秤读数。

(2) 将玻璃板恰好与水槽内水面相接触，并慢慢向上提起弹簧秤，可看到水面被提高起来弹簧秤读数明显增大(图 b)，此现象说明液体分子之间存在着引力。

149 布朗运动

布朗运动现象发现于 1827 年，但当时人们并不能正确解释它。经过 30 年的研究，才认识到布朗运动是由液体分子撞击悬浮微粒所引起的，并发现静止气体中悬浮微粒也在作布朗运动。

布朗运动是证实分子运动的重要实验，通常用显微镜来观察悬浮在液体中颗粒的运动。方法一详述了有关操作要点及注意事项；方法二简介了液体中布朗运动的投影显示法。方法三是观察悬浮在气体中颗粒的运动，因气体分子运动速度较大，所以布朗运动比较明显。

方法一

器材 显微镜，试管，载玻片，盖玻片，藤黄（或花粉，或碳素墨水），石蜡，酒精，移液管，电烙铁等。

操作

(1) 配制悬浊液：用藤黄、碳素墨水、花粉均可配制悬浊液，但浓度要适中。

(a) 藤黄 有毒，在中药店或国画社可买到。取 1g 藤黄先溶于 20g 左右的酒精中，然后再加入 80g 左右的蒸馏水稀释成浓度为 1% 的悬浊液，使用效果较佳。

(b) 墨水 将碳素墨水以 30—40 倍的清水稀释后，静置几小时使碳粒在重力作用下沉降。然后用吸管汲取杯中中间部分作为检查液，既可排除上层的悬浮杂物，又可获得大小适度，颗粒较均匀的悬浊液。

(c) 花粉（或蜂粮）用镊子取下二三朵雄性黄瓜（或南瓜）花粉，放在玻璃片上，用移液管滴 4—5 滴清水，用玻璃棒稍加搅拌使花粉的细胞壁破裂，形成许多原生质微粒悬浮于水中，在强光照射下呈淡黄色的悬浊液。无花粉季节，亦可用蜂粮（蜜蜂采集的百花粉，可向蜂场购买贮备）。筛取 50mg 蜂粮加进 1000mg 蒸馏水稀释成约为 5% 浓度的检查液即

可。

(2)制作样片：用洁净的玻璃棒，取已配制好的悬浊液，滴入洗净揩干的载玻片凹坑内，用盖玻片盖好，注意勿使凹坑中残留气泡。必须采用薄的盖玻片（厚约 0.12mm 效果较好），将石蜡碎片放在盖玻片四周，用小功率电烙铁将蜡熔化，即可将悬浊液封于载玻片凹坑中。这样处理后一般可保存一周左右。

(3)选择显微镜的放大倍数：选择适当的放大倍数，对提高观察效果很重要。以不低于 500 倍，但也不超过 800 倍，一般以 600 倍左右为宜。在这样的视场下，实验时既便于观察，又便于调节（显微镜放大倍数越大，物距越短，调节愈困难，很费时间）。

(4)调节显微镜：调节时必须先使镜筒下降到和盖玻片接近但不接触处。然后边观察边将镜筒向上提。这时转动升降手轮必须非常缓慢，且要密切注意显微镜里发生的变化。一旦从显微镜中观察到一片亮区开始变化时，“布朗运动”即将出现。这时转动手轮要更加缓慢，直至看到像，再用微动螺旋使像清晰。

注意

(1)在调焦成像时，不准将镜筒向下调，以免压碎盖玻片和损伤物镜。

(2)显微镜头，载、盖玻片等必须洁净，任何一点污染都会影响实验效果。

(3)盖上盖玻片时，要注意不使凹坑内残留所泡，溢出多余的液体可用滤纸吸干。

(4)若从显微镜中观察到小颗粒都向同一方向流动，是因为载物台倾斜，应将其调成水平，室温过低时，可用间接加热法预热载玻片。

(5)显微镜的反光镜反射的光线应强弱合适，过强反而不易看清楚，太弱则颗粒颜色灰暗。亦可采用侧向照明：用光阑板将下部光线全部挡住，用一只 45W 白炽灯在载物台旁、略高于台面处照明（这时观察到的背景是暗的，微粒的被照面是亮的，微粒的无规则运动好似繁星闪烁）。在调集同时，可适当移动灯泡位置与角度，直到微粒清晰可见。

方法二

器材 氦氖激光器(2mW 左右)，屏幕，其余同方法一。

操作 投影装置如图所示。

(1)将封有悬浊液的载玻片置于显微镜上，按方法一调节，使在目镜中能清楚地观察微粒的布朗运动。

(2)把显微镜筒转到水平位置并加以固定，防止翻倒。显微镜固定后，需重新检查一下，使仍能观察到清晰的布朗运动。

(3)接通电源点燃氦氖激光器，使发出的激光束透射过载玻片射到显微镜物镜上，并使激光束跟显微镜透镜组的光轴重合。在屏上即可看到放大的布朗运动的像。

(4)调节屏距，使像的直径约 3cm 较好。

方法三

器材 自制烟室，低倍显微镜，投影仪（幻灯机），遮光板等。

烟室的制作方法

选一块直径约 1cm，焦距约 2cm 的凸透镜，（可用旧显微镜的目镜镜片），装在用塑料板或胶合板做成的长方形盒的一侧，盒的另一侧用废牙膏嘴装一烟门，盒的上下面装上透明有机玻璃片或普通玻璃片。烟室

外形如图(a)所示，它的长取决于透镜焦距，可用平行光聚集法测得透镜焦距 f ，则烟室长为 $2f$ ，烟室高稍大于透镜直径，所有缝口用胶密封，以避免室外气流使烟粒产生定向运动。

操作 观察时将香烟的烟灌入烟室，旋紧盖子后放在显微镜镜台上，用投影仪的光束射向透镜，经凸透镜将光束会聚在烟室中心，将显微镜物镜对准光束会聚点，经适当调节后就可看到强光经悬浮的烟粒散射后呈金色的粒子，在空气分子的碰撞下急速穿梭、翻滚，时隐时现，实验装置如图(b)所示。

注意

(1)在观察时如果调节显微镜看不到烟粒的无规则运动，这是由于烟室的高度太大，使光束会聚点处于物镜有效工作距离外的缘故。因此烟室的高度必须做得小于 2cm ，用 16×10 显微镜观察，可保证实验成功。

(2)烟室灌入烟后放置镜台上须静止片刻，让内部气流稳定，观察时可减少烟粒的定向运动。

建议

烟室如做成上下透明的话还可用投影法显示，供更多人同时观察。

扩散现象 150

分子的运动无法直接看到，因此观察分子的扩散必须采用适当的示踪手段。方法一、二采用指示剂示踪，方法三、四采用有色的气体和液体以便于观察。方法一、二、三演示的是气体扩散现象，方法四演示的是液体扩散现象。

方法一

器材 小烧杯，玻璃缸（或钟罩），浓氨水，酚酞溶液，清水等。

操作

(1)在一只烧杯中注入浓氨水（半杯），另一只烧杯中注满清水，并滴入酚酞溶液。

(2)使两只烧杯靠近，放在桌面上，用玻璃缸罩好。稍许，就可观察到盛“水”的那只烧杯内，液面逐渐呈红色。这表明，氨分子已从另一只烧杯扩散到这只烧杯。

注意 浓氨水易挥发，有刺激性气味。演示时应使室内通风良好。

方法二

器材 广口瓶（带有塑料盖），氨水，酚酞溶液，脱脂棉，细铁丝等。

操作

(1)剪两条约 $1.5\text{cm}\times 6\text{cm}$ 的滤纸用酚酞溶液浸湿后贴在广口瓶内，一条竖贴在侧壁，一条横贴在靠瓶底处，如图所示。

(2)把吸有酚酞溶液的脱脂棉球挂在塑料瓶盖下的铁丝小钩上（盖好瓶盖后，该棉球应位于广口瓶颈部）。

(3)观察白色滤纸，可发现它的颜色自上而下逐渐变红。氨气的密度比空气小，又不受到外界干扰，完全是因为氨分子的不规则运动，使它们由上向下扩散，从而使酚酞变红的。

方法三

器材 广口瓶，玻璃板，碎铜屑，浓硝酸，凡士林等。

操作

(1)在广口瓶内放入铜屑，滴几滴浓硝酸，当瓶内产生红棕色的二氧化氮(NO_2)时，随即用盖好瓶口。

(2)将另一空的广口瓶(瓶内有空气)倒放在盛有红棕色气体的瓶上(如图)，瓶口相对后抽去玻璃板。

(3)虽然二氧化氮的密度比空气大，但由于分子的不规则运动，可看到红棕色气体不断向上方装有空气的瓶中运动(同时，密度小的无色空气也向下方瓶内运动)，即扩散现象。

注意 二氧化氮气体有毒，实验时为了不使其外逸，可在瓶口处涂抹一些凡士林，并使室内通风良好。演示完毕后，即将有关装置移至室外通风处。

方法四

目的 演示液体的扩散现象

器材 量筒，长颈漏斗(或注射器)，硫酸铜饱和溶液，洁净的冷水等。

操作

(1)如图(a)，先在量筒内装半筒清水，稳定后，将一长颈漏斗插到量筒底部，然后通过漏斗将硫酸铜溶液倒至清水下部。利用硫酸铜密度比水的密度大的特点，将清水抬高，并形成一清晰界面。

(2)静置一段时间(通常需要几个小时到数天)可看到两种液体的界面逐渐模糊最后达到均匀混合。这表明水分子和硫酸铜溶液中的铜离子都在做无规则运动，发生扩散。

注意

(1)本实验的关键是使硫酸铜溶液和清水在开始时有一个清晰的界面。

(2)本实验要看到界面处发生明显变化，往往需数小时以上。若用溴水代替硫酸铜则可以缩短时间。

建议 如果不用长颈漏斗，可采用如图(b)的方法获得清晰的分界面：先在量筒内注入三分二的硫酸铜溶液，液面上放一略小于量筒截面积的软木，事先在软木上系一细线，轻轻提住细线，再小心地往筒内注入清水。

151 扩散的快慢和温度有关

方法一

器材 试管，注射器(或移液管)，烧杯，热水、冷水等。

操作

(1)在两个试管中，各注入半试管清水。用吸有红墨水的注射器(注意拭净针头处残液后再吸入一点空气)分别往两试管底部注入等量的红墨水，使试管中红墨水和清水有明显的界面。注射完结后，将注射器轻轻取出，当针头达分界面处时可再吸入一些清水，以免针头从清水中取出时留下痕迹。

(2)将其中一个试管放入盛有热水的烧杯中，可看到该试管内的“界面”很快就模糊不清，而另一试管中的“界面”仍比较明显，如图所示。

这表明，液体扩散的快慢与温度有关，液体温度高，分子运动激烈，扩散加快。

注意 为防止试管内水的对抗，应使烧杯中热水水面高于试管中的水面。

方法二

器材 烧杯，注射器，红墨水（或高锰酸钾溶液），冷水，热水等。

操作 往两只烧杯中分别注入热水和冷水，用吸有红墨水的注射器，先往盛有冷水的烧杯中注入少量红墨水，再往盛有热水的烧杯中注入大致等量的红墨水少许，就可看到红墨水在热水中扩散较快。

建议 如不用注射器，也可用钢笔轻轻地将红墨水滴入水中。

非晶体的熔解和凝固 152

器材 烧杯(500ml)，温度计，试管(直径约 3cm)，酒精灯，铁架台，石棉网，停表（或手表），搅棒，松香和热水等。

操作

(1)取约 30g 松香，碾成粉末状后放入试管中，往烧杯中注入约 60 的热水，然后按图(a)所示安装好仪器。温度计的测温泡应插入松香内，烧杯内的水面略高于试管内松香顶面。

(2)用酒精灯加热烧杯中的水，并用搅棒搅动松香粉末。可看到松香先变软，再由稠变稀，流动性加强，最后成为液态。在此过程中每隔二分钟记录一次松香的温度。

(3)撤去酒精灯和烧杯，使液态松香在空气中自然冷却，同样记录温度。

(4)根据实验记录，画出松香的熔解和凝固曲线。可知松香在熔解和凝固过程中温度不断变化，表明非晶体没有一定的熔解温度（或凝固温度）。

实例

实验数据如下页列表。时间间隔：2 分钟。

以横轴代表时间，纵轴代表温度，作出温度与时间图线如图(b)所示。

实验篇·热学

记录顺序	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
温度()	50.9	56.6	63.8	68.0	72.0	79.9	82.5	85.9	87.0	
记录顺序	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
温度()	90.0	92.0	93.5	95.0	96.5	97.1	98.0	98.5	99.0	

晶体的熔解和凝固 153

这是热学中研究物态变化的一个重要实验。由于萘的熔点准确、取材容易、价格便宜，历来作为完成这一实验的传统材料。但由于萘的导热性较差，为获得较为理想的熔解=凝固图线，一般除应采用“水浴法”之外，还应采取其他必要措施。

方法一详述了用萘粉完成这一实验的要点和具体细节；方法二采用附加“内热器”的方式对实验装置加以改进；方法三、四介绍了用海波及冰代替萘完成实验的具体做法和注意点；方法五介绍的是用投影仪扩大实验可见度。

方法一

器材 萘粉(分析纯)15g, 试管夹, 烧杯(500ml), 清水(70 左右), 细玻璃棒(作搅棒用), 温度计(量程 100)2 支, 铁架台, 石棉铁丝网, 酒精灯, 方格坐标纸, 挡风屏等。

操作

(1)将萘粉装入试管中, 往烧杯内注入 70 左右热水约 350g。让试管浸入烧杯内热水中, 应使试管中的萘粉位于水面下且试管不碰到烧杯底。将一支温度计插在萘粉内, 应使其测温泡全部没入萘粉内并靠近试管底部, 但又不与管壁接触。将烧杯、石棉网, 装好萘并插好温度计的试管等组装在铁支加上(如图 a)。另一支温度计插入烧杯水中(注意不要碰到烧杯)。

(2)等到试管内萘的温度与烧杯中水的温度相等时, 开始用酒精灯通过烧杯中的水给萘缓缓加热, 同时不断用玻璃棒搅动萘粉, 使萘的各部分温度均匀。适当调节火焰大小, 使水与萘的温度差控制在 2—5 之间。

(3)当萘温达到 70 左右后, 维护水温比萘的温度度 4 左右, 每隔一分钟读一次温度计示数(先读萘温, 再读水温, 并保持这一顺序), 同时注意观察萘的状态变化, 并将萘温和状态变化情况填入表内。

(4)当萘全部熔解完, 温度达到 83 左右时, 移去酒精灯, 停止加热。接着观察萘的凝固过程, 并继续每隔一分钟记录一次萘的温度及状态变化情况。当萘全部凝固、温度下降到 70 左右时, 停止观察。

(5)取出温度计, 可用乙醚或四氯化碳清除温度计及试管中的萘。也可将沾有残余萘的试管在清水中浸泡数小时后, 用玻璃棒轻搅试管内壁, 残余萘即成块脱落。

(6)以横坐标表示时间, 以纵坐标表示温度, 作出萘的熔解-凝固图线。

注意

(1)应取纯一些的萘。通过对分析纯萘、化学纯萘、日用樟脑丸、樟脑精块的对比实验表明: 分析纯萘在熔解和凝固过程中, 温度保持不变, 水平段比较理想。

(2)萘是热的不良导体, 导热性能较差。在加热过程中, 为使萘各部分温度均匀, 萘的形状可取粉末状; 玻璃搅棒宜细些、尖些, 要插入萘层深部并有效搅动(这是达到萘温均匀的主要方法); 萘量应适中, 宜在 10—20g 之间(太多, 萘层较深, 不易搅拌, 且实验时间延长; 太少, 萘层太浅, 不能保证萘熔解前后都能浸没测温泡, 测不准温度)。

(3)为使萘的温度均匀升高, 使萘的熔解和凝固过程能维持较长时间, 本实验宜采用“水浴法”。烧杯内水量应能使试管内的萘全部位于水面下, 不宜过多; 烧杯内的水温应尽可能比萘温高出一恒定律, 通常以 2—5 为宜。

(4)在观察测定萘凝固温度时, 可将盛有液态萘的试管仍浸在烧杯内热水中。实验表明, 在水中慢慢冷却比在空气中冷却好。另外, 从实验情况看, 凝固点比熔点稍低些, 这是由于经加热后, 分子排列发生变化, 在凝固时, 分子排列不能完全复原所致。

实例 数据记录表。

根据实验数据绘出的熔解-凝固图线见图(b)。图线左边水平段所对应的温度就是萘的熔点, 即 79.9 。

时间(分)	0	1	2	3	4	5	6
萘温()	70.7	72.1	74.0	75.9	77.8	78.8	79.5
物态变化	固态						

时间(分)	7	8	9	10	11	12	13
萘温()	79.8	79.9	79.9	79.9	79.9	79.9	79.9
物态变化		熔解初			固液 共存		

时间(分)	14	15	16	17	18	19	20
萘温()	79.9	80.1	80.5	81.9	82.8	83.3	84.2
物态变化	熔解毕					停止加热	

时间(分)	21	22	23	24	25	26	27
萘温()	84.3	83.3	81.8	80.1	79.3	79.3	79.3
物态变化					凝固初	丝状	

时间(分)	28	29	30	31	32	33	34
萘温()	79.3	79.3	79.3	79.3	79.2	79.0	78.8
物态变化	固液 共存				固态		

时间(分)	35	36	37	38	39	40	41	42
萘温()	78.6	78.3	77.34	76.3	75.4	74.3	72.7	70.7
物态变化								

方法二

原理 为使实验得到较满意的结果。本方法采取了两个措施。一是改善萘内部的传热状况，用特制的金属（称作“内热器”）使萘粉在加热过程中温度分布较均匀。二是创造较好的恒温加热环境，用图(a)装置使萘在轻度沸腾的热水辐射下熔解。

器材 自制“内热器”，烧杯盖，试管塞，400ml、200ml 烧杯各一个，30mm 试管，-10—100 温度计等。

“内热器”的制作方法

用金属制成形状如图(b)、(c)的金属架(或导热片框)放入试管即成。

操作

(1)将制成的“内热器”放入试管，再向试管中装入 20g 左右的萘粉。让萘粉淹没在“内热器”中。并把温度计的水银泡小心地插入萘粉中间。

(2)大烧杯中装入 80 左右热水，让热水预热萘粉，注意观察两支温度计的示数变化。

(3)待两支温度计温差小于 5 时，开始用酒精灯加热烧杯。并每隔 0.5 分钟记录一次萘的温度。注意加热情况，不要使温升太快，一般控制在每分钟变化 1—2 左右。

(4) 萘全部熔解并继续升温一段后让其自然冷却，每隔 0.5 分记录萘的温度，一直到其全部凝固。

实例 室温 9 ，每 0.5 分钟记录的萘温。

表一：() 熔解

76.5	77	77.6	77.9	78.3	78.5	78.7	78.9	79	79	79	79.1		
79.1	79.4	79.7	80	80.1	80.3	80.4	80.6	80.7	80.8	80.9	81	81.6	82

表二：() 凝固

82.9	81	79.9	79	79	79	78.4	77.3	76.8	75.5	74	71.9	69
------	----	------	----	----	----	------	------	------	------	----	------	----

说明 内热器的几种简易制作

(1) 取电灯花线内芯的细铜丝，团成球状，使之松松地装入试管，高度为 20—30mm 为宜。然后再向试管内装萘粉，边装边摇匀，直到铜丝完全盖住为止，此时萘粉约在 20g 左右。

(2) 用细铜丝网布剪成 2.5cm 宽、8—10cm 长(依试管内径大小而定)的矩形铜丝网布条。卷成环形铜网后置入试管内，环形铜丝网内径应比温度计玻璃泡外径略大。在试管内所装萘粉的量应以能盖没“内热器”为最低限。

加装“内热器”的优点是使萘的吸热和放热比较均匀，实验数据比较理想；在熔解过程中不需搅拌，且加速了萘的吸热和放热，大大缩短了实验时间。存在问题是由于自制“内热器”把萘包围起来后，影响了熔解现象的观察。

方法三

器材 用海波代替萘粉，其他器材与方法一相同。

操作 与方法一大致相同，因海波熔解后流动性较好，可不用搅拌。

实例 40g 海波，用 80 热水加热(用酒精灯保持水温大致恒定)。

时间(分)	0	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8
温度()	35.0	42.0	46.8	47.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.2	51.2	53.0

说明

(1) 海波(硫代硫酸钠 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 是白色半透明晶体，易潮解，溶于水 and 酒精，熔点为 48 。用作本实验用的海波可从照相器材商店购买(通常用作定影剂)。

因海波熔点低，可以用热水加热，实验和清洗方便，没有萘熔解时较强的刺激性气味，故可在学生实验中用海波代替萘。

(2) 从记录看，海波熔解实验效果很好。但是，每次实验在凝固阶段

出现过冷现象。故在空气中自然冷却，过冷度达 23°C （即冷却到 25°C 仍不凝固），尔后突然升到 48°C ，放出熔解热而凝固。采取向液态海波中撒海波晶粒，搅拌等方法虽能减少过冷度，但不能完全排除过冷现象。

方法四

目的 研究冰熔解和凝固过程中，温度变化的情况。

器材 冰 25g，水 2—3ml，食盐 4g，烧杯(50ml)，试管(10ml)，温度计(最小刻度 1°C 、 -3°C — 103°C)，方座支架角匙，搅棒，计时表等。

操作

(1)把冰砸成约 1cm^3 的小块，装入烧杯内(约半杯)。

(2)在试管中倒入 2—3ml 水，把温度计插入水中，把试管放入烧杯内的冰块中，调节温度计高度，使温度计的水银泡被水淹没，并保持在水柱中心。

(3)用角匙向冰上撒食盐，并用搅棒搅拌，同时每隔半分钟或 1 分钟记录一次温度。当水从室温下降到 0°C 时，水开始凝固成冰，整个凝固过程，保持 0°C 不变。

(4)当全部水凝固成冰后，冰的温度迅速下降到 -3°C 左右。取出试管擦干管外冰水。观察熔解并记录：温度(每隔半分钟或 1 分钟记录一次，至试管中的水温达室温为止)。

(5)根据记录作出温度随时间变化的图象。

实验记录：(室温 10°C)

凝 固	时间(分)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
	温度($^{\circ}\text{C}$)	10	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	-1.5	-3

熔 解	时间(分)	6.5	7.5	8.5-23.5	24.5
	温度($^{\circ}\text{C}$)	-3	-1.5	0	1

注意

(1)食盐不可撒进试管里，否则会影响水的凝固

(2)温度计泡应完全浸没在水面下，放在水柱中心测量才准确。

说明 用冰和水做晶体熔解和凝固实验，取材容易(尤其是当今冰箱已广泛进入家庭)，操作简单，效果明显，且又可消除用萘作实验时所产生的污染。

方法五

器材 萘熔解器，投影仪，大型演示电表，热敏温度计，萘粉(或海波)，酒精灯，三角铁架，石棉网，火柴，挂钟等。

操作

(1)将电表的电压、电流等插板均抽去，将预先做好的透明塑料插板插入，将电表换档开关置于 G 档。而后与热敏温度计连接，接着按热敏温度计使用说明书中的详细说明操作，将透明塑料插板制成温度刻度盘后插入电表。

(3)将萘熔解器套件中的试管盖取下不用，用硬纸板自制一个，并开好两个孔，一个插入搅拌器，另一个可插入热敏温度计测温元件杆(原试管盖上的孔太小，插不进)。

- (4)将电表卧放在投影仪上。
 (5)其余实验步骤与一般实验相同
 (6)上法可将温度计指针偏转情况及其指示读数一览无遗地投影在白色屏幕上，使全部学生都能清楚地观察。

测量冰的熔解热 154

方法一

原理 待测物体 A(本实验中是冰块)和已知比热的物体 B(本实验中是水和量热器内桶)混合，如果能使其成为一个与外界绝热的系统，则 A(或 B)放出的热量全部被 B(或 A)吸收，即可算出待测系统的熔解热。

在实验中一般无法形成一个完美的绝热系统，因此要尽量设法减小系统与外界总的热交换量，方法是使实验系统在实验的前一部分时间内向外界放热 Q_1 ，后一部分时间内从外界吸热 Q_2 ，尽量使 Q_1 和 Q_2 相等而互相抵消。

根据“牛顿冷却定律”，在系统温度 T 与环境温度 T_0 相差不大(约在 10°C — 15°C 之内)时，系统环境的传热速率 dQ/dt 与温差 $(T - T_0)$ 成正比，即

$$dQ/dt = K(T - T_0),$$

$$dQ = K(T - T_0)dt.$$

式中系统温度 T 是时间 t 的函数， T_0 是基本不变的。从上式可看出， $T-t$ 图线包围的面积可代表传热量 Q 。

器材 量热器，温度计，天平，砝码，秒表，冰块等。

操作

(1)将量热器内筒和搅拌器干，称出它们的总质量 m_1 ，查出它们的比热 c_1 。

(2)记下室温 T_0 。取温度比室温高的水注入量热器内筒(约装筒高的二分之一)，称出水与内筒、搅拌器的总质量 m ，算出水的质量 $m_2 = m - m_1$ ，并查出水的比热 c_2 。

(3)安装好量热器后，开始搅拌筒中的水，注意温度计的读数，从冰水混和物中取一块大小适当的冰(选杂质、气泡和裂缝少的)，用布仔细干后投入内筒，同时记下水的初温 T_1 (T_1 应比室温 T_0 适当地高一些)，在搅拌的同时每隔 10 秒钟记录一次温度值，直至温度降到最低点 T_2 。

(4)以横轴代表时间 t ，纵轴代表温度 T ，作出 $T-t$ 图(如图)。图中 t_1 为投入冰块的时刻， t_2 为温度最低的时刻。曲边三角形 BFC 的面积 S_1 可代表系统向外界散发的热量；曲边三角形 CDG 的面积 S_2 可代表系统从外界吸收的热量。实验中应尽量使 $S_1 = S_2$ 。如果 S_1 和 S_2 相差太大，则应调整水、冰的质量和温度后重复操作(2)、(3)，直到 S_1 和 S_2 基本相等为止。

(5)称出内筒及其中水的总质量 m'' ，算出冰的质量 $m_3 = m'' - m$ 。

(6)根据公式 $(m_1 c_1 + m_2 c_2)(T_1 - T_2) = m_3 c_1 T_2 + m_3 \lambda$ 算出冰的熔解热 λ 。

注意

- (1)投冰、搅拌时不要将水溅出，取出温度计时要尽量少将水带出。
 (2)搅拌要轻、缓，以免对系统作太多的功。

分析 从 $Q = [(m_1c_1 + m_2c_2)(T_1 - T_2) - m_2c_1T_2] / m_2$ 可知道冰的熔解热的相对误差

$$E_\lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial m_1} \right| \cdot \frac{\Delta m_1}{\lambda} + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial m_2} \right| \cdot \frac{\Delta m_2}{\lambda} + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial T_1} \right| \frac{\Delta T_1}{\lambda} + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial T_2} \right| \cdot \frac{\Delta T_2}{\lambda}。$$

因为质量都是用天平称的， m_1 和 m_2 相对来说都很小， T_1 和 T_2 相等，因此上式略去第一、二项后成为

$$\begin{aligned} E_\lambda &= \frac{(m_1c_1 + m_2c_2) / m_2 + (m_1c_1 + m_2c_2 + m_2c_1) / m_2}{[(m_1c_1 + m_2c_2)(T_1 - T_2)](-m_2c_1T_2)m_2} \cdot \Delta T \\ &= \frac{2 \frac{m_1}{m_2} c_1 + 2c_2 + c_1}{\left(\frac{m_1}{m_2} \cdot c_1 + c_2\right)(T_1 - T_2) - c_1T_2} \cdot \Delta T \end{aligned}$$

从上式中可看出：适当地增大冰块的质量即减小 T_2 的值，对减小 E 是有利的；此外如能选用精度较高的温度计(如 0.1 分度的温度计)，以减小 ΔT ，也能明显地减小 E 。

方法二

原理 实验装置如图所示由安培表和伏特表测量出通过电阻加热器上的电流 I 和加在它两端的电压 V ，用秒表测出通电时间 t ，那么在 t 秒钟内由电热转变成的热能就是

$$Q = V \cdot I \cdot t。$$

如果在 t 秒钟内有质量为 m 的冰块熔解成了水，系统的初温和末温都是 T ，那么

$$\begin{aligned} m \lambda + mcT &= V \cdot I \cdot t， \\ &= (VI \cdot t - mcT) / m， \end{aligned}$$

式中 λ 和 c 分别代表冰的熔解热和水的比热。

器材 电量热器，伏特表，安培表，低压直流电源，滑动变阻器(50、2A)，温度计，天平，砝码，秒表，电键，导线等。

操作

(1)用天平测出量热器内筒和其中水的总质量 m_1 ，然后如图连接好实验装置(打开电键)。从温度计上读出水的初温 T 。

(2)接通电键，同时使秒表开始计时。记下伏特表的读数 V 和安培表的读数 I 。边搅拌边观察温度计的读数，如果发现水温升高，就从冰水混合物中取适量的小冰块用干布擦干后投入水中，使水温基本上保持不变。

(3)在熔冰的过程中，注意观察伏特表和安培表的读数。如果发现两个电表的读数有变化，就调节滑动变阻器，使两个电表恢复到原来的读数(至少使它们读数的乘积保持不变)。

(4)通电适当长的时间以后，打开电键，同时使秒表停止计时(注意：打开电键前要尽量使水温和水的初温 T 完全一样)。

(5)用天平称出量热器内筒和其中水的总质量 m_2 ，熔解的冰的质量就是 $m = m_2 - m_1$ 。

(6)用公式 $\lambda = (V \cdot I \cdot t - mcT) / m$ 计算出冰的熔解热。

注意

(1)要尽量使量热器内筒和水的温度和室温保持一致,这样可以减少系统和外界的热交换。

(2)搅拌的动作不要过于激烈,以免做许多不必要的功。

(3)因为电量热器中电阻丝的电阻是比较小的(一般为几个欧姆),所以伏特表和安培表的接法一定要照图连接,不能用安培表内接的方法。

155 熔点与压强的关系

原理 熔点与压强的关系,可用下式表示

$$\Delta T = \frac{(V_1 - V_2)T}{\lambda} \Delta p。$$

式中 λ 为熔解热, T 为熔点, V_1 和 V_2 分别为液体和固体每千克质量所占体积, Δp 为压强变化值, ΔT 为相应的熔点的变化值。从上式可知,如果固体熔解成液体时体积胀大(如锡),其熔点将随压强的增加而增加;如果固体熔解时体积缩小(如冰),其熔点将随压强的增加而降低。实验表明,压强每增加 1 大气压,冰的熔点的降低 0.0075 (与上式计算值能吻合)。下表给出了冰的熔点和压强的关系。

压强(大气压)	1	336	615	890	1155
冰的熔点()	0	- 2.5	- 5	- 7.5	- 10

器材 冰块,细钢丝,重物(约 5kg)2 个,支座等。

操作 把系有重物的细钢丝横挂在冰块中部(如图)。由于钢丝下的冰所受压强增加,熔点降低,熔化为水后使钢丝逐渐嵌入冰块。钢丝上方的水又结成冰(原因有二,其一是压强减小后熔点又升高;其二是钢丝下方的冰熔解时要吸收热量)。这样,当钢丝从上而下穿过整个冰块后,冰块仍然是完整的一块,即“复冰现象”。

注意 本实验只限于冰以及环境温度在 0 以下且接近 0 时才易成功。如冰及环境温度过低,虽增加压强,也很难使冰的熔点降到当时的环境温度以下,就不会发生“复冰现象”。

建议 本实验另一简易演示方法是,当环境温度合适时,取两块小冰块,相互紧压后再松开。可发现,两块冰已合为一体。

液体的蒸发 156

方法一

器材 大小相等的磨砂玻璃,火柴,棉花,滴管,酒精等。

操作

(1)用酒精棉花在两块磨砂玻璃上两个大小相等的圆圈,练习本在其中一块磨砂玻璃上扇动,观察、比较两块磨砂玻璃上的酒精蒸发的快慢。

(2)杉滴管在两块磨砂玻璃上滴入体积大小基本相等的酒精,然后使其中一块玻璃上的酒精表面积增大,观察、比较两块磨砂玻璃上酒精蒸发的快慢。

(3)用酒精棉花在两块磨砂玻璃上同时涂上两个大小相等圆圈,其中一块靠近火焰,观察、比较两块磨砂玻璃上酒精蒸发的快慢。

(4)用脱脂棉在两块磨砂玻璃上同时涂两个大小相等的圆圈，其中一个用酒精涂，另一个用水涂，观察、比较两块磨砂玻璃上酒精蒸发的快慢。

归纳观察到的现象可知：液体的表面积越大，温度越高，液体表面上空气流动得越快，蒸发得越快。蒸发快慢还与物质性质有关。

注意 用一般玻璃做此实验，酒精在玻璃上干湿程度不明显，而用磨砂玻璃做干湿程度较明显。

操作(1)、(2)不能与操作(3)交换，因玻璃受热后温度不会很快冷却。

方法二

器材 烧瓶，小烧杯，细玻璃管，铁支架，橡皮塞，白纸屏，染红色水，纱布，酒精(或乙醚)，水，扇子等。

操作

(1)按图所示，把有关器材组装成一个伽利略温度计。

(2)对球形烧瓶 风，玻璃管内染色液柱高度不变。

(3)把浸有酒精的纱布(先折叠成四层)敷在球形烧瓶顶部，红色液柱上升，表明酒精蒸发吸热；再把纱布摊开成单层敷在球形烧瓶顶部，液柱上升加快，表明酒精的蒸发面积加大，蒸发得快。

(4)对敷有酒精纱布的烧瓶 风，液柱进一步升高。表明酒精表面周围空气流动得越快，蒸发得越快。

(5)用同样的纱布用水浸湿后，重复以上操作，观察和比较染色水柱变化情况。可知，蒸发得快慢还与液体本身的性质有关。在同样条件下，酒精比水蒸发得快。

说明 本方法可见度大，适宜用作演示实验；不足之处是，不便于演示温度高低对蒸发快慢的影响。

液体蒸发时温度降低 157

显示液体蒸发时温度降低的方法很多。本实验方法一用液体温度计显示，简便易行，适宜用作分组实验或边讲边实验；方法二、三用气体温度计显示，现象明显，可见度大，可用作演示实验；方法四、五则着重从蒸发致冷的效果加以显示，有利于说明致冷设备的原理，且颇具趣味性。

方法一

器材 温度计，小烧杯，酒精等。

操作 先将温度计置于空气中，观察这时温度计的示数(即室温)；再把温度计的感温泡浸没在盛有酒精的烧杯中，可看到温度计的示数仍保持不变(酒精温度同室温)；然后把温度计从酒精中取出(注意：这时温度计上沾有酒精)，随着酒精的蒸发，可看到温度计的示数逐渐降低，降低的温度值可通过跟另一温度计示数相比较的方式以显示。

说明 此现象传统的演示方法是，用浸有酒精的棉花包裹在温度计感温泡上。但由于棉花上吸有的酒精量较多，会导致温度降低较缓慢。而采用温度计直接蘸取酒精的方式，既节省酒精，又能增强演示效果。

方法二

器材 温度计，小烧杯，酒精等。

操作 先将温度计置于空气中，观察这时温度计的示数(即室温

值)；再把温度计的感温泡浸没在盛有酒精的烧杯中，可看到温度计的示数仍保持不变(酒精温度同室温)；然后把温度计从酒精中取出(注意：这时温度计上沾有酒精)，随着酒精的蒸发，可看到温度计的示数逐渐降低，降低的温度值可通过跟另一温度计示数相比较的方式加以显示。

说明 此现象传统的演示方法是，用浸有酒精的棉花包裹在温度计感温泡上。但由于棉花上吸有的酒精量较多，会导致温度降低较缓慢。而采用温度计直接蘸取酒精的方式，既节省酒精，又能增强演示效果。

方法二

器材 试管，细长玻璃管，橡皮塞，皮吹，酒精，白纸屏等。

操作

(1)按图(a)组装成一气体温度计。当试管外壁未涂酒精时，用皮吹吹，弯玻璃管中的有色液注高度基本不变化。

(2)用蘸有酒精的棉花涂抹试管外壁、再用皮吹吹。由于酒精急剧蒸发吸收热量，使试管内温度下降，有色液柱下降。

说明 本实验现象明显，可见度大。采用弯曲形玻璃管有利于防止有色液柱落入试管内，若要进一步提高测试灵敏度，可采用烧瓶(容积大于试管)附加水平方向玻璃管的方式(图 b)。

方法三

器材 圆底烧瓶，烧杯，玻璃管(长 30—40cm、内径约 5mm)，橡皮塞，染色水，铁架台，乙醚(或酒精)，白纸屏等。

操作

(1)按图组装仪器。烧杯内是染色水。

(2)将乙醚均匀涂在烧瓶的球形顶部。由于乙醚蒸发吸热，瓶内空气温度下降，体积缩小，致使染色水沿玻璃管迅速上升，并进入烧瓶内。

方法四

器材 铁架台，烧瓶(配穿孔橡皮塞)，长、短 L 形玻璃管各 1 根，泡沫塑料，薄玻璃，打气筒(或皮老虎)，长、短橡皮管各 1 根，乙醚 25ml 左右。

操作

(1)按图装置好实验仪器，烧瓶内注乙醚，进气管插入乙醚，出气管接上长橡皮管直通室外，瓶底和玻璃片之间滴上一滴水。

(2)用短橡皮管把打气筒和进气管接通。打气，约 2 分钟，由于蒸发致冷使瓶下水滴结冰。抽去泡沫塑料块，玻璃片掉下。

注意 排气橡皮管一定要通到室外，以免大量乙醚蒸气污染室内空气。

说明 打气和抽气相比，空气流速快，不污损气筒。且把空气打入乙醚内部，产生许多气泡，增大了蒸发面，所以乙醚蒸发极为迅速，以致在室温接近 30℃ 时仍能使水滴很快结冰。

方法五

目的 观察乙醚蒸发的致冷作用。

器材 包装用的泡沫硬塑料块，直径 60mm 左右的金属盖，乙醚，皮老虎(或扇子)，水等。

操作

(1)金属盖开口向上，放在表面平整的泡沫塑料块上(如图)，金属盖与泡沫塑料块之间放少许水。

(2)向金属盖内注入深约 2mm 的少量乙醚。

(3)用皮老虎对乙醚液面打气(或用扇子扇),使乙醚迅速蒸发吸热,于是金属盖下的水会凝结成水。用手把金属盖往上提起来,泡沫塑料块不掉下来。当把金属盖与泡沫塑料块分开后,可以看到它们之间有冰屑。

158 液体的沸腾

沸腾是一种液体内部和表面同时进行的剧烈汽化的现象。本实验从三方面演示沸腾的特点:方法一说明液体在沸腾过程中,温度保持不变;方法二说明沸腾需要吸收热量(汽化热);方法三说明液体沸腾时的饱和汽压等于外界压强。

方法一

器材 大烧杯,细玻璃(弯成直角形),温度计,泡沫塑料制瓶盖,净水,石棉铁丝网,铁支架,酒精灯,碎陶瓷片,食盐等。

操作

(1)把洁净的碎瓷片(少许)置入盛有约大半杯水的烧杯中。将用泡沫塑料加工成的杯盖紧嵌在杯口,同时插入2支温度计和1根直角形细玻璃管(应使温度计A的感温泡位于水面上方,温度计B的感温泡浸没在水中)。整个实验装置如图所示。

(2)加热烧杯,当水温达沸点时,注意观察水的沸腾现象。同时可发现,在水沸腾过程中,温度计B的示数保持不变,且与温度计A的示数基本相同。这表明,在沸腾时,水汽化为同温度的水蒸气,虽然继续吸热,但温度却保持不变。

(3)往水中置入适量盐粒,加热至沸腾。可发现,温度计B的示数较前略有增加。这表明沸点与液体的纯净程度有关。

注意

(1)本实验应选用较纯净的水,且水中应溶有较多的空气,沸腾现象较显著。一般可选用自然、清洁的冷水,而不宜选用冷开水。

(2)两支温度计应事先在沸水中加以校对,只有示数相等或差值很小时才能使用。

(3)过热液体的暴沸,严重时会引起容器爆炸。往烧杯中置入附有空气的多孔物质(例碎陶瓷片等)有助于防止“暴沸”的发生。

方法二

器材 大烧杯,温度计,铁支架,试管,石棉铁丝网,酒精灯,净水等。

操作

(1)实验装置如图所示,试管和烧杯内盛的均为热水(试管内液面不宜高于试管外的液面)。

(2)对烧杯内热水加热。当水沸腾时,用温度计先后测出试管内外的水温,两者基本相同,但试管内的水并不沸腾。

这表明,虽然试管中的水温已达到沸点,但由于得不到沸腾所需的汽化热,故不会沸腾。

建议 可用锅和碗分别代替烧杯和试管,把它们放在火炉上加热时,同样能观察到当锅内的水沸腾时,碗中的水并不沸腾。

方法三

原理 沸腾是一种液体内部和表面同时进行汽化的现象。温度升高,汽化现象加剧,液体内部气泡中饱和汽压逐渐增高。当该饱和汽压等于外界压强时,就发生了沸腾现象。

器材 烧杯，玻璃漏斗，试管，石棉铁丝网，酒精灯，铁支架，碎陶瓷片，洁净的水等。

操作

(1)把烧杯，倒置的漏斗和试管等一起浸没在水池的水中，再把它们从水中取出，使试管内充满水，而烧杯中只须留大半杯水，如图所示。

(2)拭干烧杯外表的残水后用酒精灯加热。水沸腾时，气泡经漏斗上升到试管顶部，试管内水位下降，直到试管内外水面相齐。且在水沸腾过程中，试管内外水面总保持相齐。这表明，水沸腾时，试管内水面上方的饱和蒸汽压等于外界大气压。

(3)取走酒精灯，水停止沸腾并逐渐降温。可看到，试管内水面又逐渐上升，说明饱和汽压随温度变化很大。

注意

(1)烧杯内应入少许碎陶瓷片，以促进沸腾现象的发生并防止“暴沸”。

(2)漏斗的作用是支架试管，并收集杯底的气泡使它们进入试管。水沸腾过程中，有时试管内水面会低于试管外的水面（可达2—3cm）。这是由于水中溶有微量的空气，沸腾时逸出并会集在试管中从而使试管内气压增大的缘故。

沸点与外界气压的关系 159

沸点与外压强有关，这是由于沸腾时的饱和汽压等于外压强，而饱和汽压又随温度变化而升降。因此，沸点随着外压强的增大而升高，随着外压强的减小而降低。水的沸点和外压强关系如图(a)、图(b)所示。可知，虽然在大范围内沸点随压强变化是非线性的，但在atm附近区域，沸点与压强变化却可看作是线性关系。

方法一

器材

锥形烧瓶(250ml)，铁架台(连夹持附件)，热水，酒精灯，石棉网，医用注射器(100ml)，细橡皮管(或软塑料管)，橡皮塞，短玻璃管等。

操作

(1)用酒精灯对锥形烧瓶中的水(为了节省演示时间，可用热水)加热至沸腾。

(2)移去酒精灯，锥形烧瓶中的水停止沸腾。

(3)将接橡皮管的橡皮塞盖紧烧瓶口。用医用注射器通过橡皮管向烧瓶内抽气以降低瓶内水面上方的气压，即可看到锥形烧瓶中的水重又剧烈地沸腾起来(如图)。由此说明，压强减小时，水的沸点会降低。

注意

(1)实验不应使锥形烧瓶内水面上方的气压有适当的变化范围。为此需选用容量较大的医用注射器。同时灌入的水也要适当多一些，使瓶内水面上方空气的体积较小。

(2)所用橡皮管的管壁不能太薄和过软，否则抽气时管子容易发生瘪瘪而影响实验效果。

(3)橡皮管和瓶塞等连接处不能漏气。必要时可用橡皮泥或石蜡等填封。

方法二

器材烧瓶，橡皮塞，橡皮管，螺旋夹，尖嘴玻璃管，大小烧杯各一

只，铁架台（边 支持附件），铁圈，石棉网，酒精灯，热水和染红的冷等。

操作

(1)在烧瓶内注入半瓶热水，放在酒精灯上加热，使水沸腾(如图 a)。

(2)待烧瓶内水沸腾几分钟后，将带尖嘴玻璃管的橡皮塞紧塞住烧瓶口，(玻璃管的尖嘴段朝瓶内)等有水蒸气从橡皮管喷出后拧紧螺旋夹，移去酒精灯。当水停止沸腾时，将烧瓶浸没在大烧杯的冷水中，如图(b)所示。烧瓶中热水立即重新沸腾起来。

(3)把烧瓶倒置，橡皮管放入烧杯中红色水中。松开螺旋夹，烧瓶中会有一股红色喷泉出现，如图(c)。说明瓶内气压比外界气压低。

注意

(1)所有连接处不能漏气，以免影响实验效果。

(2)对水加热后，让水沸腾的时间不能过短，等有大量水蒸气从橡皮管喷出后才能停止加热。这样，可使烧瓶内的水蒸气把空气尽量排出以延长喷泉时间。

(3)用水浸法冷却，冷却效果更好。待水沸腾后，应立即移去烧杯，以免影响观察。

方法三

器材 水银气压计，手摇抽气机，方座支架，温度计，双孔橡胶塞，具支试管，烧杯，温水，乙醚等。

操作

(1)往具支试管内注入一些乙醚，先不将橡胶塞塞紧，把试管放入盛有温水的烧杯中。观察乙醚在大气压下沸腾，并记下这时的温度，即乙醚的沸点（在标准大气压下约为 35 ）。。

(2)取走烧杯，乙醚停止沸腾。将有关器件按图所示组装好，塞紧橡胶塞。迅速摇动抽气机，则压强计显示出试管内压强下降，当试管内气压下降到一定值后乙醚又沸腾起来。从温度计示数知沸腾温度降低了(乙醚在 44cmHg 时沸腾温度为 20 ）。。

(3)拔开具支试管与抽气机相连的橡皮管，使空气重新进入具支试管，气压增大，乙醚停止沸腾。

说明 在不同温度下乙醚、酒精的饱和汽压见下表。

单位 mmHg

温度()	78	60	40	35	20	0	- 20
乙 醚	—	1734	921	760	440	185	66
酒 精	760	350	134	—	44	12	3.3

由上表中数据可知，若不用乙醚，适当改变操作方法后，亦可用酒精演示。为便于用酒精演示，可将盛有酒精试管浸入热水中观察在大气压下沸腾并测沸点；然后将该试管浸在 40—60 温水中抽气使试管内气压降低亦可使酒精再沸腾。

方法四

器材 平底或圆底烧瓶，500ml（或盐水瓶），橡皮塞（上有三孔），短玻璃管，温度计，T形玻璃管，小气球，两用气管，橡皮管，铁架台（连夹持附件），弹簧夹子，酒精灯，石棉网，热水等。

操作

(1)向烧瓶内注入约四分之三瓶的热水，在瓶口的橡皮塞中插入玻璃管，温度计和T形管，把小气球扎在玻璃管上端。夹子松开，使瓶内空气与外界大气连通，用酒精灯加热至水沸腾。

(2)移去酒精灯，待水停止沸腾后盖紧橡皮塞。用夹子夹住橡皮管，用两用气筒向瓶外抽气。随着瓶内压强不断减小，可看到气球发生缩瘪的同时，水又沸腾起来，从温度计上也可以看出水温低于100℃，说明压强减小，水的沸点就降低。

(3)放开夹子，加热使水沸腾，不移去酒精灯，迅速用夹子夹住，利用两用气筒向瓶内打气，以增大压强。可看到气球会胀大，而水即停止沸腾。同时从温度计上可看出，水温即使到达100℃，水仍然不沸腾。

注意

(1)在瓶塞、小气球和橡皮管等的连接处必须密封。所用的橡皮管管壁要厚些，以免抽气时被压扁，影响继续抽气。

(2)演示前应检查两用气筒是否漏气，实验后需对气筒内部进行干燥处理（因抽出的气体中含有水蒸气及小水滴）。

(3)所用烧瓶要有足够的强度，能耐一个大气压。为防止暴沸现象产生，可在烧瓶底存放少许砂粒。

(4)演示中气不能打得太多，同时瓶塞宜用胶带或金属丝系住，且玻璃管上端应锉磨粗糙后再将气球用线扎紧，以防加压时，气球冲出、脱落。

说明 本实验设置气球，既能直观地显示瓶内气压的变化情况，也能起到“安全阀”的作用。但在一个大气压下，气球的胀大不明显。

测定水的汽化热 160

方法一

器材 烧瓶，玻璃管，铁架台，酒精灯，试管，旺热器，温度计，天平，砝码，冷水等。

操作

(1)按图所示装置仪器，用天平称量量热器小筒的质量 m_1 。

(2)向量热器小筒内倒入占总体积 1/3 的冷水，并称出其总质量 m_2 。算出冷水的质量 $m_3 = m_2 - m_1$ 。

(3)给烧瓶加热直至水沸腾，当设备预热并有大量蒸气顺利导出时，再将量热器移至导气管口下方，迅速记下导气管口插入水内前冷水的初温 t_1 ，并测出烧瓶内沸水的温度 t 。

(4)观察温度计 2 的示数，当水温高于室温的度数与初温度低于室温的度数大约相等时，先把量热器等从导气管口下方移出，再熄灭酒精灯。并记录量热器中水的最高终温 t_2 。

(5)用天平称量量热器小筒与水的总质量 m_4 ，算出凝结成水的水蒸气质量 $m_5 = m_4 - m_2$ 。

(6)把数据填入下表，并利用热平衡方程计算水的汽化热 L ，设 c 、 c_1 分别为水与铝的比热容。

$$c_1 m_2 (t_2 - t_1) + (t_2 - t_1) = L m_5 + c m_5 (t - t_2)$$

$$L = \frac{(c_1 m_1 + c m_3)(t_2 - t_1) - c m_5 (t - t_2)}{m_5}$$

注意

(1)实验时，使初、末温度与室温之差大致相等，是为了减小与外界热传递对实验数据的影响。

(2)本实验成功的关键是防止水蒸气中的小液滴带入量热器，这些液滴不能提供汽化热。故装置中另加入一个试管，作为“除水器”，但在连续输送的过程中，由于散热作用，还会有部分水蒸气变成小液滴，故玻璃管应尽可能用绝热材料包裹。并注意应在导气管大量排汽，且当管口不见水滴时再插入量热器水中。

(3)由于受外界压强变化等因素的影响，水的沸点并非一定是 100℃。因此实验中须测量沸水的温度（即水蒸气的温度）

(4)向量热器中通汽完毕后，要先将量热器移开。当导气管口离开水面后，再撤走酒精灯。否则，由于烧瓶内温度降低、气压减小，外界大气压会将量热器中的一部分水再压入导气管或除水器中，将会引起较大的误差。

分析

(1)由于水蒸气通过导气管不可避免要散失热量，总会有一些已凝结的水滴带入量热器，这些水滴已不能再提供凝结热，故测得的汽化热值往往偏小，在要求高的场合可对“质量” m 进行修正，以减少系统误差。

(2)冷凝在量热器中水蒸气的质量不宜过小，否则，由测量而引起的相对误差会增大。

验证实例

次数	物理量	量热器小筒的质量 $m_1(\text{g})$	小筒与冷水的总质量 $m_2(\text{g})$	冷水的质量 $m_3=m_2 - m_1(\text{g})$	小筒与冷水、水蒸气的总质量 $m_4(\text{g})$	水蒸气的质量 $m_5=m_4 - m_2(\text{g})$	初温度 $t_1(^\circ\text{C})$	末温度 $t_2(^\circ\text{C})$	水的汽化热 $L(\text{cal/g})$
1		111.76	335.38	223.62	339.27	3.89	27.4	37.3	5.3×10^2
2		111.76	339.90	228.14	343.48	3.58	27.2	36.2	5.3×10^2
3		111.76	329.10	217.34	331.20	2.10	27.5	33.0	5.3×10^2

沸水温度 $t=100^\circ\text{C}$ ， L 的平均值为 $5.3 \times 10^2 \text{cal/g}$ 。

方法二

器材 自制电热汽化器，天平，直流伏特计，直流安培计，低压电源，停表等。

电热汽化器的自制方法

选用容量约为 50ml、直径约 25mm 的试管，嵌装在适当大的聚苯乙烯泡沫塑料隔热套中；在试管橡皮塞上开 3 个孔，其中一对孔装硬铜钱，铜钱间连有电热丝，另一孔中插入直角形玻璃管，供蒸气喷出用。

操作

(1)往电热汽化器内注入沸水，使电热丝浸入水中，再用橡皮塞塞紧管口，置于天平左端。在天平另一端加砝码，砝码加到比左端轻 1g 左右。整个装置如图所示。

(2)接通电源、电压 U 调到 10—15V，电流 I 相应地在 1—2A，不久汽化器中水沸腾，直角形玻璃管喷嘴处喷出蒸气。

(3)由于水不断汽化，天平慢慢趋向平衡。当天平指针指向平衡位置

时刻，开始计时，然后再从天平右盘中取出一个小砝码 m 约 1—2g，使天平横梁再一次倾斜。

(4)不断汽化的水变成蒸气喷出后，天平再一次趋向平衡，当天平指针又一次指向平衡位置时，记下该时刻 t 。

(5)重复上述步骤，进行下一次测量。

(6)由于电热汽化器可看作绝热系统，那么在时间内供给电炉丝的电功 W 全部转化为水汽化所需要的热量 Q 。则由 $W=IU t$ ， $Q=Lm$ 可得 $L=IU t/m$ ，从而计算出水的汽化热。

方法三

器材 铝锅，火炉，计时器，温度计，水等。

操作 在铝锅里装一些室温(t_1)下的水，将铝锅放在火炉上加热。设经过时间水达到沸点 t_2 ，再经时间水全部汽化。测出 t_1 、 t_2 ， t_1 、 t_2 。已知水的比热为 $c=4.2 \times 10^3(\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ，则水的汽化热 L 可由下式求得

$$L=c(t_2 - t_1)t_2/t_1(\text{J}/\text{kg})。$$

分析 由于水在升温和汽化(沸腾)的过程中，随着热交换物体间温差的变化，水在单位时间内吸热会减少，向周围空气放热会增多，因此水在单位时间内获得的净热量将减少。以上计算把铝锅中水每秒钟吸收的热量看作不变，故会产生较大误差。另外，水在未达到沸腾时已开始汽化(蒸发)，水的质量亦随升温而逐渐减小，这些因素本实验并未考虑。故只能作为粗测汽化热的一种方法。

161 未饱和汽压与饱和汽压

方法一

器材 托里拆利演示器，水银，乙醚(或酒精)，弯头移液管等。

操作

(1)把灌满水银的细长玻璃管倒立在水银槽中，管内水银会下落一段。用橡皮圈标出管内水银面的位置。

(2)把吸有乙醚的移液管弯曲尖口伸入水银槽内，使其位于玻璃管下端管口处，注入 1—2 滴乙醚。乙醚立即上升至玻璃上方并形成乙醚蒸气的未饱和汽。管内水银面下降，该落差 h 即为未饱和汽压强值，如图。

(3)再往管内注入 1—2 滴乙醚(不能太多，多了不能形成未饱和汽)，随着乙醚全部汽化，可见管内水银面继续下降。表明未饱和汽压随着未饱和汽密度增加而增加。

(4)使长管逐渐倾斜(倾角不宜太大，应避免管内水银面上出现乙醚液层，达到饱和)，并分别比较管内水银柱高， h_1 ， h_2 ， h_3 ……，可知 $h_1 > h_2 > h_3$ ……。说明在温度不变时，乙醚示饱和汽的压强随体积的减小而增大(近似遵循玻-马定律)。

(5)往长玻璃管内再注入适量的乙醚。当使长管倾斜到一定位置时，水银面上出现薄的乙醚液层，表明乙醚蒸气已达饱和状态。测量此时的水银柱高度，比操作(1)、(2)、(3)、(4)中任何一次测量的都要小，说明在同一温度下饱和汽压大于未饱和汽压。这时，再使长管恢复到竖直位置，乙醚薄液层消失，乙醚又处于未饱和状态。反复几次，观察饱和汽与未饱和汽状态的变化。

(6)当长管内乙醚处于未饱和状态时，使乙醚蒸气温度降低(可借助

蒸发致冷方式，用浸有乙醚的纱布包在长管上端），管内会出现乙醚液层；若再使其恢复原来温度，液层又会消失，又恢复到原来的未饱和状态。仔细观察此过程中水银柱的高度，可知温度较高时的未饱和汽压可以高于温度较低时的饱和汽压。

操作(5)、(6)表明，使未饱和汽变成饱和汽有两种方法：减少汽的体积，或者降低汽的温度。反之，把饱和汽变成未和汽亦有两种方法：增加汽的体积，或是增加汽的温度。

注意

(1)水银有毒，手上若有伤口切勿触及。水银蒸气有剧毒，散落的水银要尽量收集起来，无法收集的残余，应撒上硫磺粉，待其硫化后，收集埋掉。

(2)由于水银不透明，用注射器（或弯曲移液管）将乙醚注入长管中应注意不要把管口提到水银面外，使水银面上方混入空气。

(3)为便于辨别乙醚液层是否出现，应将乙醚染色。

附：将乙醚染色的几种方法

由于乙醚是无色液体，能见度小。为了提高能见度，可将乙醚染色（这有利于观察与判定乙醚蒸气是否处于饱和状态）。具体方法有：

(1)将紫草根（治疗烫伤的常用中药之一，中药店有售）浸泡在乙醚液体中，可使其呈红色。

(2)在乙醚中放入少量碘屑，可获得像碘酒一样的紫褐色液体——“棕色碘乙醚”。实验证明：“棕色碘乙醚”同样蒸发得很快，并不影响乙醚饱和汽的实验结论。

方法二

器材 金属压强计，有侧嘴的锥形瓶，医用注射器，乙醚，橡皮管，橡胶塞，铁支架等。

操作

(1)按图所示组装仪器，这时瓶内空气压强约为1个大气压，压强计的示数为零（金属压强计指针的起始位置），即压强计与1大气压强所体相连接时指针的位置往往是“0”刻度位置。应用时，压强计所测定气体压强是压强计读数加1大气压（准确地说，应该是压强计读数加当时的大气压强值）。

(2)用注射器往锥形瓶内注入几滴乙醚，随着滴入的乙醚又全部汽化。金属压强计示数逐渐增大。表明乙醚的未饱和蒸气压随着未饱和汽的密度增大而增大。

(4)继续往瓶内注入乙醚，直至瓶内乙醚不能全部汽化，在瓶内确保有液态乙醚，可以看到金属压强计示数趋于某一定值（在0℃时，约0.24atm；在20℃时，约0.58atm；在35℃时，约1atm）。再继续注入乙醚，压强计示数不再增加，此时压强计示数，即为该温度下乙醚的饱和蒸气压。这表明，在某一温度下，未饱和汽的压强小于饱和汽的压强。

注意

(1)瓶口橡胶塞，各接头处应紧密连接，整个装置不能漏气。

(2)如利用此装置再次进行演示时，应将瓶内的残余乙醚蒸气排除干净（或者更换一干净的瓶做实验）。否则，将影响实验测量的结果。

饱和汽压 162

方法一

目的 测量饱和汽压及演示饱和汽压与哪些因素有关。

器材 托里拆利演示器 2 套，水银，乙醚，电吹风等。

操作

(1)取两根托里拆利管，A 管装满水银后倒立在水银槽中作气压计。B 管管口向上，注入水银，当水银面离管口约 1—2cm 时再注入染了色的乙醚至满。用手指封闭管口，将管 B 倒立后放入水银槽中。乙醚上升到水银面上并汽化使该管水银面下降。当该管水银面停止下降且水银面上方仍残留乙醚液层时，说明乙醚蒸气已达饱和状态。A、B 两管水银面的高度差就是要测的乙醚饱和汽压值。如图所示。

(2)保持温度不变，使 B 管倾斜，可看到，B 管倾斜后，管内水银面上部空间减少，乙醚饱和蒸汽的体积减小，水银面上乙醚液层增厚，测量 A、B 两管水银面高度差仍保持不变。表明饱和汽压不随饱和汽体积变化而变化。

(3)用电吹风先对 B 管乙醚饱和汽吹热风，可看到 B 管水银面不断下降。表明饱和汽压温度升高而增大；改吹冷风，水银面会不断上升，表明饱和汽压随温度降低而减小。

注意

(1)水银有毒，手上若有伤口切勿触及。

(2)水银及玻璃管必须洁净。多次演示时，A、B 两管所用的水银、水银槽不宜混用或共用。因经乙醚污染的水银或器具会影响大气压的测定，且短时间难以消除。

说明 按通常方法，是采用玻璃管向倒立在水银槽中的 B 管下端口注入乙醚，但因水银并不透明，且管口很小，这一操作有一定难度。另一方法是，在 B 管端口处套 1 段约 6cm 长的乳胶管，演示时，可用注射器扎入乳胶管向 B 管内注入乙醚。

方法二

目的 演示饱和汽压与哪些因素有关。

器材 饱和汽压演示器（可用 J2557 型气体定律演示器代替）。

如图示，2 是一根竖直固定在木板上的玻璃管（直径约 4cm），上下口用橡皮塞塞紧，1 是一根上端有进液口 5 和进液阀门 6 的长直细玻璃管，直穿上下两橡皮塞，下端口通过橡胶管与长颈漏斗 7 相连。长颈漏斗 7 夹持在木板上，可以上下移动，木板上画有均匀刻度，圆玻璃管上端橡皮塞装有一进水口 3 和插入一温度计 4，下端装有一带阀门的出水管。

操作

(1)首先打开进液阀门 6，使左右两管与大气相通，并向管内注入一定量的水银；慢慢提高右管，使两管相平的水银面升高到进液阀门 6 处，关闭阀门 6。然后下移右管，在左管上部会形成一段真空（托里拆利真空）。此时两液面高度差 H 正好等于当地大气压汞柱高的数值。

(2)往左管滴入适量的乙醚后，微微开启进液阀门 6，乙醚在左管水银面上方空间汽化，至左管水银面上剩有乙醚液层后关闭阀门 6，这时左管上方空间充满乙醚的饱和汽。此过程中不能有空气进入左管。若此时两管水银面的高度差为 h ，则乙醚的饱和汽压 $p = H - h$ （汞柱高）。

(3)保持室温不变，将右管缓慢提高，可以看到饱和汽所占空间的体积变小，左管中水银面上乙醚液层变厚，但左右管水银面高度差不变。这表明：在温度一定时，饱和汽压和体积的变化无关。

(4)把右管置于适当位置，读出 t_1 和左、右水银面的高度差 h_1 ，这

时饱和汽压 $p = H - h_1$ ，从进水口 3 灌入温水，使充满整个玻璃圆管 2，升降右管高度，使左管水银面上有乙醚液层，记录这时两管水银面高度差 h_2 和水温 t_2 。可得出：饱和汽压随温度升高而增大。

如使用 J2557 气体定律演示仪演示，此时可接通控温线路开关，加热圆玻管中水，测得饱和汽压随温度变化的数据，并绘出变化的关系曲线。可以发现，与理想气体不同，饱和汽压随温度变化的曲线并非线性关系，不遵循气体实验定律。

注意

(1) 为防止漏气，可在进液阀门处涂凡士林，但注意不要让凡士林堵塞进液孔。

(2) 为便于观察，可将乙醚用紫草根等染色(参见实验 161 方法一)。

(3) 由于乙醚的饱和汽压较大(20℃时为 440mmHg，80℃时可达 2976mmHg)，因此用乙醚完成此实验时，左边圆玻璃筒中水温应予以控制，不宜太高。

(4) 本实验应力争一次成功。因水银、器壁被乙醚等污染后，短时间内难以完全清除。再次演示会导致较大误差。

建议

若无 J2557 型气体定律演示器等现成仪器，可用化学实验用的带活塞的酸管和另一根碱管，用一根长约 80cm 到 100cm 的医用橡皮管组成 U 形管，分别固定在铁支架上完成以上演示。

方法三

目的 演示饱和汽压与哪些因素有关。

器材 小玻璃瓶，微小压强计，试管，T 形管，注射器，橡皮管，螺旋夹及水银，酒精，水，汽油等。

操作

(1) 将有关仪器按图所示装配。螺旋夹处于旋紧状态，由于小瓶内空气压强与外界气压相等，故微小压强计两管水银面相平。

(2) 用注射器向小瓶内注入适量的酒精，随着酒精汽化，可见压强计显示出压强差，待压强计内水银面稳定后两管内液面差即为小瓶内酒精蒸气压强值。如瓶内仍有残余酒精液体，则该压强值即为表饱和汽压强。

(3) 旋开螺旋夹，酒精蒸气进入试管，压强计所示压强值(两管中液面差)会暂时减小，约经半分钟后又可恢复到原有数值(实验应保证此时小瓶内仍有残留酒精薄液)。可见，饱和汽压与体积无关。

(4) 用热纱布加热试管，可见饱和汽压随温度升高而增加。

(5) 换用清洁的小瓶、试管，并用另一支注射器注入汽油(或水)，可见同一温度时，不同液体的饱和汽压不同。

注意

(1) 必须严防漏气。可在玻璃管与橡皮塞、橡皮管连接处扎紧并涂上凡士林。

(2) 微小压强计中所灌注的水银必须清洁，管壁亦应经过清洁处理，否则会影响饱和汽压的测量结果。由于乙醚饱和蒸汽压较大(20℃时为 440mmHg)，超过微小压强计测量范围(400mm)，故实验中不宜采用。

方法四

器材 烧杯，玻璃漏斗，试管，酒精灯，水等。

操作

(1) 如图所示，把玻璃漏斗倒放在烧杯中，浸入水中。另把一充满水

的试倒套在漏斗上，再从水中取出整个装置，使烧杯中仅留大半杯水后把水染成红色。

(2)用酒精灯加热，水沸腾时蒸气泡经漏斗收集在试管顶端，试管中水位下降，直至与烧杯内水面相平，表明这时饱和水蒸气压等于外界大气压。

(3)在水沸腾时，上下移动试管(保持管中不出水面)以改变试管内饱和汽的体积。可以看到试管内水面总是与烧杯的水面相平。这说明温度不变时，饱和汽压与体积无关。

(4)停止加热，随着水和饱和水蒸气温度逐渐下降，试管内水位会逐渐上升，说明饱和汽压随温度下降而减小。

注意 水沸腾时，由于气泡中含有微量空气带往试管顶端，这部分空气所产生的压强会使试管内水面低于烧杯内水面(有时可达2—3cm之多)，演示时需向学生解释。

测定露点

方法一

器材 露点湿度计(兰布列希德湿度计)，温度计，乙醚等。

露点湿度计的构造，如图(a)所示。一个圆柱形金属盒，其表面抛光，背面有一个管嘴用来连接打气球，上端有两孔，一孔用来插入温度计；另一孔用作排气。金属盒的正面套一个抛光的圆环形金属片，中间用塑料垫隔开，防止相互间的热传导。

操作

(1)用软布(或呢绒)把金属盒和环形金属片的抛光面擦净，使二者具有相同的光亮程度。再往盒内注入小半盒乙醚，插上温度计(可采用-50—50℃煤油温度计)，测温泡应浸没在乙醚中，温度计的刻度要向着金属环的光亮面。

(2)用打气球向金属盒内打气，乙醚迅速蒸发致冷，温度计示数下降。密切注视金属盒的抛光面，水汽在它上面凝结瞬间，从温度计读出该时温度 t_1 (由于环形光亮面没有水汽凝结，保持光亮；金属光亮面上由于温度降低会凝结细小的露滴，光亮度变差，二者对比观察才易于把握该瞬间)，这个温度已比露点稍低。

(3)停止打气，则金属盒因吸收周围空气热量而温度回升。当看到金属盒表面与环形金属片具有同样光亮程度时，再读出该时温度 t_2 。这个温度已比露点稍高。两次温度(t_1, t_2)的算术平均值就是露点。

注意

(1)实验时，人不要对着观察的光亮面呼吸，因呼出气体中水汽含量较大，容易在金属表面形成露滴而造成误差。

(2)乙醚有麻醉作用，实验环境应保持良好通风。

(3)应保持金属盒和环形金属片表面的光泽和洁净，实验时勿把乙醚洒在抛光面上，也不准用粗糙的脏布或湿布擦试。

说明

露点温度计是测定与计算温度的最精确的方法之一。根据实验测出的露点温度和实验时空气温度，通过查水的饱和汽压表就可求得空气的绝对湿度和相对湿度。

详见实验 167。

建议

用易拉罐自制露点湿度计的方法：如图(b)所示，在易拉罐侧壁开三个小孔，A孔插温度计，B孔伸进胶管用以打入空气，C为排气孔。罐底作为光亮面。另用同样材料剪成环形片，通过绝热垫圈将环形片固定在易拉罐底(光亮面)的同一平面上，以便于观察比较。

方法二

器材 内径约 4cm 的薄壁烧杯(有表面光亮的金属杯更好)，橡皮塞(10号或 11号)，玻璃管，温度计，打气球(或充气气球)，乙醚等。

操作

按图所示装置仪器，演示时在杯内装乙醚，并把杯四周擦试干净。

操作方法同方法一，记录杯侧面水汽凝结的瞬间和露滴完全消失瞬间的温度，即可求得露点。

建议 为防止或减少乙醚蒸发的污染，可通过乳胶管把排出的乙醚蒸气导入盛有些油的瓶中(乙醚溶于柴油)。

方法三

器材 自制露点测定器，温度计，搅拌器，绒布，水，冰块等。

露点测定器的制作方法

取一铝制易拉罐，侧面开口，开口旁有一小孔，用来插温度计，如图所示。罐底的光亮面作为观察面，另剪一光亮的环形铝片套在易拉罐上，并与罐底的光亮面在同一平面内。环形片和罐间用胶木垫圈隔开，防止互相间的热传导。搅拌器插在开口中。

操作

实验时，先记录下环境温度。用柔软的绒布把易拉罐底和环形片的光亮面擦试干净。往罐内注入约半盒室温的水，再往水里投入适量的碎冰块(注意不要沾污光亮面)。插上温度计，并使它的刻度向着光亮面。

搅动冰块，使水温迅速下降，同时密切注视罐底和环形片的光亮面，当罐底光亮面上刚刚出现细小的露滴时，记录下这一瞬间罐内水的温度。等冰完全溶解后水的温度开始上升，当罐底光亮面上的细小露滴完全消失时，再记录下这一瞬间的温度。两次温度的平均值就是露点。

注意

(1)投入水中的碎冰要适量。过少时，温度尚未降到露点，冰已完全溶解，实验不能成功；过多时，温度降到露点以后回升时间太长。亦可逐渐投入碎冰块。搅拌的快慢应视温度变化的情况而定。

(2)为及时观察露滴的出现或消失，可用手指(或棉纱)在光亮面的同一地方来回擦动。将擦过处与环形金属片表面对比，以期观察是否有露滴出现或消失。一经发现，及时记下温度计下的示数。

(3)若环境气温低并且相对湿度很小致使露点很接近 0，可改用冰盐混合物放入罐中，碎冰块和食盐按质量 3:1 混合，可冷到 -10 或更低些。

建议 如果冰块的备取有困难，可用氯化铵或硝酸铵(白色颗粒状化学肥料)替代，并准备少量浓硫酸。

由于上述化肥溶解时要吸热故有致冷作用。其中氯化铵降温速率慢，露点测量精确，适于学生实验；硝酸铵降温快，适于演示实验。使用铵盐作溶质时，若发现温度回升慢，可适当滴几滴浓硫酸(要注意浓硫酸操作规则)使温度回升加快(浓硫酸

稀释后会放出大量热量)。

乙醚的临界状态

器材 乙醚临界状态演示器，投影仪，酒精灯，铁支架等。

乙醚临界状态演示器如图所示，一长方形的金属盒，它的前后壁是可开启的玻璃窗。盒内上方金属横杆上悬挂一坚固的小玻璃管，管内封有乙醚。管内乙醚的体积约占管总容积的 23%

操作

(1)把乙醚临界状态演示器放在投影仪的聚光镜和物镜之间，使在屏上得到小玻璃管的清晰倒像。

(2)用酒精灯对装有乙醚的小玻璃管加热。观察管内乙醚液面的变化：开始时，管内液汽的分界面很清楚，成凹月形。随着温度升高，液态乙醚逐渐汽化，但当液面还很高时，就逐渐模糊进而消失(汽液差别逐渐减小，折射率也逐渐接近)。当达到临界温度时，管内液面消失，液态和汽态混为一体，乙醚处于临界状态(乙醚的临界温度是 193.8 ；临界压强是 35atm)。

(3)停止加热使小玻璃管等自然冷却。在冷却过程中，管内先出现浓厚的白雾(由透明变为不透明，出现所谓临界乳光现象)，随后又回到临界温度以前情况，分界面又清晰呈现。

注意 乙醚达临界状态时，临界压强为 35atm，即盛乙醚的玻璃管壁要承受 35atm 的压强。因此，实验前必须检查玻璃管，防止有裂纹而发生炸裂。同时实验过程中必须把金属盒上玻璃窗关好，要特别注意安全。

饱和汽加压液化

器材 100ml 玻璃注射器(带针头)，橡皮帽，乙醚少许。

操作

(1)用注射器吸进 1-2ml 乙醚，拆下针头，排去注射器中的多余空气，用橡皮帽把注射器头部密封。

(2)将注射器倒置后，向下拉出注射器活塞，同时摇动注射器，使乙醚散布在注射器内壁以增大蒸发面积，直至使注射器内乙醚全部汽化(因乙醚在 20 时饱和汽压为 440mmHg，所以可知在室温下，注射器内气体压强为 0.5 个大气压)。

(3)放手让外界大气压将活塞压入，随着注射器内气体压强增大，可观察到内壁上析出液滴。当活塞被压回原位时，汽化了的乙醚又液化为液态乙醚。

注意

(1)注射器内抽进的乙醚应少于 2ml。

(2)橡皮帽必须切实将注射器密封。

说明 如用作学生分组或课外实验，可用 20ml 的注射器吸入乙醚约 0.5ml 完成上述操作。

测定空气的绝对湿度

方法一

原理 绝对湿度的原始定义是“空气中所含水蒸气的密度”，即单位体积中所含水蒸气的质量。由于在温度一定时，气体压强与分子的密度成正比，故绝对湿度才引伸为“空气中所含水蒸气的压强”。本实验将依据原始定义测量绝对湿度。

器材 U形氯化钙干燥管 4只(如图所示)，大玻璃瓶(或代用品)，量筒(1000ml)2只，天平，螺旋夹，玻璃管，橡皮管，瓶塞，凡士林，水等。

操作

(1)用天平称出干燥管A和B的总质量 M_1 ，干燥管C的质量 m_1 。不必称D，因为它是起隔离作用，防止大玻璃瓶E中水的蒸气进入C。

(2)把有关仪器按图所示安装，各瓶塞和接头处应密封，不能漏气。通过虹吸管S向外吸水(未接A、B、C、D时应调节旋夹K和S管口的高低，使水流以70-100ml/s的速率流出)。

(3)调节完毕后，开始把从S放出的水收集在量筒里(两只量筒轮流用)，设所收集水的总体积为V(V约为20升)，则可认为流过干燥管空气的体积亦为V。

(4)关闭旋夹K。再称A和B的总质量 M_2 ，以及C的质量 m_2 。若 $m_2 > m_1$ ，则实验须重做。若 $m_2 = m_1$ ，则收集到空气中的水汽质量 $M = m_2 - m_1$ 。

(5)计算出 M/V ，即为绝对湿度 单位体积空气中所含水汽的质量。

注意 本实验宜选用绝对湿度较大的环境(例如夏天、有雾或较潮湿的天气)内进行。整个实验过程约需3-4个小时。

方法二

目的 利用空气中水蒸气的压强变化，估测空气中的绝对湿度。

原理 空气中所含水蒸气的压强，叫做空气的绝对湿度，而水蒸气产生的压强是大气压强中的一部分。本实验利用清除空气中的水蒸气后，空气压强的变化值来测定空气中水蒸气的压强，以达到测定空气的绝对湿度的目的。

器材 玻璃板，器皿，干燥剂，玻璃钟罩，橡皮塞，一端较长的U形玻璃管，粘滞性较小、密度可查的机油，凡士林，刻度板等。

操作

(1)将机油注入两端开口的U形玻璃管内，机油液面距U形管短的一端的距离约为10cm左右。

(2)将U形玻璃管长端穿过橡皮塞，橡皮塞和玻璃管要紧密封，再将橡皮塞紧紧塞在玻璃罩的上开口，整个U形玻璃管放置在玻璃钟罩内。

(3)器皿内盛放干燥剂后，放在玻璃板上，然后迅速但轻轻地用钟罩罩住器皿，立即将凡士林涂在钟罩底部和玻璃板接触的四周。

(4)数分钟后，压强计的液面出现高度差，并渐趋稳定，从刻度板上读出液面高度差 h 。

(5)运用公式 $P = \rho g h$ 计算出钟罩内空气压强的变化值，这个数值就近似地等于空气中水蒸气的压强，亦即空气中的绝对湿度。(公式中的 ρ 为机油的密度。)

注意

(1)干燥剂可用浓硫酸，但用分子筛干燥剂更好，它比浓硫酸的吸湿能力强。

(2)应该注意钟罩跟玻璃板、U形管长端跟橡皮塞、橡皮塞跟钟罩之间的密封

性。

湿度计

湿度计有多种，方法一至三分别介绍了干湿泡湿度计、毛发湿度计和露点湿度计的构造和使用方法。三者相比，露点湿度计测量准确，但结构和操作比较复杂，测出露点后要查表、计算等，使用不太方便；毛发湿度计结构简单，可以直接读数，还可和自动记录装置联合使用，但需要经常校准，测量结果不甚准确；干湿泡湿度计使用比较方便，也比较准确，所以生活中大都使用这种湿度计。方法四、五分别介绍了自制毛发湿度计和晴雨计的方法，可供学生课外制作参考。

方法一

器材 干湿泡湿度计。

干湿泡湿度计如图所示，它由两支完全相同的温度计组成。左侧为干泡温度计，用来测空气的温度；右侧为湿泡温度计，它的测温泡包着棉纱，棉纱的下端浸在水中。由于水的蒸发，湿泡温度计的示数总低于干泡温度计。两者的温度差叫做干湿泡温度差。两温度计所指示的温度差值愈大，表示湿泡的水蒸发得愈快。即空气愈干燥。根据干湿泡温度计的示数通过查湿度表等就可得出空气的相对湿度。干湿泡温度计之间的狭缝中，装有一可转动的圆柱体，圆柱体侧面就贴有湿度表，表的最上一圈列的是干湿泡温度差值。狭缝的边缘刻有温标。

操作

(1)把贮有清水的干湿泡湿度计挂在空气流动处，读取两支温度计稳定后的示数。

(2)从湿度计中央狭缝两侧的温标中找出干泡温度值，再转动缝中的圆柱体，使缝中露出的最上一栏的值正好等于干湿泡温度差值。则在圆柱体上和干泡温度计示数值并列的数字就是当时的相对湿度。

注意

(1)应用干湿泡湿度计时必须把它置于空气流动处，或用时把它晃动。否则，湿泡周围容易达到饱和，就不能测出相对湿度。

(2)有的仪器把空气湿度查算表贴在木板背面，可按表格要求查出相对湿度。

(3)由于空气流速大小、水槽中水质、包扎纱布洁净情况以及温度计的测量误差等因素的影响，都会使干湿泡湿度计测量结果发生偏差。

方法二

器材 毛发湿度计

毛发湿度计是利用人的头发在脱脂以后，其长度会随着空气的相对湿度而变化制成的。其构造如图所示。主要由一根(或一束)脱脂毛发、指针、重锤和拉杆组成。空气的相对湿度增大时，毛发伸长；相对湿度减小时，毛发缩短。毛发的长度变化控制指针的偏转。从刻度盘上就可直接读出相对湿度。

操作

把毛发湿度计竖直挂在空气流通处，待指针稳定后读取指示值就是空气的相对湿度。

注意

(1)毛发湿度计的测量范围一般是相对湿度 15%-90%，温度 0-60 。使用时必须经常用其他湿度计加以校准(可通过调节拉杆的升降实现)。

(2)使用时不要用手触及毛发，以免沾上油渍，否则影响它的吸水性能；也不要受剧烈震动，防止毛发断裂。

方法三

器材 露点湿度计，温度计。

操作

(1)利用温度计测出环境温度 t_1 。利用露点湿度计测出使空气里水的未饱和汽变为饱和汽时的温度，即露点 t_2 (具体操作请参看实验 163)。

(2)从水的饱和汽压表查出露点(t_2)时的饱和汽压，即空气在原来温度(t_1)时的绝对湿度，记作 p ；再查出原有湿度(t_1)时的饱和汽压，记作 P ，则相对湿度 B 为

$$B=(p/P) \times 100\%。$$

方法四

器材 自制毛发湿度计。

毛发湿度计的制作方法

取 40-50cm 长的头发 1 根，放在热苏打水内浸泡 1-2 小时脱脂，再用热水漂清晾干。

取一软木塞沿轴线打穿，剪一节圆珠笔芯作为轴套穿入孔内，使之与木塞紧配合，即成为一转轮。

如图所示，把脱脂毛发、转轮、缝衣针、螺母装置在木板上，脱脂毛发上端系于缝衣针上，在转轮上绕一圈后系一螺母(内径 6mm)，自然下垂的螺母使毛发张紧。毛发与木板间相隔 0.7cm 左右。就制成一简易的毛发湿度计。

为了给刻度盘定标，可将毛发湿度计置入一干燥密闭容器内，在容器底部放一些干石灰，10-20 分钟后，把指针指示位置标以 0(即相对湿度为 0%)；再用一盆盖着湿布的热热水取代石灰，放入该容器，……把指针指示位置标以 100，然后在 0 和 100 之间沿弧线进行百等分度。最好再用一只标准的干湿泡湿度计校对一下。

操作 同方法二。

方法五

目的 应用杠杆的平衡条件制作预报天气的简单装置 晴雨计。

器材 木条，木板，纸盒，食盐，棉花，竹针，铜丝等。

操作

(1)把上列器材按图安装，杠杆的左端挂一纸盒，右端纸盒内放有浸过盐水后晒干的棉花，纸盒上有若干个小洞。右端的力臂大于左端的力臂。

(2)当天晴时调节左端纸盒的质量和铜丝 2 的位置，使杠杆处于平衡状态，中间的指针 6 指的标尺中央。

(3)天气潮湿时，右端纸盒内棉花吸收空气中水分，质量增加，由于右端力臂较长，该端的力有微小的变化就能破坏杠杆的平衡。指针向左偏转。

注意 如果用久以后晴天指针并不指在标尺的中央，可以调节铜丝 2 的位置，使杠杆处于水平位置平衡。

凝结中心的作用

在通常情况下，当温度降低到使未饱和汽变为饱和汽时，蒸气凝结为液体。这是因为一般蒸气中都含有尘埃和杂质，成为蒸气凝结的凝结中心。在一定温度下，超过饱和蒸汽应有的密度而仍不液化或凝华的蒸气。叫做过饱和汽。过饱和汽并不稳定，如果其中有凝结中心出现，就会发生凝结，使蒸气回到饱和状态。人工降雨，威尔逊云室都借助于凝结中心的上述作用。

目的 观察烟尘使水蒸气雾化的现象，认识凝结中心的作用。

器材 烧瓶，铁支架，石棉网，酒精灯，大号试管，玻璃管，热水，蚊香和橡

皮塞。

操作

(1)按图所示安装好仪器，用酒精灯加热盛水的烧瓶。

(2)当水沸腾后，水蒸气经玻璃管排出。在临近喷口处观察不到蒸气(因为水蒸气本身是无色透明的)，而在喷口右方几厘米处，当一部分水蒸气凝为细小水珠时，才出现白色云雾状。

(3)将点燃的蚊香放在喷口附近，使烟雾到喷口处。这时可观察到，原来在喷口处看不见的水蒸气中出现白色云雾。这是由于烟尘作为凝结中心促使水蒸气凝结为小水珠的缘故。

建议 用冒烟的火柴等置于喷汽的高压锅(或水壶嘴)附近，也能明显地观察到烟尘使水蒸气雾化的现象。

升华和凝华

碘在三相点时，温度是 114°C ，饱和汽压为 90mmHg 。由于它和饱和汽压特别大，所以容易升华。这也是常用碘来演示固体升华现象的原因。本实验各方法都采用间接加热方式实现碘的升华，其原因在于碘的熔点和沸点都较低，且熔解热也很小。传统的用火焰直接加热的方法会使碘先熔解再汽化，并非升华过程。用硫、氯化铵等演示升华现象时同样也应注意这一问题。

方法一

器材 碘升华管，烧杯，热水，白纸屏等。

碘升华管外形如图(a)，在无色透明的圆筒形玻璃容器中密封有少量碘晶粒(容器内气压比外界低)。

操作

(1)在室温下，以白色纸屏为背景仔细观察碘升华管，可看到其中有少量碘晶粒以及淡淡的呈紫红色的碘蒸气。

(2)用热水(或太阳光等)加热碘升华管。可以发现，原来管内淡淡的紫红色碘蒸气陡然变浓，现象十分明显。自然冷却后，在管壁处亦可看到新凝华的碘屑。

建议 若无成品碘升华管，可用下法自制：取一针剂瓶(又名：安瓿，容量为 $5\text{-}10\text{ml}$)，洗净、烘干后，装入少许碘晶粒(针头大小)。用酒精灯均匀加热瓶口及另一玻璃棒，使瓶口处玻璃烧软而玻璃棒的熔液恰好滴入其中直至密合(图 b)。封口时应让瓶口朝上，并通过加热使瓶内空气尽可能的逸出。

说明 碘升华管不仅可反复演示碘的升华和凝华现象，而且操作方便，对环境没有污染。

方法二

器材 小烧杯，表面皿，碘颗粒，冷水，砂盘，铁架台，酒精灯，火柴等。

操作

(1)如图，将碘颗粒放在烧杯里，在烧杯口盖上一只盛冷水的表面皿(其底部与烧杯口应尽可能密合)。再把烧杯放在砂盘上。

(2)用酒精灯小火加热砂盘，可看到碘颗粒升华为紫红色的蒸气。

(3)碘蒸气遇冷凝华。停止加热后，在室外拿下表面皿，可看到表面皿的底面附有一层碘晶体。

注意

(1)在 1atm 下，碘的熔点是 113°C ，熔解热为 15cal/g ，沸点为 183°C ；酒精灯

火焰温度将近 2000 。因此，演示碘的升华，不宜用火焰直接对盛碘的器具加热的方式。以上采用“砂浴法”（或水浴法），以适当控制加热温度。

(2)碘蒸气对人体有害。为防止碘蒸气外逸，可在烧杯口处涂凡士林密封，并使环境通风良好。

(3)碘易潮解，对于潮解的碘可在演示前放在容器内加热，使含有的水分蒸发掉。停止加热后，将凝华在器壁上的固态碘取出装于瓶中密封备用。

方法三

器材 100ml 的移液管，酒精灯，碘颗粒，白纸屏，大烧杯，热水等。

操作

(1)取 100ml 的移液管截去两端后，装入少许碘颗粒，然后用酒精灯封口，如图所示。封口时应使管口向上，尽量使移液管内气体外逸，从而使封口后密闭容器内气压较小，有利于碘升华。

(2)将封有少许碘粒的移液管浸在盛有热水的烧杯中。可观察到紫黑色的碘颗粒升华为紫红色的碘蒸气，由淡到浓充满整个玻璃容器。

(3)自然冷却时，碘蒸气逐渐凝华在玻璃容器内壁，可看到粉末状的碘晶体。

研究气体的等温变化

方法一

器材 自制玻意耳-马略特定律实验器，木板，铁支架，重锤，白纸，图钉，铅笔以及共用气压计，热水等。

玻-马定律实验器的制作方法

结构如图(a)所示，在一有毫米刻度的直尺(长 30-50cm)上固定一根一端封闭的内径(2-3mm)均匀的直玻璃管。封闭端内腔顶部对准尺的零刻度线，管内有一段被水银柱(长 80-150mm)封闭的空气柱。

操作

(1)如图(b)所示，用铁支架固定木板，钉上白纸，用重锤检查竖直情况，并在纸上作出一条竖直方向的铅直线。

(2)使玻-马定律实验器贴近白纸。从刻度尺上读出空气柱长度 l ；用铅笔画出水银柱长度 h' 。

(3)将 h' 投影到铅直线上，量出水银柱的高度 h ，将所得 l ， h 的值填入事先设计好的表格中。

(4)使玻-马定律实验器在图示平面内按不同角度倾斜，逐次测出 l 、 h 的值并填入表内。

(5)将被封闭的空气柱用热水加热后，重复(2)、(3)两步骤。

(6)实验前后，从气压计上各读取一次大气压强值，取其平均数作为实验时的大气压强值 P_0 。

(7)分别计算封闭气体压强 P 值、 $1/P$ 值，以及压强与体积乘积 pV 的值(由于玻璃管是均匀的，设其截面积为 S ，则体积为 lS)。

(8)分析处理实验数据，探索气体等温变化时应遵循的规律，归纳出玻-马定律。

注意

(1)做好本实验的关键是需要用洁净的玻璃管和水银。水银面上不能附有水

层。

(2)实验时，不要用手握着被封闭空气柱那段玻璃管，以免引起温度变化。

(3)实验中不能急剧使玻璃管倾斜，翻转。动作要小心，缓慢，以免使水银飞出或分断(玻璃管内壁被污染时亦容易使水银柱分断)。

实例 大气压强 $P_0=762\text{mmHg}$

次数	玻璃管放置及其他情况	空气柱体积 $V=lS(\text{mm})^3$	h (mm)	空气柱压强 $P=P_0+h$ (mmHg)	1/P (mmHg^{-1})	压强×体积 PV ($\text{mmHg} \cdot (\text{mm})^3$)
1	开口向上，竖直	127S	81	843	1.19×10^{-3}	$1.07 \times 10^5 S$
2	开口向下，竖直	160S	80	682	1.47×10^{-3}	$1.09 \times 10^5 S$
3	水平放置	139S	0	762	1.31×10^{-3}	$1.06 \times 10^5 S$
4	开口向上，倾斜	127S	78	840	1.19×10^{-3}	$1.07 \times 10^5 S$
5	开口向下，倾斜	155S	78	684	1.46×10^{-3}	$1.06 \times 10^5 S$
6	加热	163S	81	843	1.19×10^{-3}	$1.37 \times 10^5 S$

以上数据表明：未加热时，“气体的体积和压强的乘积是一常量”；加热后 $P \times V$ 值变化，可得出定律的成立条件是“在温度不变时”。

换用不同长度空气柱做实验，发现 $P \times V$ 值不同，可总结出定律另一条件：“一定质量的气体。”

根据表中数据，还可通过作 $(1/P)-V$ 图线探索 P 与 V 间关系。图线如图(c)所示。由于未加热前各点 $(1/P)-V$ 图线在直线上且通过原点，亦可得出等温变化时， $PV=C$ 的结论。(图中 F 点为加热后的状态，不在直线之上。)

分析

(1)本实验的误差估算：测气柱长度误差 $l=1\text{mm}$ ，测水银柱高度误差 $h=1\text{mm}$ ；用曲管式或槽式气压计误差小，用无液气压计误差较大，约为 400Pa ，即 $p_0=400\text{Pa}=3\text{mmHg}$ 则气柱压强误差 $p=p_0+h=4\text{mmHg}$ ；表中气柱最短长度时空气柱体积为 $V=127S$ ，外加最小压强 $p=682\text{mmHg}$ 。因 $pV=C$ ，则

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta V}{V} = \frac{4}{682} + \frac{1S}{127S} = 1.4\%$$

实测时，由于温度变化，玻璃管粗细不均匀性以及管壁和水银洁净程度等因素的影响，相对误差比估算值略大些。

(2)由以上分析知，适当增加空气柱长度和水银柱长度，有助于减小相对误差。

建议 往细玻璃管内灌水银时，可用一根细铁丝(不能用其他金属丝，以免产生汞齐沾污水银)插入玻璃管，插入的深度视所要封闭的空气柱体积而定。要想水银到达那里，铁丝就插到该处，然后用注射器插入管口，灌入水银后慢慢抽出铁丝，如发现空气将水银柱隔断，可用铁丝慢慢把气泡引出。

验证实验 采用成品的“玻-马实验定律仪器”。

大气压 $p_0=753\text{mmHg}$, $h=110\text{mm}$

次数	玻管位置	气体压强 p (mmHg)	气体体积 V $V=IS(\text{mm}^3)$	pV 值 (mmHg · mm ³)
1	竖直向上	863	124S	$1.070 \times 10^5 S$
2	斜向上(1)	831	129S	$1.072 \times 10^5 S$
3	斜向上(2)	848	126.5S	$1.073 \times 10^5 S$
4	斜向上(3)	808	133S	$1.074 \times 10^5 S$
5	竖直向下	643	167S	$1.074 \times 10^5 S$
6	斜向下(1)	675	159S	$1.0735 \times 10^5 S$
7	斜向下(2)	658	163S	$1.072 \times 10^5 S$
8	斜向下(3)	698	154S	$1.075 \times 10^5 S$

方法二

器材 气体定律实验器 J2261 型，铁支架，测力计 J2104 型，钩码 J2106 型，刻度尺，气压计(共用)等。

气体定律实验器由一有刻度的注射器改制成图(a)所示。刻度长 80mm，活塞直径约 14mm。活塞的框架上装有拉钩和挂钩，以使用测力计和钩码给活塞施加拉力或压力。

操作

(1)用刻度尺测出注射器全部刻度的长度，用这个长度除它的容积就是活塞的横截面积 S 。记下气压计(共用)指示的大气压强 p_0 ，测得活塞和框架等的重力 G 。

(2)把适量的气密剂(硅油)抹在活塞上，上下拖动活塞使活塞与器壁的间隙均匀涂上油层。再把活塞插入注射器内一部分，然后用橡皮帽堵住注射器小孔，封入一定质量的空气，记下空气柱的体积 V_0 。

(3)把注射器固定在支架上，在活塞框架两侧挂上钩码。依次改变钩码的重力 G_n ，读出相应空气柱体积 V_n ，并计算相应的空气柱压强

$$p_n = p_0 + \frac{G + G_n}{S}。$$

(4)取下挂在框架上的钩码，用测力计竖直向上拉动活塞，记下测力计示数 F_n 与相应的气柱体积 V_n ，并计算相应的空气柱压强

$$p_n = p_0 + \frac{G - F_n}{S}。$$

(5)把测量数据和计算结果填入表格中，求出各个压强 p_n 跟相应的体积 V_n 的乘积 $p_n V_n$ 值。比较各次 $p_n V_n$ 值，总结一定质量的气体等温变化的规律，可得出在实验误差允许范围内，它们都是相等的。

注意

(1)本实验成败关键之一是保证针筒的密闭性，为此可在活塞与外筒的内壁间涂少许硅油或纯净的机油作为气密剂，在筒内外压强差小于 0.4kg/cm^2 情况下，可以较好保证筒内气体质量一定。千万不能用水代替机油，否则水蒸气会破坏筒内气柱的定质量的条件。

(2)注射器内外筒间摩擦阻力过大是影响实验成功另一重要因素。除对注射器进行挑选时要兼顾密闭性能和松紧适当外，还应注意内外筒不能互换和清除活塞上干涸的油污等。另外，夹持注射器外筒时应垫一层橡皮以增加磨擦，使夹持力不致

太大。否则外筒严重变形，活塞受磨擦阻力就要增加。

实验时注射器要保持竖直状态。用测力计施加拉加应使活塞受的力通过轴线；施加压力时两侧砝码要对称，否则也会使磨擦阻力加大。

(3)为保持等温变化条件，实验过程中不要用手去握住注射器筒，改变气柱体积变化过程应缓慢，以免影响密闭气体的温度。

说明

有部分的成品气体定律实验器，在其活塞的颈部有一直径为 4mm 的孔，在距底部 3cm 处的圆周上均匀分布直径为 1mm 的六个小孔。活塞内注入特种油(此油在 -50 不凝固，在 170 不蒸发)。油面高出六个小孔 1cm，活塞在外筒内上下运动时，极小量的油被不断拖带出来，充满活塞与外筒间的空隙，从而保持良好的密闭性。

方法三

器材 气体定律演示器(J2257 型)，低压电源，气压计，酒精温度计，水银和水等。

J2257 型气体定律演示器主要由定压气体温度计、控温线路、体积压强测量计三部分组成。它们同附在一块支撑木板上，并装在一个长方形木盒里。使用时，把支撑板竖立起来。仪器外形如图(a)所示。

其中的定压气体温度计如图(b)所示。AA₁ 是一端封闭的玻璃管，开口端用胶管与水平玻璃管 BB₁ 相连，在 BB₁ 上有一加装水银的小口，平时用橡胶帽密封。BB₁ 左端与大气相通。水银滴右侧构成密闭容器。当 AA₁ 受热、管内气体定压膨胀，推动水银滴向左移动，由水银滴的位置可以推知 AA₁ 管内气体的温度。由于这个气体温度计校准困难，因此，需定量测出温度时，必须与其他温度计(如酒精温度计)配合使用。

其中的定压气压温度计兼作控制线路的感温与控制元件。控温线路原理见图(c)所示。

接通 K，电热丝给玻璃圆筒内的水加热。随着温度升高，气体温度计的水银滴左移，温度升高到某一温度 t 时，水银滴与触点 M、N 相连通，继电器动作，使常闭触点 J₁ 又接通，停止加热；当温度降低后，水银滴右移、触点 M、N 断开，继电器电路被切断，常闭触点 J₁ 又接通，电热丝通电，使水温增加。调节控制旋钮，可使触点 M、N 左右移动在不同位置上，就能得到不同的温度。

其中的体积压强测量计。如图(d)所示。一根带气节门的长玻璃管 1 和长颈漏斗 2 由橡胶管 3 连接，构成 U 形管。水银从长颈漏斗口灌入。长玻璃管外面套一个大玻璃管，筒内可装热水，用以调整测量玻璃管内被测气体的温度。长玻璃管气节门关闭后，内部就封闭一段一定质量的气体，气体的体积可由竖直木板上的刻度读出。气体的压强 $p=p_0 \pm h$ ，式中 p_0 为大气压强，由气压计测出；h 为两侧玻璃管内水银面的高度差。

由此，我们就可以研究密闭气体的压强 p，体积 V、温度 t 三者之间的关系。

操作

(1)把仪器测量部分竖直架起。把盛水管的下出水口关闭，从上进水口注入净水，使水面升至距橡胶塞约 1cm 处。

把长玻璃管的气节门打开，将长颈漏斗的上口固定在标尺 28cm 处，从长颈漏斗灌入水银，使水银面升到标尺 20cm 处。待两管内液面水平后，关闭气节门。

(2)拨开 BB₁ 上的橡胶帽，用吸管从注水银口处滴入水银，使水银滴在 BB₁ 中长约 1cm。将水银滴调整到控温臂标有 t₀ 的位置。塞好橡胶塞，勿使此处漏气。将整

个控温臂水平地装在标尺板上,另取一支酒精温度计插入盛水管的水中(控温线路校准比较烦琐,通常可直接观察酒精温度计进行人工控温)。

(3)不用控温线路加热。在室温下缓慢提升或降低长颈漏斗(以防气柱温度变化),分别读出左右两管内水银面的刻度,得出几组封闭在玻璃管内气体的体积和压强值 $V_1、p_1、V_2、p_2……V_n、p_n$ 。比较各组 $p_n V_n$ 值,在实验误差范围内,它为一恒值。

(4)接通控温电路,调节控制旋钮,使水温被加热到某一温度值并保持不变。缓慢提升或降低长颈漏斗的高度,再得出几组封闭气体柱体积和压强值 $V'_1、p'_1、V'_2、p'_2……V'_n、p'_n$ 。比较各组 $p'_n V'_n$ 值,在实验误差范围内,它亦为一恒量,但 $p_n V_n \neq p'_n V'_n$ 。即对于一定质量的气体来说,不同温度下的 pV 值不相同的。

注意

(1)为保证“一定质量的气体”这一实验条件,气节门必须保证不漏气。为此,可在气节门上涂一薄层凡士林,使得该连接处密封。

(2)不要在 U 形管两管液面不水平的情况下突然打开气节门。否则,会使水银溢射出来。

(3)本仪器有一部分是直接用电 220V、50Hz 市电加热的(加热指示灯串接在电路中)。因此,要特别注意人身安全,通电时不可触及这部分电路和盛水筒中的水(包括渗漏出的水)。另外,必须在盛水筒中注入水后才可通电,否则会烧毁电热丝,加热完毕要立即切断电源。

实例 外界大气压 $p_0=76\text{cmHg}$

	t() (恒温)	IS=V	h	$p=p_0+h$	pV
1	13	20S	0	76	1520S
2	13	40S	-38	38	1520S
3	13	10S	76	152	1520S

实验可证 $p_1 V_1 = p_2 V_2 = …… = \text{常数}$ 。

方法四

器材 玻-马定律演示仪,两用气筒,红色的水等。

演示仪结构如图所示。两个厚壁玻璃筒的下端用橡皮管连通。右边圆筒的气嘴上通过三通阀联结金属压强计。压强计的量度范围是 0-atm,当和大气相通时,指针指的刻度“1”上。当三通阀的活栓上的箭头指向左方时,圆筒和压强计相通,而和大气隔离;箭头指向右方时,圆筒就和大气相通。圆筒内空气柱的长度,可从筒边的标尺上读出。

操作

(1)旋转三通阀使右边圆筒和大气相通。向左边圆筒注入红色水,直到右边圆筒留有约 15cm 长的空气柱为止,这时两筒内水面相平。用橡皮管把左边圆筒和两用气筒相连,同时旋转三通阀,使右筒和大气隔离与压强计相通,气压计指针应指示在 1atm 处。

(2)用两用气筒向左筒内缓慢抽气,由刻度尺和压强计可看出右筒中空气柱体积增大,压强减小;再改用气筒向左筒内缓慢打气,则由刻度尺和压强计可看出右筒内体积减小,压强增大;记下密闭空气柱在不同体积时的压强即可得到:在温度不变情况下,一定质量的气体的体积跟压强成反比。

注意

(1) 实验前要检查玻璃筒，如有裂纹就不能使用，否则会在加压后破裂伤人(为安人起见，通常加压亦不宜过大)。

(2) 实验过程应保证橡皮管和三通阀不能漏气，以保证“一定质量的气体”这一实验条件。可在三通阀旋塞上涂凡士林以保证密闭性。另外，抽气时不要把左筒中的水抽到气筒中。

分析

这种演示方法可见度大，并且不须使用水银，演示效果基本是好的。但右筒被封闭的空气柱中含有饱和的水蒸气，因在室温下水的饱和汽压值

较小($\frac{1}{100} - \frac{1}{25}$ atm)，而实验中空气柱压强值变化范围是0.5 – 3atm，故水的饱和汽压影响可忽略不计。

方法五

器材 气体定律演示器(J2257-1型)，铁支架等。

气体定律演示器的主要构造如图(a)所示。气柱玻管如同注射器一样分活塞和外管两部分。活塞的中心轴线上有一内径约1mm的细玻璃管，其下端和被测气体相通，上端和压强计相连，压强计的指针直接指示出管内被测气体的压强。整个装置安装在固定架上，固定架上装有体积标尺，指示管内气体的体积。压强计的背面和定容机构相连，定容机构的下部和固定架用螺旋相连。旋紧固定螺钉时，活塞和外管的相对位置就固定，可保持被测气体体积恒定不变。

操作

(1) 把演示器固定在铁支架上，用手上下拉动活塞数次，使活塞和外管之间均匀涂上一层油。把活塞顶端置于气柱玻管的体积刻度为“2”处，用橡皮帽堵住外管下端嘴上的小孔，使之不漏气。这时管内封闭着2个单位体积的空气，空气的压强由压强计读出是一个大气压。

(2) 用手上提或下压活塞，改变管内气柱的体积，并分别读出每次相应的压强值，记作 $V_1, p_1; V_2, p_2; \dots$ 。将各次对应的压强 p_n 和体积 V_n 相乘，计算乘积 $p_n V_n$ 值，可得出在实验误差允许范围内，它们都是相等的。

或者绘出 $\frac{1}{p} V$ 的图线，结果是一条通过原点的直线，如图(b)所示。

表明一定质量的气体，温度不变时， p 与 V 成反比。

注意

(1) 实验过程应确保整个装置不漏气，为此活塞与外管间磨擦面上要保持清洁，无污物，且涂油要均匀。

(2) 为保证“等温变化”的条件，实验中移动活塞时动作要缓慢，且手应握住压强计接头的塑料部分，不要触摸气柱玻管的外壁。

建议 在活塞与外管之间涂油主要是防止被测气体外漏，且有一定润滑作用。涂油后可用下法检查是否符合要求：将活塞提到最大刻度“4”处，放开手后，活塞由于自重能够自行下降到最低点；将活塞再提到最大刻度“4”时，用橡皮帽堵住外管下端嘴上的小孔后，用手将活塞压到刻度“2”，活塞内的油中应没有气泡，释手后，活塞能够自行返回到原来的位置。

研究气体的等容变化

方法一

器材 查理定律演示器，气压计，温度计，大烧杯，冰，水，干燥剂等。

查理定律演示器实验是一定容式气体温度计，其结构如图所示。一球形玻璃容器(可用球形烧瓶等代用)通过细玻璃管、橡胶管和一 U 形压强计相连。U 形压强计右端的细长玻璃管 A 可沿板上下移动，它的旁边附有刻度尺。

操作

(1)调节 U 形管装置使其竖直安置。用橡胶管把盛有适量干燥剂的球形玻璃容器和 U 形管相连。此时 U 形管两侧水银面等高，球形容器内被封闭的气体压强等于外界大气压，温度与室温相等。

(2)从气压计读取大气压强数值 p_1 ，利用温度计测得室温 t_1 ，并标记出此时 B 管中水银面位置。

(3)把球形容器全部浸没在冰水混合物中，使容器内气体温度降至 0 (需十几分钟)。调节 A 管高低，使 B 管内水银面仍回到原处，即保持容器内的空气体积不变。读出 A、B 两管水银面高度差 h ，计算出被测气体的压强 p_0 。

(4)换上不同温度的水，重复上述步骤，得出几组被测气体的温度和压强值 t_2 、 p_2 ， t_3 ， p_3 ，……。

(3)在 $p-t$ 坐标系中，标出相应的各点。可以发现，它们基本位于同一直线上。用直觉拟合法画出 $p-t$ 图线是一条倾斜的直线。这条直线与纵坐标的交点就是 0 时的压强值 p_0 ，从而可得出： $p_t = p_0(1+rt)$ 的规律，其中

p_t 为温度为 t 的压强， r 约等于 $\frac{1}{273}$ 。

注意

(1)实验中，U 形管应始终保持竖直。A 管移动要缓慢，在降低球形容器内空气温度(例如浸入冰水混合物)时应先把 A 管位置下降些，以免容器内空气冷缩时使水银流入容器。

(2)改变水温后要搅拌，由于空气不易导热，瓶内外达热平衡所需时间较长(通常需十几分钟)。待瓶中空气温度与水温平衡后，再测定空气压强。

(3)橡皮塞与烧瓶，玻璃管各连接处必须密封，不能漏气，以确保“一定质量气体”这一实验条件。

分析

(1)若烧瓶内不采取干燥措施，则瓶内空气中部分水蒸气在降温过程中会凝结。因水蒸气的凝结使参与等容变化的气体总质量减少，这将导致 0 时瓶内空气压强的测量值 p_0 比理论值减小。结果将使测得的 r 值[空气

的压强温度系数，由 $p_t = p_0(1+rt)$ 可得 $r = \left[\frac{1}{t} \left(\frac{p_t}{p_0} - 1 \right) \right]$ 产生很大的误差(可

达 10%以上)。

因此，水蒸气的凝结是产生系统误差的主要且容易忽视的原因。为吸收烧瓶内的水汽，可在实验前半天预先放入少量颗粒状的干燥剂，密封后放在低温处保存(干燥剂可采用硅胶好 SiO_2 ，颗粒状的，它具有吸水量大、干燥速度快的优点，在 120 左右的温度下还能再生)。

(2)烧瓶的容积会随温度变化，但这一原因引起的系统误差甚小；连接烧瓶和压强计的玻璃管内空气是定容空气中的一部分，由于它们几乎没有参与温度变化也会产生一定的误差。减小该项误差的方法是在装置中采用“细管”“大瓶”，使管

子相对容积很小，则由此引起的相对误差甚小。

方法二

器材 气体定律演示器(J2257型)，低压电源，气压计，酒精温度计，水等。

J2257型气体定律演示器的主结构如图所示。

操作 参看实验170方法三。

(1)先打开长玻璃管气节门，调节长颈漏斗使左右两管中水银面相平且左管中气柱高度取某一值，例如20cm。然后关闭气节门，测出储水玻璃管中冷水温度 t 。

(2)通电加热，在温度上升过程中慢慢调节长颈漏斗，使左管中气柱高度(从而使其体积)保持不变，测出3-4组温度 t 和对应的气柱压强值 p 。

(3)根据测得的几组 p 、 t 值，进行有关计算。可以得出，在实验误差允许范围内， p/T 值是一个恒量，从而验证了查理定律。

注意

见实验170方法三的注意事项。

另外，几次所取温度值的差别要大些。

为节省时间，也可用“混合法”代替“通电加热法”改变水温。即不用控温加热电路，而是每次从出水口放掉一些冷水(或温水)，再加入一些热水，但这样不易保证水管各部温度的均匀性，从而会使误差增大。

实例 $p_0=76\text{cmHg}$

	LS=V	t	T=273+t	h	p=p ₀ +h	p/T
1	20S	13	286K	0	76	0.266
2	20S	43	316K	8	84	0.266
3	20S	60	333K	13	89	0.267

实验结果表明： $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \dots = \text{常数}$ 。

方法三

器材 气体定律演示器(J2257-1型)，铁支架，大烧杯(500ml)，温度计，虹吸排水管，冷水，热水等。

操作

(1)参照实验170方法五，在气柱玻璃管内封闭2个单位体积的空气，旋紧定容机构的紧固螺钉(使管塞不能滑动)，以保证等容变化实验的条件。

(2)将气柱玻璃管的下半部浸入盛水的大烧杯中，如图(a)所示。几分钟后，记下压强计和温度计的示数 p_1 、 t_1 ；用虹吸排水管排水，同时注入热水，待水温达到某温度(例30℃)时，停止排水和注水，适当搅拌后再记下压强计和温度计的示数 p_2 、 t_2 。

(3)把水温控制在45℃、60℃……附近，重复上述操作，记录 p_3 、 t_3 、 p_4 、 t_4 ，……。

(4)将这些数据在坐标纸上描点，能得到一直线如图(b)。将这条直线延长与纵坐标轴相交，其交点即0℃时的压强值 p_0 ，从而可得出： $p_t=p_0(1+rt)$ 的规律。

方法四

器材 圆底烧瓶(50-100ml)，金属压强计(压力表)，温度计，大烧杯，酒精灯或煤气灯，铁支架，橡皮塞和水等。

操作

(1)如图(a)所示装置仪器。记录杯中水的温度和压力表上所显示的烧瓶中的压

强。

(2)加热水，使温度升高约 25 。拿走酒精灯，搅拌水约两分钟。记下压强和新的温度读数。

(3)温度每升高 25 ，重复以上步骤，直至水接近沸腾为止。

(4)如果有冰，将烧瓶浸没在盛有冰水混合物中，记下压力表和温度计的示数。

(5)根据测得的 n 组 p、 t 值，把温度值换算为绝对温标 T 值，并分别计算 p/T 值。可以得出：在实验误差允许范围内，p/T 值是一个恒量。

验证实例 器材用的是 50ml 的烧瓶。

次数	1	2	3	4
压强 p(atm)	1.08	1.11	1.14	1.17
温度 T(K)	317	326	336	349
p/T	3.41	3.40	3.39	3.35

分析

本方法用金属压强计(压力表)测定气体压强具有使用方便，易于演示等优点，但精度比水银压强计差。且由于空气不善导热，瓶内空气与水温达热平衡往往需较长时间，所以烧瓶不宜太大。用测量水温的数据代表瓶内气温亦有误差，故本方法宜用作粗略演示。

建议

由于医用血压表的刻度精细，因而能较准确地测量 p 值(可选用量程为 20-300mmHg 的医用血压表)；测温方法可将一酒精温度计直接插入烧瓶内部测得瓶内气温；热源用插入式电热器(“热得快”)。

实验装置如图(b)所示。为防止漏气，各接头部分应用真空胶脂涂抹封闭好。

实验时应使烧瓶完全浸入水中。电热器最好用 36V 以下安全电压供电。若直接用市电，则特别注意安全用电。

以下是采用改进后装置的实验结果：

环境温度 $t_0=22$ ， $p_0=755\text{mmHg}$ ， $p=p_0+p'$ 。

P'(mmHg)	p(mmHg)	t()	T(K)	p/T
20	775.0	30.0	303.0	2.557
30	785.0	33.4	306.0	2.562
40	795.0	37.0	310.0	2.565
50	805.0	41.0	314.0	2.563
60	815.0	45.5	318.0	2.558

研究气体的等压变化

方法一

器材 粗细均匀的细玻璃管(内径 2-3mm，中间用浓硫酸封闭一段空气柱)，温度计，烧杯，刻度尺(半米尺)，酒精灯，三脚架，铁丝网，搅拌器等。

操作

(1)用橡皮筋，线或细金属丝将细玻璃管和温度计固定在半米尺上(如图 a)

(2)将这个装置放在烧杯中，往烧杯中注入足够的水，使水完全浸没空气柱(不能浸没细玻璃管的开口端)如图(b)。

(3)仔细搅拌，读出冷水的温度和空气的长度。因为细玻璃管是粗细均匀的，所以当被封闭空气柱长度是1时，那么体积就是1个“单位”。

(4)缓慢地加热水，仔细搅拌，直到温度计表示的温度升高约10 为止。

(5)拿走酒精灯，等到温度稳定后，再读出温度计读数和空气柱的长度。用这种方法重复实验，至少得出六组数据，最后一组数据在水的沸点读出。由于玻璃管的顶端是开口的，实验中气压可认为保持不变。

(6)根据实验记录，绘出V-t图线。从图线上可以看出，当温度变化1 时体积变化多少；当压强不变时，温度每变化1 ，一定质量气体体积的变化量为0 时体积的多少分之一。

(7)将图线延长，与温度轴在Z点相交(见图c)，Z点的温度称为绝对零度。由此可见，当气体的压强不变时，它的体积和它的开氏温度成正比。

说明 亦可在玻璃管内装入一段水银柱(或机油)，作为“活塞”封闭一段气体柱，完成有关实验。

验证实例

方法：用成品玻-马定律实验器验证。用水银封闭的一段空气柱在常温下空气柱高61mm。用水浴法给空气柱加热，加热时要经常搅拌水，使水温变化均匀。读取温度计读数和空气柱高度时，应将酒精灯移去，并在温度计水银柱刚开始下降时读取实验数据。

温度 t()	22	33	45	50	59	67	71	76	87	92
气体长 L(mm)	61.0	62.5	65.5	66.0	68.0	69.5	71.5	72.5	73.5	74.0
温度 T(K)	295	306	318	323	332	340	344	349	360	365
T/L	4.84	4.90	4.85	4.89	4.88	4.89	4.81	4.81	4.90	4.93

L-t图线如图(d)所示，说明L和t成线性关系。从表格中最后一行T/L的值上是一个定值，可说明如果温度值采用开氏温标，则L和T成正比。

方法二

器材 铁架台，温度计，注射器，烧杯，铁圈，酒精灯，水，小橡皮帽等。

操作

(1)按图(a)将各仪器安置好(先不点燃酒精灯)。在烧杯里倒上适量的水(水深应超过注射器内空气柱高度)，记下初始水温和注射器内空气柱体积。用酒精灯给烧杯加热，使系统温度升高，记下不同时刻的温度值和注射器内空气柱体积数。

(2)将各数据列表，画出对应V-t图象。如将图线外推到体积V为零处，可获得对应温度值，就是绝对零度。

说明

如果学校实验室备有学生实验“验证玻-马定律”器材的话，该仪器可直接用于本实验。使用前应注意把注射器塞柱中润滑油倒掉，并把针筒内的润滑油洗净，烘干。因为原器材中为了减少摩擦阻力而添加的润滑油在温度升高较大时(60 以上)，由于蒸发会影响本实验的精度。为了避免塞柱与注射器内壁间的磨擦，在每次读数前，将塞柱左右稍稍旋一旋，使塞柱受到的阻力最小。

实例 下列数表和图象(b)，是两次实验的结果。

$t_1()$	V_1	$t_2()$	V_2
12.5	30	17.0	20
30.5	32	28.5	21
36.0	33	44.0	22
41.5	34	55.0	23
48.5	35	60.0	24
54.5	36	66.0	25

方法三

器材 气体定律演示器(J2257型)等。

操作 参看实验 171 方法二。

(1)先打开长玻璃管气节门,调节长颈漏斗使左右两管中水银面相平且左管中气柱高度取某一值,例如 20cm。然后关闭气节门,测出储水玻璃管中冷水温度 t 。

(2)通电加热,在加热过程中调节长颈漏斗,使左、右两管中水银面总保持相平,从而保持左管中被封闭气柱的压强不变(总等于外界大气压),而该气柱体积随温度的升高而逐渐增大。读出 3-4 组对应的 t 、 V 值。

(3)根据测得的几组 V 、 t 值,进行有关计算。可以得出,在实验误差允许范围内, V/T 值是一恒量。从而验证了盖·萨克定律。

注意 为了减小误差,最初被封闭气柱的体积选取时可适当大些,几次所取温度值的差也要大些。

实例 外界大气压 $p_0=76\text{cmHg}$ 。

	$p=p_0$	t	$T=273+t$	V	V/T
1	76	13	286K	20.0	0.070
2	76	43	316K	22.3	0.070
3	76	60	333K	23.7	0.071

实验结果表明： $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \dots = \text{常数}$ 。

方法四

器材 量筒(10ml),U形玻璃管,细直玻璃管(长 40cm),细胶管,烧杯(1000ml),橡胶塞,温度计,水银,热水和冷水等。

操作

(1)按图所示组装仪器,量筒中注入水银的体积以 5ml 为宜。

(2)将烧杯中装满冰水混合物,当温度计示数为 0 时,沿竖直方向上下调节细玻璃管,使其中水银面和量筒中的水银面在同一水平线上。此时量筒中的气体压强即为外界大气压强,从量筒上的刻度读出 0 时的气体体积 V_0 。

(3)把烧杯中的水依次换为 t_1, t_2, \dots 等不同温度的水,沿竖直方向上下调节玻璃管,使量筒中的水银面和玻璃管中的水银面相平,即保持筒内被封闭气体的等压变化。从量筒刻度记录相应的温度时气体体积 V_1, V_2, \dots 。

(4)分析所得实验数据,探索一定质量气体等压变化规律。

注意 量筒内被封闭气体要干燥,尤其不得有水混入量筒内。否则,混入量筒中水会在升温过程中不断蒸发,使量筒中气体质量增加,从而造成很大的实验误差。

实例

次数	t()	V(ml)	V_0t	$V-V_0$	$\beta = \frac{V-V_0}{V_0t}$
1	0	5.2			
2	15	5.5	78.0	0.3	$\frac{1}{2.6} \times 10^{-2}$
3	22	5.6	144.4	0.4	$\frac{1}{2.9} \times 10^{-2}$
4	31	5.8	161.2	0.6	$\frac{1}{2.7} \times 10^{-2}$
5	48	6.2	249.6	1.0	$\frac{1}{2.5} \times 10^{-2}$
6	58.5	6.4	304.2	1.2	$\frac{1}{2.5} \times 10^{-2}$
7	62	6.5	322.4	1.3	$\frac{1}{2.5} \times 10^{-2}$
平均值					$\frac{1}{2.6} \times 10^{-2}$

方法五

目的 粗略验证盖·吕萨克定律，并测空气的定压膨胀系数，通过实验加深对绝对温度的理解。

器材 三角烧瓶(100ml)，橡皮塞(带玻璃管、橡皮管)，弹簧夹子，烧杯，温度计，托盘天平，水槽，水，冰，加热器和铁支架等。

操作

(1)测出三角烧瓶，橡皮塞(带玻璃管、橡皮管)和弹簧夹子的质量 m_0 。

(2)松开弹簧夹子，把烧瓶放在沸水中。加热5分钟，测其水温是 t 。停止加热后，立即用弹簧夹夹住橡皮管(图a)。

(3)将烧瓶瓶口向下浸没在冰水混合物中，取下弹簧夹，则冰水进入瓶内。搅动水，经过几分钟，用温度计测出水温 t_0 (图b)

(4)手持倒置的烧瓶，将瓶上移到内外水面相平时，再夹住橡皮管(图c)。

(5)把烧瓶从水中拿出后，拭干瓶外的水渍，称出此时瓶和瓶中水的总质量 M 。

(6)往烧瓶内注满 t_0 的水，按原样塞上橡皮塞，夹好弹簧夹，称出其总质量 M_0 。

(7)在温度 t 时，瓶内一定质量空气的体积为 V ，它等于瓶的容积；当温度降到 t_0 时，这些空气的体积缩小为 V_0 ，而压强始终等于外界大气压，保持不变。由于采用了以水置气法来测量气体的体积，并且以水的质量之

比来代替体积之比，则可以求出 $\frac{V}{V_0} = \frac{M - m_0}{M - m}$ ，再将 t 、 t_0 化成热力学温度

T 、 T_0 ，求出比值 T/T_0 。看 V/V_0 是否近似等于 T/T_0 ，从而验证盖·吕萨克定律。

(8)估算空气的定压膨胀系数 $\beta = \frac{V - V_0}{V_0(t - t_0)}$ 。

注意

本实验的主要误差在 t 的烧瓶内的空气中含有水蒸气，当降为 t_0 后，水蒸气的凝结将破坏“一定质量”的实验条件，从而带来较大的误差。因此使用的烧瓶内部要特别干燥，否则计算出的 β 值误差可达2-3倍。

另外，以上计算过程不计烧瓶本身的体膨胀，以及水密度随温度的变化的影响，也会导致系统误差。故此法只宜用作粗略的验证和估算。

实例

$t=97.5$, $t_0=0$, $m_0=80.5\text{g}$, $m=108.3\text{g}$, $M=191.0\text{g}$ 。

$$\frac{V}{V_0} = \frac{M - m_0}{M - m} = \frac{191.0 - 80.5}{191.0 - 108.3} = \frac{110.5}{82.7} = 1.34$$

$$\frac{T}{T_0} = \frac{273 + t}{273 + t_0} = \frac{370.5}{273} = 1.36$$

在实验误差允许范围内, 可以认为 $\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$ 。

$$\beta = \frac{V - V_0}{V_0(t - t_0)} = 0.00345 = \frac{1}{289}。$$

建议

(1)为简化实验, 亦可用热水和冷水分别替代上述实验中的沸水和冰水完成有关测试; 温差大些有利于减小相对误差。

同样, 也可用 200ml、300ml 烧瓶完成上述测试, 体积 V 大些亦有助于减小相对误差。

(2)以横轴为温度, 纵轴为体积, 作出不同容积的气体体积和温度的直线, 延长后大致相交于一点。该交点应位于横轴 -273 附近。该点即为热力学温度的零点(见图 d)。

估测绝对零度

-273.15 作为热力学温标(绝对温标, 开氏温标)的零度, 叫做绝对零度。绝对零度是根据理想气体所遵循的规律, 用“外推法”得到的。所谓“外推法”, 是根据已知经验事实, 从边续性原理出发, 把研究的现象或过程外推到理想性状态从而得出所需要的规律或结果。中学物理中, 估测绝对零度的常用方法是: 根据盖·吕萨春定律(或查理定律), 取得一系列的实验数据, 并作出 $V-t$ (或 $p-t$)图, 在确认绝对零度存在的条件下, 用外推法作图估算绝对零度。

目的 根据气体的等压变化规律(盖·吕萨克定律), 运用外推法估测绝对零度。

器材 装水银的玻璃管(长约 25cm、一端封闭、内径约 2mm、管内有一段 3-4mm 的水银柱作为水银塞、被水银塞封闭的空气柱在室温下长约 13-14cm), 毫米刻度尺(长 30cm 或 50cm), 酒精温度计, 铁架台, 大烧杯, 放大镜, 搅棒, 酒精灯, 石棉网, 水, 冰和毫米方格纸等。

操作

(1)用橡筋把玻璃管、温度计固定在刻度尺上。温度计的测温泡应贴近空气柱中间的位置。空气柱顶端和底端对应刻度尺上的读数可利用放大镜加以确定。

(2)记取环境温度 t_1 以及空气柱的体积(可由空气柱长度 L_1 表示)。

(3)照图(a)所示, 把刻度尺和玻璃管、温度计一同插入冰水混合物中, 要让冰水浸没整个空气柱。达到稳定后记取温度计读数 t_2 和空气柱长度 L_2 。

(4)依次递增烧杯中的水温(可用加热或混合法), 再测温度和空气柱的长度, 从而获得 6-7 组 t 、 L 的对应值。注意温度读数要按递升次序记录, 在实验中, 应取尽可能大的温度变化范围。

(5)在毫米方格纸上描绘空气柱长度对摄氏温度的图线。以 y 轴代表空气柱长

度(体积),其单位为 mm,取值从零一直到实验的最大数据为止。用 x 轴代表摄氏温度,坐标上要从 -300 起到 100 止。作出 V-t 直线。

(6)延长 V-t 大图线(虚线),直到它与温度轴相交为止。这个交点的温度值就是本实验要估测的绝对零度值。在实验交点处画个小圈,并标明实验摄氏度数。

(7)改变室温下空气柱的长度,重复操作(2)、(3)、(4)、(5)、(6),分别作出 V-t 直线,延长后大致相交于一点。该点应位于 x 轴上 -273 附近,如图(b)。

说明

(1)用其他仪器所取得的一系列等压变化的实验数据(例如实验 172 中方法一至五),也都可用外推法估算绝对零度。

(2)根据气体等容变化规律(查理定律),实验得到的 p-t 图线,借助“外推法”,也能估算绝对零度(可根据实验 171 方法一至四所得实验数据加以估算)。

验证气态方程

方法一

器材 气体定律实验器,铁架台,测力计,钩码,大烧杯,温度计,气压计(共用),热水,冷水等。

操作 参看实验 170 方法二。

(1)测出管塞的横截面积 S,测出活塞(包括活塞上框架)的重力 G_0 ,从气压计上读出大气压强 p_0 。

(2)在管内封闭一定质量的气体,竖直放置时其体积为 V_1 ,压强为 $p_1=p_0+(G_0/S)$,记下室温 t_1 。

(3)把实验器下部浸入盛有热水的烧杯中,使热水浸没实验器中的空气柱,同时将温度计也插入烧杯中,如图所示,气体受热膨胀,管塞缓缓上升,2-3 分钟后空气体积稳定,读出该时气体体积 V_2 ,温度 t_2 ,压强不变 $p_2=p_1$ 。

(4)在管塞框架的挂钩上对称地挂上钩码,当钩码总重力为 G 时,气体压强 $p_3=p_0+(G_0+G)/S$,体积减小 V_3 ,读出此时的水温 t_3 。

(5)改变水温,重复以上实验,得出另外几组 p、V、t 值,将测量结果记入表中。

(6)计算每次的 pV/T 值($T=273+t$),比较它们是否相等,验证理想气体状态方程。

注意

参见实验 170 方法二的注意(1)(2)。

(3)气柱玻璃管浸入热水后,需经 2-3 分钟,温度不再上升并开始下降时再读数(此时气柱温度与水温才近似达到一致),过早读数会造成较大的误差。

(4)盛热水的烧杯不要直接放在支架的铁底盘上,需垫上一层泡沫塑料,以减少热量散失。

分析

设 $x=pV/T$, x 的相对误差

$$E_x=E_p+E_v+E_T。$$

因为温度 T 用绝对温标, T 值一般在 270 到 370 之间,所以 T 的值即使有 2 误差, E_T 也仅为 0.6%, 也是比较小的。 E_x 主要来自 E_v 和 E_p 。 E_v 主要是读数误差, 根据注射器的长度, 可能会产生 2-4% 的读数误差。 E_p 的主要来源是针筒与活塞之间

的磨擦力，可用如下方法来确定 E_p 的大小：如果活塞、框架、钩码的总质量是 m ，用力将活塞拉起一些，等活塞停止向下运动后，慢慢地向框架上加小砝码。如果加上总质量为 m' 的小砝码后，用肉眼发现活塞的位置移动了，则可认为 $E_p = m'/m$ 。确定了总的误差 E_x 之后，即可判断验证是否成功：设两次实验的 pV/T 值

分别为 x_1 和 x_2 ，如果 $|x_1 - x_2| < \frac{x_1 + x_2}{2} \cdot E_x$ ，可以认为验证成功，否则不成功。

实例

$G_0 = 80\text{g}$ ， $p_0 = 10.13 \times 10^4 \text{Pa}$ ，

活塞面积 $S = 1.77 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 。

G(g)	$p = 10.13 \times 10^4 + \frac{G + 80}{S} \times \frac{9.8}{1000}$ (Pa)	V	T=273+t	pV/T
0	10.57×10^4	2.00	300	7.0×10^2
0	10.57×10^4	2.15	320	7.1×10^2
200	11.68×10^4	1.95	320	7.1×10^2
0	10.57×10^4	2.25	335	7.0×10^2
200	11.68×10^4	2.05	335	7.2×10^2

实验表明： pV/T 的值在误差允许范围内是一恒量。

方法二

器材 气态方程实验器(又名小型曲管水银压强计)，大烧杯，温度计，气压计(共用)，冷水，热水等。

操作

(1)把气态方程实验器(如图)竖直放置，读出闭管内被封闭的空气柱长度，代表其体积 V_1 ；再读出两边水银面的高度差 h_1 ，读出水银气压计的示数即外界大气压强 p_0 ，算出密闭空气柱的压强 $p_1 = p_0 \pm h_1$ ，然后从温度计读出室温 t_1 ，换算成热力学温度 T_1 ，记入表中。

(2)将实验器竖直放入盛冷水的烧杯中，让冷水浸没 U 形管的封闭端，待稳定后，读出相应的 V_2 ， h_2 和 t_2 ，记入表中。

(3)将烧杯中的冷水换为热水，再读出相应的 V_3 、 h_3 和 t_3 ，记入表中。

(4)在烧杯中的热水冷却过程中，再选择 2-3 个温度，读出相应的 V_4 、 h_4 和 t_4 ，记入表中。

(5)根据以上数据，计算各次 pV/T 值，看看是否保持不变，由此验证理想气体的状态方程。

实例 $p_0 = 762 \text{mmHg}$ 。

次数	体积	温度		压强		$\frac{pV}{T}$ 值
	V(mm 气柱)	t()	T(K)	h(mmHg)	$p=p_0+h$ (mmHg)	
1	46	17	290	30	732	116.11
2	45	9	282	32	730	116.48
3	54	74	347	14	748	116.40
4	53	67	340	16	746	116.28
5	51	53	326	20	742	116.08
6	48	31	304	26	736	116.21

要实验误差允许范围内，可以认为： pV/T 为一恒量。

方法三

器材 气体定律演示器(J2257型)，低压电源，气压计(共用)，酒精温度计，水等。

演示器结构原理，操作及注意参见本书实验 170 方法三有关部分。

操作

(1) 调节仪器，使两管水银面都在刻度为 20cm 处。

(2) 给气柱加热，在每一特定温度 t 下测定气柱的 p 、 V 值。

(3) 对于测得的几组 p 、 V 、 t 数据，分别计算 pV/T 值(以空气柱长度 L 表示 V ， $T=273+t$)。比较后可得：在实验误差允许范围内， pV/T 为一恒量。

实例 数据下页列表。

实验结果表明：在误差允许范围内， $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \dots = \text{常量}$ 。

说明 若不用控温线路加热，可从出水口放出部分温水，加入热水，使水温升高。这样可节省演示空间，但实验误差会稍大些。

外界大气压 $p_0=76\text{cmHg}$

	t()	$T=273+t$ (K)	h (cm)	$p=p_0+h$ (cmHg)	$V=L$ (cm)	pV/T
1	13	286	0	76.0	20.0	5.31
2	43	316	1.5	77.5	21.5	5.27
3	60	333	1.8	77.8	22.7	5.30

晶体导热的各向异性

晶体的各向异性，是指晶体在不同方向上的物理性质(力学性质、热学性质、电学性质、光学性质等)是不同的，但并非每一种晶体都能在各种物理性质上表现出显著的各向异性。有些晶体在导热性上表现出显著的各向异性(如云母、石膏晶体)；有些晶体在导电性上表现出显著的各向异性(如方铅矿)；有些晶体在光的折射上表现出各向异性(如方解石)；有些晶体在弹性上表现出显著的各向异性(如立方形的铜晶体)。以上是指单晶体，而对于多晶体，由于它是由许多细小的单晶体杂乱集合而成，并不具有各向异性的特征。本实验仅演示晶体导热的各向异性。

方法一

器材 云母片，培养皿(外径约 60mm)，石蜡，四氯化碳，小铁钉(长约 40mm)2 只，尖嘴钳，酒精灯等。

操作

(1)将云母片剥离成薄片，厚度尽可能小。用有机溶剂四氯化碳将石蜡溶解，再用脱脂棉将石蜡溶液均匀涂在云母上和玻璃培养皿上，放在阳光下晒干备用。

(2)用类嘴钳夹住小铁钉，放在酒精灯火焰上将钉的尖端烧红。再将钉的尖端竖直向上，云母片水平放置在尖端上(涂蜡面向上)，石蜡逐渐熔化成椭圆形。

(3)将小号培养皿放在烧红的铁钉尖上(涂蜡面向上)，石蜡熔化成圆形。这表明，作为晶体的云母片导热各向异性和非晶体玻璃导热各向同性。

注意

(1)本实验用铁钉(而不用钢针)烧红后，能输出较多热量，石蜡熔化范围大，形状明显。但应注意把铁钉尖端处锉成圆锥形。

(2)普通平玻璃较厚(一般在2.5mm以上)，改用培养皿(亦可用盖玻片)，厚度仅1.4mm，石蜡可熔化成有一定半径的圆形。

(3)热的钉尖应放在云母片(或盖玻片)未涂蜡的面。若放在涂蜡的一面，石蜡本身参与导热，影响实验效果。

(4)本实验所用云母片越薄越大效果越明显。把较厚的云母片放在开水中浸2-3分钟后再剥，可获得厚度仅0.02mm的较大的云母片。

建议 为方便起见，可用电烙铁(须将烙铁头尖端磨成圆锥形)作为熔蜡的热源，可选用45-75W的外热式电烙铁，但功率不宜太小。

方法二

原理 完整的石膏晶体板状晶面近于菱形，这样的晶面具有较明显的各向异性。

器材 酒精灯，石蜡，石膏晶体，四氯化碳，刀片，薄纸(吸湿性好的)，钢针等。

操作 用刀把石膏晶体切成很薄的薄片，在其表面上涂蜡，晾干后将涂蜡面向下，并在薄片下垫一张吸湿性好的纸。用烧红的钢针触及薄片，熔化的石蜡被纸吸收，薄片上石蜡痕迹呈椭圆形。

说明 石膏晶体是一种常见的矿物，其硬度小容易加工成很薄的片状以利实验。

培养大体积单晶体

演示晶体肯有天然规则的几何形状，最好事先培养大体积的单晶体，便于观察。其中硫酸铜、重铬酸钾、明矾的大晶体比较容易获得。

器材 200ml 烧杯，硫酸铜若干(或硫代硫酸钠和明矾)，长10cm的细玻棒等。

操作

(1)在50-60 温度下，用烧杯制作硫酸铜饱和溶液170-180ml。

(2)选取外形好的硫酸铜小晶体做为结晶中心。用细线拴住，用细玻棒悬挂在放有硫酸铜的饱和溶液的烧杯中(如图)。

(3)保持20-25 室温，待1-2天后即可得到硫酸铜大晶体

说明

(1)时间长，且使晶体缓慢生成，所得晶体形状较佳；如果溶液过饱和，室温过高，晶体生长太快，得到的单晶体质量就差。

(2)如无恒温设备，则应注意制取饱和溶液的温度与室温不能相差悬殊。

(3)若用明矾、硫代硫酸钠或重铬酸钾等，也能完成上述实验。

建议 可用厚一点的纸作成一有底的圆筒，圆筒比小电珠略大，略长些，在筒外包两层纱布。用线把筒开口一端拴住，悬挂起来，使筒的 4/5 左右浸入硫酸铜溶液中作为结晶核，从而获得一个中空的硫酸铜晶体，然后在晶体内装一小电珠。演示时使电珠发光，从里面照亮晶体，以加强演示效果。

液体表面的收缩趋势

177

方法一

器材 自制表面张力演示器，皂液，烧杯，细棉线，酒精灯，钢针等。

表面张力演示器的制作方法

如图 (a) 所示，用金属丝（最好选用铜丝，既有一定硬度，又便于焊接，且不易生锈）制作成各种几何形状的框架。

操作

(1) 使系有棉线的金属丝圆环 1 上布满皂膜，膜上的棉线呈松弛状态。用热针捅破棉线左边的皂膜，棉线就被右边皂膜张紧为弧形 (图 b)。

(2) 把一个棉线圈拴在铜丝环上，使环上布满皂膜，这时棉线圈是松弛的。当用热针刺破棉线圈里那部分皂膜，外边的皂膜就把棉线圈张紧成圆形 (图 c)。

(3) 使图 (a) 中金属丝框架 2 上布满皂膜。由于皂膜的收缩，会使系在门形框架上的细线向内张紧为弧状。轻轻将细线向外拉，皂膜面积增大；松手后，皂膜的张力又会使细线向内张紧 (图 d)。

(4) 使图 (a) 中金属丝框架 3、4、5、6 浸入皂液，取出后所形成皂膜的形状分别如图 (e) 中所示。对于某一框架上形成皂膜的形状是唯一确定的，这时皂膜的表面积保持最小（其中框架 4，两环的间距是可变的，皂膜的形状会随两环的间距变化而变化）。

注意

(1) 配制和选用性能良好的肥皂混合液是实验成功的关键。

(2) 所用皂液中不能有气泡，否则容易形成畸形皂膜。皂液经过一定时间静置可消除其中的气泡。

(3) 演示时，室内不能有风，强烈的气流容易使皂膜破裂。

附：皂液的配制

在演示液体的表面现象、静电以及薄膜干涉等实验时，为了形成较大面积的薄膜和延长薄膜的留存时间，配制性能良好、浓度适当的皂液是至关重要的。配制时应注意以下几点：

(1) 用肥皂配制时，普通洗衣皂（黄色）比大多数杂色肥皂好。在皂液中加入一点甘油（纯甘油）能大大提高皂膜留存时间。

(2) 配制皂液的水最好用纯蒸馏水或较软的水（例如较新鲜干净的雨水）。配制时，不要加温或过滤；配置好的皂液可贮存在有瓶塞的瓶内在阴暗处静置半天以后再行使用；使用时可用虹吸管取出泡沫下清静液体；用过的皂液不可再倒回贮存瓶内。按上述方法配制与保存的皂液可以长时间（二年以上）保持良好性能。

(3) 用洗涤剂配制时,视环境温度高低,不加水或加少许水后可直接作皂液用。溶液的浓度以铜丝框在其中拖动时手不感到太吃力为宜。通常情况下,可用海鸥洗涤剂加入 $\frac{1}{3}-\frac{1}{4}$ 蒸馏水稀释200ml的溶液,再滴入甘油20滴(或松香粉),静置半天消除气泡后使用。用洗衣粉配成溶液,加入几滴甘油,效果也较好。

方法二

器材 玻璃皿,细铜丝,空原珠笔芯,小圆纸片,肥皂水等。

操作

(1) 用铜丝按图中的样子做一个框架,框架的长和宽分别为10cm和8cm左右。

(2) 去掉空原珠笔芯笔头,两端各套上一张小圆纸片起限位作用。

(3) 在培养皿中倒入适量肥皂水,把笔芯放在框架上一起浸没在肥皂水中,然后先提起框架的右侧,当框架与液面成约 30° 角时让框架脱离液面,这时可以观察到笔芯将在框架与笔芯内形成的肥皂薄膜的收缩作用下沿框架向上运动。

注意 调好具有恰当浓度的肥皂水是做好实验的关键(具体做法见方法一附)。

方法三

器材 铁丝圆环(直径约3cm),皂液,水龙头,铁丝,酒精,酒精灯等。

操作

(1) 把布有皂膜的铁丝圆环置于水龙头之下,让一束细流穿膜而过,皂膜仍能完好无损。这表明水的表面张力系数比皂液大。

(2) 用水浸湿细铁丝后,轻轻插入皂膜,尽管铁丝已捅穿了皂膜,皂膜却不会破碎。

(3) 往皂膜上滴一小滴酒精(或用烧热的铁丝触及皂膜),皂膜顷刻四分五裂。这表明酒精的表面张力系数比皂液小(或温度升高,皂液表面张力系数减小)。

方法四

目的 演示液体表面的收缩趋势。

器材 附有T形玻璃管的微小压强计,两用气筒,烧杯,皂液,铁支架等。

操作 按图所示组装器材,在T形玻璃管开口处涂些皂液,用气筒吹成1个肥皂泡(不必很大),并立即夹住通向气筒的橡皮管。从压强计液柱差显示出由于肥皂泡液膜收缩所产生的附加压强。

注意 配制并选用性能良好的混合皂液是本实验成功的关键(具体做法见方法一附)。

方法五

目的 演示液体的重力被另一液体的浮力平衡时呈球形,从而证明液体存在表面张力。

器材 食用植物油少许，小滴管，小烧杯，酒精，饱和食盐水等。

操作 用1支小滴管向盛有酒精的烧杯中滴几滴食用植物油，它们沉于杯底。用铁丝把它们拨在一起形成一较大椭球形液滴。再用另一滴管把饱和食盐水注入烧杯底部，可见油滴越来越圆，直到油滴悬浮在酒精食盐水溶液中，并呈一球形。

说明 这是演示表面张力的一个著名实验，通常是用橄榄油在水和酒精混合液中演示。实际上，所选两种液体只要密度相同，彼此不发生化学反应且不互溶，都可用作演示。实验中，我们常用某种方法慢慢改变一种液体的密度使它和另一种液体的密度相同。

可供选择的配对液体有橄榄油（或鱼肝油、零号柴油、食用植物油、紫草油）和酒精（用水或盐水调节酒精密度），苯胺和水（用食盐调节水的密度），萘液和热水（温度高于80℃，用食盐来调节热水密度）等。

紫草油是医学上用于治疗烫伤的药品，药店有售。紫草油因其呈紫红色，故代替橄榄油演示液体收缩成球形实验时，可见度大。

方法六

器材 培养皿，投影仪，洗洁精（或酒精、乙醚），滴管等。

操作 把盛有一薄层染色水的培养皿置于书写投影仪上，用滴管往培养皿水面中央滴几滴洗洁精（或酒精、乙醚），可看到在滴入洗洁精处液面向四处散开，并能使皿底空出一块“干”的地方，这是由于洗洁精使中央液体表面张力减小的缘故。

注意 用作投影演示时，时间不宜长。否则，由于投影仪光源加热作用，会使皿中水干涸。

方法七

器材 细木梗（例火柴梗，冰棍棒，竹筷），培养皿，水，皂液（或洗洁精）等。

操作

（1）在培养皿内注入清水。将几根细木杆平行放在水面上，让它们相互靠近，经过一段时间，漂浮在水面上的细木杆会“自动”聚集在一起。这是因为水的表面张力力图使液面保持最小面积所造成的。

（2）在相互靠近的细木杆中滴入几滴肥皂水，细木杆会各自散开。这表明滴到肥皂水处的液面表面张力减小，造成液面各处表面张力不一致，带动细木杆散开。

方法八

目的 演示杂质、温度对表面张力的影响。

器材 瓷碗，竹筷，净水，洗洁精，铜丝等。

操作

（1）往碗内注入适量净水，使水面略低于碗口。把竹筷轻轻搁在碗沿，慢慢向外抽取竹筷，由于水与筷端形成水膜的表面张力作用，即使筷子重心位于碗沿之外，仍不会掉下（如图）。

（2）往碗内滴1~2滴洗洁精（或用烧热的铜丝触及水面），筷子的平衡立即会被破坏。这表明极少量的杂质能显著改变液体的表面张力；当温度升高时表面张力减小。

方法九

器材 吹塑纸，牙膏少许，水盆，清水。

操作 用吹塑纸剪一个直径约 4cm 的“S”形小板，如图所示。在“S”形板的内弯头处挤上两小点牙膏。使 S 形小板浮在水面上，由于牙膏中所含滑石粉溶于水，使该处附近的表面张力明显减小，而其他部分仍具有较大的表面张力，它们的合力矩作用使 S 形小板在水面上慢慢旋转起来。

178

测定液体的表面张力系数

影响表面张力系数 σ 值的因素是多方面的。温度升高， σ 值减小（实验表明， σ 值与温度近似地成线性关系），因此测定 σ 值时应注意记录液体的温度；表面张力系数还与杂质有关，极少量的杂质也能显著地改变液体的表面性质，因此实验中，待测液体所触及器具的清洁处理是不容忽视的。在中学物理中，测定表面张力系数的实验仅限于应用几组特殊数据进行验证，精度要求亦不高。方法一是用拉脱法测定，可用作演示实验；方法二是用毛细管法测定，适宜用作学生实验；方法三是用滴液法，作为粗略或比较 σ 值的一种简易方法，可用作课外实验。

方法一

器材 细铁丝、物理天平，500mg 以下砝码片 1 套，细线，烧杯，刻度尺，温度计，待测液体（水、皂液）等。

操作

（1）截取两根细铁丝，且使它们长度和横截面等都相同。把其中一根弯成“U”形（图中 L 可取 5cm 左右），测出 L 值后用细线把 U 形框浸湿后系在天平左侧的挂钩上，把另一相同的铁丝放在天平右盘。调整游码使天平平衡。

（2）把盛有待测液体的烧杯放在天平的载物台上，升高载物台使 U 形框浸没在待测液体中，再稍稍下降载物台，使 U 形框上布满一层液膜后固定载物台。这时天平明显向左倾斜。

（3）往天平右盘内轻轻加入砝码片，并调整载物台的高度，使 U 形框的两脚将要离开还没有离开液面记录所加砝码片的质量 m 。

（4）由平衡条件 $2f=mg$ （其中 $f=\sigma L$ ，表示液膜一个面的表面张力），所以待测液体表面张力系数 $\sigma=mg/2L$ 。由测得数据计算 σ 的值。

（5）记录测量时待测液体的温度 t 。

注意

（1）实验中所用烧杯、U 形框应作清洁处理：烧杯可先用清洁剂洗涤后再用蒸馏水洗净；U 形框可用镊子夹好放在酒精灯上烘烤（烘烤后，不能再用手直接拿取）。

（2）实验过程中，悬挂的 U 形框不能与烧杯内壁接触。

分析 本实验是用拉脱法测定水的表面张力，较精密的测量需要用焦利氏弹簧秤。中学实验可用物理天平代替。设待测液体（例水）的表面张力系数为 $\sigma=7\times 10^{-2}\text{N/m}$ ，U 形框宽度 $L=5\text{cm}=0.05\text{m}$ ，水膜产生张力大小为 $F=2L\sigma=2\times 0.05\times 7\times 10^{-2}\text{N}=7\times 10^{-3}\text{N}$ 。

这个力约相当于 0.7 克力，这是物理天平能够测量的。

因为 $E = E_m + E_L = \frac{m}{m+L/L}$, $m=0.02\text{g}$ (物理天平的感量), $L=1\text{mm}$ (米尺的最小刻度), 所以 $E = 0.02/0.7+1/50=5\%$, 即测得的表面张力系数数值约有 5% 的误差。

方法二

目的

- (1) 用毛细管测定液体的表面张力系数。
- (2) 学会毛细管的清洁、内径检查和测量方法。

器材 玻璃烧杯, 玻璃毛细管 (内径 0.5 mm、长约 20cm) 3 根, 游标卡尺, 粗细不同的针, 螺旋测微器, 蒸馏水, 温度计等。

操作

(1) 在清洁处理过的玻璃烧杯里注入蒸馏水, 然后把清洁处理过的玻璃毛细管插入水里。

(2) 观察毛细管里弯月面的最低处的高度和玻璃容器里水面的高度, 用卡尺测出水在毛细管里上升的高度 h 。

(3) 取出毛细管, 把用烛火熏黑的针插入毛细管里, 在针被管口卡住的地方做下记号。用螺旋测微器测出针在有记号的地方的直径 d 。

(4) 如果管的内部的半径是 r , 液体的表面张力系数是 α , 那么, 竖直向上作用到液柱上的表面张力就是 $2\pi r\alpha$ 。设液柱的高度是 h , 液体密度是 ρ , 那么竖直向下作用到液柱上的重力就是 $\rho\pi r^2hg$ 。则当液柱保持平衡时, 有

$$2\pi r\alpha = \rho\pi r^2g\left(h + \frac{\gamma}{3}\right)。$$

式中 $\frac{\gamma}{3}$ 这一项附加到 h 上, 是考虑到弯月面底部以上液体体积而作的修正, 所以

$$\alpha = \frac{1}{2}\rho\gamma g\left(h + \frac{\gamma}{3}\right) = \frac{1}{4}\rho dg\left(h + \frac{d}{6}\right)。$$

当 $d \ll h$ 时, 可近似表示为 $\alpha = \frac{1}{4}\rho dhg$ 。

(5) 用直径不同的玻璃毛细管测三次, 求出水的表面张力系数的平均值。

(6) 测量实验前后水的温度, 取其平均值作为实验时水的温度。

注意

(1) 本实验所用的玻璃烧杯和毛细管必须经过清洁处理。方法是用稀释后的氢氧化钠洗涤后, 再用蒸馏水冲净, 烘干。可用下法检查毛细管清洁与否: 把毛细管下端竖直浸入装有液体的烧杯中, 将它上下移动几次, 弯月面应保持在同一高度, 否则, 说明毛细管不清洁。在弯月面符合这个试验要求前就着手进行实验是毫无意义的。

(2) 实验前, 应检查所用毛细管的内径是否均匀。具体方法是, 往清洁过的毛细管中注入长 15~20mm 的水银柱, 把管水平放置在毫米尺上, 仔细测量这段水银柱在毛细管不同部位的长度。如果长度相同, 则表示管内径均匀, 否则不均匀。

建议 测量毛细管内径另一方法是, 往管内灌入长为 L (4~5cm) 的

水银柱，测数次求平均长度。再把管中水银倒入已称过质量的小杯子中，称出水银质量 m 克，则毛细管内径。

$$d = \sqrt{\frac{m(1 + 0.00018t)}{13.596\pi L}} = \sqrt{\frac{m}{13.6\pi L}} \text{ (cm)}。$$

(设温度 t 时管内水银柱长度为 L cm)

方法三

器材 滴管，小量筒，放大镜，刻度尺（最小刻度为 0.5mm），待测液体。

操作

(1) 取滴管和小量筒各一支（可分别用眼药水瓶及有刻度的注射器筒代用），使待测液体自滴管口一滴滴入小量筒。测出 n 滴水的总体积 V 。

(2) 观察液滴从管口滴出过程可发现，每次滴下液滴的大小和形状基本相同，且在液滴断落前会形成一个收缩的“细颈”，正是细颈部的表面张力与液滴重力相平衡才使液滴在“细颈”断裂前在管口保持相对静止，因此有 $2\pi r\gamma = mg$ 。（ γ 为待测液体的表面张力系数）。

(3) 借助放大镜，通过将断裂面的“颈”粗与滴管口外径的比较，测出液滴滴下时的 $2r$ 值，并计算表面张力系数 γ 值。

实例 室温 $t=24$ ，滴管口外径 2.0mm，水滴断落前“颈”宽 1.80mm， $n=50$ 滴， $V=1.90$ ml，则水的表面张力系数。

$$\begin{aligned} \alpha &= mg / 2\pi r = (\rho Vg / n) / 2\pi r \\ &= \frac{1 \times 1.90 \times 10^{-3} \times 9.8 / 50}{1.80 \times 3.14 \times 10^{-3}} \text{ N/m} \\ &= 66 \times 10^{-3} \text{ N/m} \end{aligned}$$

说明 本实验可作为粗测或比较表面张力系数大小的一种方法，适合于课外小实验。

附：在 20 时与空气接触的液体的表面张力系数

液 体	(10^{-3} N/m)	液 体	(10^{-3} N/m)
航空汽油 (10 时)	21	甘 油	63
石 油	30	水 银	513
煤 油	24	甲 醇	22.6
松 节 油	28.8	在 0 时	24.5
水	72.75	乙 醇	22.0
皂 液	40	在 60 时	18.4
弗利昂-12	9.0	在 0 时	24.1

在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数

温度 ()	(10^{-3}N/m)	温度 ()	(10^{-3}N/m)
0	75.62	25	71.96
5	74.90	30	71.15
10	74.20	40	69.55
15	73.48	50	67.90
20	72.75	100	58.84

方法一

器材 烧杯，玻璃，石蜡块，玻璃管，自制涂蜡玻璃管，水等。

涂蜡玻璃管的制作方法

将内径 2mm 左右的玻璃管在加热熔化的石蜡中放置片刻，待壁上附上薄蜡层后取出自然冷却，蜡层太薄效果不明显且易脱落，太厚则妨碍观察。

操作

(1) 在洁净的玻璃板上放一滴水，水对玻璃浸润，它要附着在玻璃板上形成薄层。在石蜡块上放一滴水，水对石蜡不浸润，它在蜡块上呈一球状，能滚来滚去，而不附着在上面。

(2) 把普通玻璃管下端插入水中，由于水浸润玻璃，器壁附近的液面向上弯曲，水沿玻璃管上升并呈凹形的弯月面，如图(a)。把涂蜡的玻璃管下端插入水中，由于水不浸润石蜡，器壁附近液面向下弯曲，管内液面低于管外且形成凸形的弯月面，如图(b)所示。

说明 本方法仅需用水完成，而不用水银。可避免水银污染，适于用作学生实验。

方法二

器材 自制浸润和不浸润现象演示仪。

浸润和不浸润现象演示仪的制作方法

用有机玻璃胶合成如图所示的扁薄容器。图中的石蜡片是用卡片纸浸透而成的。

操作 演示前，石蜡片和铜片的表面都要用小刀仔细刮过，防止其他物质沾污。然后嵌入薄容器侧面(见图)。分别注入水和水银：由于水对玻璃是浸润的，接触角为锐角，成凹形面；由于水对蜡片不浸润，接触角为钝角，成凸形面；同样，由于水银对玻璃不浸润，接触角为钝角，成凸形面；而水银对紫铜是浸润的，接触角为锐角，成凹形面。故在两个狭槽中液面都呈 S 形。

方法三

器材 装药片的小塑料瓶(或眼药水瓶)，细金属丝，玻璃缸，石蜡，砂粒等。

操作

(1) 用未被油沾污的金属丝弯一圆环，环上焊三根金属丝作支架，

并按图(a)所示插在瓶塞上。在瓶内装适量的砂粒,使整体能竖直地漂浮在水中,且使金属环浮出水面约3~4cm。

(2) 竖直向下压圆环使它浸入水中,轻轻释放后,由于水对圆环是浸润的,水面的表面张力使它不能浮出水面,见图(b)示。

(3) 在金属圆环表面涂上一层蜡后,重复上述实验,由于水对蜡不浸润,圆环还会浮出水面。

注意 演示的关键在于当圆环(浸润体)上浮过程中,直至抵达水面时,一直要保持水平状态,否则它的某一部分将先突出水面。

说明

(1) 为了减小液体折射光线所造成的错觉,盛水的容器最好选用方形的。

(2) 当圆环为水面表面张力阻挡不能上浮时,用酒精(或乙醚、洗洁精)滴入水中,减小表面张力,圆环(浸润体)就能浮出水面。故本实验亦可用作演示表面张力作用,以及杂质对表面张力的影响。

180

毛细现象

方法一

目的 演示毛细现象和毛细管半径的关系。

器材 毛细现象演示仪,染色水(或酒精),水银等。

毛细现象演示仪包括4~5根玻璃毛细管(图a)和2个玻璃连通器(图b)。玻璃毛细管长约7cm,最小内径为0.25mm、最大内径为2.5~3mm,并列在同一个容器里。

操作

(1) 往毛细现象演示仪(图a)的容器里注入染色水(或酒精),把4根毛细管一起插入该容器。由于水(或酒精)对玻璃是浸润液体,水会沿毛细管上升,毛细管内径越小,水面升得越高。

(2) 如图(b)所示,在一个连通器的粗管中注入约1/4的染色水,可以看到毛细管里的水面比粗管里高。用水银注入另一连通器里,可以看到毛细管里的水银面比粗管里的水银面低。

注意 实验前,应对毛细管进行清洁、去污处理,并保持毛细管内畅通。

建议 如果没有图(a)中各种口径的毛细管,可取同一内径的细玻璃管4~5根插入盛有染色水的烧杯中,然后用不同外径(从小到大)的钢丝插入各个细玻璃管内。于是,钢丝和玻璃管壁间隙处就组成内径不同的毛细管。

方法二

器材 自制楔形有机玻璃容器2只,滴管2个,染色水,水银等。

楔形有机玻璃容器的制作方法

取2mm厚的有机玻璃材料用602胶水粘合,有关尺寸见图(a)(前后两板间隙最大处约1mm)。

操作 用滴管分别向两个楔形容器中注入染色水和水银,要求液体

高度达容器的一半。由于水对有机玻璃浸润，则水接触器壁处会形成向上的凹弯月面。缝越狭，水面上升得越高（图 a），由于水银对有机玻璃不浸润，水银和器壁接触处形成向下的凸弯月面，缝越狭，水银面下降得越多，如图（b）所示。

这种演示器可看作许多粗细不同的毛细管连续排列而成，可以证明，所成弯月面是一条双曲线，既便于直接观察和比较，也可投影于屏幕上供多人观察。

注意 演示前应对楔形容器进行清洁去污处理；另外，由于有机玻璃表面并非理想平面，曲线总有些畸形，但仍能说明毛细现象。

建议 实验还可采用下法进行：用两块 $12 \times 16\text{cm}^2$ 的玻璃，一边夹一片厚 1mm 的卡片，使两片玻璃形成楔形，上下分别用橡皮筋箍好。然后竖直放在盛有染色水的水盘中，如图（c）所示。

181

做功改变物体的内能

方法一

器材 机械能、内能互变演示器（丁铎尔实验仪），宽约 1cm 纱带，吸管，乙醚等。

演示器的结构如图所示，一个黄铜管装在一弓形铁夹上，黄铜管管口有一橡皮塞，管底有隔热垫圈。

操作

（1）把铁夹夹在桌边。在黄铜管里滴入乙醚（不要太多，只需占铜管容积的 $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{5}$ 即可），将塞子塞好，并使其松紧适度（不能漏气，也不宜过紧。可通过试验，逐渐掌握）。

（2）用纱布带绕管 1—2 圈，双手执纱布带两端迅速往复拉动，使纱布带与管壁摩擦。几分钟后管内乙醚沸腾，产生的乙醚蒸气压强不断增大，最后将顶部塞子冲起。这表明做功可以改变物体的内能，消耗内能又可转化为机械能。

注意

- （1）在纱布带上可涂些松香，增加摩擦。
- （2）演示时不要将头伸向铜管口处，以防管内液体或蒸气喷入眼内。
- （3）用毕应将残留乙醚倒出，并将铜管擦拭干净保存。

建议

（1）可用碳酸氢铵（一种化肥）代替乙醚完成以上实验。取一药匙碳酸氢铵放入黄铜管，当其受热后加速分解，生成大量氨气和二氧化碳，使筒内气体压强迅速增大冲开塞子。具有实验时间短，操作方便，药品易得，现象明显等优点。

（2）如果没有乙醚可用酒精，但酒精沸点高，演示时间较长。

方法二

器材 图钉，硬纸板等。

操作 用食指和拇指捏住图钉根部，使图钉帽在较粗糙的硬纸板上用力摩擦。仅往复擦十多次，就会感到图钉炙热烫手，难以触及。

这是因为图钉在克服摩擦力做功过程中，一部分机械能转变为图钉的内能，使其温度升高，即所谓“摩擦生热”现象。

方法三

器材 玻璃瓶，软木塞，温度计，泡沫塑料，细铁砂。

操作 如图所示，在玻璃瓶内装入约半瓶细铁砂，从软木塞中间插入温度计，隔着一层泡沫拿住瓶子，沿水平方向迅速振动瓶子几十次，可看到温度计上的读数逐渐升高。

182

气体的绝热压缩

方法一

目的 演示空气被迅速压缩时温度升高，说明机械能可以转化为内能。

器材 空气压缩引火仪，硝化棉或其他燃烧剂，橡皮吹气球等。

仪器由压缩活塞和活塞筒组成，如图所示，压缩活塞包括压缩手柄和活塞。活塞筒由厚壁有机玻璃制成，固定在底座上。

操作

(1) 将活塞壁涂上蓖麻油，以保证压缩过程不漏气和润滑，然后取一小片硝化棉，用玻棒送到活塞筒底部，再把活塞插入活塞筒上口。

(2) 将左手食指和中指分开，把仪器底座夹在食指和中指中间压住。右手摊开手掌，用手掌的大鱼际肌对准压缩手柄，垂直向下用力一击，把活塞迅速地压下去，硝化棉就会在瞬间燃烧，发出明亮的火光。

注意

(1) 活塞筒由有机玻璃制成，不耐高温、高压。实验时，硝化棉不宜放得过多（大小如火柴头的团粒即可），以免活塞筒炸裂或烧熔损坏。

(2) 如果第1次压缩后没有点燃，切勿再加硝化棉。应取出未燃的硝化棉，再换入新的。以防过多引起爆炸。用自制硝化棉效果较好，自制方法见附。

(3) 多次做实验时，可用橡皮吹气球吹气，将活塞筒底部的废气清除。待新的空气进入后再做实验。

(4) 使用完毕后，将活塞涂上蓖麻油，并把活塞拔出与活塞筒分别放置，以免活塞长期受压挤弹性衰退，发生漏气。

(5) 点燃物最好不用乙醚，因乙醚对有机玻璃有溶解作用（若活塞筒由玻璃制成，则可用乙醚作点燃物）。

建议 可用瓶装酒的封口薄膜作点燃物：瓶装酒酒瓶口上的封口薄膜，最常见的为白色，也有玫瑰色，其主要成分就是硝化棉。实验时，可取一块米粒大小的该封口薄膜，放入活塞筒底部，按前述方法操作，一次即可引燃，且火光明亮，可见度大。

附：硝化棉的制法：

(1) 取小圆玻璃缸两只，一只放入半缸冷水，一只放入半缸32℃的温水，用来调节反应温度。

(2) 取100ml小烧杯一只，先倒入浓硝酸10ml，再慢慢地倒入浓硫

酸 30ml，然后把小烧杯浸在冷水缸里用玻棒搅拌，将混合酸的温度调节到 30 左右。

(3) 2.5g 脱脂棉投入盛有 30 的混合酸的小烧杯内，再把小烧杯浸在冷水缸中用玻棒搅拌脱脂棉，使浸有混合酸的脱脂棉处在 30 的温度中反应，如果反应温度低于 30 时，则把盛有混合酸和脱脂棉的小烧杯移浸到 32 的温水缸中继续搅拌，经 15 分钟后即制成硝化棉。

(4) 把制成的硝化棉用清水反复漂去余酸并沥干，再放在通风避光处晾干后放进有干燥剂的广口瓶里备用。应避免震动和高温，以防爆炸。

各种混合药棉的制法：

(1) 简单混合药棉的制法 把脱脂棉浸在过饱和的氯酸钾溶液里，取出后放在通风避光处晾干，再放入生石灰箱中备用。

(2) “加料混合药棉”的制法 临做实验时，在“简单混合药棉”中加入绿豆般大的赤磷，可增强引火效果。

(3) “多元混合药棉”的制法 临做实验时，在“加料混合药棉”中再加入少量铝银粉（细铝粉），可增强发光亮度。

上述各种混合药棉可以根据仪器的气密性能加以选择。

方法二

器材 自制空气压缩引火仪，吸液管，带乳胶管的橡皮吹气球，乙醚，脱脂棉，凡士林等。

空气压缩引火仪的结构见图。玻璃管最好用耐高温的玻璃管，管壁厚 4~5mm，管内径 12~15mm，管长约 260mm（例如选用型号为 G·G17 的耐高温玻璃管）。调节螺母是用来控制调节压缩比（玻璃管全长与压缩后压缩空气柱长度的比值）的。橡皮垫是在活塞压下时起缓冲作用的。活塞可用橡皮塞加工而成，它在玻璃管内的松紧程度，是由调节固定螺母的松紧来控制的。

操作

(1) 用少量凡士林涂在橡皮活塞表面，再将活塞杆插入玻璃管，上下抽动几次。

(2) 取绿豆大小的棉球，滴上 2~3 滴乙醚后放入玻璃管内，然后把活塞放入管内，以迅猛的速度下压活塞，通常压 1~2 次便可看到明亮的火光。

(3) 在第一次燃烧后，如果再做实验，可用橡皮吹气球的乳胶管插入玻璃管内，轻轻鼓气，以新鲜空气排除燃后的废气。这样，原来的棉球仍可继续实验 2~3 次，最多 4 次。如还需继续演示，须将活塞取出，再加一滴乙醚（乙醚过多或过少，都不易成功），装好活塞，再压缩，又可使乙醚气体燃烧。

注意

(1) 本装置不需用特制的硝化棉（硝化棉制作麻烦，对保存有一定要求，稍有不慎，就会导致实验失败），关键是设计时选取内径较细的玻璃管和选择合适的压缩比。

实验前可根据当时气温情况，适当调节压缩比。空气压缩比参考数值如下表所示。

室 温	10 以下	10 15	20 左右	25 以上
压缩比	9:1	8:1	7:1	6:1

(2) 演示时操作的要领：一是小（棉球不宜大），二是少（乙醚不宜过量），三是迅速（迅速下压活塞）。

建议 可用二硫化碳代替乙醚完成本实验。由于二硫化碳的自然点仅 112（乙醚的自然点是 180），因此可大大提高实验的成功率。应注意二硫化碳极易挥发，且有毒，但每次实验仅用 2—3 滴，对健康影响不大。

气体的绝热膨胀

183

方法一

目的 演示气体绝热膨胀做功时，内能减小。

器材 两用打气筒，吸滤瓶，橡皮塞，橡皮管，酒精（或水）等。

操作

(1) 在吸滤瓶内放入少量酒精，一般在瓶底有薄薄一层就足够了，然后在瓶口塞上橡皮塞。

(2) 把吸滤瓶与两用气筒用橡皮管连通，如图所示。

(3) 用两用气筒向吸滤瓶内打气。当瓶内气压达一定大小时，橡皮塞被冲出，瓶内立即出现一片白雾。这是因为气体膨胀作功内能减少，瓶内空气温度下降，酒精蒸气液化的结果。

说明 瓶内出现白雾后，如果再在瓶口塞上橡皮塞，并向瓶内打气，可见白雾迅速消失。这是因为压缩空气做功，空气温度升高，酒精（或乙醚）液滴迅速汽化的结果。因此本实验也能说明压缩气体做功，气体内能增加。

建议

本实验亦可用一只盐水瓶，在盐水瓶的橡皮塞上加一只自行车内胎上的气门嘴（现成的气门嘴底帽直径较大，需用锉刀将其锉成直径约为 12mm）。演示时，在瓶内加入少许酒精（或水），塞上瓶塞（瓶塞上的翻边勿翻下），用普通打气筒打气，当瓶内气压达 1.5—2 个大气压时，一旦顶起瓶塞，瓶内顷刻呈白色雾状，而且白雾从瓶口上冲成约半米高的白色雾柱。

注意 打气时勿将瓶塞对着人体，以防造成意外事故。

方法二

器材 两用气筒，吸滤瓶，橡皮塞 2 只，玻璃试管，细玻璃管，橡皮管（或乳胶管），染色水等。

操作

(1) 将内有一段染色水的细玻璃管和薄壁试管等组装成一气体温度计。把气体温度计，吸滤瓶，两用气筒等按图所示组装。

(2) 用气筒迅速向瓶内打气，这时能观察到气体温度计内红色水柱上升。表明对气体做功时，气体内能增加，温度升高。

(3) 拉开橡皮管 3, 让瓶内气体迅速膨胀, 气体温度计中的红水柱迅速下降, 表明气体膨胀对外做功时, 内能减小, 温度降低。

测定热功当量

184

方法一

目的 用电热法测定热功当量

器材 量热器(包括电热丝线圈), 托盘天平, 停表, 直流伏特表、安培表, 变阻器(10、2A), 温度计, 电键, 煤油, 水, 教学用低压电源等。

操作

(1) 称出量热器内筒(包括搅拌器)的质量 m_1 。往筒内注入煤油(约占 $3/4$ 筒)。

(2) 按实验 154 方法二图所示连好电路。闭合电键 K, 调节 R, 使量热器中温度升高的速率约每分钟 $1 \sim 2$ 。

(3) 倒出筒内原有煤油, 注入温度比室温稍低的煤油, 称出内筒和煤油的质量, 并计算出煤油的质量 m_2 。

(4) 装好量热器上盖, 使电热丝浸入煤油, 并记下煤油的初温 T_1 。

(5) 接通电源, 记录安培表示数 (I)、伏特表示数 (V) 和加热时间 (t)。当煤油上升到一定温度后, 切断电源, 并记下煤油的末温 T_2 。

(6) 由公式 $W=IVt$ (J) 计算出电功, 由公式 $Q=(c_1m_1+c_2m_2)(T_2-T_1)$ (Cal) 计算出煤油及内筒吸收的热量, c_1 和 c_2 分别是煤油和量热器内筒的比热。则热功当量 $J=Q/W$ 。

注意

(1) 温度计的测温泡距离电热丝要远些。

(2) 在测温过程中, 搅拌器时刻上下搅拌且注意勿将电热丝短路。

(3) 掌握好测温时机。特别是末温 t_2 , 应在断电后继续搅拌, 读出能升到的最高温度。

分析

(1) 主要系统误差:

计算 Q 时未考虑量热器内外交换的热量 Q_1 , 连接电热丝的导体(铜杆)和温度计吸收的热量 Q_2 。为减小 Q_1 可采用“异号法”, 即应使初温 t_1 比环境温度低一些, 而末温 t_2 比环境温度高一些, 尽量使整个实验过程中量热器与环境的热交换前后彼此抵消(这种使整个实验的系统误差分成符号相反的两个部分, 并尽量互相抵消的方法, 叫做异号法)。为减少 Q_2 对总体的影响, 应该使液体的热容量 c_2m_2 比铜杆和温度计的热容量大得多, 但也不可太多, 否则加热时间过长。例如当量热器小筒容积约 200ml 时, 可装入 150g 煤油。

(2) 关于仪器的选择:

(a) 最好用稳恒直流电源, 并能持续输出较强电流。教学用低压电源(J 1201 型)的直流稳压额定电流是 1A(最大可达 1.5A); 铅酸蓄电池组能输出 6V, 1.5A。但应注意: 教学电源和学生电源的直流(不稳压)

输出是正弦形脉动电流，用直流安培表测得的并非有效值。

(b) 若用 0-100 的普通温度计，分度值 1，读数误差约 0.2。若取 $(t_2 - t_1)$ 为 10，则相对误差可达 4%，可见测温误差较大。故所取温升值 $(t_2 - t_1)$ 不宜太小，并最好选用分度值为 0.5 或 0.1 的温度计。

(c) 液体质量 m_2 和内筒质量 m_1 的测量误差对总体影响不大，即使使用托盘天平，相对误差不超过 0.2% (因 m_1 、 m_2 均大于 100g，托盘天平感量为 0.2g)。

方法二

目的 估测热功当量。

器材 长厚纸管 (或玻璃管)，软木塞，塑料杯 (或烧杯)，温度计，米尺，铅丸等。

操作

(1) 将铅丸装入杯内，约为满杯的 2/3。

(2) 将杯子放在桌面上，温度计插入铅丸之中，约 5 分钟后，记下温度计的示数，即铅丸的初温 t_1 ()。

(3) 将纸管的一端塞上软木塞，将铅丸倒入管内，测量将管倒过来时铅丸下落的距离 h (m)。

(4) 将杯子放在纸管未塞木塞的一端，使杯子紧紧地盖在管子上，并使管子竖直。

(5) 使铅丸每次从顶端竖直地落到管底，然后立即再倒置过来，记下倒置管子的次数 n ($n > 100$)。

(6) 作最后一次倒置时，应使杯子位于下方。将管子和杯子等竖直放在桌面上，从杯中取出纸管，注意不要弄散了铅丸。立即将温度计插入铅丸中，记下所达到的最高温度 t_2 ()。

(7) 如果铅丸的质量是 m (kg)，在 n 次下落中，重力做功 $W = n \cdot mgh$ (J)，势能变成内能，使铅丸温度升高 $(t_2 - t_1)$ ，铅丸吸热 $Q = mc(t_2 - t_1)$ (kCal) 则可计算得热功当量

$$J = W/Q = n \cdot mgh / mc(t_2 - t_1) = ngh / c(t_2 - t_1) \text{ (J/kCal)}.$$

式中 c 为铅的比热，单位取 kCal/kg·。

说明 以上实验中，由于铅丸的势能并未完全变成内能，而且内能也不可能全为铅丸所吸收。因此本方法只适宜粗略地估测热功当量的值。

方法一

目的 演示蒸气机的工作原理。

器材 烧瓶，注射器 (大号)，酒精灯，铁架台，玻璃管，橡皮管，夹子等。

操作 如图所示。烧瓶内盛约 1/4 水，瓶塞上插入大号注射器和接有橡皮管的玻璃管。

演示时先把橡皮管夹紧，对烧瓶加热至水沸腾，蒸气把注射器的活塞向上推，当到达一定高度时，松开夹子使蒸气从橡皮管导出，这时活塞落下，再夹紧橡皮管，蒸气又把活塞向上推……。这样重复操作，可观察到活塞的往复运动。显示了蒸气的推动力量和蒸气机的简单工作原理。

注意 为防止蒸气使活塞脱出，应在活塞和外筒之间系一适当长度的细绳，起到限位作用。

方法二

目的 了解汽油机做功的原理。

器材 自制汽缸，感应圈，软木塞，酒精灯，铁架台，导线，汽油等。

汽缸的制作方法

取一根无底试管（用实验室的坏试管，直径在 20mm 以上），在与试管相配的橡皮塞上插入两枚大头针或硬裸导线。两针的间距约 10—20mm，并在塞内露出 10—20mm，就成了火花塞。试管下端用橡皮塞塞紧，试管上端轻轻塞上软木塞。台上，在装置的背面，映一张黑纸，便于观察火花。

操作

（1）先取下玻璃管，将玻璃管的下半部放在酒精灯上烤 1—2 分钟。

（2）塞紧火花塞，然后在汽缸内滴入 1—2 滴汽油，再轻轻塞上软木塞。

（3）起动感应圈，在看到蓝色火花时，同时听到爆鸣声，软木塞可被冲上数米高。

（4）关闭感应圈，再塞上软木塞，不必加汽油和加热试管，可重复演示 2—3 次。

注意

（1）试管上端开口处的软木塞不能塞得太紧。

（2）当环境温度较低时，若不加热试管壁，汽油不易汽化和点燃。

186

蒸汽轮机的工作原理

方法一

目的 演示蒸汽轮机的工作原理。

器材 自制叶轮和支架，烧瓶，橡皮塞，直角玻璃管，铁架台，酒精灯，热水。

叶轮的制作方法

用一扁平软木塞上插入小铝片（也可用火柴盒上的薄木片）装在铁丝支架上制成。

操作

按图所示装置仪器，水沸腾后，水蒸气从喷嘴喷射出来，冲动叶轮转动。

方法二

目的 演示光能（或太阳能）汽轮机的工作原理。

器材 烧瓶（10ml），橡皮塞，带喷口的直角玻璃管，自制叶轮，凹面镜，铁支架，酒精等。

叶轮的制作方法

用厚为 0.3mm 的铝皮，剪成直径为 5cm 的圆片，在圆片边缘剪出叶片，再把叶片扭转 90° 就成为叶轮，见图（a）。

操作

（1）取一块黑布，使其紧贴在烧瓶外壁的底部（或用烟把烧瓶底部熏黑），然后往瓶内注入约 5ml 的酒精。

（2）按图（b）所示将有关器件组装起来。直角玻璃管的喷嘴要小些。太阳光经凹镜（直径为 30cm，焦距为 15cm）会聚后加热酒精，酒精沸腾后，蒸气从喷嘴喷射出来，冲动叶轮急速旋转。

注意

（1）瓶口处的橡皮塞不要塞得太紧，以防止烧瓶内气压过大而引起爆炸。

（2）烧瓶内也可选用氨水作为工质，其优点是氨气冷却后不会液化，效率高。但为了减小氨气的刺激性气味，演示时应将汽轮机置于下风区。

建议 以上汽轮机亦可用白昼幻灯机（投影仪）的光能加以演示。只须把烧瓶等置于白昼幻灯机射出光线的交点处。

187

燃汽轮机的工作原理

目的 演示燃汽轮机的工作原理。

器材 自制叶轮，燃烧室和雾化室，打气球，夹子，塑料管，喷管，感应圈，汽油（或酒精）等。

叶轮的制作方法

将薄铁皮剪成长 1.2cm，宽 0.6cm 的长方形小片共 12 片，按 12 等分嵌在软木轮（直径 3—4cm，厚 0.6—1.0cm）边缘上。将长约 3cm 的自行车钢丝插入轮中心，制成燃气轮机的叶轮（图 a）。用木条固定在底板上制成支架，再用薄铁皮钉在木条上。薄铁皮上钻个比叶轮轴略大的小孔作为轴承，小孔位置略高于集气瓶身（图 b）。

燃烧室的制作方法

将一个集气瓶的软木盖上钻两个孔，紧紧插入两根上端弯成 90° 的玻璃管（内径为 0.3cm），再将两只长约 2cm 的铁钉紧紧插入软木盖，并将一只铁钉底端弯成 90°，制成火花塞。如图（c）中的编号 7。

雾化室的制作方法

将一只集气瓶的软木盖上钻两个孔，紧紧插入两根上端弯成 90° 的玻璃管，如图（c）中的编号 8。

操作

（1）将叶轮，雾化室，燃烧室组装成模型，如图（c）。

（2）将接有电源的感应圈高压端与燃烧室软木盖上的两根铁钉头用

两根导线接好。

(3) 松开夹子，用手不断捏打气球，将空气通入汽油（或酒精）中，使汽油雾化与空气混合后进入燃烧室。

(4) 将夹子夹紧塑料管，防止燃烧时回火。

(5) 合上感应圈开关，使燃烧室内产生电火花，引燃混合气。燃气膨胀后从喷口喷向叶轮，使其转动。

注意

(1) 燃烧室的软木塞要塞紧，喷口要稍大些，防止出气不畅而使瓶爆炸。为了安全，可在燃烧室瓶外包一层金属网。

(2) 演示前，应先将装有火花塞的软木盖取下，用感应圈试一下，看能否产生电火花。不能产生电火花的原因：一是两钉底端距离太大（一般应为 1—2mm），二是软木绝缘不好，可换用橡胶盖。

摩擦起电

188

静电实验中，演示仪器绝缘部分的表面必须保持清洁和干燥。表面有灰尘和水汽会使表面电阻大大降低而导致漏电，使演示无法进行。绝缘材料中以石蜡为最好。

在摩擦起电的实验中，应注意“静电摩擦序列”：毛皮，玻璃（或有机玻璃），丝绸，电木，木材，尼龙，涤纶，金属，硬橡胶，聚丙烯，聚乙烯，石蜡，聚四氟乙烯。在该序列中的任何两种物质相互摩擦时，序列前面的物体带正电，序列后面的物体带负电。而且，两种物体在序列中相隔越远、摩擦起电效果越好。

方法一

器材 毛皮、硬橡胶棒、丝绸、有机玻璃棒、自制金箔验电器、纸屑或泡沫屑。

自制金箔验电器的制作方法

为了观察静电荷的存在，常用验电器来演示实验。但市售金箔验电器，如图（a）、（b）所示。往往效果不佳。自制一个金箔验电器必须注意以下几个关键问题：

(1) 验电器金属棒的支架必须绝缘良好。除了支架必须干燥、清洁外，金属棒离外壳的绝缘距离要尽可能地长一些，可减少实验时出现漏电现象。

(2) 金箔最好做成指针状如图（c）、（d），不要做成人字状；指针材料必须轻；指针转孔和轴间的摩擦应尽量小；指针重心离轴不宜过远，这样演示的灵敏度就高。

自制金箔验电器构造如图（c）所示。它由下列部分组成：1. 金属棒。2. 金属棒上的顶端杯（顶端杯可根据需要取下，换插入金属球、金属圆盘等）。3. 香蕉杆（分别接在金属棒和顶端杯上，起连接金属棒和顶端杯的作用）。4. 金箔指针。5. 固定金属棒的绝缘支架（用有机玻璃或塑料尺做成）。6. 防尘外壳顶盖（其中心有一圆洞），它可取下，以便清洁绝缘支架。7. 外壳（起支撑前后玻璃板和固定绝缘支架的作用）。它由前后玻璃板和白铁皮或罐头壳做成。

其中金属棒为中部开有矩形槽的金属片弯成图(d)的形状,它兼作指针支架用。金箔指针可用香烟锡纸做成图(e)的形状。其轴用两端弯成圆头的一股细铜丝做成,见图(e)。金属棒、顶杯、轴线和指针整个为一导体。

说明

(1) 在安装指针时,要注意指针的重心必须在轴下方一点点,以保证不带电时的指针在重力作用下处于垂直的平衡位置。如指针的重心在轴上,会发生随遇平衡。指针如做成人字形时,电荷的作用力要克服较大的重力,故效果不明显。

(2) 验电器不一定要自制,把市售的验电器改装一下也会收到良好的效果。只要按下述两点关键要求改装即成: 将固定金属棒的软木塞去掉,改用有机玻璃或塑料尺,同时要把它的位置下移,以增长金属棒和外壳间的绝缘距离; 指针及其支架也要改成图(d)、(e)的结构。改装后整体如图(f)所示。

操作

(1) 先将毛皮、硬橡胶棒、丝绸、有机玻璃棒等用红外线灯烘烤 10 分钟左右。注意不要烘烤太久,以免使硬橡胶棒及有机玻璃棒变形。

(2) 用丝绸摩擦有机玻璃棒,有机玻璃棒带正电。将摩擦后的有机玻璃棒接近纸屑,能吸引纸屑,说明有机玻璃棒已带电。

(3) 将摩擦后的有机玻璃棒逐渐接近(但不接触)验电器的顶端,验电器的金箔张开。拿去有机玻璃棒,金箔又复合。这也表明摩擦后的有机玻璃棒已带电。

(4) 用毛皮摩擦硬橡胶棒,硬橡胶棒带负电。重复操作(2)、(3)。表明摩擦后的硬橡胶棒已带电。

(5) 把用毛皮摩擦过的硬橡胶棒与验电器顶端相接触,使验电器带电。验电器金箔会张开一定角度。再把用丝绸摩擦过的有机玻璃棒移近验电器顶部,验电器金箔的张角减小。这表明有机玻璃所带电荷与验电器所带电荷的电性相反。

方法二

器材 聚四氟乙烯板,金属电容器圆板,氖泡,绸布等。

操作

(1) 用丝绸摩擦聚四氟乙烯板,使它带负电。再将金属电容器圆板放在聚四氟乙烯板上,由于静电感应,使圆板下端面带正电,上端面带负电。用手捏住氖泡的一端,将另一端接触金属板上端面。可以看到氖泡接触金属板的一端发光,说明金属板电容器圆板上端面带负电。

(2) 用手接触金属板的上表面,使它带正电。然后将金属板拿起并远离聚四氟乙烯板。用手捏住氖泡的一端,另一端去接触金属板的上表面。此时,氖泡靠近手的一端发光。说明金属板此时带正电如图所示。

说明

(1) 聚四氟乙烯俗称塑料王,其绝缘性能好,易于摩擦起电,而且起电后电荷保持时间长,在一般时间内可以连续取用。

(2) 氖泡中的氖气受电场力作用发生电离,正离子向电位低的一端靠近,在与电子中和时发光。所以,氖泡发光的一端是低电位。

方法三

目的

- (1) 验证摩擦起电。
- (2) 验证同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。

器材 自制塑料纤维丝，验电器，丝绸等。

塑料纤维丝的制作方法

取一段长约 40cm 的包扎用的塑料绳，在其一端打一个结，然后在没有打结的一端，细心地撕成丝。做成一束塑料纤维丝。

(1) 一手捏住纤维丝的绳结处，另一手连续地向下摩擦纤维丝束(图 a)。可见纤维丝间由于带同种电荷相斥，且向四周散开(图 b)。

(2) 用一块丝绸包住纤维丝束，重复操作(1)。这时，不仅可以看到原来下垂的纤维丝成四散状，而且用这块被摩擦的丝绸去靠近纤维丝，还可以观察到丝绸跟纤维丝间互相吸引。

(3) 将摩擦后的纤维丝去靠近验电器，可观察到验电器的金属箔明显张开。

注意

丝绸与纤维丝应保持清洁和干燥。天气潮湿时，可用红外线灯烘烤一下，以改善演示效果。

方法四

器材 有机玻璃棒或有机玻璃尺，丝绸，干燥拖把，靠背椅等。

操作

(1) 取靠背椅一只，在椅背上水平放置一干燥拖把，调节使其平衡。

(2) 取一有机玻璃棒，用丝绸摩擦后，靠近拖把柄的一端，拖把会向棒靠拢而转动起来。

(3) 把带电有机玻璃棒放在拖把柄的另一侧，发现拖把将反向转动。

注意

拖把与椅背接触处要光滑。拖把一定要干燥。

方法五

器材 小气球

操作 把气球吹足气，用细线扎牢气球口，用手按住气球，反复旋转摩擦若干圈。可见气球与手间互相吸引。

注意 气球与手都要清洁和干燥。若用玻璃纸代替气球，演示方法相同。

方法一

目的 说明摩擦起电的两物体分别带有等量异种电荷。

器材 自制摩擦起电板，金箔验电器，金属圆筒，酒精灯等。

摩擦起电板的制作方法

两块摩擦起电板分别用有机玻璃和聚丙烯塑料制成，并粘上适当长度的有机玻璃手柄。起电板大小视金属圆筒大小而定，要求两板能同时放入筒内，并且互相之间都不接触（图 a）。

操作

（1）将空心金属圆筒装在金箔验电器上。

（2）将两起电板用布擦干净，再在酒精灯火焰的上方略微烘烤一下，以消除起电板上残存的电荷和潮气。将任一块板放入空心金属筒内，金箔均不张开，说明两板都不带电。

（3）将两板相互用力摩擦几下，并迅速分离。再将任一板放入空心金属筒内，但不要和筒壁相接触，验电器金属箔张开一定角度（图 b）。板抽出后，箔片就闭合。这说明两板均带有电荷。

（4）将摩擦过的两板平行但互不接触地放入空心金属筒内，也不与金属筒壁相接触，这时金箔不张开（图 c）。若抽出任一块板，则金箔张开，且张角一样。这说明两板带有的是等量异种电荷。

说明 根据前一个实验按语中说明的摩擦起电序列，可选用各种不同的材料制作起电板。

方法二

器材 自制摩擦起电板 1 套，金箔验电器，金属圆盘，酒精灯，塑料薄膜若干。

摩擦起电板制作方法：见方法一。

操作

（1）将金属圆盘装在金箔验电器上，在金属圆盘上覆盖一层塑料薄膜，以防实验中起电板与金属圆盘相接触（图 a）。

（2）在清除起电板上残存的电荷和潮气后（见方法一），使起电板摩擦起电。将任一板贴放在金属圆盘的塑料薄膜上，可见验电器均张开一定角度，说明起电板带电。

（3）将两板同时贴放在金属圆盘的塑料薄膜上（图 b），可见验电器金箔不张开。若抽去任一块板，金箔都会张开大小相同的角度。这说明两板带有等量的异种电荷。

方法一

目的 显示同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引的现象。

器材 竹针（打毛线针），自制泡沫塑料小球 2 只，丝绸，玻璃棒，毛皮，橡胶棒，丝线等。

操作

（1）将泡沫塑料小球固定在竹针两端，再将丝线一端和竹针中点连接，丝线的另一端悬挂起来。

（2）用丝绸摩擦过的玻璃棒接触泡沫小球，使小球带上正电荷。

（3）用丝绸摩擦过的玻璃棒缓缓靠近泡沫小球，可以见到同种电荷相互排斥的现象。

(4) 用毛皮摩擦过的橡胶棒缓缓靠近泡沫小球，可以看到异种电荷互相吸引的现象。

方法二

目的 显示电荷间的相互作用。

器材 自制绝缘纸筒 2 个，丝线，丝绸，玻璃棒，铁架台等。

绝缘纸筒的制作方法

用电容器中的绝缘纸制成长约 10cm 左右的圆筒。

操作

(1) 用丝线将两个绝缘纸筒悬挂在铁架台上。用丝绸摩擦过的玻璃棒分别与两绝缘纸筒接触，可见两纸筒互相分开（如图）。

(2) 将丝绸摩擦过的玻璃棒放在两纸筒中间，可见两纸筒之间张角变大。

(3) 将毛皮摩擦过的橡胶棒放在两纸筒中间，可见两纸筒之间张角减小。

注意 绝缘纸筒要做得尽量轻一些。

方法三

目的 验证同种电荷相斥，异种电荷相吸的规律。

器材 静电感应起电机，面积为 $12 \times 15\text{cm}^2$ 厚 0.5mm 的金属板 2 块，外层包有锡纸的乒乓球，丝线，铁架台，导线若干。

操作

(1) 把两块金属薄板平行地竖直插入泡沫塑料底座上，两板间相距约 10cm（如图）。

(2) 包有锡纸的乒乓球通过绝缘细线悬挂在支架上，并放在两板之间。

(3) 两金属板接上静电感应起电机，摇动起电机，乒乓球就会在两板之间来回摆动。

(4) 控制起电机的转动速度，改变两板间电压，小球摆动频率也会随之发生变化。

(5) 断开电源后，由于极板和乒乓球带电量不断减少，相互作用力不断减弱，小球摆动频率逐渐减小，最后停下。

方法四

目的 显示电荷之间的相互作用。

器材 静电感应起电机，有绝缘手柄的平行金属板，支架，导线，锡纸，照明灯，涤纶薄膜等。

操作

(1) 将两块有绝缘手柄的平行金属板水平地固定在支架上（如图）。

(2) 在下板上放一些剪碎的锡纸屑（锡纸可采用彩色的，以增强实验效果），在两金属板间围上一圈透明涤纶薄膜，以防锡纸屑飞落它处。

(3) 两金属板上接上静电感应起电机，并用灯光照明。

(4) 摇动起电机，能明显地看到带电锡片上下不断地跳动飞舞。可说明带电锡片在电场作用下，不断地运动。

方法一

器材 自制电摆 3 个，球形导体，玻璃棒，丝绸，铁架台，有机玻璃棒，丝线等。

电摆的制作方法

用聚苯乙烯发泡材料（或其他轻质材料）制成小球，在小球上涂上石墨导电层，用丝线悬挂在有机玻璃棒上。

操作

（1）用摩擦起电的方法使球形导体和 3 个电摆带上等量同种电荷。然后将球形导体 A 逐渐靠近电摆（如图）。可见，电的摆线与竖直方向的偏角大小不同。这说明电荷间的相互作用力大小是随距离的增加而减小的。

（2）球形导体 A 位置不变，使其电量逐渐增大。从电摆角度的增大可以说明电量越大，电荷间的作用力越大。

方法二

器材 玻棒、丝绸（橡胶棒、毛皮），灯草球 3—4 只（或用发泡聚苯乙烯即电视，机等用的包装材料，自制小球），悬挂支架，自制测高标记（用铁夹贴上长度适当的硬纸质箭头标记即可）。

操作

（1）将两个悬挂支架尽量靠近，并使两个灯草球带上等量同种电荷。使测高标箭头与小球等高（见图 a）。

（2）增大悬挂支架距离，使分离后两球实际距离大于原来距离，观察到小球位置低于原测高箭头。说明作用力随距离增大而减小（见图 b）。

（3）使两个灯草球带等量同种电荷，用测高标记记下小球高度（见图 c）。

（4）用不带电的灯草球分别接触带电小球，再移动支架，使两球距离与原来大致相等。观察到小球位置低于原高度（见图 d）。说明电荷间相互作用力随电量减少而减小。

说明

（1）若两悬线长度相同，两灯草球质量相同，那么即使两球带不等量电荷，实验也能成功。

（2）减少灯草球电量时，最好用相同灯草球，能说明电量减半。

方法三

器材 气垫导轨，小型气源，大小金属球各两个，橡胶棒和毛皮，玻璃棒和绸布，感应起电机，导线等。

操作

（1）将蜡烛两端去掉一段灯芯，用作绝缘支柱。将较大的一个金属球固定在滑块上。

（2）使金属球带上正电，用带正电的玻璃棒靠近金属球，金属球被推开。

（3）使金属球带上正电，用带负电的橡胶棒靠近金属球，金属球被

吸引(图 a)。

(4) 将较小的两个相同的绝缘金属球 A、B 与起电机带正电的放电球相连,使三个金属球 A、B、C 均带上正电。此时 A、B 两球带电量相等。可见 C 球停在 A、B 两球的中央(图 b)。

(5) 将 A 球靠近 C 球,可见 C 球向右移动。说明电荷之间的距离减小时,作用力增大。

(6) 将 A 球换一个较大的绝缘金属球, A、B 两球自然与起电机带正电的放电球相连。此时, A 球所带电量大于 B 球,可见 C 球的平衡位置偏向 B 球。说明电量越大,电荷之间的作用力越大。

验证库仑定律 192

本实验提供了两种验证库仑定律的方法。方法一仅验证两电荷的库仑与它们之间距离的关系;方法二综合地验证了库仑定律。两种方法都是用测量电摆偏离平衡位置的位移来比较库仑力的大小。做好实验的关键是带电球的绝缘性能要好,保持整个实验过程中基本不漏电。

方法一

目的 验证电荷间相互作用力的大小与它们之间的距离平方或反比。

原理 力的矢量三角形与长度的三角形是相似三角形,对应边成比例(图 a)。

$$\frac{F}{mg} = \frac{d}{l} \text{ 或 } F = \frac{mgd}{l}$$

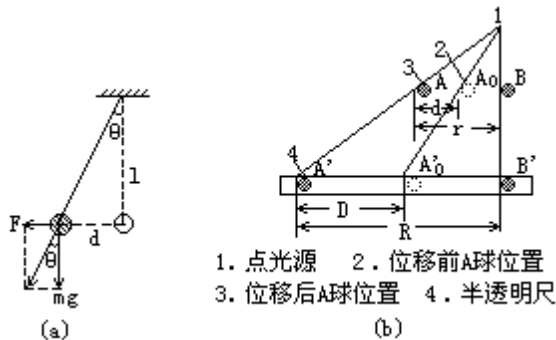
在实验全过程中,物重 mg 和绳长 l 保持不变。

设 $k = \frac{mg}{l}$,

则 $F = kd$ 。

这个式子表明静电力和位移 d 成正比。因为通过投影放大有 $D = d$,所以 $F = k'D$ 。如图(b),图中 A_0 为 A 球不带电时的位置,如能在实验

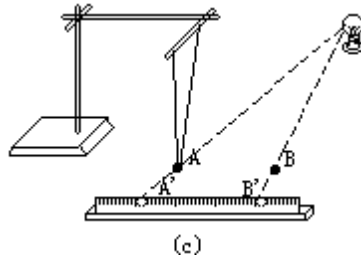
中证得 $D \propto \frac{1}{R^2}$,就可得到 $F \propto \frac{1}{R^2}$ 的结论。



器材 铁架台,小灯泡,低压电源,木杆,泡塑小球(表面涂导电层)2个,半透明刻度尺,橡胶棒,毛皮等。

操作

(1) 按图 (c) 把仪器装配好。在刻度尺上读出 A 球投影的位置 A'_0 。



(2) 充分磨擦橡胶棒，使泡塑小球 A、B 带上尽可能多的电荷。

(3) 把 B 球逐步靠近 A 球，在刻度尺上分别读出 A、B 两球投影 A' 、 B' 的位置。

(4) 记录数据求出对应的 D (A'_0A') 和 R ($A'B'$) 的值，见图

(b)。作 $D - \frac{1}{R^2}$ 图线。若图线为过原点的一条直线，就说明 $D \propto \frac{1}{R^2}$ ，

亦即证明了静电力 F 与两电荷间距离 r 的平方成反比。

说明

(1) 在对球的投影位置进行读数时，我们可统一用影的同一侧边来读数，这样测出的距离，就是影子中心间距。

(2) 给泡塑小球涂导电层的方法是：用酒精将球擦干净；在酒精里溶化一些松香，掺入一些石墨粉或铝粉，再涂在小球上。在小球表面涂上墨汁，使导电性能更好。

方法二

目的 验证库仑力的幂次变化规律。

原理 两相同的小球悬挂在长度相等的细线上，并带有等量同种电荷 Q ，两球在相距 r_1 时达到平衡状态（如图）。如设法测得此间距 r_1 。使其中一个球失去电荷，然后两球再接触，每个球的带电量为 $Q/2$ 。在达到新的平衡后，测出此时两球间距 r_2 。若设 F_1, F_2 为先后两次平衡中的库仑力，

$$\text{则有} \quad F_1 = K \frac{Q^2}{r_1^2}$$

$$F_2 = K \frac{(Q/2)^2}{r_2^2}$$

$$\text{同时有} \quad F_1 = W \operatorname{tga}_1$$

$$F_2 = W \operatorname{tga}_2$$

由此可得

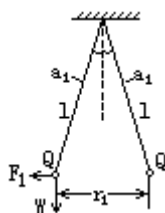
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\operatorname{tga}_1}{\operatorname{tga}_2} = 4 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2。$$

因为 $l \gg \frac{r}{2}$ ，所以有

$$\operatorname{tga}_1 \approx \sin a_1 \approx \frac{r_1/2}{l} \quad \text{及} \quad \operatorname{tga}_2 \approx \sin a_2 \approx \frac{r_2/2}{l}$$

$$\text{即} \quad \frac{r_1/2l}{r_2/2l} = 4 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2。$$

$$\text{整理得} \quad \frac{r_1}{r_2} = 4^{\frac{1}{3}} \approx 1.59。$$



若实验中测得的带电小球间距之比符合上述比值，即验证了库仑定律。

器材 外层涂有导电层的泡塑小球[制作方法见“方法一”中说明(2)]，尼龙线，感应起电机，手电筒，白纸，刻度尺等。

操作

(1) 将有机玻璃棒固定在铁架台上，在有机玻璃棒上同一悬点处，用长两根约 1.5m 的细尼龙线分别悬挂 2 个导电小球。在悬点附近固定一手电筒，光束照射在地板上的白纸上，使小球在白纸上清晰的投影。

(2) 用起电机给两小球带上尽可能多的电荷，并使两小球接触，以确保两小球电量相等。

(3) 待两个小球静止时，在白纸上标出两小球投影的边缘的位置，测量出小球间距 r_1 。

(4) 用手接触其中一个小球，使其放电，并再次使两小球相接触，使两小球带电量减半。再测出两小球间距 r_2 。计算出一组 r_1/r_2 的值。

(5) 重复操作(2)、(3)、(4)，得到多组 r_1/r_2 的值。求出 r_1/r_2 的平均值，与理论值 1.59 比较，求出相对误差。

绝缘体变导体 193

普通材料可按电阻率大小分为绝缘体、不良导体和良导体。绝缘体的电阻比良导体的电阻约大 10^{25} 倍。材料的电阻率还会随温度和电势梯度的增加而减小。下图为普通材料的电阻率谱。

	石蜡	瓷器	玻璃	云母	赛璐珞	硼	氧化铜	硒	硅	水银	镍	铜	银
电阻率 $\Omega \cdot m$	10^{16}	10^{13}	10^{10}		10^7		10^4	10	10^{-2}	10^{-5}			
	绝缘体				半导体				导体				

方法一

目的 了解绝缘体和导体之间没有绝对的界限。在某种条件下，它们可以相互转化。

原理 在通常状态下，气体分子是中性的。当外界条件改变时，例如用火焰加热或用紫外线等射线照射时，气体分子中的电子可挣脱分子的束缚，成为自由电子。这时绝缘体空气变成了导体。

器材 感应圈，酒精灯等。

操作

(1) 将感应圈上两根尖形放电杆间距调节在 5cm 左右。开启感应圈，此时无放电现象，说明空气不导电。

(2) 升高感应圈的输入电压，直到明显看到两尖形放电杆间有放电现象。说明在高压下，空气亦能导电。

(3) 再降低感应圈的输入电压,使两尖形放电杆间刚好不放电。然后,把点燃的酒精灯放在两尖形放电杆下方。可见这时又产生了放电现象。这说明加热可以使局部的空气变成导电区域。

方法二

目的 演示玻璃在高温下变成导体。

器材 废灯泡内的玻璃支杆(制取时应确保导线引出线完好),电流表(10—30mA),发光两极管,导线若干,蓄电池等。

操作

(1) 将蓄电池、玻璃支杆的两导线、电流表、发光两极管(注意正负极不能接错)组成一个串联电路。由于玻璃是绝缘体,可以观察到电流表上无读数,发光两极管不发光。说明玻璃在常温下是绝缘体。

(2) 用酒精灯对玻璃杆加热,随着玻璃杆温度的升高,电流表上开始有了读数,发光两极管也发光。说明烧红的玻璃已变成了导体。若停止加热,温度下降,玻璃又会变成绝缘体。

注意 若要缩短演示的时间,可用喷灯对玻璃杆加热。但应注意防止玻璃烧熔。

方法三

器材 金属板($10 \times 10\text{cm}^2$)一对,演示用大型电表,直流高压电源,酒精灯,支架,导线等。

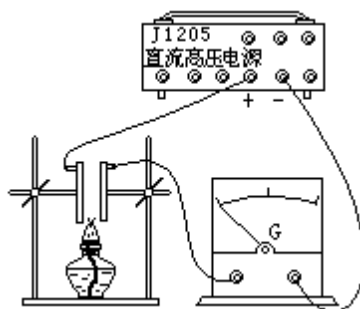
操作

(1) 按图所示将仪器接好,两板相距2cm左右。电表调至灵敏电流计档。高压电源输出选择放在300V档。

(2) 打开直流高压电源开关,电表指针不动。说明加以300V高压的两板间的空气仍不导电。

(3) 把点燃的酒精灯移至两金属板间来回晃动,使金属板间空气充分受热。这时可见电表指针发生偏转。说明空气由绝缘特性变为导电特性。

(4) 移去酒精灯,可见电表读数恢复为零。说明降温后,空气的导电性又变成了绝缘性。



电力线图 194

在电力线图的演示中,首先必须十分注意仪器的清洁与绝缘良好,注意仪器与环境的干燥。在用导线连接起电机与电极时,应注意减小由于导线的电场影响以及电极附近的电力

线分布。其次，由于蓖麻油的粘滞系数随温度的降低而增大，会使头发屑在蓖麻油中运动发生困难以至影响演示效果，所以应设法提高蓖麻油的温度。在环境温度较低时，用石蜡油替代蓖麻油，效果很好。

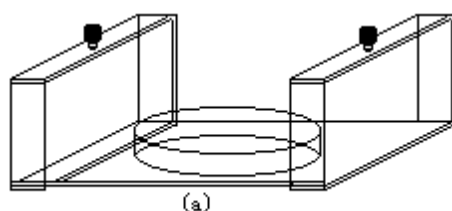
方法一

目的 显示几种典型电场的电力线形状。

器材 感应起电机，自制电力演示盘，自制电极一套，蓖麻油，木屑等。

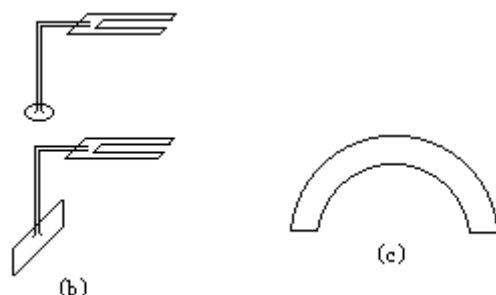
电力线演示盘的制作方法

用3—5mm厚的透明有机玻璃制成一杠架，中间能放置一个培养皿，两边架子上有两个接线柱能固定电极（图a）。



电极的制作方法

如图(b)所示，下部电极由铜箔制成，L形连杆由自行车辐条制成，上部叉形片由薄铁片制成，可用以调节电极在演示盘中的位置。除了图(b)所示的线电荷电极和平板电极各两个外，再制作一个圆柱状电极（直径与培养皿内径相同）和一个凹形柱状电极[俯视图如图(c)所示]，外径小于培养皿直径。



刮油板的制作方法：如图(d)所示，材料不限。

操作

(1) 线电荷电力线

电力线演示盘放在投影器上，培养皿内倒入蓖麻油和适量干燥木屑。

将一个线电荷电极放在培养皿中央，圆圈电极放在培养皿四周，分别接通起电机的两个电极。

缓慢地加速转动起电机，即可看到木屑沿电力线方向排列起来。（如起电过份强烈，会引起蓖麻油翻滚，木屑迁移，效果不好。）

(2) 匀强电场电力线

换用两个平板电极，两板之间距离约为板长的1/4-1/3。两板分别接通起电机的两个电极。

缓慢地加速转动起电机，即可看到匀强电场的电力线。

(3) 两等量线电荷的电力线

换用两个线电荷电极，间隔距离约等于培养皿的半径，分别与起电机的两个电极接通。

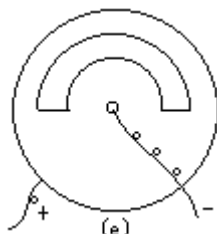
缓慢地加速转动起电机，即可看到等量异号导线电荷的电力线。

将两个线电荷电极接到起电机的一个电极上（如正极），放置圆柱电极并将它接到起电机的另一个电极上（如负极）。

缓慢地加速转动起电机，即可看到等量同号线电荷的电力线。

(4) 静电屏蔽

将一个线电荷电极、圆柱电极和凹形柱形电极按图(e)位置放置，圆柱电极和线电荷电极各和一个起电机的电极接通。



缓慢地加速转动起电机，可看到与操作(1)相类似的电力线，但凹形柱状电极内无电力线，这就是静电屏蔽。

注意 每次形成一种新的电力线之前，都要用刮油板将原来的电力线搅乱。

方法二

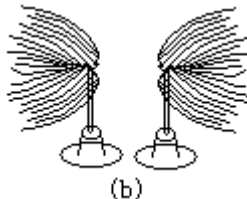
器材 验电羽，平行板电容器，感应起电机，导线等。

操作

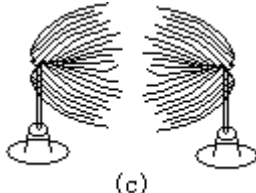
(1) 用导线将验电羽的金属杆与起电机的一个放电球相连。转动起电机，使验电羽带电，可见验电羽上的丝线向空中展开，如图(a)。



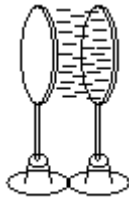
(2) 用导线将两个验电羽同时与起电机的一个放电球相连。摇动起电机，使两个验电羽带电，将两个验电羽逐渐靠拢，可见两验电羽上的丝线在空中展开，如图(b)。



(3) 用导线将两个验电羽分别与起电机的两个放电球相连。摇动起电机，使两个验电羽带上异种电荷。将两验电羽靠拢，可见两验电羽上的丝线在空中展开，如图(c)。



(4) 在平行板电容器的一个板面上粘上细纸条。用导线将两金属板跟起电机的两个放电球分别相连。摇动起电机，将两板逐渐靠拢，可见两板间细纸条展开如图(d)所示。表明两极板间形成一个匀强电场。



(d)

注意 实验时验电羽跟桌面间最好垫上有机玻璃板或硬泡塑包装材料板，以提高绝缘性。在实验中，应连续转动电机，以防止因缓慢放电而影响演示效果。

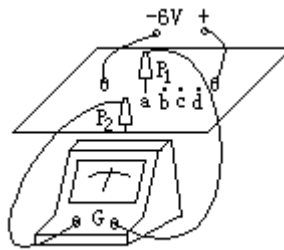
方法二

原理 常用的磁电式仪表通有电流，指针才会偏转，而静电场中段有移动的电荷即电流，故用磁电式仪表测量静电场有许多困难。以下两种方法，都是用电流场模拟静电场。从电磁学理论知道，这两种场所遵循的规律都是相同的。而电流场是可以用电磁式仪表测量的。

器材 学生电源，相同的圆柱形电极 2 个，导电纸，灵敏电流计，探针 2 根，导线若干，白纸，复写纸等。

操作

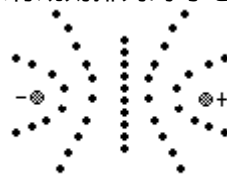
(1) 依次叠放白纸，复写纸和导电纸，在导电纸上放置 2 个相同的圆柱形电极，如图 (a)。



(a)

(2) 将 2 个探针与灵敏电流计相连。在两个电极的连线上取若干个等分点 a、b、c、d……。手握一个探针 P_1 置于 a 点，另一手握探针 P_2 在导电纸上轻轻地移动，发现灵敏电流计指针偏角有变化。当 P_2 移到某个位置时，电流计指零，说明 P_1 和 P_2 所指的点电位相等，此时将探针 P_2 用力向下按一下，使白纸上留下一个点迹。

(3) 重复上述操作，找出 8—10 个等势点。再改变探针 P_1 的位置，分别找出对应于 b、c、d……各点的等势点。可以得到一张有规则排列的等电势点的点迹图，如图 (b)。



(b)

(4) 将各组对应的点迹连起来，就得到一组等势线。利用电力线与等势线正交的关系，可以描绘出电力线。

注意

(1) 两个电极只有在无限大的导电纸上形成的电流场与两个异性线电荷形成的静电场才是相同的，因此本实验中取的点不能太靠近导电纸边缘，以减小边缘效应的影响。（在接近导电纸边缘的地方，等势线是垂直于导电纸边缘的，所以使等势线发生畸变。）

(2) 电极与导电纸应保持非常好的接触, 所以除了电极紧压导电纸外, 在直接接触处注入 5—10% 的盐水, 会改善实验的准确性, 以减小系统误差。

方法四

器材 J2459 学生示波器, 相同的圆柱形电极 2 个, 导电玻璃板, 探针 2 根, 白纸, 复写纸, 导线若干, 毫米方格纸等。

操作

(1) 在 2 张毫米方格纸的中间部位各作一条直线, 在直线上标上两电极位置 (+)、(-)。并在两电极的连线上取若干个等分点 a、b、c……。将其中一张毫米方格纸用胶水纸粘贴在电玻璃板的背面。

(2) 在导电玻璃板上 (正面) 固定两个相同的圆柱形电极, 并保持接触良好, 如图。

(3) 开启示波器, 调节旋钮使亮点在座标刻度盘的正中 (注意调节辉度, 使亮点不太亮, 以钢烧坏荧光屏)。

(4) 两探针 P_1 、 P_2 分别跟示波器 “Y 输入” 和 “接地” 端相连。手握 P_1 置于 a 点, 另一手握探针 P_2 在导电玻璃板上轻轻地移动, 当 P_1 、 P_2 不在同一等势线上时, 光点将向上或向下偏移。只有在同一等势线上时, 光点才停留在荧光屏的中心不动。找到平衡点后, 在另一张毫米方格纸上的相应位置记下这一点的位置。

(5) 同方法三的操作 (3)。

(6) 在第二张毫米方格纸上, 把各组对应的点连起来, 就得到一组等势线。利用电力线与等势线正交的关系, 可以描绘出电场电力线图。

注意

(1) 同方法三的注意事项 (1)。

导电玻璃板是一面涂有均匀导电层的玻璃板, 其作用与导电纸相仿, 但较导电纸耐用, 可多次反复使用而不损坏。

(2) 为了提高实验的精密度, 示波器 y 轴的衰减量应取得最小, 并且零点随时检查是否有漂移, 选用的示波器可以测量带有直流成分的电压信号。不能用不能测量直流信号的示波器。

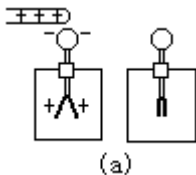
静电感应 195

方法一

器材 金箔验电器, 橡胶棒, 玻璃棒, 毛皮, 丝绸等。

操作

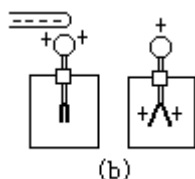
(1) 用毛皮磨擦过的带负电的橡胶棒, 慢慢靠近验电器上端金属球时, 可见验电器箔片张开角度逐渐变大, 如图 (a)。移开带电橡胶棒时, 可见箔片闭合。



(2) 用丝绸磨擦过的玻璃棒重复上列操作, 可见与上面相同的现象。但验电器上箔片

上的电荷极性与上面的相反。

(3) 将带负电的橡胶棒放在验电器小球附近，用手指跟验电器金属小球接触一下。如图(b)所示。验电器上部分负电荷经手到地，而正电荷受到橡胶棒负电荷束缚，集中在小球端，看到箔片下垂合拢。



(4) 先移开手指，再移开橡胶棒，验电器上的箔片又张开。表明正电荷仍留在验电器上。

(5) 验电器带上正电后，当用带正电的玻璃棒慢慢地靠近金属圆球时，箔片张开的角度将增大。当用带负电的橡胶棒慢慢地靠近金属小球时，箔片张开的角度逐渐减小，以迄达到闭合。当带电棒再靠近小球时，箔片将会再张开。我们常用这种静电感应的方法，来检验验电器带电的电性。

注意 棒上带电不宜过多，棒离小球也勿太近，以免球与棒间火花放电，影响演示效果或损坏验电器箔片。

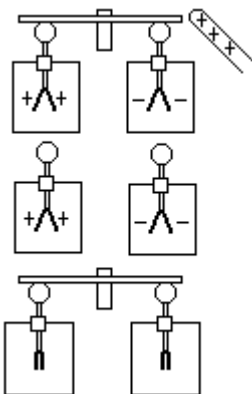
方法二

目的 说明感应起电中，产生的正负电荷是等量的。

器材 完全相同的箔片验电器 2 个，验电器连接杆，有机玻璃棒，丝绸或塑料薄膜等。

操作

(1) 把完全相同的 2 个验电器并排放置，用验电器连接杆把两个验电器连接起来。



(2) 将带电的有机玻璃棒靠近连接杆的一端，两只验电器的箔片均张开，说明发生了静电感应现象。

(3) 在两只验电器箔片均张开的情况下，手持验电器连接杆的绝缘手柄，移走连接杆，再将有机玻璃棒移走。这时两验电器的箔片仍然保持张开状态。这说明两个验电器均带了电。

(4) 用起电棒来检验两个验电器上所带电荷的种类。可以发现，原来靠近有机玻璃起电棒的那个验电器，所带电荷是负电荷。而原来远离有机玻璃起电棒的那个验电器，所带电荷为正电荷。

(5) 再用连接杆把两个验电器相连，由于电荷中和，两个验电器的箔片又都闭合。这说明在静电感应中，两个验电器带的是等量异种电荷。

方法三

器材 枕形布电器，有机玻璃棒（或玻璃棒），丝绸，验电器等。

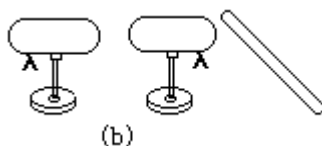
操作

(1) 将枕形布电器的两半合在一起，用丝绸磨擦过的有机玻璃棒靠近其一端，如图(a)所示。观察带电玻璃棒靠近的过程中，布电器下方的金属箔由闭合逐渐张开。说明枕形布电器两端都带了电，这就是静电感应现象。



(2) 将带电的有机玻璃棒移向远处，金属箔又由张开逐渐闭合。说明带电体移走以后，感应产生的等量异种电荷又中和了。

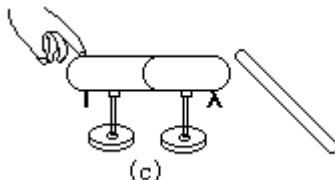
(3) 将带电玻璃棒再次靠近，金属箔重新张开。手持支架，将枕形布电器远端的那一半移开，再移走带电棒。此时金属箔就不再闭合了。这种用静电感应方法让物体带电的过程，就叫做感应起电，如图(b)。



(4) 将远端的布电器接触验电器，验电器的金箔（或指针）张开。用带电的有机玻璃棒接近时，金箔张角增大。说明远端带的电荷与带电体带的电属于同种电荷。

(5) 用同样的方法可以证明，近端带的电荷与带电体带的电荷属异种电荷。

(6) 将枕形布电器的两半重新合在一起，用带正电的玻璃棒靠近其一端。两端的金属箔均已张开。用手指接触远端，可看到远端的金属箔闭合，而近端的金属箔依然张开，如图(c)所示。说明远端的同种电荷已经通过人体进入大地。



(7) 手指离开枕形布电器后再将带电体移走，近端的金属箔张再减小，远端的金属箔微微张开。说明近端所带的异种电荷又重新分布在布电器上。这是感应起电又一种常用的起电形式。

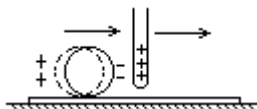
方法四

器材 自制薄铝圆环，有机玻璃棒，丝绸或塑料薄膜等。

操作

(1) 用丝绸或塑料薄膜磨擦有机玻璃棒，使棒带上正电荷。

(2) 将薄铝圆环立在绝缘板面上，将带正电荷的有机玻璃棒的一端，靠近铝环一侧时（如图），由于静电感应，在铝环上靠近棒的一侧会产生与棒相反的电荷。由于异种电荷相互吸引，环会向棒的方向滚动。



(3) 不断移动有机玻璃棒,使环与棒相近而不相碰,导引圆环不断滚动。

(4) 用毛皮磨擦过的橡胶棒带负电,可以达到相同的效果。

方法五

器材 旧唱片,金属圆盘,塑料棒,蜡烛,毛织物,8W日光灯管,彩色纸片等。

操作

(1) 如图(a)所示,用蜡(或快干胶)把塑料棒1和金属圆盘粘合在一起,作为起电盘,3为废唱片,作为起电底盘。

(2) 把唱片放在平面上(例泡沫塑料上),用毛织物磨擦唱片表面,然后将金属起电盘放在唱片上。并在起电盘上撒些彩色小纸片后用手指去触及一下起电盘,如图(b)。

(3) 当手持塑料柄将起电盘从唱片上拿开时,会发现彩色小纸片会很快的飞离起电盘。这是因为,起电盘由于静电感应而带电后,小纸片从起电盘上也获得了电荷,由于同种电荷相斥使小纸片飞离圆盘。

(4) 如图(c)所示,用一只手触及日光灯管的一个管帽,把带电的起电盘靠近日光灯的另一管帽,就会引起电火花并使灯管发出短暂的光闪(最好在暗室内观察)。

注意 金属起电盘应选未涂油漆的,且边缘必须光滑平整,没有尖的凸起,否则容易发生尖端放电使电荷漏去。

说明 由于金属起电盘上电荷是通过静电感应获得的,故它与唱片靠得越近,感应作用越大。由于唱片上有很多细螺纹,并非平面。这样即使金属起电盘直接放在唱片上。二者之间也仅有几个较高点相接触。因此,带负电的唱片不会将大量负电荷转移给起电盘,而只是通过感应使它带正电。

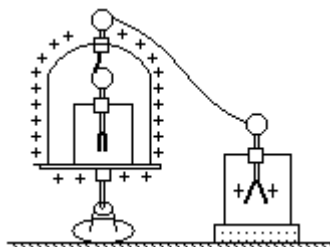
静电平衡时净电荷分布在导体的外表面 196

方法一

器材 金属网罩1套,箔片验电器2个,感应起电机,导线等。

操作

(1) 在绝缘台上放一个箔片验电器,套上金属网罩(如图)。使网罩内的金属链与验电器上金属小球相接触。在另一个绝缘底座上也放一个箔片验电器。用导线将网罩与验电器相连接。



(2) 用起电机使网罩带电,可见网罩外的验电器中箔片张角很大,而网罩内的验电器中箔片仍然闭合。

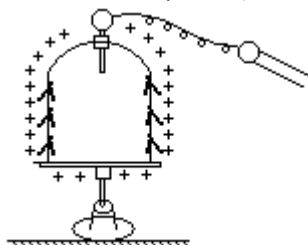
(3) 移动导线与网罩的接点位置,重复上列操作,结果相同。证明了导体(金属网罩)在静电平衡时,电荷只分布在导体的外表面。

方法二

器材 金属网罩 1 套，感应起电机，薄纸条若干，导线等。

操作

(1) 将轻质纸条均匀地粘贴在金属网罩内外壁上。把金属网罩放在绝缘金属台上。用导线把金属网罩与感应起电机的一个放电球相连，如图。



(2) 摇动起电机，使金属网罩带电。同时可见粘在金属网罩外壁的纸条都张开，而罩内纸条仍然下垂。表明金属网罩的电荷只分布在外表面上。

注意 如纸条太干燥不易带电张开效果不佳，应将纸条稍微闷潮使用。

方法三

器材 柔软的细铜丝网（长约 30cm，宽约 15cm，用多个支架支撑直立），感应起电机等。

操作

(1) 在细铜丝网两面贴上两种颜色的小纸条（约 0.8cm 宽，4cm 长）。

(2) 将细铜丝网围成各种形状的曲面，如“”“~”形状。将感应起电机一极与其相连，转动起电机使细铜丝网带电。这时，在内表面上的纸条不张开，外表面上的纸条张开，说明电荷只能分布在导体的外表面，导体内部不带电，见本实验方法一图示。

注意 改变细铜丝网的形状，多做几次实验使两种颜色的纸条都有张开的时候，避免学生对纸条本身因素的怀疑。为使纸条容易摆动，可将纸条粘贴在三角形的细铜丝上，再把它们挂在细铜丝网上，见本实验方法二图示。

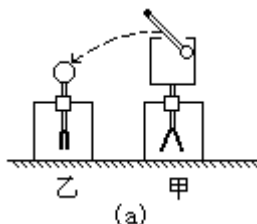
方法四

器材 开口的空心导体，箔片验电器，验电球，有机玻璃棒，丝绸或塑料薄膜等。

操作

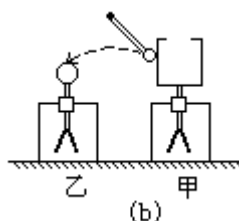
(1) 将开口的空心导体放在甲验电器的导杆上。用丝绸磨擦过的有机玻璃棒给空心导体带上正电。此时，验电器箔片张开一定角度。

(2) 用验电球与空心导体内壁接触并取出后，与乙验电器金属小球接触，多次重复操作，乙验电器箔片仍然闭合。说明无法从空心导体内壁取得电荷，如图 (a)。



(3) 用验电球与空心导体外壁相接触，并移去与乙验电器的金属小球相接触，可见乙

验电器箔片张开。重复操作数次，可见乙验电器箔片张角逐渐增大，而甲验电器的箔片张角逐渐减小。说明导体的电荷分布在外表面，如图（b）。



静电屏蔽 197

方法一

目的 用金属网罩演示静电屏蔽现象，证明在静电平衡时，导体内部的电场强度处处为零。

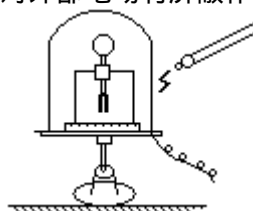
器材 金属网罩1套，感应起电机，验电器，验电球，导线等。

操作

(1) 把验电器放在绝缘金属台上，把与起电机的一个放电球连接的验电球靠近验电器，可看到验电器箔片张开。

(2) 用金属网罩将验电器罩上。再用导线把起电机的另一个放电球与金属网罩相连。

(3) 使验电球靠近网罩，可见网罩与验电球间火花放电，但罩内的验电器箔片并不张开，如图。当验电球在网罩四周移动时，都会产生火花放电。而网罩内的验电器箔片始终不张开。表明网罩内没有电场，网罩对外部电场有屏蔽作用。



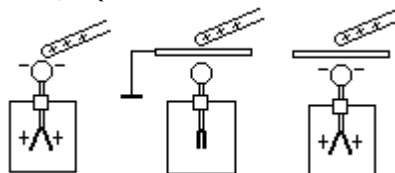
方法二

器材 箔片验电器，有机玻璃棒，塑料薄膜，平面金属薄板或平面金属网，塑料薄板，玻璃纸等。

操作

(1) 用塑料薄膜磨擦有机玻璃棒，使棒带正电。将棒移近箔片验电器，由于静电感应，箔片张开。

(2) 手持金属薄板或平面金属网，插入有机玻璃棒和验电器之间，可见箔片不再张开。说明带电棒的电场被接地导体所屏蔽。（手持金属薄板相当于接地导体。）



(3) 手持塑料薄板插入有机玻璃棒和验电器之间，可见箔片仍然张开。说明绝缘体并无屏蔽作用。

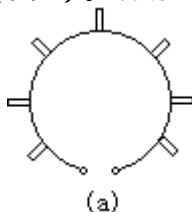
(4) 手持透明玻璃纸片，重复上述操作，可见箔片不再张开。可见玻璃纸也有屏蔽静电场的效果。

方法三

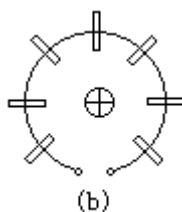
器材 验电幡，球形导体，感应起电机，导线等。

操作

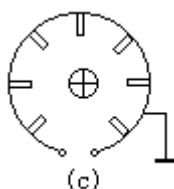
(1) 用导线将起电机与验电幡相连，把验电幡围成圆柱形。摇动起电机，可见验电幡上外部纸条张开，而其内部纸条不张开(图 a)。说明此时验电幡对外部的电场有屏蔽作用。



(2) 在围成圆柱形的验电幡中心处，放一个球形导体。给球形导体带电(可直接与起电机连接)，则可见验电幡上内部和外部的纸条都张开(图 b)。说明此时验电幡对球形导体的电场无屏蔽作用。



(3) 在验电幡上接上地线。重复上述操作，可见验电幡外部纸条垂下，而内部纸条都张开(图 c)。这说明接地后的验电幡，对内部电场有屏蔽作用。



注意

- (1) 球形导体必须获得足够的电量。
- (2) 与球形导体相连的金属导线，应竖直垂下，以免导线的电场对球形导体电场的干扰。

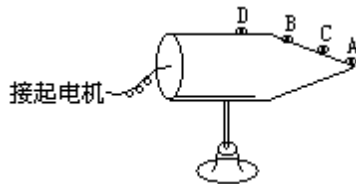
方法一

目的 观察带电导体表面上电荷的分布规律和表面上各处的电场强度大小。

器材 尖形金属导体(如图如示)，感应起电机，纸屑等。

操作

(1) 用一细导线将尖形金属导体和感应起电机连接，将纸屑散放在尖形导体表面上不同曲率处(如图)。



(2) 缓慢摇动感应起电机，使绝缘导体的带电量不断增加，即可看到导体的曲率最大处(A处)的纸屑首先飞出，然后可看到B处、C处、D处的纸屑相继飞出，D处的曲率最小，纸屑最后飞出。

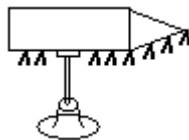
说明 A处的纸屑首先飞出，表示A处每单位面积上所带的电量最多，附近场强也最大。D处的纸屑最后飞出，表示D处每单位面积上所带的电量最少，附近的场强也最小。所以导体曲率大的部分的单位面积上所带电量多，附近场强也要大些，导体曲率小的部分的单位面积上所带电量少，附近场强也要小些。

方法二

器材 尖形导体，橡胶棒，毛皮，纸箔等。

操作

(1) 在尖形导体曲率不同的地方，粘贴上几对可动的纸箔(如图)。



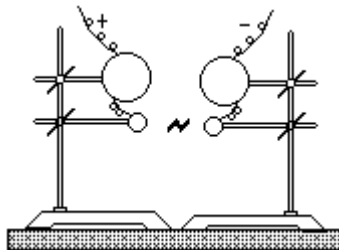
(2) 用毛皮磨擦橡胶棒使棒带负电。用带电棒使尖形导体带有一定的电荷。这时可见尖形导体上曲率不同处的纸箔，张开大小不同的角度。表明导体上的电荷分布与导体表面曲率有关。

方法三

器材 大金属球壳1对(直径约10cm)，小金属球1对(直径约1cm)，感应起电机，绝缘支架，导线等。

操作

(1) 将两对金属球两两相对固定在绝缘支架上，并把大金属球壳与小金属球连接，再与起电机的两极相连(如图)。



(2) 调节两组金属球壳之间有相同的间隙。摇动起电机，可见小球间首先产生火花放电现象。

(3) 保持大球间隙不变，增大小球间隙。摇动起电机，可见小球间仍然容易产生火花放电现象。这个现象说明，尽管两组球体间的电位差是相等的，但曲率半径小的金属球上表面电荷密度大，附近场强较大，容易导致空气电离而产生火花放电现象。

静电的应用很多，如静电除尘，静电植绒，静电喷漆，静电复印等。它们在原理上的共同之处都是使微粒带电后在电场力作用下运动。

方法一

目的 观察利用静电除尘的现象。

器材 $\phi 40\text{mm}$ 两端开口玻璃管，硬导线若干，支架台，蚊香，软导线，高压感应圈等。

操作

(1) 用硬导线在玻璃管外绕几圈，按图装好实验装置，玻璃管中用绝缘棒固定一根直导线，并照图接好线路。

(2) 点燃蚊香，让烟穿过玻璃管冒出来。然后接通感应圈电源，马上会观察到不再有烟从玻璃管冒出来了，过一段时间还会在玻璃管内壁上附着一层烟尘。这是因为当感应圈工作时，在管内存在有强电场，它使空气电离。电子在场力作用下向正极移动时，碰到烟尘微粒而使其带有负电，因此带电器烟尘微粒在场力作用下向管壁移动并附着于管壁，达到了静电除尘的目的。

注意 由于烟尘微粒的积聚，会使玻璃管壁成暗褐色，可用汽油清洗。

方法二

目的 了解静电植绒。

器材 带绝缘支架的金属圆板 1 对，感应起电机，纤维适量（化学纤维、动物毛纤维均可），圆形硬纸卡（大小与金属圆板相同），胶水，笔，夹子，导线等。

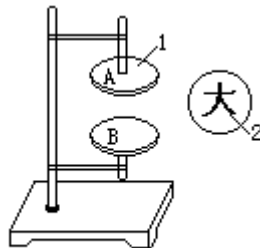
操作

(1) 把纤维剪碎，长度 2—3mm。均匀堆放在金属圆板 B 上面。

(2) 用蘸上胶水的毛笔在硬纸卡上写上“大”字，用夹子固定在金属圆板 A 下面，使写有“大”字的一面向下。

(3) 把两块金属圆板用导线分别接到感应起电机的两个放电球上（不必区别极性）。转动起电机进行植绒。

(4) 撤去高压，拿下纸卡，则纸卡上写“大”字处就植满了浓密的纤维绒絮。



1. 金属圆板 2. 硬纸卡

注意

(1) 两块金属圆板之间的距离 4—5cm 为宜，不能离得太远。

(2) 纤维不能太干燥，可喷洒少许盐水。

说明

(1) 如有不同颜色的纤维,可进行彩色植绒,每次植一种颜色的纤维,待胶水干透后,再植另一种颜色的纤维。

(2) 植绒后每根短纤维都竖直平行地植在胶水图形上,这与直接用胶水粘上纤维有明显区别。

电场强度的特征 200

目的

- (1) 验证稳定的静电场中某点的电场强度 E 和检验电荷的电量 q 无并;
- (2) 验证稳定的静电场中某点的检验电荷受到的电场力与检验电荷的电量成正比;
- (3) 观察电场强度 E 的矢量性(方向)。

器材 范德瓦尔斯感应起电机,升降台,长约 40cm 的细线丝线两根,铝箔少许,自制体积、形状完全相同的铝箔金属小球两只等。

铝箔金属小球的制作方法

(1) 用剪刀把白色泡沫塑料(钙塑)剪成直径 5 至 6mm 的小圆球。为使它们电容相同,故尽量使它们的体积、形状相同。

(2) 将包装香烟的铝箔浸入热水中,用手轻轻搓去其中一面的薄纸。把铝箔剪成 1.5cm 见方。

(3) 用铝箔包住泡沫塑料小球后放在手心中轻搓,使铝箔紧裹小球。

(4) 用长 40cm 的细丝线,一端打死结,另一端沿小球直径穿过。为减小实验误差,线的质量尽量小,为此可将一般丝线拆成单股,放在热水中拉直。

操作

(1) 把一个视为检验电荷的外包铝箔小球(以下简称球 a),悬挂在水平横杆 L 上的 c 点。

(2) 把范德瓦尔斯起电机放在升降台上,起电机的两个放电电极 K 尽量分开,并使一个电极与处于自然下垂的小球 a 恰好接触。此时它们的 y 坐标均为零。

(3) 转动摇柄使起电机带电,因球 a 与起电机电极 K 带同种电荷,故球 a 与电极 K 相斥,设此时球 a 带电量为 q_0 。

(4) 调节升降台使整个起电机竖直上升,电极 K 也随之升高,使球 a 和电极 K 的 y 坐标均为 A_1 ,并在球 a 的正下方做一标记 M。

(5) 用计算法或量角器求出悬线偏转角 α 。

(6) 用另一自制未带电的小球 b 与球 a 接触一下,因两球电容相同,所以 a、b 两球各带电量 $q/2$ 。移走 b 球,球 a 悬线偏角将减小。

(7) 同时调整电极 K 的高度和球 a 悬点位置。设 a 球悬点在 D 点时,球 a 仍在标记 M 的上方,且电极 K 和球 a 的 y 坐标均为 A_2 。

(8) 计算或测量此时悬线偏角 β 。

说明

两次实验中,球 a 相对于场源 K 的距离总为 γ ,所以根据测量出的 α 和 β 值可以证明:

(1) 在稳定的静电场中的某定点的电场强度 E 是定值。

$$\text{由第一次实验可知: } E_1 = \frac{F_1}{q} = \frac{G \times \text{tg}\alpha}{q}$$

$$\text{由第二次实验可知: } E_2 = \frac{F_2}{q/2} = \frac{2G\text{tg}\beta}{q}$$

用实验测得的 α 、 β 值代入，
 可知 $\text{tg}\alpha=2\text{tg}\beta$ ，
 所以 $E_1=E_2$ 。

对给定的稳定静电场中，两次实验 F/q 的比值相同而与检验电荷 q 的值无关，从而证明了电场强度定义的内容。

(2) 定量验证电场力 F 与检验电荷 q 成正比。

因为

$$F_1 = E_1 \times q_1$$

$$F_1 = G \text{tg}\alpha$$

$$F_2 = E \times q_2$$

$$F_2 = G \text{tg}\beta$$

可得

$$\frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\beta} = \frac{2}{1}$$

用实验数据 α 、 β 代入 式，如果等式成立，可证明： $F_1=2F_2$ 。

在给定的稳定静电场中某点检验电荷受到的电场力与检验电荷的电量成正比。

(3) 用实验观察电场强度 E 的矢量性（方向）。

把小球 a 的悬线从 D 点取下，放在场源 K 附近周围各点，可观察到小球偏离方向不尽相同。说明电场中各点场强方向一般不同。如让小球 a 带正电，则可判定场源 K 周围各点的场强方向。

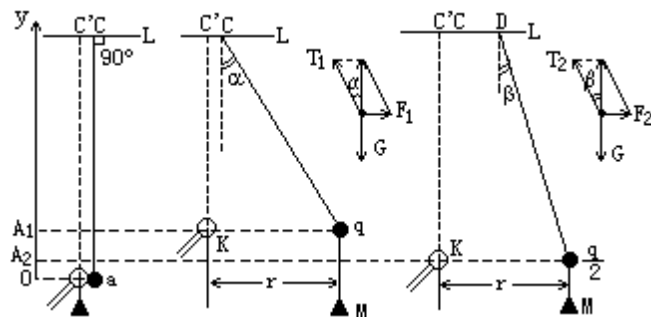
(4) 使小球 a 及电极 K 有相同的 y 坐标是为了简化受力图，使电场力 F 与球的重力 G 相垂直，便于计算。

注意

(1) 挂小球的丝线一定要轻，其质量可忽略，这样可把问题简化为三力平衡的共点力，否则就是力矩平衡问题了。

(2) 如范德瓦尔斯起电机良好，小球 a 带电后可稳定静止在空间某点很长时间，足够观察和测量偏角。

(3) 冬天气候干燥，实验效果尤为显著。但在教室里做时，注意开窗通风，否则室内湿度增加会降低实验效果。



电子电荷的测定 210

密立根 (Robert Andrews Millikan) 自 1909 年到 1917 年对带电油滴在重力场和静电场中的运动进行了研究，证实所有带电油滴所带电荷都是某一最小电荷的整数倍，明确了电荷的不连续性，并精确测定了电子电荷的数值。由于他在测定电子电荷和研究光电效应等领域里的成就，于 1923 年获诺贝尔物理学奖。测定油滴所带的电量，可以用平衡测量方法，也可以用动态测量方法，本实验采用平衡测量方法。

目的 测定油滴的电量，从而确定电子的电量。

原理 在两块水平放置的平行金属板间，有一个质量为 m 的带电油滴，电量为 q 。油滴在极板间同时受到重力 mg 和电场力 qE 的作用。若两极板间距为 d ，调节两板间电压 U ，可使这两个力达到平衡

$$mg = q \frac{U}{d}$$

从上式可见，为了测出 q 值，除了需测量 U 和 d 之外，还需测量 m 。由于油滴质量 m 很小，需用如下特殊方法来测定。

若 $U=0$ ，油滴在重力作用下加速下降，但由于空气阻力 f_r 的作用，在下降速度达到某一值 v 后，空气阻力 f_r 和重力 mg 平衡（空气浮力忽略不计）。这时油滴将匀速下降。根据斯托克斯公式，有

$$f_r = 6\pi\eta r v = mg$$

式中 η 为空气的粘滞系数， r 为油滴半径。设油的密度为 ρ ，则油滴质量可表示为

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$$

由 、 式得油滴半径

$$r = \sqrt{9\eta v / 2\rho g}$$

对于半径小到 $10^{-6}m$ 的小球，空气的粘滞系数可修正为

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{p r}}$$

这时的斯托克斯公式可修正为

$$f_r = \frac{6\pi\eta' r v}{1 + \frac{b}{p r}}$$

式中 b 为修正常数， $b=6.17 \times 10^{-6}m \cdot \text{cmHg}$ ， p 为大气压强，得

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g} \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{p r}} \right)}$$

故有

$$m = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{9\eta v}{2\rho g} \frac{1}{1 + \frac{b}{p r}} \right)^{3/2} \rho$$

当 $U=0$ 时，设油滴下降速度为 v 。若油滴匀速下降时间为 t ，距离为

l ，则有 $v = \frac{l}{t}$

将 代入 ， 代入 ，得

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t \left(1 + \frac{b}{p r} \right)} \right]^{3/2} \frac{d}{U}$$

器材 MOD—4 型密立根油滴仪或 J2438 型油滴仪。

操作

(1) 调节油滴仪左右两只调平螺丝，使水准泡指示水平，即表示平行极板处于水平。

(2) 使仪器预热 10 分钟。调节目镜，使分划板刻线清晰。

(3) 从喷雾口喷入油滴。微调显微镜的调焦手轮，可在视场中见到大量清晰的油滴。转动照明室灯珠座，使视场亮度均匀。

(4) 在平行极板上加平衡电压（约 300V 左右）。驱走不需要的油滴，注视其中适当大小的 1 滴，仔细调节平衡电压，使油滴静止不动。然后去掉平衡电压，使油滴匀速下降。待下降一段后，再加上平衡电压和升降电压，使油滴上升。以掌握控制油滴升降的操作技巧。

(5) 测出油滴下降一段距离 l 所需的时间 t 。为保证油滴匀速下降，应先使其下降一段距离后再测时间。一般取 $l=0.200\text{cm}$ 较合适。

(6) 对同一油滴进行 8—10 次测量。每次测量均需重新调整电压。

(7) 对不同的油滴 4—5 颗，分别进行测量。记录平衡电压 U 和匀速下降一段距离所需时间 t 的值。

(8) 将数据代入下列近似计算式：

$$q = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{[t(1 + 0.02\sqrt{t})]^{3/2}} \cdot \frac{1}{U}$$

求出油滴的电量。该电量将近似于电子电量的整数倍。

注意 实验中选择合适的油滴是很关键的。通常可选择平衡电压在 200V 以上，在 20—30s 时间内匀速下降 2mm 左右的油滴。

带电粒子在电场中的加速和偏转 202

方法一

目的 模拟带电粒子在电场中的加速与偏转。

器材 投影幻灯机，手摇起电机，自制演示器等。

演示器的制作方法

用 2mm 厚有机玻璃板制成底面积 $20 \times 16\text{cm}^2$ 盒子一个，高约 3cm。用覆铜板制成加速电极 A、B 和偏转电极 C、D，焊上裸铜丝分别固定在四个接线柱上[图 (a) 为俯视图]其中电极 B 由两段覆铜板焊在裸铜线上连接成门形。如图 (b)，以便小球通过。

擒纵杆的作用是擒住小球并使之与电极 A 接触，让球能带上与 A 同种的电荷。用有机玻璃做成图 (c) 样子。它与小球接触的部位用一小片磷铜片插入杆端的小孔，穿过折转固定。装配完成后磷铜片应与 A 电极的覆铜面保持良好的接触，以保证小球带电。

捕获板用 1mm 厚的有机玻璃片做成。其作用是捕获射来的小球，以免小球乱撞。剪两片 1—2mm 宽的细长条磷铜片作软弹簧把捕获板与盒壁连接起来[图 (d) 为侧视图]。装好后应使小球很容易嵌入。

带电小球用泡沫塑料制成，可用锋利的剃须刀片削制。直径为 1.3cm，外涂胶水后在 B 型铅笔的铅笔芯屑上滚动，使球的表面均匀地粘上一层石墨导电层。做好的小球必须要圆，能在平整桌面上沿直线滚动。

操作

(1) 将演示器置于投影幻灯机上，用导线把加速电极接到起电机上，使球紧靠 A 电极用擒纵杆压住，起电后按下扳手机即加速射出，后由捕获板捕获。演示带电小球经电场加速

后作直线运动。

(2) 把偏转电极 C、D 分别接在 A、B 上，小球经过电场时作类似平抛运动的曲线运动，演示偏转。调节 C 和 D 的距离可使球打在角上。

(3) 交换 C、D 极性，演示小球反向偏转。

注意

(1) 使用手摇起电机获得静电高压较为方便，使起电机的两个放电球相距约 1.5cm 能打出火花即可（电压约 1.5KV）。电压太低则电场力过小。电压如太高，小球经过门形 B 电极时会因放电而失去电荷甚至带上相反的电荷而导致演示失败。实验前要掌握起电机的适当转速。

(2) 遇潮湿天气，可用红外线灯稍烘一下起电机，使它能打出火花就行。

(3) 连接用的导线与桌面、幻灯机铁壳接触处应垫些泡沫塑料提高绝缘性。

方法二

器材 滴定管，带绝缘柄的电容器平行极板 1 对，大烧杯（200ml），铁架台，感应起电机，导线等。

(1) 把金属极板和滴定管固定在铁架台上（如图）。

(2) 在滴定管上方通入一根金属导线，一直伸到接近管底，然后把导线固定。再将导线和平行极板中一块的引出线连在一起，和感应起电机的一个极相连接。另一块极板与起电机的另一电极相接，见图。

(3) 调节滴定管的滴水频率，约每秒 2 滴左右。看到水滴相继作自由落体运动，其运动轨迹为直线。

(4) 摇动起电机，可见水滴的运动轨迹明显偏转。说明由于带电水滴受到电场力的作用而发生偏转。改变极板带电极性，可见水滴的运动轨迹偏向另一方向，说明电场方向反向，水滴所受电场力也反向。

示波管的原理 203

器材 阴极射线管，金属箔，蓄电池组（4—6V 和 2—4V），感应圈，胶水纸等。

操作

(1) 将两片金属箔用胶水纸紧密地贴在阴极射线管的玻璃壁上，并使金属箔中部略为隆起，如图。这样，可便于鳄鱼夹夹住。

(2) 将两只感应圈分别接上 4—6V 和 2—4V 的蓄电池。用导线把阴极射线管上的两极和感应圈 2 相连，把两金属箔与感应圈 3 相连。

(3) 先使感应圈 2 工作，可见阴极射线管中的荧光屏上出现一条明亮的直的射线径迹。说明阴极射线在无偏转电场作用时直线前进。

(4) 再使感应圈 3 工作，即在阴极射线管上加一偏转电场，可在荧光屏上明显地见到阴极射线发生偏转。说明原来直进的阴极射线在偏转电场作用下发生了偏转。

注意 金属箔用锡箔或铝箔均可。一般加 200V 直流电压，约可偏转 1cm，偏转较明显。

匀强电场中的电势 204

目的 本实验利用电流通过导电纸时在其间形成的电势分布情况来模拟匀强电场中的

电势分布。使学生能较形象地感觉到静电场中电势的存在，观察到等势面，认识匀强电场中电势的变化规律。

器材 伏特表，电源，自制模拟平行板电容器等。

模拟平行板电容器的制作方法

在一块薄木板上用两根铝条和接线柱固定了一张光电誊印纸组成，见图（a）。

操作

当电源接通后，用电压表的黑表棒接触负极，红表棒分别接触誊印纸上的不同位置，就在伏特表上读到该点相对负极的电势差，以负极为零电势，读数就是该点的电势。

根据各点的电势值可以看到：处于同一水平位置的各点电势值是相同的，把这些点连起来，即模拟出匀强电场中的等势面。沿着电场方向，电势不断降低，而且电场方向就是电势降落陡度最大的方向。

说明

由于光电誊印纸的电阻较大，天津光电誊印纸电阻可达 1000k 左右。电压表的内阻却要小得多，如 MF30 型万用表的直流电压档内阻是 20k /V，其他 500 型万用表或演示用电流计内阻更小。由于上述实验相当于用一个小内阻的电压表去测量大电阻各点的电压，必然有误差，（如图 b）。因此验证匀强电场中两点间的电势差与它们间的距离成正比，即 $U_{ab} \propto d$ 时，不均匀度就较明显，特别在接近正极时更甚。改进方法可采用：用食盐溶液湿润誊印纸，可使其阻值减少到 50k 以下。选用内阻较高的电压表。电源电压适当提高一点，这样电压表也选用较大的档次，相应内阻也较大些。经过改进，在誊印纸的大部分区域（除靠近正极处）都能验证 $U_{ab} \propto d$ 的规律。

描绘电场的等势线 205

直接描绘电场中的等势线是相当困难的。由于静电场和稳恒电流场遵循的规律相似，因此可以用稳恒电流场来模拟静电场描绘等势线。又因为实验中的导电纸或导电液不是无穷大的，因此在接近边缘的地方等势线将明显走样（全部垂直于边缘）所以在实验中应注意等势线不要画到太边上，以避免“边缘效应”。

方法一

器材 灵敏电流计，探针，薄木板，白纸，复写纸，导电纸，自制电极，6V 直流电源等。

电极的制作方法

用 2.8mm 直径的铁丝分别制成直径 8cm 的圆环形电极一个，11cm × 18cm 矩形电极（接头在短边中央）一个，长 11cm 的直流电极两个。

操作

（1）按图（a）尺寸在薄木板上钻两个洞，然后依次复上吹塑纸，白纸、复写纸、导电纸，最后用两个接线柱固定。

（2）按图（b）连接电源和电极。在导电纸上作出两个电极的连线，在连线上取间距大致相等的五个点作基准点。

（3）用左右手分别拿两个探针（两探针与灵敏电流计两接线柱相连），将左手探针与某一基准点相连，反复地移动右手的探针，直至电流表的指针不发生偏转为止，在白纸上复

印下右手探针的位置。照上述方法，在每个基准点的两侧各探出五个等势点，即可连出等势线。

(4) 按图(c)连接电源和电极，在导电纸上作出两电极点的连线，在连线上取间距相等的五个基准点。重复操作(3)，即可得到匀强电场的等势线。

(5) 按图(d)连接电源和电极，在导电纸上作出中央电极和圆形电极上任意一点的连线，在连线上取间距相等的四个基准点。重复操作(3)，即可得到点电荷电场的等势线。

注意

(1) 吹塑纸能改善电极与导电纸的接触，不能省略。

(2) 如没有导电纸，也可以用誊印纸代替。

(3) 用194方法三中注意(2)。把它们的位置复印在白纸上。

说明

(1) 本实验中描绘的是平面电流场中的等势线。在无限大的平面稳恒电流场中的等势线，和两个等量异号电荷电场的等势线是相似的。

(2) 因为在实验中所用的导电纸是有限大的，因此在实验中要注意所取的等势点不要靠近导电纸的边缘。(接近导电纸边缘处的等势线是垂直于纸边的。)

(3) 本实验还可用一张坐标纸压在导电玻璃板下面(导电玻璃板的导电面朝上)。在玻璃板上相距10cm处放两个接上电源的电极，用同样的方法完成。导电玻璃是在普通玻璃上涂一层很薄的能导电的物质，例如电视机前的防护屏就是一种很好的导电玻璃。如果没有导电玻璃，也可以取一个扁平的玻璃容器，在容器中装一层薄薄的电介质溶液，以代替导电玻璃。

方法二

器材 自制等势线盘，自制电极，灵敏电流计探针，毫米方格纸，6V直流电源等。

等势线盘的制作方法

用3—5mm透明有机玻璃制成长240mm、宽240mm、高50mm的无盖平底盘，如图(a)。

电极的制作方法：同方法一。安装如图(b)。

静电应用

静电的应用很多，如静电除尘，静电植绒，静电喷漆，静电复印等。它们在原理上的共同之处都是使微粒带电后在电场力作用下运动。

方法一

目的 观察利用静电除尘的现象。

器材 40mm两端开口玻璃管，硬导线若干，支架台，蚊香，软导线，高压感应圈等。

操作

(1) 用硬导线在玻璃管外绕几圈，按图装好实验装置，玻璃管中用绝缘棒固定一根直导线，并照图接好线路。

(2) 点燃蚊香，让烟穿过玻璃管冒出来。然后接通感应圈电源，马上会观察到不再有烟从玻璃管冒出来了，过一段时间还会在玻璃管内壁上附着一层烟尘。这是因为当感应圈工作时，在管内存在有强电场，它使空气电离。电子在场力作用下向正极移动时，碰到烟尘微粒而使其带有负电，因此带电烟尘微粒在场力作用下向管壁移动并附着于管壁，达到

了静电除尘的目的。

注意 由于烟尘微粒的积聚，会使玻璃管壁成暗褐色，可用汽油清洗。

方法二

目的 了解静电植绒。

器材 带绝缘支架的金属圆板 1 对，感应起电机，纤维适量（化学纤维、动物毛纤维均可），圆形硬纸卡（大小与金属圆板相同），胶水，毛笔，夹子，导线等。

操作

(1) 把纤维剪碎，长度 2—3mm。均匀堆放在金属圆板 B 上面。

(2) 用蘸上胶水的毛笔在硬纸卡上写上“大”字，用夹子固定在金属圆板 A 下面，使写有“大”字的一面向下。

(3) 把两块金属圆板用导线分别接到感应起电机的两个放电球上（不必区别极性）。转动起电机进行植绒。

(4) 撤去高压，拿下纸卡，则纸卡上写“大”字处就植满了浓密的纤维绒絮。

注意

(1) 两块金属圆板之间的距离 4—5cm 为宜，不能离得太远。

(2) 纤维不能太干燥，可喷洒少许盐水。

说明

(1) 如有不同颜色的纤维，可进行彩色植绒，每次植一种颜色的纤维，待胶水干透后，再植另一种颜色的纤维。

(2) 植绒后每根短纤维都竖直平行地植在胶水图形上，这与直接用胶水粘上纤维有明显区别。

电场强度的特征

目的

(1) 验证稳定的静电场中某点的电场强度 E 和检验电荷的电量 q 无关；

(2) 验证稳定的静电场中某点的检验电荷受到的电场力与检验电荷的电量成正比；

(3) 观察电场强度 E 的矢量性（方向）。

器材 范德瓦尔斯感应起电机，升降台，长约 40cm 的细丝线两根，铝箔少许，自制体积、形状完全相同的铝箔金属小球两只等。

铝箔金属小球的制作方法

(1) 用剪刀把白色泡沫塑料（钙塑）剪成直径 5 至 6mm 的小圆球。为使它们电容相同，故尽量使它们的体积、形状相同。

(2) 将包装香烟的铝箔浸入热水中，用手轻轻搓去其中一面的箔纸。

把铝箔剪成 1.5cm 见方。

(3) 用铝箔包住泡沫塑料小球后放在手心中轻搓，使铝箔紧裹小球。

(4) 用长 40cm 的细丝线，一端打死结，另一端沿小球直径穿过。为减小实验误差，线的质量尽量小，为此可将一般丝线拆开成单股，放在

热水中拉直。

操作

(1) 把一个视为检验电荷的外包铝箔小球（以下简称球 a），悬挂在水平横杆 L 上的 c 点。

(2) 把范德瓦尔斯起电机放在升降台上，起电机的两个放电电极 K 尽量分开，并使一个电极与处于自然下垂的小球 a 恰好接触。此时它们的 y 坐标均为零。

(3) 转动摇柄使起电机带电，因球 a 与起电机电极 K 带同种电荷，故球 a 与电极 K 相斥，设此时球 a 带电量为 q。

(4) 调节升降台使整个起电机坚直上升，电极 K 也随之升高，使球 a 和电极 K 的 y 坐标均为 A_1 ，并在球 a 的正下方做一标记 M。

(5) 用算法或量角器求出悬线偏转角 α 。

(6) 用另一自制未带电的小球 b 与球 a 接触一下，因两球电容相同，所以 a、b 两球各带电量 $q/2$ 。移走 b 球，球 a 悬线偏角将减小。

(7) 同时调整电极 K 的高度和球 a 悬点位置。设 a 球悬点在 D 点时，球 a 仍在标记 M 的上方，且电极 K 和球 a 的 y 坐标均为 A_2 。

(8) 计算或测量此时悬线偏角 β 。

说明

两次实验中，球 a 相对于场源 K 的距离总为 r，所以根据测量出的 α 和 β 值可以证明：

(1) 在稳定的静电场中的某定点的电场强度 E 是定值。

$$\text{由第一次实验可知：} E_1 = \frac{F_1}{q} = \frac{G \times \text{tg}\alpha}{q},$$

$$\text{由第二次实验可知：} E_2 = \frac{F_2}{q/2} = \frac{2G\text{tg}\beta}{q},$$

用实验测得的 α 、 β 值代入，

可知 $\text{tg}\alpha = 2\text{tg}\beta$ ，

所以 $E_1 = E_2$ 。

对给定的稳定静电场中，两次实验 F/q 的比值相同而与检验电荷 q 的值无关，从而证明了电场强度定义的内容。

(2) 定量验证电场力 F 与检验电荷 q 成正比。

$$\text{因为 } F_1 = E_1 \times q_1$$

$$F_1 = G\text{tg}\alpha$$

$$F_2 = E_1 \times q_2$$

$$F_2 = G\text{tg}\beta$$

$$\text{可得 } \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\beta} = \frac{2}{1}。$$

用实验数据 a、b 代入式，如果等式成立，可证明： $F_1 = 2F_2$ 。

在给定的稳定静电场中某点检验电荷受到的电场力与检验电荷的电量成正比。

(3) 用实验观察电场强度 E 的矢量性（方向）。

把小球 a 的悬线从 D 点取下，放在场源 K 附近周围各点，可观察到

小球偏离方向不尽相同。说明电场中各点场强方向一般不同。如让小球 a 带正电，则可判定场源 K 周围各点的场强方向。

(4)使小球 a 及电极 K 有相同的 y 坐标是为了简化受力图，使电场力 F 与球的重力 G 相垂直，便于计算。

注意

(1)挂小球的丝线一定要轻，其质量可忽略，这样可把问题简化为三力平衡的共点力，否则就是力矩平衡问题了。

(2)如范德瓦尔斯起电机良好，小球 a 带电后可稳定静止在空间某点很长时间，足够观察和测量偏角。

(3)冬天气候干燥，实验效果尤为显著。但在教室里做时，注意开窗通风，否则室内湿度增加会降低实验效果。

电子电荷的测定

密立根 (Robert Andrews Millikan) 自 1909 年到 1917 年对带电油滴在重力场和静电场中的运动进行了研究，证实所有带电油滴所带电荷都是某一最小电荷的整数倍，明确了电荷的不连续性，并精确测定了电子电荷的数值。由于他在测定电子电荷和研究光电效应等领域里的成就，于 1923 年获诺贝尔物理学奖。测定油滴所带的电量，可以用平衡测量方法，也可以用动态测量方法，本实验采用平衡测量方法。

目的 测定油滴的电量，从而确定电子的电量。

原理 在两块水平放置的平行金属板间，有一个质量为 m 的带电油滴，电量为 q 。油滴在极板间同时受到重力 mg 和电场力 qE 的作用。若两极板间距为 d ，调节两板间电压 U ，可使这两个力达到平衡

$$mg = q \frac{U}{d}$$

从上式可见，为了测出 q 值，除了需测量 U 和 d 之外，还需测量 m 。由于油滴质量 m 很小，需用如下特殊方法来测定。

若 $U=0$ ，油滴在重力作用下加速下降，但由于空气阻力 f_r 的作用，在下降速度达到某一值 v 后，空气阻力 f_r 和重力 mg 平衡（空气浮力忽略不计）。这时油滴将匀速下降。根据斯托克斯公式，有

$$f_r = 6\pi\gamma\eta v = mg$$

式中 η 为空气的粘滞系数， γ 为油滴半径。设油的密度为 ρ ，则油滴质量可表示为

$$m = \frac{4}{3}\pi\gamma^3\rho$$

由 、 式得油滴半径

$$\gamma = \sqrt{9\eta v / 2\rho g}$$

对于半径小到 10^{-6}m 的小球，空气的粘滞系数可修正为

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{P\gamma}}$$

这时的斯托克斯公式可修正为

$$f_{\gamma} = \frac{6\pi\gamma\omega\eta}{1 + \frac{b}{P\gamma}}$$

式中 b 为修正常数, $b=6.17 \times 10^{-6} \text{m} \cdot \text{cmHg}$, P 为大气压强, 得

$$\gamma = \sqrt{\frac{9\eta\mu}{2\rho g} \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{P\gamma}} \right)}$$

故有
$$m = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{9\eta\mu}{2\rho g} \frac{1}{1 + \frac{b}{P\gamma}} \right)^{3/2} \rho$$

当 $U=0$ 时, 设油滴下降速度为 v 。若油滴匀速下降时间为 t , 距离为 l ,

则有
$$v = \frac{l}{t}$$

将 代入 , 代入 , 得

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t \left(1 + \frac{b}{P\gamma} \right)} \right]^{3/2} \frac{d}{U}。$$

器材 MOD? 4 型密立根油滴仪或 J2438 型油滴仪。

操作

(1) 调节油滴仪左右两只调平螺丝, 使水准泡指示水平, 即表示平行极板处于水平。

(2) 使仪器预热 10 分钟。调节目镜, 使分划板刻线清晰。

(3) 从喷雾口喷入油滴。微调显微镜的调焦手轮, 可在视场中见到大量清晰的油滴。转动照明室灯珠座, 使视场亮度均匀。

(4) 在平行极板上加平衡电压 (约 300V 左右)。驱走不需要的油滴, 注视其中适当大小的 1 滴, 仔细调节平衡电压, 使油滴静止不动。然后去掉平衡电压, 使油滴匀速下降。待下降一段后, 再加上平衡电压和升降电压, 使油滴上升。以掌握控制油滴升降的操作技巧。

(5) 测出油滴下降一段距离 l 所需的时间 t 。为保证油滴匀速下降, 应先使其下降一段距离后再测时间。一般取 $l=0.200\text{cm}$ 较合适。

(6) 对同一油滴进行 8—10 次测量。每次测量均需重新调整电压。

(7) 对不同的油滴 4—5 颗, 分别进行测量。记录平衡电压 U 和匀速下降一段距离所需时间 t 的值。

(8) 将数据代入下列近似计算式:

$$q = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{[t(1 + 0.02\sqrt{t})]^{3/2}} \cdot \frac{1}{U} ,$$

求出油滴的电量。该电量将近似于电子电量的整数倍。

注意 实验中选择合适的油滴是很关键的。通常可选择平衡电压在 200V 以上, 在 20—30s 时间内匀速下降 2mm 左右的油滴。

带电粒子在电场中的加速和偏转

方法一

目的 模拟带电粒子在电场中的加速与偏转。

器材 投影幻灯机，手摇起电机，自制演示器等。

演示器的制作方法

1. 接线柱 2. 擒纵杆 3. 扳手 4. 小球 5. 捕获板
6. 磷铜片 7. 有机玻璃导轨 8. 角撑 9. 裸铜丝

用 2mm 厚有机玻璃板制成底面积 $20 \times 16\text{cm}^2$ 盒子一个，高约 3cm。用覆铜板制成加速电极 A、B 和偏转电极 C、焊上裸铜丝分别固定在四个接线柱上[图(a)为俯视图]其中电极 B 由两段覆铜板焊在裸铜线上连接成门形。如图(b)，以便小球通过。

擒纵杆的作用是擒住小球并使之与电极 A 接触，让球能带上与 A 同种的电荷。用有机玻璃做成图(c)样子。它与小球接触的部位用一小片磷铜片插入杆端的小孔，穿过后折转固定。装配完成后磷铜片应与 A 电极的覆铜面保持良好的接触，以保证小球带电。

捕获板用 1mm 厚的有机玻璃片做成。其作用是捕获射来的小球，以免小球乱撞。剪两片 1—2mm 宽的细长条磷铜片作软弹簧把捕获板与盒壁连接起来[图(d)为侧视图]。装好后应使小球很容易嵌入。

带电小球用泡沫塑料制成，可用锋利的剃须刀片削制。直径约 1.3cm，外涂胶水后在 B 型铅笔的铅笔芯屑上滚动，使球的表面均匀地粘上一层石墨导电层。做好的小球必须要圆，能在平整桌面上沿直线滚动。

操作

(1)将演示器置于投影幻灯机上，用导线把加速电极接到起电机上，使球紧靠 A 电极用擒纵杆压住，起电后按下扳手球即加速射出，后由捕获板捕获。演示带电小球经电场加速后作直线运动。

(2)把偏转电极 C、D 分别接在 A、B 上，小球经过电场时作类似平抛运动的曲线运动，演示偏转。调节 C 和 D 的距离可使球打在角上。

(3)交换 C、D 极性，演示小球反向偏转。

注意

(1)使用手摇起电机获得静电高压较为方便，使起电机的两个放电球相距约 1.5cm 能打出火花即可(电压约 1.5KV)。电压太低则电场力过小。电压如太高，小球经过门形 B 电极时会因放电而失去电荷甚至带上相反的电荷而导致演示失败。实验前要掌握起电机的适当转速。

(2)遇潮湿天气，可用红外线灯稍烘一下起电机，使它能打出火花就行。

(3)连接用的导线与桌面、幻灯机铁壳接触处应垫些泡沫塑料提高绝缘性。

方法二

器材 滴定管，带绝缘柄的电容器平行极板 1 对，大烧杯(200ml)，铁架台，感应起电机，导线等。

操作

(1)把金属极板和滴定管固定在铁架台上(如图)。

(2)在滴定管上方通入一根金属导线，一直伸到接近管底，然后把导线固定。再将导线和平行极板中一块的引出线连在一起，和感应起电机

的一个极相连接。另一块极板与起电机的另一电极相接，见图。

(3)调节滴定管的滴水频率，约每秒2滴左右。看到水滴相继作自由落体运动，其运动轨迹为直线。

(4)摇动起电机，可见水滴的运动轨迹明显偏转。说明由于带电水滴受到电场力的作用而发生偏转。改变极板带电极性，可见水滴的运动轨迹偏向另一方向，说明电场方向反向，水滴所受电场力也反向。

示波管的原理

器材 阴极射线管，金属箔，蓄电池组(4—6V和2—4V)，感应圈，胶水纸等。

操作

(1)将两片金属箔用胶水纸紧密地贴在阴极射线管的玻璃壁上，并使金属箔中部略为隆起，如图。这样，可便于鳄鱼夹夹住。

(2)将两只感应圈分别接上4—6V和2—4V的蓄电池。用导线把阴极射线管上的两极和感应圈2相连，把两金属箔与感应圈3相连。

(3)先使感应圈2工作，可见阴极射线管中的荧光屏上出现一条明亮的直的射线径迹。说明阴极射线在无偏转电场作用时直线前进。

(4)再使感应圈3工作，即在阴极射线管上加一偏转电场，可在荧光屏上明显地见到阴极射线发生偏转。说明原来直进的阴极射线在偏转电场作用下发生了偏转。

注意 金属箔用锡箔或铝箔均可。一般加200V直流电压，约可偏转1cm，偏转较明显。

匀强电场中的电势

目的 本实验利用电流通过导电纸时在其间形成的电势分布情况来模拟匀强电场中的电势分布。使学生能较形象地感觉到静电场中电势的存在，观察到等势面，认识匀强电场中电势的变化规律。

器材 伏特表，电源，自制模拟平行板电容器等。

模拟平行板电容器的制作方法

在一块薄木板上用两根铝条和接线柱固定了一张光电誊印纸组成，见图(a)。

操作

当电源接通后，用电压表的黑表棒接触负极，红表棒分别接触誊印纸上的不同位置，就在伏特表上读到该点相对负极的电势差，以负极为零电势，读数就是该点的电势。

根据各点的电势值可以看到：处于同一水平位置的各点电势值是相同的，把这些点连起来，即模拟出匀强电场中的等势面。沿着电场方向，电势不断降低，而且电场方向就是电势降落陡度最大的方向。

说明

由于光电誊印纸的电阻较大，天津光电誊印纸电阻可达 $1000k\Omega$ 左右。电压表的内阻却要小得多，如MF30型万用表的直流电压档内阻是20

V ，其他 500 型万用表或演示用电流计内阻更小。由于上述实验相当于用一个小内阻的电压表去测量大电阻各点的电压，必然有误差，（如图 b）。因此验证匀强电场中两点间的电势差与它们间的距离成正比，即 $U_{ab} \propto d$ 时，不均匀度就较明显，特别在接近正极时更甚。改进方法可采用：用食盐溶液湿润誊印纸，可使其阻值减少到 50k 以下。选用内阻较高的电压表。电源电压适当提高一点，这样电压表也选用较大的档次，相应内阻也较大些。经过改进，在誊印纸的大部分区域（除靠近正极处）都能验证 $U_{ab} \propto d$ 的规律。

描绘电场的等势线

直接描绘静电场中的等势线是相当困难的。由于静电场和稳恒电流场遵循的规律相似，因此可以用稳恒电流场来模拟静电场描绘等势线。又因为实验中的导电纸或导电液不是无穷大的，因此在接近边缘的地方等势线将明显走样（全部垂直于边缘）所以在实验中应注意等势线不要画到太边上去，以避免“边缘效应”。

方法一

器材 灵敏电流计，探针，薄木板，白纸，复写纸，吹塑纸，导电纸，自制电极，6V 直流电源等。

电极的制作方法

用 2.8mm 直径的铁丝分别制成直径 8cm 的圆环形电极一个，11cm × 18cm 矩形电极（接头在短边中央）一个，长 11cm 的直流电极两个。

操作

(1)按图 (a) 尺寸在薄木板上钻两个洞，然后依次复上吹塑纸，白纸、复写纸、导电纸，最后用两个接线柱固定。

(2)按图 (b) 连接电源和电极。在导电纸上作出两个电极的连线，在连线上取间距大致相等的五个点作基准点。

(3)用左右手分别拿两个探针（两探针与灵敏电流计两接线柱相连），将左手探针与某一基准点相连，反复地移动右手的探针，直至电流表的指针不发生偏转为止，在白纸上复印下右手探针的位置。照上述方法，在每个基准点的两侧各探出五个等势点，即可连出等势线。

(4)按图 (c) 连接电源和电极，在导电纸上作出两电极中点的连线，在连线上取间距相等的五个基准点。重复操作 (3)，即可得到匀强电场的等势线。

(5)按图 (d) 连接电源和电极，在导电纸上作出中央电极和圆形电极上任意一点的连线，在连线上取间距相等的四个基准点。重复操作 (3)，即可得到点电荷电场的等势线。

注意

(1)吹塑纸能改善电极与导电纸的接触，不能省略。

(2)如没有导电纸，也可以用誊印纸代替。

(3)同 194 方法三中注意 (2)。把它们的位置复印在白纸上。

说明

(1)本实验中描绘的是平面电流场中的等势线。在无限大的平面稳恒

电流场中的等势线，和两个等量异号电荷电场的等势线是相似的。

(2)因为在实验中所用的导电纸是有限大的，因此在实验中要注意所取的等势点不要靠近导电纸的边缘。(接近导电纸边缘处的等势线是垂直于纸边的。)

(3)本实验还可用一张坐标纸压在导电玻璃板下面(导电玻璃板的导电面朝上)。在玻璃板上相距 10cm 处放两个接上电源的电极，用同样的方法完成。导电玻璃是在普通玻璃上涂一层很薄的能导电的物质，例如电视机前的防护屏就是一种很好的导电玻璃。如果没有导电玻璃，也可以取一个扁平的玻璃容器，在容器中装一层薄薄的电介质溶液，以代替导电玻璃。

方法二

器材 自制等势线盘，自制电极，灵敏电流计探针，毫米方格纸，6V 直流电源等。

等势线盘的制作方法

用 3 5mm 透明有机玻璃制成长 240mm、宽 240mm、高 50mm 的无盖平底盘，如图(a)。

电极的制作方法：同方法一。安装如图(b)。

操作

(1)水平放置等势线盘在盘中加入深约 30mm 的水(如水的电阻太大，可加入少量酸)。

(2)将一张毫米方格纸压在等势线盘底下，按方法一操作(2)、(3)、(4)、(5)进行实验。不同的只是右手的探针找到等势点后，从盘底下的方格纸上读出该点的坐标，在另一张方格纸上描出该点位置。

静电平衡时导体上各点电势相等

器材

感应起电机，绝缘导体，静电计，带绝缘柄的金属小球，导线等。

操作

(1)用导线把绝缘导体与感应起电机连接，把带绝缘柄的金属小球与静电计连接。

(2)转动感应起电机使绝缘导体带电后，停止转动。

(3)手拿绝缘柄使金属小球在绝缘导体上各处移动，可见静电计指针张角不变(如图所示)，说明静电平衡时导体上各点电势都相等。

说明 静电计的金属外壳与底座相连，把它放在普通木质讲台上，对于静电来讲就等于接地了。

导体的电容

方法一

目的 证实导体的电势与导体所带的电量有关。

器材 开口球形导体，静电计(指针验电器或金箔验电器)，验电

球 4 个，感应起电机，导线等。

操作

(1)将开口空心球形导体装在静电计上。静电计外壳接地，如图所示。

(2)用起电机使 A 球带有较多的某种电荷，然后使 A 与不带电的相同的 B 球接触，则 A、B 两球的电量相等，均为 A 球原带电量的一半。然后再使 A、B 分别与不带电的 C、D 验电球相接触，分开后，A、B、C、D 四球所带的电量均为 A 球原来所带电量的 $1/4$ ，即四球带有等量的同种电荷。

(3)使 A、B、C、D 带电的验电球，分别与开口球形导体的内壁相接触。可以观察到，每次接触都导致静电计指针的张角增大。这证实了导体所带电荷电量越大，导体的电势越高。

方法二

器材 半枕形导体 1 对，指针验电器，感应起电机，导线等。

操作

(1)将指针验电器与半枕形导体 A 相连，指针验电器外壳接地。另一半枕形导体 B 与 A 远离。

(2)用起电机使半枕形导体 A 带电，指针验电器指针发生偏转，显示出导体电势的大小。

(3)用另一半枕形导体 B 与 A 接触，再分开（如图）。观察到指针验电器指针的偏角变小。

(4)用手接触一下 B，使 B 失去电荷，再重复操作(3)。每次重复操作(3)，都会观察到指针验电器指针的偏角逐次减小。这是由于每次 B 与 A 接触，都使 A 上的带电量减少，这可说明导体的电势与导体所带的电量有关。

方法三

器材 开口球形导体，球形导体，静电计（指针验电器），有机玻璃棒，丝绸（或塑料薄膜），导线等。

操作

(1)将静电计与开口球形导体相连接，静电计外壳接地，如图(a)。

(2)用塑料薄膜摩擦有机玻璃棒，使有机玻璃棒带正电。然后用有机玻璃棒与开口球形导体相接触可观察到静电计指针有明显偏转，表示此时导体带电且有一定的电势。

(3)将另一球形导体置于开口球形导体上，可见静电计指针的偏角减小(图 b)。这时两导体的总电量与原开口球形导体的带电量相等，而静电计的指针偏角变小，即电势变小，说明导体的电容变大了。这表明导体的电容大小与导体的形状、结构、大小有关。

注意 应在与其他物体绝缘的情况下，将球形导体置于开口球形导体上。

平行板电容器的电容

方法一

目的 演示平行板电容器的电容量与两板间的距离、两板正对面积、板间电介质等因素的关系。

器材 静电起电机，平行板电容器，静电计（指针验电器），硬橡胶板，有机玻璃板，绝缘支架，导线等。

操作

(1)将平行板电容器固定在绝缘支架上。两板分别与静电起电机的两极相连，使两极板相距 15cm 左右。静电计外壳接地，如图（a）。

(2)摇动起电机，给平行板电容器充电。可见静电计的指针偏转一定的角度，说明电容器充电后，两极板间存在一定的电势差。

(3)断开起电机，移动电容器的任一电极，使两板间距离增大，可见静电计指针的偏角增大。说明当电量不变时，两板板间距增大，两板间电势差增大。根据公式 $C=Q/U$ ，可知电容量变小了。

(4)移动电容器的任一极板，使两板间距减小，可见静电计指针的偏角变小。说明当电量不变时，两极板间距减小，两板间电势差减小。根据公式 $C=Q/U$ ，可知电容量变大了。

(5)保持极板所带的电量及两极板间距不变。将两板平行地错开，使两板的正对面积减小，可见静电计指针偏角变大（图 b），说明此时两板间电势差变大。根据公式 $C=Q/U$ ，可知电容量变小了。

(6)使两极板的正对面积增大，可见静电计指针偏角变小，说明此时两板间电势差变小。根据公式 $C=Q/U$ ，可知电容量变大了。

(7)将一块有机玻璃板插入两板之间，可见静电计指针的偏角变小（图 c），说明此时两极板间的电势差减小。根据 $C=Q/U$ ，可知插入有机玻璃板后，电容器电容量变大了。

(8)将有机玻璃板抽出，静电计指针又恢复到原来的偏角。再将硬橡胶板插入电容器两极板间，可见到跟操作(7)相似的现象，但静电计变化的角度与操作(7)不同。说明平行板电容器的电容量大小与两板间有何种电介质有关。

注意

(1)在操作过程中，手不能接触电容器两极板，以防漏电。

(2)绝缘支架，连接导线等的绝缘性能一定要好。

说明 如不用起电机，也可用玻璃棒（或橡胶棒）摩擦后使电容器带电。但应注意带电棒一定要接触电容器不接地的一块板。

方法二

器材 平行板电容器，数字电容表，导线，有机玻璃板等。

操作

(1)将平行板电容器与数字电容表用导线相连（如图）。

(2)数字电容表选用小量程档。电容器极板间距调至 3—4cm。

(3)将两板间距在 1—10cm 范围内变动，从数字电容表可见，极板间距变小时电容变大（可达 50PF）。距离变大时，电容变小（20PF 左右）。再增大电容板间距，数字电容表上仍有 20PF 左右的读数，这是导线等杂散电容所致。

(4)将两板间距调至 1cm,将其中一板上下平移,可见正对面积增大时,电容增大。正对面积减小时,电容减小。

(5)将两板间距调至 1cm,将电介质插入极板间,可见电容变大,抽出电介质时,电容变小。

注意

(1)人体不要接近电容器。

(2)电介质板在插入前最好在酒精灯火焰上掠过一下,以消除残留的电荷。不可用手或布在插入前摩擦电介质板,以免摩擦起电而影响实验效果。

方法三

器材 静电计,自制悬挂式电容器,木支架及有机玻璃,导线等。

悬挂式电容器的制作方法

如图, X、Y、Z 为有机玻璃制的支撑板, A、B 为圆形铝板,作平行板电容器极板用, C 为有机玻璃板。X、Y、Z 均悬挂在木制架的轴 OO' 上, B 板固定, C、A 板均可左右移动或转动。

操作

(1)将静电计与铝板 A、B 相连。静电机外壳接地。

(2)其他操作方法同方法一。(移动 A 板可改变 A、B 板间距离,转动 A 板可改变 A、B 两板正对面积,转动 C 板可改变 A、B 两板间电介质。)

测定空气的介电常数

目的 利用平行板电容器的高频充放电,测定空气的介电常数。

原理 在图(a)的电路中,交替接触式继电器 J 使用容器 C 交替地充电和通过电阻 R 及微安表放电。一般平行板电容器的电容在几十到几百 PF 的范围内,保护电阻用 100k Ω ,时间常数 RC 在 10⁻⁶—10⁻⁵s 的数量级上。如果 J 的频率 f 为几百 Hz,是可以保证电容器 C 充分地充电和放电的。充电电压 U 可以在伏特表上读出,放电电流 I 可以从微安表上读出。如电容器每次充放电量为 Q,则

$$I = fQ = fCU = f\epsilon_0 S U \left(\frac{1}{d}\right).$$

保持 f、S、U 等量不变,改变两块平行板之间的距离 d,可测得一系列不同的 I 值。以横轴代表 1/d,纵轴代表 I,作出 I—1/d 图,可得到一条直线。图线斜率 $k = f \epsilon_0 S U$,则空气的介电常数 $\epsilon_0 = k / (f S U)$ 。

器材 金属板两块(面积约 50 × 50cm²),聚乙烯绝缘小块 100 块(约 10mm × 10mm × 1mm),0—10V 直流电源,交替接触式继电器,低输出阻抗的信号发生器,电阻(100k Ω),微安表,伏特表(0—10V),米尺,游标卡尺等。

操作

(1)用米尺测量出金属板的面积 S。

(2)按图(a)接好实验线路,交替接触式继电器由低输出阻抗的信号发生器驱动。用四块聚乙烯绝缘小块垫在两块金属板的四角,形成一个空气介质电容器。

(3)接通电源后记下电压表的读数 U。调节信号源的频率 f,使微安

表的读数 I 尽量大一些。

(4) 将两块金属板四角的垫块各增加一块 (图 b), U 和 f 的值不变, 读出一个新的 I 值。如此重复十次以上, 得到十组以上的 (d, I) 值。

(5) 以横轴代表两金属板之间距离 d 的倒数 $1/d$, 纵轴代表电容器放电电流 I , 作出 $I \sim 1/d$ 图, 得到一条直线 (图 c)。用图解法或线性回归法求出图线的斜率 k , 空气的介电常数 $\epsilon_0 = k / (f \cdot S \cdot U)$ 。

注意

(1) 因为平行板电容器的电容量很小, 贮存的电量很少, 所以充放电的频率要尽量高, 才能使微安表有比较明显的偏转。但交替接触式继电器的频率是有限的, 约为 400Hz 。

(2) 在改变平行板电容器两板间的距离 d 时, 不能超过金属板边长的 $1/20$, 避免边缘效应过于明显。

(3) 因为金属板对实验桌有孤立电容, 所以 $I \sim 1/d$ 图线不通过原点, 有一个较大的截距。

电容器的充电和放电

方法一

器材 直流电源 (输出电压 14V 左右), 电解电容器 ($2200\ \mu\text{F}$, 耐压值大于 14V), 演示电表, 小灯泡 (额定电压 6V 左右), 单刀双掷电键, 导线等。

操作

(1) 演示电表调至 “VA” 档, 接上通路板 (安培表 100mA), 并将指针调到中央刻度位置;

(2) 按图接好电路, 使电源输出电压为 14V ;

(3) 键 K 打向 “1”, 电容器充电, 演示电表指针偏转;

(4) 键 K 打向 “2”, 电容器放电, 演示电表指针向另一边偏转, 同时能观察到灯泡闪光。

注意

(1) 电源输出电压不能过高, 否则实验不能重复做 (小灯要烧坏);

(2) 不能用演示电表的电流计档, 否则可能损坏电表, 并且看不到灯闪光。

方法二

器材 同样大小的莱顿瓶 2 个, 感应起电机, 放电叉, 金属板, 导线等。

操作

(1) 用感应起电机先给每个莱顿瓶充电。充电时莱顿瓶外面的铝箔接地, 用放电叉将莱顿瓶小球与起电机的一极相连, 摇动起电机。

(2) 将莱顿瓶如图 (a) 连接, 此时两莱顿瓶串联。可见串联莱顿瓶火花放电。

(3) 将莱顿瓶如图 (b) 所示方法连接, 此时两莱顿瓶并联。可见并联放电时火花要比串联时的放电火花明亮, 说明并联后电容器的电容量增大了。

说明 莱顿瓶可自制: 用几个同样大小的有盖的塑料杯, 在杯的下

半部的内外壁都粘贴一层铝箔，在杯盖的中心插入一细铜棒，并加以固定。棒的上端套入一小金属球，棒的下端悬一金属细链且与杯底接触。这样，就制成了几个相同的莱顿瓶。

方法三

器材 电解电容器，电流电源，定值电阻，双刀双位开关，灯泡，导线等。

操作

(1)按图接好线路，将开关置于1，使直流电源给电解电容器充电，数秒钟后断开电源。

(2)将开关置于2，在接通电路的瞬间，灯泡会发出强光。说明充电时储存在电容器内的电能通过灯泡放电时成为强电流，使灯泡闪光。

说明 此实验可说明电子闪光灯中主电容器的作用。闪光灯的原理是将低压直流电源（干电池）通过晶体管、变压器等原器件组成的直流电源变换器转换为高压交流电，通过整流向主电容器充电。摄影时，接通照相机快门，使引燃系统激发闪光管，促使闪光管内气体迅速电离。这时，主电容所储存的能量通过闪光管气体电离导通而使管内的氙气产生弧光放电，发生耀明的白光。

电容器的串联与并联

方法一

器材 自制电容器串并联示教板， $10\mu\text{F}$ 、 350V 电解电容器 5 个， $47\mu\text{F}$ 、 350V 电解电容 1 个，演示电压表（直流 $0\sim 250\text{V}$ ）2 台，直流高压电源，双刀双位开关，导线等。

操作

(1)在示教板上的 a、b 间接 $10\mu\text{F}$ 电容器，在 c、d 间接 $47\mu\text{F}$ 的电容

器。

(2)接通电源。把双刀双位开关拨到 H（如图），充电约 1 分钟。

(3)把双刀双位开关拨向 F，同时注意观察电容器通过电压表内阻放电的过程。可以看到，在开关刚拨向 F 时，两电压表都偏到相同的角度，说明放电的初始电压相同。然后电表指针都开始向零位移动，电表 V_2 的指针回到零位的时间较长，说明电容量大的电容器放电时间较长。

(4)在 c、d 间换接相并联的四个 $10\mu\text{F}$ 的电容器组。重复操作(2)、(3)。可见电表 V_2 的指针回到零点的时间较长，说明并联电容器组的总电容比原来大。

(5)在 c、d 间换接相串联的四个 $10\mu\text{F}$ 的电容器组。重复操作(2)、(3)。可见电表 V_2 的指针回到零点的时间较短，说明串联电容器组的总电容比原来小。

注意 实验中换接电容器时，一定要将充电后的电容器两极短路放电后才能换接。

方法二

器材 自制电容器串并联示教板，直流高压电源，纸介电容器（ $0.5\mu\text{F}$ 、 300V ）5 个，纸介电容器（ $2\mu\text{F}$ 、 300V ）1 个，氖管， 5.1M 电阻 2

个，双刀双位开关，导线等。

操作

(1)同方法一操作(1)、(2)、(3)。电容器放电时，可以看出 T_2 管发光的时间比 T_1 管发光的时间长，说明容量大的电容器放电时间较长。

(2)同方法一操作(4)。可见 T_2 管比 T_1 管亮的时间要长。说明 n 个电容器并联时，其总电容比每个电容器的电容要大。

(3)同方法一操作(5)，可见 T_2 管比 T_1 管亮的时间要短，说明几个电容器串联时，其总电容比每个电容器的电容要小。

说明 如氖管发光时间太短，可设法加大电容器电容，并适当提高电阻的阻值。

方法三

器材 电解电容器(47 μ F、10V)1个，电解电容器(10 μ F、10V)4个，交流毫安表，低压交流电源(6V、50Hz)，电键，导线等。

操作

(1)将一只47 μ F的电容器和一只10 μ F的电容器分别接在a、b处，记下毫安表的读数。可看到，当a、b处接的电容较大时，毫安表的读数也较大。

(2)将4个10 μ F的电容器并联后接在a、b处，可看到毫安表的读数比接一个10 μ F电容器时要大，说明电容器并联后的总电容量比原来每一个电容器的电容量要大。

(3)将4个10 μ F的电容器串联后接在a、b处，可看到毫安表的读数比接一个10 μ F电容时要小，说明电容器串联后的总电容量比原来每一个电容器的电容量要小。

测量电容器的电容

方法一

器材 低压电源变压器，万用表，电位器，电容器等。

原理 在电阻、电容器串联的交流电路里，有 $\frac{U_R}{R} = \frac{U_C}{X_C}$ 的关系，

所以 $C = \frac{U_R}{U_C} \times \frac{1}{2\pi f} \times \frac{1}{R}$ 。当 $U_R = U_C$ 时， $C = 3.18 \times 10^{-3} \times \frac{1}{R}$ 。

器材 油浸纸介电容器，电位器，降压变压器(输出10V)，万用表，导线等。

操作

(1)接成如图所示电路(电容器和电位器串联后接在变压器输出端上)。

(2)用万用表交流电压档分别测量电容器和电位器上的电压 U_C 和 U_R ，并反复调节电位器，直至 $U_C = U_R$ 。

(3)取下电位器，用万用表的欧姆档测量出它的电阻 R ，代入 $C = 3.18 \times 10^{-3} \times 1/R$ ，即可求出 C 。

说明

(1) 选用油浸纸介电容器绝缘好，介质损耗小，可近似看作纯电容。

(2) 电位器的选择可参考下表。

电容值	0.01 μF	0.1 μF	1 μF
电位器	470K	47K	4.7K

(3) 万用表选灵敏度较高的，一般要求交流 Ω/V 大于 4000。

方法二

原理 如图 (a) 所示电路，K 闭合后，充好电的电容器 C 开始向 R 放电。C 两端的电压 $U=U_0e^{-t/(CR)}$ ，式中 U_0 是 C 的初始电压，t 是从 K 合上开始计的时间。当 $t=CR$ 时， $U=U_0e^{-1}=0.368U_0$ 。

器材 电解电容器 (500 μF 、25V)，直流电压表 (0—15V)，蓄电池组 (6V)，电键 K，秒表，导线等。

操作

(1) 按图 (b) 将电压表与电容器并联，蓄电池组通过电键 K 与电容器连接。注意电解电容器与电源的极性不要接错。

(2) 合上电键 K，电容器被充电至电压 U_0 ，该电压由电压表读出。

(3) 打开电键，同时启动秒表计时。当电容器通过电压表内阻放电时，电压表读数下降，说明电压表两端电压下降。当电压表示数下降到某一值时，按停秒表。记下该时刻电压表的读数 U 和放电所用的时间 t，得到一组 (t, U) 值。

(4) 重复操作 (2)、(3)，得到 12 到 15 组 (t, U) 值。

(5) 以横轴代表时间 t，纵轴代表电压 U，作出 $U-t$ 图线。在 U 轴上找到 $0.368U_0$ 的位置后，在 t 轴上找到对应的 t，即可由 $C=t/R_V$ 估算出电容值 C。

说明 也可以用曲线化直的方法处理实验数据：根据 $U=U_0e^{-\frac{t}{RC}}$ ，

取对数可得
$$\ln U = \ln U_0 - \frac{t}{RC}。$$

所以可以作出 $\ln U-t$ 图线 (图 d)，用图解法 (或线性回归法) 求出该直线的斜率 k，则可通过式子 $C=1/(R_V k)$ ，求出所测电容器的电容值。

实例 某次实验中得到如下数据：

U(V)	5.9	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5
t(s)	0.0	1.2	2.6	4.4	7.1	11.4	15.8
$\ln U$	1.77	1.61	1.38	1.09	0.69	0.00	-0.69

作 $U-t$ 图，如图 (e) 所示。因为 $1/e=0.368$ ，所以在 $U-t$ 图上作 $U=U_0 \times 0.368=2.17$ 的水平线，与图线交点的横坐标是 6.6s。伏特表内阻 R 是 1.9808 Ω ，所以 $RC=6.6$ ，

$$C=6.6/(1.98 \times 10^3)=3.3 \times 10^{-3}(\mu\text{F})。$$

同样也可以用曲线化直的方法来处理实验数据，作 $\ln U \sim t$ 图，如图 (f) 所示。在图线上取两点 $P_1(2.0, 1.46)$ 、 $P_2(14.6, 0.50)$ ，求出直线的斜率

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{-0.50 - 1.46}{14.6 - 2.0} = -0.156。$$

$$C = \frac{1}{R} \times \frac{1}{k} = 3.2 \times 10^{-3} (\mu\text{F})。$$

验证电阻定律

方法一

目的 验证导体的电阻与其长度横截面积及导线的材料有关。

器材 自制电阻定律示教板，蓄电池组，安培表，伏特表，滑线变阻器，支架，电键，金属丝，连接用导线等。

电阻定律示教板的制作方法

如图 (a)，在长木板上固定五条金属丝。前三条长度相同、横截面积相同而材料不同；第 3、4 两条的材料相同，横截面积不同；第 3、5 条的材料与横截面积相同，但长度不同。在每根金属丝的两端安装标牌与接线柱，便于识别和接线。

操作

(1) 演示相同材料、相同横截面金属丝的电阻跟它的长度成正比时，用第 3、5 两根对比。按图 (b) 接线，滑线变阻器 R 起保护作用，电压用 2—4V。可见在相同的电压下，长度大的电流小，说明其电阻大；反之，长度短的，电流强度大，说明其电阻小。

(2) 演示由相同材料组成长度相同的金属丝的电阻与横截面成反比时，用第 3、4 两根。方法同操作 (1)，可见在相同电压下，截面积大的，通过的电流强度大，说明其电阻值小；反之，截面积小的，通过电流强度小，说明其电阻值大。

(3) 演示长度、截面积相同时，用不同材料制成的金属丝的电阻不同时，可选用第 1、2、3 根。方法同操作 (1)，可见在相同电压下，测得的电流强度均不同，因而金属丝的电阻不同，说明金属丝的电阻与做成的材料有关。

注意

(1) 应选择适当的伏特表、安培表量程。

(2) 每次对比测试，均应以电压表读数为定值。每次实验中通电时间尽量短些，以免电阻丝温度变化。

方法二

目的 验证导线的电阻与长度成正比，与横截面积成反比。

器材 自制实验板，长度、横截面积相同的电阻丝七根，欧姆表，导线等。

实验板的制作方法

如图所示，实验板两边各固定一列接线柱，两列接线柱之间的距离略小于电阻丝长度，然后将 7 根电阻丝安装在相应的各对接线柱之间。

操作

(1)用欧姆表测量 AA'之间的电阻 R_1 ，如果一根电阻丝的长度为 l_0 ，则得到一组数据 (l_0, R_1) ；用导线将 A'B'连接起来，用欧姆表测量 AB之间的电阻 R_2 （电阻丝长度增加了一倍），得到另一组数据 $(2l_0, R_2)$ ；再用导线将 BC 连接起来，用欧姆表测量 AC'之间的电阻 R_3, \dots ；直至取得第七组数据 $(7l_0, R_7)$ 。

(2)以横轴代表电阻丝的长度 l ，纵轴表示电阻 R ，作出 $R \sim l$ 图。如果得到一条直线，则说明电阻丝的电阻 R 与它的长度 l 成正比。

(3)拆除所有连接导线。用欧姆表测出 AA'之间电阻 R_1 ，如果一根电阻丝的横截面积为 S_0 ，则得到一组数据 (S_0, R_1) ；用导线将 AB、A'B'连接起来，再用欧姆表测出 AA'之间电阻 R_2 （电阻丝截面积增加了一倍），得到另一组数据 $(2S_0, R_2)$ ；再用导线将 BC、B'C'连接起来，……，直至取得第 7 组数据 $(7S_0, R_7)$ 。

(4)以横轴代表电阻丝的截面积 S ，纵轴代表电阻丝的电阻 R ，作出 $R \sim S$ 图，得到一条双曲线。再作 $R \sim 1/S$ 图，可得到一条直线，说明电阻丝的电阻与它的截面积成反比。

导体电阻与温度有关

方法一

目的 验证金属电阻率随温度的升高而增大。

器材 220V、40W 白炽灯，电池组（一号干电池 8 节串联），单刀电键，卡口灯座，万用示教电表，导线，火柴等。

操作

(1)先在灯泡的玻璃与灯头连接处用砂轮磨个小孔，让空气充入。再沿接口处磨一周，用尖嘴钳将灯泡玻璃逐块夹去，要保持灯丝完整无损。

(2)按图接好电路，合上电键后，电流表指示在 100mA 左右。

(3)用一根火柴加热灯丝，可见电流表指示的电流值开始下降。说明了钨丝的电阻率随温度的升高而增大。电流表指示最小读数在 50mA 左右。移开火柴后，电流表读数会很快恢复到 100mA 左右。

注意 用火柴对灯丝加热时，火焰应对准灯丝的某一部位，不要移动，以取得较明显的效果。

方法二

器材 额定电压 6.3V 的小灯泡，伏特表，安培表，电源，滑动变阻器（0 50 Ω ），导线，电键等。

操作

(1)按图接线。合上 K，调节 R，使伏特表读数从 0.5—6.3V 之间变化，对应地读出安培表读数，记录数据。

(2)以横轴代表电压 U ，纵轴代表电流 I ，作出 $I \sim U$ 图线，得到一条向下弯曲的曲线。因 $I \sim U$ 图线各点切线的斜率逐渐减小，说明通过灯丝的电流逐渐增加时，灯丝温度升高，灯丝的电阻增大，即灯丝的电阻率随温度的升高而逐渐增大。

测定导体的电阻率

方法一

目的 测定金属的电阻率。

器材 米尺（最小刻度为毫米），螺旋测微器，直流安培表，直流伏特表，滑动变阻器（阻值范围 $0 \sim 5 \Omega$ ），直流电源，电键，长约 0.5m、直径约 0.3mm、阻值约为 3Ω 的待测金属导线，连接用导线若干。

操作

(1) 用螺旋测微器测出金属导线的直径 \bar{D} ，再计算出金属导线横截

面积 $S = \frac{\pi}{4} \bar{D}^2$ 。

(2) 用米尺测量接入电路的待测金属导线 ab 的长度 l 。

(3) 如图接好电路，将滑动变阻器 R' 置于阻值最大的位置。选用安培表与伏特表适当的量程。

(4) 闭合电键 K，调节滑动变阻器，记录 7 到 9 组安培表和伏特表的读数。

(5) 根据部分电路欧姆定律 $R = U/I$ ，求出电阻的平均值 \bar{R}_x 。

(6) 由电阻定律 $R = \rho \frac{l}{S}$ ，得 $\rho = R_x \cdot \frac{S}{l}$

注意

(1) 金属导线长度 l ，应测接入电路的那部分长度，且应拉直后测量三次以上。

(2) 选几个不同位置测量金属导线的直径，求其平均值 D 。

(3) 通过金属丝的电流不宜过大，时间不宜过长，防止由于温度的升高而导致电阻率的变化。

(4) 要尽量减小接触电阻。

(5) 金属丝外层有绝缘层时，实验前应将绝缘层除去。

分析

因为
$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{S}{l},$$

所以
$$E_\rho = E_U + E_I + E_S + E_l.$$

如果 U 和 I 是用 2.5 级表测量的，可认为 $E_U = E_I = 3\%$ ； l 的读数误差为 0.5mm， l 为 50—80cm，那么 $E_l = 0.1\%$ ，可忽略； D 的一致性较差， E_S 可取为 5%，这样 E_ρ 约在 10—15% 之间。

方法二

器材 箱式惠斯登电桥，有毫米刻度的米尺，螺旋测微器，直流电源，待测电阻率的金属丝若干，电键，导线等。

操作

(1) 在金属丝的几个地方（如有绝缘层应加以清除），用螺旋测微器测出它的直径 D ，并算出金属丝截面积的平均值 \bar{S} 。

(2) 按图将金属丝接入电桥待测端。按箱式电桥操作方法测出金属丝

的电阻值 R_1 。

(3)用毫米刻度尺测出接入电路的金属丝长度 l_1 ，得到一组 (I, R) 数据。

(4)换用不同长度的金属丝，重复操作(2)、(3)。共重复 5 次，得到 5 组 (I, R) 数据。

(5)以 R 为纵坐标， I 为横坐标，作出 $R \sim I$ 图线，并求出其斜率 k ，再由 $\rho = k \cdot \bar{S}$ 算出金属丝的电阻率。

注意 同方法一。

研究欧姆定律

在本实验中，要特别注意由于电表内阻所带来的系统误差。在实验时，应根据 R_X 、 R_V 、 R_A 三者的相对大小来选择适当的线路，必要时对测量结果进行修正。在实验中，应选用精度较高的电表，以减小测量误差。

目的 以图线法研究部分电路欧姆定律。

器材 演示用大型电表 2 台，低压直流电源，电阻箱，滑动变阻器，单刀电键，导线等。

操作

(1)按图(a)接线。电阻箱 R_X 选用小于 20 Ω 的电阻时，可用如图接法，系统误差较小。

(2)保持 R_X 的阻值不变，调节滑动变阻器 R' ，改变加在 R_X 上的电压，可以从伏特表和安培表上读得若干组 (I, U) 值。

(3)以 I 为纵坐标，以 U 为横坐标作出 $I \sim U$ 图线。可得一条过原点的直线，如图(b)。说明当电阻阻值不变时，通过它的电流和加在它两端的电压成正比。

(4)改变 R_X 的值，同时调节 R' ，使 R_X 上的电压保持不变，可从电阻箱和安培表上读得若干组 (R, I) 值。

(5)以 I 为纵坐标， R 为横坐标作出 $I \sim R$ 图线。将此图线和本书基础篇第 50、51 页中各种图线对照、比较像反比曲线。因此再作 $I \sim 1/R$ 图线，得到一条过原点的直线，图(c)。说明当电压不变时，电阻上的电流与其阻值成反比。

(6)用多变量复合的方法，可得到 $I = \frac{U}{R}$ 的结论。具体方法见实验 63 的按语。

焦耳定律

电流做功的过程是电能和其他能量的转换过程。当电流通过导体时，导体的温度升高，就是电流做功转换成了导体的内能。焦耳定律就是描述电功转化为电热的规律。焦耳定律的演示方法通常用热膨胀来间接显示电流的热效应。方法一通过气体热膨胀来定性演示，方法二通过液体热膨胀来定量演示。我们还可以用类似的手段来设计其他多种的演示方法。

方法一

目的 用气体膨胀定性地演示电流的热效应和电流强度、电阻、通电时间之间的关系。

器材 50ml 烧瓶 3 只，电阻丝（6、3、2）3 根，橡皮塞 3 个，60cm 长为 4mm 的玻璃管 3 支，三通玻璃管（T 形）3 个，橡皮管，电源，导线等。

操作

(1) 按图（a）进行装配。并在三个细管中相同位置上放置有色水柱。

(2) 将电源按图（b）连接。用夹子将与烧瓶口连接的 T 形玻璃管上的橡皮管夹住（图 a 中 A 处，未详细画出），使烧瓶内的空气被密封。合上开关，在几秒内，就可观察到水柱上升的高度有明显的差异，从而得出电流热效应与电阻的定性关系。

(3) 将电路按图（c）改接。重复操作（2）。可得到电流的热效应与电流强度的定性关系。

(4) 对上述结果进行对比、分析，可以得出电流的热效应与电流强度、电阻、通电时间之间的定性关系。

方法二

目的 演示通电导体放出的热量跟电流强度、电阻和通电时间之间的关系。

器材 150ml 平底烧瓶 3 个，橡皮塞 3 个，细玻璃管（长约 20cm、内径 2—3mm）3 根，2 电热丝 4 根，演示用大型电表 2 台，10 滑动变阻器 2 个，低压电源，单刀开关，电钟，粗铜丝和煤油等。

操作

(1) 在三个完全相同的平底烧瓶的橡皮塞上各穿一根相同的细玻璃管和两根粗铜丝，在粗铜丝下端分别接上 2、2 和 4 的电热丝。在烧瓶中装满煤油后加上橡皮塞，使三个烧瓶的细玻璃管中的煤油面在同一水平面上。用橡胶圈套在细玻璃管上作为煤油液面初始位置的标记。

(2) 将三个平底烧瓶和两个电流表、两个滑动变阻器与开关等，按图连接起来。 A_1 表读出的是 A 瓶中电热丝上电流的大小， A_2 表读出的是 B、C 瓶中电热丝上电流的大小。

(3) 合上开关，同时开始记时。在 C 管上，每隔一定时间（如半分钟或一分钟）在液面相应位置处用橡胶圈作出标记。经一定时间（例如 4 分钟或 5 分钟）后打开开关。立即在 A、B 和 C 管上用橡胶圈记下当时液面的位置。

(4) 分析 A、B 管中液面的高低，可见当电阻值与通电时间相同时，通过的电流强度较大的 B 管中煤油液面上升较高，即 B 容器中电流产生的热量较大。如果调节 R' ，使 $I_2=2I_1$ ，则 B 管中煤油上升的高度约是 A 管的 4 倍。

(5) 分析 B、C 管中煤油液面的高低，可见当电路中电流强度和通电时间相同时，电阻值较大的 C 管中煤油面上升得较高，即 C 容器中电流产生的热量较大。在 $R_C=2R_B$ 时，C 管中煤油面上升高度约为 B 管的两倍。

(6) 分析 C 管中煤油液面上升的情况，可知当电阻值和电流大小保持不变时，通电时间越长，煤油上升得越高。而且可以看到，在每个相等

的时间间隔内，煤油上升的高度均相同。即说明电流产生的热量与通电时间长短成正比。

通过上述实验与半定量的分析，可以得出结论：电流通过导体时产生的热量，跟电流强度的平方成正比，跟导体的电阻成正比，跟通电的时间成正比。

注意 在烧瓶中装煤油时瓶内不能留有气体。

证明 根据液体的体胀定律

$$V_t = V_0(1 + \beta \Delta t)$$

可知 $\Delta V = V_t - V_0 = V_0 \beta \Delta t$ 。

又因为电功 $W = mc \Delta t$ ，

所以 $W = \frac{mc}{V_0 \beta} \cdot \Delta V$ ，

即电流做的功与液体体积的增量成正比，因此可以用液柱的升高来表示电流做的功。

测定小灯泡的功率

测定小灯泡的功率是初中物理的一个较复杂的实验。用滑线变阻器调节，使小灯泡在额定电压与其他电压下发光，根据伏特表与安培表的读数，来计算小灯泡的额定功率和非额定功率。值得指出的是小灯泡是一种非线性元件，其电阻是个变量。小灯泡是有其自身的伏安特性规律的，它反映了灯泡钨丝电阻与温度之间的关系。

器材 学生电源，滑动变阻器（0 10 Ω），小灯泡（2.5V），小灯座，直流伏特表（0 3V），直流安培表（0 0.6A），单刀开关，导线若干。

操作

(1)按电路图正确连接电路，注意电键必须打开，电表正负极必须连接正确。

(2)调节电表的指针均在零刻度，选择适当的量程。将滑动变阻器放在阻值最大的位置。试触电键，观察两电表指针偏转是否正常。

(3)接通电源，调节滑动变阻器，使伏特表读数低于小灯泡的额定电压，观察两电表读数，记录在表内。并观察小灯泡的实际亮度。

(4)调节滑线变阻器，使小灯泡上的电压达到额定电压，记录两电表读数。观察小灯泡正常发光时的亮度。

(5)再调节滑线变阻器，使小灯泡上的电压略高于额定电压（不超过额定电压的 1/5）。记录两电表读数。并观察小灯泡发光亮度。

(6)从所得数据可以看出，小灯泡的实际功率是随外加电压的增加而增加的。而小灯泡的发光亮度也随实际功率的增大而增大。

串联电路中的电流强度、电压和电阻

器材 安培表，伏特表，定值电阻 1 套，电键，电源，导线等。

操作

(1)按图将器材连接好。

(2)把安培表分别串联在图中的 M、N、P 各位置，从安培表的读数可得到串联电路中各处的电流强度相等的结论。

(3)用伏特表分别并联在 R_1 、 R_2 、 R_3 及总电阻的两端(如图所示的位置)。从伏特表的读数，可得到串联电路两端总电压等于各部分电路两端电压之和的结论。

(4)用上述测量的结果，根据欧姆定律分别算出电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和总电阻(串联等效电阻) R 的值，可得到串联电路总电阻等于各串联导体电阻之和的结论。

说明

(1)演示可用大型电灯(J0401型)，便于观察。电源用学生低压电源(J1201型)，宜取稳压6V或9V，便于测量和计算。

(2) R_1 、 R_2 、 R_3 可分别选用5、10、15的定值电阻，它们允许通过的最大电流分别是1.5A、1A、0.6A，阻值误差是 $\pm 1\%$ ，安培表可用大型电表0—1A档，伏特表用大型电表0—10V档。J1201型低压电源的稳压输出允许输出的最大电流为1A，这样易得到准确、稳定的电压值。

串联电路中的功率分配 220

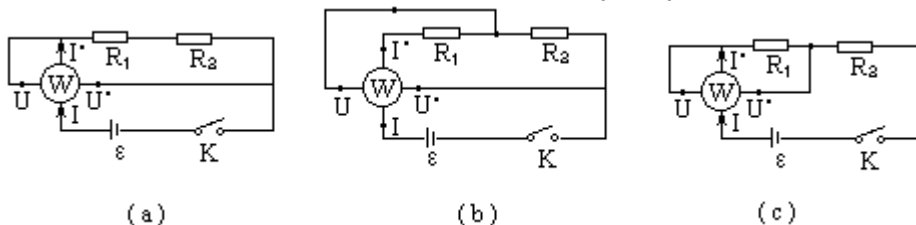
下列实验采用不同的手段来演示串联电路中的功率分配关系。方法一直接用瓦特表测串联电阻的实际功率，方法二用液体温升半定量地显示串联电路中电阻丝的实际功率和其阻值的关系，方法三用安培表和伏特表测出电阻中的电流及电压后计算电功率，得出串联电路中电阻的电功率与其阻值成正比的结论。在操作中，应注意到电路中的实际电流不要超过电阻的额定电流。

方法一

器材 演示用瓦特表，电阻圈，低压电源，导线等。

操作

(1)将“25V、1A”的表盘插在瓦特表上，这时瓦特表的量程是“0—25W”。将电阻圈15和20串联后，与14V直流电源及单刀开关相连。将瓦特表的电流线圈的两接线柱串接在电路中，电流由接线柱“I”端流入瓦特表，由接线柱“I*”端流出。将电压线圈的两接线柱“U”和“U*”分别与待测功率的电阻 R_1 的两端连接，“U”端接电势较高端，“U*”接电势较低端如(图a)。



(2)合上开关，从瓦特表读数可知待测电阻 R_1 上的电功率 P_1 。

(3)切断电源，将瓦特表“U”和“U*”端并联到 R_2 的两端，“U”接电势较高端。合上开关，从瓦特表读数可知待测电阻 R_2 上的电功率 P_2 如(图b)。

(4)切断电源，将瓦特表“U”和“U*”端并联到 R_1 和 R_2 串联电路的两端，“U”仍接电势较高端。合上开关，从瓦特表读数可知待测电路 R_1 和 R_2 串联后的总功率 P

如(图c)。

(5)从测量的结果,可得出串联电路中电功率与电阻大小成正比,即

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

的结论。同时也可得出串联电路中各部分电路功率之和等于总功率,即 $P=P_1+P_2$ 的结论。

注意

接线时要特别注意瓦特表上四个接线柱的接法正确与否。若发现电表指针反转,说明有一组线圈接反了,应及时切断电源,重新连接。

方法二

器材 自制电热升温管,低压电源,带色酒精,单刀开关,导线若干。

电热升温管的制作方法

取大试管2支,带细长玻璃管的橡胶塞2个,2 Ω 和6 Ω 电阻丝各一段,粗铜丝若干,装配如图。在向试管内装入有色酒精时,要注意不能留有空气,并调节两管中液面的初始高度等高。用小橡皮圈套在细管上,记下它们的初始高度。

操作

(1)将两试管中电阻丝的引出端用导线连成串联结构,接上低压电源(8—10V)和单刀开关。

(2)合上开关,可见管内有有色酒精受热后膨胀,使细管中液面缓缓上升。待1—2分钟后,可见两细管中液面高度有显著差异时,用小橡皮圈再次标出管内液面高度。切断电源。

(3)用毫米刻度尺量出液面升高的高度,其高度差之比与管内电阻丝阻值之比近似成正比。说明了在相等时间内,串联电路上的不同电阻放出的热量与电阻的阻值成正比。

说明 电热升温管中电阻丝产生的热量与管中液体体积的增量成正比,因此可用细管中液柱的升高来表示电阻丝放出的热量。

方法三

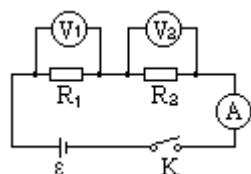
器材 电阻圈2个(5 Ω 和10 Ω),演示用电表3台,低压电源,开关,导线等。

操作

(1)将电阻圈、安培表(0—1A)、电压表(0—10V)、电源(9V)及单刀开关如图连接。

(2)合上开关,可以读出串联电路中的电流强度I,在电阻 R_1 上的电压 U_1 及电阻 R_2 上的电压 U_2 。

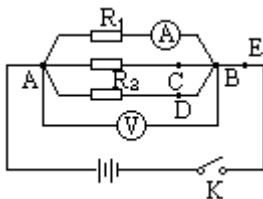
(3)分别利用 $P=IU$ 计算 R_1 和 R_2 上的电功率 P_1 和 P_2 。可以得出串联电路各电阻的电功率和其阻值成正比的结论。



并联电路中的电流强度、电压和电阻 221

器材 安培表，伏特表，定值电阻 1 套，电键，电源，导线等。

操作



(1)按图将器材连接好。

(2)再将安培表分别串联接在图中所示位置及 C、D、E 各点，分别测出 I_1 、 I_2 、 I_3 和干路中的电流 I ，可得到并联电路中总电流等于各支路中的电流强度之和的结论。

(3)把伏特表并联接在图中所示 A、B 两点，测出总电压。再将伏特表分别接在每个电阻圈两端的接线柱上，分别测出每个电阻上的电压，可得到并联电路总电压等于它的各支路电压的结论。

(4)用上述测量的结果，根据欧姆定律分别算出电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的总电阻（并联等效电阻） R 的值，可得到并联电路总电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和的结论。

注意

(1)实验中尽量不要改变安培表的量程，否则将会产生一定的误差。

(2) R_1 、 R_2 、 R_3 的电阻值用伏特表、安培表测出，有一定误差，可改用其他方法较精确地测定电阻值。

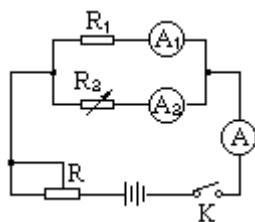
(3)为了使测量结果的数字简单，可用 10 和 15 两个电阻圈组成并联电路，此时总电阻 $R=6$ 。若取 $U=6V$ ，则 $I=1A$ ，安培表只用 0—1A 档即可测出 I_1 、 I_2 和 I 值，实验误差小。

222 并联电路的分流作用

方法一

器材 电阻圈（5、10），演示用电表 3 台，低压电源，电阻箱（0—9999），单刀开关，滑动变阻器（0—50），导线等。

操作



(1)根据实验要求连接线路，演示电表可并列放置在一起，便于读数和比较。滑动变阻器 R 置于最大。使电阻箱 R_2 的阻值与 R_1 的阻值相同。

(2)合上电键，调节滑动变阻器 R ，使电路中总电流为某个整数（便于读数和

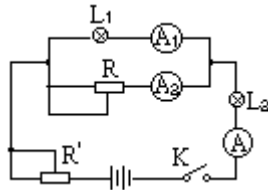
比较)。测出 I 、 I_1 、 I_2 。可以得出， $I=I_1+I_2$ 。

(3)调节变阻箱 R_2 的值，使 R_2 的值为 R_1 的若干倍。测出 I 、 I_1 、 I_2 。可以得出 $I=I_1+I_2$ 。同时可得出，分路阻值越大，分路电

流越小，两分路的电流强度 I_1 、 I_2 与其阻值 R_1 、 R_2 成正比。成反比。即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}。$$

方法二



器材 两个不同规格的小灯泡（如 3.6V、0.5A 和 1.1V、0.3A），滑动变阻器 2 只（0—200 和 0—10 ），演示用电表 3 台，低压直流电源，单刀开关及导线若干等。

操作

(1)根据实验要求连接线路，演示电表可并列放置在一起，便于读数和比较。使滑动变阻器 R （0—10 ）置于最大，另一滑动变阻器 R' （0—200 ）置于最小。

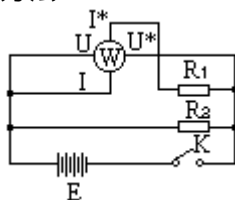
(2)合上电键，调节 R ，使 L_2 （3.6V、0.5A）中的额定电流达到 0.5A， L_2 正常发光。此时， L_1 被 R 分流，电流很小，不能正常发光。

(3)将 R 逐渐调大同时调节 R' ，使 L_1 的电流达到 0.3A， L_2 中电流不变，此时 L_1 、 L_2 都正常光。说明并联电路具有分流作用能使不同规格的用电器同时正常工作。

并联电路中的功率分配 223

本实验用三种不同的方法演示。方法一是用瓦特表直接测定并联电阻上的实际功率，验证并联电路上功率分配的规律。方法二利用电阻丝通电后的热效应，使酒精沿细玻璃管上升不同的高度，半定量地判定并联电阻丝的功率分配规律。方法三用电流表、电压表测出总电阻上的电流和电压值，并定量地说明其功率分配与电阻值成反比。

方法一



器材 演示瓦特表，定值电阻（5 、10 ），低压电源，开关和导线等。

操作

(1)按图接线，瓦特表的电流线圈的两个接线柱要串联在待测电路中，并使电流由 I 流入，I*流出。瓦特表的电压线圈的两个接线柱要和待测电路（如 R_1 或 R_2 ）并联，使 U 端接高电势点，U*接低电势点。E 为低压直流电源，可用 6V 或 8V。瓦特表插入 2.5V、1A 的表盘。合上电键，测出电阻 R_1 上消耗的电功率。

(2)将瓦特表改串在 R_2 的电路中，接线方法与上同。测出 R_2 上消耗的电功率。

(3)将瓦特表串入总电路中，测出 R_1 和 R_2 消耗的总功率。

实验表明，并联电路的功率分配与电阻的大小成反比。电路的总功率等于各部分电路功率之和。

方法二

器材 大试管，橡胶塞，细玻璃管，电阻丝，粗铜丝，导线，有色酒精等。

操作

(1)用电阻丝制成 2 和 8 的电阻圈，焊牢在粗铜丝两端，将大试管内注入有色酒精后注入有色酒精后加上橡皮塞，留心试管及细玻璃管内不应有气泡。将两个装有不同的阻值电阻丝的大试管安装在一块竖直放置的白色木板上（如图）。

(2)按图将两大试管内的电阻丝（8 和 2）并联起来。电源电压取 3V。

(3)合上电键，待 1—2 分钟后，可见两细玻璃管中红色酒精柱由于热膨胀而上升。液柱的上升高度与两电阻丝的电功率成反比。因为在同样的时间内电阻丝的热量与阻值大小成正比。有 $P_1R_1=P_2R_2$ 。

方法三

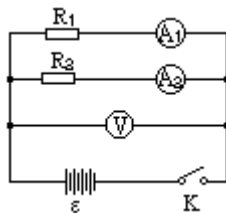
器材 电阻圈（10、15），演示电表 3 台，低压直接电源，单刀开关，导线等。

操作

(1)将 R_1 （10）与演示电表 A_1 相串，将 R_2 与演示电表 A_2 相串。安培表取 0—1A，伏特表取量程 0—10V，电源取 6V。按图正确接线。

(2)合上电键，读出电源两端电压和两电阻中电流 I_1 和 I_2 切断电源。

(3)根据读数，算出 R_1 和 R_2 上的实际电功率 P_1 和 P_2 的值。可见并联电路电功率与电阻的大小成反比，有 $P_1R_1=P_2R_2$ 。

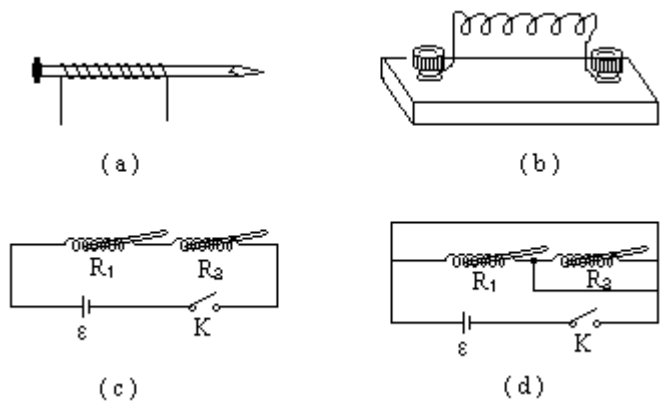


串并联电路的电热分配 224

器材 自制电热丝电阻，学生电源，单刀单位开关，导线等。

电热丝电阻的制作方法

用电热丝在大号铁钉上如图(a)绕制，做成如图(b)的电阻，要求 R_1 的阻值约为 R_2 的 1.5—2 倍。



操作

(1)按图(c)接线， R_1 和 R_2 串联，在电热丝电阻中分别插入火柴，使火柴头位于电热丝的中部。

(2)学生电源用直流输出档，2—14V 可调。通电后，可看到电阻 R_1 中的火柴较 R_2 中的火柴先引燃，说明在串联电路中，阻值大的电阻其电热也大。

(3)按图(d)接线，使 R_1 和 R_2 并联，重新在电热丝中插入火柴，使火柴头在电热丝中部。

(4)通电后，可看到 R_2 中的火柴较 R_1 中的火柴先引燃，这说明在并联电路中，阻值较小的电阻其电热较大。

注意 在每次火柴被引燃后，务必仔细清除燃烧后的残留物，否则会显著影响演示效果。

225 将电流表改装为伏特表

方法一

器材 标准伏特表(量程与改装伏特表相同)，电流表，电阻箱(0—9999)，滑动变阻器(5—50)，低压直流电源，单刀开关，导线等。

操作

(1)首先测出待改装电流表的电阻。

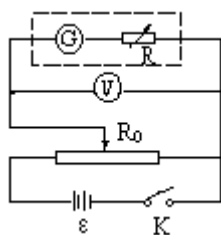
(2)从电流表刻度盘直接读出满偏电流 I_g ，由 $U_g = I_g R_g$ 算出这只电流表本身的满偏电压值。

(3)根据要求改装的伏特表量程 U ，算出改装伏特表应串联的分压电阻值

$$R = \frac{U - I_g R_g}{I_g}。$$

(4)将电阻箱调到 R 值，把电流表与电阻箱串联，这样就改装成一个伏特表。

(5)按图接成校对伏特表的电路。图中 V 是标准伏特表，虚线框内是改装好的伏特表， R_0 是滑动变阻器。



(6) 闭合 K，把滑动变阻器的触头从最右端逐渐向左移动，使标准伏特表的示数分别为 0.5V、1.0V、1.5V、2.0V、... 时，在改装伏特表上读出相应的电压值。打开开关，拆除线路。

(7) 以横轴表示标准伏特表的读数，纵轴表示改装伏特表的读数，在图上描写各个校准点，然后用折线将各校准点（包括原点）依次连接起来，便得到一校准图线。使用改装伏特表测量电压时，可根据表上读到的电压数，利用校准图线找到真正的电压值。

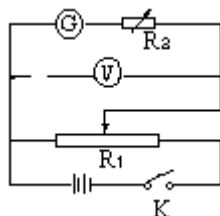
说明

(1) 校准图线一般作成折线。中间取的数据点越多，校准准确度越高。

(2) 校准电路中的滑动变阻器必须接成分压器电路，而不能接成变阻器电路，否则无法校准零点附近的电压值。

方法二

器材 电流表，电阻箱（0—9999 Ω），滑动变阻器（0—50 Ω），标准伏特表（量程与改装伏特表相近），低压直流电源，电键，导线等。



操作

(1) 如图连接电路。将滑动变阻器 R_1 的滑动触点放在最左端，电阻箱 R_2 的阻值调成最大值，然后合上电键 K。

(2) 调节 R_1 ，使伏特表的读数为其量程的 $1/10$ 。然后调节 R_2 ，使电流表的指针也偏转其满偏刻度的 $1/10$ 。

(3) 继续调节 R_1 ，使伏特表满偏。再仔细调节 R_2 ，使电流表也满偏，伏特表即改装成功。

(4) 用与方法一操作(5)、(6)、(7)相同的方法校准改装的伏特表并作出校准图线。

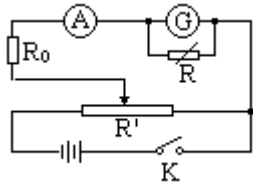
说明

(1) 如果电阻箱 R_2 阻值调到最大，改装伏特表的偏转角度仍大于标准伏特表，可以在电阻箱上再串联一个大阻值电阻（不必知道它的准确阻值。）

(2) 本方法不用测量电流表内阻和计算分压电阻的大小，将改装和校准两个步骤合二为一，准确，易行。

方法一

器材 电流表（或毫安表），标准安培表，低压电源，电阻箱，定值电阻，滑动变阻器，单刀开关，导线等。



操作

(1) 从待改装的电流表读出满偏电流 I_g ，并用实验所述的方法测出电流表内阻 R_g 。

(2) 根据 $n=I/I_g$ ，算出电流表量程扩大的倍数，再由 $R=R_g/(n-1)$ 算出分流电阻值。

(3) 将电阻箱调节为分流电阻值，并联在待改装的电流表的两个接线柱上，组成量程为 I 的安培表。

(4) 将改装好的安培表进行校准。按图接线。这滑动变阻器 R' 触点调到最右端后，合上开关 K ，调节 R' ，依次读出相应的改装安培表和标准安培表的读数，直至满量程。

(5) 以横轴表示标准安培表的读数，纵轴表示改装后安培表的读数，在图上描出各个校准点，然后用折线将各校准点（包括原点）依次连接起来，便得一校准图线。使用改装安培表时，可根据表上读到的电流值，利用校准图找到相应的真正的电流值。

注意

(1) 电阻箱的各线绕电阻都有不同的最大电流，阻值越小的绕阻允许通过的电流越大。将电阻箱用作改装安培表的分流电阻时，要注意所分电流不能超过绕阻的最大电流。

(2) 校准电路中的滑动变阻器必须接成分压器电路，而不能接成变阻器电路，否则无法校准零点附近的电流值。

方法二

器材 电流表，标准安培表，电阻箱，滑动变阻器（0—50 Ω），低压直流电源，定值电阻，电键，导线等。

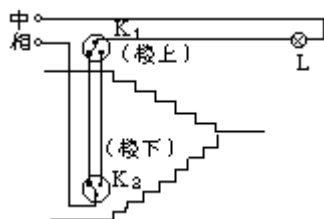
操作

(1) 如方法一图连接电路。将滑动变阻器 R' 的触点放在最右端，电阻箱 R 的阻值调成零，然后合上电键 K 。

(2) 调节 R' ，使安培表的指针满偏，然后调大 R 的阻值，使电流表的指针也满偏。反复调节 R' 和 R ，使两个表的指针都满偏。安培表即改装成功。

(3) 用与方法一操作(4)、(5)相同的方法校准改装的安培表并作出校准图线。

注意 同方法一。



方法一

目的 演示两个地点控制同一盏灯。

器材 单刀双位开关 2 只，灯头，灯泡，导线等。

操作

(1) 将一块面积为 $40 \times 50\text{cm}^2$ 左右的木板漆成白色，装上支架，竖直放置在讲台上。

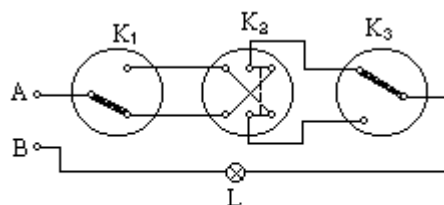
(2) 按图接线，中性线进灯头（用绿色导线），相线进开关（用红色导线）。单刀双位开关 K_1 为楼上的开关， K_2 为楼下的开关。

说明

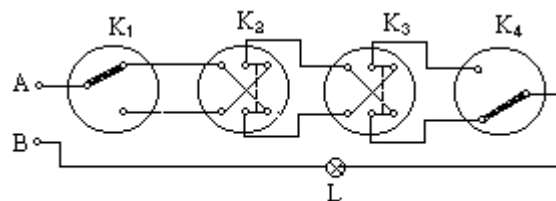
(1) 当一个电器设备需要在两个不同位置进行控制时，都可以用这种方法。只要在灯泡 L 所在处换上其他用电器即可。

(2) 安装家用电路尤其讲究布线的整齐与规则性，对简单家用电路亦应如此。

方法二



(a)



(b)

目的 演示三个（或多个）地方控制一盏灯。

器材 单刀双位开关 2 只，双刀双位开关，木板（约 $40 \times 50\text{cm}$ ）灯座，灯泡，导线若干等。

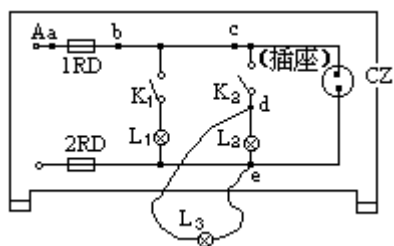
操作 在示教用木板上按图接线。其中 A 为相线，B 为中性线。示教板装上木支架，便于竖直地放置在讲台上进行演示。图中 K_1 和 K_3 为单刀双位开关， K_2 为双刀双位开关。L 为用电器。装上灯泡后，即可演示。

说明 本方法还可扩展为多处控制一个用电器。图 (b) 就是四处控制一个灯的电路。

方法三

目的 用灯泡检查照明电路的故障。

器材 室内照明电路示教板，灯泡（220V、40W），灯头，接线棒，导线若干。



操作

(1) 准备一块照明电路示教板（如图）， L_1 、 L_2 为两个灯泡，1RD 和 2RD 为两个熔丝盒， K_1 、 K_2 为两个开关，CZ 为插座。从 A、B 端接出一插头，即可接上市电，进行演示。

(2) 若 L_1 、 L_2 两灯熄灭，1RD 熔丝已断，说明线路中存在有短路故障，这时不能贸然换上新熔丝。用一个“220V、40W”灯泡，从灯头两端引出两接线棒，作为检查灯也叫“挑担灯”。若检查灯搭接在 1RD 熔丝两端 a、b 两点，灯正常发光，说明线路中有短路处。先后卸下 L_1 、 L_2 两灯泡和插座中的家用电器，若发现某时挑担灯不亮了，说明这就正是故障所在。

(3) 若只有个别用电器（如 L_2 灯不亮）有故障，可能是线路中发生了断路现象。将挑担灯搭接在 K_2 两端的 c、d 处，若 L_2 、 L_3 均亮，说明开关 K_2 中有断路故障。若搭接在灯 L_2 两端 e、d 处，如 L_3 正常发光，说明故障在 L_2 的灯座中，可能是 L_2 的灯丝已断。

228 电池的串联与并联

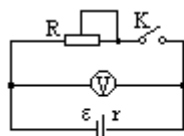
方法一

目的 演示串联电池组的总电动势、总内电阻和单个电池电动势、内电阻的关系。

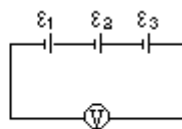
器材 可调内阻电池三个，教学用电阻箱，伏特表，单刀开关，导线等。

操作

(1) 测出每个电池的电动势 ε_1 、 ε_2 和 ε_3 以及每个电池的内电阻 r_1 、 r_2 和 r_3 ，按图接线，断开 K，伏特表的读数即电池的电动势。合上 K，调电阻箱 R 值，使 $U = \varepsilon/2$ 时，电阻箱读数 $R=r$ 。



(a)



(b)

(2) 将三个电池串联如图。测出串联电池组的总电动势 $\varepsilon_{总}$ 。可得 $\varepsilon_{总} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ 的结论。

(3) 用测单个电池内电阻的方法，测出串联电池组的内阻 $r_{总}$ 。可得 $r_{总} = r_1 + r_2 + r_3$ 的结论。

说明

(1) 由于干电池、蓄电池内阻很小，不宜用来作演示串联电池组内阻与单个电池内阻关系的实验。

(2) 可调内阻电池的电动势约在 2V 左右，其内阻大小可视实验需要调节。

(3) 实验将路端电压近似地看作电动势，因此宜选用高内阻的伏特表。

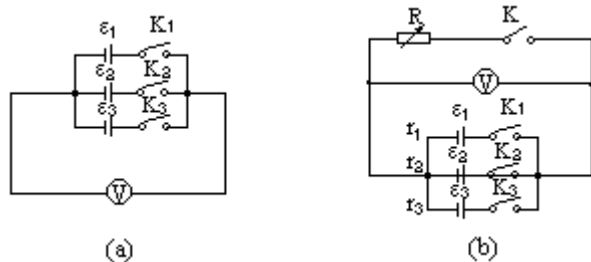
方法二

目的 演示并联电池组的总电动势、总内电阻和单个电池电动势、内电阻的关系。

器材 可调内阻电池 3 个，教学用电阻箱，伏特表，单刀开关 3 个，导线等。

操作

(1) 同方法一的操作(1)。



(2) 将三个电池并联（如图 a），3 个开关均合上时，测出并联电池组总电动势。可得 $\varepsilon_{\text{总}} = \varepsilon$ 的结论。

(3) 用测单个电池内阻的方法，测出并联电池组的总内阻 $r_{\text{总}}$ （如图 b）。可得 $\frac{1}{r_{\text{总}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$ 。

说明

(1) 3 个电池的内阻可调成相同值，便于验证。

(2) 同方法一说明(3)。

229 研究全电路欧姆定律

全电路欧姆定律 $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$ ，也可以写成 $\varepsilon = IR + Ir = U + U'$ ，其

中 r 为电源内电阻， U' 为电源内电阻上的电势降落。本实验的难点在于通常电池的内电阻 r 均很小，内电压的测量很困难。本实验所列出的三种方法，不同程度地解决了这个问题，在提高电源内电阻及测量内电压的方法上有一定的改进。

本实验中的伏特表最好用内阻很高的数字式电压表，也可以用万用表中的直流电压档，不宜采用内电阻较低的学生实验用电压表。

方法一

目的 验证闭合电路中内电压和外电压之和等于电源电动势。

器材 可调式高内阻电池，万用表 2 只，安培表（0—0.6A），电阻箱（0—9999 Ω ），单刀开关 2 个，导线等。

操作

(1) 按图接线，虚线框内是可调式高内阻电池，a、b 为二探针。接线时，应注意两电表的正负极。a、b 两探针应使其尽量靠近极板，但不能与极板接触。伏特表 V_2 读出的是电池内电压 U' ，伏特表 V_1 读出的是电池外电压 U 。

(2) 合上 K_1 、 K_2 ，逐渐减小电阻箱 R 的阻值，测出电路中电流 I 、内电压 U' 、外电压 U 等的各项数据。结果表明：在负载 R 逐渐减小时，电池输出电流 I 增大，

外电压 U 增大，内电压 U' 减小。在误差允许范围内，总有 $\mathcal{E} = U + U'$ 。

(3) 将外电路短路 ($R=0$)，即电阻箱阻值调至零， V_2 伏特表的读数等于电池的电动势。将 K_1 断开，即外电路断路，伏特表 V_1 的读数等于电池的电动势。

注意

(1) 实验中，可调式电池的内阻调大一些，可使内电压明显，减小实验误差。

(2) 电池工作后，会使两探针表面极化，产生几十 mV 的极化电动势。严重极化的探针要进行处理。方法是把探针插在电池中，加 4V 交流电，通电半分钟，即可消除极化。

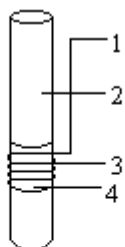
(3) 实验结束后，探针要从电池中取出，在清水中浸洗半小时后，擦干存放。

实例 某次实验数据如下：

外电阻 $R(\Omega)$	170	90	56	38	27
电流强度 I	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
外电压 $U(V)$	1.92	1.80	1.72	1.59	1.49
内电压 $U'(V)$	0.12	0.22	0.32	0.42	0.51
内外电压和 $U+U'(V)$	2.04	2.02	2.04	2.01	2.00

方法二

器材 U 型管，铜棒， CuSO_4 液， ZnSO_4 液，脱脂棉花，锌棒，内电极，滑动变阻器，单刀电键，导线等。



1. 内电极引出线焊接点
2. 铜棒或锌棒
3. 裸露漆包线
4. 透明胶

(a)

操作

(1) 制作电极：将 $d=8-10\text{mm}$ ，长约 10cm 铜棒和锌棒打磨光洁，焊上引线，分别作为电池的正、负极。用宽约 2cm 透明胶分别贴一圈在铜、锌电极的中下部，然后用 $d=0.16-0.25\text{mm}$ 、长约 10cm 漆包线紧绕在透明胶上如图(a)。绕在透明胶上的漆包线要除漆，作为内电极，其余浸没在电解液中的漆包线不要除漆。用万用电表测试内、外电极是否绝缘良好。

(2) 将适量脱脂棉花塞进 U 型管的中部，先分别在左、右两管中加入 24ml 蒸馏水，再同时分别加入 8ml 饱和 ZnSO_4 和 CuSO_4 溶液，插上电极。

(3) 按图(b)接线，合上单刀电键 K ，调节可变电阻器 $R(47k\Omega)$ ，用两只同型号万用电表分别测出 $U_{\text{内}}$ 、 $U_{\text{外}}$ 。改变 R 、多次测量，验证 $\mathcal{E} = U_{\text{内}} + U_{\text{外}}$ 。

注意

- (1) 电解液浓度：一份 CuSO_4 或 ZnSO_4 饱和溶液用三份蒸馏水稀释。
- (2) 调节脱脂棉的多少和松紧程度可改变内电阻 r 。本实验内电阻较大。
- (3) 本实验装置输出电流约为 5mA。由于供电电流小，因此滑动电位器阻值要大一些（如 47k Ω ）为宜。

说明 采用 CuSO_4 、 ZnSO_4 溶液代替稀硫酸，腐蚀性小，安全可靠，且可克服极化现象， r 和 E 均较稳定。

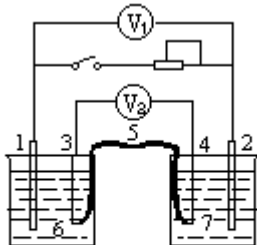
实例 铜棒用初中热膨胀实验中的铜条，锌棒用大号 1.5V 废旧干电池外壳锌皮（自制），电解液用自来水配制，用铜导线芯代替漆包线，两只 MF-30 型万用电表测量内、外电压。

$U_{\text{外}}(\text{V})$	1.02	0.98	0.94	0.90	0.86	0.83	0.80
$U_{\text{内}}(\text{V})$	0.00	0.04	0.08	0.12	0.16	0.19	0.21
$=U_{\text{外}}+U_{\text{内}}(\text{V})$	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.01

实测时由于锌皮未打磨光洁和用稀酸处理，在内、外电极上有不少碳黑状沉积物，但 E 仍很稳定。

方法三

器材 600ml 烧杯 2 只，面积为 $10 \times 6\text{cm}^2$ 的铜片、锌片各 1 片（厚度任意），滤纸 ($30\text{cm} \times 6\text{cm}$)，电压表 2 个，10k Ω 滑动变阻器（或 0—10k Ω 电阻箱），镀镍回形针，单刀电键，导线若干，0.05M 硫酸溶液适量等。



1. 铜片 2. 锌片 3、4. 探针
5. 滤纸 6、7. H_2SO_4

操作

(1) 把滤纸对折成 3cm 宽的纸条后，在酸液中浸透用作酸桥。按图连接好实验装置。回形针接直后作为探针。两个极板的有效面积为 40—50 cm^2 。

(2) 打开电键 K，记下电压表 V_1 的读数，作为电源电动势 E 。合上电键，保持两烧杯间的距离不变，改变变阻器 R 的阻值，每改变一次，记下内、外电路上的电压值（电压表 V_2 和 V_1 的读数）。

(3) 找出 V_1 和 V_2 值的变化规律以及 V_1 、 V_2 的值跟电动势 E 的关系。

(4) 改变两烧杯的距离，即改变电源内阻，复重操作 (2)、(3)。

注意

(1) 为减小极化的影响，酸液浓度不宜过大，以 0.05M 为好。

(2) 酸桥的阻值较高，因此，探针不论放在酸液中的哪个位置对实验结果均无大影响，只要不能接触电极。

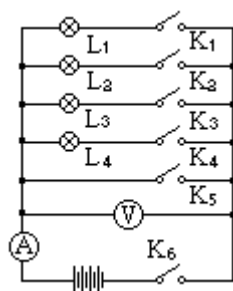
说明

(1)采用滤纸做酸桥，电池内阻较大（几百—几k Ω ），当外电路电阻改变引起电流变化时，内、外电路上的电压变化十分明显。

(2)改变两个烧杯的距离（即改变酸桥的长度），能改变电池内阻的大小。当外电路的电阻保持不变时，内阻增大会使路端电压下降而内电路电压将增大。此实验可以用来解释用旧的干电池会引起路端电压明显降低的原因。

230 路端电压与外电路电阻的关系

器材 旧的干电池(1.5V)，安培表，伏特表，小灯泡（6.3V、0.15A），单刀开关，导线若干。



操作

(1)按图接线，整个线路可布置在一块示教板上。

(2)合上K₆，断开K₁、K₂、K₃、K₄、K₅时外电路断，电阻R=∞，此时I=0，路端电压即电池组电动势，U=6.2V。

(3)逐次先后合上K₁、K₂、K₃、K₄，可见L₁、L₂、L₃、L₄逐个先后发光。但随着并联小灯的增加，灯的亮度明显逐渐降低。从安培表可依次读得电流值逐渐增加，而伏特表显示的路端电压逐渐减小。

(4)最后短时间地合上K₅，外电路被短路，路端电压读数为零，电灯全部熄灭。

说明

(1)本实验较形象地显示路端电压随外电路电阻减小而减小，不仅能从灯的亮度变化进行观察，并有具体数据可进行测算。

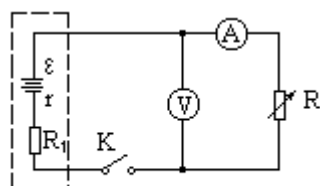
(2)电池组最好用旧的干电池，内阻较大，演示效果较好。

研究电源的输出功率 231

目的 研究电源输出功率跟电源内电阻和负载的关系，以及在什么情况下电源输出功率最大。

器材 干电池，定值电阻R₀（10 Ω ），电阻箱，伏特表，安培表，电键，导线等。

操作



(a)

(1)按图(a)连线路，R₀与电池串联在一起当作电源。安培表量程取0—0.6A；

伏特表量程取 0—3V。

(2) 合上电键，逐次调节电阻箱 R，取值范围是 $R > R_0$ ； $R < R_0$ （注意在 R_0 附近多取几个数据点，不要错过 $R=R_0+r$ 的测试点）。

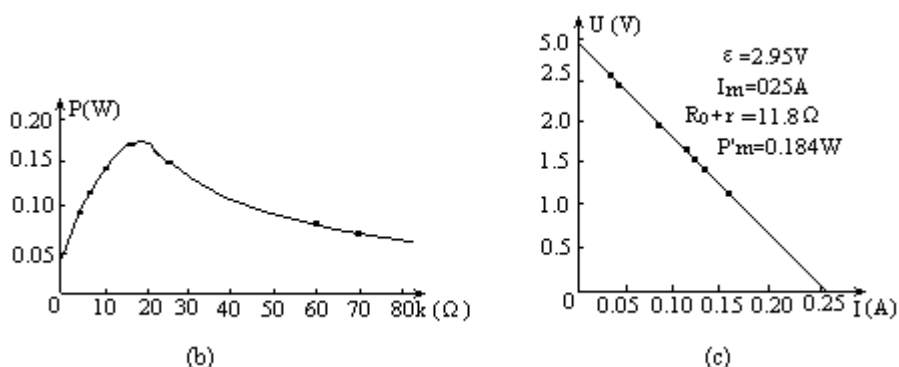
(3) 记录每个测试点的 U、I 并算出 P 值。

(4) 绘出 P-R 关系曲线。

(5) 绘出 U-I 图线并求出 R_0+r 和 P'_m 值。根据 $P'_{max} = \frac{\epsilon^2}{4(R_0+r)}$ 算出

P'_{max} 与实测值 P_{max} 比较。

实例 某次实验数据和图线如下页列表。



从 P-R 图上可以看出，当 $R=12.5$ 时，电源输出功率最大，达 0.189W。U-I 图中可求出 $R_0+r=11.8$ ，与 $R=12.5$ 相差不多。从 U-I 图中求出

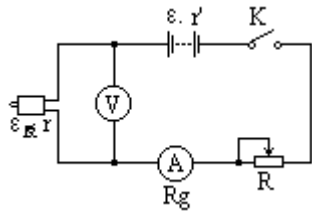
R()	2	4	6	8	10	11	12
I(A)	0.24	0.18	0.16	0.14	0.13	0.122	0.120
U(V)	0.50	0.82	1.06	1.26	1.40	1.50	1.56
P(W)	0.12	0.148	0.170	0.176	0.182	0.183	0.187
R()	12.5	13	20	40	60	80	
I(A)	0.118	0.116	0.084	0.058	0.040	0.032	
U(V)	1.60	1.62	1.88	2.28	2.46	2.58	
P(W)	0.189	0.188	0.158	0.132	0.098	0.083	

的 $P'_m = \epsilon^2 / [4(R_0+r)] = 0.184W$ ，与 P-R 图中的 $P_m = 0.189W$ 也基本相符。从 P-R 图中还可看出，当 $R < R_0+r$ 时，曲线比较陡，说明 P 随 R 的增大而迅速增大；而当 $R > R_0+r$ 时，曲线比较平缓，说明 P 随 R 的增大而缓慢地减小。所以在实验中取值时应注意，当 $R < R_0+r$ 时应取得密一些，而当 $R > R_0+r$ 时，可取得疏一些。

电动机的电热与电功 232

器材 电池组(6V)，安培表(量程为 0—1A)，伏特表(量程为 0—10V)，玩具电动机(直流 2—6V、 $r = 0.5$)，滑动变阻器(0—50、1.5A)，电键，导线等。

操作



(1)按图连接电路。

(2)合上电键K,当玩具电动机转速稳定后,读出安培表和伏特表的读数 I 、 U ,即可算出电动机的反电动势 $\varepsilon_{\text{反}}=U-Ir$ 。若已知 r 、 R 、 R_g 、 r 、 r' 还可比较 $I(R+r+R_g+r')$ 与 $\varepsilon_{\text{反}}$ 的大小。显然, $\varepsilon_{\text{反}} > I(R+r+R_g+r')$ 。

(3)用手捏住电动机的转轴,此时变为纯电阻电路。读出电表读数 I' 、 U' ,计算后得出 $\varepsilon_{\text{反}}=I'(R+r+R_g+r')$ 。

(4)计算电动机在正常运转时的电功率 $P=IU$,转化为机械能的功率 $P_1=I \cdot \varepsilon_{\text{反}}$,热功率 $P_2=I^2 \cdot r$ 。由此得出, $P=P_1+P_2$ 。

说明

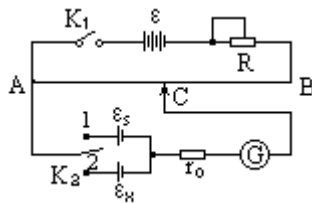
(1)为不使捏住电动机转柄后,电路的电流太大,应对此装置事先作好调试。经试验,提供下列数据供参考:接通电路,电动机不转动时,调节滑动变阻器 $R=10\Omega$,两电表读数分别为 $I'=0.43\text{A}$, $U'=0.22\text{V}$ 。接通电路,电动机正常运转时, $R=10\Omega$, $I=0.15\text{A}$, $U=4\text{V}$ 。(滑动变阻器亦可用学生实验用 10Ω 定值电阻代替。)

(2)经反复测试,用手捏住电动机转柄时,持续时间可达1分钟左右,电动机不升温发烫,不会烧坏。这已满足演示所需的时间。

223 用电势差计测电池的电动势

原理

用伏特表直接测电池电动势不准确,因为电池有内阻 r ,只要有电流通过,内阻上就有电压降 $I \cdot r$,因此测得的只是路端电压,本实验采用电势差计测定电池的电动势。 AB 是一条粗细均匀的电阻丝, ε 是供电电源, ε_s 是标准电池, ε_x 是待测电池, R 是限流电阻。 G 为灵敏电流计, r_0 为电流计的保护电阻(如图)。



当 K_1 闭合时,在电阻丝 AB 上有一定的电势降落。当 K_2 合到1,移动滑动触头 C ,使 G 表针有偏转这时 $U_{AC}=\varepsilon_s$,电势差计平衡,有 $\varepsilon_s=IR_{AC}$ 。再将 K_2 合到2时,移动滑动触头 C ,再使电势差计达到新的平衡,这时有 $U'_{AC}=\varepsilon_x$,即有 $\varepsilon_x=IR'_{AC}$ 。上述两式相比,有

$$\frac{x}{s} = \frac{IR'_{AC}}{IR_{AC}}$$

因为 $\frac{R'_{AC}}{R_{AC}} = \frac{l_x}{l_s}$,

所以 $s_x = \frac{l_x}{l_s} s_0$

而 l_x 和 l_s 为电阻丝长度，可从电势差计上直接读出，即可测出电源的电动势

x°
器材 筒式滑线式电势差计，灵敏电流计，标准电池 s (20 时 $s=1.0183V$ 、通电电流 $I < 10^{-4}A$)、电源 (电池三节)，待测干电池 x ，滑动电阻 R (0—20 Ω 、2A)，保护电阻 r (10k Ω 线绕电阻)，单刀双位电键 K_2 ，电键 K_1 ，导线等。

操作

(1)按上图接好电路。AB 为直线电阻丝。

(2)闭合 K_1 ，粗调 R ，使直线电阻 AB 两端电压为 2V 左右。(可用伏特表粗测 AB 端电压。)

(3) K_2 拨到位置“1”，标准电池接入电路。从 AB 中间开始左右滑动触头 C，直至 G 表读数为零。读出 AC_1 值记作 L_1 。

(4)把 K_2 拨到位置“2”，待测电池接入电路。再次调节触头 C 的位置直至将 G 表读数再次调为零。读出 AC_2 记作 L_2 。

(5)用公式 $x = \frac{L_2}{L_1} \cdot s$ 计算出 x 值。

根据式子 $x = \frac{L_2}{L_1} s$ ，为了方便，取 $s/L_1 = 10^n$ 的条件来测量 x ，

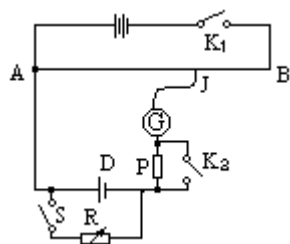
这样， x 的有效数字与 L_2 完全相同。因此，当 s 接在 AC 时， L_1 值应该与 s 的有效数字相同，但此时 I_G 不一定等于 0，这可借助于 R 来调节，使电势差计处于平衡状态。这种满足 $s/L_1=10^n$ 的 R 调节过程称为电位差计工作电流标准化的过程。

例如 $s=1.01866V$ ，取 $L_1=10.1866m$ ，那么 $s/L_1=0.100000V \cdot m^{-1}$ 。

234 用板式电桥测电池的内阻

器材 干电池，电阻箱 R (约 0—50 Ω)，电键 3 个，板式电桥，灵敏电流计及其保护电阻，滑动触头，蓄电池，导线等。

操作



(1)如图，将蓄电池通过电键 K_1 连接到板式电桥的两端 A、B 上。将干电池的正极连接到 A，负极通过保护电阻 P 和灵敏电流计 G 连接到板式电桥的触头 J 上。将电键 S 和电阻箱串联后连接到干电池 D 的两端。

(2) 打开电键 S 和 K_2 ，移动滑动触头 J。在 AB 上找出使电流计指针为零的平衡点。合上电键 K_2 ，使保护电阻 P 短路，再仔细移动触头 J 的位置，使灵敏电流计读数恢复到 0，在板式电桥上测出相应电池电动势的平衡长度 l_0 。

(3) 将电阻箱阻值置于 10Ω ，合上电键 S，迅速测出板式电桥上新的平衡点，记下新的平衡长度 l 后立即将电键打开。

(4) 将 R 的阻值依次置为 20Ω 、 50Ω 、 100Ω ，每次尽可能迅速测出板式电桥上的平衡长度 l 。最后打开电键 S，重新测量一下 R 开路时板式电桥上的平衡长度 l_0 。

(5) 作图和计算

$$\text{电池内阻 } r = \frac{E - V}{I} = \frac{E - V}{V/R} = \frac{(E - V)}{V} \cdot R$$

$$r = \left(\frac{l_0 - l}{l} \right) R = \left(\frac{l_0}{l} - 1 \right) R,$$

$$\frac{l_0}{l} = r \left(\frac{1}{R} \right) + 1$$

画出 $(l_0/l) - (1/R)$ 关系图线，根据式 (5) 可知图线是一条斜率为 r 的直线。只要求出图线的斜率，就可以求出电池的内阻 r 。

验证实例

如图接好电路，分别将 R 的阻值置成 10Ω 、 20Ω 、 50Ω 、 100Ω ，测出 l 的长度。 l_0 为 59cm 。实验数据如下：

R (Ω)	10.0	20.0	50.0	100.0
l (cm)	50.5	52.0	55.5	57.0
1/R (Ω^{-1})	0.100	0.0500	0.0200	0.0100
l_0/l	1.17	1.14	1.06	1.04

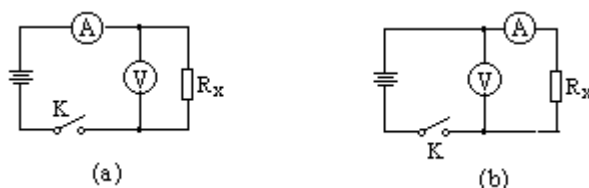
可求出 $(l_0/l) - (1/R)$ 图线的斜率为 1.46，截距为 1.04 即干电池的内阻为 1.46 Ω 。

235 伏安法测电阻

伏安法是一种常用的测量电阻的方法。它主要的系统误差来自两方面，实验原理不完善和伏特表、安培表的不准确。方法一中通过正确地选择安培表内接和外接，可减小第一方面原因带来的系统误差；方法二则可完全避免第一方面原因带来的误差。有关减小第二方面原因带来的系统误差的问题，将在下一个实验中讨论。

方法一

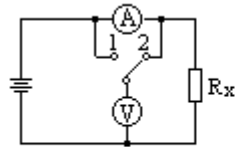
原理 伏安法有两种基本线路：安培表外接法(图 a)和安培表内接法(图 b)。当待测电阻 R_x 的阻值较小(比伏特表的内阻 R_V 小得多)时，应选用外接法；当待测电阻 R_x 的阻值较大(比安培表的内阻大得多)时，应选用内接法。



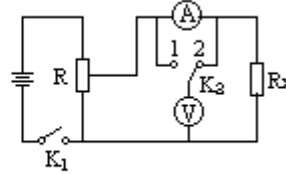
图(c)所示的电路可用来粗略判断，待测电阻 R_x 的大小。将单刀双掷电键反

复地合向 1 和 2，在此过程中，如果伏特表读数变比较明显，安培表读数基本不变，说明 R_x 阻值较小；如果安培表读数变化明显，而伏特表读数基本不变，则说明 R_x 阻值较大。

器材 伏特表，安培表，滑动变阻器（200 Ω ），直流电源（6V），单刀单位开关，单刀双位开关，待测电阻，导线等。



(c)



(d)

操作

(1)如图(d)连接电路，将滑动变阻器 R 的滑动触头调到图中最下端(R_x 上电压为零)，合上单刀单位开关 K_1 。将 R 的滑动触头逐步向上调，直至安培表有一个适当的读数。

(2)将单刀双位开关 K_2 反复地合向 1、2 两个位置，同时观察伏特表和安培表的读数。如果发现安培表的读数基本不变，说明待测电阻 R_x 阻值较小，可将 K_2 向 2 进行以下实验；如果发现伏特表的读数基本不变，说明 R_x 的阻值较大，可将 K_2 合向 1 进行以下实验；如果安培表和伏特表的读数都基本不变，则说明安培表内接或外接都可以。

(3)每改变一次滑动变阻器 R 的滑动触头位置，都得到一组安培表和伏特表的示数(I 、 U)值。共需要 7—9 组(I 、 U)值。

(4)以横轴代表 U ，纵轴代表 I ，作出 U - I 图线，可得一条直线。

(5)用图解法求出图线的斜率，即待测电阻 R_x 的阻值。

注意 在实验过程中，应注意待测电阻的温度是否有变化。如果发现 R_x 的温度逐步升高，则应减小电流，并尽量缩短接通电路读取安培表、伏特表示数的时间。

分析

(1)由于实验原理不完善带来的系统误差

设伏特表和安培表的读数分别为 U 和 I ，内阻分别为 R_V 和 R_A ，待测电阻阻值为 R_x 。

安培表外接

$$\frac{U}{I} = \frac{R_V \cdot R_x}{R_V + R_x} ,$$

$$R_x = \frac{U}{I - U / R_V}$$

U/I 值与 R_x 的真值比较偏小。相对误差

$$E_{R_x} = \frac{R_x}{R_x} = \frac{\left| \frac{U}{I} - R_x \right|}{R_x} = \frac{\left| \frac{R_V \cdot R_x}{R_V + R_x} - R_x \right|}{R_x}$$

$$= \frac{R_x}{R_A + R_V} \circ$$

当 $R_V \gg R_x$ 时， E_{R_x} 很小。

安培表内接

$$\frac{U}{I} = R_x + R_A ,$$

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A。$$

U/I 值与 R_x 的真值比较偏大。相对误差

$$E_{R_x} = \frac{R_x}{R_x} = \frac{\left| \frac{U}{I} - R_x \right|}{R_x} = \frac{|R_x + R_A - R_x|}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}。$$

当 $R_A \ll R_x$ 时, E_{R_x} 可以很小。

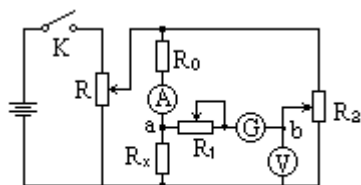
如果 R_V 和 R_A 为已知, 可以对实验结果进行修正。

(2) 由于电表的不准确带来的系统误差

因为 $R = U/I$

所以 $E_R = E_V + E_I。$

方法二



(a)

原理 在图(a)所示的电路中, 适当地调节滑动变阻器 R_1 的滑动触头的位置, 可以使灵敏电流计 G 中的电流为零。此时, 因为 a、b 两点等势, 所以伏特表的读数就是待测电阻 R_x 上的电压。因为表 G 中无电流通过, 所以安培表的读数就是通过 R_x 的电流。这样就可以消除由于安培表外接或内接带来的系统误差。这种方法叫补偿伏安法。

器材 安培表, 伏特表, 灵敏电流计, 滑动变阻器 (2k 1个、200 两个), 定值电阻, 直流电源 (6V), 待测电阻, 电键, 导线等。

操作

(1) 如图(a)连接电路。

(2) 将滑动变阻器 R_1 的阻值调成最大。合上电键 K, 调节 R_2 , 使灵敏电流计的读数为零。

(3) 逐步减小 R_1 的阻值, 同时调节 R_2 , 保持灵敏电流计的读数为零, 直至 R_1 的阻值为零。记下安培表和伏特表的读数, 得到一组 (I、U) 值。

(4) 打开电键 K, 改变 R_1 滑动触片的位置, 重复操作(2)、(3), 得到另一组 (I、U) 值。共重复 7—9 次。

(5) 以横轴代表 I, 纵轴代表 U, 作出 U-I 图线, 可得到一条直线。用图解法求出图线的斜率, 就是待测电阻的阻值。

实例 用不同的伏安法测一电阻的实验数据如下:

(1) 安培表外接

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
电流(mA)	1.38	2.36	3.24	4.34	5.40	6.38	7.14	7.86
电压(V)	1.45	2.50	3.40	4.54	5.67	6.61	7.30	8.09

(2) 安培表内接

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
电流(mA)	0.96	1.22	1.76	2.12	2.60	3.04	3.50	4.04
电压(V)	2.10	2.70	3.79	4.59	5.60	6.56	7.50	8.70

(3) 补偿伏安法

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
电流(mA)	0.99	1.39	1.79	2.44	3.05	3.60	4.28	4.60
电压(V)	2.05	2.90	3.71	4.95	6.30	7.25	8.55	9.10

由以上数据作出 I-U 图线 (图 b)，用图线法求出它们的斜率。

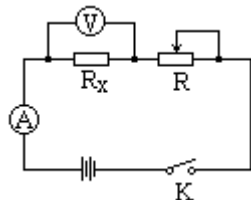
实验结果

安培表外接： $R_x=1.03k$ ；安培表内接： $R_x=2.13k$ ；补偿伏安法： $R_x=1.97k$

236 替代法测电阻

伏安法测电阻的实验中，用补偿的方法可以消除由于安培表内接或外接带来的系统误差。但没有解决由于伏特表和安培表的不准确带来的误差。在本实验方法一中，用准确度比伏特表和安培表高的电阻箱作为测量工具，而伏特表和安培表仅作为指示器，就较好地解决了这个问题。在方法二中，用灵敏度比伏特表，安培表高得多的灵敏电流计作为指示器，可进一步提高测量的准确性。

方法一



原理 在如图所示的电路中，用一个电阻箱替换待测电阻 R_x 。调节电阻箱，使伏特表和安培表的读数和未替换前一样，则电阻箱的阻值就是 R_x 的阻值。

器材 安培表，伏特表，低压直流电源，电阻箱，滑动变阻器，待测电阻，电键，导线等。

操作

(1) 如图连接电路。合上电键后，读出伏特表和安培表的读数。

(2) 根据伏特表和安培表的读数，估算出待测电阻 R_x 的阻值。然后调节滑动变阻器，使其阻值略小于 R_x 的估算值（也可借助电表完成这一项操作）准确地记下两电表的读数。

(3) 打开电键。用电阻箱替换 R_x 。将电阻箱的阻值调成最大，重新合上电键。

(4) 调节电阻箱，使两电表完全恢复替换前的读数。此时电阻箱的读数就是待测电阻的阻值。

注意 实验电流不宜大。电流过大会使待测电阻发热，还容易损坏电阻箱。

说明

本实验方法除了电阻箱阻值的误差之外，误差主要来自两个电表的读数误差。为了减小这一项误差，要尽量提高电路的灵敏度，即增大

$\frac{U}{R_x}$ 和 $\frac{I}{R_x}$ 。如果不考虑电源内阻和两电表对电路的影响。

$$U = I \cdot R = \frac{E}{R_x + R} \cdot R_x,$$

$$U' = \frac{dU}{dR_x} = \frac{(R_x + R) - R_x}{(R_x + R)^2} = \frac{R}{(R + R_x)^2}.$$

为了求出 R 取多大时 dU/dR_x 最大，再将 U 对 R 求导

$$dU'/dR = \frac{(R + R_x)^2 - 2(R + R_x) \cdot R}{(R + R_x)^4}$$

令 $dU'/dR=0$ ，可解得 $R=R_x$ 。

说明

(1) 当 $R=R_x$ 时， dU/dR_x 最大，即替换前后伏特表的读数误差最小。至于 dI/dR_x ，显然是当 $R=0$ 时 dI/dR_x 最大。所以滑动变阻器的阻值 R 宜取略小于 R_x 的值。

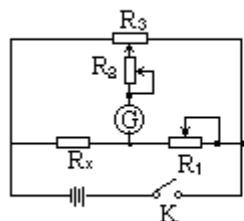
(2) 如果电源的稳压性能比较好，也可以只用一个伏特表或只用一个安培表作为指示器。只用一个伏特表时，取 $R=R_x$ ；只用一个安培表时，取 $R=0$ 。

方法二

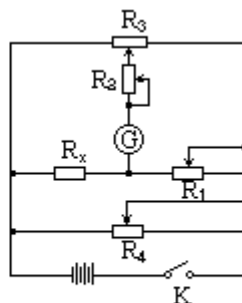
原理 在如图(a)的电路中，如果滑动变阻器左、右两段电阻之比等于 R_x/R_1 ，则灵敏电流计 G 中电流为零，此状态称平衡状态。如果 R_x 的阻值略有变化，表 G 中就会有电流通过，因此可用表 G 作为指示器。

器材 电阻箱，灵敏电流计，滑动变阻器(2k)4 个，直流电源，电键，导线等。

操作



(a)



(b)

(1) 如图(b)连接电路，将 R_1 和 R_3 的滑动触头放在中间， R_4 的滑动触头放在最左边， R_2 调至阻值最大。

(2) 合上电键 K 。将 R_4 的滑动触头逐步向右移，同时调节 R_1 ，使灵敏电流计 G 的读数保持为零。(在必要时也可适当地移动 R_3 的滑动触头，但尽量将它保持在中间。)直至 R_4 的滑动触头移到最右边。

(3) 逐步减小 R_2 的阻值。如果发现电流计的指针发生偏转，随时调节 R_1 ，使其变零。直至 R_2 的阻值减小为零。

(4) 打开电键 K 。用电阻箱替换待测电阻 R_x 。将 R_2 的阻值仍调成最大， R_4 的滑动触头仍放到最左边。

(5) 合上电键 K 。将 R_4 的滑动触头逐步向右移，同时调节电阻箱，使电流计的读数保持为零 (R_1 和 R_3 的滑动触头不能移动)。直至 R_4 的滑动触头移到最右边。

(6)逐步减小 R_2 的阻值。如果发现电流计的指针发生偏转，随时调节电阻箱，使其变零。直至 R_2 的阻值减小为零。此时电阻箱的阻值就是待测电阻的阻值。

说明

(1)从理论和实验中都可证明：当 $R_x=R_1$ 时，电路的灵敏度最高，即 I/R_x 最大（ I 为通过灵敏电流计的电流）。具体证明可参阅有关惠斯通电桥的实验。所以在实验中要尽量将 R_3 的触头放在其中点。

(2)此实验方法的电路已具有惠斯通电桥的雏形。如果使用相同的电阻箱和灵敏电流计，其测量结果的误差可小于惠斯通电桥。

欧姆表的原理 237

本实验有三种实验方法，从不同的侧面介绍了欧姆表的原理。方法一着重介绍调零电阻的作用；方法二着重介绍欧姆表表盘的刻制方法；方法三着重介绍构成欧姆表不同倍率档的方法。

方法一

器材 投影电流表，直线式电位器，干电池（5号），标准电阻两个，待测电阻，香蕉插若干个，红黑表棒，有机玻璃板，直径1mm以上的塑料硬铜芯线等。

欧姆表原理投影示教板的制法

取用25cm见方的有机玻璃板1块，按图(a)所示的电路布线。投影电表固定在上方。电池、调零电位器、标准电阻、待测电阻和红黑表棒均可插入。

操作

(1)插入电池、定值电阻，将电位器两端短接，构成一个闭合电路。电流计指针指向一个确定的位置。

(2)换一个定值电阻，电流表指针指向另一个确定的位置。说明当电阻 R 确定以后，电流表指针偏转有一个确定的对应位置。如果将定值电阻的阻值标在表面上，即可构成一个可以测量电阻的仪表。

(3)以上电表测量电阻的范围有限制。可以测量的最小电阻是 $R = \frac{E}{I_g} + r$

（ E 和 r 是电池的电动势和内阻， I_g 是电流表的量程）。为了测量阻值更小的电阻，必须加上电位器 R_0 作调零电阻（图 b）。插上电位器，将其阻值调成最大，将两表棒短接后调节电位器，使电流表满偏。

(4)将指针满偏的位置作为电阻值为零，重新用定值电阻（或电阻箱）确定电流表指针各个位置所代表的电阻值。即构成了一个可以测量任何阻值电阻的欧姆表。

方法二

器材 演示用示教电表，教学用电阻箱（0—99999 Ω ），干电池（1.5V），滑线变阻器（0—200 Ω ），定值电阻（200 Ω ），红黑表笔，导线等。

操作

(1)在演示用示教电表上插接上5mA的通路板，作为待改装的电流表G。这时它的满偏电流 $I_g=5\text{mA}$ ，内阻 $R_g=20\Omega$ 。

(2)用一节新的1.5V的干电池作表内电池。将滑线变阻器与定值电阻

串联起来，作为欧姆表的调零电阻，起限流作用。由 $I_g = \frac{E}{R_g + r + R}$ ，若

r 忽略不计，则得 $R=280\Omega$ 。并接上红黑表笔（如图 a）。

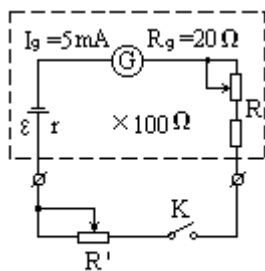
(3)粗略地绘制欧姆表刻度盘。在原 5mA 的刻度盘上方贴上白纸。将红黑表笔相接触，调节 R，使指针满偏，即 $I_g=5\text{mA}$ ，对应的待测电阻值 $R_x=0$ ，用彩色墨水笔在 5mA 刻度上方写上“0”。然后分开两表笔，此时指针回到最左边的刻度线，即 $I_g=0$ ，对应的 $R_x=$ ，故在 0mA 刻度

线的上方写上“ ”。然后，根据 $I_g = \frac{\varepsilon}{R_g + r + R + R_x}$ 算出对应的 R_x 为

100 ，200 ，.....100 时的电流值，在白纸上分别写上 1, 2, ...10 刻度。并写上“ $\times 100$ ”。刻度盘绘制完成（图 b）。

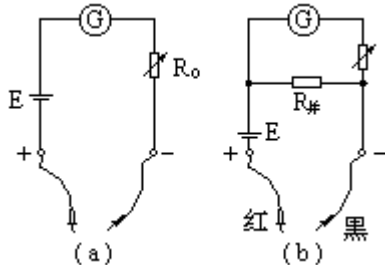
(4)对改装后的欧姆表进行检验。如图(c)。R 为电阻箱，作为校验用的标准电阻。当 K 断开时，表头指针应为欧姆表刻度 0 处。当 $R = 0$ ，K 闭合后，指针应指“ ”处。然后将 R 分别调至 100 ，200 ，.....1000 处，观察指针是否指向对应的欧姆表刻度。

(5)用改装好的欧姆表试测未知电阻 R_x 。估测欧姆数值，并用另一万用表测试进行对照。



(c)

方法三



目的 演示构成欧姆表不同倍率档的原理。

器材 电流表 ($I_g=5\text{mA}$ 、 $R_g=200$)，电阻箱，表棒，干电池 (1.5V)，导线等。

操作

(1)按图(a)连接电路，表 G 是满偏电压为 1V、内阻 R_g 为 0.2k 的电流表，E 是 1.5V 的干电池， R_0 是调零用的电阻箱。

(2) R_0 置于最大值后，将两根表棒短接。逐步调小 R_0 的阻值，直至电流表指针满偏。

(3)在两根表棒之间接上一个电阻箱作 R_x 。调节 R_x ，使电流表指针半偏。此时的 R_x 值叫做欧姆表的中心欧姆 $R_{中}$ ，也就是 R_0+R_g 的值（忽略干电池的内阻）。

(4)因为 $I = \frac{\varepsilon}{R_{中} + R_x}$ ，所以 $R_x = \frac{\varepsilon}{I} - R_{中}$ 。根据此式，可确定电流

表面上各处的欧姆数。

(5)为了测量小阻值电阻，需要改变欧姆的倍率档。方法是在电流表和 R_0 上并联一个电阻 $R_{\#}$ （图 b）。如果要使欧姆表的倍率档由 $\times 10$ 变成 $\times 1$ ，即要求电表指针指在中心时所代表的电阻为 $R_{中}/10$ ，则可以用

$$\frac{R_{\text{中}} \cdot R_{\text{并}}}{R_{\text{中}} + R_{\text{并}}} = \frac{R_{\text{并}}}{10} \text{ 计算出 } R_{\text{并}}。$$

(6)根据计算出的 $R_{\text{并}}$ 的值，用一个电阻箱作为 $R_{\text{并}}$ 接上去。最后再用一个电阻箱作为 R_x ，校验 $\times 1$ 档各处阻值是否正确。

实例 设 $R_0=200$ ， $I_g=5\text{mA}$ ， $E=1.5\text{V}$ （电池内阻忽略），则

$$I_g = \frac{E}{R_g + R_0}。$$

$$\text{可算出 } R_0 = \frac{E - I_g R_g}{I_g} = \frac{1.5 - 1.0}{0.005} = 100，$$

$$\text{即 } R_{\text{中}} = R_0 + R_g = 100 + 200 = 300。$$

$$\text{因为 } \frac{R_{\text{中}} \cdot R_{\text{并}}}{R_{\text{中}} + R_{\text{并}}} = \frac{R_{\text{中}}}{10}，$$

代入数据，可得

$$R_{\text{并}} = 33$$

说明

(1)如果还需要其他倍率档，可以用相同的方法推算。总之， $R_{\text{并}}$ 越小，倍率越小。

(2)从图(b)可以看出，倍率档越小，欧姆表向被测电阻输出的电流越大，而且红表棒与表内干电池的负极相连，黑表棒与正极相连。在测量晶体二、三极管时都应注意欧姆表的这个特点。

万用表测电阻

器材 万用表，小螺丝刀， $\frac{1}{8}\text{W}$ 碳膜电阻（几欧、几十欧、几百欧、几千欧、几十千欧、几百千欧各1只）。

操作

(1)检查万用表表针是否停在左端的“0”位置。如果没有停在零位置，可用小螺丝刀轻轻地转动表盘下边的调整零位螺丝，使指针指零。

(2)将红色表笔插入正(+)插孔，黑表笔插入负(-)插孔。

(3)把选择开关调到欧姆档上。选择适当的倍乘档，使测量时欧姆表指针尽量在刻度中值附近（ $\frac{R_{\text{中}}}{4} - 4R_{\text{中}}$ ），这样相对误差较小。

(4)选好适当的倍乘档后，先把两表笔相接触，调整欧姆档的调零旋钮，使指针指在电阻刻度的零位上。

(5)将两表笔分别待测电阻的两端相接，进行测量。在用高阻档测电阻时，应避免人体(两手)同时接触两表笔的铜头，以免人体与被测电阻并联而造成误差。欧姆表的读数一般只取两位有效数字。

(6)在每次换用欧姆表的另一倍乘档时，都需要重新调零，即重复操作(4)。

(7)万用表用毕，应将选择开关调到交流电压最高档。并把表笔从插孔拔出，防止漏电。长期不用时，应将表内电池取出。

注意 测电阻时，应将待测电阻与别的元件或电源断开。

惠斯通电桥测电阻

惠斯通电桥是用比较的方法测量电阻的，由于电阻的准确程度可以制作得

较高，检流计的灵敏度也较高，因此测量较精确。方法一用电阻箱和电流计构成电桥，着重介绍电桥测量的原理和分析测量结果的误差；方法二用滑线式电桥，用长度比替代两个比例臂的电阻比；方法三介绍箱式电桥的原理和使用方法；方法四用集成运放电路配合发光二极管指示电桥的平衡，独特新颖。

方法一

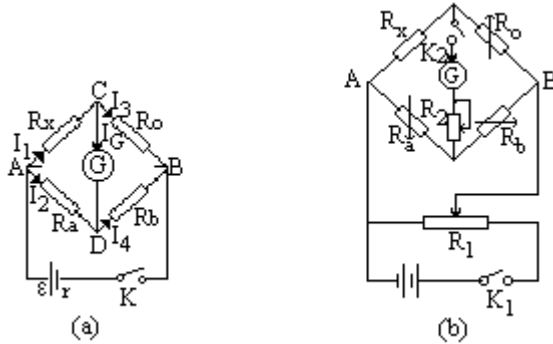
原理 惠斯通电桥原理如图(a)所示。其中 R_a 和 R_b 是两个比例臂， R_0 是比例臂，三个桥臂的阻值都可以调节。另一个桥臂 R_x 是待测电阻。桥上的灵敏电流计 G 可显示电桥是否平衡。调节 R_a 、 R_b 、 R_0 ，可使 G 的读数为零，此时电桥平衡。根据分压原理可知：

$$U_{CB} = U_{AB} \frac{R_0}{R_0 + R_x},$$

$$U_{DB} = U_{AB} \frac{R_b}{R_a + R_b}.$$

平衡时， $U_{CB} = U_{DB}$ 即 $\frac{R_0}{R_0 + R_x} = \frac{R_b}{R_a + R_b}.$

利用分比定理，化简后得出：



$$R_x = \frac{R_a}{R_b} \cdot R_0.$$

器材 电阻箱，滑动变阻器 2 个(200 Ω，2000 Ω)，灵敏电流计，万用电表，待测电阻，低压直流电源，电键等。

操作

(1) 用万用电表粗测一下待测电阻 R_x 的阻值。

(2) 将三个电阻箱作为 R_0 、 R_a 、 R_b ，200 Ω 滑动变阻器作为 R_1 ，2000 Ω 滑动变阻器作为 R_2 ，按图(b)连接电路。

(3) 将 R_1 的滑动触头放在最左端($U_{AB}=0$)， R_2 的阻值调成最大。按照粗测 R_x 得到的结果，调节 R_0 、 R_a 、 R_b ，使电桥尽量接近平衡。

(4) 合上电键 K_1 和 K_2 。调节 R_1 ，逐步增大 U_{AB} 。如果发现电流计 G 指针发生偏转，随时调节 R_0 、 R_a 、 R_b ，使它恢复到零，直至 R_1 的滑动触头调到最右边。

(5) 调小 R_2 的阻值，也随时调节 R_0 、 R_a 、 R_b ，保持 G 读数为零，直至 R_2 阻值为零。多次开合电键 K_2 ，细心观察电流计指针是否有摆动。

(6) 读出 R_0 、 R_a 、 R_b 的阻值，用 $R_x = \frac{R_a}{R_b} \cdot R_0$ 计算出 R_x 的准确阻值。

阻值。

注意 测量过程中各处接线要牢靠。如某处接线突然断开，有可能损坏电

流计。

分析

因为 $R_x = \frac{R_a}{R_b} \cdot R_0$ ，所以 $E_{R_x} = E_{R_a} + E_{R_b} + E_{R_0}$ ，确定 E_{R_a} 的方法如

下：电桥达到平衡后，由小至大地改变 R_a 的阻值，直至用肉眼可看出电流计的指针发生了偏转。记下 R_a 阻值的变化量 R'_a 。根据 R_a 的阻值和电阻箱的级别计算出 R_a 可能的误差 R''_a (如电阻箱为 0.2 级，则 $R''_a = R_a \times 0.2\%$)。比较 R'_a 和 R''_a ，取其中极大的一个作为 R_a ，即可算出 $E_{R_a} = R_a / R'_a$ 。用同样的方法可确定 E_{R_b} 和 E_{R_0} 。

说明

(1) 做本实验时，电流计的灵敏程度和电阻箱的准确程度要尽

量配合。电桥的灵敏度定义为 $S = \frac{n}{(R_x / R_x)}$ (理论上可证明 $S = R_x /$

$R_x = R_a / R_a = R_b / R_b = R_0 / R_0$)，式中 n 表示由于 R_x 改变了 R_x 而引起的电流计指针偏转的格数。电桥的灵敏度主要取决于电流计的灵敏度。

假设实验者可以觉察出电流计指针 1/10 格的偏转，实验采用的电阻箱是 0.2 级的，那么电桥的灵敏度应该达到

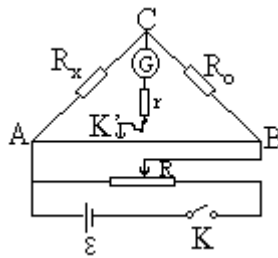
$$S = \frac{0.1 \text{ 格}}{0.2\%} = 5 \times 10 \text{ 格} = 50 \text{ 格}。$$

即 R_x 改变 2% 时，电流计指针应偏转 1 格。如果这样配备电阻箱和电流计，则以上分析部分中的 R'_a 和 R''_a 是相等的。如果实验中 R'_a 明显大于 R''_a ，说明所选电流计太不灵敏，给实验带来较大的误差；反之，则说明电流计太灵敏，也会给实验带来一些不必要的麻烦。

(2) 实验和理论都可以证明：当 $R_a / R_b = 1$ 时，电桥的灵敏度最高。

方法二

器材 滑线式惠斯通电桥，电阻箱，干电池(或学生电源)，电键，灵敏电流计，滑动变阻器，定值电阻(1000)，导线等。



操作

(1) 如图所示，AB 为直线电桥， R_0 为电阻箱。R 为滑线变阻器，滑动触头开始时置于最左端。 R_x 为待测电阻。G 为灵敏电流计，r 为定值保护电阻。§ 为电源，用一节干电池或学生电源直流档 2V。

(2) 将电阻箱 R_0 调一任意阻值，合上 K，使 R 的滑动触头略向右移，在直线电桥上加一个较小的电压。按下开关 K'，观察灵敏电流计指针的偏转方向。将滑动头 D 向某一方向移动几厘米后若发现 G 偏转角度变小，则再将 D 向同一方面移动。若发现 G 偏转角度变大，则应将 D 向反方向移动。直至灵敏电流计指针不动为止。此时，触头 D 所在位置即为此时电桥平衡位置。

(3) 调节 R ，增大 A、B 间电压，重复操作(2)，微微移动触头 D，直至确信灵敏电流计不偏转为止。读出此时的 $I_1(AD)$ 和 $I_2(DB)$ 的值。由

$$R_x = \frac{I_1}{I_2} R_0 \quad \text{计算 } R_x \text{ 的值。}$$

(4) 交换 R_x 及 R_0 的位置，重新测一次 R_x 值。以两次的平均值为待测电阻的测量值。

注意

(1) 实验中电桥的平衡位置应从电阻线 AB 的中点开始向两边寻找。加在电阻线 AB 上的电压不要超过 1.5V，以免电阻线因电流过大而发热变形。不测量时，要关掉电源开关。

(2) 当桥臂的比值 $I_1/I_2=1$ 时，电桥灵敏度最高。故实验中，先粗测一次，再调整电阻箱 R_0 的值，使 $R_0 \approx R_x$ ，再精测一次，使电桥平衡点在 AB 的中点附近，这样可使测量误差减到最小。

(3) 实验中按动滑动触头时不要用力过大，也不要用力在电阻丝上拖动，这样会使电阻丝磨损。因为实验分析计算是以电阻丝 AB 的粗细均匀为出发点的。所以电阻丝被磨损会引起误差。

(4) 若滑线式惠斯通电桥的电阻丝确因使用日久，磨损严重，导致电阻分布不均匀。在实验中可固定滑动触头位置，调节电阻箱 R_0 ，直到灵敏电流计读数为零。

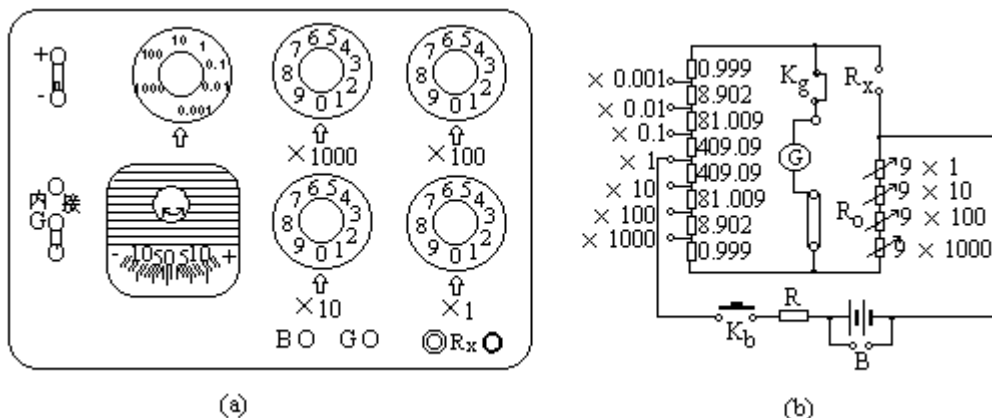
然后再将待测电阻和电阻箱位置互换，重复上

述操作。设这样得到的电阻箱的二次读数分别为 R_0 和 R_0' ，则 $R = \sqrt{R_0 R_0'}$ 。

方法三

原理 同方法一。

器材 携带式直流电桥，万用电表等。



QJ-23 型携带式电桥面板如图(a)所示，内部电路如图(b)所示。电桥比例臂采用十进率固定值，由一个旋钮调节，分为 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000 七档。每种比例都可保证四位有效数字。比较臂为四钮电阻箱，最小可调旋钮为 $\times 1$ 档。电桥内附检流计 G。与检流计有关的接线柱有三个，并标有“内接”、“外接”和配有短路金属片。使用内附检流计时，短路金属片应接到“外接”位置。如感到内附检流计灵敏度不够高，可用短路金属片将“内接”两端短路后，从“外接”接线柱串入灵敏度更高的检流计。电桥电源是 3 节 2 号干电池，也可在拆去内部干电池的情况下，由接线柱 B 外接电源。

操作

(1) 调准检流计的机械零点。

(2) 用万用电表粗测一下待测电阻的阻值。然后根据粗测的结果，安排各桥臂的阻值，使电桥在接近平衡的情况下开始调节，以免有过大的电流通过检流计。(如果没有万用电表，对待测电阻的阻值一无所知，可以拆下短路金属片，在外接两端之间串接一个可调保护电阻 R_n 。测量前，将 R_n 调到最大，随着电桥接近平衡，逐步减小 R_n 的阻值，直至零。)

(3) 将待测电阻接在 R_x 处，然后接通 K_b 。短促地接通 K_g ，反复调节比较臂 R_0 ，直至确信 K_g 的开合对检流计指针没有影响为止。

(4) 根据比例臂和比较臂的阻值，算出待测电阻的阻值。

注意

(1) 使用电桥时，应根据待测电阻的大小选择合适的比例臂，使比较臂有四位有效数字，从而保证结果有四位有效数字。

(2) 为保护检流计，应注意开关次序。接通电路时，应先合 K_b 。后合 K_g ；断开电路时，应先断开 K_g ，后断开 K_b 。在测量电感的直流电阻时应特别注意这一点。

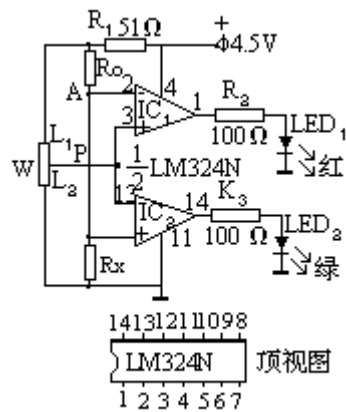
(3) K_b 接通的时间也应该尽量短，特别是在测量额定功率较小的电阻时。通电时间过长会导致电阻发热，引起阻值变化。

(4) 电桥平衡后，可略增减比较臂 R_0 的阻值，检流计的指针应分别向两边偏转，说明电桥工作正常。这一步可排除桥路断开或电源断开等可能。

(5) 电桥使用完毕，应把短路金属片接回“内接”位置，使检流计处于过阻尼状态，以减小指针的机械晃动。

方法四

器材 集成运算放大器 LM 324 N 一块；电阻四只；红色、绿色发光二极管各一只 (LED_1 和 LED_2)；干电池三节。



操作

(1) 按集成电路引脚连线(如图所示)， R_1 为电桥限流电阻， R_2 和 R_3 为发光二极管的限流电阻， R_0 为定值电阻， R_x 为未知电阻， W 为滑线式惠斯通电桥的电阻线。

(2) 当 $R_0=R_x$ 时，惠斯通电桥的滑动压触电键 P 位于 W 的中点，电桥平衡， AP 间电压为零，即运算放大器 IC_1 和 IC_2 的两个输入端(同相输入端和反相输入端)间电压为零， LED_1 和 LED_2 都不发光。当 P 点位于中点偏上的位置时， IC_1 的同相输入端(+)的电势比反相输入端(-)的电势高， IC_1 输出端为高电压，红色发光二极管 LED_1 发光；而 IC_2 的反相输入端的电势比同相输入端高， IC_2 输出为低电压，绿色发光二极管 LED_2 不发光。反之则 LED_1 不发光， LED_2 发出绿色光。这样可从两个发光二极管的发光情况判断电桥是否平衡。

(3)改变 R_0 或 R_x 后，调节电桥平衡，W 的两部分滑线长度 L_1 、 L_2 之比能满足公式

$$L_1 / L_2 = R_0 / R_x ,$$

即可算出 R_x 的阻值。

说明

(1)集成电路 LM 324 N 为高增益四运算放大器，内含有四个独立的运算放大器，本电路仅用其中两个电路。全电路的工作电流仅 0.8mA，与电源电压基本无关，每个电路的电压增益为 15V/mV，当两个输入端间电压 0.3mV，就能使发光二极管发光，灵敏度较高。

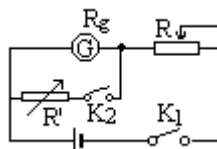
(2)由于 W 的电阻较小，不宜直接连在电源两端，须经限流电阻 R_1 降压，减小 R_1 可提高电路指示灵敏度，但电源消耗也增加。

电表内阻的测量

本实验介绍了八种测量电表内阻的方法。方法一是传统的分流半偏法；方法二对分流半偏法进行了改进；方法三适用于没有电阻箱的学校，分析部分提出了“五分之二偏法”；方法四是分压半偏法，线路简单，效果优于分流半偏法；方法六是替代比较法，从原理上看基本无系统误差，结果的好坏取决于电阻箱 R 的准确程度和电流表 G 的灵敏度；方法七是惠斯通电桥法；方法八是汤姆逊电桥法。几种方法测量结果都比较准确。

方法一

器材 电流表，滑动变阻器 R(2K)，电阻箱 R' (0-99999)，单刀开关，电源(干电池若干节或直流电源)。



操作

(1)将器材如图连接(电源用 4-6V)，将滑动变阻器 R 置于最大阻值，电阻箱 R' 置于最小阻值。开关均处于断开状态。

(2)断开 K_2 合上 K_1 ，调节滑动变阻器 R 使电流表满偏，即 $I=I_g$ 。

(3)再合上 K_2 ，调节电阻箱 R' 由最小逐步增大，使电流表半偏，即此时电流表中通过的电流为 $I_g/2$ 。由于满足条件 $R \gg R'$ ，所以 R' 和 R_g 并联后，对于干路电流影响不大，即可认为此时干路电流仍为 I_g 。因此在 R' 中的电流也是 $I_g/2$ ，即 $R_g=R'$ 。

分析

(1)由于操作(3)中的干路电流实际上比操作(2)时略有增大，所以 G 半偏后通过 R' 的电流略大于 $I_g/2$ ，所以 R_g 应该略大于 R' 的值。

(2)在一般实验中，当由于实验原理的不完善带来的系统误差小于实验仪器的测量误差时，该实验原理可被采用。根据这个原则，如果电流表是 2.5 级表，则 K_2 合上后，干路中电流的变化不能大于 2.5%。

因为
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R},$$

所以
$$\frac{I}{I} = \frac{R}{R} < 2.5\%。$$

只要 $R > 40R'$ 即可。

(如果 G 是 1 级表, 要求 $R > 100R'$, 如果 G 是 0.5 级表, 要求 $R > 200R'$ 。) 在实验中如果达不到上述要求, 只要适当增高电源电压即能解决。

(3) 如果对实验准确度要求较高, 还可以用以下方法对测量结果进行修正:

K_1 合上, K_2 断开时, 电路总电流

$$I = \frac{E}{R + R'}$$

合上 K_2 时, 电路总电流为

$$I' = \frac{E}{R + \frac{R'R_g}{R'+R_g}}$$

调节 R' , 使通过表头的电流为 $I/2$, 则

$$I' = \frac{R'+R}{R'} \cdot \frac{I}{2}。$$

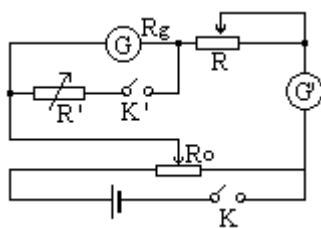
将(1)、(2)式代入(3)式, 化简后得到

$$R'R + R'R_g = RR_g,$$

因此有
$$R_g = \frac{RR'}{R - R'}。$$

方法二

器材 电流表 G ($I_g=200\mu A$), 电流表 G' ($I_g=300\mu A$), 滑动变阻器 R (0—1750), 滑动变阻器 R_0 (0—50), 电阻箱 R' (0—9999), 单刀开关, 直流低压电源, 导线等。



操作

(1) 将器材如图连接。滑动变阻器 R 置于阻值最大处, 滑动变阻器 R_0 置于阻值最小处, 电阻箱 R' 置成阻值最小。开关均断开。

(2) 闭合 K, 调节 R_0 及 R, 使电流表 G 满偏, 记下电流表 G' 的刻度数。

(3) 再合上 K' , 调节电阻箱 R' , 由最小逐渐增大, 使电流表 G 达到半偏。这时可发现电流表 G' 读数偏离了原来记下的刻度数。

(4) 多次反复调节 R 和 R' , 使电流表 G' 的指针仍指示原来的度数, 而电流表 G 的读数恰又在半偏。记下此时电阻箱 R' 的读数。

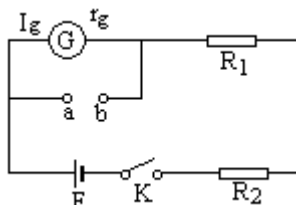
(5) K' 断开, K 合上时, 见 G' 读数为 I; 在合上 K' 时, 见 G' 读数仍为 I。则有 $R_g=R'$ 。

说明

本实验中电流表 G 显示了电路总电流大小不变。则电表内阻的测算与电源的电动势、电源的内电阻及滑动变阻器 R 无关，故实验误差较小。但在选用电流表时，应注意 G 的量程不应小于 G 的量程。

方法三

器材 电池组，变阻器(电位器)，普通电阻器，线绕(或金属膜)电阻器若干，电键等。



操作

(1)按图接线。其中 G 为待测内电阻的电流表； R_2 为定值电阻，起限流保护作用(R_2 应选阻值略小于 E/I_g 的普通电阻)； R_1 为电位器(或普通滑动变阻器)。

(2)接通电键 K ，调节 R_1 使电流表 G 的指针达满偏或接近满偏的某一数值 I_1 。

(3)用一只精确度级别较高的电阻 R' (可选 0.1 级或 0.05 级的线绕或金属膜材料的精密电阻，其误差范围分别为 $\pm 1\%$ 和 $\pm 0.5\%$)，并接在 a 、 b 两点，记下这时电流表的读数 I_2 。

(4)在通常情况下，总有 $R_2 \gg R'$ ，故可认为在 a 、 b 两点并接 R' 前后干路电流保持 I_1 不变。同时由于这时 R' 和电流表 G 是并联的，它们两端电势差应相等，可得

$$I_2 r_g = (I_1 - I_2) R'.$$

即电流表内电阻 $r_g = \frac{I_1 - I_2}{I_2} R'$ 。这样，根据 I_1 、 I_2 、 R' 值即可求得 r_g 值。

分析

(1)、(2)同方法一分析(1)、(2)。

(3)因为 $r_g = \frac{I_1 - I_2}{I_2} R'$ ，

所以 $E_{r_g} = +E_{(I_1 - I_2)} + E_{I_2} + E_{R'} = \frac{I_1 + I_2}{I_1 - I_2} + \frac{I_2}{I_2} + \frac{R'}{R'}$ 。

因为 R' 选用精密电阻，所以 R'/R' 一项很小，可忽略；又因为 $I_1 = I_2$ ，所以

$$E_{r_g} = \frac{2}{I_1 - I_2} + \frac{I_2}{I_2} = \frac{I_1 + I_2}{I_2(I_1 - I_2)} \cdot I_2.$$

为求 E_{r_g} 最小值，设 I_1 确定则：

$$dE_{r_g} / dI_2 = \frac{I_2(I_1 - I_2) - (I_1 + I_2)(I_1 - 2I_2)}{I_2^2(I_1 - I_2)^2}.$$

令 $dE_{r_g} / dI_2 = 0$ ，可得

$$I_2^2 + 2I_1 I_2 - I_1^2 = 0,$$

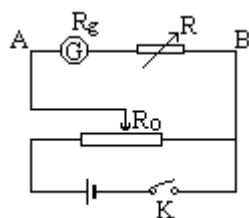
解得 $I_2 = (\sqrt{2} - 1)I_1 = 0.41I_1$ 。

由此可见，当 $I_2 = 0.41I_1$ ，即把 R' 取成接近 $1.5r_g$ 时， r_g 的测量误差最小。

将以上结论引进到经典的“半偏法测电流表内阻”的方法中，可知从测量准确的角度来看，“2/5偏法”应该更好。在方法一中，可以在合上 K_2 后，调节 R' ，使 $I=(2/5)I_g$ ，然后 $r_g=(3/2)R'$ 。

方法四

器材 电流表($I_g=300\mu A$)，电阻箱(0-9999)，滑动变阻器(0-50)，低压直流电源，单刀开关，导线等。



操作

(1)按图示正确接线， R 电阻箱值置于最大，滑动变阻器触头置右端，使分压值最小。

(2)合上开关 K ，调节电阻箱 R 的值和滑动变阻器 R_0 的值，使电流表满偏。此时有： $U_{AB}=I_g(R_1+R_g)$ 。 R_1 值为此时电阻箱的读数。

(3)保持滑动变阻器滑动触头位置不变，调节电阻箱 R 的值，使电流表半偏。设此时电阻箱的值为 R_2 。则有 $U'_{AB}=\frac{I_g}{2}(R_2+R_g)$ 。

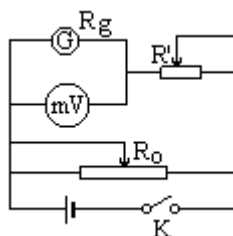
(4)由 $I_g(R_1+R_g)=\frac{I_g}{2}(R_2+R_g)$ ，得 $R_g=R_2-2R_1$ 。可计算出电流表内阻 R_g 的值。

注意

本方法存在着一定的测量误差，因为当电阻箱阻值变化时，端电压 U_{AB} 和 U'_{AB} 并不完全相等。为了减小测量误差，可使滑动变阻器 R_0 的值远小于 R_g 的值，那么，即使电阻箱从 R_1 变到 R_2 ，整个外电路负载的总电阻值变化甚小，使 U_{AB} 和 U'_{AB} 更接近。

方法五

器材 电流表 G ，毫伏表 mV ，滑动变阻器 R' (0—1750)，滑动变阻器 R_0 (0—50)，直流低压电源，单刀开关，导线等。



操作

(1)将器材如图连接。滑动变阻器 R' 阻值置于最大。滑动变阻器 R_0 的触头置于最右端。 K 断开。

(2)闭合 K ，调节 R_0 及 R' ，使电流表 G 满偏。记下这时毫伏表的读数。

因为毫伏表与电流表并联，这时毫伏表的读数即为电流表的满偏电压 U_g 。

由 $U_g=I_gR_g$ ，

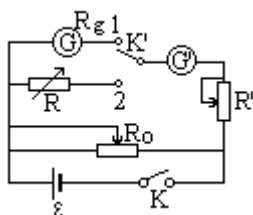
可有 $R_g = \frac{U_g}{I_g}$ (I_g 为电流表量程)。

说明 因为 $R_g = \frac{U_g}{I_g}$ ，所以 $E_R = E_U + E_I$ 。因此本方法测量结果的

好坏取决于电流表和毫伏表的准确程度。

方法六

器材 电流表 G ($I_g=200\mu A$ 或 $300\mu A$)，电流表 G' ($I_g=300\mu A$)，滑动变阻器 R' (0-1750)，滑动变阻器 R_0 (0—50)，电阻箱 (0—9999)，直流低压电源，单刀开关，单刀双掷开关，导线等。



操作

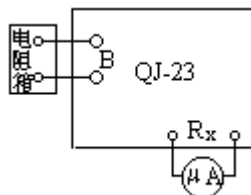
(1) 将器材连接如图。滑动变阻器 R' 阻值置于最大，电阻箱置于最大。滑动变阻器 R_0 置于最右端。开关均处于断开位置。

(2) 闭合 K ，使 K' 接 1，调节 R_0 及 R' ，使辅助电流表 G' 达到 $200\mu A$ (或小于 $200\mu A$ 的某个刻度)。

(3) 使 K' 接 2，逐渐减小电阻箱的阻值，使 G' 的读数仍指示原有的值。这时电阻箱的值 $R=R_0$ 。

方法七

器材 箱式单臂电桥 (QJ-23)，电阻箱，电流表，导线等。



操作

(1) 因电流表允许通过电流一般都比较小，因此要将 QJ-23 型电桥 B 处的短路金属板取下，串入一个电阻较大的电阻箱。电阻箱阻值可以用以下方法估算

$$R > \frac{E}{I}$$

如果电桥内电池电压为 $E=4.5V$ ，待测电流表满偏电流为 $I=50\mu A$ ，则

$$R > \frac{E}{I} = \frac{4.5}{50 \times 10^{-6}} = 90(k \quad)。$$

(2) 将待测的电流表安装在电桥的 R_x 两端后，按照电桥的一般使用方法即可测出电流表的内阻 (具体方法可参考本实验方法三)。

注意

(1) 因限于待测电表的额定电流，此方法中电桥工作在很小的电流下，因此比例臂应取 1:1，以提高灵敏度。

(2) 通过待测表头的电流尽量接近它的满偏电流，以提高测量精度。

方法八

原理 如图所示电路中，如果 R_1 、 R_2 、 R_g 、 R_3 达到平衡状态，桥路 AB 中是不会有电流通过的，也就是说在平衡状态下 K' 的开合对 I_g 没有影响。

器材 电阻箱 3 个，滑动变阻器 2 个(50 、 1750)，电键 2 个，电流表，电池，导线等。

操作

(1)按图连接电路， R_1 和 R_2 的阻值相同，将 R' 的阻值调成最大，打开 K' 。将 R 的触点置于较左端后，合上 K 。

(2)短促地开，合 K' ，观察电流表的指针的位置是否变化。如发生变化，调节 R_3 ，直至 K' 开合对电流表没有影响为止。

(3)逐渐减小 R' 的阻值，并将 R 的触头向右移，适当增大加在电桥上的电压，重复操作(2)直至 R' 减小到零。记下 R_3 的阻值。

(4)将 R_1 和 R_2 的位置对调，阻值仍然相同。重复操作(2)、(3)。将两次 R_3 的平均值作为 R_g 的值。

注意 在不超过电流表的额定电流的情况下，尽量让电流表的电流大一些，以减小测量误差。

测量电流表各种方法的比较：对五只电流表分别用方法一、二、四、五、六、七、八测量结果如下页列表。

从表中的测量值可以看出：方法一(分流半偏法)的初测结果偏小，应该经过修正后才能使用；方法二(用一电流表监视的分流半偏法)和方法四(分压半偏法)操作简单，器材易备，结果较好，值得在学生实验中推广；方法五(伏安法)因受毫伏表和电流表测量误差的影响，结果不够理想；方法六(替代比较法)、方法七(惠斯通电桥法)、方法八(汤姆逊电桥法)用的都是比较的测量思想，消除了大部分系统误差，而且不受电流表读数的影响，是较为准确的测量电流表内阻的方法。

方法 电表	一		二	四	五	六	七	八
	初测值	修正值						
1	4.30	4.47	4.50	4.50	4.20	4.46	4.43	4.42
2	4.30	4.47	4.50	4.50	4.20	4.46	4.43	4.42
3	4.10	4.25	4.16	4.86	4.20	4.46	4.43	4.42
4	4.31	4.48	4.44	4.36	4.40	4.46	4.43	4.42
5	4.31	4.48	4.44	4.27	4.40	4.46	4.43	4.42

测量结果 R_g 的单位：k 。

测定电阻率的温度系数

原理 导体的电阻率 随温度变化的规律是

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t)$$

式中的 ρ_0 、 ρ_t 表示导体在 0、t 时的电阻率，t 表示摄氏温度， α 为导体的温度系数。对某一段长度为 l，截面积为 S 的导体来说，如果不考虑 l、S 随 t 的变化，则有

$$\rho \frac{l}{S} = \rho_0 \frac{l}{S} (1 + \alpha t),$$

即 $R_t = R_0 (1 + \alpha t) = R_0 + \alpha R_0 t$ 。

测出包括 R_0 在内的一系列电阻 R_t 与温度 t 的对应值。即可作出 $R_t - t$ 图，此图线的斜率 $k = \alpha R_0$ ， $\alpha = k/R_0$ 。

器材 惠斯顿电桥，干电池，电键，灵敏电流计，电阻，温度计 ($0^\circ - 100^\circ\text{C}$)，烧杯，大试管，煤气灯，支架，冰，搅拌器，标准电阻，自制电阻等。

自制电阻的制作方法

将细铁丝绕在一个 U 形玻璃棒上，将铁丝的两个端点接到固定在试管塞上的接线柱 T_1 、 T_2 上 (U 形玻璃管也固定在试管塞上)，如图 (a) 所示。试管塞中央的洞中插入温度计。在试管中注入轻质油，以改善导热性能。(如果在试管中装水，线圈要用涂有绝缘漆的铁丝绕制，也可以用细的漆包铜线来替代。)

操作

(1) 将待测温度系数的铁丝线圈电阻 R 连接到电桥的一臂上，将在室温下阻值与其相近的标准电阻 S 连接到电桥的另一臂上 (如图 b)。

(2) 将铁丝线圈埋入装满碎冰的容器中，稍等一会，等到线圈的温度稳定在 0°C 后，移动滑动触头 J 。找出电桥的电阻丝 AB 上的平衡点，记下在此温度下的平衡长度 l_0 。

(3) 加热冰，使其融化。当温度升高约 10°C 并达到稳定时，调节电桥平衡，记下此时的准确温度值和对应的电桥平衡长度。继续加热，使水温达到一系列的稳定温度值，直至 90°C ，并记下每一个温度相对应的电桥平衡长度 l 。

(4) 让水冷却 (必要时可加冷水)，在水温下降过程中，记下当水温达到与前面一系列温度相同的电桥平衡长度，并找出前后两次对应于同一温度时电桥平衡长度的平均值 l 。

(5) 根据下式算出对应于每一温度值 t 的阻值 R_t

$$R_t = \frac{l}{l_0 - l} \cdot S,$$

式中 l_0 为电桥电阻丝的总长度。

(6) 以横轴代表温度 t ，纵轴代表电阻值 R_t ，作为 $R_t - t$ 图，可得一条直线 (图 c)。用图解法求出直线的斜率

$$k = \frac{R_t - R_0}{t},$$

导体电阻率的温度系数

$$= k/R_0.$$

说明 如果没有冰，也可利用图线外推得到 R_0 ，但这样做误差较大。

测定伏特表的内阻

方法一

器材 毫安表，电源，滑动变阻器，待测伏特表，电键，导线等。

操作

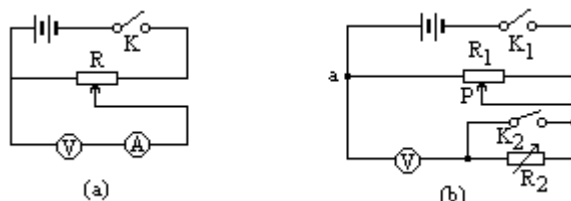
(1) 如图 (a) 连接电路。因为伏特表内阻较大，因此用分压器线路来改变电压效果较好。

(2) 合上电键 K，改变滑动变阻器 R 的触头的位置，从毫安表和伏特表上读得若干组不同的 (I, U) 值。

(3) 以横轴代表电流 I，以纵轴代表电压 U，作出 U-I 图。求出图线的斜率 k，就是伏特表的内阻。

方法二

器材 直流电源，滑动变阻器，电阻箱，待测伏特表，电键，导线等。



操作

- (1) 如图(b)连接电路。K₁, K₂ 都合上，调节滑动变阻器 R₁，使伏特表满偏。
- (2) 打开 K₂，调节电阻箱 R₂，使伏特表半偏。
- (3) 读出电阻箱的阻值，就是伏特表的内阻。

分析

(1) 此实验结果成立的前提是伏特表的内阻比滑动变阻器 R₁ 的阻值大得多，此时可认为 K₂ 的打开基本上不影响 a 点和滑动变阻器触点 P 之间的电压 U_{ap}。因此 R₁ 的阻值选得越小，实验结果的误差越小。(当然 R₁ 阻值越小，实验电路就越耗电，这一点必须兼顾考虑。)

(2) 不论伏特表内阻怎样大于滑动变阻器 R₁ 的阻值，当 K₂ 打开时，U_{ap} 总还是变大的。因此用此种方法测出的伏特表内阻是偏大的。

(3) 因为伏特表内阻一般较大，因此在测量其内阻时只能用本文介绍的电压半偏法，而不能用一般教材中常用的电流半偏法(因为如果用电流半偏法，除非用很高的电源电压和很大的干路电阻，才能保持干路电流基本不变)。

方法三

器材 电阻箱，滑动变阻器，电池，导线，电键等。

操作

(1) 如图连接电路。R₁ 是滑动变阻器，R₂、R₃、R₄ 是三只电阻箱。这是一种特殊的电桥，因为被测物是一个伏特表，本身就有指示功能，因此中间的桥上不再需要指零电表。

(2) 合上电键 K₁ 后，适当地调节 R₂、R₃、R₄ 三个电阻箱的阻值，使电键 K₂ 反复开、合而伏特表指针的位置不发生变化。此时电桥已经平衡，即有

$$R_U : R_2 = R_3 : R_4 ,$$

$$R_U = \frac{R_2 R_3}{R_4} .$$

(3) 逐渐减小滑动变阻器 R₁ 的阻值，可以提高电桥的灵敏度，直至 R₁ 调到零为止。

分析

(1) 因为 $R_U = \frac{R_2 R_3}{R_4}$ ，所以 $E_{RU} = E_{R2} + E_{R3} + E_{R4}$ 。而电阻箱的精密程度

是比较高的，因此这是一种比较准确的测量伏特表内阻的方法。

(2)为了提高伏特表指示平衡的灵敏度,可以适当地增高所用电源的电压,但要注意电阻箱的实际功率不能超过它的额定功率。

液体导体

酸、碱、盐的水溶液都能导电,当插入两个电极后,正负离子在电场力作用下做定向移动,形成了电流。液体导电的本质是离子导电。离子导电同时发生电解现象。正离子在阴极上得到电子发生还原反应,而负离子在阳极板上失去电子发生氧化反应。液体导电过程中会发生化学反应,这是与金属导电不同的地方。

方法一

目的 通过电镀铜演示液体导电时离子的运动。

器材 方形玻璃缸,铜电极,碳电极,硫酸铜溶液,滑线变阻器,安培表,直流电源,单刀开关,导线等。

操作

(1)将硫酸铜溶液倒入方形玻璃缸内,用铜板作阳极,用碳棒(可用大号干电池中的碳棒代用)作阴极,按图把电路接好。安培表可用大型示教电表,电源可用低压直流电源。

(2)在电流表上插接“0-1A”通路板。合上K,可见安培表有读数,说明液体开始导电。

(3)调节滑线变阻器,使电路中电流在1A左右。经3-5分钟,可见在阴极碳棒上附着一层暗红色的铜。说明硫酸铜溶液导电后,带正电的铜离子在电场力作用下向阴极运动,并在阴极上得到电子发生还原反应,变成铜原子附着的阴极上。同时,带负电的硫酸根离子,在电场力作用下向阳极运动,失去电子发生氧化反应,变为硫酸根。硫酸根与水分子反应,生成硫酸,析出氧分子,所以在阳极上出现了气泡。

方法二

器材 演示电表,直流高压电源(25V直流输出),有机玻璃板,铜条,滤纸,高锰酸钾溶液,硝酸钾溶液,导线等。

操作

(1)将吸满硝酸钾溶液的滤纸固定在有机玻璃板上,两边各压一条铜条作电极。在滤纸中间贴放一条高锰酸钾溶液浸泡过的纸条(紫色)。将电表作为100mA量程的毫安表,与高压直流电源等按图连接成电路。

(2)打开高压电源开关,可见毫安表指针偏转,说明电路中有电流通过。有机玻璃板中间的紫色带缓慢向阳极移动,说明高锰酸钾的锰酸根离子在缓慢地向阳极移动。

(3)将高压电源正负极对换。可见紫色条带向相反方向移动,说明液体导电是离子导电。

测定铜的电化当量

目的 根据法拉第电解第一定律 $m=KIt$ 测定铜的电化当量。

器材 如图所示: B为用长9.6cm、高7.5cm、宽6.5cm的透明塑料板制成的电解槽; R为14Ω、2.2A的滑动变阻器, E为12V的蓄电池; A为0—0.6A、0—3A双量程的电流表; 三块高5.5cm、宽5cm的铜板,中间一块为阴极板,两边二块为阳极板; 称量范围为10mg—200g的天平; 停表; 硫酸铜($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)60g; 蒸馏水300ml。

操作

(1)溶液的配制：把硫酸铜 60g，放入 300ml 的蒸馏水中，当硫酸铜完全溶解后即可进行实验。若硫酸铜完全溶解后再加入 20ml 的浓硫酸，除去沉淀物，可提高溶液的导电能力，增大电流密度，使铜的结晶更紧密、细致。

(2)实验前，三块极板要用砂皮除去毛刺，去掉污渍。这是为了使电解时各处电流密度均匀，不致出现瘤状物。称出阴极板的质量 m_1 。

(3)实验中，使电流 I 稳定在某一值。为保持电流稳定，要求在一合上开关时，动作迅速地把电流强度调节到 2A，并同时开始计时或先用一块与阴极板相同面积的辅助极板代替，待调节好电流强度后再换上质量为 m_1 的阴极板。实验过程中还要随时注意调整，保证电流值的稳定。

(4)实验后，从电解槽中取出阴极板，经水洗净，在酒精灯上烤干，然后在天平上称出质量 m_2 。在烤干称量过程中避免用手或脏物接触沉积面。

(5)阴阳极板间距离应稍大一些，这样即使极间稍有不平行即极间的距离各处不相等时，电流密度的相对变化也不会太大。

分析

某次实验，用天平测出 $m_1=44.16\text{g}$ ， $m_2=45.36\text{g}$ ， $m_2-m_1=1.20\text{g}$ 。

由公式 $K = \frac{m_2 - m_1}{It}$ ，K 的最大相对误差为

$$\frac{K}{K} = \left| \frac{m_2}{m_2 - m_1} \right| + \left| \frac{m_1}{m_2 - m_1} \right| + \left| \frac{I}{I} \right| + \left| \frac{t}{t} \right|。$$

m_1 、 m_2 的大小决定于天平的精度和砝码的等级。如果天平的感量为 10mg，则前两项的相对误差为 $\frac{2 \times 0.01}{1.20} = 1.66\%$ 。I 取决于电流表的等级，

现电流表为 2.5 级，实验接 3A 量程，则 $I = 0.025 \times 3 = 0.075\text{A}$ ，当 $I = 2\text{A}$ 时，

$\frac{I}{I} = 3.8\%$ 。停表测定时间 t ， t 能控制在 1 秒内， $t = 30$ 分钟，所以 t/t 很

小，可忽略不计。所以在我们所用的仪器本身带来的最大相对误差在 5.46%，如果天平的感量为 20mg，则仪器带来的最大相对误差在 7.12%。产生误差的原因还有电流的不稳定、溶液的浓度过低，以及铜在负极上有脱落等。可采用四组蓄电池两两串联后再并联和两只滑动变阻器并联使用的方法，这样既可增大电流，又可使内阻减小，起稳定电流的作用。溶液的百分浓度应在 5% 以上，以保证溶液有合理的导电能力。除去负极板上的沉淀物，适当提高溶液的导电能力，增大电流密度可使铜的结晶紧密、细致、不脱落。

验证实例

将 60g 化学纯的硫酸铜溶解在 300ml 蒸馏水中，待硫酸铜完全溶解后再加入 20ml 浓硫酸。称出阴极铜板原来的质量 m_1 ，工作电流保持在 2.0A，用秒表计时。电解后阴极铜板的质量为 m_2 。

共进行三次实验

第一次 $m_1 = 44.16\text{g}$, $m_2 = 45.39\text{g}$,
 $m = m_2 - m_1 = 1.23\text{g}$,
 $t = 1800\text{s}$, $I = 2.0\text{A}$,

$$K = \frac{m}{I \cdot t} = \frac{1.23 \times 10^{-3}\text{kg}}{2 \times 60 \times 30\text{C}} = 3.40 \times 10^{-7}\text{kg/C}。$$

第二次 $m_1 = 48.57\text{g}$, $m_2 = 49.83\text{g}$,
 $m = m_2 - m_1 = 1.26\text{g}$,
 $t = 1800\text{s}$, $I = 2.0\text{A}$,

$$K = \frac{m}{I \cdot t} = \frac{1.26 \times 10^{-3}\text{kg}}{2 \times 60 \times 30\text{C}} = 3.50 \times 10^{-7}\text{kg/C}。$$

第三次 $m_1 = 48.57\text{g}$, $m_2 = 49.76\text{g}$,
 $m = m_2 - m_1 = 1.20\text{g}$,

$$K = \frac{m}{I \cdot t} = \frac{1.20 \times 10^{-3}\text{kg}}{2 \times 60 \times 30\text{C}} = 3.32 \times 10^{-7}\text{kg/C}。$$

将上述三次实验结果和公认值 $3.29 \times 10^{-7}\text{kg/C}$ 比较, 相对误差分别为

$$E_1 = \frac{3.40 - 3.29}{3.29} \times 100\% = 3.3\% ,$$

$$E_2 = \frac{3.50 - 3.29}{3.29} \times 100\% = 6.4\% ,$$

$$E_3 = \frac{3.32 - 3.29}{3.29} \times 100\% = 0.9\% 。$$

都在允许的实验误差范围之内(所用天平是感量为 0.02g 的物理天平)。

气体的受激放电

在通常情况下, 由于气体几乎完全是由中性的原子或分子组成的, 所以是不导电的。在火焰、紫外线、x射线和放射性元素发出的射线等电离剂作用下, 气体可被激电离, 产生正离子和电子, 从而产生导电现象。通常把在电离剂作用下才能发生的气体放电现象叫做受激放电, 没有电离剂作用而发生的气体放电现象叫做自激放电。本实验所列举的几种方法, 都是用火焰作电离剂, 使气体电离造成放电现象。

方法一

器材 金属板两块, 演示用电流表, 直流高压电源, 酒精灯, 支架, 导线等。

操作

(1) 把两块相互绝缘的金属板平行放置, 两板相距 2cm 左右。将演示用电表调到 G 档, 并将指针调至左方零点, 量程为 $200\mu\text{A}$ 。高压直流输出调在 300V 档。按图接线。

(2) 开启高压电源, 两板间无放电现象, 电流表读数为零, 说明此时两板间的空气不导电。

(3) 把点燃的酒精灯移至两金属板间, 对空气加热。并将酒精灯在两板间来回晃动, 使两金属板间的空气充分受热, 直至空气分子电离。这时, 可以看到电表指针发生偏转, 示数在 $10\mu\text{A}$ 以上。表明电离后的离子和电子在电场力作用下, 形成

了电流，电流计指示的是空气导电时的电流。

(4)将酒精灯移去，离解的正离子和电子很快又复合成中性的气体分子电表指示立即为零。这说明气体导电是受激导电。

说明

若没有高压直流电源，用感应圈替代，也可以演示。演示时，要注意安全。

方法二

器材 指针验电器，有机玻璃棒，丝绸，火柴，蜡烛，橡胶棒，毛皮等。

操作

(1)取两个验电器，让一个带正电，一个带负电，并使它们的金属球互相靠近。由于空气是干燥的，两验电器带电状态保持不变。

(2)把点燃的蜡烛置于两金属球之间(如图)。可以看到，两个验电器很快就不带电了。说明这时的空气变成了导体。

说明

若只用一只验器，也能做成这个实验。因空气受激后验电器上的电荷将被中和。

方法三

器材 锥形烧瓶，橡皮塞，金属圆板 1 对，铜片，薄铝箔，直流高压电源，导线，火柴等。

操作

(1)在锥形烧瓶中装上一铜片和铝箔，平行且下垂(如图)。相距 1cm 左右。

(2)接通高压直流电源，金属圆板 A 带正电，瓶中铜片带负电。

(3)点燃一根火柴放在 A、B 两金属圆板间，使空气电离而导电，使金属圆板 B 及铝箔均带上正电。铝箔与铜片间由于异种电荷相互吸引，使铝箔摆向铜片而相互接触，电荷由于被中和而使铝箔重新摆向原来的下垂位置。但又由于 A、B 两金属圆板间空气仍在继续电离，故又重复上述过程。从而出现铝箔在瓶中反复摆动的现象。直至 A、B 两金属圆板间火焰熄灭为止。

稀薄气体的辉光放电

方法一

器材 低气压放电管组一套(6 支)，感应圈，低压直流电源(8-10V)，导线若干。

操作

(1)感应圈的输入端接 8-10V 直流电。其输出端分别接在放电管组的两个接线柱上。

(2)开启低压电源，手持放电杆的绝缘手柄，再开启感应圈。将放电杆的金属端分别与 6 支放电管的顶端相接，便可以看到各个稀薄气体放电管中产生不同的辉光放电现象。如果将实验室光线遮去一些，则效果更好。

注意 与感应圈输出端相连的两根导线有高压，它们之间的距离要足够大。实验中，手不要触及放电杆的金属部分，以防电击。

说明 当管中气压为 40mmHg 时，出现紫色光带。当气压为 10mmHg 时，全管出现紫色光带，颜色比前面的稍浅，两极周围出现红蓝色辉光。当气压为 3mmHg 时，阴极周围出现紫色辉光，从阳极发光的粉红色辉光充满全管，开始出现克鲁克斯暗区。当气压为 1mmHg 时，阴极周围出现蓝色辉光，阳极出现鳞片状辉光，能清晰地分出克鲁克斯暗区和法拉第暗区。当气压降到 0.1mmHg 时，暗区加长，管内出现灰白色

棉球状的光亮。当气压为 0.02mmHg 时，阴极发出射线，在玻璃管壁上出现荧光。荧光的色彩与玻璃的品种有关。

方法二

目的 研究放电管内气压变化时的放电现象。

器材 自制放电管，感应圈，真空泵，导线；电源等。

放电管的制作方法

用 8W 废日光灯管一支，中间截断，清洗好。一端利用管脚作电极，一端塞上橡皮塞封住管口，在橡皮塞上紧插直径为 1mm 铜丝一段，在铜丝一端焊上金属小瓶盖作电极，再紧插一根玻璃管用作抽气时接口，实物见图。

操作

(1) 调节感应圈，使其放电间隙在 5-8mm 左右，输出电压约在 5 万伏以上。

(2) 把调节好的感应圈的输出端分别接在自制放电管的两端电极上。

(3) 用硬橡胶管将放电管的抽气口与真空泵相接。

(4) 接通感应圈，开动真空泵给放电管抽气。放电管内随着气压的变化光柱的形状和颜色也相应发生变化，从最初出现紫色光带，随后紫色光带变宽几乎充满全管直到管内出现法拉第暗区和克鲁克斯暗区。

注意 该实验的成败关键在于放电管的接口密封性要好，不能漏气。且演示最好在暗室内进行，没有暗室时可用大泡沫塑料包装盒涂黑后进行遮光。

方法三

目的 用废白炽灯泡演示稀薄气体的辉光放电。

器材 废白炽灯泡，高压电源等。

操作

(1) 将废白炽灯泡尾部的金属壳除去，不要弄断灯丝引出线。(可用电烙铁先烫去锡块，再敲去填料。)

(2) 将灯丝引出线接在高压电源两端，逐步升高电压，直至看到淡红色辉光(交流电压 1500V 左右始见辉光)。

注意

(1) 要选不漏气的灯泡。

(2) 电压升高后，灯丝引线间可能出现火花放电，可用干燥绝缘材料将其隔开。

弧光放电

两碳棒相接触时，由于接触处电阻很大，电流通过产生大量热量，使接触处温度很高。当两碳棒分离后，高温气体发生电离，形成放电，这种现象叫做弧光放电。在大气中产生弧光放电时，两碳棒间的电压并不高，通常仅几十伏，而极间电阻极小，即极间气体有很好的导电性，故电流可达几安甚至几十安。因此，在电路中需有制流电阻器保护电源。制流电阻器(又叫限流器)也可以用功率在 1KW 以上的电炉串接在电路中代用。弧光放电的电极可以是碳极，也可以是金属极。弧光放电在实际中有着广泛的应用，如各种气体放电光源、电炉炼钢和电焊等。

器材 碳棒(可以从旧电池中拆出)，限流器(10A、0.03H)，交流电源(50V、500W)，支架，导线等。

操作

(1) 将两碳棒分别安装在铁架台上，作为两电极。两碳棒与限流器串接于交流 50V 的电源上。

(2)接通电源后,调节碳棒接触片刻,随后使两极分开 1-2mm,即可看到横跨间隙的极为明亮耀眼的弧光。放电区域温度很高,气体温度可达 2000K 以上。由于电极的不断烧蚀,故需及时调节两极间距,使放电保持稳定。

注意 弧光放电时,伴随有大量的紫外线,对眼睛有伤害作用,应注意防护。

说明 如果没有 50V 的交流电源,也可用两台低压电源的 24V 交流档串联代用。

火花放电

当两电极间的电势差和电场强度增大到一定程度(约 $3 \times 10^6 \text{V/m}$)时,在两极间会出现一束明亮的细丝状的放电火花,并伴有爆炸声,这就是火花放电。

火花放电特点是极间电压很高,而供给的功率不需要太大。极间气体是在强电场作用下被击穿而导电的。实验中感应圈、感应起电机、范德格拉夫起电机等都可以作为高压电源。

火花放电的电极形状没有限制,用金属丝或金属球均可,只是不能用太尖的导体,以免发生尖端放电。两电极间的距离大小,取决于电源所能达到的电压。一般说来,空气的穿电压为每厘米万伏量级。自然界的雷击闪电,就是云层之间或云层与大地之间的火花放电。

方法一

器材 感应圈,低压电源,导线等。

操作

(1)感应圈输入端接上 8-10V 低压直流电,在放电柱上安装尖形极电杆。使两放电杆尖端相距 2-4cm。

(2)接通电源,调节断续器,就可以见到两个放电尖端处不断发生火花放电,并伴有噼啪爆裂声。

(3)切断电源,拉开尖端间距至 4-8cm。升高电源电压,重复操作(2)。可以看到更长的火花放电。

(4)切断电源,取下尖形放电杆。装上两个金属球形电极。重复操作(2)。由于达到放电电压时,金属球上可积累更多的电荷,因此放电时火花更亮些,爆裂声也更响些。

注意

(1)用两尖形放电杆实验时,火花间距不能超过 80mm。用放电盘和尖形放电杆时,火花间距不能超过 50mm。连续工作不要超过 15 分钟。

(2)若发现断续器接触不良,可用细砂纸轻轻擦去白金触点表面的氧化层,使之接触良好。

(3)实验操作中,身体不要接触放电器和引出线。手距放电柱距离应大于 80mm,以防电击。

方法二

器材 感应起电机,红外线灯,交流电源等。

操作

(1)感应起电机使用前先要将上面的灰尘清除掉。试摇后发现不能起电,则应略加日晒,或用红外线灯烘烤。用来消除仪器表面的水气。但烘烤的温度不要超过 40℃,以防有机玻璃板变形。

(2)在起电机座下,垫一层有机玻璃板或包装仪器用的聚苯发泡塑料,提高仪器与大地间的绝缘性能。

(3)摇动感应起电机，在两放电球间(一般两球间距小于 8cm)发生断续的火花，伴有“啪、啪”声。这就是由于两极间高压电场的作用，使极间空气电离而产生的火花放电。

尖端放电

带电导体的尖端处电荷密度最大，尖端附近的电场最强，容易使附近的气体电离而产生尖端放电现象，尖端放电时常常不带有强烈的火花。在暗处，可以看到尖端处出现淡紫色的光点。这种放电只发生在靠近带电体的很薄的一层空气里，属于电晕放电。而火花放电是两带电体间存在有很高的电势差和场强，使气体电离而导电，产生火花且伴有爆炸声的放电现象。两者有明显区别。一些高压设备的电极常常做成光滑的球面，就是为了避免尖端放电。而避雷针则是通过尖端放电避免电荷积累而发生雷击。

方法一

器材 自制电风轮，感应起电机，导线等。

电风轮的制作方法

用金属丝四根，一端固定在金属轮轴上，另一端磨尖并朝同一方向弯成直角(如图)。把风轮安放在带有尖端支点的导体上，导体安装在绝缘底座上。风轮要在水平面内转动自如。

操作

(1)将风轮下的金属支承轴与感应起电机的一极相连。注意连接用的导线两端不能有细金属丝向外伸出。

(2)摇动起电机，使风轮带电。由于风轮尖端处电荷密度最大，所以附近场强最强。在强电场力的作用下，尖端附近的空气被电离。与轮的尖端带同种电荷的离子被排斥而飞向远方；与尖端带异种电荷的离子被吸引而趋向尖端，并与尖端上的电荷中和。根据动量守恒，则风轮沿尖端相反的方向转动。

(3)实验完毕，将起电机的两放电球相碰，使之放电。

方法二

目的 观察带电粒子在电场中的运动。

原理 蜡烛点燃后被融化，并挥发出碳和氢气。它们在火焰的高温作用下，失去电子而带正电。带正电的碳和氢离子在上升过程中不断被氧化(即燃烧)，生成二氧化碳和水蒸气，并发出热和光形成蜡烛火焰。

把蜡烛火焰靠近带高压正电的导体尖端时，由于导体尖端部分电荷密度大，它附近的电场很强，带正电的碳和氢离子在电场力作用下，向远离尖端导体的方向运动，这时碳和氢燃烧产生的火焰也就向远离导体的方向偏，好像有一股持续的“风”从带正电的导体尖端吹向火焰一般。把蜡烛火焰靠近带负电的导体尖端时，情况正好相反。根据蜡烛火焰在电场中偏转的方向可以判断带电粒子在电场中运动的方向。

器材 感应起电机，带有尖端的绝缘导体，蜡烛等。

操作

(1)用导线把绝缘导体与感应起电机的一根电极相连，把蜡烛放在适当位置使火焰在导体尖端处。这时火焰向上，说明火焰中带正电的碳和氢离子向上运动。

(2)转动起电机，使绝缘导体带正电，这时蜡烛火焰被排斥，如图所示。说明火焰中带正电的碳和氢离子在电场力的作用下向远离导体的方向运动。

(3)把绝缘导体与感应起电机的另一根电极相连，转动起电机，情况正好与操

作(2)相反。

(4)改变起电机转速，导体带电量发生变化，尖端处场强大小发生变化，火焰的偏转程度也随之变化。这是因为火焰中的碳和氢离子受到的电场力发生变化，它们在电场中的偏转程度也发生了变化。

说明

由于火焰发光部分具有净的正电荷，因此使绝缘导体的尖端带正电荷比使它带负电荷的演示效果更好。

方法三

原理 如图所示，在带正电圆板形成的电场的作用下，针尖由于静电感应而带上了负电荷。由于针尖的尖端放电，使导电球带上了负电荷。带负电的导电球在圆板电场的的作用下与圆板接触而带上正电，因此被圆板排斥开，又受到针尖所放电荷的影响……。如此往复，导电球会多次撞击圆板。

器材 感应起电机，带有绝缘柄的导体圆板，自制导电球，缝衣针，铁架台，塑料棒，丝线等。

导电球的制作方法

将乒乓球用细砂皮打磨后粘上铅笔芯粉，使球表面形成一个均匀的导电薄层即成。

操作

(1)把圆盘形成铝盘固定在铁架台上。用线将导电球悬挂在塑料棒上，塑料棒固定在铁架台上(如图)，使球与铝盘保持1-2cm距离。

(2)把有机玻璃棒用丝绸摩擦几下，将棒接触铝盘，使盘带上正电荷。重复几次，以增加铝盘上正电荷数量。此时，导电球将偏向铝盘。

(3)用缝衣针的针尖指向导电球，逐渐靠近，球就会在铝盘与针尖之间来回摆动，反复敲击铝盘。

永磁体的磁力线

器材 条形磁铁2根，蹄形磁铁，铁屑，玻璃板，白纸等。

操作

(1)将铁屑装在盖上有小孔的小瓶中。将白纸贴在玻璃板上。

(2)将没有贴纸的一面玻璃板向上，条形磁铁放在玻璃板下。在玻璃板上均匀地撒上铁屑后用于轻敲玻璃板，铁屑沿磁力线走向排列，显示出条形磁铁的磁力线，如图(a)。

(3)将两根条形磁铁同名磁极相隔适当距离相对放置，重复操作(2)，可显示两同性磁极间磁力线，如图(b)。

(4)将两根条形磁铁的异性磁极端相隔一定距离相对放置，重复操作(2)，可显示两异性磁极间的磁力线，如图(c)。

(5)将马蹄形磁铁水平地放置于玻璃板下面，重复操作(2)，可显示马蹄形磁铁两极间的磁力线，如图(d)。

注意

实验的关键是铁屑要均匀地撒在玻璃板上，并不在于铁屑多少。铁屑太多，磁力线反而会模糊不清。

说明

(1)如果要用投影仪在屏幕上显示磁力线，则玻璃上不必贴白纸，完成操作(2)后将玻璃放在投影幻灯机上即可。

(2) 如果想永久地保留磁力线图, 可用如下方法: 取一张白色书写纸, 将它放入熔化的蜡烛液中浸渍均匀后取出凉干, 成为一张白色含蜡纸板。将含蜡纸板放在玻璃板上, 用与操作(2)、(3)、(4)、(5)相同的方法制成磁力线图。然后用热电熨斗靠近蜡纸板, 使蜡熔化。取走电熨斗, 蜡液冷却, 粘住了铁屑, 即成为永久的磁力线图。

磁 极

器材 大钢针, 磁铁, 铁屑等。

操作

(1) 用条形磁铁的一端顺着—个方向摩擦钢针, 使钢针磁化。

(2) 将钢针放入铁屑中, 再取出, 可见钢针的两端吸引着许多铁屑(如图), 说明钢针有两个磁极。

(3) 将钢针从中部折断, 重复操作(2)。可见每段钢针都变成了磁体, 每个磁体都有两个磁极。

(4) 用小磁针检验每个磁极的极性。

(5) 把钢针再折断, 重复操作(3)、(4)。结论是每个磁体都有两个磁极, 单个磁极的磁体是不存在的。

磁体表面的磁感应强度与其曲率有关

器材 永磁铁(也可用喇叭上的磁钢或其他铁氧体磁子等), 小钢珠(直径 6mm 左右), 回形针, 细线等。

操作

(1) 将永磁体放在水平桌面上。磁体上放置一小球。小钢球被磁体吸住(小钢球的位置在磁体平面的中间部分)。

(2) 手持线的上端, 在线的下端悬挂一个回形针。使回形针与小钢球上端表面接触, 如图(a)。

(3) 缓慢地将细线上提, 发现小钢球一起被提了起来, 如图(b)所示。待到达一定高度后, 小钢球落下。

说明 小钢球会随回形针一起提升的现象, 说明被磁化后的回形针与钢球接触部分的曲率比永磁铁与钢球接触部分的曲率大, 因此回形针与小钢球接触处的磁感应强度比永磁体与小钢球接触处的磁感应强度大。

当小钢球上升到一定高度后, 由于回形针的磁性减弱, 小球所受重力大于回形针对它的吸引力时, 小钢球就下落。

烧 摆

目的 演示铁磁性物质在高温下会失去磁性的现象。

器材 自制镍卷, 条形磁铁, 酒精灯, 铁架台, 漆包线等。

镍卷的制作方法

取一段窄长条状镍片(可从废旧电子管的板极上截取)卷成螺旋状。

操作

(1) 如图所示, 用细漆包线把镍卷悬挂起来, 调节条形磁铁和镍卷的间距, 使镍卷处于近乎临界平衡状态。

(2) 用酒精灯焰加热镍卷, 不一会儿, 镍卷的平衡遭破坏, 镍卷下落并脱离火焰区。但镍卷刚往下移过一段距离后又会重新被磁铁吸引, 回到原来位置, 再次被

灯焰加热……如此周而复始，构成一奇特的“烧摆”。

说明 通常，人们把铁磁性物质失去铁磁性的临界温度称作“居里点”。铁的居里点温度为 770，镍的居里点温度为 358。因此，用自制镍卷替代铁质回形针完成“烧摆”实验，较易获得成功(一般书上是以“回形针”为材料完成上述实验的)。

奥斯特实验

目的 验证电流的周围存在磁场。

器材 直导线，支架，磁针和支座，蓄电池组，滑动变阻器，单刀开关，导线等。

操作

(1)把直导线顺着子午线(即沿南北方向)安置在支架上。在直导线下方约 1cm 左右平行放置磁针。将导线、滑动变阻器、单刀开关、电源串联成回路。

(2)把滑动变阻器的滑动触头置于中部，合上开关，直导线通有电流 I。即可看到磁针指向发生偏转。

(3)将磁针置于直导线上、下、左、右各个位置，重复操作(2)。发现只要导线中通有电流，磁针在直导线四周各个位置均发生偏转。

(4)改变直导线中的电流方向，重复操作(2)。观察到磁针也发生偏转，但偏转方向与上列操作中的结果相反。

(5)总结实验观察结果；在电流周围存在有磁场。当电流方向改变时，磁场方向也发生改变。

注意

(1)滑动变阻器在电路中起着控制电流、保护电源的作用。但电阻值不能太大，否则电流太小，实验效果不明显。

(2)直导线也可以用收音机上的铜质拉杆天线替代，如图。

通电导线周围的磁力线

演示通电导线周围的磁力线，需要有一个输出电流较大的直流电源。一般教学用的铅蓄电池放电电流不宜超过 3A。常用的替代办法是采用多匝线框替代单股导线，以“增大”电流强度。也可以用大电容缓慢充电后，较快地放电得到短时间的大电流。

方法一

目的 演示奥斯特实验和直线电流的磁力线。

器材 自制通电直导线，低压直流电源，磁针，铁粉等。

通电直导线的制作方法

取长约 70cm、0.5mm 漆包线 30 根，加入等长直径 1mm 左右铁丝一根，外面套上塑料管。在较薄的有机玻璃板(或白色光滑塑料板、硬纸板)上钻一个比塑料套管截面稍大的孔，如图(a)。将套好套管的多股导线穿过此孔。用硬纸或薄铝皮制一开口小盒，并装上两只接线柱，如图(b)。将多股导线两端各线头刮去漆，然后插入小盒两端的孔中。从多股导线两端各任取一根，用万用表测得不通，即可把它们绞合起来并焊牢。逐根依此法绞合、焊牢，最后剩首尾各一根与接线柱固定。把焊接好的线头逐根用绝缘布包好，藏于小盒中。制成后如图(c)。

操作

(1)演示奥斯特实验时，将有机玻璃板移至小盒一侧，如图(d)。

(2)如图(c)的装置,将铁屑撒于有机玻璃板上,通电后轻敲有机玻璃板,铁屑立即按磁力的分布排列,再用小磁针指示出磁场的方向。可验证安培定则。本实验也可用书写投影仪或平面镜反射给学生观看。

(3)用图(d)装置,可演示磁场对电流的作用,并验证左手定则。

说明 演示上述几个实验时只需用 2V-4V 直流电源,此时每根导线电流约 0.6A,套管内的总电流约 20A,可较长时间通电而不发热。

方法二

目的 演示环形电流的磁力线。

器材 自制单匝环形线圈,低压直流电源,磁针,铁粉等。

单匝环形线圈的制作方法

用长约 70cm、0.5mm 左右漆包线 30 根,加入等长的直径 1mm 左右铁丝一根,外面套上适当粗细的塑料套管。在透明有机玻璃板(或光滑白色塑料板、硬纸板)上钻两个相距 15cm 比塑料套管截面稍大的孔,如图(a)。将套好塑料套管的漆包线穿过两孔,弯成一单匝线圈,如图(b)。把各线头刮除漆,两端各任取一根用万用表测得不通后绞合焊接起来,并包上绝缘布,逐根全部焊接后藏于接线柱后面的小盒内。剩下首尾各一根头,用焊片固定在接线柱上(图 c)。

操作 在两个接线柱上接上 2V 电压,通过线圈的电流约 0.6A。在有机玻璃板上撒上铁屑,轻轻敲击有机玻璃板,铁屑便以磁力线形状排列,再用小磁针测得磁场方向。

注意 有机玻璃板面必须十分光滑,否则撒在上面的铁屑不易排列。

方法三

目的 演示通电螺线管的磁力线。

器材 自制螺线管,低压直流电源,磁针,铁粉等。

螺线管的制作方法

取长 120cm、0.5mm 左右的漆包线 30 根和等长的 1mm 铁丝一根,外面套上适当粗细的塑料套管。

在 3mm 厚的有机玻璃(或白色光滑硬纸板)上钻 7 对比塑料套管截面稍大的孔,如图(a)。将套好塑料管的漆包线通过这些孔,弯成一螺线管,如图(b)。各线头刮去漆,两端各任取一根用万用表测量不通后绞合并焊接在一起。全部线头依法逐个焊好后,再用绝缘布粘住。最后剩首尾各一线头接至接线柱上(图 c)。

操作 接上低压直流电源,线圈中电流约 0.6A。在有机玻璃上面撒满铁屑,轻敲有机玻璃,铁屑便按磁力线排列。再用小磁针放在螺线管两端,指示出磁场方向。

磁感应强度

器材 电流天平,演示用大型电表,低压电源,滑动变阻器(10 Ω 、2A),导线,电键等。

操作

(1)电流天平 E 形导线接 4V 电压,电流天平螺线管线圈接 6V 电压(如图 a)。两示教电表均用作 5A 直流电流表。转动电流天平调平螺丝。将电流天平转换开关置于 1 位置(如图 b)使 E 形导线有效长度 l 为 $L/2$ 。调节滑动变阻器 R_2 ,使通过螺线管线圈的激磁电流为 1A。再调滑动变阻器 R_1 ,使通过 E 形导线 $L/2$ 部分的电流 I 为 1A。这时电流天平的平衡被破坏,指针偏转。在砝码挂钩处挂上一个 100mg 的砝码,使电流天平恢复平衡。这时有 $L/2$ 部分导线所受安培力 F 等于砝码所受的重力

G。

(2)保持螺线管线圈中的激磁电流大小不变,调节滑动变阻器 R_1 ,使E形导线L/2部分的电流I增加为2A,3A,重复操作(1)。恢复平衡需挂砝码20mg、30mg。这说明通电导线所受磁场力之比为 $F_1:F_2:F_3=1:2:3$,可见在磁感应强度和通电导线长度不变的条件下, $F \propto I$ 。

(3)保持螺线管线圈中的激磁电流大小不变。将转换开关合到2位置。使E形导线的有效长度l(即受磁场力作用导线的长度)为L,再调节滑动变阻器 R_1 ,使通过E形导线L部分的电流I大小依次为1A,2A。恢复平衡时相应所挂的砝码为20mg和40mg。这说明在磁感应强度和导线通过电流I不变的情况下,导线所受的磁场力 $F \propto l$ 。

(4)根据以上结果,用多变量复合的方法(具体方法见实验63按语),可以得到在磁感应强度不变的情况 $F \propto I \cdot l$ 的结论,即 $F=K \cdot I \cdot l$, $K=F/(I \cdot l)$ 。

(5)调节滑动变阻器 R_2 ,使螺线管中的电流增加到2A。重复操作(1)、(2)、(3)、(4),可以得到相同的结论,但K的值增大为原来的两倍。这说明K是一个只与螺线管中的电流有关,可以表征螺线管中磁场强弱的物理量,叫做磁感应强度。

研究直线电流磁场

原理 在地磁场水平分量 B_e 作用下,小磁针的N极偏北。把直导线竖直地放置在小磁针所在的磁子午面内,当导线中通过电流时,由于同时受到地磁场和直线电流磁场的作用,小磁针发生偏角。根据这个偏角的大小,可以知道直线电流磁场的磁感应强度的大小。改变直导线中电流的大小及小磁针到直导线的距离,便可以研究直线电流磁场的特征。

器材 演示电表,滑动变阻器(0-200 Ω),磁针,单刀开关,低压电源,塑料量角器,自制大线框,支架,导线等。

大线框的制作方法

用直径为0.41mm的漆包线绕成长80cm、宽25cm,约80匝的矩形线框,外用胶布扎紧。

操作

(1)把两块塑料量角器下面无刻度部分磨去,拼制成一个0—360°的刻度盘。然后在其圆心部分固定一小针,用来放置大磁针。

(2)将线框竖直放置于桌边,使线框长边的中点在桌面附近。将磁针置于桌边,待磁针静止不动后,调整线框平面与磁针处于同一子午面内。

(3)将线框、大型安培表、滑动变阻器、单刀开关、低压电源用导线连成串联电路。低压电源输出调至6V直流,安培表量程用(0-1A)。

(4)合上开关,使磁针轴到线框长边的距离 $r=10\text{cm}$,调节滑动变阻器,使电流分别为 I_1, I_2, I_3 ,记录相应的磁针偏角 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 。

因为 $\tan \alpha = \frac{B}{B_e}$, 所以 $B = B_e \cdot \tan \alpha$ 。从 $B_1 : B_2 : B_3 = I_1 : I_2 : I_3$ 可知当r—

定时 $B \propto I$ 。

(5)调节滑动变阻器,使线框中保持某一电流值I不变。沿地磁场水平分量 B_e 的方向移动磁针,改变直导线与磁针中心的间距r。测得间距分别为 r_1, r_2, r_3 时,磁针的偏角分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, 由 $B=B_e \tan \alpha$

算出 B_1 、 B_2 、 B 的值。从 $B_1 : B_2 : B_3 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3}$ ，可知当 I 一定时，

$$B \propto \frac{1}{r}。$$

(6)用多变量复合的方法(见实验63按语)，可从 $B \propto I$ ， $B \propto \frac{1}{r}$ 得到 $B \propto \frac{1}{r}$

的结论。

注意 实验时，电源要尽量远离磁针，以免电源中电感元件受磁场的干扰。

通电螺线管的磁场

螺线管的结构如果各匝靠得很近，则螺线管相当于一组有相同半径和共轴的环形电流。当螺线管较长时，其磁场结构类似于条形磁铁的磁场。有长直螺线管内部的磁场相当于一个匀强磁场，其磁感应强度的大小与通电电流 I 的大小成正比，其方向由右手螺旋法则确定。

下列两种方法是分别采用重力杠杆秤和弹簧来定性研究通电螺线管的磁场大小与哪些因素有关的。

方法一

目的 研究通电螺线管磁场强弱与哪些因素有关。

器材 低压直流电源，滑动变阻器，电键，安培表，自制演示器，导线等。

演示器的制作方法

演示器的构造如图。其中螺线管用长10cm、 ϕ 3.5cm的硬纸筒外面用0.5mm的漆包线密绕320匝(中间有抽头)制成。320匝的一头，中间抽头分别接在接线柱13、12上。接线柱11接公共头。磁体用废钢锯片制成。制作时还要注意指针和磁体的共同重心应略低于水平转动轴，此重心越接近转动轴，仪器的灵敏度越高。螺线管离磁体的距离应在实验中加以调节。

操作

(1)将直流电源、滑动变阻器、安培表、电键等与演示器通电螺线管串联在一起(连接接线柱11、12)。在线圈匝数一定时，调节滑动变阻器改变电流。可看到通过的电流小，指针偏转小；通过的电流大，指针偏转大。这种现象说明通电螺线管磁性的强弱与电流大小有关：电流大，磁性强；电流小，磁性弱。

(2)换接接线柱11、13，调节滑动变阻器使电流大小与操作(1)时相同，可看到指针的偏转角度比操作(1)时大。说明通电螺线管磁性的强弱与线圈匝数有关。匝数多、磁性强；匝数少，磁性弱。

(3)使电流和匝数不变，插入软铁蕊，可看到指针的偏转角度显著增大。说明通电螺线管中插入铁蕊后，磁性会大大地增强。

说明

(1)指针下端的小废钢锯片随着磁作用而发生偏转，由于小废钢锯片偏转而产生的重力矩，使其受力平衡，故指针偏转大小容易稳定；

(2)线圈筒与小废钢锯片之间的距离可调节、小废钢锯片与水平转轴间距离可调节，仪器可操作性强，制作材料易找。

方法二

目的 观察通电螺线管的磁性强弱与电流强度大小、线圈匝数多少和有无铁蕊的关系。

器材 大型示教安培表，自制螺线管，软铁棒(12mm × 140mm)。细弹簧(倔强系数约为 10N/m)，直流低压电源，滑动变阻器，电键，导线等。

螺线管的制作方法

用 0.41mm 的漆包线在直径 20mm、长 50mm 的框架上绕 2000 匝(每 500 匝抽头)，直流电阻约 30 。

操作

(1)在软铁棒上粘上一层纸，在纸上等间距地划上刻度。

(2)如图连接电路，线圈用“0”和“1000”两个头。闭合电键，调节滑动变阻器，使电流在 0.2A-1.0A 之间变化，铁棒下降的距离约在 2mm-65mm 之间变化。说明通过螺线管的电流越大，螺线管的磁场越强。

(3)使线圈的匝数分别为 500 匝、1000 匝、1500 匝、2000 匝。调节滑动变阻器，控制电流始终为 0.4A。铁棒下降的距离约在 3mm-56mm 之间变化。说明在电流不变的情况下，通电螺线管的匝数越多，螺线管磁性越强。

(4)在螺线管中间固定上铁芯。将软铁棒向上移，两者相距约 20mm。线圈接“0”和“1000”两个头，电流调节在 0.5-0.6A。合上电键，可看到软铁棒被牢牢地吸在铁芯上。抽去铁芯，保持线圈匝数和通过的电流不变，合上电键时，几乎看不出软铁棒受到磁力的作用。说明插进铁芯后，使螺线管磁场明显增强。

实例

无铁芯时电流强度、匝数和弹簧伸长的关系

	线圈匝数(匝)	500	1000	1500	2000
弹簧伸长(mm)					
电流强度(A)					
0.2			2	6	19
0.4	3	20	46	56	
0.6	8	46	60	69	
0.8	30	57	69		
1.0	43	65			

匀强磁场

方法一

目的 演示匀强磁场中的磁力线是彼此平行的。

器材 低压电源，电磁感应演示器，导线等。

操作

(1) 低压电源调为直流 24V 输出，接电磁感应演示器的电源接线柱。(演示器红色接线柱与电源正极相接)。调节电磁铁上磁极体到合适的高度。将该演示器中的附件：磁力线演示板放在下磁极体的上面。

(2) 打开低压电源开关，合上演示器开关。在两极磁极间形成一个匀强磁场。

可见磁力线演示板上—端固定的磁化钢针纷纷直立。说明，在匀强磁场中的磁力线是彼此平衡的。

(3) 将磁力线演示板移至该匀强磁场边缘时，可见部分磁化钢针不再竖直向上，而是指向某个倾斜的方向。说明在平行磁极的边缘部分不再是匀强磁场。

方法二

目的 同方法一。

器材 洛仑兹力演示器，自制磁力线演示框等。

操作

(1) 用较粗的金属丝弯成一个圆形框架，直径大致与洛仑兹力演示器的环形线圈相似。将十数枚钢针磁化后，用丝线等距缚上钢针，并悬吊在圆形框架上备用。

(2) 将洛仑兹力演示器上的电子射线管取下。打开电源开关，将励磁电流开关和“顺时针”档接通，线圈旁边顺时针指向指示灯发光，表示在环形线圈上已加上顺时针方向的励磁电流。这时产生了方向朝里的匀强磁场。

(3) 将自制的磁力线演示框置于两个环形线圈之间，并使框架平面与环形线圈平面平行。可见磁化钢针平行地朝向一致地整齐排列。说明了在匀强磁场中的磁力线是彼此平行的。

估测磁感应强度

原理 在地球周围存在磁场，称为地磁场。过磁针在地面静止的位置所作的竖直平面称作地磁子午面。当有其他磁场影响时，磁针就可能偏离原来所在的地磁子午面。根据磁针偏离原来的磁子午面的偏角大小，可估测其他磁场的磁感应强度。

地磁场的磁感应强度的水平分量 B_0 。随纬度的不同而不同。以下列出我国几个地区的 B_0 值：

地名	北京	沈阳	兰州	上海	武汉	成都	广州
水平磁感应强度 ($10^{-4}T$)	0.289	0.277	0.312	0.333	0.343	0.356	0.375

器材 磁针，养料量角器，条形磁铁，刻度尺等。

操作

(1) 同“研究直线电流的磁场”操作(1)。

(2) 将自制罗盘放在水平桌面上。待罗盘中的小磁针静止时，所指的方向，即为小磁针所在处地磁场的水平分量 B_0 的方向。用铅笔记下这个方位。

(3) 将条形磁铁放在罗盘的同—水平面上，条形磁铁的磁极的端面距小磁针转轴约 30cm。磁铁的方位放在东西方向上，其轴线通过小磁针的支轴。这时，可见小磁针在条形磁铁磁场影响下，偏离原来的方位而偏转了一个 θ 角。用铅笔记下这个方位(如图)

(4) 作图并量出这个 θ 角的值。显然， θ 角是地磁场的水平分量 B_0 的方向与合磁场 B 的方向间的夹角。设条形磁铁在小磁针处的磁感应强度为 B_m ，则由

可求得

(5) 将条形磁铁磁极的端面离磁针转轴的距离为 40cm,50cm。重复操作(2)、(3)。可分别求出对应的 B_m 值。

(6) 将条形磁铁放到罗盘的正南(或正北)方位上,条形磁铁轴线的方位仍取东西向。(如图中虚线所示的位置)重复操作(2)、(3),可以估测条形磁铁纵向垂直平分线上的磁感应强度。

磁场对电的作用

磁铁并不是磁场的唯一来源,电流也能产生磁场。磁场对磁场会发生力的作用,磁场对电流也会通过磁场发生相互作用。要演示磁场和电流之间的相互作用,一般都通过物体的运动来显示。不论用何种方法显示,都要注意到运动体要轻,惯性要小,通电的电流要大,磁场要强。同时,为了保护电源,通电时间要尽量短。

方法一

器材 6V 蓄电池组,滑动变阻器,大号蹄形磁铁,3 定值电阻,安培表,18#裸铜导线(可用纸介电容器中拆出的铝箔条卷成细空心铝管,效果更好),电键,导线等。

操作

(1) 在平行放置的两个滑动变阻器之间放一场蹄形磁铁,并将两个滑动变阻器的滑动触头都移到一端。

(2) 将定值电阻、安培表、电键、滑动变阻器的两根金属杆、裸铜线串联起来。将裸铜线放在蹄形磁铁的磁场最强处。

(3) 合上电键,可见到裸铜线受到力的作用而滚动。

说明

若要改变电流方向,只需将两个滑动变阻器位置对调;若要改变磁力线方向,只须将蹄形磁铁翻个身。

方法二

器材 自制磁性板,直径 2—3mm 的铝棒,书写投影仪,低压直流电源等。

磁性板的制作方法

取直径为 5mm 左右、强度在 3000 高斯以上的微型磁钢二十余片,均匀嵌放在 3mm 厚的有机玻璃板上。沿有机玻璃板两边平行地装接两条宽约 5mm 的铝条,在四角安装四个接线柱反铝条固定(图 a)。

操作

(1) 将有机玻璃板平放在书写投影仪上作为一个较大的磁场。

(2) 用稳压电源 6—8V 的直流电压供电,通电后铝棒即向一定方向运动[图(b)为俯视图]。改变电流方向,铝棒即向相反方向运动。

方法二

器材 上端装有两个接线柱的木框架,粗铜丝(长约 5cm),细铜丝,蹄形磁铁,电键,蓄电池组(6V),导线等。

操作

(1) 用细铜丝将粗铜丝水平悬挂在木框架的两个接线柱上(如图)。各连接处保持良好接触。

(2) 将蹄形磁铁放在木框架底板上,并使粗铜丝恰位于磁铁的磁极间。

(3) 在粗铜丝静止的情况下,闭合电键,观察它受力运动的方向。

(4) 改变通入粗铜丝的电流方向,重复实验。

(5) 改变磁极位置即改变磁场方向，重复实验。

注意

通电时间尽可能短，以保护电源。

方法四

器材

蹄形磁铁，稳压电源，鳄鱼夹，自制通电导线等。

通电导线的制作方法

将坏的纸介电容器中的铝箔包在吸汽水用的吸管外。再将细漆包线绕成螺旋状弹簧（直径 0.5cm、长约 20cm）。漆包线两头去漆，一头穿过吸管与铝箔紧绕，另一头包上一段小铝箔。

操作

(1) 将自制的包着铝箔的通电导线吊在蹄形磁铁的正上方（如图）。

(2) 接通电路，导线中通过 2—3A 电流时，导线将在水平面内旋转，同时向下运动。

说明

(1) 本实验成功的是通电导线要轻。也可用以下方法制成更轻的无芯铝管：将从大电解电容器中拆取的铝箔抹平后，在直径 1.5cm 的圆棒上卷成铝管，接缝处用透明胶水纸粘合，抽掉圆棒后即成一空心轻质铝管。

(2) 用此方法中的导线完成本实验方法三效果将更好。

方法五

器材 铝箔条（长 30—40cm，可以从纸介电容器中拆出），铁架台，低压电源（直流 2V），单刀开关，鳄鱼夹，滑动变阻器 0—50 Ω，导线等。

操作

(1) 将铝箔条如图用支架与鳄鱼夹固定在铁架台上。将铝箔条与滑动变阻器（置于最大）、电源、单刀开关等用导线串联起来。

(2) 合上开关，调节滑动变阻器使铝箔有明显弯曲为止。表明磁场对电流产生了力的作用。

(3) 将蹄形磁铁两极翻转，重复操作（2），比较与操作（2）中力的作用力方向的异同。

(4) 将低压直流电源正负极对调，重复操作（2）、（3）。比较与操作（2）、（3）中作用力方向的异同。

方法六

器材 低压直流电源，滑动变阻器单刀开关，导线若干，巴罗轮等。

巴罗轮如图所示，可以自制，在金属圆片的圆心处做一转轴，将转轴固定在支架上即可。

原理

金属轮的下侧边缘浸入水银槽中，如图（a）。当金属轮中有如图示的电流时，再加上一磁场，通电金属轮有电流部分受到磁场力的作用而开始转动。如果电流与磁场的方向一直不变，则该轮可以一直向某一方向转动下去。

操作

(1) 金属水银槽注入水银，使巴罗轮的下侧边缘部分浸入水银槽，金属支架和金属水银槽与低压直流电源、滑动变阻器、单刀开关、导线等连成串联电路。将蹄形磁铁用支架固定放置，如图（b）。

(2) 接通电路，调节滑动变阻器阻值由大到小，观察巴罗轮能以一定速度转

动为止。记下电流方向与轮转动方向。切断电源。研究这两个方向间的关系是否符合左手定则。

(3) 改变电流方向, 重复操作(2)。比较操作(2)、(3)的实验结果。

(4) 改变磁场方向, 重复操作(2)、(3)。比较操作(2), (3), (4)的实验结果, 是否符合左手定则。

注意 使用水银时, 勿使水银洒落在水银槽外。实验完毕后, 水银应立即倒入瓶中, 密封保存。水银蒸气有毒, 操作要注意安全。

方法七

目的 演示磁场对通电灯丝的作用。

器材 蹄形磁铁, 交直流电源, “220V、15W”或“220V、40W”灯泡, 导线等。

操作

(1) 给灯丝通以(0—15V)直流电, 可见灯丝单向弯曲, 弯曲方向即通电灯丝受磁场作用力方向。研究是否符合左手定则。

(2) 给灯丝通以交流电, (0—120V), 可见灯丝振动起来。说明交流电通过灯丝时, 灯丝受力方向不断地改变, 导致灯丝有规律地振动。

说明 也可用投影放大灯丝振动情况。

研究安培力

方法一

目的 定性演示磁场中的通电导线受到安培力大小跟电流强度、磁感应强度、通电导线在磁场里的长度等因素有关。

器材 蹄形磁铁, 安培表, 滑动变阻器, 蓄电池组, 单刀开关, 导线等。

操作

(1) 将滚动导线的轨道插入木底座的B、C两孔内, 使两轨道平行, 并按图所示连接电路。

(2) 把滚动导线放在蹄形磁铁的磁极附近处(磁感应强度较大), 用变阻器改变电流强度, 观察滚动导线起动的快慢不同。说明安培力的大小跟电流强度有关。

(3) 保持电流强度不变, 将滚动导线由蹄形磁铁的磁极附近处移至磁体内侧某处(磁感应强度较小), 看到滚动导线起动较慢。说明安培力的大小跟导线所在处的磁场强弱有关。

(4) 将滚动导线仍放在蹄形磁铁内侧某处并保持电流强度不变, 将轨道插入A、D两孔内, 这时滚动导线在磁场中的长度增至原来的三倍, 可以看到滚动导线起动比操作(3)时快。说明安培力的大小跟在磁场里的通电导线长度有关。

说明

(1) 为易于固定磁铁, 可在木底座上挖一刚能放进六块蹄形磁铁的槽。

(2) 在木底座上钻A、B、C、D四个圆孔时, 深度要适当, 使轨道高度在N、S极中央。轨道要保持水平。

(3) 滚动导线用直而轻的空心铜管制作(截面要尽量圆), 以提高实验灵敏度。铜管的一端可套上有鲜明标志的塑片, 以增强可见度。

方法二

目的 研究安培力大小与哪些因素有关。

器材 自制电流天平，直流低压电源，示教安培表，滑线变阻器(0—10) 2只，单刀开关，导线等。

电流天平的制作方法

电流天平的主要部件为激磁线圈和横梁系统。激磁线圈是用于产生强磁场的长直螺线管，横卧在底座上(如图)。横梁系统是由环氧树脂数铜板制成，有“E”形导体，转换开关可以改变“E”形导体中通电导体的长度。横梁中部有一自由转轴，两侧等臂，并装有平衡螺母及砝码钩针以及天平指针。在未通电，先将横梁调平，指针指零。在激磁圈及“E”形导体中通以电流后，通电螺线管产生磁场对“E”形导线中与磁场垂直的部分导线形成竖直向下的作用力，使天平原有的平衡被破坏。为使天平恢复平衡，必须在砝码挂钩上悬挂适量的砝码。达到 $mg=BIl$ 时，天平恢复平衡。

操作

(1) 按图示电路将所有器材连接起来。调整平衡螺母，使横梁指针指在刻度盘中点。将横梁上的转换开关选择“E”形导体受力部分的长度为有效长度以 l 的 $1/2$ 。

(2) 合上 K_2 ，调节滑动变阻器 R_2 ，使电表 I_2 (激磁电流)为1A。

(3) 合上 K_1 。在砝码钩上依次挂上不同质量的砝码，每次都调节滑动变阻器 R_1 ，使横梁指针重指在刻度盘零点上。分别记下砝码的质量 m_1 和横梁平衡时电表 A_1 的读数 I_1 。

(4) 以横轴表示 I_1 ，纵轴表示 m_1g (其大小等于磁场对通电导线的作用力)，作出 m_1g-I_1 图，可得到一条经过原点的直线，说明安培力与电流成正比。

(5) 将横梁上的转换开关选择“E”形导体受力的部分为有效长度 l 。重复操作(3)。可看出 mg 相同时， I_1 只有原先的一半。即当 I_1 相同时，安培力与通电导线长度成正比。

(6) 调节滑动变阻器 R_1 ，使电表 I_1 的读数 A_1 为某一定值(如2A)不变。在砝码钩上依次挂上不同质量的砝码，每次都调节滑动变阻器 R_2 ，使横梁水平，分别记下砝码的质量 m_2 和横梁水平时电表 A_2 的读数 I_2 。

(7) 以横轴表 I_2 ，纵轴代表 m_2g (其大小等于磁场对通电导线的作用力)，作出 m_2g-I_2 图。得到一条过原点的直线，说明安培力与励磁线圈中的电流成正比。因为实验和理论都可让明密绕的长螺线管内部的磁应强度和通过它的电流成正比($B=\mu_0ni$)，所以可以得到安培力 F 与 B 成正比的结论。

(8) 应用多变量复合的方法，可以得到安培力 $F=BIl$ 的结论(具体方法见实验63的按语)。

实例

表1(导体有效长度为 $l=20\text{mm}$ ，激磁线圈电流 $I_2=1\text{A}$)

次 数	I_1 (A)	F (N)
1	0.5	$5 \times 10^{-6} \times g$
2	1.0	$10 \times 10^{-6} \times g$
3	1.5	$15 \times 10^{-6} \times g$
4	2.0	$20 \times 10^{-6} \times g$
5	2.5	$25 \times 10^{-6} \times g$

表2(导体有效长充 $l=40\text{mm}$ ，激磁线圈电流 $I_2=1\text{A}$)($g=9.8\text{m/s}^2$)

次 数	I_1 (A)	F (N)
1	0.5	$10 \times 10^{-6} \times g$
2	1.0	$20 \times 10^{-6} \times g$
3	1.5	$30 \times 10^{-6} \times g$
4	2.0	$40 \times 10^{-6} \times g$
5	2.5	$50 \times 10^{-6} \times g$

表 3 (导体的有效长度 $l=40\text{mm}$ 导体中电流 $I_1=2\text{A}$)

次 数	I_2 (A)	F (N)	B (N/Am)
1	0.5	$20 \times 10^{-6}g$	$2.5 \times 10^{-4} \times g$
2	1.0	$40 \times 10^{-6}g$	$5 \times 10^{-4} \times g$
3	1.5	$60 \times 10^{-6}g$	$7.5 \times 10^{-4} \times g$
4	2.0	$80 \times 10^{-6}g$	$10 \times 10^{-4} \times g$
5	2.5	$100 \times 10^{-6}g$	$12.5 \times 10^{-4} \times g$

由操作 (3) 得到表 1 数据 ,
 由操作 (5) 得到表 2 数据 ,
 由操作 (6) 得到表 3 数据。

磁场对通电线框作用

方法一

器材 条形磁铁 6—12 块, 低压直流电源, 自制矩形圈, 滑动变阻器, 电键。

矩形线圈的制作方法

在质地很轻的长方体发泡塑料盒上割下 20—25mm 宽的一圈, 作为矩形线圈的框架 (长、宽尺寸约为 130—160mm)。用直径 0.31mm 的漆包线在框架上绕 30—50 圈, 线圈两端用多股丝包线作引出线。另取一根自行车辐条, 将一端磨类后从线框一条短边的中央穿入, 类端顶住另一条短边的内侧中央, 然后把辐条的另一端固定在底座上, 作为转轴。

操作

(1) 将条形磁铁分成相等的两组, 分别固定在两只架子上 (每组的 N、S 极方向相同), 然后将两组磁铁分放在矩形线圈的两旁, 组成匀强磁场。

(2) 把线圈和滑动变阻器、电键串联后接上直流电源, 用 2—6V 电压即能得到通电线圈在磁场中受力转动的明显现象。最后总是停在线圈平面垂直于磁力线的平衡位置上。

(3) 改变电流的方向, 可看到通电后线圈从相反方向转到平衡位置。

(4) 放置线圈, 使其平面与磁力线成 60° 角。通过滑动变阻器调节线框中的电流, 使合上电键时线圈刚好不能转动 (因无法克服线圈所受静摩擦力的力矩)。

(5) 将线圈平面放到与磁力线平行的位置上, 合上电键, 线圈能顺利启动并转到平衡位置。说明当磁场与通过圈的电流不变时, 线圈的方位不同, 所受的磁力矩是不一样的。

方法二

器材 电磁感应演示器，低压电源，交流电机转子模型，导线等。

电磁感应演示器的主体，是一个电磁铁匀强磁场发生器。它由上下两块平行的方形铁芯组成，外面有励磁线圈，上下的线圈相串联。两电磁是距可以调整，可以形成间距不同的匀强磁场（如图）。

操作

（1）将交流电机转子模型放入磁场中，使线圈平面竖直放置。将转子电压调至4V。

（2）打开电磁感应实验器开关，可见转子线圈转动至线圈平面水平时，停止转动。

（3）将转子线圈平面与水平面成45°放置，通电后，线圈转至水平位置停止。

（4）改变电流方向，重复操作（3）。可见转子线圈转动方向与前次操作相反，所受力矩符合左手定则判断的结果。

方法三

器材 1.0mm漆包线12cm，0.4mm漆包线40cm，扁磁铁9或蹄形磁铁），一号干电池等。

操作

（1）将1.0mm铜丝的漆刮干净，剪成两段，一头弯成一个u型的弯头，另一头焊在干电上（如图）。

（2）用0.4mm漆包线绕成适当大小的4—6匝的线圈，两端制成平直的引线，注意让两引线的连线通过线圈的重心。

（3）当线圈处于竖直位置时，刮去两引线下半部分的漆皮（注意：不能全刮去）。

（4）将扁磁铁放在干电池上，再将线；圈的两根引线搁在两个弯头上，便可看到线圈不停地转动起来。

电流之间的相互作用

电流之间的相互作用，可理解成一根通电导线在另一极导线所形成的磁场中受到安培力的作用。因为通电长直导线周围的磁感应强度

$B = K \frac{I}{r}$ ，式中 $K = 2 \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} / \text{A}$ ，因此即使 r 小至1mm， I 达10A， B 也

仅为0.002T，比一般磁铁形成的磁场要弱得多，当然产生的安培力也较小。所以在做实验时，通电导线要尽量轻一些，受的摩擦力要尽量小一些。方法一和方法五用铝箔和铝箔卷成的圆筒，就是为了轻一些；方法二、三、四用悬挂的方式，就是为了让阻力小一些。

方法一

器材

铝箔，支架，低压直流电源，导线等。

操作

（1）拆取旧的纸介电容器内铝箔两条，折成如图形状。在铁架台上固定两根绝缘棒，把两条铝箔固定在绝缘棒上。两铝箔之间距离约为1cm左右。

（2）用导线把两条铝箔并联起来，接在4V左右的直流电源上（两铝箔中电流方向相同），通电时可以看到两铝箔相互靠近的现象，说明通以同向电流的两根平

行导线互相吸引。

(3) 用导线把两条铝箔依次串联起来，接到 6V 左右的直流电源上(使两铝箔中电流方向相反)，通电时可以看到两铝箔相互分开的现象，说明通以反向电流的两根平行导线互相排斥。

注意

(1) 做本实验时，为了观察到比较明显的现象，流过铝箔的电流较大(大约 4 安培左右)。所以应选用输出电流较大的低压电源，同时通电时间尽量短。

(2) 做实验时，应避免有风吹动铝箔。若能加上透明材料制成的防风罩则更好。

方法二

器材 直流电源、电容器(10000 μ F25V、可用市售 3000 μ F25V 并联使用)，单刀双位开关，导线若干，自制平行导线等。

平行导线的制作方法

用 1.17 裸铜导线如图(a)弯制两副直导线备用。外层可涂上红、黑两色加以区别。将四个铜空心铆钉一端用锡封住，并焊好接线，如图(b)。

操作

(1) 按图(c)将器材装配好，使 A、B 两平行导线尽量靠近。为了减小电阻，铆钉内要滴入水银。

(2) 将单刀双位开关 K 扳到 1，使电源对电容器充电。然后将扳到 2，电容器通过两条导线放电(瞬时电流可以相当大)，可看到两条导线互相分开。说明两条通以反向电流的平行导线互相排斥。

(3) 改变电路，使两条导线并联后接到电容器上。重复操作(2)。可看到两条导线互相靠拢。说明两条通以同向电流的平行导线互相吸引。

方法三

器材

直流电源 6V、5A 左右)，滑动变阻器，按钮开关，自制摆形导线框及支架，导线等。

摆形导线框的制作方法

用四根粗铜棒(直径约 1cm、高约 30cm)作立柱，四根细铜棒(直径约 0.5cm、长 10cm)作横架，固定在有机玻璃底座上(如图)。摆形线框摆线用细铜丝，水平导线用细空心金属管，水平导线和摆线长度均为 25cm 左右。在底座背面用导线将接线柱与铜立柱相连。A、B 两接线柱分别与一根铜立柱相连，C 接线柱同时与两根铜立柱相连。

操作

(1) 将直流电源、滑动变阻器、按钮开关、摆形导线框演示器用导线串联起来。电源正负极分别与 A、B 相连(平行导线框中可获反向电流)。调节两平行导线间距为 1cm 左右。

(2) 按下按钮电键，调节滑动变阻器，当电流约为 5A 时，两线框明显相斥，两平行导线间距可达 2.5cm 左右。

(3) 将 A、B 两接线柱连接起来，与电源某一极相连，接线柱 V 与电源另一极相连，则两导线框中可获同向电流。调节两平行导线间距在 2cm 左右。按下按钮开关，可见两导线框相吸，并合到一起。

方法四

目的 利用通电螺线来演示同向平行电流间的相互吸引现象。

器材 直流电源（6V、5A 左右），水银若干，金属杯，按钮开关，绝缘支架，滑线变阻器，自制螺线形导线。

螺线形导线的制作方法

用直径约为 0.5mm 的铜导线在一大试管上绕几十匝抽去试管，即成一个螺线管。将螺线管上端固定在支的接线柱上，螺线管的长度为 20—25cm。

操作 按图接线，调节螺旋线下端使它稍微浸入水银。调节滑动变阻器，使通过螺旋导线的电流为 3—5A。由于相邻各匝通电导线为同向平行电流，故相互吸引而导致螺旋长度缩短，使导线下端脱离水银面而电路断开。断电后，相互作用力消失又使螺线形导线恢复原长，下端又与水银接触而导致电路接通。因此螺旋线作周期性的伸长和缩短。看来好像螺旋线在不停地跳动。

说明 在螺旋线上端跳动时，会产生火花。在水银层上注入少许酒精，可以减少火花的产生。

方法五

器材 直径 2mm、长 20cm 的裸铜圆导线，用铝箔在铅笔上卷成直径 7mm、长 5cm 的空心圆筒两根，投影仪，整流二极管，电阻（4.7k Ω 、1W），电容器（100 μ F、400V），导线等。

操作

（1）将两根裸铜导线平行放置在投影仪上，相距略小于 5cm。将两根空心圆筒平行靠近（相距约 1cm）放置在铜导线上。并将二极管 D、电容器 C、单刀双掷电键 K，如图（a）连接。

（2）将 K 合向 1，给电容器充电。数秒钟后，将 K 合向 2，可看到两圆筒靠拢。

（3）将第三裸铜线剪成等长的两段，如图（b）放置并连接电路。

（4）将 K 合向 1，给电容器充电。数秒钟后，将 K 合向 2，可看到两圆筒分开。

注意

（1）因为用 220V 的交流电直接整流充电，所以一定要注意安全。

（2）铝箔圆筒和裸铜丝之间要接触良好。由于放电电流大，因此铝箔与铜线接触处易氧化甚至烧熔，所以每次实验前要改变接触点的位置。

带电粒子在磁场中的偏转

演示带电粒子在磁场中偏转首先要使带电粒子运动，如方法一中的阴极射线和方法二示波管中的电子束，方法三硫酸铜溶液中的离子对在电场中运动（径向）。其次要在带电粒子运动空间加上磁场，才能显示出带电粒子的偏转。磁场产生的方法可以用磁体（条形或蹄形磁铁），也可以用励磁线圈产生。

方法一

器材 感应圈，阴极射线管，低压直流电源，蹄形磁铁，导线等。

操作

（1）将感应圈的初级线圈与低压直流电源相连（9V 左右），次级线圈与阴极射线管相连。

（2）接通电源，并接通感应圈的转换开关，使感应圈有高压输出（注意阴极射线管两端的高压极性要正确），可看到在荧光屏上出现一条亮线，这表示了阴极射线从阴极射向阳极的径迹。如在荧光屏上看到杂乱无章的荧光说明所加高压极性不对。这时可将感应圈的转换开关倒向另一侧，改变高压输出的极性。

（3）未加外磁场时，电子运动径迹是一条直线。若用蹄形磁铁跨置于阴极射

线管上(如图),则可见电子迹发生偏转,说明运动电荷在磁场中受到洛仑兹力的作用。若将蹄形磁铁的极性翻转,则可见电子束运动径迹向反方向偏转。

注意

- (1) 实验完毕,先松感应圈断续器的调节螺丝,再切断电源。
- (2) 实验中勿使两高压导线相近。手勿接近高压导线,以免电击。

方法二

器材 示波器,蹄形磁铁等。

操作

- (1) 调节示波器,使一条水平扫描线位于荧光屏中央。
- (2) 把蹄形磁铁照图各位置放在荧光屏前,就可以看到磁铁中间的扫描线弯曲了,说明电子束在磁场中发生了偏转。

注意 此实验绝对不可以在彩色电视机显像管前面进行。

说明 如果把示波器 X 输入入在外接档,使荧光屏上产生一个亮点,用亮点来代替扫描线进行实验,效果也一样。但要注意把亮度旋 尽量调小些,并且不要让亮点长时间地停留在荧光屏的某一点上。

方法二

器材 自制洛仑兹力演示器,双刀双位开关,直流电源(6—8V),硫酸铜等。

洛仑兹力演示器的制作方法

取一个培养皿,沿皿内壁用铜皮焊成一个环,在环上焊一根弯成 形的细铜棒,铜棒另一端焊上一香蕉插头。再取一块圆柱形铜块,也焊上一根 形细铜棒,并于铜棒另一端焊上香蕉插头。将一微型磁钢(6—8mm)垫于皿底中央,如图(a)。

操作

91) 将洛仑兹力演示器、电源、双刀双位开关串联起来。(双刀双位形状起换向器作用,a、b两端接演示器、c、d两端接电源。

(2) 将演示器放在书写投影仪上,在培养皿中灌入饱和硫酸铜溶液。在溶液中放几片轻小纸片,位置略偏中央铜块。

(3) 然且合上开关,可见小纸片缓缓围绕铜块运动。启换向开关或改变磁钢上下位置,纸片逐渐停下并向反方向运动。

注意

电解槽两极的电压不宜加得太大,否则电极会严重腐蚀,纸屑也容易被极化而吸附在电极上。如果纸屑运动速度不够大,可以适当加大励磁线圈的电流。

说明 本实验也可以用自制励磁线圈形成磁场。励磁线圈用 0.3mm 漆包线 300 匝绕于培养皿外即可。也可用食盐水代替硫酸铜溶液。

电子束在匀强磁场中的运动

显示电子束在匀强磁场中作圆周运动的洛仑兹力演示仪是利用电子束使惰性气体电离发光,显示出电子束的径迹,同时利用亥姆霍兹线圈产生匀强磁场。洛仑兹力演示仪有多种型号,基本结构和功能相同,辅助结构略有不同。一般都能显示洛仑兹力 F 与磁感应强度 B 、电子运动速度 v 之间的关系。

器材 洛仑兹力演示仪。

操作

- (1) 接通电源,预热 3—5 分钟。

(2) 慢慢增加加速极电压, 可看到电子枪发射出的电子束直线径迹。加速极电压越大, 电子运动速度越快, 径迹的辉度越亮。

(3) 加上偏转极电压, 可看到电子束在偏转极板中间发生偏转, 离开偏转极板后仍然作直线运动。必变偏转极电压, 可看到偏转电压越大, 电子束偏转角度也越大。保持偏转电压不变, 改变加速极电压, 可看到加速电压越大, 电子束偏转角度越小。改变偏转极电压极性, 可看到电子束向相反方向偏转。

(4) 接通励磁线圈的电流, 可看到电子束在匀强磁场中作圆周运动。保持加速极电压不变, 增大励磁电流, 可看到电子束径迹圆逐渐变小。说明在电子速度 v 不变的情况下, 磁感应强度 B 越大, 洛仑兹力越大。

(5) 保持励磁电流不变, 改变加速电极电压。可看到加速电压增大, 电子束径迹圆增大。

(6) 转动洛仑兹力管, 使电子束飞行方向与磁场方向约成 60° 角, 可看到螺旋状电子束径迹。如果使电子束飞行方向平行于磁场方向, 可看到电子束呈直线前进, 说明当 v 平行于 B 时, 洛仑兹力为零。

(7) 断开励磁电流, 将会形或蹄形磁铁放在洛仑兹力管附近不同的地方, 可观察电子束各种各样的偏转径迹。

注意 在实验中, 在改变励磁电流的方向时, 一定要先将励磁电流调至最, 以防大电流转换, 导致电弧过大而烧坏开关。

导线切割磁力线产生感生电动势

为了增加感生电动势, 可以用增大磁感应强度 B 的方法, 如用强磁铁或用许多磁铁的同名磁极放在一起等。也可以用增大切割磁力线导线的长度 l 的方法, 如用多匝的形线框的一条边就比单匝导线效果好。也可以用给演示灵敏电流计加接放大器, 提高电表灵敏度的方法来提高演示效果。

方法一

器材 示教用电表, 蹄形磁铁, 支架, 单刀开关, 自制导线框等。

导线框的制作方法

用直径 $0.18\text{—}0.31\text{mm}$ 的漆包线绕成 $20\text{—}30$ 匝、长 80mm 、宽 60mm 的矩形线框。

操作

(1) 将示教用电表指针零点调到中央, 功能开关扳到 G 档, 此时电表的量程为 $-100\text{—}0\text{—}+100\ \mu\text{A}$ 。将矩形线框两端接到示教电表的接线柱上。

(2) 用手移动矩形线框, 使在蹄形磁铁中间的一条线框边作切割磁力线的运动。则在这条边中将产生感生电动势。由电表指针的偏转方向可反映线框中感生电流的方向。

(3) 改变这条边切割磁力线的方向, 重复操作 (2), 可见电表指针的偏转方向与操作 (2) 中相反。

(4) 改变这条边切割磁力线的速度, 可以从电表指针偏转角度的大小来反映产生感生电动势的大小。

方法二

器材 电磁感应演示器、低压电源, 演示电表, 直流放大器, 导线等。

操作

(1) 将直流放大器 (放大倍数 $100\text{—}4000$ 可调) 装到演示电表上, 电表置 “ G ” 档, 并调节指针指中心零位。

(2) 将电磁感应演示器下磁极放在轨道上, 上磁极固定在立柱上, 用低压电源的直流输出 24V 给磁极的激磁线圈供电。将仪器所附的直导线两端的软线连接到直流放大器的输入端(图见本实验方法三)。

(3) 接通直流放大器的电源, 调节其“调零”电位器, 使电表指针指在中央零位上。

(4) 手持导线, 使其在上下两磁极间的匀强磁场中作水平方向切割磁力线运动, 可看到电表指针发生偏转, 说明有感生电流产生。

(5) 使直导线静止在两磁极间, 则见电表指针不偏转。若再移动磁极沿轨道运动, 使导线与磁极间产生相对运动, 见电表指针发生偏转, 说明同样有感生电流产生。

(6) 手持导线在磁极间上下竖直方向运动, 使运动方向与磁力线平行, 可见电表指针不偏转。

(7) 使直导线在磁极间斜向运动, 运动方向与磁力线成一定夹角, 可见电表指针偏转, 说明有感生电流产生。

(8) 以上实验说明当闭合电路的一部分做切割磁力线运动时, 就产生感生电流。

方法三

器材 同方法二。

操作

(1) 同方法二操作(1)、(2)、(3)。

(2) 手持导线, 将长度为 l 的导线以大小不同的速度在磁极间做到垂直切割磁力线的运动。则发现电表指示偏转的角度不同。当切割速度大时, 感生电动势就大。

(3) 手持长度为 l 的导线, 使切割运动的方向与磁力线的夹角为 θ 。可见当切割速度相同, 夹角 θ 不同时, 指针的偏转的角度不同。 θ 角越小, 偏角就越小。

(4) 调节激磁线圈电压使磁场的磁感应强度 B 减小。使直导线以相同的速度 v 在磁极间做垂直切割磁力线运动。则可见电表指针偏角减小。 B 越小, 偏角也就小。

(5) 当换用长度 L 的原长一半的导线, 在磁感应强度相同的磁场中, 以相同的速度作垂直切割磁力线的运动时, 电表指针偏角减小。可见 l 越小, 偏角也越小。

(6) 从以上操作的结果可定性地验证导线切割磁力线时, 产生的感生电动势 $\mathcal{E} = Blv \sin \theta$ 。

产生感生电流的条件

方法一

器材 原副线圈一套, 条形磁铁, 演示用大型电表, 滑动变阻器(0-200 Ω), 低压直流电源, 单刀开关, 导线等。

操作

(1) 把演示电表用作灵敏电流计, 指针调至中央零点。用导线将副线圈与演示电表正负接线柱相连。

(2) 将条形磁铁往线圈里插入或拔出时, 发现电表的指针均发生偏转(图 a)。说明线圈中产生了感生电流。从电表指针的偏转方向, 可以判定副线圈中感生电流的方向。当磁铁插在副线圈中不动时, 电表指针不动, 说明无磁通量变化时, 没有感生电流产生。

(3) 使条形磁铁与副线圈轴线平行。当条形磁铁迅速靠近或迅速远离副线圈时，均可发现电表指针发生偏转（图 b）。当条形磁铁不动时，电表指针不发生偏转。

(4) 使副线圈横卧在桌上，将条形磁铁从副线圈的一端插入，另一端拔出时，可见电表指针偏转（图 c）。

(5) 上列实验中，若条形磁铁不动，副线圈相对于条形磁铁运动，可以得到一样的实验结果。

(6) 按图（d）把 6V 低压直流电源和单刀开关、滑动变阻器、原线圈串联起来。将副线圈与演示电表连接起来。

(7) 接通电源，将通电的原线圈插入或拔出副线圈，可见副线圈相连的 G 表指针发生偏转，说明副线圈中产生了感生电流。

(8) 将原线圈放置在副线圈内，切断或合上单刀开关，可见电表指针发生偏转。若开关一直合上，或原线圈通电后静止在副线圈中，电表指针均不发生偏转。

(9) 合上单刀开关，通电的原线圈置于副线圈内，迅速移动滑动变阻器的滑动触头，可见电表指针发生偏转，说明在副线圈中产生了感生电流。

以上实验表明，只要通过闭合电路中的磁通量生发变化，就会产生感生电流。

方法二

器材 自制匀强磁场，带有握柄的自制矩形线框，示教电表（或灵敏电流计），软导线等。

匀强磁场的获得方法

取十块示教电表中的磁铁，五块一组，分成两组。将其中一组的 N 极与另一组的 S 极分别吸于长 17.5cm、宽 0.8cm 的铁块两侧如图（a）所示。在两组磁的另一对磁极间形成的磁场即为较理想的匀强磁场。也可以将两块面积较大的矽钢片吸于磁性较强的蹄形磁铁的两极间，如图（b）。在两块矽钢片间就形成了近似的匀强磁场。

线框的制作方法

用直径 0.6 毫米左右的漆包线，绕一个长 4cm、宽 3cm 的线框，共 50 匝，用胶布包紧。将 30cm 长的握柄扎在线框上如图（c）所示。

操作

(1) 将线框的两端用软导线接到示教电表（用作电流计）或灵敏电流计上。

(2) 握住手柄，使线框进入、拉出磁场区域，可见电表指针偏转，说明线框中有感生电流产生。

(3) 将线框在匀强磁场中移动，可见电表指针不发生偏转，说明尽管线框切割磁力线，但如果磁通不发生变化，也没有感生电流产生。

右手定则

右手定则的验证是判定磁感应强度方向、导线切割磁力线方向和感生电流方向间的关系。故在实验中，不论用电流表或示波器，都要先确定电流方向的显示方法。

为了提高演示效果，可以用增大磁感应强度（方法一）、增加导线匝数（方法二、三）或选用较灵敏的显示方式（方法四）等方法。

方法一

器材 电磁感应演示器，低压直流电源，大型示教电表，直流放大器，导

线等。

操作

(1) 确定大型教电表的指针偏转方向和流过它的电流方向之间的关系，并在电表上装上直流放大器。用 24V 直流电源给电磁感应演示器的激磁线圈供电。接通直流放大器电源，调节电表的指针指在中央零位。

(2) 用小磁针判定两磁极间磁场的方向，用手持直导线，在磁极间做切割磁力线运动，由电表指针的偏转方向可以判定感生电流方向。

(3) 使直导线运动方向相反，重复操作(2)。

(4) 改变激磁线圈电源的正负极接线以改变磁场方向，重复操作(2)。可见在任何一种情况下，磁力线方向、导线运动方向以及产生的感生电流方向三者之间的关系，均符合右手定则。

方法二

目的 用示波器检验感生电方向，从而验证右手定则。

器材 左右手定则演示器，电阻圈(5 Ω 、1.5A)，教学示波器，蹄形磁铁，导线等。

操作

(1) 将示波器的 Y 轴输入开关置于“DC”档，Y 轴衰减置于“100”档，“Y 轴增益”旋钮顺时针方向旋到底，“扫描范围”旋钮置于除“外 X”档以外的任何一档，“扫描微调”旋钮顺时针方向旋到底。再适当调节其他旋钮，使示波器荧光屏中 部位有一条清晰的水平直线。

(2) 用一节干电池判定示波器水平扫描线上下位移与电流方向的关系。将电池的正、负极分别接示波器“Y 输入”和“地”接线柱。可见水平扫描线上移一段距离。说明当有电流从“Y 输入”流入时，水平扫描线上移。再将电池反接，可见当有电流从“地”端流入时，水平扫描线下移。

(3) 将蹄形磁铁、左右手定则演示器、电阻圈、示波器等按图(a)方法连接。

(4) 用手持线圈使其在磁铁间沿水平方向作切割磁力线的运动，可见示波器荧光屏扫描线上移(或下移)如图(b)所示。

(5) 使导线框切割磁力线的运动方向相反，可见示波器荧光屏上扫描线上下移动的方向也相反。根据扫描线迹的移动方向确定感生电流方向，从而判定感生电流方向、磁力线方向和导线运动方向间的关系，验证“右手定则”。

注意 示波器引入导线要用屏蔽线，以免外界感应，干扰演示效果。

方法三

器材 自制“单匝”线圈，大蹄形磁铁，大型电流计，导线等。

“单匝”线圈的制作方法

取长 50cm、0.3mm 漆包线 100 股，加入等长的直径 1mm 左右的铁丝一根，穿入适当粗细的塑料管内曲成一单匝线圈。将各线头上的漆刮净，两端各任取一根，用万用表测得不通后绞合起来并焊牢，然后用胶水纸包住。依此法逐根绞合包好后，最后剩首尾各一线头分别焊一焊片。此时外观为一单匝线圈，实际是 100 匝线圈，其电阻约为 10 Ω 左右。用硬纸板折成一方盒，各线头都藏在方盒内，焊片装在两只接线柱上。

操作

(1) 首先确定电流表指针偏转与相应的输入电流方向之间的关系。方法是在电流表上并联一低值电阻 R' 作分路(如图 a)，再与一节干电池、滑动变阻器、单

刀开关等串联成回路。合上开关，观察电流表指针偏转方向与电流方向间的关系。

(2) 拆开回路。再将自制线圈用导线与电流表连成回路(图 b)。

(3) 将线框一条边在蹄形磁铁两极间作垂直切割磁力线运动，观察电表指针偏转方向与磁场方向及导线运动方向之间的关系。

(4) 改变线框一条边的运动方向，重复操作(3)。

(5) 将蹄形磁铁 N、S 极对换，即改变磁场方向，重复操作(3)、(4)。

(6) 由以上操作，归纳得到磁场方向、导线运动方向与感生电流方向之间的关系，验证右手定则。

方法四

器材 示教电流表，磁铁，直导线等。

操作

(1) 拆下示教电流表的动圈，按原来尺寸用 0.29mm 漆包线绕 21 匝，然后浸漆、烘干。设法适当地减弱电流表内磁钢的磁性，再将电流表重新安装好。改制后电表的电压灵敏度约为 6mV。

(2) 将直导线的两端与电表的两个极相连使导线在磁场中作切割磁力线的运动，可看到电表指针发生明显的偏转。根据指针偏转的方向，可验证右手定则。

说明 一般示教电流表无法直接演示直导线切割磁力线产生的电流，主要是因为电流表的电压灵敏度不够。改制后的冲击式灵敏毫伏计对演示瞬时变化的脉冲低压电比较有效。

楞次定律

楞次定律是判断感生电流方向的一个实验定律。不论采用何种方法演示，都要有显示感生电流方向的手段。方法一和方法二是有流表指针的偏转方向来显示，方法三是用示波器扫描线上移或下移来显示，而方法四、五、六是根据铝球或线圈的移动来显示。实验中要注意在闭合回路中有足够大的磁通量变化率， $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ 越大现象越明显。

方法一

器材 条形磁铁，无铁芯的原副线圈，演示用电表，单刀开关，铁架台等。

操作

(1) 认清线圈上漆包线的缠绕方向。并检测通过灵敏电流计的电流方向与电流表指针偏转方向的关系[具体方法见实验 269 方法三操作(1)]。

(2) 将线圈、电流表和单刀开关相连，合上单刀开关。线圈放在台上固定不动，分别将条形磁铁的 N 极或 S 极很快地插入或拔出线圈(图 a)。可以看到电流表指针有偏转，说明线圈中有感生电流产生。考察磁极运动方向，磁极性质，线圈中感生电流方向之间的关系，可验证楞次定律。

(3) 将条形磁铁固定在铁架台上(如图 b)。让线圈对磁铁作相对运动。观察实验结果，并判断线圈相对条形磁铁的运动方向和产生的感生电流方向间的关系。可验证楞次定律。

方法二

器材 原副线圈，示教电表，蓄电池组，滑动变阻器，单刀开关，导线等。

操作

(1) 将副线圈与电流表串联成回路，将具有软铁棒做铁芯的原线圈与滑动变阻器、蓄电池、单刀开关串联成另一回路(如图)。

(2) 观察原线圈接通电源后的电流方向,判定该电磁铁的磁极。观察副线圈的导线导向。检测电流表指针偏转方向与流入电流方向间的关系[具体方法见实验269方法三操作(1)]。

(3) 接通电源,让原副线圈作相对运动。观察线圈间相对运动方向与副线圈中感生电流方向间的关系。验证楞次定律。

(4) 把具有铁芯的原线圈插入副线圈中不动。观察合上或切断开关瞬间电流表指针的偏转方向。分析原线圈中电流通断瞬间,原线圈中电流方向与副线圈中电流方向间的关系。验证楞次定律。

(5) 合上开关后,快速移动滑动变阻器的滑动触头,使原线圈中的电流强度迅速变化,观察此时电流表指针的偏转情况。分析原线圈中电流增大或减小时和副线圈中产生的感生电流方向间的关系。验证楞次定律。

方法三

器材 演示用原、副线圈,电阻圈(5 Ω 、1.5A),教学示波器,滑动变阻器,低压电源,(6A),导线等。

操作

(1) 将原线圈、滑动变阻器、低压电源等连接(如图a)。将原线圈放入副线圈中。低压电源供直流6V。滑动变阻器滑动触头置于使电路中阻值较小的位置。调节示波器使扫描线呈一水平直线。

(2) 当闭合或切断低压电源开关时,示波器荧光屏上即出如图(b)、(c)所示波形。如果以适当速度控制开关的闭合或断开,则在荧光屏上可见如图(d)所示的波形。

(3) 保持开关闭合,迅速移动变阻器的滑动触头,改变原线圈中的电流强度,在荧光屏上也会出现相似的波形。

(4) 根据原线圈中电流方向及变化情况,以及扫描线上移还是下移的情况分析,可以验证楞次定律。

注意 示波器与电阻圈两端间的引线,均应采用屏蔽线。以免外界感应、影响演示效果。

方法四

器材 自制楞次定律演示器,条形磁铁等。

楞次定律演示器的制作方法

选用0.5mm厚的铝板,按图(a)所示尺寸剪下(一环闭侯,另一环开口)。把周边的毛刺锉光。然后将两端的环扭转90°,使两环面与横截面竖直。在横梁的中点冲一小坑,把横梁支在大磁针底座的尖端上,使其平衡,并能在水平面内自由转动。

操作

(1) 将铝环的横梁放在支架的尖顶上,并使其水平静止。

(2) 将条形磁铁的任一极慢慢地插入闭合圆环(注意不要和圆环相碰),可看到圆环向后退,从上往下看,系统作顺时针转动。待铝环停止转动后,将条形磁铁自铝环中慢慢地抽出(也不能和铝环相碰),可看到铝环随条形磁铁运动,从上往下看,系统作逆时针转动(图b)。

(3) 将条形磁铁的任一磁极慢慢地插入开口圆环,或从开口圆环中抽出(同样要注意条形磁铁不要与圆环相碰),系统均保持静止不动。实验表明,当条形磁铁插入闭合铝环时,由于通过铝环的磁通量增加,铝环中产生感生电流。感生电流的磁场与条形磁铁磁场相互作用,使闭合铝环与磁铁同方向运动。当条形磁铁抽出铝

环时，同样产生磁通量的变化。感生电流的磁场与条形磁铁的磁场相互作用，使闭合铝环与条形磁铁产生相同方向的运动。

开口铝环由于不构成闭合回路，故在开口铝环中仅产生感生电动势，而无感生电流，也无感生电流的磁场。故当条形磁铁插入（或抽出）时，开口铝环静止不动。

方法五

目的 利用套在软铁棒上的小铝环被斥或被吸的现象，演示楞次定律。

器材 螺线管（1000匝），表面光滑的软铁棒（1.2cm、长15cm），小铝环（直径略大于软铁棒、宽5mm），直流电源（ $I=3A$ ），单刀开关，滑动变阻器，有凹槽的木架子。

操作

（1）将小铝环套在软铁棒上，并使其位置靠近螺线管。软铁棒与螺线管的水平放置（如图）。

（2）连接好电路，调节电源输出，使电流在3A左右。闭合开关，在接通电路的瞬间，螺线管里的磁场增强，会在小铝环中产生感生电流。实验表明，在小铝环中产生的感生电流磁场方向与通电螺线管磁场的方向相反。小铝环会受到排斥作用而沿软铁棒向离开螺线管的方向滑动。

（3）在切断电路的瞬间，螺线管中磁场的变化，使小铝环中产生感生电流。实验表明，小铝环中感生电流的磁场与螺线管电流的磁场方向相同，故小铝环被吸向螺线管。

注意

在做切断电源，观察小铝环被螺线管吸引的实验时，必须先将小铝环移到靠近螺线管的位置，然后切断电源，这时可观察到小铝环被吸引。如果小铝环距通电螺线管太远，由于吸引力太小则看不到明显的移动现象。

方法六

器材 自制楞次定律演示器，电流表，蓄电池，按键开关，导线等。

楞次定律演示器的制作方法

用木板制成一“L”形底座，底座的另一端树立一水平支架（如图）。螺线管用略粗的漆包线（直径约1mm）密绕400匝制成线圈A，套在固定于竖立木板上的水平木杆上。将A线圈的两引出线接在竖立木板上的接线柱上。A线圈外径不大于4cm。

另用直径0.38mm左右的漆包线，绕制一内径大于A线圈外径（约5.5cm）的线圈B，共绕200匝左右。绕成后用细线扎紧。线圈B引出线用较细软的漆包线（直径0.15mm左右），并悬挂于底座另一端的水平支架的接线柱上，使其能活摆动。

操作

（1）调节使A、B两线圈同轴，并使两线圈面相距3—5cm。将示教电、楞次定律演示器、按键开关、蓄电池组用导线如图连接。

（2）按下按键，给螺线管A通以电流。同时可见B线圈受A线圈的及力而向后摆动，同时电流表指针也产生偏转。

（3）待B线圈静止后，松开电键，即断开A线圈电路，同时可见B线圈受到吸引而向A线圈方向摆动，电流表指针同时产生偏转。分析A线圈中电流的通断与B线圈中感生电流方向，验证楞次定律。

（4）若反复接通或断开按键开关，并使电流通断的周期与线圈的摆动周期一致，使其合拍，可见到B线圈的摆动幅度越来越大，同时可见电流表指针也周期性

地左右摆动。

感生电动势大小跟磁通量变化的快慢有关

方法一

器材 原、副线圈，条形磁铁，演示用电表，导线等。

操作

(1) 将演示用电表调成“G”档，将指针的位置调在刻度盘中点。将副线圈的两端接在电流表上(如图)。

(2) 先将一个条形磁铁以较慢的速度插入副线圈，记下电流表指针偏转角度大小。再将同一个条形磁铁以较快的速度插入副线圈，记下电流表指针偏转角度的大小，比较两次电表指针偏转角度的大小。磁通量的变化量 $\Delta\Phi$ 两次是相同的，但快速插入时所经历的时间 Δt 较小，故 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 较大。闭合电路的电阻恒定，指针偏转角度大就表示回路感生

电流大，即副线圈中的感生电动势大。这说明磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

大。感生电动势就大。

(3) 将两个条形磁铁的同名磁极合并在一起，用和操作(2)相同的速度插入副线圈中。可见用两个条形磁铁时电流表指针的偏转角度较大。由于插入的速度相同，故经历的时间 Δt 相同，但两个条形磁铁合

并插入时，产生的磁通量变化 $\Delta\Phi$ 大，即磁通量变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 大。

说明感生电动势大小跟磁通量变化率大小有关，磁通量变化率越大，感生电动势越大。

方法二

器材 原、副线圈，示教电表，蓄电池组，滑动变阻器，单刀开关，导线等。

操作

(1) 按图接好电路。

(2) 合上开关，第一次将滑动变阻器从某一较小阻值滑移至最大阻值，观察电流表指针偏转角度的大小。第二次用比第一次大的速度将滑动变阻器从同一较小阻值滑移至最大阻值，比较两次电流表指针偏转角度大小。第二次电表的偏转角度较大，说明第二次感生电流较大，即感生电动势交大。这两次实验，原线圈中电流的变化量 ΔI 相同。但第二次变化所经历的时间 Δt 较小，故导致副线圈中磁通量的变化率较大，以致产生的感生电动势较大。说明感生电动势的大小跟磁通量变化率大小有关， $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 越大，感生电动势越大。

(3) 连续两次以相同的速度将滑动变阻器由同一较小电阻滑移至最大阻值。但第一次原线圈中不放铁芯，而第二次原线圈中放置铁芯。可见，第二次电表指针偏转角度大得多。说明这两次过程中，原线中电流的变化量 ΔI 相同，但由于第二次原线圈中有铁芯，使副线圈中磁通量变化量 $\Delta\Phi$ 大得多，亦即 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 大得多。说明感生电动势的大小与磁通量变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 的大小有关。

说明 如采用实验 270 方法三的线路，用示波器观察演示结果，也可得到相同的结论。

直流电动机的反电动势

目的 通过直流玩具电动机的启动、调速过程中电流强度的变化，显示反电动势的存在和反电势与转速的关系。

器材 直流玩具电机（额定电压 6V），蓄电池（或直流电源），大型示教电流表，大型示教电压表，电键，导线等。

操作

（1）如图连接电路。闭合电键，启动电动机，观察电流表的读数变化。在闭合电键的瞬间，电流表的读数突然增大。这时因为电动机转速为零时，没有反电动势，电流强度 $I=U/R$ 。

（2）电动机转速逐渐增大时，电流表读数逐渐减小，电压表的读数保持不变。这是因为电动机转速增大时，反电动势 $E_{反}$ 也随之增大，

$$I = \frac{U - E_{反}}{R} \text{ 将逐渐减小。}$$

（3）用大拇指和食指捏住电动机转轴，增大阻力矩。在电动机转速降低的同时，可以看到电流表的读数增大。这是因为电动机有负载时，转速降低，反电动势减小，输入电流增大，使动力矩增大，来达到新的平衡。

（4）分析以上实验现象，输入电动机的电压 $U = E_{反} + IR$ 保持不变。输入电动机的总功率为 IU ，随着电流的增大而增大。 $IU = I E_{反} + I^2 R$ 这一部分为发热的功率，余下的 $I E_{反}$ 这一部分就是转变为机械能的功率。

电磁阻尼

在磁场中转动的线圈，会产生感生电动势。若线圈的外电路闭合，则在线圈中会产生感生电流。磁场对感生电流将产生安培力，形成与原来转动方向相反的力偶矩，对线圈的转动起阻尼作用。下列两种方法，分别演示短路线接上后，对灵敏电流计和电动机的电磁阻尼效果。

方法一

目的 演示灵敏电流计的短路保护。

器材 灵敏电流计，导线等。

操作

（1）将灵敏电流计摇动后，使指针有较大的摆动幅度。停止摇动后，可观察指针要摆动多次，经一定时间才能停止下来。

（2）再次摇灵敏电注，使其有较大的摆幅。立即在两个接线柱上接上一根导线（短路线），可发现指针摆幅迅速减小，比不连短路线时摆时的时间短得多。这是上于与指针相连的线圈在磁场中摆动时产生了感生电流，线圈受到安培力形成的阻力矩的作用，使指针摆幅迅速衰减。这样能起到阻尼保护的作用。

（3）再摇动已连上短路线的灵敏电流计，可见指针摆动幅度很小，且迅速停下。理由同操作（2）。

说明

（1）通常 JD409 或 JD409-1 型灵敏电流计的阻尼时间小于 4s，因为此种灵敏电流计的动圈铝框是闭合的，已有一定的阻尼作用。所以本演示中最好采用老式的

灵敏电计（内部动圈铝框是不闭合的），演示短路阻尼效果更好。

（2）本实验说明灵敏电流计不用时，应在两接线柱上加上短路线，以达到阻尼保护的作用。防止在搬动或运输过程中，电流计受到振动，指针振幅过大而被撞弯或轴类脱落等情况。

方法二

目的 演示电动机的短路制动方法。

器材 玩具电机，单刀双位开关，干电池，导线等。

操作

（1）将玩具电动机、两节干电池、单刀双位开关用导线连接如图。

（2）将单刀双位开关扳到 a，电动机即高速转动。切断电源，可电动机断电后，仍能较长时间保持转动。记下从切断电源到完全停转的时间。

（3）再次将开关扳到 a，电动机高速转动后，即将单刀双位开关扳到 b。发现电动机会迅速停止转动。与操作（2）形成明显对比。这是因为已经高速转动的电动机转子，在切断供电后，仍在磁场中高速转动，转子中会产生感生电动势。若这时将外电路闭合（如开关打到 b），在电路中会产生感生电流，这时相当于一个发电机。具有感生电流的转子线圈，受到安培力偶矩的制动作用，会使转动迅速停止下来。故这时电动机外部的短路线起到了对转子的电磁阻尼作用。

自感现象

自感现象是电磁感应现象中的一种特殊情形——是在导体本身的电

流发生变化时产生的一种电磁感应现象。由 $I_{\text{自}} = -\frac{I}{t}$ 可知，在演示

中，除了要使电的变化率（ $-\frac{I}{t}$ ）尽量大之外，线圈的自感系数也要

足够大。即自感线圈要长，匝数要多，截面积要大，并要有铁心。同时，也要注意线圈不能有过的电阻，否则也会使自感电流过小而自感现象不明显。

方法一

器材 自制线圈，2.2V 小电珠 2 个，50 滑动变阻器，2V 铅蓄电池 3 个，电键，导线等。

线圈的制作方法

铁芯选用 22mmE1 型硅钢片（图 a），叠厚 40mm 左右。用绝缘纸板做一个与铁芯相配合的绕线框架（图 b）。用 0.40mm 左右的漆包线在绕线框架上绕 800 匝，抽一个头，再绕 400 匝。然后将硅钢片交叉插入，制成一个有铁芯的线圈（图 c）。

操作

（1）按图（d）连接电路，线圈的 1200 匝全部用上，电源用 6V。

（2）合上电键 K，调节变阻器 R_2 ，使小灯 A_1 和 A_2 的明亮程度相同。调节 R_1 ，使 A_1 、 A_2 正常发光。然后断开 K。

（3）合上 K，可见到 A_2 立刻正常发光，而 A_1 却是逐渐亮起来。说明 L 的自感现象。

（4）按图（e）连接电路，L 用 400 匝，电源用 4V。

（5）合上电键 K，调节 R，使小灯 A 比正常发光稍暗一些。

（6）断开 K，可看到 A 灯突然更亮一下才熄灭，这是 L 的自感电动势引起的。

方法二

目的 断电自感现象的演示。

器材 自感线圈（也可用日光灯镇流器，规格是 15—40W 任意一种），直流电源（3—4V），氖泡（日光灯启动器或试电笔中的氖泡 S），电键，导线等。

操作

（1）接通 K，氖泡不亮。（一般氖泡需几十 V 以上的最低电压才能放电）。

（2）断开 K，因自感线圈（日光灯镇流器）产生的自感电动势可达 200V 左右，使氖管起辉。

（3）如果把电键快速反复接通和断开，可看到氖泡连续发光。为了操作方便，可以用一个金属导体和齿轮簧片式电路断续路器 K'，代替电键 K，只要旋转电路断续器，氖泡即可较稳定地发亮。可长时间观察瞬间断电自感现象。

说明 实验时，如果两手同时接触日光灯镇流器两端，断开电键时会受到较强烈的电击，因时间极短暂，无害人体，但却可使学生有更深刻的印象。

方法三

器材 带铁芯线圈（可用 2 只 40W 日光灯镇流器串联），发光二极管 3 只（红色发光二极管 2 只： D_1 、 D_2 ；绿色发光二极管 1 只： D_3 ），滑动变阻器（0—300 Ω ），定值电阻器（20 Ω 、1/2W），电池组（3V），导线等。

操作

（1）将（a）图中的器材安装在示教板上，将滑动变阻器 W 的滑动片入在阻值最大的位置。

（2）闭合电键 K，则 D_1 、 D_2 发出红色光，调整滑动变阻器 W 的滑动片位置，使 D_1 和 D_2 的亮度相近。

（3）每次闭合电键 K 时， D_2 比 D_1 延迟发光。比此验证通电时的自感现象。

（4）每次断开 K 时， D_1 、 D_2 熄灭， D_3 发出绿光，以此验证断电时的自感现象。

注意

（1）带铁芯线圈的选择是本实验的关键，线圈的自感系数不能太小，否则 D_2 的发光延迟时间将难以分辨。

（2）电源电压大于 2V 就能工作，正常工作电压为 3V，以两节干电池串联较好。如用稳压电源时，不能用稳压电源的电源开关代替电路中的电键 K，因为稳压电源的输出端接有滤波电解电容器，在稳压电源开关切断交流电源后仍有逐渐减小的电流供给电路，使线圈中的电流不是突然减小，无法使 D_3 在断电时发光。

说明 本实验也可以用如图（b）所示的电路。L 可用 40W 日光灯镇流器， S_1 、 S_2 、 S_3 是三只白炽灯， D_1 、 D_2 用两只 2DZ 系列二极管。

方法四

器材 日光灯镇流器（15—40W），发光二极管 2 只（绿色发光二极管 D_1 ，红色发光二极管 D_2 ），定值电阻 1 只 R（100—200 Ω ），电源（3V），电键，导线等。

操作 按图接通电路，K 闭合， D_1 发光；K 断开， D_1 熄灭， D_2 被线圈 L 的自感电动势点亮发光。

说明

（1）利用发光二极管正常发光时工作电流极小（小于 20mA）的特点，容易做成断电自感现象的实验。

（2）根据发光二极管 D_2 的正向导通方向，可以判别感生电流的方向。

方法五

器材 晶体管收音机输出变压器（用初级），检流计，电阻（ R 为 $15\ \Omega$ 、 R' 为 $61\ \Omega$ ），电键，电池，导线若干、滑动变阻器（ $56\ \Omega$ ），导线等。

操作

（1）按图连接电路。闭合电键 K ，调节变阻器 W 使检流计的指针在中间零点的位置，然后去掉保护电阻 R' ，进一步调好平衡。

（2）断开电键的瞬间，见到检地的指针偏转一下，说明断电时的自感现象，并可断定自感电动势的方向。

（3）闭合电键的瞬间，见到检流计的指针向相反方向偏转一下，说明通电时的自感现象，也可以断定自感电动势的方向。

方法六

器材 变压器原理说明器，教学示波器，单刀开关，蓄电池组，导线等。

操作

（1）将 J2425 型变压器原理说明器中的线圈套在铁芯上（0—400 匝线圈）构成有较大自感的有铁芯线圈 L ，再将小灯泡（6.3V、0.15A）和蓄电池组（电压 4V）、单刀开关及教学用示波器如图（a）连接。

（2）调节示波器，使输入开关置于“DC”档，“Y 衰减”旋钮旋到“1000”档，“Y 增益”旋钮旋到适当位置，“扫描频率”旋钮旋到“100—1KHz”档，“扫描微调”旋钮在任何位置均可。用“垂直位移”旋钮将扫描线调到荧光屏的中央 d 位置。调节“辉度”与“聚焦”旋钮，使水平扫描线清晰并有适当亮度。

（3）合上开关 K 瞬间，可见水平扫描线先跳至 b 位置，随即回到 a 位置（图 b）。说明在接通瞬间， L 上有较大的自感电动势，电源路端电压较大。正常导通以后， L 的直流电阻较小，电源路端电压降低。

（4）当切断电源时，可见水平扫描线先跳至 c 位置，随即回到 d 位置。 cd 间的距离远大于 ab 之间的距离。说明在切断电源瞬间，线圈中产生了方向与线圈中原电流方向相同，大小远大于 U 的自感电动势。

自感在日光灯电路中的应用

目的 显示镇流器产生瞬时高压和降压限流两个作用。

器材 40W 日光灯管，启动器，“220V、100W”白炽灯，单刀单位开关，单刀双位开关，双刀双位开关，导线等。

操作

（1）如图连接电路接通 K_1 ， K_2 接 a 端，当 K_3 接 d 端时， A 灯泡亮， K_3 悬空时， A 灯不亮。

（2） K_3 换接 c 端，启动器 S 相当于自动开关，使灯泡交替明暗。由于 A 灯泡不能产生瞬时高压，因此日光灯管始终不能点亮。

（3） K_2 换至 b 端，当启动器自动断开时，镇流器 L 的自感高压达数百伏，使日光灯管点亮。

（4）也可以用 K_3 代替启动器 S ：将 K_3 扳到 d ，待看到日光灯管两端微红后，打开 K_3 ，可看到日光灯立刻点亮。

（5）将 K_2 从 b 端迅速换至 a 端，灯管仍然亮，说明此时 L 的作用和 A 灯钨丝电阻的作用相同，起分压限流的作用。

说明

(1)40W 日光灯正常发光时，电流约为 0.41A。实验表明，A 灯功率用“220V、100W”较合适。灯泡的额定功率若太小，由于灯泡分压较多而使灯管不能正常发光。

(2) K_2 从 b 端换接 a 端时，必须迅速，才能保证灯管内灯丝仍处于热电子发射状态。

涡流

方法一

目的 演示涡电流的热效应。

器材 万用变压器线圈（ $n=1000$ 圈），铁心，环形铝锅等。

操作

(1)按图将线圈套在铁心一边，环形铝锅套在铁心的另一边，用条形铁轭使铁心闭合。在线圈的接线柱上接上电源线及插头。

(2)一手持环形铝锅（如图）在锅内放一些水，同时接通 220V 交流电源。闭合铁心处于交变磁场中，穿过环形铝锅交变的磁通量使之产生感应电流，形成涡电流。由于铝锅电阻很小，有较大的涡电流。几分钟内可见铝锅中的水沸腾。

方法二

器材 变压器原理说明器，低压交流电源，铁棒（长约 60mm、直径约 20mm），导线等。

操作

(1)取变压器原理说明器中的 0—400 匝线圈（12V、3A），8—10V 交流低压电源。

(2)将铁棒插入线圈，接通电源（如图）。经 10 分钟左右，取出铁棒，用手摸铁棒可感觉到铁棒的温度升高了。这是铁棒被置于交变磁场中产生涡流所产生的热效应。

(3)将变压器原理说明器中的条形铁轭插入线圈中，给线圈通以同样的电压，也经历 10 分钟左右的时间。切断电源，取出条形铁轭，用手摸铁轭并不感到有明显的温度升高。这是因为铁轭是由许多相互绝缘的硅钢片叠合成的，当处在同样的交变磁场中时，产生的涡流要小得多，涡流的热效应也就不明显了。

阻尼摆

当阻尼摆在磁场中摆动时，不论摆动的是金属板（如方法一、二）还是磁铁（如方法三），由于金属板在不断切割磁力线，因而在金属板上产生感生电动势。这种感生电动势在金属板内自成回路形成涡电流。涡电流所受的安培力阻碍摆的摆动，使摆动的幅度衰减。涡流越大，外磁场对涡流的作用效果就越大，摆幅的衰减也就越迅速。

方法一

目的 演示涡电流的机械效应。

器材 变压器原理说明器（或万用变压器），低压电源，导线等。

操作

(1)将0—400匝线圈套入U形铁芯内，两极掌分别放在铁芯上方，并使垂直端面相对，距离约20mm，用铁轭压板压紧。把摆架装在压板上，使摆架的刀承与极掌相对面垂直。先将弱阻尼摆的刀口放在刀承上，使摆能在两极掌间的空隙中自由摆动，既不摩擦也无撞击现象。线圈引出线接直流12—16V电源。

(2)先不给线圈通电，使强阻尼摆和弱阻尼摆（梳形摆）分别在两磁极间摆动，可以观察到在轴尖处的摩擦力和空气阻力的作用下，要经历相当长的时间（约3分钟）才能完全停止下来。

(3)接通励磁电源，则在两磁极间产生很强的磁场。当强阻尼摆在两磁极间摆动时，在阻尼摆内产生涡电流，使强阻尼摆的摆幅迅速衰减，并很快停止摆动。

(4)用弱阻尼摆作重复操作(2)，可以观察到弱阻尼摆的摆幅衰减较慢，在较长时间内仍能继续摆动。其原因是弱阻尼摆上有许多隔槽，使摆内的涡电流大为减小，因而阻尼作用很弱。

方法二

器材 面积为 $(4 \times 6)\text{cm}^2$ 的铝片，细线，铁架台，竹竿，条形磁铁等。

操作

(1)用轧头把竹竿水平固定在铁架台上，在铝片的两只角上钻两个小孔，用四根30cm左右长的细线挂在水平的竹竿下（如图）。

(2)轻轻碰一下铝片，铝片至少来回摆动几十次才会停下。拿一块条形磁铁，以磁极面尽量贴近铝片，铝片只摆动十多次就会完全停止，这就是电磁阻尼现象。

说明 为了增强实验效果，可将几根条形磁铁的同极端并在一起使用。

方法三

目的 演示运动的磁铁在金属板内激发的涡电流所引起的阻尼作用。

器材 永磁铁棒（磁性要强），铜板或铝板 $(50\text{cm} \times 50\text{cm})$ ，铁架台，导线等。

操作

(1)将永久磁铁棒悬挂于金属板（铜板或铝板）之上的铁架台上，悬线的长度调节到使磁棒在摆动时其底部正好不与金属板相撞。

(2)不放金属板，用手拉磁铁棒偏离平衡位置，放手让其摆动。磁铁棒将摆动相当长的时间才会慢慢停下来。

(3)在磁铁棒下方放置金属板，重复操作(2)。可观察到磁铁棒的摆动幅度迅速减小，并很快停止。实验说明，由于磁铁的摆动，在金属板中产生了涡电流，而涡电流的磁场将阻碍磁铁棒的摆动，显示了涡电流的阻尼效应。

交流电的产生

通常，在演示交流电的产生时，首先要建立一个匀强磁场（方法一、二、四中均采用电磁铁形成匀强磁场，方法三用亥姆霍兹线圈产生匀强磁场）。再在这个磁

场中放置一个可以绕轴转动的闭合线框。交流电的显示手段，可以用大型示教电表的“G”档，也可以用示波器。

方法一

器材 演示用电表，电机原理说明器，低压电源，导线等。

操作

(1)将电机原理说明器、演示用电表及低压电源用导线如图连接。演示电表调成“G”表，指针在刻度盘中央为零。低压电源输出6V直流作为交流发电机的励磁电源。把演示电表接在电机原理说明器的带有电刷的接线柱上。调节两电刷至交流输出的位置，并使其与铜滑环紧密接触。

(2)接通低压电源，摇动转柄使电枢均匀旋转，转动快慢要跟指针的摆动合拍。指针在零位左右对称地摆动，说明电枢中产生的电流是大小和方向作周期性变化的交流电。

说明 当摇动电枢的转速加大时，指针的摆动次数也随之增加。由于指针的惯性，指针的摆幅反而减小，甚至停住不动。故演示中要适当控制转速。

方法二

目的 观察交流电的波形，研究交流电的周期和最大值。

器材 手摇发电机模型（配有不同匝数的转子），示波器，励磁电源，导线等。

操作

(1)用励磁电源对发电机模型电磁铁线圈供电，使其产生磁场。

(2)将发电机转子输出端与示波器“Y轴输入”端及“接地”端用导线相连。衰减旋钮放在1或10，扫描旋钮放在10或100（视实际情况确定）。

(3)匀速摇动发电机转子，示波器上可看到正弦交流电的波形，证明线圈在匀强磁场中匀速转动时会产生交流电。

(4)改用匝数不同的转子，以同样的转速运动，可看到交流电的最大值不同，匝数多的产生的交流电的最大值大。

(5)提高转子转动速度，交流电波形图变得密集，即交流周期变小，说明转子转动的周期与交流电的周期相同。转子转速增大时，示波器显示的交流电的最大值也同时增大。

说明 此实验直观显示了矩形线圈在匀强磁场中匀速转动会产生交流电，并能讨论交流电的周期、最大值与什么因素有关。

方法三

目的 证实矩形线圈在匀强磁场中旋转时，闭合线圈内会产生正弦交流电。

器材 自制亥姆霍兹线圈，12V稳压电源，教学示波器，电机原理说明器（旧的），手摇传动皮带，手摇转动轮及支架，导线等。

亥姆霍兹线圈的制作方法

亥姆霍兹线圈的组成是由一对相同的圆形线圈，彼此平行而共轴，回绕方向一致，两线圈的间距与半径相等。自制数据：线圈半径13.5cm，每个线圈绕50圈左右，直流电阻10 Ω 。亦可用洛力仑兹力演示仪（拔去威尔尼特电子管）替代。

操作

(1)将旧的电机原理说明器拆去外壳，取出其中的矩形线圈及其附属物：轴，换向器，电刷固定在一木块上，木块可紧卡在亥姆霍兹线圈中间，再用传动皮带将线框轴上带槽滑轮及手摇转动轮连接，如图所示。

(2)将亥姆霍兹线圈接上 12V 直流电。把矩形线圈两端通过电刷、转换器接至示波器 Y 输入端和“地”。示波器衰减旋至零，扫描旋至 10Hz。接通示波器电源，并调整至待用状态。

(3)快速摇动矩形线框，细心地慢慢转动示波器同步旋钮，示波器屏幕上便会呈现稳定清晰的单相交流电正弦波曲线。

方法四

器材 电磁感应演示器，低压电源，演示电表，电流放大器，导线等。

操作

(1)低压电流电源 24V 接电磁感应演示器的电源接线柱，红色接线柱连电源正极。将单匝矩形线框放在支座上，其两引出端接演示电流。演示电源调成“G”表，并加接电流放大器（如图）。

(2)打开电源开关，并接通演示器开关，在两极间形成一个较强的匀强磁场。当均匀转动单匝线圈，并使其转动周期与电表指针系统摆动周期接近时，可见电表指针在中心零刻度附近左右对称地摆动起来。这说明在线框中产生了交流电。

(3)若使线框从中性面开始转动，当转到线圈平面与磁力线平行位置瞬间，感生电流最大。而当线圈平面转到与磁力线垂直的位置瞬间，感生电流最小。从而说明了线框位置与产生的交流电正弦变化规律之间的对应。

(4)将单匝线圈换成带滑环的多匝线圈，以同样转速均匀地摇动多匝线圈，可见产生的交流电幅度比单匝时大得多。并显示匝数越多，转动越快，感生电流也越大。

(5)保持线圈转速度快慢不变，降低直流电源的输出电压，可见感生电流也变小。这说明线框中产生的感生电流大小，除与转速快慢有关之外，还线框周围的磁感应强度大小有关。

用示波器观察交流电的波形和频率

方法一

器材 教学示波器，低压交流电源，电阻(24k)j，电容(0.1μF)，导线等。

操作

(1)将辉度调节旋钮逆时针方向转到底，垂直位移()旋转到中间位置，衰减旋钮置于最高档，扫描范围旋钮置于“外 X”档。

(2)打开电源开关。经 2—3 分钟预热后，顺时针旋转辉度调节旋钮，屏上出现一个亮斑（注意亮斑不要太亮）。旋转聚焦调节()和辅助聚焦旋钮，使亮斑最圆最小。

(3)将衰减旋钮转到“10”，Y 增益旋钮逆时针方向转到底，扫描范围放在“10—100”，可看到荧光屏中间呈现一条清晰的水平扫描线。

(4)将电阻 R、电容器 C、低压电源、示波器按图(a)接好，低压电源输出 2V 交

流电。适当地调节示波器的扫描微调和Y增益等旋钮，可在荧光屏上得到3—4个稳定的正弦波。

说明 电阻R和电容器C是为防止高频谐波对50Hz交流电的干扰而设置的滤波电路。在不接入R、C的情况下，波形往往要失真。

方法二

器材 教学示波器，低频信号发生器，电阻(24k)，电容器(0.1 μ F)，导线等。

操作

(1)、(2)、(3)同方法一。

(4)将电阻、电容器、低频信号发生器、示波器按图接好。适当地调节示波器的扫描范围，扫描微调和Y增益等旋钮，可在荧光屏上得到几个稳定的正弦波。

(5)改变低频信号源输出信号的频率，可看到荧光屏上正弦波个数的变化：当交流信号频率升高时，荧光屏上正弦波的个数增加，反之则减少。

交流电的极性变换

演示交流电的极性变换，要用低频交流电源供电才能演示清楚。否则由于指针系统的惯性，或由于人眼的视觉暂留效应而无法看清。演示时应取交变频率 $f = 1\text{Hz}$ 的低频或超低频电源。电源可采用XFD-8型超低频交流讯号发生器，也可以用J2464型教学信号源的超低频信号。此外还可以自制简易超低频讯号发生器，或用滑动变阻器组装。

方法一

目的 观察交流电极性的周期性变换。

原理 电解食盐水溶液，溶液中的正、负离子分别向阴极和阳极移动，钠离子(Na^+)在阴极附近与水中的氢氧根离子(OH^-)生成氢氧化钠(NaOH)，滴入酚酞指示剂后就会在阴极附近出现红色。当电极的极性发生周期性变换时，两个电极附近就周期性地交替出现红色。为使这一现象能清晰地观察到并保留下来，宜采用渗水性较好而流动性较差的滤纸来吸附NaCl溶液，并使电极在滤纸上移动，以显现极性变换的现象。

器材 交流信号发生器(频率可调，最低频率为1Hz)，万用电表的红、黑表棒一对，氧化钠，酚酞指示剂，滤纸(长、宽不限)。

操作

(1)先用氯化钠溶液浸湿滤纸(不宜太湿，以溶液不会自行滴下为宜)，再在滤纸上均匀滴入酚酞指示剂。

(2)将红、黑表棒分别接在6V蓄电池的正、负极上，然后把两表棒紧压在滤纸上平行地缓慢移动，可见黑表棒拖过处留下一条红色痕迹。说明与电源负极相连的表棒能留下红色痕迹。

(3)将红、黑表棒接在交流信号发生器的低频输出端，调节输出信号频率小于20Hz，输出电压为5—6V。

让红、黑表棒压紧滤纸并使它们平行地缓慢移动，这时在滤纸上(与表棒接触

处)将出现两条红色虚线(如图)。

说明

(1)两条虚线中出现的红色部分的位置相互交错,表明红、黑表棒的极性是周期性交换的。

(2)在表棒匀速移动的情况下,虚线中出现红色和不出现红色的间距相等,表明交流电极性变化是等时的。若已知棒移动速率为 v ,量出相邻两段红色线段端点间的距离 s ,则可粗略测定交流电的周期 $T=s/v$ 。

方法二

器材 红、绿发光二极管各一个,4V 蓄电池,低频信号发生器,2000 滑动变阻器,电键,导线等。

操作

(1)如图连接电路,LED1 和 LED2 分别为红色和绿色的发光二极管,电源为蓄电池。

(2)合上电键,可看到 LED₂ 亮,LED1 不变。(可用 R 调节 LED 的发光亮度,电流约为 5mA 较好。)

(3)改变电源极性,可看到 LED1 亮,LED2 不变。说明两个 LED 的亮暗可指示电源不同的极性。

(4)将蓄电换成低频信号发生器,频率调成 $f=1\text{Hz}$,输出电压 4—6V。合上电键,可看到 LED1 和 LED2 轮流闪亮,而且闪亮的时间是相同的。说明交流电的极性是在不断变化的,而且变化周期是相同的。

说明 如果没有发光二极管,本实验也可以由图(b)线路来完成, L_1 和 L_2 为普通小灯泡。但这种线路要求低频信号源有较大的电流输出能力。

测定交流电的频率

目的 利用示波器所显示的利萨如图形来测定交流电的频率。

原理 示波管内的电子束受 x 偏转板上正弦电压的作用时,屏上亮点作垂直方向的谐振动;受 y 偏转板上正弦电压的作用时,亮点作垂直方向的谐振动。若在 x 与 y 偏转板同时加上正弦电压时如图(a),亮点的运动是两个相互垂直的简谐振动的合成。

当 x 方向的振动频率 f_x 与 y 方向的振动频率 f_y 相同时,亮点合成运动的轨迹一般是一个椭圆。若两频率之比 f_y/f_x 为整数比,则合成运动轨迹是一个闭合曲线图形,称为利萨如图形。

通常选用有一定频率比构成的利萨如图形来进行测算,如图(b)所示。图下方标明的是 f_y/f_x 。

根据

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{\text{屏幕坐标方格水平边与图形的切点数 } N_x}{\text{屏幕坐标方格垂直边与图形的切点数 } N_y} = k,$$

从中可以测出未知的交流电频率 f_y 。

器材 教学用信号源 2 台,教学用示波器,导线等。

操作

(1)、(2)同实验 279 方法一中的操作(1)、(2)。

(3)将待测频率的交流信号从教学信号源引出，从“Y 输入”和“地”端输入，同时将另一低频信号发生器的信号从“X 输入”和“地”端输入。

(4)调节 x、y 轴增幅或衰减，使图形比例适中。缓慢调节已知频率的信号源频率，得利萨如图形。记录后关掉信号源与示波器电源。

(5)根据利萨如图形特征和 $f_y = k f_x$ 计算出待测交流电频率。

说明

(1)荧光屏上亮点的辉度不要调得太亮，也不要长时间固定在某一点位置上，以免损坏荧光屏。

(2)x、y 轴输入有一公共接地端，接线时应防止将外电路短路。

(3)实际操作中，不容易调到 f_y / f_x 整数比，因此只要调到利萨如图形基本稳定即可。

交流电的最大值和有效值的关系

方法一

器材 低压电源，滑动变阻器(0—50)，双刀双位开关，小灯泡(2.5V、0.3A)，电阻圈(15)，教学用示波器，导线等。

(1)双刀双位开关的 1、3 接交流电源 8—10V，滑动变阻器作分压器使用，初始时，电压调在最小。2、4 端接直流电 6V，由低压电源稳压输出。电阻圈 R 两端分别接示波器的“Y”端和接“地”端如图(a)。接线过程中，开关常开。

(2)按照实验 279 方法一操作(1)、(2)的步骤调节好示波器后，将示波器 Y 输入开关置“DC”位置，Y 衰减旋钮放在“100”档。扫描范围旋钮置于“10—100Hz”档。同步开关置于“十”位置。

(3)打开交直流电源的开关。将双刀双位开关置于 2、4 端，用直流将灯泡点亮，注意观察小灯泡明亮的程度。然后把双刀双位开关合向 1、3 端，缓慢调节滑动变阻器滑动触头，使灯泡的亮度与用直流时尽量接近。反复将开关合向 2、4 端和 1、3 端，调节到用交流或直流供电，使该灯泡的亮度目测无差异时为止。这时，可以认为交流电流的发热效果与直流电流的发热效果是等效的。

(4)当双刀双位开关合向 1、3 端时，在示波器荧光屏上可见正弦交流波形。为了便于进行定量分析，可调节示波器的“扫描微调”，“X 增益”和“Y 增益”等旋钮，使屏上出现的波形 i 与图(b)所示相仿。

(5)当双刀双位开始合向 2、4 端时，在示波器荧光屏上可见直流电的波形 I_D ，如图(b)所示。

(6)由于取样电阻 R 与小灯是串联的，电流强度是相等的。从图上可分析与直流电流 I_D 相应的交流电流强度 I_C 与最大值的

$$I_C = I_D = I_m \sin \frac{\pi}{4} = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

$$I_m = \sqrt{2}I_C。$$

方法二

器材 教学用示波器(J2458), 滑动变阻器(0—200), 低压电源, 交流电压表, 导线等。

操作

(1)按实验 279 方法一操作(1)、(2)的步骤调节好示波器后, 将 Y 衰减开关扳到“校准 100mV”档, 扫描范围扳到“100—1K”档, 调节扫描微调旋钮, 使荧光屏上显示出稳定的方波波形。调 Y 增益旋钮, 使荧光屏上的方波显示的幅度刚好为 5 格, 则这时垂直系统的灵敏度被校准为 $20\text{mV}_{\text{pp}}/\text{格}$ 。校准后, Y 增益旋钮不能再转动。

(2)将示波器“Y 衰减”置于“100”, 这时被测电压幅度为 $4\text{—}10\text{V}_{\text{pp}}$ 。“扫描范围”置于“10—100Hz”档。

(3)把滑动变阻器 R 作分压器使用, 接于低压电源的“交流”输出接线柱上。将分压器的输出端分别接到示波器的“Y 输入”和“接地”端。将交流电压表并联在分压器的输出端上(如图)。

(4)打开电源开关, 给分压器输入 6V 交流电压。调节分压器滑动触头和示波器的扫描微调旋钮, 使荧光屏上交流波形的峰-峰值恰为 6 格, 并使图形稳定。同时从交流电压表上读出这时输入示波器的交流电压的有效值 U。这时 $U=4.3\text{V}$ 。切断示波器和低压电源开关。

(5)最大值和有效值的关系可以由下列分析得到 $U_{\text{pp}}=6$ 格。示波器垂直系统的灵敏度已被校准为 $20\text{mV}_{\text{pp}}/\text{格}$,

所以有 $U_{\text{pp}}=20\text{mV}/\text{格} \times 6 \text{格}=12\text{V}$ 。

最大值 $U_{\text{m}}=U_{\text{pp}}/2=6\text{V}$ 。

有效值 $U = U_{\text{m}} / \sqrt{2} = 6 / \sqrt{2} = 4.24\text{V}$ 。

这与用电压表测得的有效值 $U=4.2\text{V}$ 接近, 验证了交流电最大值与有效值之间存在: $U_{\text{m}} = \sqrt{2}U$ 。

方法三

器材 0—220V 交流调压器, 250V 交流电压表, 250V 直流电压表, 带滤波的整流器, 3k 碳膜电阻, 氖泡等。

操作

(1)如图(a)接好电路。由小到大地调节加在氖泡上的电压, 使它刚好起辉。此时氖泡两端所加的电压是交流电压的最大值 U_{m} , 而交流电压表上读出的是交流电压的有效值 U。

(2)按图(b)接好电路。逐渐调高整流器输出的直流电压, 直至氖泡起辉。此时直流电压表上读出的电压就是氖泡的起辉电压, 也就是操作(1)中的 U_{m} 。

(3)比较 U_{m} 和 U 的大小, 看是否有 $U_{\text{m}} = \sqrt{2}U$ 的关系。

交流电的相差

原理 如图所示的电路可得到各种不同相位的交流信号。U 接 50Hz 交流电。由 A 端和 O 端输出的信号 U_{A0} 与 U 同相, 由 B 端和 O 端输出的信号 U_{B0} 的相位视 W 阻值的大小而定。当 W 的触头移到 a 点时, U_{B0} 与 U_{A0} 同相; 当 W 的触头移到 b 点时,

因为 R_W 比 X_C (约为 $6.8k$) 大得多, 所以 U_{B0} 与 U_{D0} 同相, 即与 U_{A0} 反相; 当 W 的触头处于其他的中间位置时, U_{B0} 和 U_{A0} 的相差大于 0° 小于 180° 。

器材 教学示波器, 电子开关, 电位器($100k$ 、 $1W$), 金属化纸介电容($0.47\mu F$ 、 $63V$)、电阻(470 、 $1/8W$)2个, 低压电源, 导线等。

操作

(1)使电阻 R_1 、 R_2 , 电位器 W 和电容器 C 等连成如图电路, 组成阻容移相器。

在输入端接低压交流电源(2—4V)。“电子开关”的“ A 输入”、“ B 输入”和“地”分别与图示阻容移相器中的“ A”、“ B”和“ 0”端相连, 它的“输出”和“地”分别接示波器的“ Y 输入”和“地”。

(2)调节电子开关和示波器进入正常工作状态。方法是将电子开关的“ A 增幅”和“ B 增幅”旋钮均逆时针转到底, “频率范围”旋钮置“ 5—50KHz”档。示波器的“ Y 衰减”置“ 10”档, “扫描范围”置“ 10—100Hz”档。将移相器中的电位器 W 的触头置于 a 处。

(3)调节两个观测信号 U_{A0} 和 U_{B0} 同相。方法是先缓慢地顺时针转动电子开关的“ A 增幅”和“ B 增幅”旋钮, 以及示波器的“ Y 增益”旋钮使屏上显出的波形有适当的幅度。再分别调节电子开关的“频率细调”和示波器的“扫描微调”旋钮, 使示波器屏上显示出稳定的两个波形。最后调节电子开关的“相对位置”旋钮, 使两个波形重合起来如图(b)。可以看到两个交流电压信号“ U_{A0} ”和“ U_{B0} ”同相。

(4)调节 W 的触点位置, 使两个观测信号 U_{A0} 和 U_{B0} 出现相差并达到反相。方法是转动移相器的电位器 W 的触点, 逐渐由 a 向 b 移动。这时在屏上可见波形 U_{A0} 不动, 而波形 U_{B0} 缓慢右移。这说明 U_{A0} 与 U_{B0} 出现了相差, 并且 U_{B0} 比 U_{A0} 滞后。继续缓慢转动电位器 W , 使两波形的相位差进一步加大。当调至屏上出现如图(c)情况时, 说明两波形的相差恰为 $\pi/2$ 。即 U_{B0} 落后于 U_{A0} 为 $\pi/2$, 或者 U_{A0} 超前 U_{B0} 为 $\pi/2$ 。再继续调节电位器 W , 使相差达到 180° 。即波形 U_{A0} 和波形 U_{B0} 为反相, 如图(d)所示。

说明 如有双踪示波器, 则可不用电子开关, 直接将 A、B 两点与示波器的 Y_A 、 Y_B 接通。

纯电阻电路中的电流与电压的相位

白炽灯、电炉、电烙铁等用电器可以看成是纯电阻性元件, 由它们组成的电路称为纯电阻电路。纯电阻电路是最简单的交流电路。

如将 R 接到 $e = \epsilon_m \sin \omega t$ 的电源上, 根据欧姆定律, 通过电阻的电流瞬时值为

$$i = \frac{e}{R} = \frac{\epsilon_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

可见, 在正弦交流电源作用下, 电阻中通过的电流也是一正弦交流电流, 且电流与电压同相。

下列实验中用低频电源, 目的是为了把电压与电流的位相关系演示得更清楚。

方法一

目的 用超低频电源及电表演示纯电阻电路中的电流与电压的相位。

器材 滑动变阻器，电阻($24\text{k}\Omega$ 、 $\frac{1}{8}\text{W}$)，演示电表，电池组，单刀开关，导线等。

操作

(1)用滑动变阻器组装成越低频电源如图(a)。当合上开关K，使滑动变阻器的滑动触头P在AB两端间作周期性的往复滑动时，在M、N两端则产生强度与方向均作周期性变化的电压。变化的频率取决于滑动触头P滑动的速率，电压的幅度决定于电源电动势的高低和滑动触头移动的距离。

(2)将演示电表调成“直流0—10V”量程的电压表和灵敏电流计，并都调成中心零位式。电源 \mathcal{E}_1 和 \mathcal{E}_2 均用2V蓄电池。按图(b)线路接线。注意电表的正负位置。

(3)合上单刀开关K，缓慢移动滑线变阻器R'的摆动触头P，给纯电阻电路输入超低频交流电压，观察电压表及灵敏电流计指针摆动情况。适当调节滑动触头的滑动幅度及速率，使两电表指针在零点左右摆动幅度及快慢适宜。仔细比较两电表指针的同步摆动。这说明在纯电阻电路中电流与电压是相同的。

方法二

目的 用示波器演示纯电阻电路中电压与电流的相位关系。

器材 教学示波器，电子开关，低频信号发生器，电阻($1\text{k}\Omega$ 、 $\frac{1}{8}\text{W}$)，电阻($100\ \Omega$ 、 $1/8\text{W}$)，导线等。

操作

(1)将示波器，电子开关， R_1 ($1\text{k}\ \Omega$)， R_2 ($100\ \Omega$)等用导线按图(a)连接好。A、B两端接低频信号发生器交流输出接线柱及“地”接线柱。电子开关的“A输入”、“B输入”及“地”分别接测试点1、2、3上。

(2)将电子开关的“频率范围”旋钮放在“5—50KHz”档，示波器的“Y衰减”放在“1”档，“扫描范围”放在“100—1KHz”档，“Y增益”旋钮顺时针方向转到底。调节低频信号发生器，使信号发生器的输出信号频率为400—600Hz，将“正弦波衰减”置于“0db”档。然后调节信号发生器的“正弦波幅度”及电子开关的“A增幅”、“B增幅”，再调节示波器的“扫描微调”及电子开关的“相对位移”旋钮，使示波器屏上出现如图(b)所示的大小适中的稳定的电压与电流波形。

(3)旋动电子开关中的“A增幅”旋钮，可见电压波形的波幅发生变化。旋动“B增幅”旋钮，可见电流波形的波幅发生变化。从而说明在纯电阻电路中，电压与电流是同相位。

电感器对交流电的阻碍作用

方法一

目的 用对比观察的方法演示电阻与电感在直流电路和交流电路中的阻碍作用。

器材 低频信号发生器，带铁芯的电感线圈，电阻(其阻值与电感线圈的直流电阻相同)，小灯泡(2.5V)，单刀双位开关，双刀双位开关，直流电源，导线等。

操作

(1) 双刀双位开关 K_1 “1” 端接 2V 直流电源, “2” 端接低频信号发生器输出。再将单刀双位开关 K_2 , 小灯泡 D, 有铁芯的线圈 L 与电阻 R 如图连接。

(2) K_1 接 1, 演示直流电阻中电阻 R 与电感对电流的作用。当 K_2 接 1 时, 灯 D 点亮。当 K_2 接 2 时, 灯 D 的亮度与 K_2 接 1 时的亮度相同。这是由于电感 L 的直流电阻与电阻 R 的阻值相等。

(3) K_1 接 2, 演示交流电路中电阻 R 与电感 L 对电流的阻碍作用。低频信号发生器频率调至 500Hz。当 K_2 接 1 时, 灯 D 点亮, 调节正弦波幅度, 使灯 D 发光亮度与操作(2)中相仿。当 K_2 接 2 时, 灯 D 的亮度明显减弱。说明有铁芯的线圈 L 对交流电有明显的阻碍作用。改变交流信号输出频率, 可见随着频率的增加, 灯 D 的亮度逐渐减弱。将电感线圈的铁芯抽出, 可见灯 D 变亮。说明电感线圈对交流电的阻碍作用与交流电频率及线圈的自感系数有关。

方法二

目的 用电流表演示电感对交流电的阻碍作用。

器材 演示电表, 小灯(6—8V), 变压器原理说明器, 滑动变阻器(50 、1.5A、10 、2A 各 1 个), 低压电源, 单刀双位开关, 导线等。

操作

(1) 电感线圈 L 用变压器原理说明器中的“0—400 匝”线圈, 其直流电阻约为 3.4 。将铁芯闭合, 并将螺钉旋紧。电流表用“0—100mA”量程, 伏特表用“0—10V”量程。低压电源输出 6—8V 交流电压。滑动变阻器 R_2 的阻值尽量调得与电感线圈的直流电阻相近。将所有器材按图连接(两个演示电表分别用作交流毫安表和交流伏特表)。

(2) K 接 1, 将电阻接入电路。调节滑动变阻器 R_1 , 使伏特表的读数为 4V, 小灯泡发光。记下电流表的读数 I_1 。

(3) K 接 2, 调节滑动变阻器 R_1 , 使伏特表的读数仍为 4V, 但小灯泡不亮, 这时小灯中电流为 I_2 , 它明显小于 I_1 , 说明电感对交流电具有阻碍作用。

纯电感电路欧姆定律

目的 验证在纯电感电路中电流强度与电压成正比。

器材 演示用电表, 变压器原理说明器, 滑动变阻器(0—200), 低压交流电源, 导线等。

操作

(1) 将演示电表调节为量程是 0—100mA 的交流安培表, 及量程为 0—10V 的交流伏特表。低压电源调节为交流 10V 输出。电感线圈可用变压器原理说明器中的绿色线圈套在铁芯上, 用铁轭封闭并拧紧螺母固定制成。

(2) 用导线将电感线圈、安培表、伏特表、滑动变阻器、低压电源等按图接线。

(3) 接通电源, 从安培表、伏特表读取一组 (I, U) 值。

(4) 调节滑动变阻器, 改变 L 中的电流, 可读取另一组 (I, U) 值。共要读取 7—8 组 (I, U) 值。

(5) 以横轴代表 I , 纵轴代表 U , 作出 $U-I$ 图, 可得一条直线。说明电感电路中

的电流与它两端的电压成正比。

注意

(1)在电源用 50Hz 的交流电时，电感线圈的感抗一般为几十欧，比伏特表的内阻要小得多，因此应该用安培表外接法。

(2)要尽量选用直流电阻小的电感线圈。如有条件，电源可改用低频信号发生器。适当地提高交流电源的频率，可增大电感线圈的感抗。

电感器的感抗

方法一

目的

(1)了解电感对交流电路的阻碍作用。

(2)定性演示感抗与自感系数及信号频率的关系。

器材 低频信号发生器，小型变压器，扬声器，电键，导线等。

操作

(1)按图(a)连接装置。变压器可用 J2426 型中 120 匝一组。

(2)开启信号发生器，输出 400Hz 的低频信号。可听到扬声器发声。

(3)连续地断开和闭合电键 K，可听到扬声器中声音有轻有响。当断开电键时扬声器中的声音要比电键合上时轻一些，这是电感线圈对交流信号产生阻碍作用的结果。

(4)改变低频信号发生器的输出频率为 4000Hz，再不断地断开和合上电键，注意扬声器中声音响度的变化。将发现这时比操作(3)时响度的变化要大得多。说明交流电频率越高，电感对交流电的阻碍作用越大，也就是感抗越大。

(5)使低频信号发生器输出某一固定频率(如 400Hz)。再把铁芯逐步抽出，如图(b)，可听到扬声器中声音逐渐变响。这是由于逐渐抽出铁芯，线圈的自感系数逐渐变小，电感对交流信号的阻碍作用(感抗)变小了。

(6)把变压器的原、副线圈串联起来，分别组成 120 匝、240 匝和 360 匝三组线圈。把这三组线圈顺次接入电路，比较扬声器中声音的响度。可见圈数最小的，声音最小，说明线圈的感抗与匝数有关。

说明

(1)当线圈串联后接入电路时，扬声器中的声音应比单个线圈时轻。如果发现声音不轻，说明线圈接反了。这时将线圈的两个端点换接一下即可。

(2)如能用晶体管电压表测扬声器两端的电压，在电键通和断时，扬声器端的电压值会发生相应的变化，再配合听声音，演示效果会更好。

方法二

目的 定性演示感抗与交流电频率的关系。

器材

变频电源，电池组，电感器，线绕电阻，单刀双位开关，双刀双位开关，小灯

泡，导线等。

操作

(1)如图连接电路。 K_1 为双刀双位开关， K_2 为单刀双位开关， D 为“6.2V、0.3A”小灯泡。 R 为用镍铬电阻丝烧制的线绕电阻（其阻值与电感器 L 的直流电阻相同）。电感器用 $\varnothing 1.0\text{mm}$ 漆包线绕 250 匝，其直流电阻约为 $4\ \Omega$ ，自感系数约为 3—5mH。

(2) K_1 接电池组， K_2 接电阻器 R 。观察小灯泡正常发光，说明电阻器对直流电阻碍较小。

(3)将 K_2 改接电感器，可看到小灯泡同样正常发光，说明电感器对直流电有较小的阻碍作用。

(4) K_2 接电阻器，将 K_1 改接变频交流电源，小灯泡正常发光，说明电阻对交流电阻碍作用也较小。此时，改变电源输出交流电的频率，小灯泡发光的亮度基本不变，说明纯电阻对交流电阻碍作用的大小与频率无关。

(5) K_2 接电感器，小灯泡比原来要暗，说明电感对交流电有较大的阻碍作用。

(6)改变交流电的频率，频率越高，电灯越暗。说明电感对交流电阻碍作用的大小与频率有关，频率越高，阻碍作用越大。

(7)保持交流电的频率不变，在电感线圈中插入软铁芯，可看到小灯泡变得更暗，说明电感对交流电阻碍作用的大小还与有无铁芯有关。

方法三

目的 观察电感电路中电流强度的大小与通过的交流电频率、电感线圈的自感系数之间的关系。

器材 电感线圈（可用变压器）、低频讯号发生器、示波器、大型电流计、2CP 型二极管。

操作

(1)如图连接电路， ab 间是变压器的 220V 线圈。从大型电流计可看出电路中电流的大小，从示波器上可看出交流电的频率。

(2)接通电源后逐步将电源频率从 100Hz 提高到 1000Hz，可看到电路中电流逐渐减小，说明线圈的感抗随电源频率的升高而变大。

(3)将线圈的两头改接 b 、 c 位置（线圈的匝数减小），可看到电路中电流增大。说明线圈的感抗随匝数的减少而变小。

(4)开放变压器的铁芯，即减小线圈的自感系数，可看到电路中电流明显增大。说明线圈中的闭合铁芯能使线圈感抗明显增大。

方法四

目的 用信号源与示波器研究感抗。

器材 学生信号源，自制线圈，示波器，电阻（ $1.2\text{k}\ \Omega$ ），电位器（0—100 Ω ），喇叭（2.5 舌簧喇叭），插头，导线若干。

线圈的制作方法

用线径是 0.23mm 的漆包线在同一线架上，4 线并绕 1500 匝。将第 1 个线圈的尾端跟第 2 个线圈的首端接在一起引出第 1 个抽头，第 2 个线圈的尾端跟第 3 个线圈的首端接在一起引出第 2 个抽头，按相同方法引出第 3 个抽头如图(a)，空芯线架的截面积为 $25 \times 25\text{mm}^2$ ，长 25mm。

操作

(1)按图(b)所示电路将各元件连接在示教板上。电阻器 R 阻值 $1.2k\Omega$, R_L 是 100Ω 的电位器,喇叭是 2.5Ω 的舌簧喇叭, L 是自制线圈自感系数约 $0.3H$, 有三个抽头, 将线圈分成匝数相等的四部分。学生信号源低频输出端钮与 A、B 两接线柱相连, F、G 两接线柱分别与示波器 Y 输入端和接地端相连。

(2)把插头插入与电阻器 R 相连的孔 1, 信号源频率选 $500Hz$ 。开信号源, 调节示波器的 Y 增益和扫描范围, 使示波器荧光屏呈现 1 个完整的正弦波波形, 幅度为 3 格。保持信号源幅度不变, 改变信号频率, 依次为 $1000Hz$ 、 $1500Hz$ 、 $2000Hz$ 和 $2500Hz$, 可看到波形数目依次增多, 而幅度基本未变。说明电流大小未随频率变化而变化, 即电路的电阻跟交流电的频率无关。

(3)研究感抗跟线圈匝数间的关系, 将插头插入孔 2, 信号源频率选 $1000Hz$ 。调节示波器, 使荧光屏呈 2 个波形, 幅度 4 格。再将插头改插入孔 3, 可看到波形个数未变, 但幅度减小为 2 格。说明电流减小为原来的一半。再将插头分别改插入孔 4 和孔 5, 可看到波形幅度反比例地缩小, 说明感抗跟线圈匝数成正比关系。

(4)研究感抗跟交流电频率间的关系。将插头插入孔 3, 信号源频率选 $500Hz$, 荧光屏呈现 1 个波形, 调节幅度为 4 格。改变信号源的频率, 使之依次为 $1000Hz$ 、 $1500Hz$ 、 $2000Hz$ 和 $2500Hz$, 波形数依次变多而幅度依次变小, 可说明感抗跟交流电的频率成正比。

说明

(1)信号源开启后, 舌簧喇叭发出声音。根据音调的变化可直观地显示出交流电频率的变化。

(2)用示波器测电流实际上是测分压电阻 R_L 的电压, 如图(c)所示。 R_L 两端的电压 U_{FG} 为

$$U_{FG} = \frac{\varepsilon R_L}{\sqrt{R_L^2 + (2\pi fL)^2}},$$

当 $2\pi fL \gg R_L$ 时,

$$U_{FG} = \frac{\varepsilon R_L}{2\pi fL}。$$

这时 U_{FG} 跟 f 、 L 成反比。原则上 R_L 越小越好。 R_L 很小时, 回路的电流由感抗 $X_L=2\pi fL$ 决定。但是 R_L 太小使示波器显示的波形幅度太小。为兼顾这两方面, R_L 用一只可调节的电位器, 实验时根据情况调节。

纯感电路中电流和电压的相差

对纯电感电路中的电流有 $i_L = I_m \sin \omega t$, 则其电压为 $U_L = I_m X_L \sin(\omega t + 90^\circ)$, 存在有 90° 的相差。

演示中应取用自感系 L 很大而直流电阻 R 很小的线圈, 并注意采用适当的交流频率。

方法一

目的 用超低频交流电源和电表演示纯电感电路中电流和电压的相差。

器材 滑动变阻器，电位器(2.7k、1W)，电感线圈(可用镇流器)，演示电表，电池组，单刀开关，导线等。

操作

(1)用滑动变阻器组装成超低频电源(图中虚线方框内部分)。组装方法可参考实验 284 中的方法之一。将演示电表调节为“0—10V”的电压表和“0—10mA”的电流表，并都调成中心零位式，以便于观察相差。

(2)按图接线，将电位器 W 的阻值调为最大。合上单刀开关，以适当的速率移动滑动变阻器 R 的滑动触头 P，使两电表的指针都以零位为中心左右对称地摆动，这时两电表指针的摆动几乎是同步的，说明电路中的电阻较大。

(3)逐渐减小 W 的阻值，可见电流表指针越来越落后于电压表的指针。当 W 减小到零时，电流表指针落后电压表指针的相差最大。说明在电感电路中，电流相位落后于电压，存在相差。

说明

演示中的电感线圈必须采用自感系数 L 很大而直流电阻很小的线圈，才能有较好的效果。

方法二

目的 用示波器显示电感电路中的电压和电流的相差。

器材 可拆变压器，电位器(200、1W)，低频信号发生器，电子开关，教学示波器，电阻(15Ω 、 $\frac{1}{8}W$)，导线等。

操作

(1)按图(a)接线。电位器 W 用于改变电感线圈的直流电阻，其阻值范围为 0—200。电感线圈 L 可用可拆变压器的线圈(0—110—220V)，并在该线圈中插入条形铁芯。由教学电源供给 400Hz 正弦交流电。电子开关的“A 输入”，“B 输入”和“地”分别接于测试点“1”、“2”、“3”。用于观察加于电路两端的总电压 U 和通过它的电流 i。电子开关的“输出”和“地”分别用屏蔽线接于示波器的“Y 输入”和“地”，并将“频率范围”置于“5k—50k”(Hz)档。

(2)调节示波器，将“Y 轴衰减”置于“1 档”，“扫描范围”置于“100—1k”档，“Y 增益”旋钮向顺时针方向旋到底。将电位器 W 的阻值调至最大。

(3)先调节低频信号发生器的“低频增幅”旋钮、电子开关的“A 增幅”和“B 增幅”旋钮，使信号幅度大小适当。再调节示波器的“频率微调”旋钮，使扫描和被观察信号同步。在示波器屏上显示两个稳定的信号波形。调节电子开关“相对位移”旋钮，使两波形的零线重合。在屏上可见如图(b)所示的电流 i_L 和电压 U_L 的波形，它们的相差大于零而小于 90° 。这表明了电感电路中电流与电压的相位关系。

(4)将 W 的阻值逐渐减小，相差将逐渐增大。当 W 减小到零时，相位差接近“ 90° ”。这近似地表示了纯电感电路中的电流与加在它两端电压的相位关系。电路越接近于纯电感电路，电流落后于电压的相位差就越接近于 90° 。

说明

(1)示波器显示的电流波形实际上是采样电阻上的电压。因为采样电阻与电感是串联的，它们中间的电流相位相同；而且电阻上的电压和电流相位也相同，所以可以用采样电阻上的电压来代表电感中的电流。

(2)因为示波器显示的电感上的电压实际上是电感上的电压和采样电阻 R 上的电压的矢量和，所以 R 的阻值要尽量小一些，要保证 $2\pi fL \gg R$ 。

(3)如有双踪示波器，可以省却电子开关。

电容器的隔直通交作用

器材 电池组(6V)，交流电源(6V)，双刀双位开关，小电珠(6.3V、0.15A)，灯座，电解电容器(200 μ F)两只，导线等。

操作

(1)按图(a)所示电路连接，电容器用两只 200 μ F 的电解电容器反向串联而成。使用电解电容器是为了使电容量大一些，反向串联是为了防止电解电容器接入交流电路被反向击穿。

(2)把双刀双位开关 K 合在直流电源一边，小电珠不亮，说明直流电不能通过电容器，即电容器有隔直流的作用。

(3)把 K 合在交流电源一边，小电珠点亮，说明交流电能通过电容器，即电容器有通交流的作用。

说明

(1)如果在电容器两端并联一个单刀开关 K_2 ，如图(b)。在 K_1 接通交流电源，小电珠发光的前提下，闭合 K_2 ，就能看到小电珠比 K_2 断开时更亮，这就说明电容器对交流电也有阻碍作用。

(2)如果没有双刀双位开关，可用单刀双位开关代替，这时电路如图(c)所示。

纯电容电路欧姆定律

目的 验证在纯电容电路中电流强度跟电压成正比。

器材 演示用安培表(交流 0—1A)，演示用伏特表(交流 0—10V)，电解电容器(1000 μ F、12V)，滑动变阻器(0—50 Ω)，交流电源(6V)，导线等。

操作

(1)按图连接好电路。打开电源，从安培表和伏特表可读出一组 (I, U) 值。

(2)调节滑动变阻器 R ，改变电路中的电流，可读取另一组 (I, U) 值。共要读取 7—8 组 (I, U) 值。

(3)以横轴代表 I ，纵轴代表 U ，作出 $U-I$ 图，可得一条直线。说明电容电路中的电流与它两端的电压成正比。

注意

(1)用 50Hz 的交流电和 1000 μ F 的电容器，电容器的容抗为几个欧，比伏特计的内阻要小得多，因此应该用安培表外接法。

(2)选用的电解电容的耐压值应适当高一些，以防接在交流电路中被击穿。

电容器的容抗

方法一

目的

- (1)认识电容对交流电的阻碍作用。
- (2)定性认识容抗与电容量及信号频率的关系。

器材 低频信号发生器，扬声器，电容器 3 个($0.1\mu\text{F}$ 、 $1\mu\text{F}$ 、 $10\mu\text{F}$)，电键，导线等。

操作

- (1)按图接好连线。电容取 $10\mu\text{F}$ 。
- (2)开启信号发生器，输出一低频信号（如 400Hz ），可以听到扬声器发声。
- (3)断开、闭合电键 K ，扬声器里声音响度有变化。电键断开时的声音比合上时要轻得多，这是电容器的容抗对交流电起阻碍作用的结果。
- (4)改变信号发生器输出信号的频率（如增加到 4000Hz ），重复操作(3)，可发现频率越高，开、合电键时扬声器声音响度的变化越小。这说明频率越高，电容器的容抗越小。
- (5)让信号发生器输出固定频率（例如 4000Hz ），依次把 $0.1\mu\text{F}$ 、 $1\mu\text{F}$ 、 $10\mu\text{F}$ 的电容器接入电路。比较扬声器响度的变化。电容器的容量很大，扬声器里声音也最响；电容器的容量很小，扬声器里声音最轻。说明当电流频率不变时，容量大的电容器容抗较小。

注意 本实验中电容器的容抗与扬声器的电抗相差不要太远。若容抗太大， K 断开时扬声器声音太小；若容抗太小， K 通断时，扬声器声音变化不大。

方法二

目的 定性演示容抗与电容、交流电频率的关系。

器材 变频电源，电池组，双刀双位开关，单刀双位开关， $1000\mu\text{F}$ 电容器 3 个，小电珠，导线等。

操作

- (1)按图连接电路。打开 K_1 ，将 K_2 合到 a 处（接电池组），小电珠不亮，说明直流电不能通过电容器。
- (2)将 K_2 合向 b （接变频电源）。改变变频电源的频率（保持输出电压不变），可看到频率越高，小电珠越亮。说明频率越高，电容器的容抗越小。
- (3)固定变频电源输出电流的频率。将其余两个电容器逐个与原来的电容器并联，可看到并联的电容器越多，小电珠越亮。说明电容器的容量越大，它的容抗越小。
- (4)合上 K_1 ，可看到小电珠比操作(2)、(3)中都要亮。说明电容器尽管能通过交流电，但对交流电仍然有阻碍作用。

方法三

目的 研究通过电容器电流强度的大小与电容器的电容量及交流电的频率之间的关系。

器材 低频信号发生器，示教交流毫安表，示教交流伏特表，电容器（电解电容器或油浸电容器）2只，导线等。

操作

(1)如图连接电路，接通电源，让低频信号发生器正常工作（两电表均选小量程）。

(2)保持输出正弦波的频率不变，改变电容器的电容（可用相同电容器串联或并联），同时调节正弦波幅度，保持伏特表的示数不变。观察电流表的示数与电容量的关系，可以得到通过电容器的电流强度与电容量

成正比的结论。从而可知电容器的容抗与电容量成反比，即 $X_c = \infty \frac{1}{C}$ 。

(3)保持电容量不变，改变正弦波的频率，同时调节正弦波幅度，保持伏特表的示数不变。观察电流强度与交流电的频率的关系，可以得到通过电容器的电流强度与交流电的频率成正比的结论。从而可知电容器的容

抗与交流电的频率成反比，即 $X_c \propto \frac{1}{f}$ 。

方法四

器材 学生信号源，电阻1.2k Ω ，电位器（0—100 Ω ），电容器4只（0.1 μ F、0.2 μ F、0.3 μ F、0.4 μ F），喇叭（2.5英寸舌簧喇叭），导线等。

操作

(1)如图连接电路，将学生信号源的低频输出端与A、B两接线柱相连，F、G两接线柱分别与示波器Y输入端和接地端相连。

(2)研究容抗跟电容间的关系

将插头插入孔2，接通0.1 μ F的电容器，信号源频率选1000Hz，调节示波器，使荧光屏呈现两个波形，幅度为1格。改变电容量，插头分别改插孔3、4和5，电容依次为0.2、0.3和0.4 μ F，观察到波形幅度成倍地增加，说明容抗随电容的增加而反比例地减小。

(3)研究容抗跟频率的关系，将插头插入孔2，信号源频率选500Hz，荧光屏呈现1个波形，幅度调为1格。保持输出信号电压不变，改变信号源的频率，依次为1000、1500、2000和2500Hz，示波器显示的波形数依次为2、3、4和5，波形的幅度成倍地增加，说明容抗随频率的增加而反比例地减小。

(4)将插头插到孔1，信号源频率是500Hz。调节示波器，使荧光屏上出现一个完整的正弦波。保持信号源输出电压不变，改变信号频率，可看到荧光屏上波形数目逐渐增多，而幅度基本未变。说明电阻对交流电的阻碍作用与频率无关。

说明 在示波器得到的信号足够大的前提下， R_L 尽量调得小一些。具体可参看实验287方法的说明部分。

纯电容电路中电流和电压的相差

在纯电容电路中，如果 $U=U_m \sin \omega t$ ，则其电流瞬时值方程为 $i=I_m \sin(\omega t+90^\circ)$ ，电流的相位比电压超前 90° 。

在演示中，除用电容元件代替电感元件外，其他均与实验288的方法相似。

方法一

目的 用超低频交流电源和电表演示纯电容电路中的电流和电压的相差。

器材 滑动变阻器，电位器（0—470k Ω ），金属化纸介电容（4 μ F、160V），演示电表，电池组，单刀开关，导线等。

操作

(1)用滑动变阻器组装成超低频电源，组装方法可参考实验 284 中的方法一。将两台演示电表分别调节为“0—10V”的电压表和灵敏电流计“G”档。并都调成中心零位式，以便于观察相差。

(2)按图接线。先将电位器 W 的阻值调至最大。合上单刀开关，以适当的速率往复移动滑动变阻器 R 的滑动触头，使两电表都以零位为中心左右对称地摆动。因为电路中电阻较大，所以这时它们的摆动情况几乎是同步的。

(3)逐渐减小电位器 W 的阻值，可见电流表指针逐渐变得超前于电压表的指针，相差逐渐增大。当 W 阻值减小到零时，电流表指针超前于电压表指针为最大，相差接近 90°。说明在纯电容电路中，相差为 90°。而在电阻与电容串联的电路中，电流超前电压，相差大于零而小于 90°。

注意

由于电压表的内阻 R_V 比电位器 W、电容 C 支路的电阻小得多，若按图中虚线位置连接电压表，电流将超过 G 表的量程，使实验不能成功。

方法二

目的 用示波器显示电容电路中的电压和电流的相差。

器材 金属化纸介容器（1 μ F、160V），教学示波器，低频信号发生器，电子开关，电位器（0—150 Ω ），电阻（15 Ω 、1/8W），导线等。

操作

(1)按图(a)接线。电位器 W 用于改变电路的直流电阻用，其阻值范围为 0—150 Ω 。低频信号发生器输出 u 为 1000Hz 的正弦信号。R 为取样电阻。

(2)电子开关的“A 输入”，“B 输入”，“地”分别接测试点 1, 2, 3。用于观察电路两端的总电压 u 和电路中电流 i 。并将电子开关的“频率范围”置于“1”和“100—1k”Hz 档。电位器 W 值调至最大。

(3)将示波器的“Y 输入”和“地”分别接在电子开关的“输出”和“地”上。“Y 衰减”及“扫描范围”分别置于“1”和“100—1k”Hz 档。电位器 W 值调至最大。

(4)先调节电子开关的“A 增幅”、“B 增幅”和示波器的“Y 增益”，使信号幅度大小适当。再调节示波器的“频率微调”，使扫描和被观察信号同步，在屏上显示两个稳定的形波。最后调节电子开关的“相对位移”，使两波形的零线重合如图(b)，可看出电压 u 与电流 i 的相差大于零而小于 90°。这表明在电阻与电容器串联电路中，电流与电压间存在位相差，且电流超前于电压。

(5)将 W 的阻值逐渐减小，电流与电压间的相差将逐渐增大。当 W 值减小到零时，电路接近纯电容电路。这时的相差接近 90°。这说明了纯电容电路中电流与加在它两端的电压存在 $\pi/2$ 的相差。

说明

(1)同实验 288 方法二中的说明(1)。

(2)因为示波器显示的电容上的电压实际上是电容上的电压和采样电阻P上的电压的矢量和，所以P的阻值要尽量小一些，要保证 $\frac{1}{2\pi fc} \gg R$ 。

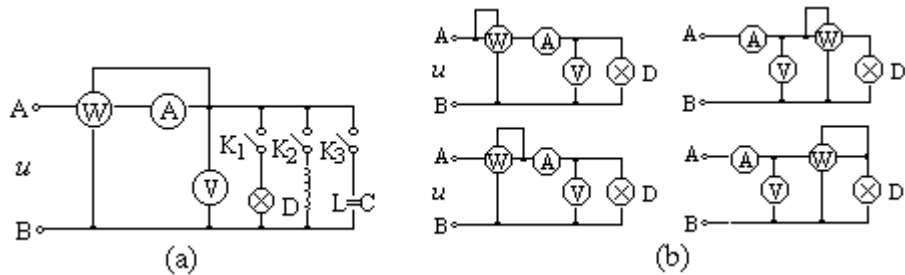
(3)如有双踪示波器，可以省却电子开关。

交流电的有功功率和视在功率

器材 演示电表，演示瓦特表，灯泡(10V、10W)，变压器原理说明器，金属化纸介电容器(25 μ F、160V)8 个，低压电源，灯座，单刀开关，导线等。

操作

(1)按图(a)连接线路。将两台演示电表分别调节为“0—10V”的交流伏特表和“0—1A”的交流安培表。A、B 端接低压电源交流输出 10V。K₁、K₂、K₃ 均断开。电感 L 用变压器原理说明器中的红色线圈套在 U 形铁芯的一个臂上，放上条形铁轭并用螺母压紧。从线圈的“0”、“2” 端引出导线，这时线圈的匝数为 200 匝，直流电阻约为 0.8 Ω 。电容器 C 用 8 个 25 μ F 的电容器并联成 200 μ F。瓦特表 W 调节为 0—25W 的量程，按图接线。接线时不能接成图(b)中的各种接法，否则会降低演示效果。



(2)合上 K₁，成为纯电阻电路。灯发光，由伏特表、安培表和瓦特计分别测出电路负载的总电压 U，总电流 I 和总消耗功率 P。由测量结果可得有用功率 P=UI。由公式 S=UI 算出视在功率，可以看出，在纯电阻电路中，交流电的功率等于电压与电流的乘积，与直流电路情况相同。有功功率 P 等于视在功率 S，功率因数 $\cos \phi = P/S=1$ 。

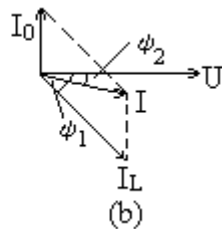
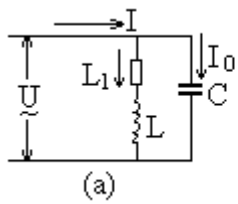
(3)将低压电源输出电压调为 6V 交流。断开 K₁，合上 K₂。由于电感线圈具有电阻，故此时电路相当于电阻与电感串联的电路。测出电路负载的总电压 U、总电流 I 和有功功率 P。由读数计算视在功率 S=UI。比较有功功率 P 和视在功率 S，可知 P<S。从而说明了，在电阻和电感串联的电路中 $\cos \phi = P/S < 1$ 。

(4)将低压电源输出电压调为 8V，断开 K₂，只合上 K₃，成为纯电容电路。测出电路中的 U，I 和 P。此时虽然电流表和电压表的读数很大，但瓦特表的读数却为零。结果说明：纯电容电路不消耗功率， $\cos \phi = P/S=0$ 。

提高功率因数

方法一

目的 演示用并联电容器的方法提高功率因数。

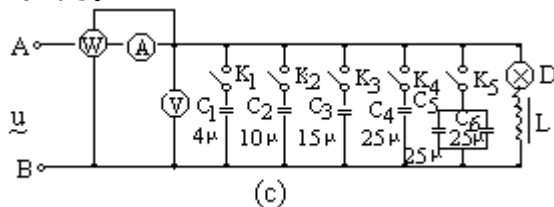


原理 在图(a)所示的电路中，电感上的电流 I_L 的相位比电压 U 落后

ϕ_1 角图(b)。并联上电容器 C 后，因为电容器上的电流 I_C 比 U 要领先 $\frac{\phi_2}{2}$ ，

所以总电流 I 只比 U 落后 ϕ_2 角 ($\phi_2 < \phi_1$)，而且 I 的值也比 I_L 的值小。在 I_L 一定的情况下，取一个适当的 I_C 值，可使 $\phi_2 = 0$ ， $I = I_{\min}$ 。

器材 低压电源，演示瓦特表，演示电表，变压器原理说明器(J2425)， $25\mu\text{F}$ 电容器 3 个， $4\mu\text{F}$ 、 $10\mu\text{F}$ 、 $15\mu\text{F}$ 电容器各一个，单刀开关 5 个，灯泡及灯座(10V、10W)，导线等。



操作

(1) 将变压器原理说明器中的绿色线圈套在铁芯上，放上条形铁轭并用螺母压紧，使铁芯闭合。从线圈的“0”、“1”端引出导线，作电感器 L 。将瓦特表调节为“ $25\text{V} \cdot \text{A}$ ”。将两台演示电表分别调节为“ $0-10\text{V}$ ”的伏特表和“ $0-1\text{A}$ ”的安培表。低压电源用 24V 交流输出。按图(c)接线。6 个电容器并联控制开关，可得到各种电容值的电容，如 $4\mu\text{F}$ 、 $10\mu\text{F}$ 、 $15\mu\text{F}$ 、 $25\mu\text{F}$ 、 $40\mu\text{F}$ 、 $50\mu\text{F}$ 、 $60\mu\text{F}$ 、 $75\mu\text{F}$ 及 $100\mu\text{F}$ 等。

(2) 先断开所有电容器的开关，接通电源，记录瓦特表、安培表、伏特表的读数。并由 $S=UI$ ， $\cos \phi = P/S$ 计算此时的视在功率和功率因数。

(3) 依次接通电容器组上的开关，使并联在灯泡电路上的电容量递增，从 $4\mu\text{F}$ 逐渐增大到 $100\mu\text{F}$ ，可见灯泡仍然发光。记录有关三个电表的读数，计算每次改变的视在功率和功率因数。

(4) 分析数据可以看出：不并联电容器时，功率因数最小；在并上电容器后，功率因数增大。这说明，在感性负载电路两端并以适当容量的电容器，可以使电路的总电流最小，而功率因数最大。

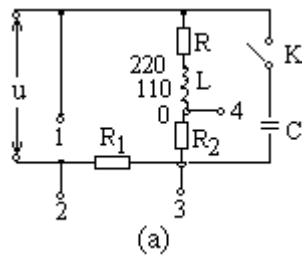
实例 某次实验如下表：

电容量(μ F)	0	4	10	15	25	40	50	60	75	100
有功功率(W)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.6	12.7	12.7	12.8	13.0
电压(V)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
电流强度(A)	0.70	0.68	0.66	0.64	0.60	0.57	0.56	0.57	0.59	0.65
视在功率(VA)	17.5	17.0	16.5	16.0	15.0	14.3	14.0	14.3	14.8	16.3
功率因数	0.71	0.74	0.76	0.78	0.83	0.88	0.91	0.89	0.87	0.80

从数据表中可以看出,该电路在并联上 $50 \mu\text{F}$ 的电容时,电流强度值为 0.56A ,为最小,而这时的功率因数达 0.91 ,为最大。说明在电源电压不变的情况下,并联适当的电容器后,感性负载电路的功率因数可以提高,并且有一个最大值。

方法二

器材 教学示波器,电子开关,低频信号发生器,可拆变压器,金属化纸介电容器($2.2 \mu\text{F}$ 、 63V),电阻(20Ω 、 $1/8\text{W}$),电阻(30Ω 、 $1/8\text{W}$) 2只,单刀开关,导线等。



操作

(1)按图(a)接线。线圈L用可拆变压器线圈“1”。电阻R用 30Ω , 取样电阻 R_2 用 30Ω , R_1 用 20Ω 。电子开关的“ A 输入”、“ B 输入”及“地”分别接测试点2、4、3。电子开关的“输出”、“地”分别与示波器的“ Y 输入”、“地”相接。由低频信号发生器提供频率为 400Hz 正弦交流信号。开关K断开。

(2)示波器的“ Y 轴衰减”置于“10”,“扫描范围”置于“100—1k” Hz 档。反复调节低频信号发生器的“频率微调”、“正弦波幅度”及示波器的“扫描微调”、“ Y 增益”、电子开关的“频率细调”、“ A 增幅”、“ B 增幅”、“相对位移”等。使在示波器屏上显示出稳定的波形如图(b)。i 为总电流波形, i_1 为 R、L 支路上的波形。(实际上 i 与 i_1 同相,由于“0”电位点选在 R_1 和 R_2 的中点,因此造成 i 和 i_1 波形相位相反。)

(3)合上K,并上电容器C,可看到总电流 i 的波形幅度显著变小,而 R、L 支路中电流 i_1 的波形幅度变大了。定性地说明在感性负载并上适当电容后,总电流将减小,并小于感性负载上的电流。断开开关K。

(4)再将电子并关的“ A 输入”、“ B 输入”、“地”接在测试点1、3、2上。适当调节有关旋钮,在示波器屏上可见如图(c)所示电流和电压波形图。电流比电压滞后。合上K,给感性负载并上电容C,可看到 u 和 i 的相差明显减小。这定性地说明了,在给感性负载并上电容器后,提高了电路的功率因数。

方法三

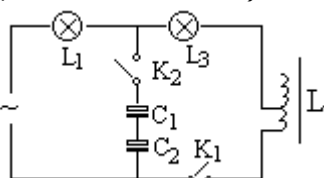
目的

演示

用并联电容器的方法高功率因数。

器材

小灯泡(2.5V、0.3A)2只,晶体管收音机用输出变压器,电解电容器(200 μ F、100 μ F,耐压均在10V以上)各1只,低压电源,单刀开关2只,导线等。



操作

(1)如图连接线路。电感L用晶体管收音机输出变压器的初级,低压电源选择交流6V档。

(2)用小灯泡 L_1 代表线路电阻, L_2 和电感L代表负载。当闭合开关 K_1 时,小灯泡 L_1 、 L_2 的亮度基本相同。

(3)闭合开关 K_2 ,小灯泡 L_2 的亮度基本不变,而 L_1 则明显变暗。这是因为在并联电容器以后,功率因数大为提高,小灯泡 L_2 的有功功率虽然不变,但视在功率变小,在电源电压不变的情况下,输送的电流随之变小, L_1 的功率亦变小,所以 L_1 变暗。

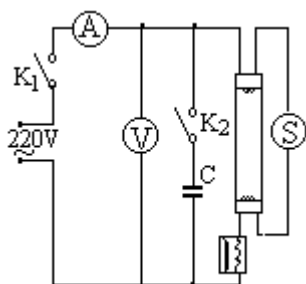
建议 如有条件,将实验中两个小灯泡处换接两只交流电流表,可使实验结果更量化。

方法四

目的

通过演示,说明原是感性电路的日光灯当接入电容器后即可改变功率因数,提高电能利用率。

器材 40W日光灯管,起辉器,40W日光灯镇流器(4.75 μ F、400V),电容器,0—A交流电流表,0—250V交流电压表。



操作

(1)如图所示接好电路。合上 K_1 ,点亮日光灯。电流表和电压表读数的乘积可表示整个电路的视在功率S。

(2)将 K_2 闭合,把电容器C接入电路,可观察到日光灯亮度基本不变,说明有功功率 $P=40W$ 不变。电压表示数不变,而电流表示数明显减小,说明视在功率S显

然减小。

注意

感性电路中接入电容器，其电容器值应有一定的限值，否则使电路变为容性电路，又会使功率因数降低。可见要提高日光灯的功率因数，加接的电容器的值是有一个范围的，一般取 $4.75 \mu\text{F}$ 。

变压器电压和匝数的关系

方法一

器材 万用变压器 形铁芯，0—200 匝线圈，(2.5V、0.3A)电珠，灯座，5m 长导线，电源线插头，导线等。

操作

(1) 实验装置如图所示。

(2) 原线圈输入交流 220V 电压。

(3) 用导线连接好灯座后，顺时针方向一匝一匝地将导线绕在 形铁芯的左侧。开始时电珠不亮。增加匝数后，可见电珠亮度逐渐增加，直至绕到二十多匝，电珠发出强光时为止。这定性地说明了变压器的电压与匝数的关系。

注意

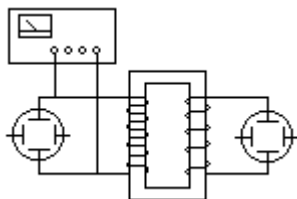
(1) 线圈的接线柱上有 220V 交流电压，最好包上绝缘布以确保安全操作。

(2) 如果手边没有万用变压器，此实验可用可拆变压器代用，效果相同。

(3) 当电珠发出强光后，不能再增加匝数，防止烧坏电珠。

方法二

器材 低频信号源，相同型号示波器 2 台，31cm 黑白电视机行输出变压器磁芯，导线等。



操作

(1) 检查两台示波器 Y 轴输入灵敏度是否一致：两示波器 Y 轴衰减一致，Y 轴增益旋至最大，Y 轴输入并接到同一信号源上。屏幕上显示的图形 Y 方向幅度应一致。如不一致，可调节其中一台示波器的 Y 轴增益，使其一致。在整个实验过程中，Y 轴增益不能再行调节。

(2) 用导线在磁芯一边绕 16 匝作为变压器初级，另用一根导线在另一边绕 4 匝作为次级。

(3) 低频信号源输出频率大于 30kHz 的正弦信号，作为变压器初级输入的正弦交流电。用两台示波器分别检测变压器初、次级电压。接线见图。

(4) 调节信号源输出电压，使初级信号幅度在示波器屏幕上显示为 8 格，这时次级显示为 2 格。

(5) 改变变压器次级匝数，可看到初、次级电压始终和匝数成正比。

注意

(1) 变压器磁芯一定要夹紧。以免空隙太大，影响实验的准确。

(2) 如果换用其他规格的磁芯，初级匝数应相应改变，原则是在保证足够电感的前提下尽可能匝数少些。

(3) 为了减少变压器绕组的匝数（以便当场绕制）和提高效率（不必对匝数进行补偿，就得出理想的正比关系），因此采用了 30kHz 以上的交流信号。但是带来的问题是信号源输出电压均不高（J2462 型的正弦信号电压不足 2V），在本实验中难以用一般交流电压表进行准确测量，因此才采用了示波器。

变压器中铁芯的作用

目的

演示变压器中铁芯的导磁作用。

原理

据电磁感应定律，变压器初级线圈有 $e_1 = n_1 \frac{\Delta f_1}{\Delta t}$ ，次级线圈有 $e_2 = n_2 \frac{\Delta f_2}{\Delta t}$ ，可见次级线圈的电动势与穿过次级线圈的磁通量大

小有关。如图所示，当 A 与 B 不闭合，空气磁导率小，磁阻很大，穿过次级线圈的磁通量很小；当 A 与 B 接触面积小，磁阻较大，穿过次级线圈的磁通量较小；只有当 A 与 B 完全闭合时，穿过次级线圈的磁通量最大，次级电动势达到设计值，小灯才正常发光。

器材

可拆变压器（附初级、次级线圈），负载小灯（额定电压与次级输出电压相符或略低些）。

操作

(1) 可拆变压器的初级线圈接 220V 交流电，次级线圈接负载小灯，铁芯 A 与 B 不闭合，小灯很暗。

(2) 把 A 慢慢推向 B，小灯逐渐变亮（现象可能不甚明显）。

(3) 在 A 与 B 接触至完全闭合的过程中，小灯亮度变化极为明显。推动 A 时由于磁性增强，手感觉到越来越费力。

注意

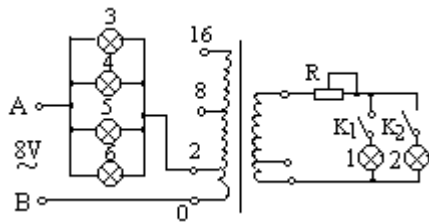
(1) 铁芯开放通电时间不能太长，因为此时初级线圈自感系数小，电流大，容易烧坏。

(2) 本实验如果用示波器或电压表配合小灯泡显示次级线圈电压，则效果更好。

变压器电流和匝数的关系

方法一

器材 变压器原理说明器（或可拆变压器），小灯泡（6—8V、0.15A）若干个，滑动变阻器（0—20Ω），调压器（0—20V），导线等。



操作

(1)如图连接电路。用调压器向 A、B 两端输入 8V 的交流电。当 K_1 、 K_2 都打开时，灯 3、灯 4、灯 5、灯 6 都不发光。说明当次级线圈断开（即 $I_2=0$ ）时，初级线圈也几乎没有电流。

(2)合上 K_1 ，灯 3—灯 6 开始发光，但还比较暗。再合上 K_2 ，并调节滑动变阻器 R，使灯 1、灯 2 正常发光，此时可看到灯 3—灯 6 也正常发光。说明 $I_1 : I_2 = n_1 : n_2$ 。

(3)改变 n_1 和 n_2 的比，并调整初、次级灯泡的个数 N_1 和 N_2 ，使 $N_1 \cdot n_1 = N_2 \cdot n_2$ 。

(4)用调压器向 A、B 两端输入适当的电压。调节 R，使次级一边的 N_2 个灯泡正常发光，此时可看到初级一边的 N_1 个灯泡也总是正常发光。因为 $N_1 : N_2 = n_2 : n_1$ ，所以 $I_1 : I_2 = n_2 : n_1$ 。

注意

(1)初级一边的 N_1 个灯泡是先并联后一起串在初级回路中，而次级一边的 N_2 个灯泡是并联在次级线圈上，不可接错。

(2)由调压器输给 A、B 的电压可适当地高于变压器原来的额定电压，因为灯泡还要分掉一部分电压。

方法二

器材 变压器原理说明器（或可拆变压器），演示电表，滑动变阻器（50、1.5A），调压器，电键，导线等。

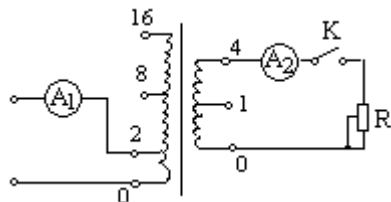
操作

(1)如图接好实验线路。将调压器的输出电压调为 0，两个输入端接在 A、B 上。

(2)合上 K，逐步增大调压器的输出电压达到变压器的额定输出电压后，读取 A_1 、 A_2 的示数 I_1 和 I_2 。

(3)调节 R，可看到当 R 阻值变小时， I_2 增大， I_1 也增大；反之，则 I_2 、 I_1 都变小。再读取 n 组 I_1 和 I_2 ，看是否符合 $I_1 : I_2 = n_2 : n_1$ 的关系。

(4)改变初、次级线圈的匝数，重复操作(1)、(2)、(3)。反复验证变压器中电流和匝数的关系。



注意 因实验中的变压器并非理想变压器，即使 K 断开，初级线圈中也是有空载电流的。所以实验中次级电流 I_2 不宜太小， I_2 大一些，实验误差比较小。

说明 本实验在初、次级回路中各串入一个阻值相等的取样电阻，便可以用示波器代替安培表来进行实验。

变压器的效率

变压器的效率与多种因素有关。如通电后导线要发热，铁芯也要发热，存在一定的磁阻与磁漏，变压器的大小等均有关。这些能量损耗统称为铜损和铁损。因此，变压器的输出功率总比输入功率要小一些。

由于变压器没有运转部分，而铜损与铁损又是比较小的，所以变压器的效率通常可达 94—95%。一些大型的变压器的效率更可高达 98—99%。

在演示中使用的是小型变压器，由于结构上的原因，其铜损与铁损较大，故在演示中会出现变压器效率在 70%左右的现象。

方法一

器材 可拆变压器，演示用大型电表，滑动变阻器，导线等。

操作

(1) 实验电路如图所示。A₁、A₂ 分别为“0—5A”、“0—1A”的交流电流表；V₁、V₂ 分别为“0—25V”、“0—25V”的交流电压表。

(2) 闭合铁芯，初级线圈有“0—200匝”，次级线圈用“0—400匝”。接上额定电压，读取 A₁、V₁、A₂、V₂ 值。

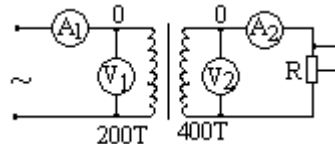
(3) 输入功率 $P_1 = U_1 I_1$ ，输出功率 $P_2 = U_2 I_2$ ，变压器效率 $= \frac{P_2}{P_1} =$

$\frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \times 100\%$ ，由这些式子计算出。

方法二

目的 研究变压器的效率与哪些因素有关。

器材 演示变压器，演示电表，滑动变阻器(50、200 各一个)，导线等。



操作

(1) 将四台演示电表改装成两台电流表(用作 A₁、A₂)和两台电压表(用作 V₁、V₂)。如图连接电路，R_L 代表负载，R 代表变压器次级线圈的内阻。

(2) 将 R 的阻值调成零。在初级线圈上接上额定电压。改变 R_L 的阻值，可读出不同的 U₁、U₂、I₁、I₂ 的值，由 $\eta = U_2 I_2 / (U_1 I_1)$ 计算出不同的效率。可看到当 R_L 的阻值较小(即负载较重)时，变压器的效率较低。这是因为当 R_L 较小时，次级线圈的电阻相对来说就比较大。

(3) 固定 R_L，改变 R 的阻值。读得不同的 U₁、U₂、I₁、I₂ 的值后计算出不同的效率。可看到当 R 逐渐变大(即线圈电阻增大)时，效率逐渐降低。这是因为线圈内阻增大时，消耗在线圈上的功率就增加了。

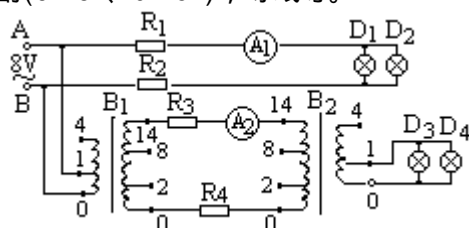
(4) 将 R 仍然调成零，R_L 固定不变。逐渐抽去变压器的矽钢片(如用可拆式变压器，可逐渐移开压在 U 形铁芯上的铁轭)，读得不同的 U₁、U₂、I₁、I₂ 的值计算出不同的效率。可看到当矽钢片逐渐变少时，效率逐渐降低。

远距离输电

方法一

目的 演示提高输电电压可以减少输电线路上的能量损失。

器材 低压电源，可拆变压器，演示电表，电阻(10 Ω、1A)4只，小灯泡及灯座4副(6—8V、0.15A)，导线等。



操作

(1)两只可拆变压器，一只作升压变压器 B_1 ，另一只作降压变压器 B_2 。 R_1 、 R_2 代表低压输电线的电阻， R_3 、 R_4 代表高压输电线的电阻。 D_1 、 D_2 代表接在低压输电线末端的灯泡， D_3 、 D_4 代表接在高压输电线路末端，即降压变压器输出端的灯泡。电路 A、B 端接低压电源输出的 8V 交流电。按图接线。高压线均接“0”和“14”端。两台演示电表作为电流表分别串在低压、高压输电线路内。

(2)接通电源，可见低压输电线末端的灯泡 D_1 、 D_2 光线很弱，而高压输电线末端的灯泡 D_3 、 D_4 发光正常。说明高压输电时，在线路上的电压损失较小，故 D_3 、 D_4 比 D_1 、 D_2 亮。从两台电流表的读数可以看出，高压输电线中的电流比低压输电线中的电流要小得多。

(3)降低高压输电电压，将高压输电线依次接在“8”与“2”端。可见 D_3 、 D_4 的亮度也减弱了，说明降低输电电压，增加了输电线上损失的能量。

方法二

目的 演示并说明若要保证输出功率不变，在减小电流的同时，必须提高输电电压，以减少输电线上的电功率损失。

器材 1KVA 调压变压器 2 只，5.5 Ω 电阻丝 2 根，小灯泡(6V、15W)2 只，示教电表，双刀单位开关，交流电源，导线等。

操作

(1)将元件按图连接。

(2)将示教电表 4 调至交流 0—1A，示教电表 5 调至交流 0—250V。将调压变压器 3 和 7 的次级电压调至最小。接通交流电源，电压为 220V。

(3)先演示在“低压输电”时，输电导线上损耗的电功率较大。调节调压变压器 3，使交流电压表指示 $U_{MN}=30V$ ，再调节调压变压器 7，使交流安培表读数为 0.8A，说明此时输给电路 MN 的电功率为 24W，灯泡发光呈橙黄色。将交流电压表接到输电线末端 Q、S，测出 $U_{QS}=21V$ ，可算出此时在输电线上损失电功率约为 7W。

(4)演示“高压输电”时，输电导线上损失的电功率较小。交流电压表仍接在 MN 端。先使调压变压器 7 次级电压调为零。调节调压变压器 3，使 $U'_{MN}=120V$ 。为了使输入电路 MN 的电功率仍为 24W，调节调压变压器 7，使交流安培表的读数为 0.2A。此时灯泡的亮度接近正常发光。与操作(3)比，“高压输电”时灯的亮度比“低压输电”时亮。

(5)将交流电压表再改接到 Q、S 端，测出 $U'_{QS}=118V$ 。可以算出在“高压输电”时，在输电导线上损耗的电功率约为 0.4W。与操作(4)相比，高压输电时在输电线上的功率损失小。

注意

(1)实验开始时，将调压变压器调到最小是必要的，否则易烧毁小灯泡。

(2)在将交流电压表从 MN 改接到 Q、S 端时，应先切断交流电源开关，以保证用电安全。

方法三

目的

(1)演示一种获得脉冲电流的方法。

(2)演示高压输电的一些性质。

器材 6P1 输出变压器，废旧钟齿轮，铁片，铁丝，木板，电池，导线等。

脉冲电流发生装置的制作方法

将 6p1 电子管收音机输出变压器安装在木板上。把一个废钟废齿轮安装在铁皮制成的轴承座上。在齿轮轴上焊接一个转柄。齿轮与一个弹性金属片接触。将金属片、齿轮、6p1 变压器输出端、开关及干电池组(3V)串联起来，如图。

当合上开关，并转动齿轮手柄时，由于轮齿与弹簧片间断接触，使变压器次级有间断的脉冲电流通过，故在变压器的另一绕组上可以得到 40—60V 的脉冲电压。电压脉冲频率的高低取决于齿轮转动的快慢。其电压的有效值可用交流电压表测出。

操作

(1)当摇动手柄时，变压器 CD 端有脉冲电压输出。用手触及会有“麻电”的感觉。

(2)若此时将 CD 端放入盛有水和鱼的烧杯中，会使鱼因触电而失去知觉。说明电压较高时，必须十分注意用电安全。

(3)若此时将 CD 端用 10m 长的导线引出，另一端接上氖泡，会看到氖泡的亮度几乎不减。而改用 3V 直流电通过同样长的导线引出，另一端的氖泡几乎不发光。这可以定性地说明高压输电时在输电线上的电能损失小。

三相交流电的性质

方法一

器材 手摇三相交流发电机 (J2410 型)，低压直充电源，演示电表，导线等。

操作

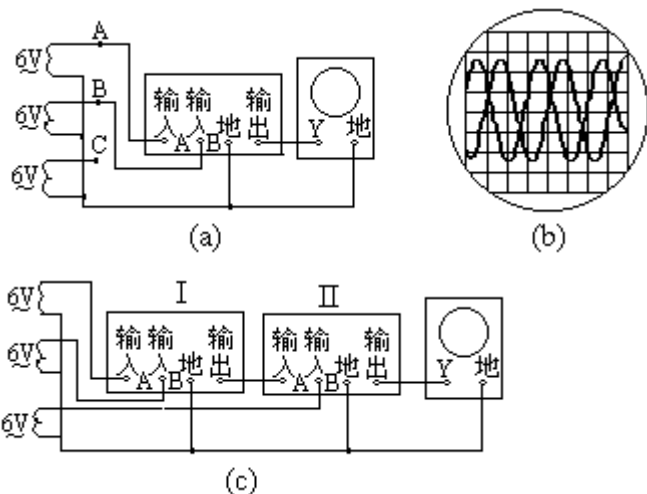
(1)将三台电表都用作 5mA 直流毫安表，调成中心零位式。将三相交流发电机的三相绕组接成星形，把三台电表作为负载也接成星形，与发电机相连 (如图)。

(2)将发电机的励磁线圈接上 4—6V 的直流电，然后尽量匀速、缓慢地转动发电机的转子。可看到电表的指针摆动起来，但三台电表指针的摆动不是同步的，而是依次到达最大值，在时间上相差 $1/3$ 周期。说明三相交流电各相之间的相差是 120° 。

注意 在观察这个实验时，如果同时看三个电表，会有眼花缭乱、目不暇接的感觉。应该将注意力集中在其中两台电表上，看清了这两台电表指针偏转的规律，再注意依次看另外两台。

方法二

器材 三相调压器，示波器，电子开关 (J2460—1 型)，导线等。



操作

(1) 将三相调压变压器调节成输出三相 6V 的交流电。如图(a)连接电路。

(2) 调节电子开关的“ A 增幅”、“ B 增幅”、“ 频率细调”、“ 相对位移”等旋钮以及示波器的有关旋钮，可在荧光屏上看到两个频率相同、幅度相等、相差为 120° 的稳定清晰的正弦波形图(b)。

(3) 换用另一台电子开关，重复操作(2)。

(4) 如图(c)连接电路重复操作(2)、(3)后所有调节旋钮都不要转动。即可在荧光屏上看到如图(d)所示的三相交流电的波形。如果波形不够清晰，只要把有关旋钮稍稍调节一下即可。此波形可看到三相交流电的各种性质。

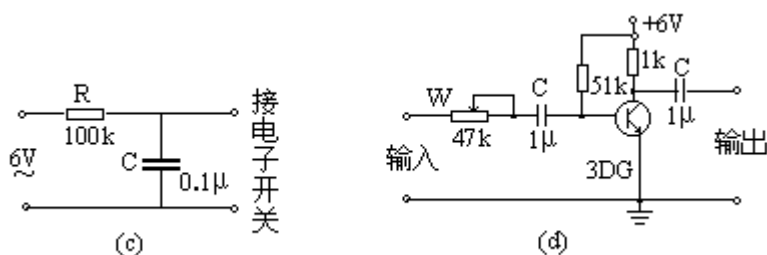
注意

(1) 电子开关 I 的交换频率必须比 II 的交换频率高，以确保电子开关 II 的 A 路每导通一次，电子开关 I 可将 A、B 两个信号都送入示波器。

(2) 如果荧光屏上的波形有失真现象，这是电网或调压器的谐波造成的。只要在每一相和电子开关之间加一个滤波电路图(e)，即可滤掉其中的高频谐波。

说明

(1) 如实验室中没有三相调压器，可在 380V 的三相交流电路的每一根相线上串联一个(10M、1W)的电阻降压，然后接入电子开关。但这种做法一定要注意安全。



(2) 如果实验室中有双踪示波器，则只要用一个电子开关即可。使用时电子开关的交换频率尽量高一些。

(3) 如果有的电子开关(如 J2460 型)输出信号和输入信号相位是相反的，则要另外加反相器。反相器电路如图 f 所示。电位器 W 的阻值根据输入信号的大小调节。

三相交流电的连接

方法一

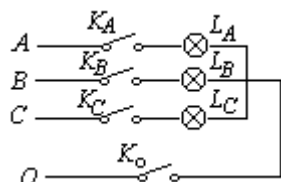
目的

(1) 了解三相交流电“三相四线制”供电方式， $U_{\text{相}}$ 与 $U_{\text{线}}$ 的关系。

(2) 观察三相负载平衡（对称负载）时相电流与中线电流的关系。

(3) 观察三相负载不平衡（非对称负载）时相电流与中线电流的关系。

器材 万用表，交流电流表（量程 500mA），100W/220V 白炽灯三盏（连灯座），电键 4 只，40W/220V、25W/220V 的白炽灯各一盏（连座），安装板，导线等。



操作

(1) 按电路图将实物安装在木板上并将 4 根导线连到三相电源上， L_A 、 L_B 、 L_C 均为 100W 灯。用万用表 \mathcal{V} 档测量相电压 U_{AO} 、 U_{BO} 、 U_{CO} 及线电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} ，可看到 $U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}}$ 的关系。

(2) 平衡负载

闭合 K_0 将电流表分别串在 K_A 、 K_B 、 K_C 处，测出各负载的相电流 i_A 、 i_B 、 i_C 。

将电流表串在 K_0 处，依次闭合 K_A 和 K_B ， K_A 和 K_C ， K_B 和 K_C ，测出三次中线电流 i_0 。可看到 i_0 与前面测的相电流基本相同。

同时闭合 K_A 、 K_B 、 K_C ，测 i_0 。可看到当 K_A 、 K_B 、 K_C 都闭合，即三相负载平衡时， i_0 基本为零。

(3) 不平衡负载

换成 L_A 为 100W、 L_B 为 40W、 L_C 为 15W。按上述步骤再做一次。可看到无论怎样连接， i_0 总不会大于 A 灯的相电流 i_A 。当 L_A 、 L_B 、 L_C 三灯都点亮时， i_0 也不为零。

注意

(1) 实验必须注意安全。每次测量电流前均应切断电路。

(2) 负载不平衡时，为确保负载相电压的对称，不可以没有中线，因此在三相四线制的中线上不能安装保险丝，也不能装电键。此处 K_0 仅为实验方便而设计。

实例 一组实验数据如下：

相电压(V)			线电压(V)		
U_{AO}	U_{BO}	U_{CO}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
220	220	220	380	380	380

表二

电流负载	对称负载 L_A, L_B, L_C 均为 100W						非对称负载 $L_A 100W, L_B 40W, L_C 15W$							
	相 $i_A(A)$	0.45			0.45	0.45		0.45	0.45			0.45	0.45	
电 $i_B(A)$		0.45		0.45		0.45	0.45		0.18		0.18		0.18	0.18
流 $i_C(A)$			0.45		0.45	0.45	0.45			0.065		0.065	0.065	0.065
中线电流 $i_0(A)$	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0	0.45	0.18	0.065	0.37	0.41	0.17	0.315

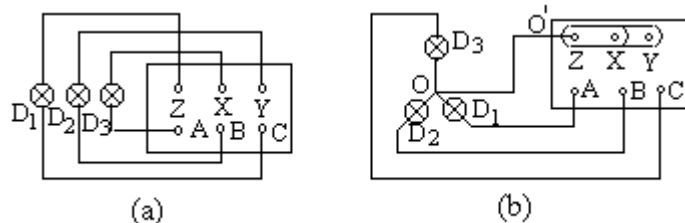
方法二

器材 手摇三相交流发电机，演示电表，低压直流电源，小灯泡（6—8V, 0.15A）4 个，灯座，导线等。

操作

(1) 将发电机的 Y/ 接线板上的三块连接片取下，如图(a)连接电路，即给发电机的每一个线圈(A—X、B—Y、C—Z)接上一个小灯。给发电机的励磁线圈接上 6V 的直流电。以适当的转速转动发电机转子，可看到三个小灯都正常发光。

(2) 将发电机和三个小灯 D_1 、 D_2 、 D_3 都接成星形接法，然后用“三相四线制”将电源和用电器连接起来(图 b)。以与操作(1)中尽量相同的转速转动发电机转子，可看到三个小灯同样正常发光。说明用六根线输送三相交流电是不必要的。



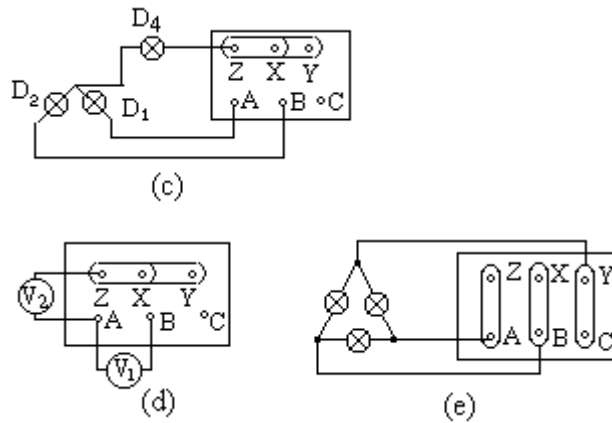
(3) 在图(b)电路的中性线(OO')上串进一个同样的小灯 D_4 。转动发电机，可看到 D_1 、 D_2 、 D_3 正常发光，而 D_4 不亮。说明中性线中基本上没有电流。

(4) 将中性线拆去，再转动发电机，可看到 D_1 、 D_2 、 D_3 仍然能发光。说明当三相交流电的三相负载平衡时，中性线是可以省去的。

(5) 将 D_1 、 D_2 、 D_3 中拆去任意一个，中性线仍然接上，并在上面串一个 D_4 (图 c)。转动发电机，可看到三个灯都正常发光。说明当三相负载不平衡时，中性线上是有电流通过的。(实际用电中一般无法保证三相负载绝对平衡，所以中性线不能省，采用三相四线制送电。)

(6) 将两只演示电表用作量程为 30V 的交流电压表。 V_1 接在任意两条相线间(测量线电压)，另一只 V_2 接在任意一根相线和中性线间(测量相电压(图 d))。使发电机发电，同时读取两只电表的读数，可看到线电压大致为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

(7) 将发电机和小灯泡都改成 接法，(图 e)。转动发电机，可看到小灯泡也能发光。说明三相交流电还可以用三角形接法输送。



三相交流感应电动机的原理

方法一

目的 演示三相电能形成旋转磁场。

器材 永磁式旋转磁场演示器，电磁式旋转磁场演示器，铝框，支座，手摇三相发电机等。

操作

(1)如图(a)，在永磁式旋转磁场演示器中间，放入支座，把铝框放在支座上，使其能自由转动。

(2)用手捻动磁铁，使之旋转，可看到铝框也跟着旋转起来。随即反向转动磁铁，可见到铝框很快停下来，并逐渐跟着磁铁反向转动起来。说明铝框在旋转磁场的作用下能够跟着磁场发生转动。

(3)如图(b)，再用电磁式旋转磁场演示器作此实验。把它和三相交流发电机连接起来。当发电机工作时，可以看到置于演示器中间的铝框也旋转起来。说明当线圈中通入三相交流电时，在三个线圈包围的空间能建立起一个旋转磁场。

(4)将一个小磁针放在电磁式旋转磁场演示器中间，通上三相交流电后，小磁针立即跟着旋转起来。也能说明同样的问题。

方法二

目的 演示三相交流感应（异步）电动机的原理。

器材 电磁式旋转磁场演示器，铝框，鼠笼，支架，三相交流感应电动机模型，手摇三相交流发电机等。

操作

(1)使用电磁式旋转磁场演示器，把铝框放在支架上，将三相手摇发电机与电磁式旋转磁场演示器的线圈连接起来，摇动发电机，三相交流电通入线圈，铝框随即旋转起来。

(2)鼠笼可以看作是许多个铝框围绕中心轴排列在一起组成的（图 a），用鼠笼换下铝框，演示效果与铝框一样。

(3)将三相交流感应电动机模型（图 b），按星形或三角形连接法，与手摇三相交流发电机连接。摇动发电机，三相感应电动机即旋转，然后任意对调两个接头，

改变旋转磁场的方向，则转子转动方向与原转动方向相反。

由单相交流电获得三相交流电

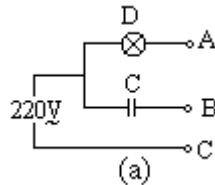
方法一

器材 (7 μ F、400V)交流电容器，(100W、220V)的白炽灯，三相线圈，小磁针，三相感应电动机模型，导线等。

操作

(1)如图(a)连接线路。D是(220V、100W)的白炽灯泡，C是(7 μ F、400V)的电容器。由A、B、C三端即可输出三相交流电(三相的相差不都是120°)。

(2)将三相线圈的A、B、C三个端子和三相电源的A、B、C三端接好(三相线圈的另一端已接地，即星型接法)。把小磁针放在三相线圈中间，即可看到小磁针在旋转磁场的作用下飞转起来图(b)。对换三根线中任意两根接线的位置可看到小磁针反转起来，说明磁场旋转的方向发生了变化。



(3)将三相感应电动机模型的三个接线柱与三相电源的A、B、C端接好，可看到电动机旋转起来。对换三根接线中的任意两根，电动机反转。

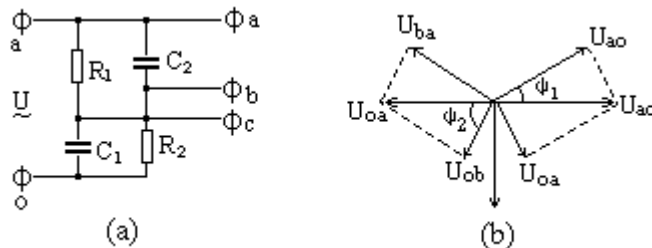
注意

- (1)电源直接使用220V交流电源，必须注意安全。
- (2)不宜使用电解电容器。

方法二

原理 用如图(a)所示电路可由a、o处输入的单相电得到由a、b、c处输出的三相电。如果要求输出三相对称的交流电，即 U_{ac} 、 U_{cb} 、 U_{ba} 各差120°(见图b)，可用如下方法计算 R_1 、 R_2 和 C_1 、 C_2 的配值。

因为 $\phi_1=30^\circ$ ， $\phi_2=60^\circ$ ，
 $\text{tg } \phi_1=1/(C_1R_1)$ ，
 $\text{tg } \phi_2=1/(C_2R_2)$ 。



当 $f=50\text{Hz}$ ，即 $\omega=100 \text{ rad/s}$ 时

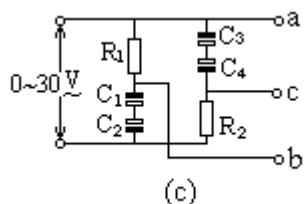
$$R_1 = \sqrt{3} / (100 C_1) ,$$

$$R_2 = 1 / (100 C_2 \sqrt{3}) ,$$

如果 C_1 和 C_2 采用 $1.2 \mu\text{F}$ 的风扇电容，则 $R_1=4594$ ， $R_2=1531$ 。

器材 $1.2 \mu\text{F}$ 风扇电容器 2 个，10k 和 2k 的滑动变阻器各 1 个等。

操作 如图(a)连接电路，将滑动变阻器 R_1 和 R_2 调到适当的阻值，即可在 a、b、c 三端得到三相交流电。



注意

(1) 电容器必须选用交流电容器，如电风扇、洗衣机所用的油浸纸质电容器，不能用电解电容器或者有极性的电容器。电容器的耐压值至少大于输入电压的 $\sqrt{2}$ 倍。

(2) 如果只有电解电容器可接成如图(c)所示的形式，即用两只极性反串的电解电容器来代替原来的一只无极性电容器。

(3) 两个滑动变阻器的功率要根据用电器的功率来确定。

演示阻尼振荡

方法一

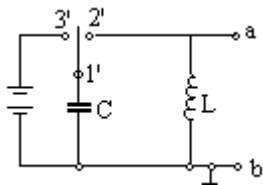
目的

(1) 观察电磁振荡波形。演示阻尼振荡。

(2) 了解 LC 振荡电路电磁振荡周期和频率的变化规律。

器材 6V 蓄电池组，电铃，单刀双位开关，单刀单位开关， $4\mu\text{F}$ 油浸纸解电容器 3 个，0—1000 匝电感线圈（电阻 10、500 匝处中心抽头），示波器，导线等。

操作



(1) 如图(a)，将电铃稍加改装，即在螺钉 4 的上方加一装有接触铜片的接线柱 2。连接好电路，使电铃的 1、2 和 3 起到一个单刀双位开关的作用（当 1 被电磁铁吸引时与 3 导通，不被吸引时与 2 导通）。

(2) 按图(b)连接线路，L 为 0—500 匝的线圈，C 为 $4\mu\text{F}$ 电容器。图(b)中的 1'，2' 和 3' 分别接到图(a)中相对应的 1、2 和 3 上。将 a、b 分别接示波器的“Y 输入”端和“地”端。

(3) 闭合 K，调节示波器，将 Y 衰减置于 10，Y 增益及 X 增益调至中间位置，扫描范围置于 10—100Hz 档。适当调当扫描微调，即可在屏上观察到阻尼振荡电流的波形。

(4) 不改变示波器的增益、衰减以及扫描旋钮。在图(b)的电容 C 上并联 2 个 $4\mu\text{F}$ 的电容器。再观察示波器上的波形及频率的变化。与操作(3)中的波形相比较。

(5) C 用 $4\mu\text{F}$ 电容器，L 改用 0—1000 匝的电感线圈。再观察示波器上的波形周期及频率的变化。与操作(3)中的波形相比较。

(6) 找出电容或电感变化时，振荡电路的周期与频率变化的规律。

注意 电感线圈 L 的电阻不宜太大，否则振荡电流衰减过快，不易观察。

方法二

目的 用示波器观察振荡电路阻尼振荡的波形。

器材 教学示波器,低频信号发生器,40W 荧光灯镇流器,0.033 μF 瓷片电容,100k 电阻,导线等。

操作

(1)按图连接电路。用 40W 荧光灯镇流器作为电感器,和瓷片电容器组成一个振荡电路。低频信号发生器输出 100—200Hz 的方波,经过 100k 的电阻 R 输入振荡电路。示波器的 Y 轴衰减旋钮转到“1”档,扫描范围置于“100—1kHz”档。

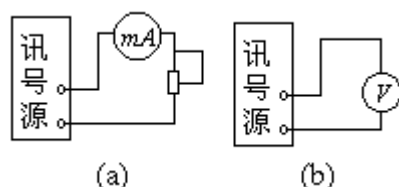
(2)适当调节低频信号发生器输出方波的频率和幅度,同时调节示波器上 X 增益、Y 增益和扫描微调,就可在示波器的屏上观察到振荡电路阻尼振荡的波形。

演示等幅振荡

方法一

目的 用电流表或电压表演示低频等幅振荡。

器材 J2464 型教学讯号源(或其他带有超低频振荡器的仪器均可),大型电流表,滑动变阻器(1k)等。



操作

(1)实验装置如图(a)所示。讯号源输出超低频讯号。

(2)逐渐减小滑动变阻器的电阻使电流表(直流 25mA)指针在平衡位置左右对称地摆动。

(3)若用电压表,可采用图(b),其量程用直流 10V,就能看到指针左右摆动。

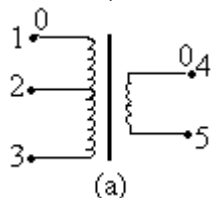
注意

(1)若发现左右摆动不对称,则可调节“超低频调零”旋钮,使其摆动对称。

(2)电流表或电压表的指针摆动的惯性较大,摆动的频率不能太大,故只能显示超低频的振荡。频率高的振荡只能借助示波器来显示。

方法二

器材 自制电感线圈,电容器(0.047 μF 、0.1 μF 、0.22 μF 、63V)各 1 个,三极管 3DG6,电位器(100k、1k)各 1 只,电阻(10k、5.1)各 1 只,示波器,直流电源等。



电感线圈的制作方法

初次级线圈都用线径 0.19mm 左右的漆包线绕制,匝数和抽头如图(a)所示。配上适当大小的铁芯,叠厚约 18mm。

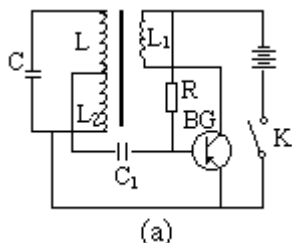
操作

(1)按图(b)连接好电路。电感线圈的“1”、“3”两端分别与示波器的“Y输入”和“地”相连。示波器的“Y衰减”置于“10”档,扫描范围置于“10—100Hz”档。

(2)接通电源,调节电位器 W_2 使阻值最小。再调电位器 W_1 以及示波器有关旋钮,这时在示波器屏上就显出等幅振荡波形。

LC 振荡的频率

目的 研究 LC 振荡的频率和电感的自感系数、电容器的容量之间的关系。

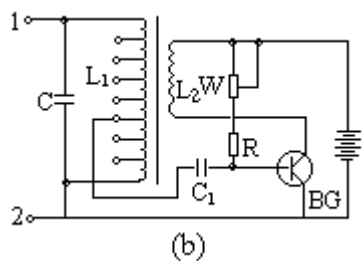


原理 在图(a)所示的电路中,当 K 合上时,流经晶体三极管 BG 的电流通过 L_1 使 L 上产生感生电流。此感生电流使左边的 LC 回路开始振荡。 L_2 取出一部分 L 的振荡信号通过电容器 C_1 加在 BG 的发射极和基极之间。此信号通过 BG 放大后再次通过 L_1 送给 LC 回路,这样就形成了正反馈。如正反馈能量足够大,能补偿 LC 回路中的振荡能量损失,即能维持 LC 回路作等幅振荡。改变 L 的匝数或 C 的容量,可以改变 LC 振荡的频率。

器材 自制振荡线圈,金属化纸介电容器 8 个($0.1\mu\text{F}$ 、63V),电位器(100k),电阻(10k 、1/8W),3DG 型晶体三极管($\beta > 60$),示波器,音频信号发生器,6V 直流电源,导线等。

振荡线圈的制作方法

选用 GE1B18 型铁芯,叠厚 18mm,截面积为 $18 \times 18\text{mm}^2$ 。用直径为 0.2mm 左右的漆包线在骨架上绕两组线圈: L_1 800 匝(每一百匝抽一个头), L_2 300 匝。两个线圈要同向绕制。绕完后用交叉插法插好铁芯。



操作

(1)如图连接电路。 L_1 和 C 组成振荡回路,电源用 6V 直流供电,C 先用 $0.1\mu\text{F}$ 。“1”、“2”两个点分别接示波器的“Y输入”和“地”。此外音频信号发生器的输出接示波器的“X输入”和“地”。

(2)接通电源后慢慢调节电位器 W,直到示波器上出现信号。再细调节示波器的“Y 衰减”和“扫描范围”等旋钮,可在荧光屏上看到等幅振荡的正弦波形。

(3)停止示波器的 X 方向扫描(接外 X)。开启音频信号发生器,调节输出信号的频率和幅度,直至荧光屏上出现一个椭圆。从音频信号发生器上读出音频信号的频率,就是此时 LC 振荡的频率 f 。

(4)保持 C 的容量不变,改变 L_1 的匝数。重复操作(2)、(3),得到若干组(N, f)值。从实验数据可看出,当 N 增大(即 L 增大)时, f 变小(T 增大)。

(5)保持 L_1 的匝数不变,改变 C 的容量(可采用并联电容器的方法),重复操作(2)、

- (3), 得到若干组(C, f)值。从实验数据可看出, 当C增大时, f 变小(即T增大)。
注意 如果LC回路不起振, 可能是L₂的方向接反了。可将L₂的两个头交换一下。

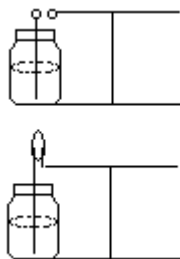
电磁波的发射和接收

方法一

目的 用莱顿瓶演示电磁波的发射和接收。

器材 莱顿瓶两只(一只带振子, 一只带氖泡), 感应圈等。

操作

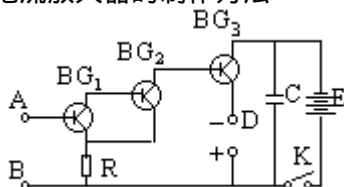


- (1)将感应圈输出端接于带振子的莱顿瓶上。
- (2)接通感应圈的电源, 使莱顿瓶振子开始振荡, 并发出电磁波。
- (3)将带氖泡的莱顿瓶靠近, 调节两莱顿瓶上滑动杆的位置相同, 可看到氖泡发亮。说明带氖泡的莱顿瓶接收到了电磁波, 产生了电谐振。
- (4)若两莱顿瓶上的滑动杆位置不一样, 则氖泡不亮, 这说明两振荡电路固有周期不同时, 没有电谐振现象。

方法二

器材 电谐振演示器, 演示电表, 电子感应圈, 自制电流放大器, 导线等。

电流放大器的制作方法



电路如图(a)所示。图中BG₁和BG₂为3DG12晶体管, BG₃为3DA87晶体管。R为1.5k电阻, C为100μF、6V电容器, 电池取6V。全部元件和电池安装在小塑料盒内。

操作

- (1)按图(b), 接好实验电路, 电流放大器可以装在电谐振演示器上, A、B 两端接在原来接氖泡的两个接头上。D、G 两端通过导线1、2跟电流表相连。
- (2)用万用表检查接收电路N的莱顿瓶外层铝箔与矩形线框接触是否良好。矩形线框的滑动边与固定边的接触是否良好。
- (3)将感应圈高压线圈两端的放电杆取下, 用导线分别将这两端与图(b)中发射电路M的3和4端相连。使发射电路M和接收电路相距0.5m左右。
- (4)接上感应圈的电源, 高压开关调至2或3档。发射电路M即可发生连续的火花放电, 这时可见接收电路N收到电磁波, 电流表指针发生明显的偏转, 示数可达400μA以上。

方法三

目的 用赫兹振荡器演示电磁波的发射和接收。

器材 感应圈，拉杆天线（能拉长至 1m 以上）4 根，球形导体（直径约 1cm）2 个，氖泡，绝缘手柄等。

操作

(1) 将两个球形导体装在两根拉杆天线粗端，再将拉杆天线固定在感应圈上，使两个球形导体相距约 5mm 图(a)，作为发射天线。

(2) 将氖泡和另外两根拉杆天线装在绝缘手柄上，并将氖泡的两端分别接于拉杆天线的粗端（图 b），作为接收天线。

(3) 接通感应圈的电源，使感应圈工作。这时必须先安好天线，再接通电源。

(4) 将接收天线的长度调节成与发射天线的长度相同。将接收天线平行地逐步靠近发射天线，可看到氖泡逐渐发光。说明发射天线发射出电磁波，接收天线收到电磁波，并且产生了电谐振，谐振电流使氖泡发光。

(5) 改变接收天线的长度，或转过一定的角度，可看到氖泡变显或熄灭。说明接收天线与电磁波不产生电谐振时，接收到的电磁波的能量很小。

说明 取下接收器的氖泡，在两根拉杆天线的邻近端接上一只晶体二极管（2AP 型），然后再与电流表并联图(c)。当接收器收到电磁波时，电流表的指针就发生偏转，接收距离可达几米。

方法四

目的 用教学讯号源和普通中波收音机演示电磁波的发射和接收。

器材 教学讯号源（J2464 型或 J2465 型），信号发生器（话筒、电唱机或录音机均可），收音机，导线（1—2m）等。

操作

(1) 对讯号源进行改装

将讯号源中低频振荡器和高频振荡器的连线断开。接一个耳机插座，使普通低频振荡器的振荡号仍能送入高频振荡器，当外接信号插头插入耳机插座时才断开低频振荡器，而将外接信号送入高频振荡器进行调。

(2) 将高频振荡器置于中频段（550—1650kHz）。

(3) 用导线作为天线。将天线一端连接讯号源的输出端并将其竖直放置。

(4) 把信号插头（如电唱机）插入改装的插座内，将信号送入进行调制，这时天线中发射出调信号。

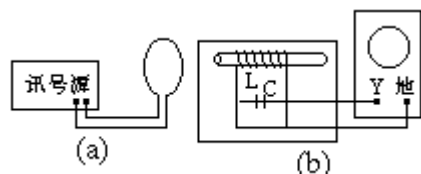
(5) 将收音机打开，调节接收频率，在适当位置即可收到号源中发出的电磁波信号，这时收音机的频率与高频振荡器的振荡频率相同。

(6) 改变高频振荡器的频率，必须重新调节收音机的接收频率才能收到信号。

方法五

目的 用教学讯号源发射高频电磁波，配以简单调谐电路进行接收，用示波器显示。

器材 教学讯号源，教学示波器，磁棒（ $10 \times 100-140$ ），7 股纱包线，空气单连可变电容器（270PF），粗铜线（或铝线），导线等。



调谐电路的制作方法

用7股纱包导线在磁棒上平绕70—75匝，与空气单连可变电容器并联。

操作

(1)将粗铜线弯成一直径为20cm的圆环作为天线，接在号源高频输出端上(如图a)，使信号源发出550—1650kHz间的任一频率信号，由发射天线发射电磁波。

(2)接收装置由磁棒线圈与单连可变电容按图(b)连接而成。并使磁棒处在环形天线的轴线上(与环形天线所在的面垂直)。

(3)调节接收装置的可变电容，并适当调节示波器，使示波器上的正弦波形清晰且振幅最大。无论将电容器向哪一个方向旋转，波形幅度都迅速减小，这说明发生了电谐振(LC回路的频率与讯号源的频率相同)。

(4)改变讯号源的频率，示波器上图形消失。调节接收电路中的电容器，使接收器和电磁波重新谐振才能在示波器上看到幅度较大的波形。

注意 示波器的“Y输入”和“地”要用屏蔽线分别接可变电容器的定片和动片，不可接反。

电磁波的发射的频率的关系

目的 通过实验证明，电磁振荡的频率越高，向外辐射能量的本领越大。

器材 J2465型学生信号源，半导体收音机(将自动音量控制电路短路)，自制高频电流表，导线等。

高频电流表的制作方法

它的电路如图(a)所示。图中电流表用J402电表配用 $500\mu\text{A}$ 插件，两只晶体二极管用2AP9。

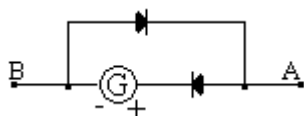
操作

(1)演示时按图(b)连接电路。图中1和2是两根2m左右的塑料电线，1和2两端挂在黑板两边的上端，形成开放电路，3是自制的高频电流表，4是学生信号源，高频电流表的B端接塑料电线，A端接学生信号源高频输出端红色接线柱。

(2)演示时使信号源处于调幅振荡状态，高频增幅调到最大，调节振荡频率由低到高，可见高频电流表指针偏转逐渐增大，这表明发射电流随频率增高而增大；同时收音机调到相应接收频率，声音也比接收低频段时更响亮。这也定性说明了电磁振荡的频率越高，向外辐射能量的本领越大。

本实验通过视听结合，定性验证这一结论，随着振荡频率的变化，高频电流表的示数和收音机的响度差别明显。

建议 如果高频电流表偏转不够明显，可以换用功率更大的信号源或灵敏度更高的表头。



电磁波的反射和折射

方法一

原理 电视机的遥控一般是利用遥控发射器发出的红外电磁接收而进行的。使用时遥控器头部要对准电视机的红外接收孔，张角大约在 45° 以内图(a)。这种红外电磁波沿直线传播并符合反射定律，因此能用来演示电磁波的反射。

器材 遥控电视机及遥控器，表面光亮的金属反射板（也可用平面镜代替）。

操作

- (1)如图(a)所示，用遥控器在一定张角内遥控电视机工作。
- (2)将遥控器头部转至背向电视样位置，这时电视机不能被遥控（遥控器不要指向坚硬物体）。
- (3)在遥控发射器前放置一块金属反射板，慢慢转动反射板，可以在某一范围内使发射器发出的红外电磁波经反射后到达电视机，遥控又能进行，如图(b)所示。

说明

本实验在室内进行时，有时因墙壁的多次反射，使遥控的张角变得很大。此时可按图(c)所示，用薄金属片卷成一小圆筒罩住电视机红外接收孔，以排除墙壁等反射波的影响。

方法二

器材 电磁波的发送和接收演示器(J2435)，米尺等。

操作

- (1)将甚高频振荡器装好，安上发射振子天线，天线的总长度调至 65cm，并使两边长度相等。使甚高频振荡器工作，发射等幅电磁波。
- (2)如图所示，将甚高频振荡器放在距墙壁 50—60cm 处，并与墙壁成一个角度使其发射电磁波。手持调谐接收器，使接收振子天线沿箭头线所示的方向移动。只有移到图示位置时，接收器中的小灯泡才发光。说明墙壁使电磁波发生了反射，并且遵循反射定律。

方法三

器材 电磁波的干涉、衍射、偏振演示器（J2436 型）等。

- (1)将仪器安装好，使活动臂与固定臂在一条直线上，接收喇叭口与发射喇叭口等高并且对准。
- (2)接通电源，调整接收喇叭后端的短路活塞，使微安表指示足够大。
- (3)把反射用铝板插在刻度圆盘的中心插座上，作为电磁波的反射面，其边缘与刻度盘的“ 0° ”、“ 180° ”线对齐并固定住。此时刻度圆盘的 90° 线可作为反射面的法线。
- (4)转动刻度圆盘，使固定上指针指在某一角度 θ 处（就是入射角）。再仔细地调节活动臂的位置，使微安表指针偏转最大或所器声音最响。读出活动臂上指针所指的角度 θ' ，即反射角。如果在误差允许的范围内， $\theta = \theta'$ ，即可验证反射定律（如图）。
- (5)取下反射铝板，重复操作(1)、(2)。然后将折射棱镜（用石蜡制成的等腰直角三棱柱）放在刻度圆盘中间与喇叭等高的位置，可发现微安表指针偏转角度和扬器发声显变小，再转动活动臂，重新找到微安表指针偏转最大（扬声器最响）的位置图(b)，即可说明石蜡三棱镜对电磁波的折射作用。

(6)改变石蜡三棱镜的方向，使它一个直角面与发射喇叭口平行。转动活动臂，可在如图(c)所示位置时，发现微安表指针偏转最大或扬声器声音最响。说明电磁波在通过直角三棱镜时发生了全反射。

电磁波的干涉

原理 传送电视信号的电磁波在传播过程中碰到界面会发生反射。反射波与直射波都是满足相干条件的相干波。利用金属表面对电磁波进行反射，可以使反射波与直射波发生叠加。如电视机的图象与伴音变好或变坏，就是电磁波的干涉现象引起的。

器材 电视机，金属反射板（可用大号铝锅盖或大尺寸平面镜代替）。

操作

(1)按图将电视机放置在电视台与操作者之间。调整电视机天线，使所在平面与电磁波传播方向垂直。选择某一频道，调节电视机微调对比度旋钮，使电视机接收的信号较弱，这时图象很淡，伴音也不清晰，还有杂波干扰。

(2)将反射板放在垂直于电亩台天线与电视机连线的位置上，由电视机前开始缓缓向后移动。此过程中可以观察到屏幕上的图象由淡变深，然后又渐渐减弱，模糊不清，行帧不同步，甚至图象消失，伴音也有类似现象。这种清晰、模糊的变化有规律地交替出现，就是直射电磁波和反射电磁波的干涉现象。

实例

电磁波经反射后到达接收机并与直射波干涉。设电视机与反射板距离为 l ，则直射波与反射波的波程差 $L=2l$ 。当 L 为半波长的奇数倍时，干涉相消，图象模糊不清，当 L 为半波长的偶数倍时干涉叠加，图象清晰。考虑到反射板上的半波损失，有 $2l=(2n+1)\lambda/2$ 即 $l=(n+1)\lambda/2$ 时干涉相消。 $(n=0,1,2\dots)$ ， λ 为某电视频道的中心波长。以下给出一组实验数据，供参考。

上海电视频道	频率段 (MHz)	中心频率 (MHz)	中心波长(m)	各干涉相消时 l 值		
				l_0 (m)	l_1 (m)	l_2 (m)
八频道	183—191	187	1.60	0.8	1.6	2.4
廿频道	526—534	538	0.566	0.28	0.57	0.85
廿六频道	614—622	618	0.485	0.24	0.49	0.73

表中 l_0, l_1, l_2 为各级干涉相消时反射面离电视机的距离。

方法二

器材 电磁波的发送和接收演示器（J2435型），米尺型。

操作

(1)将甚高频振荡器安装好，安上发射振子天线，天线的总长度调至 65cm，并使两边长度相等。使甚高频振荡器工作，发射等幅电磁波。

(2)将装着振子接收器天线的振子接收器（天线长度也是 65cm），放在距甚高频振荡器 3—4m 远处，使两天线平行。转动接收器上调电表灵敏度的电位器旋钮，使微安表读数为 40—50 μA 。

(3)将反射器放在发射振子天线的后面（与发射振子天线、接收振子天线在同一平面内）。改变反射器与发射振子天线的距离，在某些位置上，可看到微安表读数增大；在另一些位置上，可看到微安表读数减小。这就是直射波和反射波的干涉现象。

方法三

器材 电磁波的干涉，衍射，偏振演示器(J2436)等。

操作

(1)将仪器安装好，转动活动臂使接收喇叭与发射喇叭在同一轴线上对准。将双缝板插在刻度圆盘中心的插座上，板对准刻度圆盘的“ 0° ”和“ 180° ”线(如图a)。

(2)接通电源，使发射喇叭发出电磁波。调整接收喇叭后端的短路活塞，使微安表指示足够大。

(3)向左或向右转动活动臂，改变接收喇叭的位置，可看到电表的读数反复出现较大值和较小值，扬声器发出的声音也重要出现轻、响的变化。如果以横轴代表活动臂偏离原来位置的角度 α ，纵轴表示电表的读数 I ，可粗略地得到如图(b)所示的图象。说明各级较大值强度相差不大，而且基本上是按一定的角度周期变化的。这是由电磁波的双缝干涉引起的。

电磁波的衍射

器材 电磁波的干涉、衍射、偏振演示器(J2436)等。

操作

(1)将仪器安装好，转动活动臂使接收喇叭与发射喇叭在同一轴线上对准。接通电源，使发射喇叭发射电磁波。调整接收喇叭后端的短路活塞，使微安表的读数足够大。

(2)将单缝板的缝宽调成4—5cm，插在刻度圆盘的中心插座上，对准刻度圆盘的“ 0° ”和“ 180° ”线。可看到微安表读数相当大，扬声器也相当响。

(3)向左或向右转动活动臂，改变接收喇叭的位置。可看到微安表的读数先变小，再变大(但比原来位置要小得多)；再变小，再变大；……。如果以横轴代表活动臂偏离原来位置的角度 α ，纵轴表示微安表的读数 I ，可粗略地得到如图(b)所示的图象。说明第一次极大幅度最大，角度变化范围也较大，二次、三次……极大幅度迅速减小，角度变化范围也变小。这就是电磁波的单缝衍射引起的。

(4)改变单缝的宽度，重复操作(2)、(3)，还可以看到单缝的宽度对衍射的结果是有影响的。

电磁波的偏振

方法一

器材 电视机，羊角天线等。

操作

(1)将羊角天线的两根天线放在一直线上，将每一根的长度调节成所要接收的电视频道波长的一半。

(2)调节好电视机的有关旋钮后，将天线在竖直面以电磁波传播方向为轴慢慢转动(如图)。可看到电视的图象和伴音周期性地变好和变坏，这说明电磁波是一种偏振波。

方法二

器材 电磁波的发送和接收演示器(J2435)，米尺等。

操作

(1)将甚高频振荡器安装好，安上发射振子天线，天线的总长度调至65cm，并使两边长度相等。使甚高频振荡器工作，发射等幅电磁波。

(2)给调谐接收器装上接收振子天线,天线总长度调成 65cm,并且两边长度相等。将调谐接收器放在离甚高频振荡器 50—60cm 处。当两天线平时,调谐接收器上的小灯泡发光;当两天线互相垂直时,小灯泡熄灭。可说明甚高频振荡器发出的电磁波是一种偏振波。

(3)把调谐接收器换用振子接收器,放在甚高频振荡器 3—4m 处。可看到当两天线平时,微安表的读数比两天线垂直时的读数要大得多,同样可以说磁波是一种偏振波。

方法三

器材 电磁波的干涉、衍射、偏振演示器(J2436型)等。

操作

(1)将仪器安装好,转动活动臂,使接收喇叭与发射喇叭在同一轴线上对准。

(2)将栅条形偏振板水平插在刻度圆盘中心的插座上,接通电源。调整接收喇叭后端的短路活塞,使微安表指示足够大,扬声器声音最响。

(3)将偏振片竖直插在插座上,可见到微安表读数很小,扬器基本无声。表明电磁波是一种偏振波。

电磁波的调制、发射和接收 313

将要传递的电信号“加”到高频等幅振荡电流上去的过程叫调制。常用的调制方法有调幅、调频和调相,它们分别是使高频振荡电流的幅度、频率和相位随着调制信号而改变。本实验的前两种方法演示的是调幅发射,方法三演示的是调频发射。

方法一

目的 演示电磁波的调制。

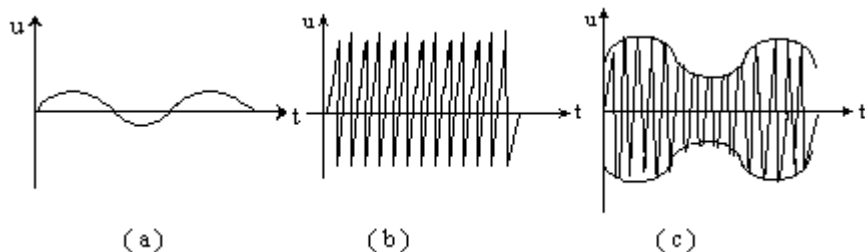
器材 高频信号源,示波器等。

操作

(1)从高频信号发生器中引出 400Hz 低频调制讯号送入示波器。其波形如图(a)。

(2)把高频信号发生器的“调幅”旋钮调节到调幅度为零,从高频输出插孔中引出未调制的高频等幅信号送入示波器。其波形如图(b)。

(3)调节“调幅”旋钮增大调幅度。从示波器上观察调制后的高频调幅波形。其波形如图(c)。



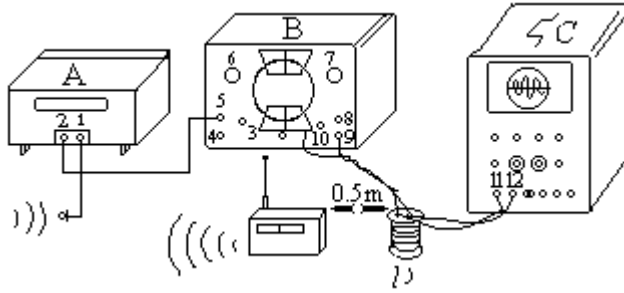
方法二

目的 演示电磁波的调制、发送和接收(模拟广播电台)。

器材 高频信号源,示波器,收、扩电唱三用机,半导体收音机,话筒,原、副线圈,导线等。

操作

(1)如图将各仪器连接起来。



A : CF-1 三用机 (图中为背面)

B : XFC-12 高频讯号发生器

C : 325-2 示波器

D : 副线圈

E : 收音机

1 . 话筒插孔

2 . 外接喇叭孔

3 . 调幅

4 . 400 ~

5 . 外调

6 . 度盘

7 . 波段

8 . 高频输出 ($\times 10$)

9 . 高频输出 ($\times 1$)

10 . 接地

11 . 接地

12 . Y 输入

(2)将收音机调谐在无电台处。将“调幅”及高频输出置于最大位置，转动度盘频率至收音机的调谐频率附近，直至在收音机中听到“嘟……”的400Hz低频声音。将度盘频率调偏，声响随之消失，证明收音机收到的确是信号发生器发送的信号。

(3)用讲话声音信号或唱片信号作为调制信号，输入“外调”插孔。适当调节调制信号的强度（调节三用机的音量），即可从收音机中听到讲话或唱片的声音，同时在示波器中可看到幅度随声音的强弱而变化的高频调幅波波形。

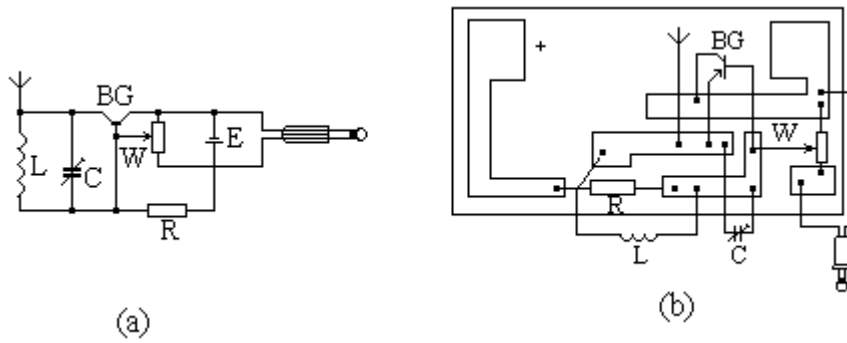
(4)用示波器分别观察三用机喇叭输出端的调制信号及收音机喇叭两端经发射、接收、放大后的信号波形。如果有双踪示波器或使用电子开关，即可同时观察这两个信号，可发现这两个信号基本上是相同的。

方法三

目的 演示电磁波以调频方式发射与接收。

器材 自制印刷线路板，天线（8mm漆包线，长15cm），线圈（0.4mm漆包线在3mm骨架上绕10圈），半可变电容器（1/18P），电位器（33K Ω ），电阻（2K Ω ），三极管（3DG204），5号电池，3.5mm耳机插头，调频收音机等。

原理 电路如图(a)，晶体管与电感、电容组成三点式高频振荡器，其振荡频率受工作电压的控制。从耳机插头送来的音频信号，经过电位器分压后加到晶体管基极，使其振荡频率随音频而改变，达到调频的目的，调频信号经天线幅射出去。



操作

(1) 印刷板如图(b)，照图把元件装好。

(2) 将插头插到收录机或电视机的耳机插口上，接通电源，调整电容器，打开调频收音机，在 88—108MHz 频段上细细调整，收到信号后再调整电位器，使其音质清晰即可。整机工作电流不到 1mA。

(3) 找一个塑料盒子把线路板装在里面。这台调频发射器发射距离不小于 30m，而且很容易装成。

注意 由于线路工作频率较高，所以调试时应用无感螺丝刀仔细调整。

314 电磁波的屏蔽

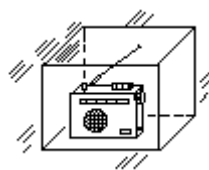
方法一

器材 灵敏度较高的小型超外差式晶体管收音机，金属盒（可用金属饭盒、铝锅）等。

操作

(1) 打开收音机，调谐至一强电台并开大音量。

(2) 将收音机放入金属盒内，并将盒盖盖紧。此时声音衰减甚至消失。逐渐打开盖子，声音又增大，取出后音量恢复如初。这说明空间的无线电电磁波绝大部分被金属盒屏蔽，不能或极少进入盒内。如图(b)。



方法二

器材 教学演示用无线电波发射和接收机，大号金属盒（可用大铝锅代替）等。

操作

(1) 接通发射机电源使其发射电磁波。在发射机附近调节接收机上的可变电容器，使谐振在发射波频率，此时接收机上小电珠发光。

(2) 将发射机放入大金属盒内，保持与接收机位置不变，这时接收机的小灯不亮。说明发射机发出的电磁波在传播中被金属盒屏蔽，盒外接收机接收不到电磁波。

说明 电磁波被金属材料屏蔽这一物理现象的利用与防止在生产生活中很常见。如：收音机、电视机外壳不用金属制作就是为了防止金属对电磁波的屏蔽而影响接收；各种发射设备为了提高电磁波的发射效果，还用拉竿天线、外接天线。相反，接收机内本振、中放、检波等电路却要用金属罩罩严并妥善接地，为的是防止它们工作时产生的电磁振荡向外传播引起干扰。至于大量电子仪器设备为了屏蔽空间各种电磁杂波的影响都用金属作外壳，有时还要良好接地，因为地球周围是一个充满各种电磁波的空间，电火花、电键的闭合或断开等都会产生电磁波。因此一些精密的测量甚至要将整个实验室用金属材料严密屏蔽，以防止外界电磁波的干扰。

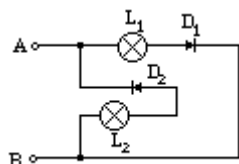
晶体二极管的单向导电性 315

方法一

器材 晶体二极管(2CP 或 2AP)，直流低压电源，小电珠，导线等。

操作

(1)按图接好电路。



(2)当 A 端接直流电源的高电位，B 端接低电位时，小电珠 L_1 亮、 L_2 暗。说明晶体二极管 D_1 导通、 D_2 截止。

(3)当 A 端接直流电源的低电位，B 端接高电位时，小电珠 L_2 亮、 L_1 暗。说明晶体二极管 D_2 导通、 D_1 截止。

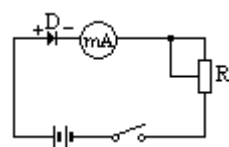
注意 本实验中，AB 间的电压，二极管 D_1 、 D_2 的最高反向电压和小电珠的额定电压要互相配合。

方法二

器材 晶体二极管(2AP)，演示电表，滑动变阻器(2000 Ω)，电池组，电键，导线等。

操作

(1)按图接好电路，将滑动变阻器 R 的阻值调成最大。合上电键后慢慢地调小 R 的阻值，可看到毫安表的示数逐渐增大。说明当二极管的“+”极电位比“-”极电位高的时候，它能导电。



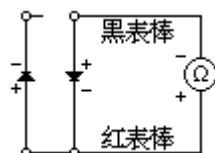
(2)将二极管的极性反过来，重复以上操作，可看到即使 R 的阻值调成零，毫安表的读数仍然很小。说明当二极管的“+”极电位比“-”极电位低时，它基本不能导电。

注意 操作(1)中减小 R 的阻值时，电路中的电流不能大于毫安表的量程和二极管的最大正向电流。

方法三

器材 万用表，二极管(2CP 或 2AP)等。

操作



(1)将万用表量程开关选在电阻测量档($R \times 100$ 或 $R \times 1K$)。

(2)将红表棒接二极管的“-”端，黑表棒接二极管的“+”端，万用表的读数是几百欧。

(3)将二极管与表棒连接的位置调换一下(如图虚线所示)，再测一次。万用

表的读数是几百千欧。说明晶体二极管两个方向的导电性能相差很大。如果两次测量的阻值相差不大，说明晶体管已损坏。

注意

(1)万用表黑表棒接表内电池正极，红表棒接表内电池负极。

(2)用万用表测二极管时，不能用 $R \times 1$ 档或 $R \times 10K$ 档，以免电流过大。

晶体二极管的伏安特性曲线 316

方法一

器材 低压直流电源，滑动变阻器(200、2000 各一个)，演示电表，晶体二极管(2AP)，电阻，定值电阻(300、2K 各一个)，电键，导线等。

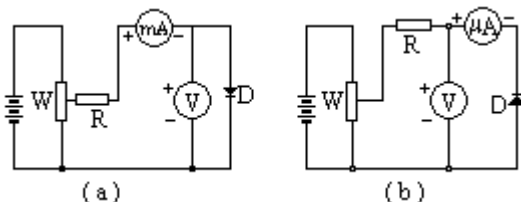
操作

(1)按图(a)接好电路。电源用 12V 直流电源，W 用 200 滑动变阻器，R 是用 300 定值电阻作限流用。两台演示电表分别用作直流伏特表和直流毫安表。

(2)调节 W，使伏特表 U 的读数依次为 0.0V、0.2V、0.4V、0.6V、0.8V，读出毫安表 I 相应的读数。

(3)以横轴代表电压 U，纵轴代表电流 I，作出 I-U 图，即晶体管的正向伏安特性曲线。

(4)按图(b)接好电路。电源用 16V 直流电源，W 用 2000 滑动变阻器，R 用 2K 定值电阻。两台演示电表分别用作直流伏特表和直流微安表。



(5)调节 W，使伏特表 U 的读数依次为 0V、1V、5V、10V、13V，读出微安表 I 相应的读数。

(6)以横轴的负方向代表 U，纵轴的负方向代表 I，作出 I-U 图，即晶体管的反向伏安特性曲线。

注意

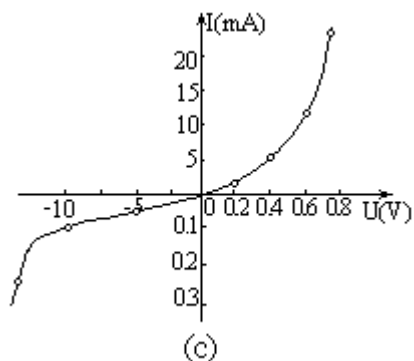
(1)因为晶体二极管的正向电阻较小，反向电阻很大，因此在测定它的正向伏安特性时，要用毫安表外接，在测定它的反向伏安特性时，要用微安表内接（有关此内容可参阅实验 235）。

(2)限流电阻 R 的大小要适当。过小了起不到保护二极管的作用，过大了会使二极管上的电压升不到需要的数值。测二极管的正向伏安特性时，流经二极管的电流不应超过它的最大工作电流。

实例 实验数据如下：

正向电压(V)	0	0.2	0.4	0.6	0.8
正向电流(mA)	0	1	5	12	24
反向电压(V)	0	1	5	10	13
反向电流(μ A)	0	0	50	75	250

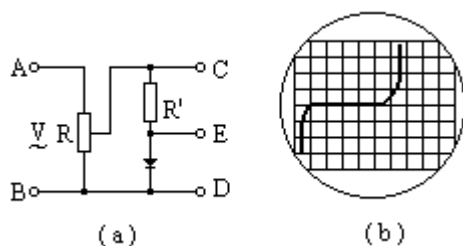
作出二极管的伏安特性曲线如图(c)。从图可以看出在二极管上加不同的电压时，它的电阻是不一样的，因此二极管是一种非线性元件。



建议 二极管的电阻值变化比较大，因此在测量精度要求比较高的场合下，可采用补偿伏安法（具体方法见实验 235 方法二）。

方法二

原理 如图(a)所示电路，A、B 两端接适当电压的交流电。随着交流电压的变化，取样电阻 R 和二极管 D 上就会产生不同大小和方向的电流。D、E 之间的电压是 D 上的电压，CE 之间的电压可以代表 D 上流过的电流。将 U_{DE} 和 U_{CE} 分别送给示波器的 Y 和 X 偏转极板，就可以在荧光屏上显示出 D 的伏安特性曲线。一般二极管的反向击穿电压比较高，因此 D 宜用稳压管 2DW7（反向击穿电压 6V 左右）。电阻 R 兼有取样及限流两个作用，当通过 D 的电流增大时， R 分掉的电压也增高，这样就限制了 D 电流过度增大。



器材 晶体二极管（2AP 型和 2DW7 型各 1 只），示波器，滑动变阻器（2K Ω ），电阻（1K Ω ，1/8W），低压交流电源，导线等。

操作

- (1) 按图(a)连接电路。A、B 两端接 8—10V 交流电，D 用稳压二极管 2DW7， R 用 1K Ω 电阻。C、D、E 分别接示波器的“Y 输入”、“X 输入”和“地”。
- (2) 将示波器的“扫描范围”置于“外接”档。接通 A、B 之间的交流电源后，适当地调节示波器的“Y 增益”、“X 增益”等旋钮及滑动变阻器 R ，即可在荧光屏上看到二极管完整的伏安特性曲线(图 b)。

317 半波整流

方法一

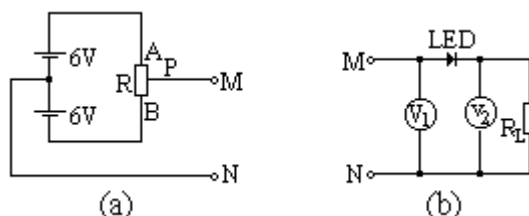
器材 自制模拟交流电源，演示电表，电池，滑动变阻器(1000 Ω)，发光二极管，电阻(500 Ω)，导线等。

模拟交流电源的制作方法

图(a)所示电路是用滑动变阻器R构成的模拟交流电源。当R的滑动触头P在A、B之间来回滑动时，M、N两端就输出交变电压。当P在A点时， $U_{MN}>0$ ；当P在B点时， $U_{MN}<0$ 。交变电压的频率取决于P点拉动的快慢。

操作

(1)如图(b)连接电路。两台演示电表都用作伏特表(中心指零)， V_1 显示整流前的电压， V_2 显示整流后的电压。LED是一个发光二极管，除了具有单向导电性之外，在正向电流达到一定值时还能发光，演示效果较好。 R_L 是负载电阻，其阻值大小可根据电源电压高低来定，一般使LED中有10mA左右电流通过即可。M、N两个头接模拟交流电源。



(2)以比较均匀的速度连续来回拉动模拟交流电源的滑动变阻器。可看到 V_1 的指针连续来回摆动(两边摆幅基本相同)，说明电源输出的是交流电。LED间断地闪光，说明它间断地导通。 V_2 的指针一次又一次间断地向一个方向偏转(由于指针的惯性，指针可能向另一方向略有偏转)，说明加在负载电阻 R_L 上面的是间断的脉动直流电。

(3)根据演示的需要，可将模拟交流电源滑动变阻器的触头停在某一位置，定格显示该种情况下LED的通断情况和 R_L 上的电压方向。当M点电位高于N点电位时，LED导通(发光)， V_2 指针偏转；当M点电位低于N点电位时，LED截止(不亮)， V_2 指针不动。 R_L 上得到的是间断的方向自上而下的电流。

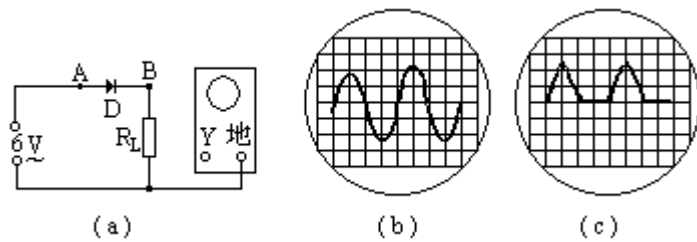
说明 本实验也可以用小灯作为负载，这样能更直观地显示负载上何时有电流通过。但要注意的一般小电珠电流都比较大(100—200mA)，而LED能通过的电流一般都较小，因此要选用一个工作电流较小的发光器件。

方法二

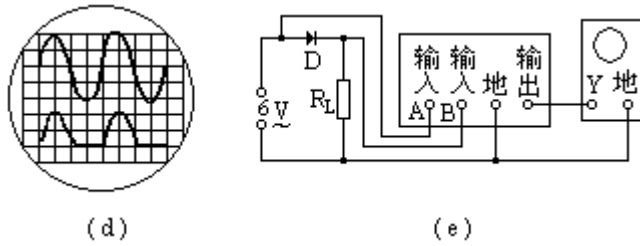
器材 低压交流电源，示波器，晶体二极管(2CP)，电阻(2K Ω)，导线等。

操作

(1)如图(a)连接电路。按实验279方法一操作(1)、(2)的步骤调节好示波器后，用导线将A点与示波器的“Y输入”接通。调节示波器的有关旋钮后，可在荧光屏上看到如图(b)所示的交流电波形。



(2) 将示波器的“Y输入”改接在负载 R_L 上端的 B 点，可在荧光屏上看到如图 (c) 所示的间断脉动直流电波形。说明经过晶体二极管 D 的整流后，在负载 R_L 上得到的是间断脉动直流电。从示波器上看，经过这种电路整流后，交流电只剩下一半向上的波形，因此这种整流叫半波整流。它得到的直流电脉动比较大。



说明

(1) 如果有双踪示波器，可将示波器的“ Y_A 输入”和“ Y_B 输入”分别与电路中的 A、B 点接通，则会在荧光屏上看到如图 (d) 所示的波形。

(2) 如用单踪示波器和电子开关，则可接成如图 (e) 所示电路。适当地调节电子开关和示波器后，荧光屏上同样能出现图 (d) 所示的波形。

318 全波整流

全波整流和半波整流比较，它的优点是可以得到连续的脉动直流电；缺点是变压器的利用率不高，而且变压器需要一个抽头。在实验中应注意体现这些特点。

方法一

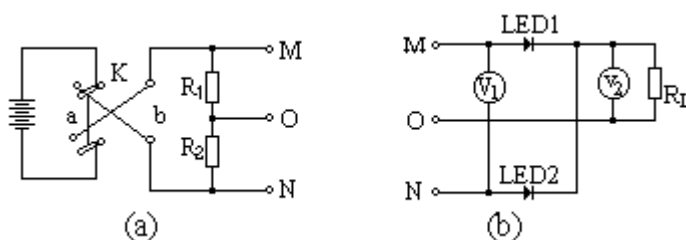
器材 演示电表，电源（直流 12V），双刀双位开关，电阻(1000 Ω)。发光二极管，电阻(1000 Ω)，导线等。

模拟抽头交流电源的制作方法

图(a)所示电路是用两个电阻 R_1 、 R_2 和双刀双位开关 K 制成的模拟抽头交流电源。当 K 掷向 a 时， $U_M < U_N$ ；当 K 掷向 b 时， $U_M > U_N$ ， U_0 始终处于 U_{MN} 的中点上。交变电压的频率取决于扳动 K 的快慢。

操作

(1)如图(b)连接电路。两台演示电表都用作伏特表（中心指零）， V_1 显示交流电压， V_2 显示脉动直流电压。LED1 和 LED2 是两个发光二极管，除了具有单向导电性之外，它在正向电流达到一定值时还能发光。M、O、N 三个头分别与图(a)中对应的 M、O、N 点连接。 R_L 是负载电阻，其阻值的选取要考虑两个方面：一是使通过 LED 的电流为 10mA 左右，二是阻值应比图(a)中的 R_1 、 R_2 大得多。



(2)以较均匀的频率将 K 在 a、b 之间来回扳动。可看到 V_1 的指针以较大的幅度连续来回摆动，说明 M、N 两端输出的是交流电。LED1 和 LED2 轮流发光（当 $U_M > U_N$ 时，LED1 亮；当 $U_M < U_N$ 时，LED2 亮），说明它们轮流导通。 V_2 的指针以较小的幅度一次又一次连续地向一个方向偏转（与半波整流的间断偏转不同），说明加在负载 R_L 上面的是连续的脉动直流电。比较 V_1 和 V_2 指针偏转的幅度，可看到交流电压的峰值比直流脉动电压的峰值要大，说明交流电的利用率较低。

(3)根据演示的需要，可将 K 停在 a 或 b 上。从容地讨论交流电变化中某一时刻二极管导通的情况和负载上电流的方向。

说明

(1)如有电流表，可在 R_L 和 O 点之间再串联一只电流表，能更直接地说明 R_L 得到的电流始终是自上而下的。

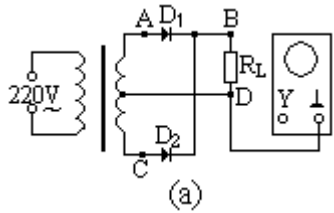
(2)同实验 317 方法一中的说明。

方法二

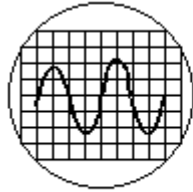
器材 示波器，晶体二极管（2CP 型），电源变压器（初级 220V、次级 $2 \times 6V$ ），电阻（2K Ω ），导线等。

操作

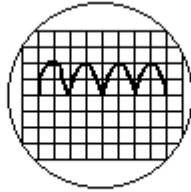
(1)如图(a)连接电路。按实验 279 方法一操作(1)、(2)的步骤调节好示波器后，用导线将 A 点与示波器的“Y 输入”接通。调节示波器，可在荧光屏上看到图(b)所示的交流电波形。



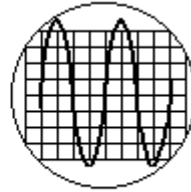
(2) 将示波器的“Y输入”改接负载 R_L 的上端 B 点。可在荧光屏上看到如图(c)所示的连续脉动直流电波形（与半波整流得到的间断脉动直流电波形不同）。说明经过晶体二极管 D_1 和 D_2 的整流后，在负载 R_L 上得到的是连续的脉动直流电。



(b)



(c)

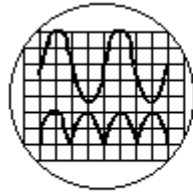


(d)

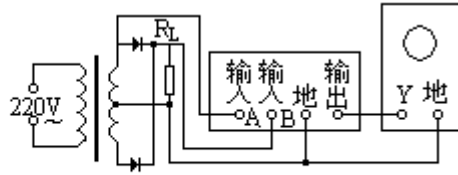
(3) 将示波器的“Y输入”仍然接 A 点，“地”接 C 点。可在荧光屏上看到如图(d)所示的交流电波形。将图(d)与图(c)加以比较，可看到全波整流的交流电的峰值比得到的脉动直流电的峰值要大一倍，说明变压器的利用率不高。

说明

(1) 如果有双踪示波器，可将示波器的“ Y_A 输入”和“ Y_B 输入”分别与 A、B 点接通，“地”接 D 点。荧光屏上会出现如图(e)所示的波形，更便于比较。



(e)



(f)

(2) 如用单踪示波器和电子开关，则可接成如图(f)所示线路。适当地调节电子开关和示波器，荧光屏上同样能出现图(e)所示的波形。

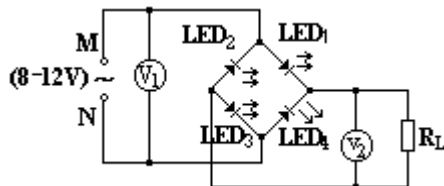
桥式整流319

桥式整流和半波、全波整流比较，它的优点是既能得到连续的脉动直流电，变压器的利用率又比较高，且不需要抽头。因此桥式整流在家用电器中得到广泛的应用。在实验中应注意体现它的这些优点。

方法一

器材 发光二极管4个（两红、两绿），演示电表，自制模拟交流电源，电阻(200)等。

模拟交流电源的制作方法：见实验317方法一。



操作

(1)按图连接电路，M、N端分别与模拟交流电源相应端点连接。两只电表都用作伏特表（中心指零）， V_1 显示整流前的电压； V_2 显示整流后的电压。LED1和LED3是红色发光二极管，LED2和LED4是绿色发光二极管，在导通时能够发光。 R_L 是负载电阻，可取200—500。

(2)以比较均匀的速度连续来回拉动模拟交流电源的滑动变阻器。可看到 V_1 的指针来回摆动，说明电源输出的是交流电。2只红色发光二极管和2只绿色发光二极管轮流发光，说明它们轮流导通。 V_2 的指针一次又一次连续地向一个方向摆动，说明整流后加在负载上的是连续的脉动直流电。

(3)比较 V_1 和 V_2 指针偏转的幅度，可发现两表指针摆幅基本相同。说明交流电压的峰值和直流电压的峰值相同，因此交流电的转化率较高。

(4)根据演示的需要，可将滑动变阻器的滑动触头停在某一位置上，定格显示该时刻4个发光二极管的通、断情况和 R_L 上的电压方向。当M点电位高于N点电位时，LED1和LED3（红色）发光；当N点电位高于M点电位时，LED2和LED4发光。 R_L 始终得到自上而下的连续的脉动电流。

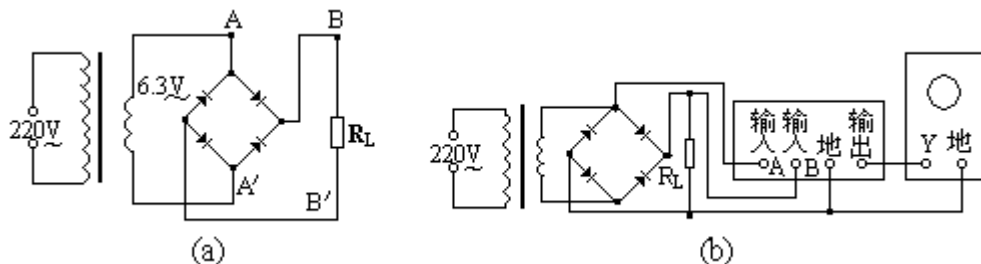
说明 同实验317方法一中的说明。

方法二

器材 示波器，整流二极管，电源变压器（初级220V、次级6.3V），电阻(2K)，导线等。

操作

(1)按图(a)连接电路。按实验279方法一操作(1)、(2)的步骤调节好示波器。将示波器的“Y输入”接A点，“地”接A'点。调节示波器，可在荧光屏上看到交流电波形[如实验318方法二的图(b)]。



(2)将示波器的“Y输入”接B点，“地”接B点。调节示波器，可在示波器荧光屏上看到如实验318方法二图(c)所示的连续脉动直流电波形（与半波整流得到的间断脉动直流电波形不同）。说明负载 R_L 上得到的是连续脉动直流电。

(3)比较实验318方法二中图(b)的交流电和图(c)的脉动直流电的波形，可看到它们的峰值是一样大的。说明交流电的转化率是比较高的。

说明

(1)如果有双踪示波器，可将示波器的“ Y_A 输入”和“ Y_B 输入”分别与A、B点接通，“地”与B接通，然后再在B和B之间接一个 $0.1\mu\text{F}$ 的电容器。荧光屏上会出现如实验318方法二中图(e)所示的波形。

(2)如果用单踪示波器和电子开关，则可接成如实验318方法二中图(f)所示的电路。适当地调节电子开关和示波器，荧光屏上会出现与实验318方法二中图(e)相同的波形。

滤波电路 320

本实验介绍了电容滤波、电感滤波及 π 型滤波三种滤波方式。实验中应该对这三种滤波方法的性能加以比较：电容滤波器器材简单，但“外特性平直情况”较差，适用于输出电流较小的情况；由 LC 组成的 π 型滤波各方面性能都比较好，但由于电感线圈体积较大，成本较高，所以被采用得也不多；由 RC 组成的 π 型滤波电路取材简便，性能也较好，因此在各类电器中被广泛采用。

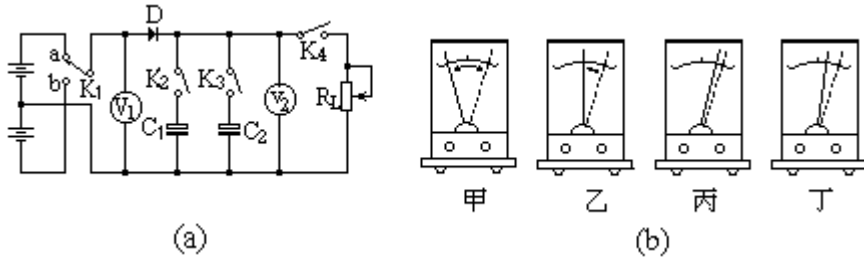
方法一

器材 电池组，演示电表，晶体二极管，电解电容器(2000 μ F、10V)2 个，滑动变阻器(2000 Ω)，单刀开关，单刀双位开关，导线等。

操作

(1)如图(a)连接电路。 K_1 为单刀双位开关，当 K_1 轮流合向 a、b 两点时，便可以在 V_1 两端得到一个低频交流电。两台电表都用作中心指零的伏特表。

(2)打开 K_2 、 K_3 、 K_4 ，将 K_1 轮流合向 a、b 两个位置，可看到 V_1 的指针以零点为中心左右等幅摆动如图(b)甲，而 V_2 的指针由零点开始向一边摆动如图(b)乙。说明 V_1 两端的是交流电压，而经过晶体二极管 D 整流后， V_2 两端的是间断的脉冲直流电压。



(3)合上 K_2 ，重复操作(2)，可看到 V_2 的指针始终偏在一边，并略有摆动，但摆动的幅度比操作(2)时明显减小如图(b)丙。说明由于 C_1 的接入，滤掉了一部分交流成份，使输出电压变得比较平稳了。

(4)再合上 K_3 ，重复操作(2)，可看到 V_2 的指针偏在一边几乎不动了。说明由于再接入 C_2 ，滤掉的交流成份更多了，输出电压几乎已成稳恒电压。这样便可证明滤波电容的容量越大，滤波的效果越好。

(5)将 R_L 的阻值调成最大，合上 K_4 。边重复操作(2)，边调小 R_L 的阻值。可看到 R_L 的阻值越小， V_2 指针的摆动越明显如图(b)丁。说明当输出电流增大时，输出电压的平稳程度就变坏了。也就是说，电容滤波的“外特性平直情况”是较差的，只适合于输出电流较小的情况。

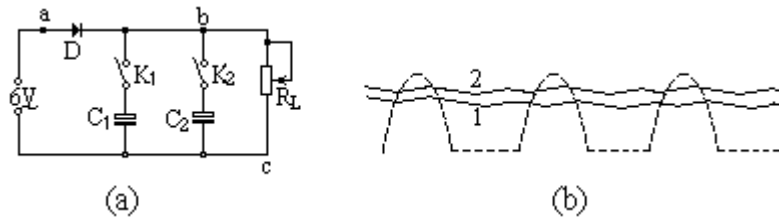
方法二

器材 低压交流电源(6V)，晶体二极管，电解电容器(10 μ F、10V 和 100 μ F、10V 各 1 个)滑动变阻器(2000 Ω)，示波器，电键，导线等。

操作

(1)如图(a)连接电路， R_L 的阻值调成最大。 C_1 和 C_2 分别为 10 μ F 和 100 μ F 的电容器。将示波器的“地”端与 C 点连接，“Y 输入”端与 a 点连接。适当地调节示波器有关旋钮，可在荧光屏上看到正弦波形。

(2)将 K_1 、 K_2 打开，示波器的“Y 输入”端换接到 b 点，可在荧光屏上看到半波整流得到的间断脉冲直流电波形[如图(b)中虚线所示]。



(3)合上 K_1 ，可看到荧光屏上的波形变得平滑起来[如图(b)中实线 1]。

(4)再合上电键 K_2 。由于又接上了一个 $100\mu\text{F}$ 的电容器，所以使荧光屏上的波形更平滑[如图(b)中实线 2]。由此可说明，滤波电容越大，滤波的效果越好。

(5)逐步减小负载电阻 R_L ，增大输出电流。可看到屏上波形的波动程度逐步增大。说明电容滤波的“外特性平直情况”较差，只适合输出电流较小的情况。

方法三

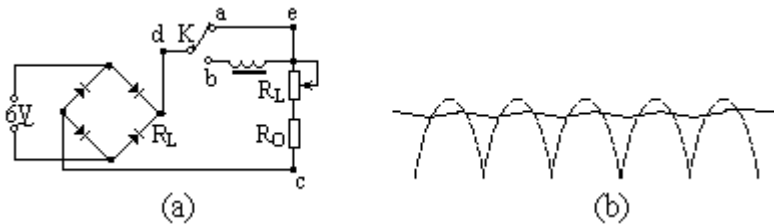
器材 示波器，晶体二极管，电感线圈（可用电源变压器的初级线圈），滑动变阻器(2K)，电阻(100)，低压交流电源，单刀双位开关，导线等。

操作

(1)如图(a)连接电路。将 K 合向 a ， R_L 的阻值调成最大。

(2)将示波器的“地”端与 c 点连接，“Y 输入”端与 d 点连接。调节示波器的有关旋钮后可在荧光屏上看到连续的脉冲直流电[如图(b)中虚线所示]。

(3)将“Y 输入”端改接 e 点， K 接 a ，荧光屏上仍然是连续脉冲直流电波形。然后将 K 接到 b ，由于脉动直流电压的一部分交流分量降落在电感 L 上，所以波形明显平滑起来[如图(b)中实线所示]。



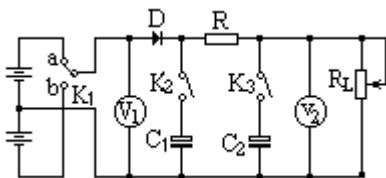
(4)逐步减小 R_L 的阻值，增大输出电流。可看到荧光屏上波形的波动程度也逐渐增大，但和方法一、二相比，它的变化比电容滤波要小。说明电感滤波的“外特性平直情况”比电容滤波要好一些。

方法四

器材 电池组，演示电表，晶体二极管，电解电容器 $2000\mu\text{F}$ 、 10V 各 1 个，电阻(51、 $1/8\text{W}$)，滑动变阻器(2000)，单刀开关，单刀双位开关，导线等。

操作

(1)如图连接电路。两只电表都用作中心指零的直流伏特表。将单刀双位开关 K_1 轮流接通 a 、 b 点，可以在 V_1 两端得到低频交流电。



(2)将 R_L 调成阻值最大，打开 K_2 、 K_3 将 K_1 轮流接通 a 、 b 两点，可看到 V_1 的指针以零点为中心左右等幅摆动，如方法一图(b)甲；而 V_2 的指针由零点开始向一边摆动，如方法一图(b)乙。说明 V_1 两端的是交流电压，而经过晶体二极管 D 整流后， V_2 两端的是间断的脉冲直流电压。

(3)合上 K_2 ，将 K_1 轮流接通 a、b 两点，可看到 V_2 的指针始终偏在一边摆动，但摆幅比操作(2)明显减小，如方法一图(b)丙。说明由于 C_1 的接入，滤掉了一部分交流成份，使输出电压比较平稳了。

(4)再合上 K_3 ，将 K_1 轮流接通 a、b 两点，可看到 V_2 的指针偏在一边几乎不动。说明经过 RC 形滤波后的电压变得相当平稳了。

(5)逐渐减小 R_L 的阻值，将 K_1 轮流接通 a、b 两点，可看到随着 R_L 阻值的减小， V_2 指针的摆幅略有增大。说明 RC 形滤波的“外特性平直情况”比电容、电感滤波都要好。

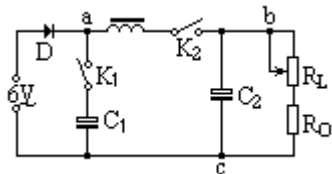
(6)将 R_L 调成 500 左右，依次打开 K_3 、 K_2 。可看到单接入 C_1 时， V_2 指针摆幅略有增大，而单接入 C_2 时， V_2 指针摆幅明显增大。说明在 RC 形滤波中，输入电容 C_1 的作用比输出电容 C_2 的作用大。如果手头有两个容量不同的电容器。应该将容量较大的一个作为 C_1 。

方法五

器材 示波器，晶体二极管，电感线圈（可用电源变压器的初级线圈），滑动变阻器(2K)，电阻(100)，低压交流电源，电键，电解电容器(200 μ F、10V)，导线等。

操作

(1)如图连接电路，将 R_L 的阻值调成最大。



(2)将示波器的“地”端与 c 点连接，“Y 输入”端与 a 点连接。适当地调节示波器的有关旋钮，可在荧光屏上看到间断的脉冲直流电波形，如方法二图(b)中的虚线。

(3)合上 K_1 ，可看到荧光屏上的波形变得平滑起来，如方法二图(b)中的实线 1。

(4)将示波器的“Y 输入”改拉 b 点，再合上 K_2 。可在荧光屏上看到几乎完全平直的图象。说明经过 LC 形滤波，负载 R_L 上得到的几乎是稳恒电压。

(5)逐渐调小 R_L 的阻值，增大输出电流。荧光屏上图象的波动程度虽略有增大，但并不明显。说明 LC 形滤的“外特性平直情况”是比较好的。

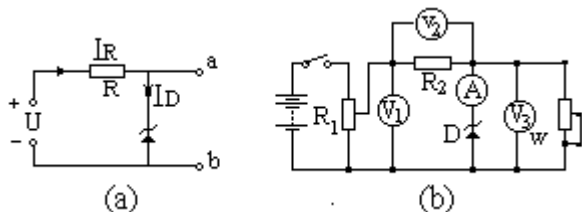
稳压二极管 321

原理 半导体二极管具有单向导电性，它的反向电阻很大。但是当加在二极管上的反向电压增加到某一数值时，二极管被击穿，这个电压叫做二极管的击穿电压。二极管被击穿后，电流迅速增大，而加在它两端的电压却基本维持击穿电压不变。二极管反向击穿后，只要电流不超过某一值，它并不损坏。当外加电压低于击穿电压时，二极管又能恢复到原来的状态。利用二极管的这种反向击穿特性。可制成稳压电源。在图(a)所示的电路中，稳压管已经处于反向击穿状态。如果电源电压升高，流经二极管的电流 I_D 也增大，流过电阻 R 的电流 I_R 也增大，降在 R 上的电压升高，从而使输出端的电压 U_{ab} 基本不变。

器材 稳压管(2CW)，直流低压电源，滑动变阻器(1000 Ω)，电阻器(10K Ω)，演示电表，电阻(510 Ω)，电键，导线等。

操作

(1)如图连接电路。其中三只伏特表，一只安培表都是用的演示电表。将滑动变阻器 R_1 的滑动触点放在最下端后合上电键 K 。



(2)将 R_1 的滑动触头逐步向上移，可看到三个伏特表 V_1 、 V_2 、 V_3 的读数都逐渐增大，而安培表 A 的读数基本为零。此时二极管 D 处于反向截止状态。

(3)当伏特表 V_1 的读数增大到某一值时，可看到安培表 A 的读数也开始迅速增大。此时二极管开始被反向击穿。继续增大电压，可看到 V_1 的读数继续增大， V_2 的读数也增大， A 的读数明显增大，而 V_3 的读数基本不变。说明电源电压变化时，电路能起稳压作用。

(4)改变负载电位器 W 的阻值，可看到 A 表的读数有变化，而 V_1 、 V_2 、 V_3 的读数基本不变。说明在负载变化时，电路也能起稳压作用。

注意 实验过程中，通过稳压二极管的反向电流不能超过它允许的最大值。

322 晶体三极管的电流分配和放大作用

晶体三极管的出现，给电子技术的发展开辟了一条新的道路。目前晶体三极管的种类繁多，但它们的基本结构和作用原理却是一致的。为了了解和掌握晶体三极管的工作原理，放大作用。本实验以一种类型晶体三极管为主，介绍它的电流分配原则及放大作用。

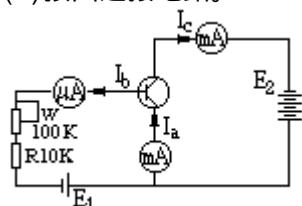
方法一

目的 观察晶体三极管的电流分配。

器材 晶体三极管(PNP, 3AX 型)，电位器，电阻，直流电源，电键，毫安表，微安表，导线等。

操作

(1)按图连接电路。



(2)多次改变W的阻值，把每次的 I_b 、 I_c 和 I_e 的值都记录下来。可看出发射极电流总是等于基极电流和集电极电流之和即 $I_e=I_b+I_c$ ，而且基极电流远小于集电极电流 $I_b \ll I_c$ 。

(3)计算各次基极电流的变化值 $I_{b1}=I_{b2}-I_{b1}$ ， $I_{b2}=I_{b3}-I_{b2}$ ，……；再计算各次集电极电流的变化值 $I_{c1}=I_{c2}-I_{c1}$ ， $I_{c2}=I_{c3}-I_{c2}$ ……。可看出每次的 I_c 都比 I_b 大得多，说明晶体三极管有放大作用。

注意

(1)本实验选用的晶体三极管的放大倍数应尽量小一些，使 I_c 和 I_b 不要差得太大。因为当 $I_c \gg I_b$ 时，受到电流表精度的限制，不易看出 $I_e=I_b+I_c$ 的关系。如果没有放大倍数小于15的管子，可将三极管的发射极和集电极调换使用，就成为放大倍数很小的管子。

(2)电源电压和W阻值的大小要适当，以使晶体三极管工作在放大区。

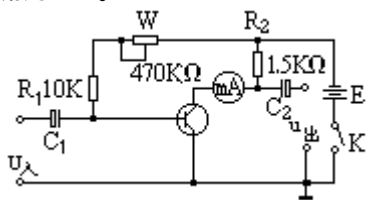
方法二

目的 用示波器显示晶体三极管的放大作用。

器材 晶体三极管(3AX 型)，电位器(470k)，电阻(1K 和 1.5K 各1个)，电容器(10 μ F)2个，毫安表，音频信号发生器，示波器，电子开关，低压直流电源，电键，导线等。

操作

(1)如图连接电路。合上电键K，调节电位器W，使毫安表的读数即集电极静态电流为1mA。



(2)将音频信号源的输出端接到电路的输出端和电子开关的A输入端。放大电

路的另一输出端接到电子开关的 B 输入端。电子开关的输出端接到示波器的“Y 输入”端。最后将信号源、放大电路、电子开关、示波器的接地端全部连接起来。

(3)适当地调整信号源的输出幅度，调节电子开关和示波器的有关旋钮，可在示波器荧光屏上看到两个清晰而且不失真的正弦波。其中通过电子开关 B 输入端送入示波器的信号，比通过 A 输入端送入示波器的信号幅度要大得多。即可说明晶体三极管的放大作用。

说明

(1)如果经三极管放大后的信号有失真现象，可适当地减小输入信号的幅度或适当地增大晶体管的静态工作电流。

(2)如实验室中有双踪示波器，可不用电子开关，而直接将放大电路的输出端接入双踪示波器的“A 输入”和“B 输入”端。

(3)如果实验室中既无电子开关，也无双踪示波器，可分两次观察放大电路的输出波形幅度，但两次观察之间不能调节示波器和信号源。

323 晶体三极管的输入特性曲线

晶体三极管的特性曲线可直观而形象地描述它的工作特性，用以研究放大电路十分方便。表示三极管输入电压 U_{BE} 和输入电流 I_B 关系的叫输入特性曲线，表示输出电压 U_{CE} 和输出电流 I_C 关系的叫输出特性曲线。本实验研究最常见的共发射极电路输入特性曲线。

方法一

目的 用伏特表和安培表描绘晶体三极管的输入特性曲线。

器材 晶体三极管(PNP, 3AX型)，微安表，伏特表，毫伏表，电位器(100K和10K各一只)，电阻(10K)，直流电源(3V、6V各一个)，导线等。

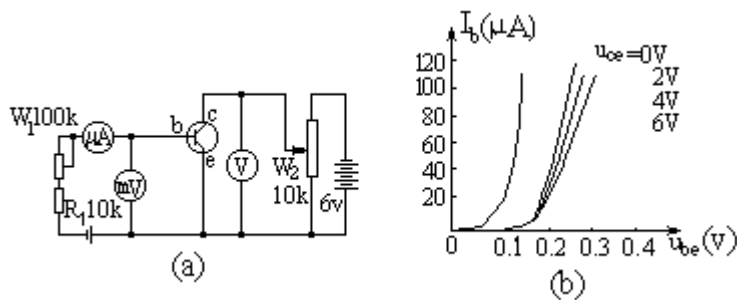
操作

(1)按图(a)连接电路。将 W_2 的滑动触头移到最下端，使 $U_{CE}=0$ 。

(2)调节 W_1 ，改变输入回路中基极和发射极间的电压 U_{be} ，则基极电流 I_b 将跟着变化，记下7—9组(U_{be} ， I_b)的值。

(3)取 U_{be} 为横轴， I_b 为纵轴；画出 $U_{CE}=0$ 时三极管的输入特性曲线。

(4)调节 W_2 使 U_{CE} 分别为 2V、4V、6V，每次都重复操作(2)、(3)过程，即可获得不同 U_{CE} 下晶体三极管的输入特性曲线。如图(b)所示。



说明

(1)当 $U_{CE}=0$ (即集电极和发射极短接时) 晶体管的集电结和发射结并联，晶体三极管的输入特性就是两个并联的PN结的正向特性。

(2)当取 $U_{CE}=1V、2V、4V、6V$ 时，几条曲线差别不大，这表明输入特性受 U_{CB} 的影响较小，所以输入特性通常只给出典型的一条。

(3)典型的输入特性曲线清楚表明，当输入电压 U_{be} 小于某一临界值时，基极电流 I_b 为零。这个临界值称为 U_{be} 的阈值。对于锗管此值约为 0.1V 左右，硅管约为 0.5V 左右。

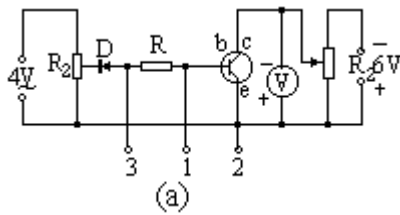
方法二

目的 用示波器观察晶体三极管的输入特性曲线。

器材 示波器，晶体三极管(3AX型)，电位器(4.7K)，电阻(1K)，低压交流电源(4V)，低压直流电源(6V)，整流二极管，滑动变阻器(1K)2个，直流电压表，导线等。

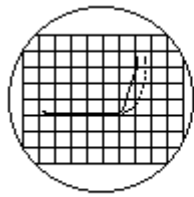
操作

(1)如图(a)连接电路。图中 R 为取样电阻， U_{12} 是三极管的 U_{be} ， U_{13} 可表示三极管 I_b 的大小。

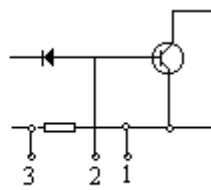


(2) 调节 R_1 ，使滑动触头和下端之间的电压约为 2V。将 R_2 的滑动触头拉到最下端，使 $U_{ce}=0$ 。将 1、2、3 三个端点分别与示波器的“地”、“X 输入”、“Y 输入”连接。

(3) 适当地调节示波器的有关旋钮，即可在荧光屏上显示出 $U_{ce}=0$ 时的三极管的输入特性曲线，如图(b)中实线。如果图线不够理想，可适当地调节 R_1 。如果曲线反向，只要调整取样电阻和取样点的位置（如图 c）即可。



(b)



(c)

(4) 调整 R_2 ，使 $U_{ce}=2V$ 。可看到荧光屏上曲线的竖直部分向右移动一段距离，如图(b)中虚线。再将 U_{ce} 调成 4V、6V，可看到曲线无明显变化。说明三极管的输入特性曲线受 U_{ce} 的影响不大。

方法三

器材 JT-1 晶体管特性图示仪，晶体三极管(PNP, 3AX 型)等。

操作

(1) 接通仪器的电源开关，稍等片刻，旋动“辉度”旋钮，使荧光屏上光点亮度适中。然后旋动“聚焦”旋钮使亮点聚得最小。把 Y 轴、X 轴作用板上的“放大器校正”扳向零，分别旋动 Y 轴位移，X 轴位移，将亮点移到荧光屏坐标的零点。

(2) 集电极扫描信号板上的峰值电压范围选 0—10V，极性为“-” (PNP)，基极阶梯信号板上的极性为“-” (PNP)，阶梯选择毫安/级，级/秒为 200，阶梯作用为重复。

(3) 取一个小功率 PNP 晶体管，将它的三个极插入晶体管插座对应的 e, b, c 插孔内。然后将测试选择开关调到晶体管所插的插座 (A 或 B)，进行测试。

(4) 将仪器 Y 轴作用开关置于“基极电流或基极源电压”，X 轴作用开关置于“基极电压”。在荧光屏上即显示出输入特性曲线。

晶体三极管的输出特性曲线 324

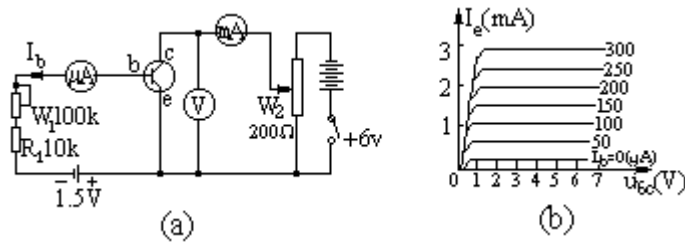
方法一

目的 用伏特表和安培表描绘晶体三极管的输出特性曲线。

器材 晶体三极管(3AX型),毫安表,微安表,伏特表,电位器(100K 和 10K 各一个),直流电源(1.5V和6V各一个),滑动变阻器(200 和 100K 各一个),电阻(10K),导线等。

操作

- (1)如图连接电路。调节 W_1 , 使基极电流 $I_b=50\mu A$ 。
- (2)调节 W_2 , 改变 U_{ce} 读出对应的集电极电流 I_c , 共读得7—9组(U_{ce}, I_c)值。
- (3)以横轴代表 U_{ce} , 纵轴代表 I_c , 作出一根 I_c-U_{ce} 图线。
- (4)依次使 I_b 为 $100\mu A$ 、 $150\mu A$ 、 $200\mu A$ 、 $250\mu A$ 、 $300\mu A$, 重复操作(2)、(3), 即可得到一族晶体三极管的输出特性曲线(图 b)。



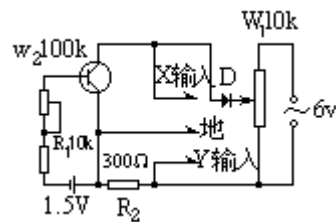
方法二

目的 用示波器观察晶体三极管的输出特性曲线。

器材 示波器,晶体三极管(3AX型),电位器(100K, 10K 各一只),电阻(300, 10K 各一只),直流电源(1.5V),交流电源(6V),整流二极管,导线等。

操作

- (1)按图连接电路。 R_2 为用于测量集电极电流 I_c 的取样电阻,直流电源、电阻 R_1 和电位器 W_2 等组成偏置电路,用于改变 I_{b0} 。 I_c 在 R_2 上的电压降 $U_R=I_c R_2$ 从示波器 Y 端输入,集电极电压 U_{ce} 从 X 端输入。



- (2)调整 W_2 , 使 I_b 为某一个数值后保持不动;调整 W_1 , 使 U_{ce} 逐渐增加, 荧光屏上便显示出 $U_{ce}-I_c$ 曲线, 即三极管的输出特性曲线。

- (3)再重新调整 W_2 , 使 I_b 增加, 则曲线逐渐升高。用上述电路, 每次只能看到一条特性曲线。如果要看到特性曲线族, 在基极电路上应加上阶梯电压。

方法三

目的 用晶体管图示仪观察晶体三极管输出特性曲线。

器材 JT-1 晶体管特性图示仪, 晶体三极管(3AX型)等。

操作

- (1)接通 JT-1 晶体管特性图示仪的电源开关;稍等片刻, 旋动“辉度”旋钮, 使荧光屏上光点亮度适中。然后旋动“聚焦”旋钮, 使亮点聚得最小。把 Y 轴作用、X 轴作用板上的“放大器校正”扳向“零”, 分别旋动 Y 轴位移、X 轴位移, 将亮

点移到荧光屏坐标的零点。然后进行阶梯调零。

(2)集电极扫描信号板上的峰值电压范围选 0-10V 极性为“-”(PNP 管)基极阶梯信号板上的极性为“-”(PNP 管),阶梯选择毫安/级,级/秒为 200,阶梯作用为重复。

(3)测试台上的接地选择开关调到“发射极接地”,测试选择调到“关”。

(4)取一个 PNP 小功率晶体管,将它的三个极插入晶体管对应的 e、b、c 插孔内,然后将测试选择拨向对应的位置(A 或 B)。

(5)将仪器 Y 轴作用开关置于“集电极电流”(1 毫安/度),X 轴作用开关置于“集电极电压”(0.5 伏/度)功耗电阻 1 千欧,阶梯选择为 0.02 毫安/度左右,调节集电极扫描信号,加上一定的集电极电压 U_c ,在荧光屏上就显示出晶体管输出特性曲线族。

注意 V_c 不可长时间超过三极管的额定值,否则将会烧毁被测三极管。

晶体三极管放大器 325

晶体三极管放大器必须有适当的静态工作点，才能对输入信号进行不失真的放大。单管放大器的电压放大倍数和直流负载电阻的阻值以及耦合电容器的容量大小有关。单管放大器的输出电压和输入电压的相位是相反的。在实验中应该注意体现晶体管放大器的这三个特点。

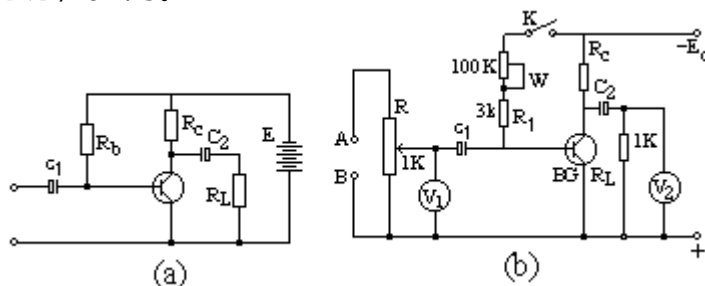
方法一

原理 晶体三极管单管低频放大器最简单的电路如图(a)所示。 R_b 为偏置电阻， R_c 为集电极直流负载电阻， C_1 、 C_2 分别为输入和输出端耦合电容。

放大器在没有信号输入时的工作状态叫做静态。静态时的基极电流 I_b 、集电极电流 I_c 和集电极与发射极的管压降 U_{ce} 叫做静态工作点。当电源 E_c 和集电极直流负载电阻 R_c 确定后，放大器的静态工作点是由电流 I_b 来决定的。 I_b 叫做偏流。获得偏流的电路叫做偏置电路，在图(a)的放大器中，偏置电路是由电源 E_c ，电阻 R_b 和晶体管的发射结等组成的，其中的 R_b 叫偏置电阻。只有通过调整偏流电阻，给放大器确定以合适的静态工作点后，放大器才能对输入电压进行不失真的放大。

目的 用演示电表显示晶体三极管单管放大器的特点。

器材 演示电表，晶体三极管 BG (3AX 型 < 30)，电位器(47K)，电阻(3K、1K、300、100 各一个 1/8W)，滑动变阻器(1K、100K 各一个)，电解电容器(200 μ F 和 100 μ F 各二个)，教学信号源(J2464 型)，低压直流电源，电键，导线等。



操作

(1)按图(b)所示接好电路。电表的指针都调成中心零位式的，均采用直流“0-10V”档，并配用“G”的刻度盘，这样它们的量程为-5-0-5V。集电极直流负载电阻 R_c 先用 300。耦合电容 C_1 、 C_2 先用 200 μ F，教学信号源输出的超低频信号由 A、B 端输入。

(2)断开开关 K，缓慢移动变阻器 R 的滑动触头，增大输入的超低频信号电压，并适当调节教学信号源的“超低频调零”旋钮，则测量输入电压的电压表 V_1 的指针就以零点为中心左右对称地摆动起来，表明输入的电压是逐渐的交变电压。

(3)观察测量输出电压的电压表 V_2 的指针。当输入电压较小时不摆动；当输入电压足够大时，才从零开始向一侧摆动，摆动的幅度也不比 V_1 大。这说明了放大器发生了严重的失真现象，没有正常工作。

(4)闭合开关 K，接通偏置电路。重新移动变阻器 R 的滑动触头逐渐增大输入电压并配合调整教学信号源的“超低频调零”，使伏特表 V_1 的指针以零点为中心左右地摆动起来，最大值为 0.15V。再适当调整电位器 W 的阻值，当转到某一位置时，电压表 V_2 的指针也是以零点为中心左右对称地摆动，其幅度约 2V。这表明给予适当的偏流后，放大器已正常工作。

(5)仔细观察两个伏特计，可看到 V_2 指针摆动的方向总是跟 V_1 相反，说明被放大后的输出信号与输入信号的相位是相反的。

(6)增大 W 的阻值以减小偏流 I_b ，可看到 V_2 指针左右摆动的幅度由相等变为不等。这是由于 I_b 太小，放大器发生了“截止”失真。逐渐调小 W 的阻值，使放大器正常工作。再继续减小 W 的阻值，可看到 V_2 指针左右摆动的幅度又变得不相等了。这是由于 I_b 太大，放大器发生了“饱和”失真。

(7)重新使放大器正常工作。调节 R ，逐步增大输入信号，可看到 V_1 指针的摆幅逐渐增大。而 V_2 指针的摆幅一开始也跟着变大，但以后就恒定不变了，只是摆到两边端点时稍停一下再往回摆。这是由于输入信号太强了，尽管放大器工作点合适，也发生了上“饱和”和下“截止”失真。

(8)将 V_1 的指针重新调成最大值为 $0.15V$ 。将直流负载电阻 R_C 由 $300\ \Omega$ 换成 $100\ \Omega$ ，可看到 V_2 指针的摆幅立即减小很多。说明当负载 R_L 一定时，直流负载电阻变小，放大器的电压放大倍数随之减小。

(9)将 R_C 仍然换成 $300\ \Omega$ ，先单将 C_1 换成 $100\ \mu F$ ，然后将单将 C_2 换成 $100\ \mu F$ ，最后将 C_1 、 C_2 都换成 $100\ \mu F$ 。可看到 V_2 指针的摆幅都要减小，而最后一次变得最小。说明在输入信号的频率一定时，耦合电容 C_1 、 C_2 的容量越小，放大器的电压放大倍数越小。

注意 晶体三极管的电流放大倍数以 $15\sim 30$ 倍为宜。

方法二

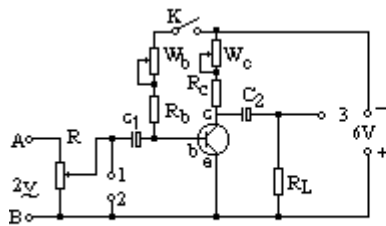
目的 用示波器研究晶体三极管放大电路的特点。

原理 同方法一。

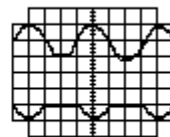
器材 示波器，电子开关，晶体三极管（3AX型），电位器（ $220K$ 和 $1.5K$ 各一个），滑动变阻器（ $200\ \Omega$ ），电阻（ $4.7K$ 、 $20K$ 和 $1.5K$ 各1个， $1/8W$ ），电解电容（ $100\ \mu F$ 、 $4.7\ \mu F$ 各2个， $10V$ ），低压直流电源（ $6V$ ），低压交流电源（ $2V$ ），电键，导线等。

操作

(1)如图(a)连接电路。耦合电容 C_1 、 C_2 选用 $100\ \mu F$ 。 R 是 $200\ \Omega$ 滑动变阻器，作调节输入电压用。 W_b 用 $220K$ 电位器，可调节三极管的偏流。 W_c 用 $1.5K$ 电位器， R_b 、 R_c 和 R_L 分别用 $20K$ 、 $1.5K$ 和 $4.7K$ 电阻。



(a)



(b)

(2)将 W_c 的阻值调成最大。断开 K （暂不接通偏置电路）。电路中的 1、3、2 三个点分别与电子开关的“ A 输入”、“ B 输入”和“地”连接。电子开关的“输出”和“地”分别与示波器的“ Y 输入”、“地”连接。适当地调节电子开关和示波器的有关旋钮，示波器的荧光屏上就会出现如图(b)所示的波形（上方是输入信号，下方是输出信号）。可看出三极管放大器在没有偏置电路时，输出信号严重失真。

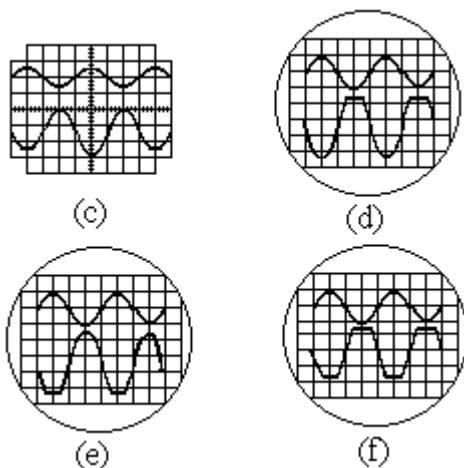
(3)合上 K ，调节 W_b ，直至荧光屏上出现如图(c)所示的波形。说明三极管有适

当的偏置电流时，能正常的工作。放大后的信号与输入信号反相。

(4)在三极管正常工作时调大 W_b 的阻值，减小偏流，荧光屏上出现如图(d)所示的波形，放大器发生截止失真。减小 W_b 的阻值，增大偏流，荧光屏上出现如图(e)所示的波形，放大器发生饱和失真。说明三极管必须有适当大小的偏置电流，才能很好地工作。

(5)在三极管正常工作时，调节 R，逐渐增大输入信号，可看到如图(f)所示的波形。说明输入信号太大时，也会引起放大器失真。

(6)在三极管正常工作时，减小直流负载 W_c 的阻值，或者将 C_1 、 C_2 换 $4.7 \mu F$ 的电解电容，都可看到输出信号的幅度减小。说明放大器的电压放大倍数随三极管的直流负载、耦合电容的减小而减小。



说明

(1)因为放大器的输入和输出信号是通过电子开关再送进示波器的，而电子开关的“ A 增幅 ”、“ B 增幅 ” 旋钮可改变所送信号的幅度，所以本方法不能定量估测放大器的放大倍数。如需定量估测放大倍数，不能用电子开关，只能用示波器分别测试输入和输出信号。

(2)如果实验室中有双踪示波器，可省去电子开关，直接将输入和输出信号送到示波器的“ Y 输入 A ”和“ Y 输入 B ”。

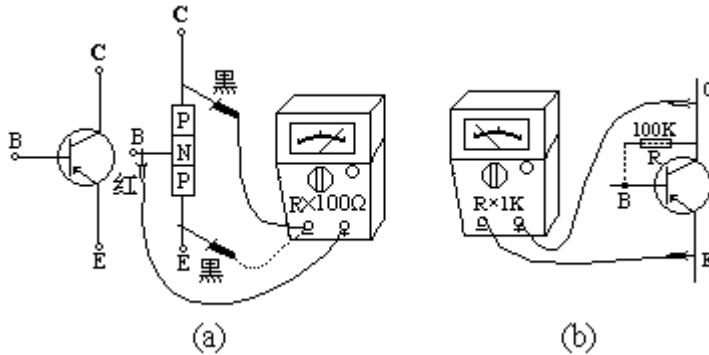
判别晶体三极管管脚并估测 值 326

器材 万用表，三极管，电阻(100K 和 150K 各 1 个)，干电池，导线等。

操作

(1)晶体三极管是由两个 PN 结构成的，每个 PN 结的正向电阻都较小，反向电阻都较大。如果测试的是 PNP 型三极管，用红表棒（接表内电池负极）接基极 B，黑表棒（接表内电池正极）接发射极 E 或集电极 C，都会呈现较小的正向电阻约几百欧）。用此方法可找出晶体三极管的 B 极。如果是 NPN 型三极管，则应该用黑表棒找 B 极。

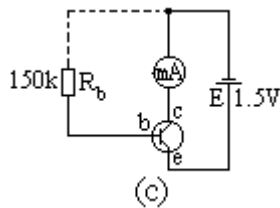
(2)将黑、红表棒分别与三极管尚未判定的两个脚连接（其中一个为 E 极，另一个为 C 极），欧姆表上读出基极电流为零时正极和 C 极之间的电阻，一般很大(图 b)。然后在基极和与红表棒连接的极之间加接一个 100K 的电阻，可看到由于有了基极电流，CE 之间的电阻立即变小了。电阻变小得越明显，说明管子的电流放大倍数 越大。将 E、C 两脚交换测试，哪一次 较大，这一次和黑表棒连接的脚就是 E 极，和红表棒连接的是 C 极（指 PNP 型，如果是 NPN 型则相反）。



(3)将万用表作直毫安表用，将三极管和 E=1.5V 的干电池照图(c)连接好。在未接 R_b 时，毫安表读数为 I_1 ，接上 R_b 后，毫安表读数为 I_2 。电流放大倍数

$$= I_c / I_b。$$

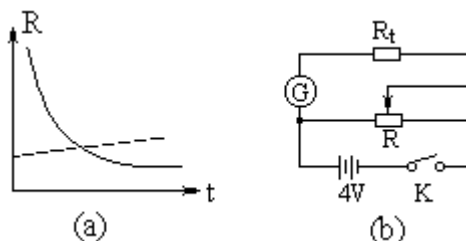
式中 $I_c = I_2 - I_1$ ， $I_b = E/R_b$ (忽略了 EB 结的正向电阻) 即可估算出晶体三极管的 值。



注意 用万用表的欧姆档测试晶体三极管时，不可以用 $\times 1$ 档和 $\times 10$ 档，以免电流太大而损坏管子。

半导体的热敏特性 327

当温度升高时，半导体的电阻值迅速减小，这叫做半导体的热敏特性。一般金属的电阻随温度的升高而缓慢地增大。图(a)中的实线和虚线分别表示半导体和金属的电阻随温度变化的规律。



方法一

器材 热敏电阻(MF11型)，演示电表，滑动变阻器(200 Ω)，低压直流电源，导线等。

操作

(1)如图(b)连接电路， R_t 为热敏电阻。

(2)将滑动变阻器的触头放在最左端，合上电键K。慢慢地将滑动变阻器的触头向右滑动，增大加在 R_t 上的电压，直至电流计的指针偏转 $1/3$ 为止。

(3)用热毛巾给热敏电阻加热，或将它放在酒精灯火焰上一晃而过，可看到电流表的示数明显增大。使温度复原后，电流表指针也回到原来的地方。

(4)用浸过冰水的冷毛巾使热敏电阻降温，可看到电流表的示数明显减小。将冷毛巾拿开，电流表指针又迅速地回到原来的地方。

说明

(1)热敏电阻是用对温度极为敏感的半导体材料制成的。一般分成负温度系数与正温度系数两类。本实验采用MF11型负温度系数热敏电阻。

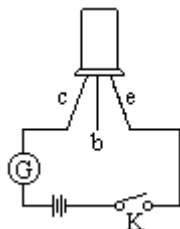
(2)操作(3)、(4)对 R_t 的加热和冷却，可根据 R_t 并结合环境温度而适当选定，以便观察到最佳的热敏效果。

方法二

器材 半导体锗低频小功率三级管(3AX21—24)，演示电表，低压直流电源，电键，导线等。

操作

(1)如图连接电路，利用三极管的发射结反向电阻进行实验。电表用G档，直流电源为2—3V。



(2)合上电键，电表指针发生偏转，示数一般不超过 $10\mu\text{A}$ 。用热毛巾给三极管加热，使三极管发射结的反向电阻迅速减小，可看到电表的示数明显增大。取走热毛巾后，表针逐渐回到原位。

注意

(1)要挑选发射结反向电阻比较大的三极管。可用万用表的红表棒接e极，黑

表棒接 c 极测量，要求电阻值大于 100K 。

(2) 为了便于导热，应选用金属外壳的三极管。

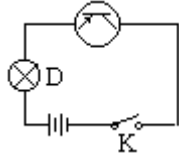
(3) 如果实验中发现灵敏度不够高，可将电源的正、负极交换一下，利用集电结的反向电阻来进行实验。

方法三

器材 锗低频大功率三极管(3AD6)，小灯泡(2.5V、200mA)，低压直流电源，电键，导线等。

操作

(1) 如图连接电路，直流电源用 4V。



(2) 合上电键 K，由于三极管集电结反向电阻很大，因此小灯泡 D 不亮。

(3) 用热毛巾给三极管加温，使三极管集电结反向电阻减小。可看到小灯泡逐渐由暗变亮。

(4) 移去热毛巾，可看到小灯泡逐渐变暗直至熄灭。

注意 由于小灯泡额定电流较大，因此必须用大功率三极管演示。

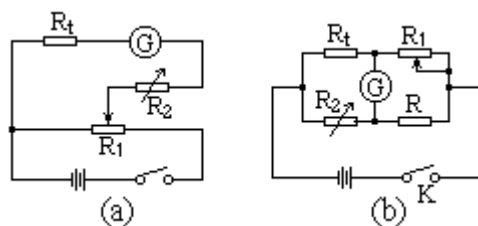
方法一

目的 利用半导体的热敏特性制作测温装置。

器材 热敏电阻 R_t (MF11、1—2.2K)，演示电表，滑动变阻器(1000)，电阻箱，电池组(4V)，电键，导线，酒精灯，温度计，铁架台等。

操作

(1)如图(a)连接电路。 R_t 为热敏电阻， R_2 为电阻箱。将热敏电阻放在薄紫铜皮卷成的圆筒内，两根引脚套上塑料套管后引出，筒的两头用环氧树脂密封，制成测温头。



(2)演示电表用 G 档，调节调零旋钮，使指针指在标度盘左方的边线。在标度盘上覆盖一层白纸。将滑动变阻器 R_1 的滑动触头置于最左端，然后合上电键 K。将测温头放在冰水混合物中，将电阻箱调成较小阻值，慢慢地将 R_1 的触头向右移，直至电表指针偏转满刻度的 $1/5$ 。在白纸上记下指针位置(作为 0)，并记下 R_2 的阻值。以后 R_1 的触头位置不能再移动。

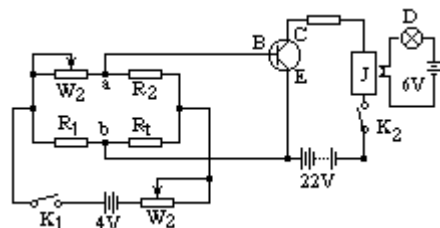
(3)将温度计和测温头都浸没在烧杯中的水里，用酒精灯给烧杯加热。当温度计的读数升到 5 时，在白纸上记下电表指针的位置，作为 5 ，依次类推，在白纸上分别作出 10 、 15 ……的位置。如果到某一个温度 t 时指针已满偏，必须调节 R_2 ，使电表指针回到 0 处，方可继续升温。记下此时电阻箱的阻值，作为高温段阻值，相应地先前一个电阻箱阻值就是低温段阻值。应用此装置测温时，可根据具体测量对象确定用高温段还是低温段。

说明 为了提高测温的灵敏度和准确度，可将测温器改成如图(b)所示的电路。滑动变阻器 R_1 和电阻箱 R_2 的作用与前面叙述的相同。

方法二

目的 利用半导体的热敏特性制作温控器。

器材 晶体三极管(3AX型 $\beta > 100$)，热敏电阻。(MF11型、2.2—4.7K)，灵敏继电器(JRX—11型、直流电阻 960 ，额定电压 18V，吸合电流 9mA)，电位器(5.1K)2个，电位器(510)，1/8W电阻(1K ，2K 各1个)，伏特表(1V量程)、电池组，电键，灯泡，导线等。



操作

(1)如图连接由 热敏电阻 R_t 和电阻 R_1 (1K)、 R_2 (2K)、电位器 W_1 (510

)构成一个惠斯通电桥,从电桥的对象 a、b 引出两根线,与三极管的 B、E 极相连。当 $U_a > U_b$ 时,三极管截止,反之则导通。三极管的集电极负载是灵敏继电器 J。

(2) 将 R_t 放在紫铜皮卷成的筒内,制成测温头[见方法一操作(1)]。

(3) 断开三极管 B、E 极与 a、b 点之间的连线,在 a、b 两间接上伏特表。将热敏电阻 R_t 放在需要控制的温度环境中,然后调节 W_2 和 W_1 ,使 U_b 比 U_a 高 0.25V 左右。如果 R_t 周围的温度升高,可看到 a、b 两点间的电压明显降低,甚至 U_a 高于 U_b 。

(4) 接好电路,合上 K_2 。当 R_t 处在所需控制的温度中时,三极管导通,J 将工作电路接通。当工作电路中的灯泡 D 使 R_t 的温度升高时,三极管截止,J 使工作电路断开。这样就可看到灯泡交替亮暗的现象。说明半导体温控器的基本原理。

方法三

目的 利用半导体的热敏特性制作报警器。

器材 热敏电阻(MF11、4.7K),低频三极管 5 个($\beta > 80$),二极管,10V 电解电容(0.047 μ F、0.01 μ F、5 μ F、100 μ F 各 1 个),1/8W 电阻(5.1K 2 个,1K 2 个,10K、15K、850、250 各 1 个),电位器(2.2K)2 个,扬声器(8、1/4W)等。

原理 电路图如图(a)所示。

(1) 差分电路

由 BG_1 、 BG_2 、 W_1 、 R_t 、 R_4 (1K)、 R_5 (15K)组成桥式测量电路。通常状态下,调节 W_2 使 $U_A = U_B$,当 R_t 温度升高,阻值下降时, U_A 升高, U_B 降低, U_D 降低。

(2) 开关电路

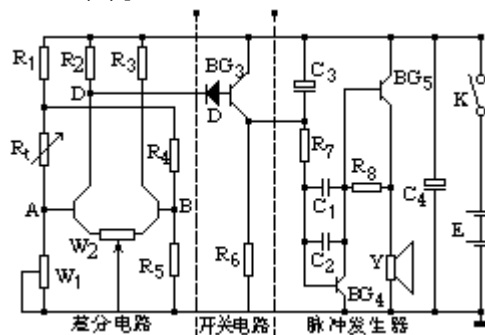
由 BG_3 、 R_6 (10K)组成。当 U_D 点电位比电源正极电位低 1.4V 左右, BG_3 导通,随着温度不断升高,D 点电位越来越低,使 BG_3 很快进入饱和状态,其饱和电流约 1mA。

(3) 音频脉冲发生器

由 BG_4 、 BG_5 等组成。当 BG_3 导通后,有部分电流由弱到强注入 BG_4 的基极,脉冲发生器开始工作,扬声器发出由弱到强,音调由低到高的声音;当 BG_3 饱和后,扬声器发出稳定的单音调报警声。

操作

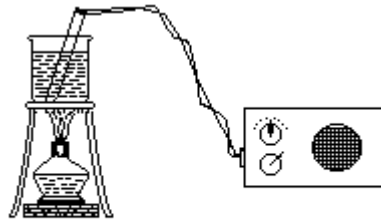
(1) 按图(a)连接电路。 BG_1 、 BG_2 选用性能相近的配对管。电位器 W_1 可安装在面板上,便于调节报警的温度。热敏电阻 R_t 装在薄壁金属圆筒内,作为测温头[见方法一操作(1)]。



(2) 元件组装完毕后,将 W_2 调到中间位置, W_1 调到阻值最小的位置,用万用电表 $R \times 100$ 档测整机阻值。热敏电阻 R_t 未插入前为 2000—1800 左右,插入后为 1500—1300 左右。若阻值偏离过大,应重新核对电路,检查元件。

(3)接通 6V 直流电源，整机静态电流约为 4.5mA。如果将 C_3 人为短路，扬声器应发出报警声。报警时的工作电流应该为 50mA 左右。调节 R_7 阻值，可改变音量大小，同时也可改变音调。

(4)将热敏电阻、即测温头放入沸水里(图 b)，稍待片刻，待头内热敏电阻与外界达到热平衡后，将 W_1 的阻值逐渐增大，调到扬声器刚好发声为止，在面板上刻 100 标记。将 W_1 退回到最小阻值，让沸水冷却到 80 时，再把 W_1 阻值增大到扬声器发声，再在面板上刻 80 标记。依次类推，在面板上分别标出 60 、 40 等。



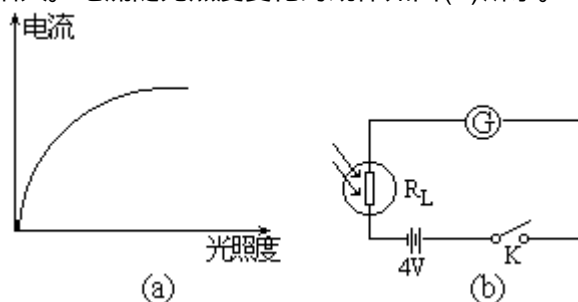
(b)

若再把测温头放入沸水里， W_1 调到最大值，扬声器仍不发声，可将 W_2 的滑片向 BG_1 的发射极一边偏一些，然后按操作(4)调整。

说明 本电路测温比较准确，耗电省，如把探测棒插入水壶嘴里，可作家用开水报警器等。

329 半导体的光敏特性

当被光照射时，半导体的电阻值迅速减小，这叫做半导体的光敏特性。将光敏半导体串联在有电源的电路中，有光照射半导体时，电路中的电流随光照度的增大而增大。电流随光照度变化的规律如图(a)所示。



方法一

器材 光敏电阻(RL型)，演示电表，低压直流电源，光源，电键，导线等。

操作

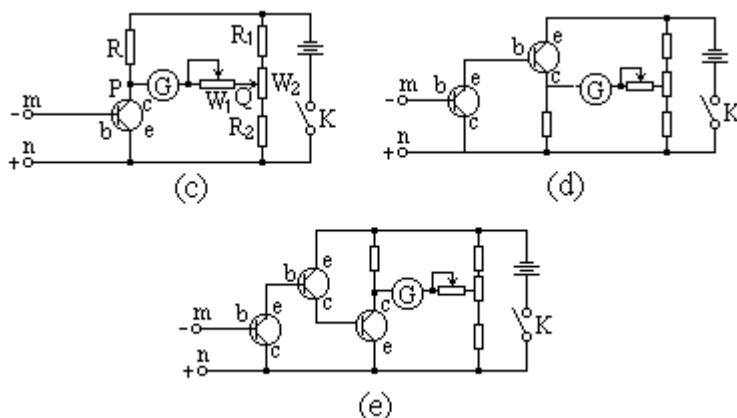
(1)如图(b)连接电路。 R_L 为光敏电阻，演示电表用“G”档。

(2)合上电键K，在无光照射 R_L 时，电表的指针几乎不动，说明电路中电流很小。

(3)用光源(如手电筒)照射 R_L ，可看到电表指针发生偏转。说明光敏电阻被光照射时电阻明显减小，电路中电流显著增大。

(4)将光源靠近光敏电阻，增大光的照度，可看到电表指针偏角增大。说明光敏电阻的阻值随光照度的增加而减小。

建议 如果限于电表的灵敏度不能很好地显示电路中电流的变化，可加接一个直流放大器。图(c)、图(d)、图(e)分别为一级、二级、三级直流放大器的电路，图(c)中电阻 R 、 R_1 、 R_2 、电位器 W_2 和晶体管BG构成一个电桥。电表和变阻器 W_1 串接在电桥的对角线PQ上。当 n 、 m 之间无电流时，调节 W_2 ，使电桥平衡。当 n 、 m 之间有较小电流通过时，使三极管集电极电流增大，从而使P点电位下降，破坏了电桥的平衡，电表中有较大电流通过。图(e)和图(d)电路原理相同，只是增加了电流放大的级数，使电表的灵敏度更高了。和电表串联的变阻器 W_1 可改变电表的量程。



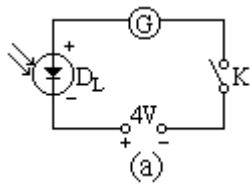
方法二

器材 光电二极管(2CU1型)，演示电表，直流低压电源，电键，光源，导线等。

操作

(1)如图(a)连接电路。合上电键，无光照射光电二极管 D_L 时，电表指针几乎

不动。说明电路中电流很小，无光照射 D_L 的反向电阻很大。



(2) 用较强的光源照射 D_L ，可看到电表指针立即发生偏转。说明光电二极管受光照射后，反向电阻明显减小。

(3) 将光源靠近二极管，可看到电表指针偏转角增大。说明电流随光照度的增大而增大。

(4) 移开光源或用手遮挡光线，电表的指针又回到零点。

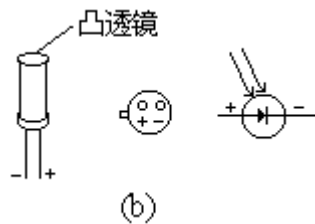
注意

(1) 光电二极管务必反向接入电路中。因为光电二极管同样具有单向导电性，正向接入电路中时电阻很小，电路中电流将很大。它反向接入电路而无光照射时，电阻很大（加上 10—50V 的反向电压时，最大电流不超过 $0.2 \mu A$ ）。有光照射时，电阻明显减小，反向电流可达 $80 \mu A$ 以上。

(2) 如实验现象不够明显，同样可加接直流放大器（见方法一的建议部分）。

说明

(1) 2CU 管的外型与管脚及符号见图(b)。管壳顶端有一个让光线射入的窗口，窗口上有一个凸透镜。光线通过窗口经凸透镜会聚就射到管芯的 PN 结上。



(2) 光照时电流增加的原因是 PN 结上产生了新的电子—空穴对，从而导电性能增加，PN 结反向电阻减小，说明半导体 PN 结具有光敏特性。

(3) 2CU1 型效果比 2CU2 型好。若使用 2CU2 型，可用手电筒光经凸透镜会聚后进行照射。

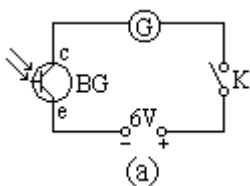
(4) 用万用表粗略检验 2CU 管的方法：将万用表拨至 $R \times 1K$ 档。红黑表棒先分别接 2CU 的正极和负极。表的偏转应很小，电阻读数一般在 200K 以上，再用手电筒照射光电管的窗口，表针偏转应立即加大，光线越强，光电管的反向电阻越小，可降至几千欧，甚至几百欧。关掉手电筒，表针恢复原来最高阻值。最后将红黑表棒对换，测 2CU 的正向电阻，读数约几千欧，且不随光照强弱而改变。

方法三

器材 光电三极管(3DU5 型)，演示电表，低压直流电源，光源，电键，导线等。

操作

(1) 如图(a)连接电路。将光敏三极管 BG 的集电极和发射极分别接电源的正、负极。演示电表置“G”档。



(2) 合上电键 K，可看到电表的指针几乎不动。这是因为光敏三极管的集电结处于反向电压下，电阻很大。

(3) 用光源照射光敏三极管，可看到电表的指针发生了明显的偏转。说明有光照射以后，光敏三极管的电阻明显变小。

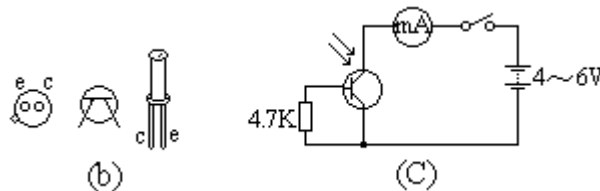
(4)将光源移近三极管，可看到电表偏转角变大。说明光的照度越大，光敏三极管的电阻越小。

(5)移开光源或用手遮断光线，可看到电表的指针立即回到零点附近。

说明

(1)当有光照射时，通过 3DU5 的电流可达 2—3mA，比方法一中操作(2)获得的电流要大得多，所以实验效果较好。

(2)3DU 型光敏三极管的外型、管脚及符号见图(b)。基极为受光极，没有引出脚。由于光敏三极管具有放大光电流的作用，因此可用毫安表测光电流。



(3)使用锗 3AU1 时，电路如图(c)。

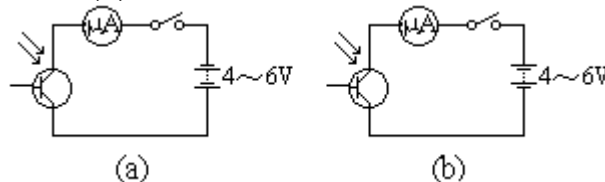
方法四

器材 玻璃管壳的 3AX81、3AX71 各 1 只（金属管壳要拆去外壳），0—200 μ A 微安表，直流电源，电键，导线等。

操作

(1)观察发射结反向电阻的光敏特性。

按图(a)连成电路。



用手电筒照射管内锗片（PN 结）观察到光照后电流增大。

(2)观察集电结反向电阻的光敏特性。

按图(b)连成电路。

操作同上。

说明

(1)锗低频管的集电结反向电阻的光敏效果比发射结反向电阻的光敏效果好。

(2)用万用表挑选 3AX 管的方法

将万用表拨至 $R \times 1K$ 档。将 3AX 管用黑纸遮住。红黑表棒分别接管子的集电极与发射极，测其集电结反向电阻。如达几百千欧（一般在 150K 以上），去掉纸罩，并用手电筒正对管子中的晶体照射，若集电结反向电阻立即下降到几千欧（一般 5K 以下），表明管子的光敏特性很好，按图(b)实验。否则，集电结反向电阻性能太差，按图(a)实验。

(3)实验中直流电压值可根据实际情况选定。

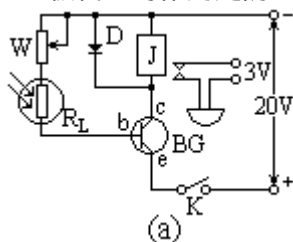
330 光敏特性的应用

方法一

器材 光敏电阻 (RL 型), 晶体三极管 (3AX 型、 $\beta > 100$), 二极管, 灵敏继电器, 电位器 (1M), 直流电源 (20V), 光源, 电铃, 电键, 导线等。

操作

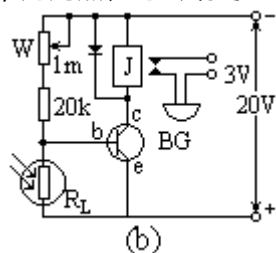
(1) 如图(a)连接电路。无光照射光敏电阻 R_L 时, R_L 阻值很大(约为几个兆欧), 基极电流 I_b 很小, 集电极电流 I_c 也很小, 继电器 J 不吸合, 电铃不响, R_L 受光照射时, 电阻明显减小(约为几个千欧), I_b 增大, I_c 也增大, 可观察到 J 吸合, 电铃响。二极管 D 的作用是防止 J 的自感流以致损坏三极管。



(2) 合上电键 K, 将电位器 W 的阻值调成最大。用光源照射 R_L , 逐步调小 W 的阻值, 直到电铃响为止。

(3) 移开光源或遮断光线, 可看到电铃停止工作。

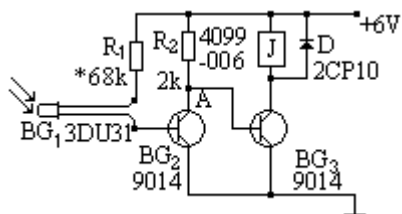
说明 如果有光照, J 放开; 无光照 J, 吸合。可用如图(b)所示的电路。在有光照射时, 逐步调大 W 的阻值, 直至电铃不响为止。即成为一个有光照、电铃不响; 无光照、电铃响的“暗通”电路。



方法二

原理 见图, BG_1 是光敏三极管, 其暗电阻 $> 10M$ 。无光照时 BG_2 (9014) 截止, A 点电位较高。经过 R_2 的电流 (约为 3mA) 注入 BG_3 (9014) 基极后, BG_3 导通并处于饱和状态。继电器 J 吸合。继电器电阻为 100, 故 BG_3 集电极电流 $< 60mA$ 。

当 BG_1 受到光照时, 阻值减小到 300K 左右, BG_2 导通, 并处于饱和状态。由于 BG_2 饱和压降很小, A 点电位明显降低、 BG_3 趋向截止状态, 集电极电流很小, 继电器释放 (实际上集电极电流 $< 15mA$ 已被释放)。



R_1 即是限流电阻, 防止过大的电流通过 BG_1 、 BG_2 , 以致损坏管子; 又是控制光照灵敏度的调节元件。 R_1 阻值越大灵敏度越差, 最大可调到 200K, 此时在强光照射下还可工作。阻值过小、灵敏度过高, 容易受杂散光线的影响产生误动作。一般可取 68K。

D 是保护二极管, 为防止 BG_3 截止时继电器线圈产生自感电动势击穿 BG_3 。

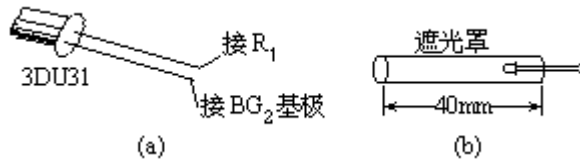
器材 光敏三极管 BG_1 (3DU31), 继电器 J(40996V), 三极管(9014、80)2个, 电阻 $1/8W$ (68K、2K 各1个), 二极管 D(2CP10)等。

操作 利用磁性黑板进行演示, 可选用无线电组合教具的元件进行组合。也可将元件焊接到印刷电路板上, 或装入一个盒内进行光电控制。

说明

(1)继电器之后, 根据需要接上被控制的用电器, 如电动机、电灯、电铃、报警器等。

(2) BG_1 的两个引脚不可接反。可按图(a)区分。也可用万用电表 $R \times 1K$ 档进行光照试验, 光照后阻值有明显减小时, 接红表笔的电极应与 BG_2 基极相连接。



(3) BG_1 外面套上遮光罩(图 b), 可避免杂散光线所致的误动作, 又能提高光控灵敏度。

(4) BG_2 选 大、饱和压降小的管子, 饱和压降过大, 不能有效地将 BG_3 截止, 继电器不能释放。

光学和原子物理学

GUANGXUEHEYUANZIWULIXUE

光在纯净的媒质中传播是看不见光路的，必须使光在其传播路线上发生漫反射，才能显示出光路。常用的方法有两种：一种是让光以很小的角度照射到一块平板上（如方法一），采用这种方法显示光路的光束必须有一定的扩散性。另一种方法是让光射进含有微小颗粒的媒质（如方法二）。

方法一

器材 激光演示仪。

操作

- (1) 开启激光器。
- (2) 移动扩束器中的柱面镜 B_0 ，使向上打出的激光束被扩散。
- (3) 调整分束器，用 1# 分光镜得到一条明亮的光束。
- (4) 将平面镜转轴插入圆盘中间的孔中，即可看到光在同一种均匀媒质中沿直线传播并被平面镜反射的光路，如图所示。

方法二

器材 矩形玻璃水箱，氦氖激光器，小平面镜，碘化钾溶液和硝酸银溶液各少许。

操作

(1) 在玻璃水箱内注入约 2/3 高度的蒸馏水，加入少量碘化钾，配制成浓度约为 0.1mol/L 的碘化钾溶液，再滴入几滴硝酸银，用玻璃棒稍稍搅拌，生成碘化银胶体溶液。

(2) 用氦氖激光束射入胶体溶液，会发生“丁达尔现象”，可显示出一束明亮的红光。

(3) 在箱底放置一小平面镜，可演示光的反射现象（图 a）。

(4) 用平玻璃盖在箱上，并在液面上喷些烟雾，调整激光束通过玻璃盖射入，则可观察到激光束在液面上的反射和折射现象（图 b）。

(5) 调整激光束使其从水箱的侧壁射入液体，调节入射角度可观察到在液面处发生的反射光线、折射光线及全反射现象（图 c）。

注意

(1) 碘化银胶体溶液的浓度可由滴入硝酸银的多少来控制。滴入量太少，光现象不明显；滴入量过多，又会使溶液混浊。

(2) 平面镜不能长时间浸在溶液中，实验后应立即取出用清水冲洗擦净。

(3) 如无蒸馏水，也可用普通自来水配制胶体溶液，但只能随配随用，不能久放。

(4) 胶体溶液会沉淀，沉淀物不易清洗，演示后要注意及时将溶液吸出，进行清洗。

建议

(1) 建议用薄的有机玻璃盒制成矩形、三角形、双凸透镜形、D 形（代替半圆形扁玻璃砖）等所需“空心镜”，往其中注入碘化银胶体溶液，置入有烟雾的玻璃

箱内（或固定在哈特光盘上）即可演示激光通过各种光学器件表面及内部的光路和有关光现象。

(2)如配制胶体溶液不方便，亦可用澄清的肥皂水代替碘化银胶体溶液完成演示，效果亦不错。

说明

本演示无须用遮光设备，可见度大且光路显示稳定。

小孔成像的实质是：当把发光体看作由无数多个发光点组成时，由于光的直线传播，若各发光点发出的光束经小孔后在光屏上形成的光斑不出现明显的重叠，就会呈现出整个物体清晰的像。

在演示和理解小孔成像时应注意：(1)小孔的“小”是相对的，并无确定的尺寸限制；(2)小孔只起到限制光束作用，孔本身形状无关紧要。

以下所列方法一、二可作为演示实验，应在暗室条件下完成；方法三至五可作为课外制作及实验。

方法一

器材 硬纸板，毛玻璃屏，蜡烛，锥子等

操作

(1)用锥子在硬纸板中央部分扎一直径约3mm的小孔，然后将点燃的蜡烛，带孔屏及毛玻璃屏按图示位置立在桌面上。可在毛玻璃屏上观察到一倒立的烛焰像。

(2)前后移动毛玻璃屏，观察烛焰像的变化。

(3)改变小孔孔径的大小，观察烛焰像的变化。

(4)在硬纸板上，戳几个大小不等、形状不同的孔（可预先戳好，用黑纸遮没，需要时再揭去黑纸），孔与孔之间相距约几cm，则每个小孔都会在屏上成像，观察比较孔的大小、形状对烛焰像的影响。

方法二

器材 白炽灯，圆纸筒，黑纸，锥子等。

操作

(1)用圆纸筒套住白炽灯，在圆纸筒的一端用黑纸遮没，并在黑纸上钻几个孔径不一、形状不同的小孔。如图(a)所示。

(2)演示时，使钻有成像孔的黑纸对着光屏，接通电源，白炽灯丝会通过小孔在屏上成灯丝的倒像。

(3)比较各小孔成像情况，以及改变灯丝与光屏的间距，观察像的变化，认识小孔成像的规律。

建议 演示前，可用小黑纸片和胶带纸将黑纸上小孔遮没。演示时，每揭开一小黑纸片，屏上即可显示出一灯丝的像，以增加趣味。

方法三

器材 圆纸筒（可取装蜡纸用的筒），硬纸板，描图纸，胶带纸，针等。

操作

(1)把硬纸板卷成一圆筒形（外径比圆纸筒稍小，使两者能套在一起），在其一端蒙一层半透明描图纸，用胶带粘好后作为像屏。

(2)在圆纸筒一端中心处钻一小孔（孔径0.5—3.0mm），作为成像孔。把带有像屏与成像孔的圆筒组装起来（如图）。（小孔与像屏间约相距10cm）

(3)使成像孔对准明亮景物，改变像屏与成像孔间距，观察小孔成像的情况。

方法四

器材 大小空罐头各 1 只(内径大于 8cm,两者刚好能套在一起),半透明纸,硬纸板,金属螺钉和螺帽(1 2mm)等。

操作

(1)将小号空罐头筒的上下底去掉后,在筒口安装半透明纸作为光屏。将大号空罐头筒筒底打 2 个孔:圆心处打一直径 1cm 的孔,离圆心 2cm 处打一直径 1 2mm 的小孔 O 作为转盘的轴心(如图)。

(2)用硬纸板作一转盘,半径 3cm,在距圆心 2cm 的圆周上,开几个大小不一的小孔,孔径从 0.5mm 以 10mm。

(3)将大筒、小筒、转盘如图所示组装在一起,有屏一端靠近打孔的一端。

(4)旋转转盘,选择不同孔径的小孔,就能观察和比较“小孔成像”的有关现象。

说明

(1)利用大小套筒做成一暗箱,便于观察小孔成像。

(2)通过比较,便于观察小孔成像的清晰程度随孔径不同而变化的规律。

方法五

目的 观察小孔的大小、形状对小孔所成像的影响。

器材 硬纸板,直尺,刀片等。

操作

(1)在一块硬纸板 A 上开 3 个线度为 5 10mm 的孔,并使它们分别呈方形、圆形和三角形。

(2)如图所示,把挖有小孔的硬纸板 A 正对太阳光,另一硬纸板 B 作为光屏与 A 平行放置。当 A、B 相距较近时,在屏 B 上观察到的分别是方形、圆形和三角形的亮斑。

(3)逐渐增大 A、B 间距离,可以发现,当 A、B 间距足够大时,B 屏上的三个亮斑都会变成圆形。

说明

以上两种现象都是光的直线传播所造成的。当孔的线度可以与 AB 间距相比时,由于光的直线传播,会在屏上形成一个与孔的形状相似的亮斑;当 A、B 间距较大时,孔本身的尺寸和形状与其相比已微不足道,仅可视作一小孔。这时呈现在 B 屏上的圆亮斑实际上是太阳的像。

目的 演示本影和半影的形成。

器材 幻灯投影屏幕，手电筒，金属或硬纸圆形遮光物件（塑料瓶盖也可）。

操作

(1)把两个手电筒聚光圈拆除，在两个小灯上分别涂上红、蓝墨水并晾干。

(2)设法把遮光物件悬挂或支于屏幕前。

(3)用单个手电筒演示本影的形成[见图(a)]。

(4)用两个手电筒演示本影和半影[见图(b)]。

注意

(1)暗室演示。

(2)两个电筒亮度要基本相同（红、蓝墨水涂层的厚度会影响亮度）。

(3)圆形遮光物件直径7—10cm，置于屏幕前150—200cm，小灯距遮盖物件20—25cm。

方法一

器材 光具盘（J2501型），低压电源等。

操作

(1)如图(a)所示，把圆光盘卡在矩形光盘上，再把小平面镜卡在圆光盘中。使镜面边缘与 90° 线重合。从光栏透过三条平行光带射向平面镜面，经平面镜反射后的三条光带也是平行的，说明平面镜是规则反射。

(2)如图(b)所示，使平面镜背面的漫反射镜（又称作“波纹面镜”）对着入射光带，可看到入射光带是平行的，而反射后的光带射向不同方向，不再平行。转动圆光盘时，反射线的变化也是不规则的。如在光栏上加滤色片，使入射光呈不同颜色，则可增强演示效果。

建议 推荐一种自制的漫反射镜。取镜面有机玻璃一条（ $10\text{cm} \times 1\text{cm}$ ），用水浴法制作，装置如图(c)所示。

图中，1为待加工的有机玻璃条；3为两根铁棒，作为使有机玻璃弯曲时的支撑物；2为压在有机玻璃上的两根硬杆，当水温加热到 82°C 左右时，镜面有机玻璃开始软化，通过硬杆对有机玻璃片加压，使它弯成波浪形后，从水中把有机玻璃片取出粘在平板上即可。为避免镜面在加热加压时被损坏，应在硬杆与镜面之间填上一块软布。

有的光具盘不附带“漫反射镜”，可用此法自制。

方法二

器材 平面镜，灰色纸板，手电筒等。

操作

(1)在黑暗的环境中，用手电筒斜照射在平面镜上，由于光线发生镜面反射，反射光线几乎不能进入实验者眼睛，这时镜面如“黑洞”；

(2)用手电筒照射灰纸板，由于光线在其表面发生漫反射，反射光线散向各个方向，很易进入实验者眼睛，看上去要比平面镜亮得多。

建议 亦可用水盆中的平静水面代替平面镜完成本实验。

方法一

器材 光的反射实验器（也可自制，自制方法见建议部分），平行光源，低压电源，狭缝屏等。

光的反射实验器的结构如图(a)所示，白色光屏由两块铁板用铰链连接组成。左板与底座固定，右板能以两板的接缝为轴前后转动。

光屏上的刻度是以两块板的接缝为零度。小平面镜安装在零度线下方零点位置。由于接缝与小平面镜相互垂直，因此，接缝上的零度线就是法线。

操作

(1) 放好仪器，让一束光线紧靠固定的左板，射到镜面上零点处，如图(a)所示。前后转动右板，观察该板上的光线。当板上观察到有光线射出时，停止转动。可发现此时左、右两板恰在同一平面上。说明入射光、反射光和法线三线共面。

(2) 让入射光沿左板面以不同角度射向小平面镜零点，观察反射角的变化，并比较两角的大小，可知反射角等于入射角。

(3) 将入射光线调到某一入射角 i ，标在分度盘上，并标记下反射光线所示反射角 r 。让光线逆反射光的光路以 r 入射，观察到反射光线沿原来的入射方向射出，说明光路是可逆的。

建议

(1) 本实验可用光具盘平行光源(或手电筒)，在其光路装一狭缝(宽1~2mm)，获得所需线光源。亦可直接借用“光的全反射演示器”的附件：灯泡(10V、10W)和有狭缝的铁皮灯罩。

(2) 自制“光的反射实验器”的方法

将硬纸板剪成半圆，画出分度线。用刀沿法线 ON 刻一浅缝（沿缝能弯折，但左右两面不断开）。把该半圆屏左半侧与镶有小平面镜的底板后侧边粘在一起，并保持纸屏与镜面垂直，右半侧可前后转动，如图(b)所示。

为便于观察，还可根据需要半圆分成6等分（或12等分，18等分）。此仪器适宜用作学生分组实验，所需线光源可在手电筒灯泡前玻璃面内压入由不透光黑色纸作外层、锡纸（箔）作里层叠在一起组成的圆纸片，并刻一狭缝，如图(c)所示。

方法二

器材 光具盘（J2501型），低压电源等。

操作

(1) 如图所示，将圆光盘卡在矩形光盘上，再把小平面镜卡在圆光盘中。使镜面的边缘与 90° 线重合。

(2) 从矩形光具盘缝屏中央引入一条光束，调节平行光源位置，使光束与圆光盘零度线重合（即入射角为零度）。

(3) 转动圆形光盘，改变入射光线的入射角，观察入射光线、反射光线变化情况；读出它们与零度线（即法线）的夹角，比较后可发现：反射角总等于入射角。

方法三

器材 激光光学演示仪（J2513型）。

操作

(1)将平面镜转轴插入光度盘孔中，使镜面垂直0°线。

(2)开启激光器，移动扩束器，使激光束被扩束。

(3)调整分束器，只用1#分光镜，使得到一条明亮的光线沿光度盘半径方向入射到平面镜上。

(4)转动光度盘，使入射光线可以不同的入射角射到平面镜上，读出反射角，分析反射角与对应入射角的关系，从而得到反射定律。如图(a)。

说明 也可在圆盘中间孔中插入半圆柱透镜，使其底边和90°直径重合，0°直径垂直底边且通过光心。然后调节光束使其通过半圆柱透镜的中心，并在盘面上发生反射。如图(b)。

方法四

器材 小平面镜，三合板，白纸，量角器，铅笔，小电珠（6~8V），电源（6~8V），缝屏等。

操作

(1)用小灯座装上6~8V电珠做光源（或用光具座的平行光源）。光路前方放一有竖直到底狭缝的缝屏，使透射光成线状。在光线路径上平放一张白纸，可在白纸上看到一条发亮光线。用笔和直尺沿入射光画一直线。

(2)垂直于白纸放置一小平面镜，使镜面挡在光路上。这时，能在白纸上看到反射光的亮线。用笔和直尺沿反射光线画一直线。再沿小平面镜下缘画一直线MM，标记镜面位置。

(3)取下小平面镜，撤去光源，可见白纸上标志入射光的直线与标志反射光的直线相交于MM上一点O。过O点作直线OO'⊥MM。用量角器量入射线与OO'的夹角为*i*，反射线与OO'的夹角为*r*，可看到*i*=*r*。从而验证了反射定律。

注意

(1)本实验最好选用反射面在前面的金属小平面镜。如选玻璃平面镜，由于反射面在玻璃后表面，应根据玻璃厚度加以校正。

(2)实验中若缝屏上狭缝宽度太小，则透射光线太弱，现象不明显；若缝宽稍大，则透射光成带状。这时，可选取该光带某一侧边作为入射光线，按前述方法完成实验，效果也很好。

方法五

器材 小平面镜，白纸，大头针数枚，量角器，铅笔，橡皮泥等。

操作

(1)把小平面镜放置在一张白纸上，镜面与纸面垂直。在镜面前约5cm处，插两根大头针P、P₁（P、P₁连线可与镜面平行），如图中所示。

(2)用单眼观察，调节视线角度，使大头针P₁恰遮住P在平面镜中的像P'，并沿视线插上大头针P₂（此时P₂应恰遮住P₁和P'）。

(3)沿平面镜下缘画一直线MM，标志镜面位置。移去平面镜及大头针，过P₁、P₂在纸上的针孔画一直线与MM交于O₁点，连接PO₁，过O₁点作MM的垂线O₁O₁'。（见图中所示）

则PO₁为入射光线，O₁为入射点，P₁P₂为反射光线，O₁O₁'为法线。

(4)用量角器量得入射光线 PO_1 与 O_1O_1 夹角 i_1 , 反射线 P_1P_2 与 O_1O_1 夹角 r_1 , 可得 $i_1 = r_1$, 从而验证了反射定律。

(5)在镜面前选另一位置插下大头针 P_3 , 重复上述方法 , 确定入射点 O_2 , 反射光线 P_3P_4 以及入射光线 PO_2 , 再验证一次。

注意

(1)与“方法四”注意 1 相同。

(2)平面镜应垂直于纸面固定(可借助于橡皮泥固定),大头针亦应垂直于纸面。

建议

(1)大头针 P 可涂以红色以示区别。

(2)若将反射光线 P_1P_2 、 P_3P_4 用虚线延长相交于一点 P' , 则该点即 P 在镜中像的位置。测量结果表明: P 和 P' 到 MM' 距离相等。以此亦可说明平面镜成像的特点。

方法一

器材 无色有机玻璃（22cm×25cm、22cm×15cm 各 1 块），蜡烛，三角板，白纸等。

操作

(1)在白纸上画上等间距的线条，压在较大的一块有机玻璃下面，将较小的一块有机玻璃直立在上面（图 a）。

(2)将一支点燃的蜡烛放在 A 处，利用竖直有机玻璃板的半反射作用可在里面看到蜡烛的虚像。

(3)将另一支蜡烛在板后移动，利用有机玻璃的半透射作用，可逐步将它放得与 A 蜡烛的虚像重合。

(4)把两把三角尺的一条直角边分别紧靠有机玻璃边推向 A、B 处，可看到它们的边线 AOB 与玻璃边垂直，而且 AO=B0（图 b）。这样便验证了平面镜成像的特点。

方法二

器材 白色蜡烛 3 支，白硬卡纸，平面镜，平玻璃板（与平面镜大小相同），铁架台等。

操作

(1)在白色硬卡纸上画上 7 条等距横线和 2 条垂直线，如图示。

(2)先将平面镜和平玻璃板竖直地放置在有等距横线的白色卡片纸中间，并处于同一直线上。

(3)将两支蜡烛点燃后放置在同一横线的两端，与垂直线的距离相等，这时镜中和玻璃中同时出现了两个烛焰的像。

(4)将第三支蜡烛放在玻璃后面正好是像的位置处。在玻璃前面观察时，第三支蜡烛好像也点燃着。

(5)比较成像的位置，成像的大小，分析现象，得出平面镜成像的特点。

方法三

器材 小平面镜，三合板，白纸，刻度尺，大头针数枚，铅笔等。

操作

(1)把平面镜放置在一张白纸上，镜面与纸面垂直。在镜前约 10cm 处，插一根大头针 O 作为物体，如图所示。

(2)从镜面前某一位置 E_1 单眼观察大头针 O 在镜中的像 I，并沿视线插上大头针 P_1 ，使 P_1 恰遮住像 I，再插上大头针 P_2 （与 P_1 相距约 8—10cm），使 P_2 恰遮住 P_1 和 I。这时， P_1 、 P_2 、I 将在同一直线上。

(3)再从另一位置 E_2 （可选在大头针 O 的另一侧）观察 I，照前述方法插上两枚大头针 P_3 、 P_4 。（见图示）

(4)沿平面镜下缘画一条直线 MM'，以示平面镜的位置。

(5)移去平面镜及大头针，过 P_1 、 P_2 在纸上的针孔画一直线，再过 P_3 、 P_4 在纸上的针孔画一直线。这两条直线在镜后的交点就是像 I 的位置。

(6)用刻度尺测量后可知：像 I 到 MM 的距离，等于物 O 到 MM 的距离。

(7)改变物体 O 的位置，再按上述方法做一次。

注意

(1)镜面和大头针一定要与板垂直，观看时，要特别注意针尖部分是否在同一直线上。

(2)本实验最好选用反射面在前的金属小平面镜。如选用玻璃平面镜，则反射面在玻璃后面，可画出 MM 后再根据玻璃厚度确定反射面（镜面）的位置。

说明 可用橡皮泥固定小平面镜。

方法四

目的 用实验方法测定穿衣镜的最短尺寸。

器材 穿衣镜，带刻度的纸带，直尺等。

操作

(1)根据家庭穿衣镜尺寸制作一条带有毫米刻度的纸带，把它竖直固定在穿衣镜上，如图。

(2)观察者取立正姿势，正对穿衣镜观察自己在镜内的全身像，并读出观察像上下限时看到的刻度标尺上的刻度值。观察者要从穿衣镜中观察到本人的全身像，该穿衣镜应具有的最短尺寸就是上述测得的两刻度值之差。

(3)改变观察者与镜面间距离再进行读数，比较测得值有无大的变化，并求几次数据的平均值。

注意

(1)在观察全身像的上下限并读数时，眼的位置应保持不变，且穿衣镜亦应竖直放置。

(2)可请助手协助，把一直尺水平放置在镜面上并上下移动，以便确定上下限位置并读数。

说明 人站在平面镜前，要想看清自己的全身像，当人体与镜面平行时，可以证明，镜面长度至少为人的身高的一半。但如果平面镜是倾斜放置的，那么较小的平面镜，只要采用适当的摆放或悬挂方式，也能观察到自己的全身像。

方法一

器材 长方形平面镜 2 块，胶布，蜡烛，闹钟等。

操作

(1)如图(a)示，用胶布把两块平面镜粘接在一起。然后把它竖直放在水平桌面上，使两镜面间成一定夹角，组成一“角镜”。将一点燃的蜡烛放在角镜前，蜡烛便在角镜内产生一定数目的像，且这些像都位于同一圆周上。像的数目与两镜间夹角有关，夹角变小，像的数目增多。

(2)使角镜两镜面夹角恰为 90° （该光具常称为“直角二面镜”或“反像镜”）。取一张报纸或一闹钟正对着折角放在直角二面镜前，则镜中字的像是正写的，如图(b)所示。

当观察者从两镜交界处看去，所看到的自己的像并非左右反置的。人的左眼，在镜中也在像的左边，人的右眼，在镜中也在像的右边（观察时可通过眨眼来验证）。

(3)如图(c)示，把角镜的一块面镜平放，另一面竖放，这样从镜中将能观察到左右顺序相同，而上下颠倒的虚像（这种镜亦称为“倒像镜”）。

方法二

器材 平面镜 2 块，蜡烛（或玩具小人），底座等。

操作

如图所示，把两块平面镜的镜面相对且互相平行，竖直安装在底座上（底座可用聚苯乙烯泡沫塑料，开两条槽供平面镜插入）。将一点燃的蜡烛（或玩具小人）放在两镜面中间。越过一块镜子上端向对面镜内看去，就会看到许多个蜡烛像排成一线，伸展到远处。

分析 这是光在两面相互平行的平面镜间发生多次反射所形成的多个虚像。从原理上讲像应是无穷多个，但由于平面镜反射率总小于 1，随着反射次数的增多，像的亮度逐渐减弱，以至人眼看不清楚，所以像的数目是有限的。

方法三

器材 小平面镜（ $10 \times 7\text{cm}$ ）2 块，硬纸板，胶布等。

操作

(1)按图(a)所示，准备 2 块硬纸板，把涂黑的圆圈部分剪去。用小刀沿着虚线划一痕迹（注意不要划透），然后沿虚线折叠，作成两个长方形盒子，并用胶布粘好。

(2)如图(b)示，用胶布把两块小平面镜固定在两只盒的上（或下）端，使两镜面相对且都与盒盖成 45° 角。然后把 A 盒套入 B 盒中，组成一镜筒可伸缩的潜望镜。此潜望镜可用平视法观察到比眼睛高出 40—60cm 的物体。

方法一

器材 凹面镜，凸面镜，平行光源，小电珠，平面镜，烟雾箱等。

操作

(1)将凹镜对着太阳光（使光线与凹镜的主光轴平行），凹镜能使平行的太阳光线会聚于一点，以白纸为屏能显示出该聚焦点。取一火柴头置于该点很快会燃着。

(2)把凹镜置入烟雾箱中，使凹面对着光源且使箱内充满烟雾。用平行光源入射几条平行于凹面镜主光轴的平行光线，透过烟雾箱的玻璃窗可看到：平行光线经凹镜镜面反射后会聚于一点，该点即凹镜的焦点。

(3)关掉平行光源，将一发亮的小电珠（看作为点光源）放在凹镜的焦点上。可观察到：它的光线经凹镜反射后，成为一束平行光线。

(4)从烟雾箱中取出凹面镜，置入凸面镜，正对着凸面镜入射数条平行光线，经凸面镜发散。如沿反射光线向反方向延长时，将交于镜面后的一点。看起来反射光线好像从这一点射出一样，该点就是凸面镜的虚焦点。

(5)在三线白纸上各剪出一圆孔，使圆孔的直径相同。把它们分别覆盖在凹面镜、凸面镜、平面镜镜面上，使三面镜子通过圆孔露出的径长相同。通过露出的镜面观察，并比较三者可观察范围和成像的大小。

方法二

器材 光具盘（可用 J2501 型），低压电源等。

操作

(1)将凹凸面镜挂在矩形光盘上，调整面镜和平行光源的高度，使从光具盘缝隙中射来 5 条平行光束与凹凸面镜的主光轴平行，且中间一条光束与凹面镜的主光轴重合。可看到与主轴平行的光线，经凹面镜反射后都通过焦点 F。焦点 F 与入射光线在凹面镜的同侧，如图(a)示。

(2)使凸面镜对准平行光源，可看到平行光线经凸面镜反射后成为发散光线，如图(b)示。把这些反射光线反向延长后，也会聚一点，该点即凸面镜的虚焦点。

注意

(1)为加强演示效果，可将红蓝滤光片罩在隙缝前面，使光束呈现不同的颜色。

(2)本实验也可用激光光学演示仪完成，操作方法与上类同。演示时，应注意突出以下要点：凹面镜的会聚作用及实焦点的测定；通过凹面镜球心的光线，反射后按原路返回；凸面镜的发散作用及虚焦点的测定；指向凸面镜球心的光线，反射后按原路返回等。

目的

- (1) 演示平行光经凹面镜反射会聚在焦点上；
- (2) 演示从凹面镜焦点处发出的光被反射后成平行光。

器材 “220V、500W” 线形灯泡，灯座，电源线，插头，金属凹面镜 2 个（焦距为 7cm、镜面直径：A 镜为 25.5cm，B 镜为 23.5cm），方座支架及复夹 2 副，火柴，铁丝等。

操作

- (1) 按图分别将凹面镜 A、B 装置好。
- (2) 将灯泡置于 B 镜的焦点附近，要求灯丝的中点在 A、B 两镜的主光轴附近。
- (3) 接通电源。灯发出的光经 B 镜反射基本成平行光。
- (4) 用铁丝做成“ Γ ”形指针，固定在 A 镜的支架上，使其下端处在 A 镜反射出的光线的会聚点 C 处。
- (5) 取一根火柴，将其首端置于 C 点处，顷刻火柴即会冒烟，燃着。
- (6) 取走 A 镜可观察平行光束在远处墙壁上形成一特别亮的光斑。

注意

- (1) 灯泡的功率不可太小。
- (2) 镜面要用擦镜纸揩干净，使其有良好的反射性能。

说明

此实验简单易行，可形象地阐明凹面镜的性质，说明太阳灶、太阳炉等的原理，且不受天气条件的限制。

本实验介绍了四种实验方法。方法二和方法三突出了三条特殊光线的作用。方法四的优点是器材简单，并可确定各种像（包括虚像）的位置，但操作有一定难度，需经过适当训练才能掌握。

方法一

器材 光具座，低压电源，蜡烛，半光屏（用白色卡片纸自制），凹面镜，凸面镜等。

操作

(1)以平行光源照亮“1”字屏（或用蜡烛）作为“物”，把它们和凹面镜分别安装在光具座上，且使“1”屏在主光轴上方。另用一张白色卡片纸，装置在主光轴下方，作为半光屏。如图所示。

(2)确定凹面镜的焦点 F 和球面中心 C ($OC=2f$)，并把其位置在标尺上标出来。

(3)把物体置于凹面镜球心 C 外侧某处，左右移动半光屏，直到屏上呈现清晰的实像。该像是倒立、缩小的，位于焦点 F 和球心 C （即两倍焦距）之间。

(4)依次把物置于球心 C 处，球心 C 和焦点 F 之间，移动光屏，可先后得到与物等大或放大的倒立实像，像分别位于球心 C 及球心 C 外例。

(5)把物置于凹面镜焦点 F 之内，无论怎样移动光屏，都不能在屏上成像，但对着凹面镜观察可以看到镜后有一比物体大的正立虚像。

(6)改用凸面镜，无论将物放在镜前何处，无论怎样移动光屏都不能得到实像。但对着凸面镜观察，可看到镜后生成一正立缩小的虚像。物体距镜愈远，虚像愈小。

注意 实验时，应尽量使“物体”（“1”字屏或蜡烛接近主光轴，这可改善成像质量）。

方法二

器材 光具盘（J2501型），低压电源等。

操作

(1)将凹柱面镜（ $f=8\text{cm}$ ）挂在矩形光具盘上。打开平行光源，让光从矩形光具盘的缝隙中射出，加上滤色片，调整它们的相互位置以及光栏后小平面镜的方向等，并按图所示演示当物体处于两倍焦距点以外时凹面镜成像的光路。图中， A 表示物点、 A' 表示 A 经凹面镜反射所成实像点，可知该像点位于二倍焦距点和焦点 f 之间，是倒立缩小的。

(2)移动凹柱面镜，逐渐缩短它与物点 A 间的距离，使物点分别位于两倍焦距点处、两倍焦距点和焦点 F 之间、以及焦点之内，就能分别显示出凹镜所成等大倒立实像（位于两倍焦距点处）、放大倒立实像（位于两倍焦距点之外）、以及放大虚像的光路。

方法三

器材 激光光学演示仪（J2513型）。

操作

(1)将凹面镜对称地置于主光轴线上。

(2)开启激光器，移动扩束器，使激光束被扩束。

(3)调整分束器，使被扩束的激光经反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 后分为三束。

(4)演示 $u > 2f$ 的成像情况时，使上光束通过镜心，中光束平行光轴，下光束和光轴重合。上面两束光相交于球心 C 外一点 A 作为物点，被凹面镜反射后再相交于 A' 点，即为像点。如图(a)所示。

(5)演示 $f < u < 2f$ 的成像情况时，使上光束平行光轴，中光束和光轴重合，下光束通过凹面镜球心 C 。由上、中两光束相交得物点 A (处于焦点 F 和两倍焦距点 C 之间)，反射成像于 A' 。如图(b)。

(6)演示 $u < f$ 的成像情况时，使上光束平行于主轴，中光束和主轴重合，下光束通过凹面镜球心 C ，与上光束相交得物点 A ，上、下光束的反射光不能相交，反向延长交于 A' 点，即 A 点的虚像。如图(c)。

(7)取下凹面镜，将凸面镜对称地置于主轴上。

(8)开启激光器，调整扩束器和分束器，得三条光线，使上光束通过凸面镜球心 C ，中光束平行于光轴，下光束和光轴重合。上面两束光在镜前相交得物点 A ，反射后不能相交，反向延长后相交于 A' 点，即 A 的虚像点。如图(d)所示。

方法四

原理 在“东南西北”坐标系中，如果在东、西轴上有眼睛和 A 、 B 两个物体。眼睛由东向西看去， A 、 B 两物体重合。如果 A 物体在前， B 物体在后，当眼睛向北移动时，可看到 B 物体移动到 A 物体北边去了；反之，则 A 物体移动到 B 物体南边去。如果发现不论眼睛在南、北方向上怎样移动， A 、 B 两物体始终重合，说明 A 、 B 在同一处。用这个方法，可判断两个物体的前后。这个方法通常称视差法。

器材 凸面镜，凹面镜，铁架台，铅笔（长、短各一支）等。

操作

(1)用铁架台将凹面镜固定好，将短铅笔竖立在凹面镜焦点之外，二倍焦距点之内，可用眼睛看到一个放大的倒立的像（图 b）。

(2)手持长铅笔竖立在凹面镜的主轴上。眼睛左、右移动，可看到短铅笔的像和长铅笔左右交错移动。调节长铅笔在主轴上的位置，直到不论眼睛怎样移动，短铅笔的像和长铅笔始终重合为止。此时长铅笔的位置就是短铅笔像的位置。

(3)将短铅笔移至凹镜两倍焦距之外，可用眼睛看到一个倒立缩小的像。

(4)重复操作(2)，确定像的位置。

(5)将短铅笔移至凹面镜焦点之内，可在镜中看到一个放大正立的像。

(6)手持长铅笔竖立在凹面镜后面的主轴上（部分铅笔被凹面镜遮挡，上面一部分可看见）用和操作(2)相同的方法确定像的位置。

(7)换用凸面镜，将短铅笔竖在主轴上各个位置，都可在镜中看见缩小正立的虚像。重复操作(6)，确定像的位置。

说明 此方法应在亮室中做，能比较准确地确定各种像的位置。

方法一

器材 凹面镜，平行光源，光具座，半光屏等。

操作

(1)把平行光源和凹面镜安装在光具座上，使它们等高共轴。另取一白色卡片纸作为半光屏，遮去平行光源通光孔径的一半（见图）。

(2)使平行光入射到凹面镜上，移动半光屏和凹镜间的距离，直到屏上呈现平行光经凹镜反射后所成的聚焦点。此时半光屏与凹面镜间的距离就是凹面镜的焦距。

说明 这种方法通常称作“平行光聚焦法”。也可以太阳光作为平行光线，使它平行于光具座的轨道入射，从光具座上读出半光屏和凹面镜间距离就是焦距。误差约在5% 10%范围内。

方法二

器材 凹镜（曲率半径约200 300mm），光具座，半光屏等。

操作

(1)用“平行光聚焦法”粗测凹面镜焦距的近似值（参见“方法一”）。

(2)按实验340方法一图所示要求安装仪器，使物体离凹镜略大于2倍焦距开始，调整光屏得到一清晰的像，测得物距 u 和像距 v ，把它们和计算出的 $1/u$ 值、 $1/v$ 值填入自行设计的表格中。

(3)使光屏向凹面镜方向移动一小段距离（约 $f/6$ ），移动物体获得另一个清晰的像。重复这样的操作，获得5组数据。

(4)在坐标纸上，以 $1/u$ 、 $1/v$ 分别为横、纵坐标，描绘出 $\frac{1}{u} - \frac{1}{v}$ 图线，应是一条直线，该直线的截距值即为 $1/f$ ，取其倒数可求得焦距 f 值。

说明 此法通常称作“物距 像距法”或“公式法”。对测得的多组 u 、 v 值有三种图线处理方法，可参看“实验354方法二中说明”的有关内容。

方法三

器材 凹面镜，光具座，大头针，小电珠等。

操作

(1)用“平行光聚焦法”先测得凹面镜焦距的近似值。

(2)按图所示把大头针、凹面镜安装在光具座上，使针尖位于凹面镜的二倍焦距（即球心）附近，且用一小电珠从侧面照射大头针。沿光具座正对着镜面方向观察物（大头针）和它经凹面镜反射所成的实像。

(3)缓缓移动凹面镜，当观察到由凹面镜反射所成倒立实像位置与原物重合时，大头针所处位置恰好是凹面镜的球心，即2倍焦距处。由此可求得凹镜的焦距 f 。

注意

(1)为保证物和像的位置相重合，必须用“无视差法”加以判定，即观察时将头部面对着镜面稍微左右移动，如物与像间没有相对移动，就认为无视差。此时物

和像都位于凹面镜的球心处，可以减小测量误差。（可参考实验 340 方法四）

(2)调节与安装仪器时，应尽量使刻度尺与大头针尖和凹镜球心的连线（即主光轴）平行；同时，应使大头针与滑块上的刻度标记线在同一垂直平面内。

说明

此法通常亦称作“视差法”，由于采用无视差对准技术，可以较准确地测凹面镜的焦距值。

方法一

目的 用附加凸透镜的方法测定凸面镜的焦距。

器材 光具座，凸透镜，待测焦距的凸面镜，光源，光屏等。

操作

(1)在厚纸板中央开一个三角形小孔 A，挡在光源前方，使光线只从三角孔射出。参照图所示，将凸透镜放在光源和光屏 B 之间，并且调节它的位置，使屏上成的像清晰，记下屏 B 对透镜光心 O 的距离 v 。

(2)保持光源和透镜的原来位置，将待测焦距的凸面镜放在透镜和屏之间（镜面朝向透镜），调节凸面镜的位置，使在厚纸板上能得到一清晰的、与三角形小孔 A 等大的实像 C，量出此时凸面镜与凸透镜的距离 d 。可以证明，在上述情况时凸面镜的曲率中心正好在原会聚光束的会聚点上，才使光线经凸面镜反射后仍在原物体位置成像，则该凸面镜的曲率半径 $r=v-d$ 。所以，凸面镜的焦距（绝对值） $f=r/2$ 。

(3)改变厚纸板和透镜间的距离，重复上述实验。最后计算焦距的平均值。

注意 实验时注意共轴调节，且保证 $v > r$ ，才能顺利完成测试。

方法二

原理 如图所示，当宽度为 a 的平行光束射到凸面镜上，经反射后成为发散光束，投射到距凸面镜为 l 的屏（墙）上。若反射光线所形成光

斑 D 距主光轴距离 (DC) 为 b ，则有 $\frac{f}{f+l} = \frac{a}{b}$ 。凸镜焦距（绝对值）

$f=a \cdot l/(b-a)$ 。

器材 待测凸面镜，平行线光源，米尺，白色屏幕（或墙）等。

操作

(1)将宽度为 a 的平行光束投射到凸镜上，并测出光束的宽度 a 。

(2)量出凸面镜的镜面和墙之间距离即 l 。

(3)量出发散光束 CD 的宽度，即 b 。

(4)由测得的 a 、 b 、 l 的值，根据 $f=al/(b-a)$ 即可算出凸镜的焦距 f （绝对值）。

建议 本方法亦可在 J2501 光具盘或 J2513 型激光光学演示仪上演示及完成。

目的 演示面镜对光线反射的现象和规律。

器材 自制变焦面镜，光具盘，平行光源等。

变焦面镜的制作方法

截取长 160mm、宽 20mm 的 2mm 薄型镜面有机玻璃一条作面镜，如图(a)中 1；用 4mm 的金属杆制作如图(b)所示的焦距变化控制杆，即图(a)中 2，注意缺口略为深些以便固定；图(a)中 3 是一条薄型马口铁皮，形状和尺寸如图(c)，在图(b)焦距变化控制杆的上端用焊锡竖直焊在马口铁皮的中心位置（反面），在斜线框内放入镜面，并按虚线处上下左右包住镜面；图(a)所示 4 为镜面支架，用透明的 3mm 有机玻璃弯成（图 d），在支架中心位置打一个 5mm 圆孔，可让焦距变化控制杆自由通过支架上的圆孔，并起到固定不同曲率面镜的作用；最后把它们组装起来，把焦距变化控制杆的一头插入镜面支架的中心位置孔内，并焊上 15mm×20mm 的铁皮一块当把手，用如图(a)中 5。

操作

(1)把矩形光具盘放置平稳，使其下缘与桌面平行，把光源放在光栏一边，并尽量靠近，将栏光片插入第一、七条缝，只留下中间五条缝，调整平行光源位置，在矩形光具盘上可见五条光带。

(2)将手柄推到第一第二缺口，可以演示凸面镜反射的现象。

(3)将手柄推到第三缺口，可以演示平面镜反射的现象。

(4)将手柄推到第四、第五缺口，可以演示平行光经凹面镜反射会聚在一点上的现象。

说明

(1)用 2mm 的薄型镜面有机玻璃作面镜，有韧性，可以自由弯曲。它能一镜三用，可以作凸面镜、平面镜和凹面镜用。还可以连续观察光线照射在不同曲率面镜时的变化规律，从而显示出三镜之间的区别和联系。

(2)镜面有机玻璃反射光强，实验效果好，而且不会碎裂。

方法一

器材 长方形玻璃水槽，玻璃板，氦氖激光器，小平面镜，铁支架，水，蚊香等。

操作

(1) 往盛有半槽水的玻璃水槽水面上方喷入烟雾后，用玻璃盖盖好。

(2) 如图(a)所示，使激光束经小平面镜反射后，由空气进入水中，观察入射光线在空气与水面交界处折射现象，并比较折射角与入射角的大小。

(3) 缓缓转动小平面镜，逐渐减小入射角，观察折射角随入射角变化的现象(注意观察光垂直射入水面时的情况)。

(4) 如图(b)所示，使激光束由水面下射向空气，观察光由水射入空气时的折射现象。

说明

(1) 为更清楚地显示光在水中的径迹，可往水中滴入少许豆浆(或牛奶)并搅拌均匀。

(2) 亦可用平行光源或手电筒附加一单缝纸屏后获得演示所需光束，但效果稍差。

方法二

器材 光具盘(J2501型)，低压电源等。

操作

(1) 将圆形光盘卡在矩形光盘上，把半圆柱透镜紧固在圆形光盘上(毛面向里、底边跟 90° 横线重合、 0° 线通过中心)。光栏只留中间一条缝，使一条光束沿光盘上 0° 刻线(即入射角为 0°)射到半圆柱透镜的圆心O处，这时光线由空气进入玻璃(或由玻璃进入空气)都不发生偏折。

(2) 将圆形光盘转过一角度，如图(a)所示，演示光线由光疏媒质(空气)进入光密媒质(玻璃)时的折射现象。(同时可观察到在界面上的反射现象。)

(3) 转动圆形光盘，改变入射角的大小，观察折射角随之射角变化而变化的现象。

(4) 转动圆形光盘，使光线沿半圆柱透镜的半径射到直边，见图(b)所示。观察光线由光密媒质(玻璃)射入光疏媒质(空气)时的折射现象。

(5) 改变入射角大小，但使入射角不大于玻璃对空气的临界角(约为 42°)，观察折射角随之变化的情况。

方法三

器材 广口瓶，卡片纸，白炽灯，清水等。

操作

(1) 取一张信封大小的卡片纸，在其中部开三条长2cm、宽2mm的狭缝，如图(a)所示。然后，将开有狭缝的卡片纸，紧贴在一只空的广口瓶(外径约9cm)的外

侧壁，使其中间竖缝对准白炽灯。

(2)保持灯、纸、瓶、眼在同一水平高度，如图(b)所示。由于光沿直线传播，这时观察者只能由中缝看到白炽灯的像。

(3)往瓶内注入清水，适当调节人眼与瓶后壁间的距离，就能同时从三条狭缝中各看到一盏白炽灯丝的像。这是由于光线通过瓶内清水和空气界面时发生折射的缘故。光路图见图(c)。

方法四

器材 刻度尺，游标，不透明容器，清水，照明灯等。

操作

(1)不透明容器内盛水量过半，设法使带刻度直尺竖直立于容器中。

(2)在刻度尺对面确定一观察位置，调整视线使之能观察到尺底端 A 的像 A' (如图中 COA' 视线)。

(3)调节直尺上游标 B，使 B 在水中的倒像 B' 恰与 A' 重合。

(4)从刻度尺上确定 B 到水面距离，即知水的视深，比较水面到 A 的距离 (实深)，可知视深比实深浅。

(5)改变观察者位置，使视线逐渐趋近直尺，观察 A' B' 两像间相对位置关系，将发现像 A' 位置也逐渐降低，即视深随入射角减小而增大但测量表明视深仍比实深浅。

说明

(1)当入射角变小时，B 发出经水面的反射光能量渐弱，而 A 发出的折射光能量渐强。为保证像 B'、A' 都清晰可辨，可在容器侧旁置一照明灯，用来照亮游标 B，而直尺底端以处在容器侧壁半影区为佳。

(2)游标颜色宜采用白色或浅色，游标可用废旧牙膏皮制作 (或用一红色发光二极管代替游标)。

实例

水的实际深度为 8.0cm。

入射角 i	35.0 °	29.3 °	19.3 °	11.9 °
视深(cm)	4.8	5.3	6	6.5

入射角 i 可用 $\text{tgi} = \frac{d}{H}$ 算出。H 为水的实深，这里 $H = 8.0\text{cm}$ ，d 为

入射点 (如装置图中 O 点) 到刻度尺距离。

方法一

器材 长方形玻璃水槽，氦氖激光器，小平面镜，电源，自制带有刻度的矩形木板等。

操作

(1)根据水槽尺寸制作一画有圆和刻度线的矩形木板(如图)。在MM'上标上刻度，并每过一定间隔(例5mm)作垂线交于圆上。过圆心O作垂线作为法线NN'。以MM'为界面，把木板竖直放入水槽中，并在水槽注入清水，使水面恰与MM'相齐。

(2)调节平面镜 θ 角度，使入射光线沿圆的半径方向射入圆心O处，且交圆上一点C，折射光线交圆上一点D，分别读出C、D两点在MM'上的刻度值。

(3)计算
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{C\text{刻度值}}{D\text{刻度值}}。$$

(4)改变几次入射光线的方向，求出几组 $\sin i/\sin r$ 的值，观察其是否为一常数，并求出平均值，这个平均值就是水对空气的折射率。

注意 应保证水与空气的界面恰好与MM'相齐，且必须以O点作为入射点。

说明 可用有单缝纸屏的平行光源或手电筒代替激光光源完成演示。

方法二

原理 改变入射角，测出对应的折射角，比较入射角和折射角的正弦之比值，发现该比值对确定的媒质是一常数。

器材 画有直角坐标的长方形木板，玻璃缸(或500—2000ml的大烧杯)，大头针，量角器，清水等。

操作

(1)在木板上直角坐标的第三象限内作射线OA，使它与y轴间夹角 r_1 为某一确定值(如取 $r_1=15^\circ$)。

(2)在OA射线上垂直板面插上两枚大头针 P_2 、 P_3 ，把木板浸入盛有水的玻璃缸内，使水面与OX轴平齐。

(3)在木板的第一象限内，用一只眼睛沿着木板观察浸在水中的大头针，改变观察方位，直到看到上面的大头针 P_2 恰能完全挡住下面的大头针 P_3 ，然后在观察的方向上垂直板面插上大头针 P_1 ，再从原方位观察一次，确认看到的 P_1 、 P_2 、 P_3 依次在同一直线上为止，如图所示。

(4)量出入射角 i_1 ，算出两角度之比 i_1/r_1 和它们的正弦值之比 $\sin i_1/\sin r_1$ ，填入预先设计好的表格中。

(5)逐次改变射线OA的方位角，设为 r_2 、 r_3 、 r_4 、……，测出对应的入射角 i_2 、 i_3 、 i_4 、……，分别算出它们的角度之比和正弦值之比，填入表内。

(6)比较实验结果可以看出，光在两种确定的媒质间发生折射时，其入射角正弦和折射角正弦之比为一常数，即 $\sin i/\sin r=n$ 。

注意

(1)木板应竖直插入水中，且所选角 r 的值应小于水对空气的临界角($48^\circ 36'$)。

(2)为较准确地判断三枚大头针是否在同一直线上，可自制一细纸筒。实验时通

过细纸筒观察，有助于更准确地确定三枚大头针的位置。

实例

实验序号	入射角 i (度)	折射角 r (度)	i/r	$\sin i/\sin r$	平均值 (折射率 n)
1	13.5	10	1.35	$\frac{0.233}{0.174} = 1.34$	1.34
2	20.5	15	1.37	$\frac{0.350}{0.259} = 1.35$	
3	28.5	20	1.40	$\frac{0.469}{0.342} = 1.37$	
4	33.5	25	1.34	$\frac{0.552}{0.423} = 1.30$	
5	42.5	30	1.42	$\frac{0.676}{0.50} = 1.35$	
6	52.0	35	1.49	$\frac{0.778}{0.574} = 1.37$	
7	58.5	40	1.46	$\frac{0.863}{0.642} = 1.33$	

说明

(1)本方法简单易行，适合于学生分组实验，通过实验探索折射定律。

(2)为便于测量，折射角 r_1 、 r_2 、……，可依次选定整数。

(3)如事先在木板上以直角坐标原点为圆心作一圆，并仔细分划好刻度线，则使用时更方便。

方法三

器材 光具盘 (J2501 型)，低压电源等。

操作

(参考实验 344 方法二)

(1)如图所示，将圆形光盘卡在矩形光盘上，并将半圆柱透镜紧固在圆形光盘上。

(2)让中央一束光线射向圆心，如图。当光盘转到某一角度时，可观察到光由空气进入玻璃时发生折射，且折射光线跟入射光线和法线在同一平面内，并且分别位于法线的两侧。

(3)依次改变入射角 i 的值 (令 i 分别为 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 等)，读出相应的折射角 r 值，分别算出它们的角度之比 (i/r) 和正弦值之比 ($\sin i/\sin r$)，填入相应的表格中 (参照本实验方法二)。

(4)比较实验结果可知，在误差允许范围内比值 $\sin i/\sin r$ 为一常数 (该值即玻璃对空气的折射率，近似为 1.5)。

注意

(1)用白光时，偏折程度越大色散越严重，致使折射光束散开，难以测出折射角的值。

(2)演示时，应仔细调整入射光线，使它射在半圆柱透镜的圆心O处，从而使从半圆柱透镜射出的光线沿直线传播，便于直接从圆形光盘上读出折射角r的值。

方法四

器材 激光光学演示仪（J2513型）。

操作

(1)将半圆柱透镜转轴插入度盘孔中，底边跟90° 90°直径重合，O O线垂直底面并通过中心。

(2)开启激光器，经过调整打束器和分束器，只有1#分光镜，形成一条明亮的光线。光线沿光盘半径入射到半圆柱透镜底面，即可见到光在底面发生的折射现象。如图(a)所示。

(3)量出入射角i、折射角r，算出 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 之值。

(4)转动圆盘，分别读出入射角i、折射角r的几组值，依次算出每组 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 值，比较后得折射定律。

说明

(1)研究折射现象时，可不予考虑底面同时发生的反射现象。

(2)若转动度盘，使光线沿半圆柱透镜半径方向入射，至底面时发生折射现象，如图(b)。由对应的i和r与图(a)中r和i相等，可说明光路的可逆性。

光在不均匀媒质中传播时路径会发生弯曲，如果该不均匀媒质具有一定的折射率梯度，光会在其中发生连续折射以及全反射。“海市蜃楼”（简称蜃景）就是由此而形成的一种自然奇观。

以下介绍两种模拟演示蜃景的方法。方法一是“自然扩散法”，操作简便但用的时间较长；方法二是“配液渗漏法”，能快速显示但操作要求较高。

方法一

器材 矩形玻璃容器，清水，酸性定影液（或食盐水、白糖水、酒精、苏打水、甘油等），氦氖激光器，虹吸管，浮槽等。

操作

(1) 先把液体 A（密度为 ρ_A 、折射率为 N_A ）注入玻璃容器里，放入一个浮槽（浮槽可用现成的聚苯乙烯泡沫塑料盒自制，在其底部钻许多细小的孔），然后利用虹吸管，把另一液体 B（密度为 ρ_B ，折射率为 N_B ， $\rho_B < \rho_A$ ）缓缓导入浮槽，使溶液 B 能平稳地渗过小孔加在液体 A 的表面上。过一段时间后由于扩散会形成一扩散层。扩散层中的介质是不均匀的，自上而下随深度形成梯度分布。

(2) 点燃激光器，使激光穿过液槽，由于光线穿过扩散层时发生折射和全反射，会连续偏折而弯向折射率大的一边，如图(a)所示。

(3) 移去激光器，然后在水槽旁放置一明亮的或适当发光的景物（小摆设等，本实验选用的是高约 5cm 的盆景亭台）。然后在容器另一侧观看该景物，就能看到“蜃景”（图 b）。

注意

(1) 采用不同的液体可以形成折射率梯度方向不同的扩散层，从而展现“上现蜃景”和“下现蜃景”，图(a)、(b)所示均属上现蜃景情况。

(2) 溶液的扩散性能与蜃景变化快慢有关，例如食盐水扩散较快，食糖水较慢。形成所需要的扩散层通常需几小时或十几小时。

实例

几组供参考的实验数据：

实例 1：（上现蜃景）

下层的溶液 A 用酸性定影液，深约 15cm；上层溶液 B 用清水，厚度约 4cm。扩散层随时间而增厚，在 24 小时内蜃景清晰，畸变不大。

实例 2：（上现蜃景）

下层溶液 A 用甘油，深 2~3cm；上层溶液用清水，厚度 4~5cm。甘油的密度比水大，折射率（约 1.40）也比水大。

实例 3：（下现蜃景）

下层溶液 A 用清水，深 4~5cm，上层溶液用酒精，厚度 2~3cm，酒精的密度为 0.8，比水小；酒精的折射率（为 1.36）比水（1.34）大。

方法二

器材 长方形的透明槽，盛水容器，虹吸管，导水管，食盐溶液，清水，氦

氦激光器，浮槽。

操作

(1)按图(a)所示装置仪器，显示蜃景的容器B是一长方形的透明槽(槽的底面积是 $40 \times 15\text{cm}^2$ ，高度为30cm)，槽中先放浓度为10%~20%的食盐溶液约2cm高度。容器A在B的上方，盛有同浓度的盐溶液，体积为2400ml。

(2)由导水管让清水流入容器A，流量为6ml/s，搅拌容器A中液体，使其浓度均匀减小。同时，通过虹吸管把稀释后的溶液导入容器B。调节虹吸管两管口高度差，使其流量为10ml/s。容器B内有一个浮槽(浮槽可用现成的聚苯乙烯泡沫塑料盒制成，在底部打许多细小的孔)，使溶液能平稳地从孔内渗入容器B，直到液面接近上边沿为止。

(3)用激光束射进容器B中的液体，就会看到光束明显地向下弯曲，如图(b)所示。这是由于该溶液的浓度随着液层高度的增加而连续的减小，折射率也相应减小的缘故。

(4)撤去激光器。在容器B后方约40cm、高度略低于槽底处放置实物(容器B应放在实验台边缘)并使光线照亮实物。这时在槽的前方向透过上述不均匀媒质去观察时可看到“上现蜃景”，如图(c)所示。由于媒质各处的折射率不同，看到的蜃景会产生形变。变换景物位置和观看角度，还可看到该实物其他形变的蜃景。

注意

(1)对长方形透明槽(即容器B)的尺寸无固定要求，但它的长度和高度影响蜃景成像的质量。

(2)适当控制流入容器A和B的流量可以调节液体浓度随高度变化的状况，得到所需的各种折射率随高度变化的不均匀媒质。从而得到各种“上现蜃景”。当溶液中折射率的梯度较大时，会出现光束分裂现象，产生非常有趣的蜃景。

(3)如先在容器A中盛部分清水，然后不断注入酒精，并用虹吸管把容器A中浓度逐渐增大的酒精不断导入容器B，则可在容器B中形成观察“下现蜃景”所需的不均匀媒质。(酒精的密度为0.8，比水小；折射率为1.36，比水大。)

说明

蜃景的模拟演示通常是利用两种不同液体间分子的自然扩散，形成折射率随高度渐变的扩散层来进行的。但液体分子的自然扩散速度很慢，通常需十几个小时后才能形成所需扩散层，且无法人为地控制其分布状况。

本实验采用“配液渗漏法”，能在几分钟内完成演示，且可人为控制折射率随高度分布状况，得到各类蜃景。

测定玻璃的折射率 (347)

测定玻璃等媒质的折射率，是光学中的一个基本实验。实验过程中需描绘出光进入玻璃时的入射光线和折射光线，用插针观察的方法（简称“插针法”）是解决这一问题的巧妙方法。它与直接用光束显示相比，更有助于培养学生的观察和动手能力。

方法一详细说明了用矩形玻璃砖完成有关测定的操作要点，注意事项及各种处理数据的方法；方法二、三、四分别以梯形玻璃砖（或棱镜）和半圆形玻璃砖为例，介绍了测定折射率的几种简易方法，适宜于学生课外实验。

方法一

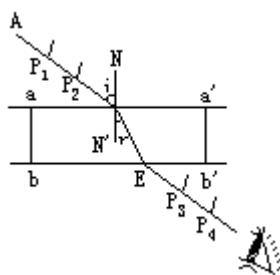
目的 学会用“插针法”测定玻璃的折射率和验证光的折射定律。

器材 矩形（或梯形）玻璃砖，直尺，量角器（或圆规），坐标纸，胶带纸，白纸，大头针，铅笔，绘图板等。

操作

(1)把白纸铺在绘图板（或木板）上，用透明胶带固定好位置。在白纸上画直线 aa' 作为玻璃砖的一个界面，过 aa' 中点 O 画界面的法线 NN' ，选定入射角，再画直线 AO 作为入射光线。把矩形玻璃砖放在白纸上，使它的长边跟 aa' 对齐，画出玻璃砖的另一边 bb' 。

(2)在直线 AO 上竖直插上两枚大头针 P_1 、 P_2 ，透过玻璃砖观察大头针 P_1 、 P_2 的像。移动视线方向，直到 P_1 的像被 P_2 的像挡住。再在观察的这一侧插两枚大头针 P_3 、 P_4 ，使 P_3 挡住 P_1 、 P_2 的像， P_4 挡住 P_3 和 P_1 、 P_2 的像（大头针应垂直于纸面插放， P_1 和 P_2 ， P_3 和 P_4 间的距离稍大些有利于减少误差，观测过程切勿使玻璃砖移动。）



(a)

(3)记下 P_3 、 P_4 的位置，移动玻璃砖和大头针。过 P_3 、 P_4 引直线 EB 与 bb' 交于 E ， EB 就表示沿 AO 方向入射的光线通过玻璃砖后传播的方向，连接 OE ， OE 就是玻璃砖内折射光线的方向，入射角 $i = \angle AON$ ，折射角 $r = \angle EON'$ 。（注意：必须认真画好光路图，准确求得点 E 和 O 的位置。）

(4)用量角器测出入射角 i 和折射角 r （可用放大镜助视）。

(5)采用同样方法，多测几组数据。研究它们的正弦函数值之比，看它们是否接近某个常数。求出几次测得的 $\sin i / \sin r$ 的平均值，作为测得的玻璃的折射率 n 。

注意

(1)直线 aa' 和 bb' 要利用直尺画，不可直接用铅笔靠着玻璃砖侧面划线，否则容易损伤玻璃砖的光学表面。

铅笔应削尖磨细，尽可能用硬铅笔。画出的直线 aa' 、 bb' 要与两平行界面严格对齐，画出射光线 P_3P_4 时应通过针孔，不能把针孔涂黑后通过黑点画。

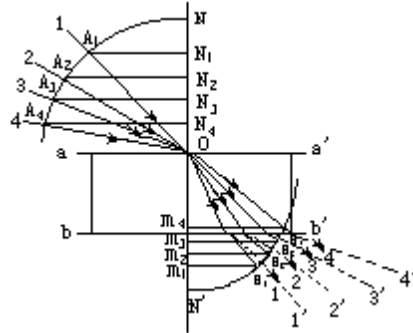
(2)入射角 i 应在 $40^\circ - 75^\circ$ 范围内取值。只用一组入射光线及折射光线时，入射角 i 应大于 60° ，不宜过小，否则折射角更小，相对误差大；也不宜过大，否则折射光的能量减小，且色散较严重，会导致通过玻璃砖看到的大头针虚像暗淡、模糊、变粗，

不利于插针的瞄准。

说明

(1)可用下列多图并一图的方法完成多组数据的观测，以减少操作步骤。

以O为入射点，画出入射角分别为40°、50°、60°、70°的入射光线。为避免搞错，可给各入射光线标上相应的标号1、2、3、4，然后用前述插针法测出各入射光线的出射光线所经途径（即针孔），并给相应针孔标上1 1、2 2、3 3、4 4，如图（b）。取下玻璃砖，连接各针孔，完成光路图，量出折射角等。



(b)

(2)为简化实验数据测量与处理，可采用下列方法：

以入射点O为圆心作圆弧（半径大些有利于减小相对误差），与入射光线分别交于A₁、A₂、……，与折射光线分别交于B₁、B₂、……。过A₁、A₂、……分别作法线NN'的垂线交法线于N₁、N₂、……；过B₁、B₂、……分别作法线的垂线交法线于M₁、M₂、……，如图（b）所示。

由于 $n = \sin i / \sin r$ ，又 $\sin i = A_1 N_1 / A_1 O$ ， $\sin r = B_1 M_1 / B_1 O$ ，故 $n =$

$$\left(\frac{A_1 N_1}{A_1 O} \right) / \left(\frac{B_1 M_1}{B_1 O} \right) = A_1 N_1 / B_1 M_1, \text{即玻璃的折射率等于 } A_1 N_1 \text{ 和 } B_1 M_1 \text{ 两条线}$$

段长度之比。这样，本实验中角度测量、查三角函数表和求正弦函数比值的计算等操作，就可以转化为线段长度的测量及其比值的计算。

(3)用图线法处理数据可减小测量误差，剔除异常数据，并可验证折射定律。具体方法是：以折射角的正弦值 $\sin r$ 为横坐标，以入射角的正弦值 $\sin i$ 为纵坐标，利用实验测得的数据，在坐标纸上作出 $\sin i - \sin r$ 图线，它应是一条通过坐标原点的直线，该直线的斜率就是待测的折射率 n 值。

分析 因为折射率 $n = \sin i / \sin r$ ，所以 n 的相对误差

$$E_n = \left| \frac{\partial n}{\partial i} \right| \cdot \frac{\Delta i}{n} + \left| \frac{\partial n}{\partial r} \right| \cdot \frac{\Delta r}{n} \\ = \operatorname{ctg} i \cdot \Delta i + \operatorname{ctg} r \cdot \Delta r。$$

因此当入射角 i 和折射角 r 的测量误差 Δi 和 Δr 一定时， i 和 r 取得大一些， E_n 将会小一些。

实例

入射角 (i)	折射角(r)	入射角正弦 (sin i)	折射角正弦 (sin r)	sin i/sin r
40 °	25.2 °	0.643	0.427	1.51
50 °	30.7 °	0.766	0.511	1.50
60 °	35.1 °	0.866	0.575	1.54
70 °	38.6 °	0.940	0.624	1.51

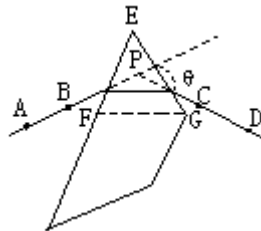
玻璃折射率 n (平均值) 1.52。

方法二

器材 梯形玻璃砖，木板，铅笔，白纸，大头针，量角器等。

操作

(1) 在平铺于木板的白纸上画出等边三角形 EFG (边长等于梯形玻璃砖 60° 底角的腰长)，在靠近底边 FG 处，画上线段 BC 与底边平行。如图所示。



(2) 把梯形玻璃砖 (代替三棱镜) 放在纸上，使其 60° 角的两边分别与图中 EF、FG 重合。贴靠玻璃砖左右折射面，在紧靠 B、C 两点处各竖直地插一个大头针，然后从右侧向 EG 面观察，改变视角，使看到的大头针 C、B 的虚像和玻璃砖中线段 BC 都在同一直线上。

(3) 保持眼的观察角度不变，再插上大头针 A 和 D，使四枚针看起来都在同一直线上。

(4) 取走玻璃砖，画出光路 AB 和 CD，延长 AB 和 DC 交于 P 点 (如图中虚线所示)，则 角即为光线通过三棱镜的最小偏向角。

(5) 量出 角 (可用放大镜助视)，则玻璃折射率 $n = \sin\left(\frac{a + \theta}{2}\right) / (\sin a / 2)$ 。式

中 为三棱镜的顶角。

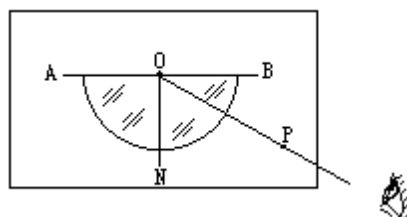
注意 如用梯形玻璃砖的 45° 底角，当作顶角为 45° 的三棱镜完成上述测量，因最小偏向角较小，测出结果的相对误差要大一些。

方法三

器材 半圆形玻璃砖 (半圆柱透镜)，白纸，铅笔，量角器，直尺，大头针等。

操作

(1) 把一张白纸平铺在木板上，画一直线 AB，并过其中部 O 点作法线 ON。取一枚大头针竖直插在 O 点，使半圆形玻璃砖的直径与 AB 线对齐，且将其圆心贴近大头针。



(2) 从 N 处开始，透过玻璃砖观察大头针 O 的像，并沿 NB 方向逐渐增大视线与 ON

的夹角。反复观察，并用插针法找出大头针的像恰好消失时的视线方向 PO 。如图示。

(3)由光的折射规律知， $\angle PON$ 就是由 O 点大头针发出的光线以接近 90° 的入射角进入玻璃后的折射角，即玻璃的临界角 C 。

(4)量出 $\angle PON$ 的大小并查得其正弦值，由 $n=1/\sin C$ 就可求得玻璃的折射率。

注意 本实验所依据的原理，主要是处于 O 点的大头针与玻璃砖间虽十分贴近，但其间总会有一极薄的空气隙，由大头针发出的光从空气进入玻璃发生折射才会出现上述实验现象。一旦排除了大头针 O 与玻璃间空气隙（如用水膜代替两者之间空气隙）透过玻璃砖就很难找到大头针像消失的位置。

方法四

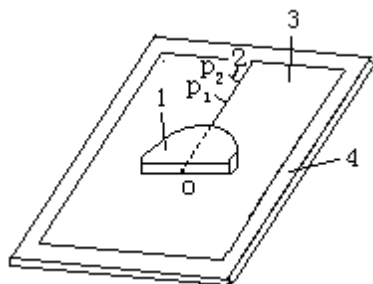
目的 用半圆形玻璃砖测定玻璃的折射率。

器材 半圆形玻璃砖，大头针，白纸，木板，毫米刻度尺等。

操作

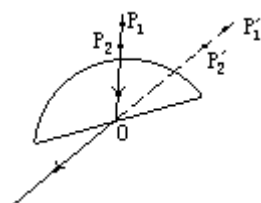
(1)用刻度尺量出半圆形玻璃砖的直径 d ，算出半径 $r=d/2$ ，然后确定圆心 O 的位置记在玻璃砖上。

(2)在白纸上画一条直线作为入射光线，并在线上竖插两枚大头针 P_1, P_2 。将玻璃砖置于白纸上，使入射线与玻璃砖直径边垂直。并过圆心 O ，如图 (a) 所示。

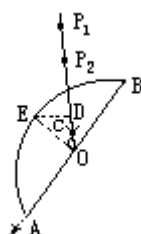


1. 半圆形玻璃砖 2. 大头针 3. 白纸 4. 木板

(a)



(b)



(c)

(3)眼睛向着玻璃砖直径边，透过玻璃砖观察 P_1, P_2 的像。然后慢慢地使玻璃砖绕 O 作逆时针转动，同时调整视线，使观察点与 P_2, P_1

的像 P_1', P_2' 处在一直线上，如图 (b) 所示。

(4)继续使玻璃砖缓慢转动，并不断调整视线，作上述操作(3)的跟踪观察，直至视线沿着直径恰好看不到 P_2 和 P_1 的像时，停止转动玻璃砖。

(5)在白纸上记下玻璃砖位置及圆心O，用毫米刻度尺在图中作EO、AB、ED、P₁O，如图(c)所示，量出ED与EO的长度，据

$n = \frac{1}{\sin C} = \frac{EO}{ED}$ ，确定玻璃砖折射率。

测定液体的折射率 (348)

这里着重介绍了利用简易器具测定液体折射率的方法。方法一、二是利用水面的镜面反射和水中物点折射成像的规律；方法三是直接运用折射定律；方法四巧妙地运用了全反射现象及其规律；方法五依据的是组合透镜的有关特性，通常称之为“液体透镜法”；方法六是利用测量视深度的方法估算折射率的。

方法一

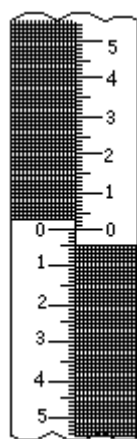
器材 长方型玻璃缸（也可用烧杯、广口瓶等容器），自制刻度尺等。

刻度尺的制作方法

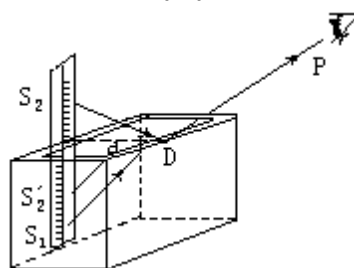
如图（a）所示。图中阴影部分为黑色，右上方数字应颠倒并反写，这样经反射后成的像就为正立的阿拉伯数字。

操作

(1)在长方型玻璃缸内盛满水，再把刻度尺紧挨着玻璃缸壁竖直放置，并使刻度尺的0刻度线刚好与水面相平，如图（b）所示。



(a)



(b)

(2)在刻度尺的对面P点观察水面，能清晰地看到左、右并在一起的两个刻度，它们分别是刻度尺在水中部分的刻度和露出水面部分刻度在水中的像。

(3)读取你看到的刻度尺在水下最低点 S_1 的刻度（左侧）以及跟这个刻度相对齐的水上 S_2 的像 S_2' 的刻度（右侧）。

(4)量出玻璃缸壁D到刻度尺表面的距离d。

(5)根据反射定律和折射定律可推得公式：

$$n = \sqrt{\frac{d^2 + S_1^2}{d^2 + S_2^2}}$$

代入测量的数据，就可计算出水的折射率。

说明 如果不自制刻度尺，用左右两边都有刻度的刻度尺，把浸没在水下部分的一边刻度用黑纸贴没，也可代替，但这时读取 S_1 和 S_2 要略为困难一些。

方法二

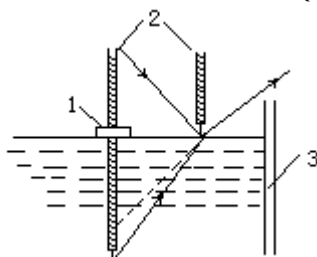
器材 软木塞（薄圆柱形），刻度尺，圆珠笔芯，水槽，清水等。

操作

(1) 在软木塞中心钻一小孔，将圆珠笔芯从该小孔垂直插入软木塞中。

(2) 把带有笔芯的软木塞放入盛水近满的水槽中，使之浮在水面上，笔芯保持垂直。

(3) 调节笔芯在软木塞上、下侧的长度以及软木塞等与器壁间距离。使沿器壁上沿看去，软木上方笔芯末端在水中反射所成的像，与水面下方笔芯头由于水折射所成虚像恰好重叠在一起，如图示。这时应保持观察角度不变，另取一支原珠笔芯竖直于水面上方，使其笔端亦与前述笔芯头折射所成虚像重合（即标志出入射点 O 的位置）。



1. 软木塞 2. 笔芯 3. 器壁

(4) 测出两原珠笔芯间的水平距离 R ，软木塞上笔芯在水面上方的长度 L_1 ，整个原珠笔芯的长度 L ，则由折射定律与反射定律可得被测液体的折射率

$$n = \sqrt{\frac{(L - L_1)^2 + R^2}{L_1^2 + R^2}}$$

一组实验数据是： $L=10.4\text{cm}$ ， $L_1=2.6\text{cm}$ ， $R=8.4\text{cm}$ ，可算得 $n_{\text{水}}=1.36$ 。

方法三

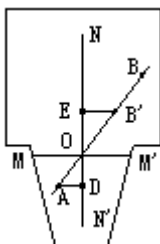
器材 三合板（或硬纸板），大头针数枚，玻璃杯，铅笔，圆规，刻度尺，清水等。

操作

(1) 将三合板加工成上大下小的形式，使它正好能插放在玻璃杯里，如图示。事先在板上画互相垂直的两条直线 MM' 和 NN' ，交点

为 O 。在 O 点和板的下部任意一点 A （为减小误差， OA 不能太短， $\angle AOD$ 可取 30° 左右）各插一枚大头针，然后将板竖直插入玻璃杯中。

(2) 向杯内注入清水，使水面与 MM' 平齐。从 A 上部沿板面看 A 、 O 处的两枚大头针，使视线与两大头针成一直线，并在三合板的上方（尽可能高）插入另一枚大头针 B ，正好挡住 A 、 O 。此时沿 B 看去， B 、 O 、 A 三者成一直线。



(3) 取出三合板，用铅笔连接 AO 和 BO （可看出它们并不在同一直线上）。在 OB 上

截取 $OB = OA$ ，过 A 点和 B 点分别作 NN 的垂线交 NN 于 D 点和 E 点。

(4) 测出线段 AD 和 BE 的长 a 和 b，由折射定律，可知水的折射率 $n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{b}{a}$ 。

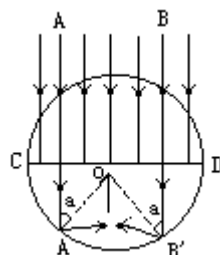
方法四

目的

- (1) 利用全反射现象测定水的折射率；
- (2) 学会用转换方法测长度和角度
- (3) 加深对全反射现象及有关规律的理解。

原理

如图 (a) 示，当平行光垂直于 CD 射入截面为弓形的水柱内时，方向将不改变。设其中两条光线 AA' 及 BB' 在 A 点及 B 点的入射角 ($\angle AAO$ 和 $\angle BBO$) 刚好等于水对空气发生全反射的临界角。则这两条光线及位于其外侧的光线抵达水底界面处时，都将发生全反射。故水底部只有 AB 这段圆弧才是亮的。若测得弧线 AB 的长 l 及圆周长 L，则临界角 $\alpha = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{l}{L} \right) \cdot 2\pi \text{ 弧度} = \frac{l\pi}{L} \text{ 弧度}$ 。



(a)

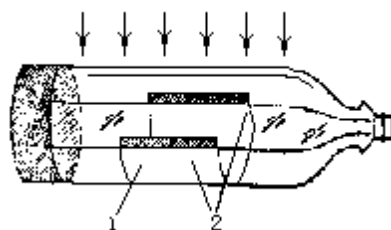
于是由 $n = \frac{1}{\sin \alpha}$ 可求得水的折射率 $n_{\text{水}}$ 。

器材 塑制可乐饮料瓶，狭纸条 (1cm × 30cm) 及半透明薄白纸 (约 12cm × 16cm) 各 1 张，刻度尺，红色原珠笔及平行光源 (可用 60-100W 白炽灯) 等。

操作

(1) 夜晚或在暗室内，半盛有半瓶左右清水的无色透明可乐瓶，水平横放在白炽灯光下约 1.5m 处 (这时灯光可近似看作平行光)。将半透明纸紧裹在瓶下部 (约半周)。从上往下看时，可发现水底白纸中部为亮区，两侧为暗区，见图 (b) 所示。且很易分辨出作为亮区与暗区分界处的两条直线。

(2) 使白纸上预先画好的一条红色细直线跟亮区与暗区的一条分界线对齐，然后用逐步逼近法尽可能准确地标出另一条明暗界线在白纸上的位置。



1. 半透明纸 2. 清水面

(3) 取下白纸，用刻度尺测出两界线间距 l；另用狭纸条绕可乐瓶

侧壁一周并截取其周长，用刻度尺测得其长度L。则临界角 $\alpha = \frac{l\pi}{L}$ 。

(4)计算。经实测，一组参考数据为： $l=76\text{mm}$ ， $L=278\text{mm}$ ，则

$$\text{临界角}\alpha = \frac{l\pi}{L} \text{弧度} = \frac{76 \times 3.14}{278} \text{弧度} = 0.8553 \text{弧度} = 49.03^\circ ;$$

水的折射率 $n = 1/\sin \alpha = 1/\sin 49.03^\circ = 1/0.7547 = 1.32$

查表可知水折射率为1.33。

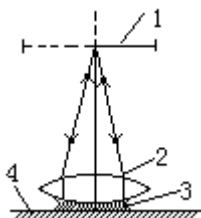
说明

(1)据实验原理知，瓶下方亮区与暗区分界线是由于全反射引起的。可推知若在一定范围内使瓶内水面涨落（改变瓶内贮水量，使水位升高或降低）。该亮区的宽度将不会发生变化。实验时可观察这一现象。因此，本实验对瓶内贮水量多少要求并不严格。

(2)本实验中，全反射实际发生在塑瓶器壁与空气的界面处，但由于瓶壁很薄且其折射率与水相差无几，故对所成亮区宽度的影响可不予考虑。

方法五

器材 双凸透镜，平面镜，夹子，大头针，支架，球径计，米尺及待测液体等。



1.大头针 2.双凸透镜 3.待测液体 4.平面镜

原理 如图示装置，令凸透镜的焦距为 f_1 ，这个透镜和平面

凹液体透镜 组合透镜的焦距为F。则 $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$ （ f_2 为液体透镜

的焦距）。若 f_1 和F已知，从上式即可求得 f_2 的值，又 $\frac{1}{f_2} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\infty}\right) =$

$$\frac{n-1}{r} \quad (f_2 \text{和} r \text{均为负值})，故n = 1 + \frac{r}{f_2}。$$

操作

(1)如图所示，平面镜放在支架的底盘上，用夹子把大头针水平地固定在平面镜的上方，然后将凸透镜放在平面镜上。

(2)改变大头针上下的位置，使大头针和它自己的像出现在同一位置（可用视差法判断）。测得这一点到透镜的距离，即为透镜的焦距（ f_1 ）。

(3)移去透镜，滴几滴液体在平面镜上，再把透镜放在液体上，得到一个凸（玻璃）透镜和平凹（液体）透镜的组合透镜。组合透镜的焦距（F）仍可用上法求得。

(4)用球径仪测得双凸透镜的曲率半径r，根据F和 f_1 可计算出

液体透镜的焦距 f_2 ，则待测液体的折射率为 $n = 1 + \frac{r}{f_2}$ 。

方法六

器材 纸杯，铅笔，刻度尺，清水等。

操作

(1)首先用铅笔在杯内底上画出杯底的一条直径，如图（a），再往杯里注满水。

(2)由于水对光的折射，看上去杯子好像变浅些。这时，把铅笔尖顶在杯子的外壁

上，看起来和杯底直线对齐。然后从杯顶俯视，前后移动视线，同时调整笔尖的位置，使它从前后各位置看去，铅笔尖都和直线的一端对齐，见图（b）（水在杯壁处所成弯月面会使该处发生失真，观察过程应加以注意）。

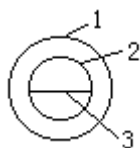
(3)在铅笔尖所指的合适位置上，作出记号，测得这个位置到水面垂直距离(视深) h ，水深 H 以及杯底直径 $2R$ 。

(4)计算

由折射定律及图（c）示，知水的折射率可由下式计算：

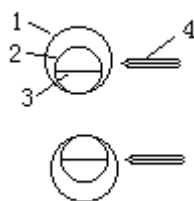
$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{R / \sqrt{R^2 + h^2}}{R / \sqrt{R^2 + H^2}} = \sqrt{\frac{R^2 + H^2}{R^2 + h^2}}$$

当杯子足够深， i 和 r 很小时，有 $n \approx \frac{i}{r} \approx \frac{H(\text{实际深度})}{h(\text{视深度})}$ 。

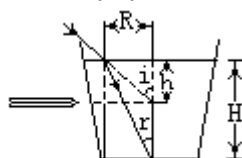


1. 杯壁 2. 杯底 3. 杯底直线 4. 铅笔

(a)



(b)



(c)

建议 本实验也可用合适的玻璃杯或塑料杯替代纸杯，替代时可另剪一与杯底大小相同的圆纸片，画上直径后置于杯内底部。

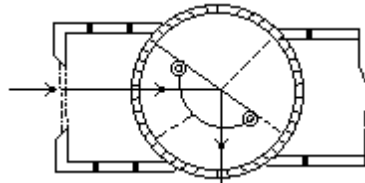
全反射、临界角 (349)

方法一

器材 光具盘，低压电源等。

操作

(1)将圆形光盘卡紧在矩形光盘上，然后把半圆柱透镜紧固在圆形光盘上，使其毛面向里，底边跟 90° 横线重合， 0° 线通过中心。使光栏只留中间一条缝，使光线沿半圆柱透镜的半径射到直边，并调整入射光线跟法线的夹角。



(2)当入射角较小时，可看到一部分光线从直边折射到空气中，一部分光反射回玻璃逐渐增大光的入射角，可发现，折射光线离法线越来越远，且越来越弱，反射光线越来越强。当入射角增大到某一角度时，折射光线消失，光全部反射回玻璃中，这种现象即为全反射。刚好发生全反射时的入射角叫临界角（玻璃对空气的临界角约 42° ）。当入射角大于临界角时，就能发生全反射。

方法二

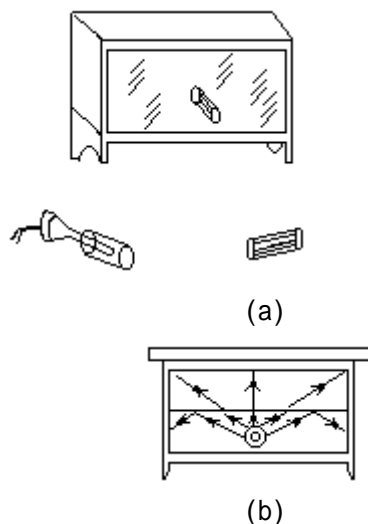
器材 光的全反射演示器，低压电源，清水等。

全反射演示器的构造如图(a)，它主要分两部分：(1)铁皮制长方形水槽，前面镶有玻璃，后壁中下部装有一防水玻璃管。(2)隙缝光源，可以在防水玻璃管内自由转动和抽出，它由一个6-8V的长直丝灯泡外套一铁皮灯管组成，灯管的一侧开有一条纵向狭缝，另一侧开有5条纵向狭缝。

操作

(1)往水槽内注入清水，使液面达槽高约一半处。把隙缝光源装在防水玻璃管内，接通电源，使隙缝中只射出一束狭窄光线，转动光源，可得到各种不同角度的直射光线和通过液面射入空气的折射光线。

(2)当入射角增大到某一角度时，可看到折射光线消失，只剩下反射光线，即发生全反射（水对空气的临界角为 $48^\circ 36'$ ）。



(3)使隙缝光源射出5束光线，且中间一条光线垂直射向水面，可看到最外侧两条

光线发生全反射，居中3条光线由于入射角小于临界角，不发生全反射，如图(b)所示。

注意

- (1)电源电压不要超过8V，交直流均可用。
- (2)演示完毕将水倒净拭干，防止演示器生锈。

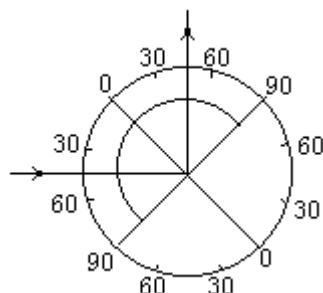
方法三

器材 激光光学演示仪(J2513型)。

操作

(1)将半圆柱透镜转轴插入圆盘中间的孔中，底面跟 $90^\circ-90^\circ$ 直径重合，0°线垂直底面并通过中心。

(2)开启激光器，调整扩束器和分束器，只用1#分光镜，形成一条明亮的光线，沿光盘半径入射到圆柱面上，即可看到光在底面发生的反射和折射现象。



(3)转动度盘，开始入射角较小时，可看到由底面反射的光线亮度较弱，折射线亮度较强，随着度盘转动，入射角增大，反射角和折射角也增大，反射光线亮度逐渐增强，折射光线亮度逐渐减弱。

(4)继续转动度盘，当入射角达到某个值时，折射角恰好为 90° ，光线发生掠射。记下此时的入射角A，即为玻璃对空气的临界角。其值

$$\text{为 } A = \sin^{-1} \frac{1}{n}。$$

(5)当入射角大于临界角A时，界面没有折射光线，而全部被反射，即发生全反射现象。如图。

方法四

器材 硬币，玻璃杯，水槽，清水等。

操作

在盛有清水的水槽底部放置一枚硬币，把玻璃杯口朝下竖直扣在硬币上(勿让杯内空气逸出)。然后，从浸入水中的玻璃杯的侧面部分观察，不论从那个方向看，都观察不到杯中硬币。这是由于从硬币发出的光线都在水与空气交界处发生全反射的缘故，见图所示。



注意 水槽内水的深度是能否造成全反射的关键，只有水足够深时，才能造成图所示情况。这时从杯四侧看到水中的杯壁像镀了一层银似的。

说明

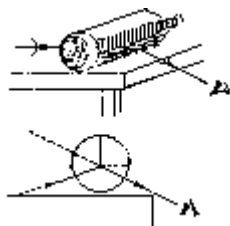
- (1)从杯子正上方能看见硬币。

(2)可变换水的深浅观察有关现象，并加以比较。

方法五

器材 塑制可乐饮料瓶，报纸（或画页），清水等。

操作



(1)在可乐饮料瓶中注入半瓶清水，旋紧瓶盖后横置在桌边缘，瓶下压有一张报纸（或画报）。

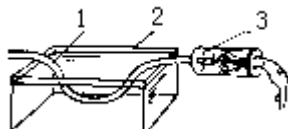
(2)观察者从瓶侧面比瓶内水平面稍低处，斜向上看，如图所示。可发现，原来清澈透明的水面好像镀银的镜面，熠熠发光，并且可看到，“镜”中所映现的却是瓶另一侧报纸上的字迹的像。这是由于该光线在水面与空气交界处发生了全反射的缘故。

注意 可乐瓶应选用无色透明的，且注意使瓶的一侧向着光线明亮处。

光导纤维 (350)

方法一

器材 玻璃棒（或有机玻璃棒，直径6—10mm），玻璃水槽，电珠，暗盒，电源，清水等。



1. 弯玻璃棒 2. 玻璃木槽 3. 装有电珠的暗盒

操作

(1)把玻璃棒在灯焰上加热后弯曲成“~”形，把电珠装在一用黑纸等做成的暗盒中，然后将有关器件按图所示装置。

(2)点亮电珠，当光从弯玻璃管的右端射入，从弯管的左端可看到有光射出。这是因为射入玻璃棒内的光线，在棒内发生多次全反射，沿着锯齿形路线沿棒的另一端射出来。

(3)在玻璃水槽内注入清水，由于玻璃棒对水的临界角较大，光在棒内有的界面上发生全反射的条件被破坏。这时从棒的左端观察到光的强度明显减弱。

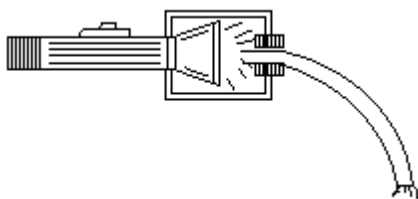
说明 如果用氦氖激光器作光源，只要让光束直接从玻璃棒端面垂直射入即可。

方法二

器材 手电筒，自制暗盒，有机玻璃棒（或尼龙线、玻璃纸）等。

操作

(1)把有机玻璃棒弯成弧形。用硬纸板和黑纸做成一圆桶形暗盒，恰能罩没手电筒前端。暗盒一端钻一孔，孔的大小以恰能插入弯玻璃棒为宜，如图所示。



1. 手电筒 2. 暗盒 3. 弯曲玻璃棒

(2)在暗处打开手电筒，从弯曲有机玻璃管下端可看到明亮的光，利用该光线还能辨认报纸上的文字。

注意 有机玻璃棒的两个端面要尽可能平整。

建议 弯曲玻璃棒亦可用尼龙线替代。具体方法是：取钓鱼用尼龙丝线3—4m，剪成约20cm长的15—20根，一端排齐并扎紧。演示时可发现，不论把尼龙线弯向何方，尼龙线下端面上的亮度依旧，效果较好。

方法二

目的 模拟光导纤维通讯。

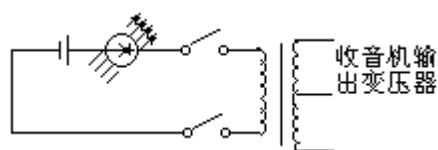
原理 用发光二极管将半导体收音机的电讯号转换成光信号，在弯曲的有机玻璃棒中传导，最后由光敏二极管将光信号还原成电信号，经放大后由扬声器播出声音。

器材 带乙类推换输出的半导体收音机，发光二极管，信号接收器（具体线路见后），弯曲的有机玻璃棒，小槽，袖珍电筒，毛玻璃，蓖麻油等。

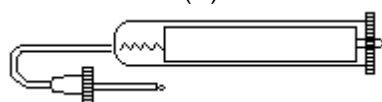
操作

(1)将半导体收音机的扬声器拆下，换上一节干电池和一个发光二极管，如图(a)。

电池和发光二极管可装在一个塑料圆筒中如图 (b)。插头插进耳机插孔时，自动将扬声器断开。



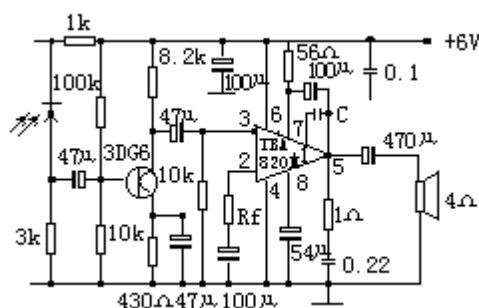
(a)



(b)

(2) 选用一根直径 8—10mm、长约 1m 的实心有机玻璃棒，先用颗粒较大的粉笔灰沾上水用软布打磨有机玻璃棒表面，再用牙膏反复打光，直至有机玻璃棒表面没有疵点、划痕。然后在电炉上方将有机玻璃棒缓缓弯成适当的形状。

(3) 信号接收器线路如图 (c) 所示，光敏二极管可选用 2DU 或 3DU。



(c)



(d)

(4) 实验装置如图 (d) 所示。先用袖珍手电筒对着有机玻璃棒一端，将毛玻璃放在有机玻璃另一端，如果在毛玻璃上看到一个清晰的光斑，说明光导纤维工作正常。

(5) 将袖珍手电换用接在半导体收音机上的发光二极管，将毛玻璃换成接收器的光敏二极管。打开收音机，可在接收机中听到半导体收音机的声音。

(6) 将蓖麻油倒入塑料盒中，油把一部分有机玻璃棒浸没，可发现接收器不响了。

棱镜的折射 (351)

方法一

器材 光具盘, 低压电源, 蜡烛, 正三棱镜等。

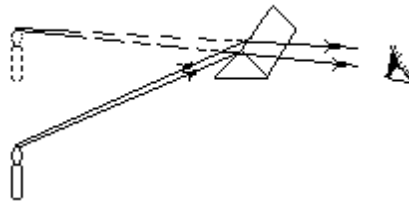
操作

(1) 观察棱镜所成的虚像

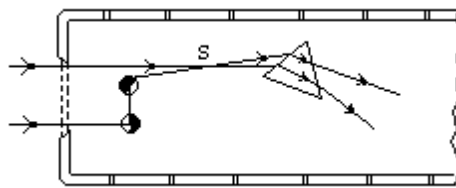
点燃一支蜡烛, 把三棱镜置于蜡烛前, 使三棱镜的一个底面向下, 棱角向上。通过棱镜可以看到蜡烛的虚像, 它比蜡烛的实际位置高。这是由于光线通过棱镜时向底边偏折的结果。

(2) 用矩形光盘演示成像的光路

按图 (b) 所示把有关仪器装好, 一束光线直接射入光盘, 另一束光线经过两个条形小平面镜反射后射入光盘, 两束光线交于 S 点后射向等边三棱镜。S 点相当于发光的物点, 射入棱镜的是发散光束, 经过棱镜折射后射出的也是发散光束。表明棱镜这时成的是虚像。



(a)



(b)

注意 演示图 (b) 时若用白光, 应使偏向角小些, 以减轻色散现象。

方法二

器材 光具盘, 低压电源等。

操作

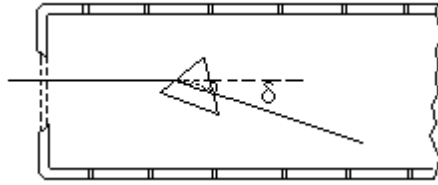
(1) 如图 (a) 所示, 把等腰直角棱镜装在光具盘上。在光栏处插上滤光片, 只使一束红色光射到三棱镜的侧面, 并能从另一侧面射出, 可看到光束经棱镜两次折射后, 向下方偏折, 图中 θ 为偏向角 (转动棱镜, 可看到入射角不同时偏向角 θ 也不同)。

(2) 使三棱镜的底面向上, 重复上述演示, 可看到光束经棱镜折射后, 向上方偏折; 归纳上述两种情况, 可知光通过三棱镜总是向底面偏折。

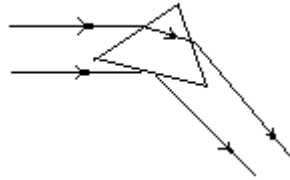
说明

(1) 本实验用 J2501 型光具盘、哈特尔光盘、激光光学演示器等都可演示。

(2) 如有大小合适的正三棱镜, 还可演示“最小偏向角”。方法是: 按图 (b) 所示, 取两条互相平行的光束, 其中一束射向棱镜一下侧面, 经折射后从另一侧面射出, 另一束光入射到棱镜底面并经该底面反射。转动棱镜, 当观察到出射光线和入射光线的位置相对于棱镜成对称时, 光线偏折最小。这时的偏向角 θ_{\min} 即为最小偏向角。在最小偏向角时, 偏向角的变化最小, 容易作准确的测定, 且这时偏向角和棱镜材料的折射率有简单的关系, 故光学实验中常通过测定最小偏向角测定折射率 (参见实验 347 方法二)。



(a)



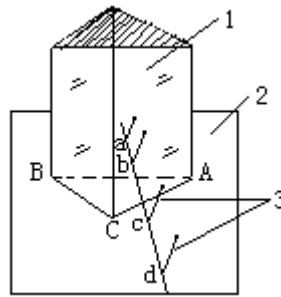
(b)

方法三

器材 三棱镜，白纸，铅笔，直尺，大头针数枚，量角器等。

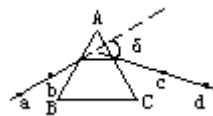
操作

(1)将棱镜放在桌面上的一张白纸上，画下它的轮廓ABC，如图(a)。移去棱镜，在纸上的轮廓线AB边一侧画一条线作为入射线，并在该入射线上竖直插二枚大头针a、b。



1.三棱镜 2.白纸 3.大头针

(a)



(b)

(2)将棱镜放回已画好的轮廓上，然后从棱镜的另一侧观察入射线及其上的大头针，依次再竖直插上二枚大头针c、d，使c恰遮没a、b的像，d遮没a、b、c的像(即看到它们似在同一直线上)。

(3)移去三棱镜，连接大头针c、d的针孔并延长a、b的延长线相交(设夹角为 δ)。可发现，入射光线ab经棱镜折射后向底边偏折，夹角 δ 即为偏向角，如图(b)

(4)换用顶角为 45° 的棱镜重复上述实验，并使入射光线以相同的入射角进入棱镜侧面。可发现顶角减小后偏向角也减小。

注意 大头针应竖直于纸面插，且a、b之间，c、d之间距离不宜太近。

说明

(1)可用梯形玻璃砖的 60° 底角、 45° 底角代替三棱镜完成上述实验。

(2)如有条件，可再自制一个水三棱镜，用以定性说明偏向角 δ 与棱镜材料的折射率有关。(在保证入射角和顶角相同条件下，折射材料的折射率小，偏向角也减小。)

全反射棱镜 (352)

从用途来分，棱镜可分为反射棱镜和折射镜两大类。反射棱镜的主要用途是改变光线传播的方向，虽然也可以用两块以上的平面镜组合起来，达到改变光线传播方向的目的，但使用反射棱镜有以下优点：

(1)稳定性好（把几块平面镜固定在一起并保持稳定是比较困难的）；

(2)反射率高（反射系数接近于 100%，而平面反射镜在镀银和镀铝情况下反射系数在 80-90%之间）；

(3)棱镜成像不存在多重像的现象。（用来制作平面镜的玻璃基板不是严格的平行平面玻璃，会出现双重像的干扰。）

所以，在精密光学实验和光学仪器中经常采用棱镜，其缺点是加工困难，成本高且容易产生色散。

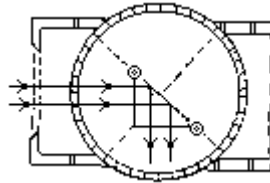
方法一

器材 光具盘，低压电源等。

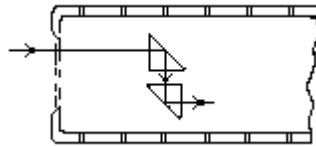
操作

(1)演示一次全反射

按照图 (a) 把全反射棱镜（等腰直角棱镜）固定在圆形光盘上。光栏开两条缝（其中一条缝加上滤色片）。当光线垂直地照射到全反射棱镜一个直角面，进入棱镜后对斜面的入射角为 45° ，因其大于临界角，而发生全反射，并从另一直角面垂直地射出。射出的光线对入射光线改变了 90° 角。（像和物体或上下颠倒，或左右对换。）



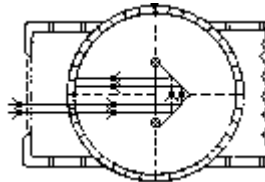
(a)



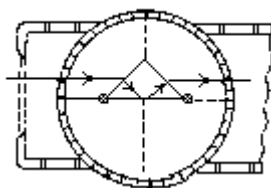
(b)

(2)演示潜望镜原理

如图 (b) 所示，把两只全反射棱镜装在光盘上，选取一条光束，即显示出潜望镜光路。



(c)



(d)

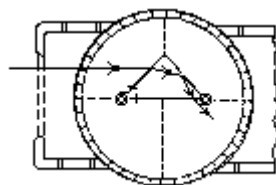
(3)演示两次全反射

如图(c)示,使光束垂直于斜面射入棱镜,经过两直角面两次全反射,最后光线改变 180° 角,再从斜面射出,像和物体的上下方向是颠倒的,这样使用方式的棱镜叫普柔式棱镜。

(4)演示两次折射和一次全反射

如图(d)示,使光束平行于底面投射到全反射棱镜的一直角面,经过斜面的全反射后从另一直角面射出。当入射光平行光时,出射光仍为平行光,但排列顺序填倒了。

如图(e)示,使光束平行于底面投射到全反射棱镜的一直角面,但入射线离底面远些(在直角面中点以上),则入射光线将在另一直角面上发生全反射后再通过底边射出。



(e)

说明

(1)本实验亦可用激光光学演示仪、磁性光盘和光具等演示,方法基本相同。

(2)本实验亦可用氦氖激光器替代平行光源,演示光在等腰直角棱镜中发生全反射的各种情况,效果较好。

方法二

器材 幻灯投影机,投影片(胶片画面尺寸 $35\text{mm} \times 24\text{mm}$ 、135胶卷摄制),全反射棱镜,屏幕等。

操作

(1)取一张投影片,使画面正立,插入幻灯投影机,投射在屏上的像是倒立的。

(2)将全反射棱镜置入投影幻灯机成像光路上,如图(a)所示,使得光束在斜面发生全反射后再从另一直角面射出,显示在屏上的像是正立的。



(a)



(b)

说明 某些物理现象的演示(例如毛细现象、表面张力、液体的临界状态等)常需要借助投影幻灯以扩大可见度,美中不足的是在屏上所成的像是倒立的。本方法说明,利用全反射棱镜可使倒立的像转换成正立的像。

建议 本实验的另一简易演示法:

首先，使烛焰（或发光物）经凸透镜（相当于投影幻灯镜头）折射后在屏上成清晰倒立的像。然后，在其成像光路上（一般选光路较窄的部位）置入一全反射棱镜，如图（b）所示，稍加调节。即可在屏上成一正立的烛焰像。

凸透镜成像 (353)

方法一

器材 光具座 (J2507 型), 低压电源, 蜡烛, 135 投影片等。

操作

(1) 在光具座上, 以蜡烛 (或平行光源照亮“1”字屏, 或平行光源照亮投影片等) 作为“物”, 把它们安装在滑块上, 然后依次另外两个滑块上安装焦距为 5cm (或 10cm) 的凸透镜和光屏, 并调节它们等高共轴。

(2) 把凸透镜的滑块固定在导轨中间, 把作为物的蜡烛等置于二倍焦距以外处某一位置, 移动光屏, 使屏上呈现清晰的像 (确定该实像位置时应注意观察: 光屏在成像位置附近移动时, 像由模糊到清晰再到模糊的过程)。把物体位置、像的位置以及像的性质 (虚、实、倒、正, 放大、缩小) 记在相应的表格中。

(3) 使物体逐步移近透镜 (即逐步缩短物距 u), 同时改变光屏的位置, 总使像成在屏上, 观察成像情况的变化, 并且把物距分别为 $u=2f$ 和 $2f > u > f$ 时的成像情况及实验结果填在相应的表格中。

(4) 当物距缩短到等于焦距 ($u=f$) 时, 光屏无论放在距透镜多远处, 屏上都得不到像。(这时物体发出的光, 通过透镜折射后是平行光。)

(5) 当物体位于焦点之内 (即 $u < f$) 时, 光屏上仍得不到物体的像, 但从光屏一侧对着透镜能观察到一个跟物体位于透镜同侧的正立、放大的虚像。

透镜种类	物体位置	像的位置	像的大小	像的虚实	像的正倒
凸 透 镜	$u > 2f$	$f < v < 2f$	缩小	实像	倒立
	$u = 2f$	$v = 2f$	等大	实像	倒立
	$2f > u > f$	$v > 2f$	放大	实像	倒立
	$u = f$	$v \rightarrow \infty$			
	$u < f$	$v < 0$	放大	虚像	正立

(6) 验证成像公式

使物距 u 分别为某些取定值, 测出各次所成像的像距 v 值, 由成像

公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 计算出透镜的焦距值, 并与该透镜的标称值相比较。

注意

(1) J2507 型光具座的有效刻度为 0-900mm, 要在这给定的有限长度内使凸透镜成实像, 且在不超出光具座范围内安置物和屏, 则凸透镜焦距 f 应满足关系 $f \leq l/4$ (l 为光具座的有效长度)。故本实验应选用光具座所附 $f=100\text{mm}$, 或 $f=50\text{mm}$ 的双凸透镜, 不能选用 $f=300\text{mm}$ 的平凸透镜。

(2) 凸透镜的两侧面是两个球面。从烛焰发出的光到达透镜时, 除了发生通常的折射现象外, 还可能在两个球面上发生反射。如图 (a) 所示, 对于烛焰的入射光来说, L_1 面相当于凸面镜, L_2 面也起着凹面镜的作用。因此, 实验中当眼睛位于烛焰同侧往镜中观察时, 由于这两个“球面镜”的反射作用, 有时能看到一大一小两个正立像 (或一正一倒的两个像) 等。



(a)

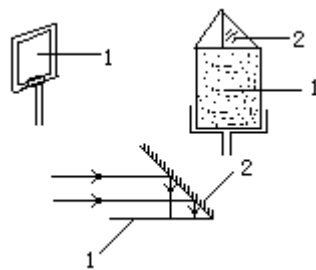
(3)由于蜡烛是发光体，沿主轴方向有一定厚度，使物距不是唯一的值，也难以确定像的确切位置，故只适宜用作定性观察。如用作验证透镜成像公式，可选用平行光源照亮“1”字屏或投影片作为物(“1”字屏放在光源前5-10mm处)，有助于提高实验精度。另外，为避免光源中灯丝的像成在屏上，可在“1”字屏挖空处贴上一张透明纸。

实例

用“1”字屏和投影片(把投影片附在“1”字屏上)的实验数据比较(用 $f=5\text{cm}$ 的凸透镜)。

物	物距 $u(\text{cm})$	像距 $v(\text{cm})$	焦距计算值 (cm)	平均误差
“1”字屏	15.0	7.2	4.86	6.6%
	8.0	12.5	4.88	
	6.0	15.0	4.82	
投影片	13.0	8.0	4.95	1.2%
	8.5	12.1	4.98	
	7.0	16.2	4.89	

由表中数据可知，用投影片作为物，实验精度较高。这是因为“1”字屏中“1”字笔划粗，用肉眼较难辨别它在白屏上成清晰像的确切位置(将屏前后移动几 cm ，成像清晰度无明显变化)；用135投影片为物，很容易找到成像最清晰的位置(宜选用有头像的投影片为佳，一般调到所成像的眼睛部位清晰时，测得像距误差最小)。



1.毛玻璃屏 2.平面镜

建议

如作为演示实验，为便于学生观察毛玻璃屏上成像情况的变化，建议将光屏1改成由平面镜2和光屏1的组合体。1、2交角为 45° ，如图(b)。经这样改进后，成像光束先经平面镜反射，再在光屏上成像，而像距是平面镜与光屏的交线到凸透镜的距离，几乎没有改变，但像的位置却从侧面转到了正面。

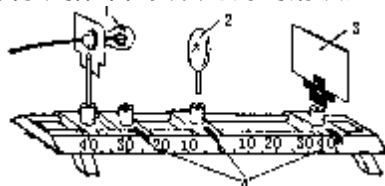
方法二

器材 光具座，白炽灯，自制指针等。

操作

(1)对光具座等作三处改进

用白炽电灯代替传统发光物体蜡烛；把光具座上的标尺改为刻度“0”在中央，再从中央向两边刻度；在凸透镜、光屏、电灯灯丝下的滑块上装上铁皮指针，以便清楚显示物距和像距。其中灯丝下的指针必须处在灯丝平面的正下方。为操作方便，也可用铁皮和螺钉将该指针和安装电灯的滑块连结在一起，如图所示。



1. 白炽灯 2. 凸透镜 3. 光屏 4. 指针

(2) 观察凸透镜成像

将已知焦距的凸透镜固定在标尺中央刻度“0”处，并使灯丝、凸透镜、光屏中心在同一高度，然后参照方法一，进行实验。

说明

(1) 作演示用时，白炽灯功率如不小于 60W，则在普通不遮光教室内都能看到明亮清晰的灯丝像。

(2) 光屏以毛玻璃或其他半透明材料为好，以便从光屏后面也能看到屏上的灯丝像。

(3) 像的正立或倒立可用灯丝的开口方向和其像的开口方向作比较而确定。

方法三

器材 光具盘 (J2501 型)，低压电源等。

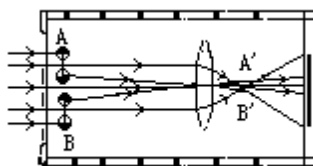
操作 将大双凸柱透镜 ($f=16\text{cm}$) 挂在矩形光盘上，打开平行光源，让光从矩形光具盘的缝隙中射出。加上滤色片，调节双凸柱透镜在光具盘上的位置以及光栏后小平面镜的方向等，按以下顺序演示凸透镜成像的各种情况。

(1) 物体到透镜距离大于 2 倍焦距时的成像 (照相面成像原理)

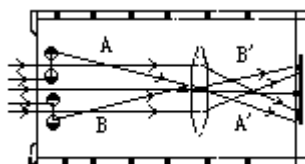
按图 (a) 放置透镜并调节仪器，显示出成倒立缩小实像的光路和条件 (图中物点 A、B 实际在光具盘外面，A'、B' 为像点)。

(2) 物体到透镜距离等于 2 倍焦距时的成像情况

按图 (b) 放置透镜并调节仪器，显示出成倒立实像 (不放大亦不缩小) 的光路。



(a)



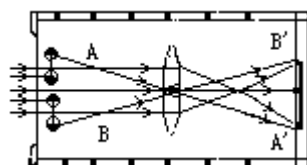
(b)

(3) 物体到透镜的距离大于焦距、小于 2 倍焦距时的成像 (投影放映系统成像原理)

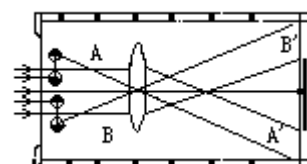
按图 (c) 放置透镜并调节仪器，显示出成倒立放大实像的光路和条件。

(4) 物体在凸透镜焦点上的成像（平行光管原理）

按图（d）放置透镜并调节仪器，显示出处于焦平面上的物体 AB 发出的光线，经透镜折射后平行，即成像在无穷远处。

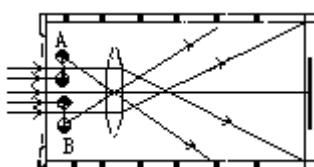


(c)



(d)

(5) 物体在焦点以内的成像（放大镜原理）



(e)

按图（e）放置透镜并调节仪器，显示出在焦点以内的物点 A、B 发出的光线经透镜折射后发散（其反向延长线交点 A'、B' 即为虚像点）。

注意 演示时应由物距较大逐渐变小，以便对凸透镜成像的几种情况有比较完整的认识。操作时，主要是将小反射镜方向把握好。

说明 本实验亦可用激光光学演示仪、光学实验组合教具及其他矩形光具盘演示，方法类同。

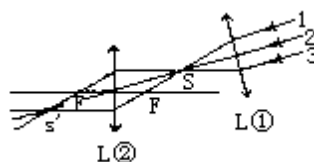
方法四

目的 观察三条特殊光线通过凸透镜的成像规律。

器材 平行光源（12V、50W），光具盘，大双凸柱透镜（ $f_1=16\text{cm}$ ），小双凸柱透镜（ $f_2=8\text{cm}$ ）等。

操作

(1) 使平行光源发出的平行光斜向下射入光具盘，形成如图中所示 1、2、3、三条光线。



(2) 调节大双凸柱透镜 L₁，使它垂直于三条平行光，并使光线 2 通过主轴。调节三条平行光线的射入方向，使光线 3 经透镜 L₁ 折射后方向成水平。

(3) 调节小双凸柱透镜 L₂ 的位置，使光线 2 不改变方向，而光线 1 经透镜 L₂ 折射后方向成水平。

(4) 在光具盘上标出透镜 L₂ 的主光轴和焦点 F（可事先根据 $f_2=8\text{cm}$ 的数据，将画好主轴和焦点的纸带用小磁块贴到光具盘上）。这样就完成了演示前的准备。

(5)改变遮光板的缝，能直接、同时或单独观察三条特殊光线从S点发出，通过透镜折射后光路和成像S'的情况。也能观察非特殊光线或所有从S点发出的光线，通过凸透镜折射后都会聚于像点S'。

(6)改变凸透镜L 水平位置能观察成像规律。

测定凸透镜的焦距 (354)

透镜的焦距是反映透镜特性的基本参数之一。下面列举了六种测定凸透镜焦距的方法。

方法一（平行光聚焦法）突出了焦距的概念，但测量较粗糙；方法二（公式法）着重介绍了用图线处理数据的3种方式；方法三（共轭法）是中学物理中能获得较精确测量结果的方法之一，结合该方法，着重介绍了有关仪器选择和消去法的思想等有关减少误差的途径和基本技巧；方法四（平行光聚焦法）依据的是自准原理；方法五（视差法）；方法六（放大率法）简便易行，适宜用作课外实验。

另外，对光学实验中常用的基本方法：“共轴调节方法”和“左右逼近读数方法”在此先作介绍。

共轴调节方法

所谓“共轴”是指用作测量的各光学元件（如光源、发光物、透镜等）的主光轴重合，这样不仅能保证近轴光线的条件成立，还能保证光具座上的刻度指示即为光具的准确位置。调共轴是使透镜成像实验顺利进行的条件。（在光具座上进行其他实验时，也必须调共轴。）

共轴调节的方法一般是先粗调，后细调。

粗调 把物屏、凸透镜和光屏靠在一起，调节它们高度，使它们的中心都在和光具座导轨平行的一条直线上。

细调 根据共轭法成像的特点与光路，固定光源（物屏）和光屏的位置，移动透镜在屏上两次成像时，若像的中心重合，说明物与像的中心均在主光轴上；反之，若像的中心不重合，说明物点不在主光轴上。此时可按使放大像的中心趋向缩小像的中心的调试方法（大像“追”小像）反复调节透镜高度（或物的高度）。使经过透镜两次成像的中心位置重合，即达到共轴等高状态。

左右逼近法读数

在本实验操作时，考虑到人眼判断成像清晰的误差较大，可采用逐步缩小清晰范围，从而确定成像位置的方法。即在初步找到成像清晰区后，利用左右逼近法读数：先使透镜由左向右移动，当像刚清晰时记下透镜所在位置，再使透镜自右向左移动，在像刚清晰时又可读得一数据。取两次读数平均值作为清晰成像时透镜的位置。这种逐渐趋近的方法在很多实验仪器的调节中是非常有用的。

方法一

器材 光具座，凸透镜，光屏，白纸等。

操作

(1)将凸透镜和光屏安装在光具座上，使它们的平面与光具座的轨道垂直。

(2)在光屏上贴一张白纸，然后将凸透镜与光屏尽量靠拢，用铅笔在白纸上画下透镜外缘的投影圈。

(3)将光具座放在太阳光下，调节光具座的倾斜角度、方向以及凸透镜的位置，使透镜的影子恰好在投影圈内（此进太阳光线平行于光具座轨道），并且使凸透镜会聚的太阳光点最小。

(4)从光具座上读出透镜到光屏的距离，就是凸透镜的焦距。

方法二

原理 在测得透镜成像的物距 u 和像距 v 后，可应用公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ ，

算得焦距 $1/f$ ，此法通常称作公式法。

器材 光具座，学生电源，导线，刻度尺，白纸和坐标纸等。

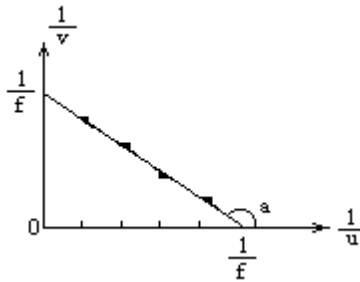
操作

(1)用平行光聚焦法粗测凸透镜的焦距 f 。

(2)将光源、“1”字屏（被光源照明后作为物）、凸透镜和毛玻璃屏，依次安装在光具座上。使“1”字屏与毛玻璃屏之间的距离大于粗略测定的焦距的四倍。调节各光具与光源共轴（调节方法见本实验的序言及方法三的分析）。

(3)接通光源，照亮“1”字屏，移动透镜，使屏上呈现清晰的“1”字的倒立像，量得这时的物距 u 和像距 v ，代入公式算出透镜焦距 f 。

(4)改变物距和像距，按上述方法多测几次（3次以上），求得 f 的平均值。



(a)

说明 根据上述测量所得多组 u 、 v 数据，可用图线法求焦距 f 。下面介绍三种处理方法。

(1)在坐标纸上以 $1/u$ 、 $1/v$ 分别为横、纵坐标，将各数据点画在坐标系中。如图 (a) 所示。然后一条与横坐标夹角 $\alpha=135^\circ$ 的直线，使通过尽量多的数据点。读取直线与横或纵轴的截距值，再取倒数，即为 f 值。

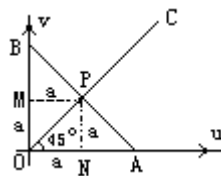
(2)根据 u 、 v 值分别计算 $u \cdot v$ 与 $(u+v)$ 的值，绘制 uv 与 $(u+v)$ 关系图线。求出图线中直线的斜率即为所测透镜的 f 值。

(3)以直角坐标系的横轴表示物距 u ，纵轴表示像距 v 。取一组 u 、 v 值，分别标在横轴和纵轴上得到点 $A(u, 0)$ 和 $B(0, v)$ 。把 A 、 B 用一根直线连接起来。

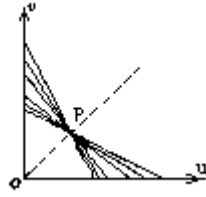
再过坐标原点 O 作与两坐标轴成 45° 角的射线 OC ，它与 AB 交于 P 点，过 P 点画一正方形 OMP_N ，如图 (b) 所示。那么，正方形的边长 a （也就是 P 点的横坐标值或纵坐标值）就是焦距 f 的值。这是

因为 $\triangle BMP \cong \triangle BOA$ ，所以 $\frac{BM}{MP} = \frac{BO}{OA}$ ，即 $\frac{v-a}{a} = \frac{v}{u}$ ， $uv = au + av$ ，等号两边同除

以 uva 得 $\frac{1}{a} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ ，把它与凸透镜公式 $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ 相比较，有 $f = a$ 。



(b)



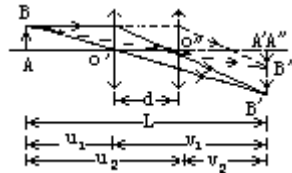
(c)

对每一组 u 、 v 值，由于存在共轭关系，可以画出两条直线。则 n 组 u 、 v 值可以画出 $2n$ 条直线。由于对一给定的凸透镜，它的焦距 f 是一固定值，因此这些直线的交点必在 P 点（如图 c 示）。

分析 详见方法二。

方法三

原理 此法通常称作共轭法，也叫二次成像位移法（贝塞法），是依据光路可逆原理。当物与像之间的距离 L ($L > 4f$) 不变时，移动透镜可成两次实像，从而导出公式 $f = (L^2 - d^2) / 4L$ 。实验时测得 L 和透镜移动距离 d ，代入上式即可算得焦距 f 。



器材 同方法二。

操作

(1)先用平行光聚焦法粗测透镜焦距 f 。

(2)按光路图安装光源、“1”字屏、透镜和毛玻璃屏，并使 $L > 4f$ ，调节至共轴等高状态，固定“1”字屏和毛玻璃屏的位置，测出二者的间距 L 值。

(3)移动透镜位置，借助左右逼近读数法记录屏上呈现清晰的放大像和缩小像时透镜位置 O_1 和 O_2 ，测得 $O_1 O_2$ 的距离 d 值。

(4)将测得的 L 值和 d 值代入公式 $f = (L^2 - d^2) / 4L$ ，计算出透镜的焦距 f 值。

(5)改变 L ，再重测几次（3次以上），对于每一组 L 、 d 值分别计算出 f 值，然后求其平均值。

注意

关于光具座和所用凸透镜焦距的选取

光具座有多种规格，长度有 1500mm、975mm、600mm 多种。实验时，要这给定的有限长度范围内达到二次成实像的要求，凸透镜的焦距应满足 $f < L/4$ (L 为光具座上所附刻度尺的长度) 的条件。

假设 L 是透镜焦距 f 的 Q 倍，即 $L = Qf$ ($Q > 4$)，为了在光具座上能够较明显地显示放大、缩小的实像， Q 值以稍大于 4 为宜（例如可取 $Q = 5$ ），但成像亦不可过大或过小，否则，由于人眼的分辨能力有限及存在像差，会使确定清晰成像的位置更为困难。

主要供中学学生分组实验用的 J2507 型光具座，有效刻度为 0-900mm。附两块焦距分别为 100mm 和 50mm 的双凸透镜，一块焦距为 300mm 的平凸透镜，要在不超过光具座的长度范围内安装物和屏，并二次成像，就不能选用焦距为 300mm 的平凸镜。

分析

(1)为减小误差，应注意以下问题：

实验和理论证明：当 $L = 4f$ 并接近 $4f$ 时，成像误差最小。 L 太大或太小都会引入

较大误差。

毛玻璃屏应使其磨砂面对着透镜，眼睛由光面观察实像。

不可用蜡烛或普通灯泡的灯丝作发光物，因其发光部分不在同一平面，物距不是唯一的，像距也难以确定。如果在“1”字屏上粘一层半透明薄纸，使“1”字的亮度比较均匀，更便于观测像的清晰情况。

由于远轴光线通过透镜边缘成像差的影响，往往会使测出的 f 值小于标定值。在保证像有足够亮度前提下，减小圆孔光阑的直径（可用黑色照像纸做成圆形光阑将透镜边缘部分遮住），有助于改善像的质量，提高测量精度。

用共轭法时，可比较两次成清晰像时透镜所取位置，看是否存在 $u_1 = u_2$ 的关系（这个关系是光路的可逆原理所限定的）。若偏离较大，必是在成像清晰性等方面判断有误，应重新操作。

(2) 公式法和共轭法测量的误差比较

由于透镜的光心一般与它的几何中心并不重合，因而光心的位置不易测定。在公式法中，物距与像距均应从透镜的光心算起，且由于物、像和透镜的实际位置和光具座上标度位置存在误差，因而 u 、 v 是难以精确测量的量，所以用公式法测得的结果是比较粗略的。

共轭法的优点是：把焦距的测量归结为对于可以精确测定的量 L 和 d 的测量，避免了在测量 u 和 v 值时，由于估计透镜光心位置不准确所带来的误差。且用位移法测相对量 d 值，清除了透镜与其支座间偏离所造成的误差，因此测量结果比较准确。

方法四

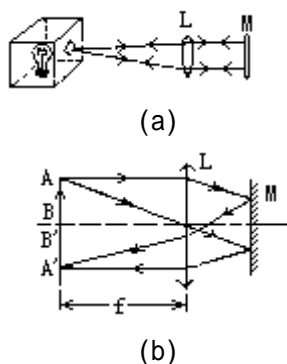
原理 若发光点位于凸透镜的焦点上，它发出的光线经凸透镜折射后为平行光线。用一与主光轴垂直的平面镜将此平行光反射回去，反射光经凸透镜后将仍会聚于焦点上，此关系称为自准原理。如果在凸透镜的焦平面上放一物体，由图 (b) 可知，其像仍成在焦平面上，但却是一个与原物大小相等而倒立的像。

实验中，只要依据自准原理，以平面镜相辅助找到与原物同样大小的倒立像。测得此时物至透镜之间距离即为该透镜的焦距。故这种方法通常称作平面镜辅助法，又叫自准法。

器材 自制光源箱，光具座，低压电源，平面镜等。

光源箱的制作方法

如图 (a) 中所示，箱的前侧面有一正三角形小孔，孔上贴有半透明纸，作为“物”。



操作

(1) 把光源箱、凸透镜、平面镜按图 (a) 装在光具座上，调节平面镜使与透镜主光轴垂直。

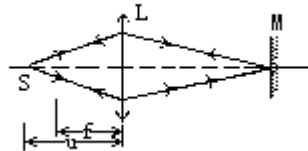
(2) 固定光源箱和平面镜，缓慢移动凸透镜，直到光源箱前壁出现三角形孔的倒

像。如果像的一部分清晰，其余部分模糊，是由于箱上开有三角形孔的侧面或平面镜与透镜主轴不垂直造成的，应进行调整。

(3)调节光源箱高度，使像的底边恰好与三角形孔的底边重合。并将平面镜稍作前后移动，应该看到像的大小不变。

(4)用刻度尺量得这时光源箱前侧面与凸透镜之间距离，就是该凸透镜焦距 f 。

注意 用平面镜辅助法测焦距，必须强调只有在物平面上成清晰的倒像，且物、像对称时，物（或像）到透镜的距离才是焦距，这种情况对平面镜的前后位置也没有限制。



(c)

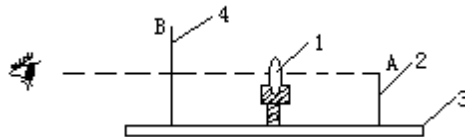
另一成像情况是发光物位于主轴上大于焦距处，经透镜所成像恰好在平面镜上，如图 (c) 示。根据光路可逆、物像共轭的原理，最后在物平面上也能得到一个清晰的像，不过这个像是正立的，但此时物距绝不等于焦距。

建议用此法测焦距时，应将平面镜适当靠近凸透镜。这样既容易避免物平面上成正立像的现象，又有助于提高像的清晰度，便于观测。

说明 平面镜辅助法的优点是把光源箱上发光三角形小孔和它所成的倒立实像放在一起加以对比，从而确定成清晰像的位置，有利于减小偶然误差。但无法消除由于透镜光心位置不易测定所带来的误差。

方法五

原理 不用光屏，借助视差法确定透镜成像位置，然后测得像距、物距，算出焦距。



1.凸透镜 2.大头针 3.直木条 4.细铁丝

视差原理及视差法详见实验 340 方法四。

器材 凸透镜，橡皮泥，直木条，刻度尺，大头针及回形针等。

操作

(1)如图示，用橡皮泥把透镜固定在细木条上，调节大头针 A 的前后位置，使在透镜另一侧能不用光屏，直接观察到一略为放大的倒立的像 A'。

(2)将一细铁丝 B (可把回形针拉直代用) 直立在透镜前，用视差法确定像 A' 的位置。

(3)测出这时像距 v 、物距 u ；由 $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ 算出焦距 f 。

说明 用视差法确定像 A' 位置的具体方法是，前后调节细铁丝 B 的位置，每改变一次，左右移动视线观察一次，直到只能看到 B 而不再出现 A'，即 B 与 A' 间无视差为止，此时 B 所在位置即为实像 A' 的位置。

实验中应注意使透镜面和木条垂直。待测透镜的焦距以 5—15cm 为宜。

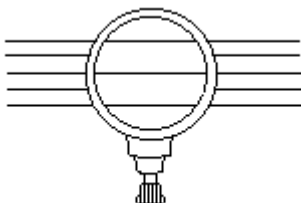
方法六

目的 掌握用放大率法测凸透镜焦距的原理和方法。

器材 待测定焦距的凸透镜，白纸，刻度尺等。

操作

(1) 在一张白纸上画上几条间隔均匀的平行直线，线与线的间距，可根据需要在 1—5mm 间选取。



(2) 透过凸透镜去观察平行线条的虚像，适当调节，使像与物的几何比例合适，亦即选取适当的放大率。

(3) 如图所示，知放大率 $m = \frac{|v|}{u} = 2$ ，另测得此时透镜与白纸间

距（即物距） $u=5\text{cm}$ 。

(4) 由透镜公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 及 $m = \frac{|v|}{u}$ ，可知 $f = \frac{uv}{u+v} = \frac{mu}{m-1}$ （注意，凸透镜成虚像时 $v=-mu$ ）。则对上例可算得 $f=10\text{cm}$ 。

说明

(1) 与其他测定凸透镜焦距方法相比，本实验无需限定的光源，简便易行。

(2) 本方法是粗测焦距的方法之一，有助于学生对透镜成像规律的认识。

部分凸透镜成像 (355)

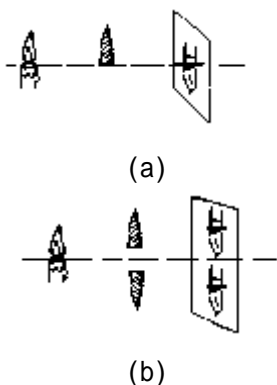
器材 破损凸透镜数块, 蜡烛, 光屏, 支架等。

操作

(1) 一块凸透镜, 跌碎为几块, 把它们按原样拼合起来。尽管其中部有明显的裂纹, 但使蜡烛通过该拼合起的透镜在屏上成一实像时, 仔细观察, 裂纹几乎对所成实像毫无影响。

(2) 如图(a)示, 使蜡烛通过半块凸透镜在屏上成一实像, 它依然能成一完整的蜡烛像(成像原理及位置规律与完好透镜成像一样), 只是像变暗了, 这是由于半块透镜比整块透镜透光面积减小, 透光量减小的缘故。

倘若不借助光屏, 而是从透镜右侧直接观察该实像。那么观察像的空间范围(视域)也相应减小。



在没有破碎透镜时, 亦可用黑纸遮没透镜的某一部位(或上半部, 或下半部, 或中央, 或边缘)观察所成实像的变化。情况与上类似。

(3) 如图(b)所示, 把两半块透镜分别上、下移动。这时可以发现, 呈现在屏上的烛像, 也会由一个较为明亮的像, 分为上、下两个稍暗的烛像。这时, 上、下半个透镜各相当于一个独立的透镜, 烛焰对它们分别成一个像。

说明 以上演示, 可以加深对透镜成像规律和特点的认识。在图(b)情况中, 发光点经上、下半个透镜后成为两个像点, 这两个像点是由同一发光点发出的光束分割开来的, 它们构成了相干光源, 因此, 这一装置也是干涉装置。

凹透镜成像 (356)

方法一

器材 凹透镜，蜡烛，光屏等。

操作 把点亮的蜡烛放在凹透镜前，调节它们等高共轴，任意改变它们的间距，光屏上都得不到蜡烛的像，而只有通过凹透镜看到一个与蜡烛位于同侧的正立、缩小的虚像（位于透镜和物体之间）。将蜡烛移向透镜时，像亦越向镜面靠近，并逐渐变大（但都小于实物本身）。

注意

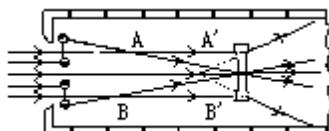
(1) 本实验可借助各种光具座演示。

(2) 运用“视差法”可确定凹透镜所成虚像的位置，测出像距并验证透镜公式。具体操作可参看实验 357 方法二。

方法二

器材 光具盘（J2501 型），低压电源。

操作 将 $f = -8\text{cm}$ 的双凹柱透镜挂在光盘中间，按照图示调节好仪器，使显示出凹透镜成虚像的光路。



图中 A、B 为物点，每个物点射出的光经凹透镜折射后成发散光束，将发散光束反向延长可得虚像点 A' B' 。

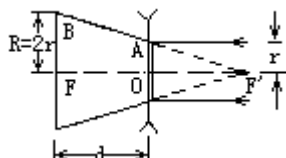
测定凹透镜的焦距 (357)

由于凹透镜不能直接生成发光体的实像，因此测定凹透镜焦距的设计原理较为灵活和巧妙。

方法一是依据虚焦点概念设计的，但由于光斑边界不够清晰以及透镜和屏的定位误差，测得结果较粗略；方法二称作“视差法”，由于受观察距离限制，在确定像的位置时误差较大；方法三是自准法（或平面镜法），不宜用作测定长焦距透镜；方法四是凸透镜辅助法（或虚物成实像法），较适宜测量较长焦距的凹透镜。方法三、四的测量误差较小，但调节要求较高，测量原理也较为复杂。

方法一

原理 如图所示，在凹透镜中心遮一半径为 r 的黑色圆纸片 A，另在白纸 B 上画一半径 R 为 $2r$ 的圆。用平行光照射透镜，调节透镜与白纸间距离，使黑色圆纸片的影恰好跟白纸上的圆圈重合。据虚焦点的概念和相似三角形关系可知， $F_0/O/F = r/R = 1/2$ ，因此 $F_0 = OF = |f|$ 。



器材 平行光源（或太阳光），黑纸片，白纸屏，刻度尺等。

操作

(1)按实验原理图装置器件。调节 A 与 B 间距，使黑纸片 A 的影恰与白纸上的圆圈重合。

(2)用刻度尺测出这时 A 与 B 间距离 d ，即为凹透镜焦距 f 的大小。

注意

(1)凹透镜应正对着平行光线（或太阳光线），白纸屏应和凹透镜保持平行，使黑纸片在呈圆形黑影。若黑影呈椭圆形，应予以调整。

(2)为保护透镜表面，可用清水将黑纸片弄湿后贴在凹透镜的中心处。实验后要用镜头纸等将凹透镜面擦拭干净。

(3)为测量方便，可根据待测凹透镜焦距的长短适当改变白纸上圆圈半径 R 值。设 $R = kr$ 时，（ k 值大于 1），则由原理图可得：

$$\frac{|f|}{d} = \frac{r}{R-r} = \frac{r}{(k-1)r} = \frac{1}{k-1}, |f| = \frac{d}{k-1}。$$

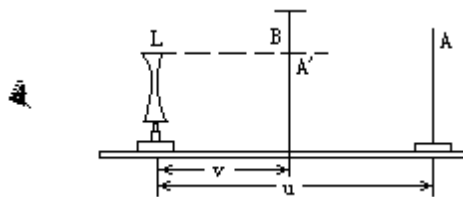
对于长焦距的凹透镜（例如浅度近视眼镜）可取 $k=1.4$ ，即 $R=1.4r$ 。

若测得 $d = 13\text{cm}$ ，则 $|f| = \frac{d}{k-1} = \frac{0.13}{1.4-1}\text{m} = 0.325\text{m}$ （则该眼镜的度数约为

$100 \times \frac{1}{f} \approx 300$ ）。这可作为估测近视眼镜度数的一种简易方法。

方法二

原理 因为实物通过凹透镜不能成实像，因此不能用成像在屏上的方法确定像距。这时可在物与透镜之间用一指针（像针）代替像屏，通过透镜观察像的同时移动指针，用视差法确定像的位置，然后测得 u 、 v ，由成像公式求出焦距 f 。



器材 凹透镜（或近视眼镜），橡皮，刻度尺，细铁丝，大头针等。

操作

(1)将凹透镜，插在橡皮（或软木塞）上的细铁丝 A 按图示位置安装。用目视法调节 A，使它的像 A' 的顶端与透镜 L 的顶端齐高。

(2)用大头针 B 依照视差法确定虚像 A' 的位置。具体做法是：一边前后移动大头针 B，一边透过透镜左右稍许移动视线观察，直到通过透镜看到的虚像 A' 的上端，与不通过透镜看到的大头针 B 的下尖端之间无相对位移，即无视差时。这时 B 所指示的就是虚像 A' 的位置（如图）。

(3)测出物距 u ，像距 v ，由 $\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ 算出 f 值。改变 u 值，多测几次，

取 f 平均值。

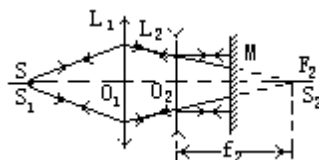
说明 本方法可作为无平行光源的场合，近似测定凹透镜焦距的简易方法之一。亦可用作估测近视眼镜的度数。

方法三

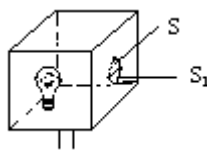
原理 图 (a) 所示光路中，发光点 S 发出的光经凸透镜 L_1 和凹透镜 L_2 折射后成平行光束，经平面镜 M 反射，再经 L_2 和 L_1 ，在物点 S 生成 S 的实像 S_1 。保持 S 和 L_1 位置不变，撤去 L_2 和 M，则在原来 L_2 的虚焦点 F_2 处生成 S 的实像 S_2 。测得 O_2S_2 间距即为凹透镜焦距的绝对值。

器材 待测凹透镜，光具座，自制光源箱（图 b），凸透镜，白屏，低压电源等。

操作



(a)



(b)

(1)将光源箱、凸透镜 L_1 、凹透镜 L_2 和小平面镜 M 按图 (a) 所示依次装置在光具座上。

(2)将上述各光学器件作共轴调节（具体方法见实验 354 的序言）后，再稍微移动 L_2 （M 也随 L_2 移动），直到光源箱前壁出现清晰的三角形孔倒像，并且位于孔的正下方，二者底边重合。这时保持 L_1 、 L_2 、S 位置不变，平移 M 向 L_2 靠近，应看到实像 S_1 的大小和清晰度无变化，只是亮度稍有增强。

(3)固定 L_1 ，记下 L_2 所对标尺刻度数 a_1 。

(4)撤去 L_2 和 M，移动光屏，使 S 在该光屏上生成三角孔的清晰倒立实像 S_2 ，记下

此时屏所在位置的标尺刻度数 a_2 。

(5) 计算凹透镜焦距绝对值： $f_2 = |a_2 - a_1|$ 。

注意

(1) 凸透镜焦距 f_1 应小于光具座有效长度的 $1/4$ 。

(2) 待测凹透镜的焦距和直径稍大些，有助于提高成像的清晰度和亮度。但焦距不宜太长，约为光具座长度的 $1/2$ 为好。

此法测得结果误差较小。

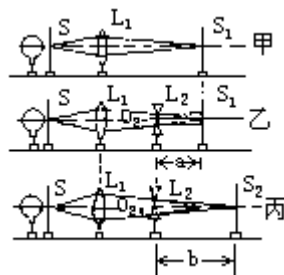
方法四

目的 掌握用凸透镜辅助法测定凹透镜的焦距。

器材 J2507 光具座，凸透镜，凹透镜，光源，“1”字屏，光屏等。

操作

(1) 将光源、字屏、凸透镜、光屏依次置于光具座上，首先将以上元件作共轴调节，再调节凸透镜位置，使屏上有清晰的像（应是缩小的倒立实像），如图（a）甲。



(a)

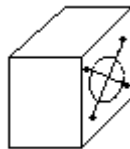
(2) 在凸透镜与光屏间，放入凹透镜，测出像屏到凹透镜间距 a （虚物距）。如图（a）乙。

(3) 移动光屏，使屏上再次显清晰的像（比原来的像略大些），测出像屏到凹透镜间距 b （像距）。

(4) 由 $f = \frac{ab}{a-b}$ ，算出凹透镜焦距。

注意

(1) 为减小误差，可用自制光源箱替代“1”字屏。即在光源箱的一侧开一较大的圆孔，粘上两根头发构叉丝，被电灯照亮后作为发光物体，如图（b）所示。并以叉丝的交点为准，判断像的清晰程度。



(b)

(2) 作为辅助用的凸透镜 L_1 ，其焦距应在光具座有效长度的 $1/6$ - $1/8$ 范围内选取。

(3) 放入待测凹透镜 L_2 时，应使凹透镜的光轴与已调好的光轴线重合，并使它和屏和距离小于 L_2 的焦距数（按方法一测出的 f 值掌握）。

如发现 S_2 的位置超出了光具座，可将 L_2 向远离 L_1 的方向移少许，就能缩短 S_2 和它的距离。

在光具座长度允许的条件下，应使 S_1 和 S_2 的间距尺可能大些，有助于减小误差。

(4) 为减小偶然误差，可稍微改变 L_2 的位置，再测几组 a 、 b 值，最后取平均值作

为待测透镜的焦距值。

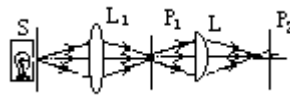
说明 此种方法适合于测定焦距较长的凹透镜，且所得误差比前述三种方法小。

单透镜的像差 (358)

光学系统常以透镜为主要元件，而一个单独的薄透镜常常不能理想的成像。这是因为光学材料折射率随波长而变化；二是因为单透镜只有在近轴光线条件下才能很好地成像，一旦透镜口径增大，或者物体离轴较远，像就出现偏差。像差可分为复色像差和单色像差（单色像差包括球差、像散、慧差、像场弯曲和畸变等）。相对来说，色差、球差和畸变与中学物理知识联系较紧密，以下实验简介了观察有关现象的方法。

方法一

原理 处在光轴上的点光源如果发出的光是多波长的（例如白光），则由于成像透镜对于不同的波长具有不同的折射率（即同一透镜对不同颜色的光将具有不同的焦点），所以生成的像点将沿轴向拉开，波长短的（例如紫光）距透镜近。这种现象称为轴向色差。

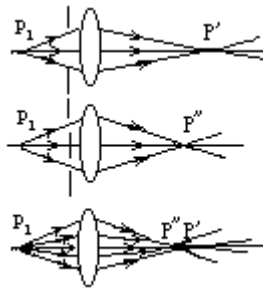


(a)

器材 光具座，双凸透镜，平凸透镜，光源，滤光片（红色、紫色各1片），针孔屏，白屏，光阑（边缘透光与中部透光各1只）。

操作

(1)如图(a)所示，将光源S、聚光透镜L₁、针孔屏P₁、待测平凸透镜L及白屏P₂置于光具座上并使之共轴。调节L₁，使S发出的光聚焦于针孔上。



(b)

(2)在透镜L左方紧靠透镜插入中部透光的光阑，在光源S的窗孔上分别加上红色和紫色滤光片，移动L或白屏P₂，直至P₂上分别出现针孔的红色像和紫色像。

(3)记录并比较P₂在光具座上两位置的读数，计算两点到透镜L光心的距离S_R'和S_V'。

色差H的大小通常以红色像和紫色像至透镜距离之差来表示，即

$$H = S'_R - S'_V。$$

(4)取下滤光片，移动白屏P₂，使P₂上得到针孔的清晰像，记录P₂的位置P。将中部透光的光阑换以边缘透光的光阑（不能变动透镜L的位置），观察这时P₂上针孔的像已经模糊，调整白屏P₂的位置才能使屏上再显较清晰的针孔像。记录这时P₂的位置P'，如图(b)所示。

(5)在光路中不加任何光阑，在P和P'之间的任一位置都只能观察到一个弥散光斑。以上现象说明，在透镜光轴上的物点，如果入射光不限制在近轴光束而是宽光束。近轴光线与非近轴光线所成像点是分开的，由此而引起的像差就是球差。

方法二

目的 利用简单器具观察单透镜的色差。

器材 平凸透镜（焦距约 30mm），白炽灯，硬纸板，白纸屏等。

操作

(1)把平凸透镜放在挖有圆孔（孔径略小于透镜外径）的硬纸板上，然后把它们置于白炽灯正下方。另取一张白纸作光屏，适当调节透镜、光屏和灯丝间距离，使光屏上出现较清晰的灯丝的缩小的像。设这时光屏处于 A 位置。

(2)将光屏从 A 稍向上移，则可发现，在该灯丝的像稍变模糊的同时，像的四周呈现红橙色镶边；同样，将光屏从 A 稍向下移，又可观察到灯丝的像在稍变模糊的同时，像的镶边又变成了蓝紫色，这种在不同位置上观察到的像的镶边彩色的变化，正是透镜存在色差的缘故。

方法三

目的 用简易器具观察单透镜成像的畸变。

原理 物体经透镜成像时，若透镜对离光轴距离不同的物体上各部分的横向放大率不同，则所成像与原物不相似。这种现象称为畸变。例如在一个与主光轴相垂直的平面上，一条不与主光轴相交的直线各点所成的像不是直线，而是弯曲的线。



器材 凸透镜（焦距约 10cm），双色原珠笔，白纸笔。

操作 在白纸上并排紧挨着画红色和蓝色直线，长约 10cm，将凸透镜置于画有双色线的正上方，使镜面与纸面夹角稍大于 60° ，如图所示。这时从透镜上方稍远处过透镜观察纸上双色线，同时调节透镜与纸面间距，使之稍小于透镜焦距，观察到的竟是一个椭圆形的双色彩环。而且，彩环还能随着透镜的上下微移，时宽时窄，时圆时缺，犹如一彩色漩涡。

说明 上述小实验中，由于双色直线上的点偏离主光轴，且距光心的远近差距亦很大。因此，透镜各部分对双色直线上各“物点”将呈不同的放大率，使之畸变为弧线。

眼睛的光学原理 (359)

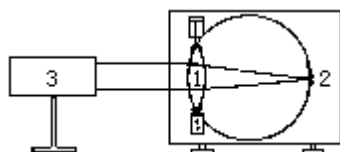
方法一

目的 演示眼睛的光学原理，近视、远视及其矫正。

器材 平行光源，自制眼睛模型，柱面凸透镜，凹透镜等。

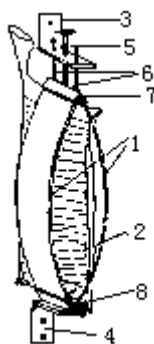
眼睛模型的制作方法

材料：2mm厚无色透明有机玻璃两片（ $12 \times 4\text{cm}^2$ ）、铁直角两个，1mm厚铁皮两片（ $4 \times 1.5\text{cm}^2$ ），螺丝一个（直径4mm、长4cm、可用实验铁夹上的带柄螺丝），铜丝或铁丝两根（直径2-3mm、长约3cm），木板一块（ $60 \times 40\text{cm}^2$ ），无色透明塑料袋一个。



(a)

1. 晶状体 2. 视网膜 3. 平行光源



(b)

1. 有机玻璃片 2. 充水塑料袋 3、4 铁直角
5. 螺丝 6. 限位杆 7、8. 铁片

制法：如图(a)所示，在木板上画眼球剖面图，把晶状体部位挖空。如图(b)所示，把两片铁片都折成直角，一片上焊接铜丝两根（限位杆）。另一片焊在下铁直角上。在上铁直角的臂中间打一孔；改直径4mm螺纹（或焊一4mm螺帽），两侧各打一孔以便限位杆插入。如图(b)所示形状烫制塑料袋，长12cm、宽5-6cm，装水后放入有机玻璃片之间。上下铁直角之间的距离以平行光线能会聚在视网膜上并留有调节余地为难。

操作

(1)演示眼睛的光学原理，从平行光源取出两条平行光线贴着板面射入，调节螺丝使光线会聚在视网膜上，演示正常眼睛看清远处物体。

(2)往下旋螺丝，平行光线会聚于视网膜之前，说明近视眼不能看清远处物体，在眼前加柱面凹透镜使光线重聚视网膜，矫正了近视。

(3)往上旋螺丝演示远视，在眼前加柱面凸透镜矫正远视。

注意 操作(2)、(3)需经试验，掌握螺丝旋到什么程度刚好与所用柱面透镜配合。

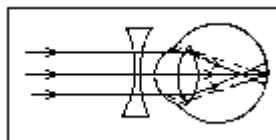
方法二

目的 演示眼镜的矫正作用原理。

器材 矩形光具盘，低压电源，自制眼睛剖面图等。

操作

(1)把眼睛的剖面图贴在矩形光具盘上，在剖面图中表示眼睛的水晶体处挂上 $f=80\text{mm}$ 的双凸柱面透镜，使三条平行光线通过该凸透镜后会聚在视网膜前，如图中实线所示。然后用一个焦距 $f=-80\text{mm}$ 的双凹透镜代表眼镜，靠着前述凸透镜左侧挂上，可看到光线的会聚点向后移，调节双凹透镜和双凸透镜之间距离，使该会聚点位于视网膜上，表示用凹透镜矫正近视眼的原理。

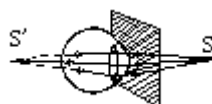


(2)用 $f=160\text{mm}$ 的双凸柱面透镜代表眼睛的水晶体，引入三条平行光线，在光具盘上标志出它们经凸透镜折射后的会聚点。再在该透镜前挂 $f=80\text{mm}$ 的双凸柱透镜，可以看到会聚点明显前移。表明凸透镜对远视眼有矫正作用。

方法三

目的 验证人的眼睛的调节作用是有限的，以及验证正常人眼近点的存在。

原理 如图 (a) 示，设点光源 S 距眼的距离小于近点 (10cm)。则由 S 发出的三束发散光束射入瞳孔后，即使晶状体调到最凸状态，仍不能使它们会聚在视网膜上，而只能在视网膜之后。这样，由 S 发出的光将在视网膜上形成一个品字形光斑 \therefore 。又因视觉中的像和视网膜上的像是倒置的。因此，人观察到 S 的“像”将是 \ominus 形状。



(a)

器材 大头针，火柴盒，牙膏盒等。

操作

(1)取一只空的火柴盒，用大头针在盒的一端中央部位戳 3 个小孔，使之组成一品字形 (小孔间距约为 2mm)。再用大头针在火柴盒的另一端相对位置戳 3 个相同的小孔。如图 (b) 所示。



(b)

1. 火柴盒 2. 品字形小孔

(2)眼睛贴近火柴盒一端的品字形小孔透过另一端品字形小孔向亮处窥视时，观察到的将是由 9 个小孔组成的倒置三角形，如图 (b) 所示。

这是由于火柴盒另一端的每个小孔都相当于一个点光源，它位于人眼的近点之内 (火柴盒长度约为 4.5cm)，1 个小孔成 3 个光斑，3 个小孔成 9 个小亮斑恰组成 三角形。

(3)采取类似的方法，在牙膏盒两端戳孔。重复以上观察，由于牙膏盒的长度大于人眼的近点 10mm 。观察到的就不是 9 个亮斑了。

视觉暂留

视觉暂留是人类视觉的一种特性。是指当外界景物消失以后，视神经对它的

印象还要延续约 0.1s 的时间（视觉暂留时间的长短和光的强度及色调有关，一般在 $\frac{1}{30} - \frac{1}{5}$ s 之间）。

证实眼睛具有视觉暂留的实验很多，亦颇具趣味。以下所选，方法一、二适宜作演示实验；方法三、四可作为课外小实验。

利用视觉暂留进行色光复合的实验可参看实验 375 的方法五、六。

方法一

器材 玩具电动机，自制转盘、画有鸟笼板的正反面、画有手拍球分解动作的纸带、七色板，干电池，电位器等。

转盘，鸟笼板，纸带，七色板的制作方法如右图所示。

操作

(1) 将电动机竖直放置，插上鸟笼板（或拍球转盘），接通电源，调至最佳转速，可以分别观察到鸟进笼（或连续的拍球动作）。

(2) 换上七色板，让七色板快速旋转，七种颜色的光复合成一种白光。

方法二

器材 幻灯投影机，白纸屏，直尺等。

操作

(1) 调整幻灯投影机镜头，使在距镜头 2—3m 处白纸屏上呈现清晰的画面。

(2) 取去白纸屏，手持直尺（或直尺状的木条），在原白纸屏处迅速上下挥动。由于视觉暂留效应，这时也能在挥动的直尺上看到上述画面。

方法三

器材 废唱片，白色胶布条若干，铅笔等。

操作

(1) 将宽约 1cm 的 6 条白色胶布条粘贴在废唱片上，如图所示，排列成扇形。

(2) 使该唱片绕穿过中心处的铅笔杆旋转，当转速适当时，由于视觉暂留，呈现在眼帘之中的将是三个白色同心圆环。

注意 唱片最好选小号的。

方法四

器材 卡片纸，红、黄、蓝色颜料等。

操作

(1) 如图所示尺寸，在卡纸上画一个大环和一个小圆，然后把它剪下，涂上三种不同颜色。

(2) 取一支铅笔插入小圆中心并在铅笔插入处涂上一些胶水。

(3) 把铅笔放在两手掌间来回搓动。当转速适当时，会观察到一种奇妙现象：大环离开小圆，并围绕小圆旋转起来。

自制照相机模型

方法一

器材 直径相同的焦距分别为 20cm 和 10cm 凸透镜各一片，三夹板，毛玻璃片，卡片纸，钢丝等。

照相机模型的制作方法

如图所示，用三夹板加工成抽屉式箱体，内箱中间装入毛玻璃片作为光屏，外箱前端中央处挖一圆孔，胶接一卡片纸卷成的镜筒，其直径视透镜直径而定（约 65—80mm）。

操作

（1）使镜头对准物体（烛焰、白炽灯等），移动内箱，改变像距，可在毛玻璃上得到清晰的倒立像。

（2）取下钢丝制的卡簧，更换不同焦距的凸透镜后，可显示变焦距镜头的作用。

方法二

器材 焦距约为 13cm 的凸透镜，碘钨灯（1000W），2 号或 3 号印相纸，显影及定影液，自制简易照相机等。

简易照相箱的制作方法

左图为自制简易照相箱的平面图，其中“1”为凸透镜，“2”为屏幕，“3”为照相箱后板，4 是屏幕上直径约 5cm 的圆孔，圆孔上覆盖半透明纸。屏板上有两根两端固定的牛皮筋，用来固定印相纸。

操作

（1）前后调整照相箱与被摄物体的间距，一直到屏幕的半透明纸上呈现被摄物体清晰的像。

（2）在红灯下将印相纸插入屏板橡皮筋下，有药膜的一面朝被摄物。

（3）在白灯下曝光（用 1000W 碘钨灯时约 2s）。

（4）在红灯下显影、定影。

注意

（1）由于本实验用印相纸代替胶纸，显影（相当于冲卷）、定影后得到负片。为使负片清晰美观，被摄物与所处的背景要有较大的反差。如白瓷杯用黑布为背景。

（2）由于曝光时间各次不尽相同，所以显影时要特别注意掌握显影时间。显影后立即夹出负片，在清水中漂洗后投入定影液中，最后再夹入清水中漂洗等。

投影机

方法一

器材 光具座（J 2507 型），低压电源，投影片等。

操作

(1) 如图所示,把平行光源、投影片、凸透镜($f=5\text{cm}$)、白屏等依次安装在光具座滑块上,并使各器件中心共轴等高。

(2) 由凸透镜成像原理知,当 u 满足 $f < u < 2f$ 时,则屏上得到放大的实像。因此将投影片倒放在透镜焦距之外、2倍焦距之内时,适当调节幻灯投影机与光屏的位置,就能在屏上清楚地映出放大的投影片图景。

注意 当 $f=5\text{cm}$ 时, u 可在6—8.5cm间选取,不宜太大或太小。

方法二

器材 光具盘(J 2501型),低压电源等。

操作 将 $f=16\text{cm}$ 的大双凸柱透镜挂在矩形光盘中间,装好平行光源,打开光盘左侧相应的光阑狭缝,加上滤色片,按图所示光路调节光阑后小平面的位置和方向。

左图表示当物距 u 满足 $f < u < 2f$ 条件时,物AB通过凸透镜在屏上成倒立放大实像,亦即幻灯机成像原理的光路图。

建议 本实验亦可用激光光学演示仪完成,方法类同。

显微镜

方法一

器材 J 2507型光具座,低压电源,透明刻度尺(或透明三角板)等。

操作

(1) 取 $f=300\text{mm}$ 的平凸透镜($\phi 50$)作目镜, $f=50\text{mm}$ 的双凸透镜($\phi 30$)作为物镜,分别安装在光具座上,使二者相距360mm左右,并且调整两者等高共轴。

(2) 把透明刻度尺(或透明三角板)夹在屏上(应使其刻度线保持水平方向),把此屏装置在距物镜外70—80mm处的滑块上,并使刻度线在物镜视场内。这时眼睛对准目镜并前后稍作调节,就能看清被放大的刻度线(装置示意图如图所示)。

(3) 取掉目镜,只用物镜时观察不到上述放大的刻度线。这是因为刻度尺(物)在物镜的焦点之外,以此可说明显微镜二次成像的原理。

说明

(1) 为便于观察,应将透明刻度尺对着光亮处。

(2) 本实验亦可用 $f=100\text{mm}$ 的双凸透镜作为目镜,有助于提高组装成显微镜的放大率。

(3) 以上组装成的显微镜,放大率通常只有5—10倍。这是因为放大率太大时,将会产生严重的色像差,因此在调节物与物镜距离、目镜与第一次成的实像的距离时,都不可太靠近焦点。

方法二

器材 光具盘(J 2501型),低压电源等。

操作

(1) 以大双凸柱透镜 ($f=160\text{mm} \pm 5$) 作为目镜、小双凸柱透镜 ($f=80\text{mm} \pm 5$) 作为物镜。如图所示, 把它们挂在矩形光具盘上, 二者相距约 240mm。

(2) 调节由光盘左侧射入的五条光线, 使光路图如图所示, 其中 A、B 表示显微镜所观察的物点, 位于物镜的焦点外面一些; A、B 为经物镜所造成的 (放大倒立的) 实像点, 该实像点恰位于目镜的焦点之内, 再由目镜放大 (目镜的作用相当于放大镜), A、B 即经目镜放大生成的虚像点。经比较可知所成像是逐次放大的。

注意 演示时必须使中间一条光束和两只透镜的主轴都重合, 否则, 应将镜头作适当调整。另外, 为保证演示得以迅速顺利地顺利完成, 可事前调好光路, 作上标记, 演示时依次挂好物镜和目镜, 并分步讲解二次成像的特点。

说明 本实验亦可用激光光学演示仪演示, 方法大体相同。

方法三

器材 凸透镜焦距分别为 150mm 和 25mm 各一片, 圆纸筒, 黑纸等。

操作 以 $f=25\text{mm}$ 的凸透镜作为物镜, 以 $f=150\text{mm}$ 的凸透镜作为目镜。按照物镜、目镜大小分别用牛皮纸卷制 (或选配) 两只内壁粘有黑纸且不反光、长短粗细适宜的圆纸筒作为镜筒 (目镜镜筒长约 150mm、物镜镜筒长约 30mm), 然后按图所示组装起来, 两个透镜分别起幻灯投影机和放大镜的作用。总放大倍数 (等于物镜和目镜放大倍数的乘积) 约为 16 倍。

说明 上述透镜焦距规格仅作参考, 可按手边材料规格自行设计制作, 镜筒亦可用蜡纸筒等代替。

望远镜

望远镜有折射式和反射式两种。其设计思想是, 先用一个口径较大、焦距较长的透镜 (或曲面反射镜) 作为物镜, 使远物成一缩小的倒立实像, 然后再把这个实像用放大镜作为目镜放大视角。望远镜的种类很多, 常见的有:

开普勒望远镜, 属折射式望远镜。物镜和目镜都是会聚透镜, 成倒立像位于极远处, 常用于天文观察。

伽利略望远镜, 属折射式望远镜, 物镜是会聚透镜、目镜是发散透镜, 其优点是成正像, 便于观察地面物体。

牛顿式望远镜, 属反射式望远镜。它用凹镜作为物镜, 可以不产生像差等。

此外, 还有棱镜望远镜, 读数望远镜等。下面主要介绍有关折射式望远镜原理的实验。

方法一

器材 光具座 (J 2507 型), 低压电源等。

操作

(1) 组装开普勒望远镜

以 $\phi 50$ 、 $f=300\text{mm}$ 的平凸透镜作为物镜, $\phi 30$ 、 $f=50\text{mm}$ 的双凸透镜作为目镜, 分别插在光具座上, 使二者相距 350mm 左右, 并作等高共轴调节, 即构成开普勒望

远镜，使物镜对准远处物体（花木或标志物等），通过目镜观察并稍作调节，即可看到清晰的倒立虚像。

（2）组装伽利略望远镜

以 $\phi 30$ 、 $f=-75\text{mm}$ 的双凹透镜取代上述 $\phi 30$ 、 $f=50\text{mm}$ 的双凸透镜（作为目镜），并将两镜间距离调至225mm左右。作等高共轴调节后，使物镜对准远处物体（花木或其他标志物），通过目镜边观察、边稍作调节（改变目镜和物镜间距离），就可看到清晰的正立的虚像。

注意

（1）透镜等光学元件要防止被汗液、油脂物沾污。如有沾污要用绒布、擦镜纸等柔软物擦拭。

（2）应选择光线稍暗的室内向室外明亮处观察，或在光具座上加一遮光罩（可用纸板自制），以避免周围杂散光的干扰。

说明

（1）望远镜的物镜所造成的像比原物体小，但因视角放大，看物体时有距离缩短的感觉。

（2）望远镜亦可参照下述方法分两步组装：先使物镜对准观察目标，使它成一倒立缩小实像（从物镜另一侧能直接观察到该像）。将毛玻璃屏置于成像处，在毛玻璃屏后放目镜。慢慢移动目镜，直至清晰看到毛玻璃表面的粗糙结构和它上面的像，取走毛玻璃屏，像变明亮；再微调目镜位置，可使像更清晰（目镜与毛玻璃屏间距离约等于目镜和焦距长度）。

按此法既便于说明望远镜成像原理，也便于调节。

方法二

器材 光具盘（J 2501型），低压电源等。

操作

（1）演示开普勒望远镜成像光路

以大双凸柱透镜（ $f=160\text{mm}\pm 5$ ）作为物镜，以小双凸透镜（ $f=80\text{mm}\pm 5$ ）作目镜，把它们挂在矩形光盘上，如图（a）所示，二者相距约240mm（该距离应等于两只透镜的焦距之和）。

调节由光盘左侧光栏处射入的五条光线，使光路图如图（a）所示，其中A、B表示距物镜左侧极远处物点A、B经物镜所成的实像点（物镜所造的倒立缩小实像，位于物镜第二焦点即目镜的第一焦点处）；A'、B'表示此实像再经目镜所成的虚像点（相对于物点是倒立的，也应位于极远处。为演示方便，物点A、B和像点A'、B'都局限在光具盘内或距其不远处）。此光路图即为开普勒望远镜的成像光路图。从光路可以看出，望远镜的作用是视角的放大（即使虚像A'、B'的视角比物体AB大），并非所造成的像比实物还大（但因视角放大，看物体时有缩短距离的感觉）。

（2）演示伽利略望远镜成像的光路

仍以大双凸柱透镜（ $f=160\text{mm}\pm 5$ ）作为物镜，而以双凹柱透镜（ $f=-80\text{mm}\pm 5$ ）作为目镜，把它们挂在矩形光盘上，如图（b）所示，先使二者相距约为80mm（即使目镜的第二焦点与物镜的第二焦点基本重合）。

调节由光盘左侧光栏处射入的五条光线以及两透镜的间距，使光路如图（b）所示。图中应显示出从光盘左侧极远处A、B两物点射来的光线，经物镜折射，在

生成实像点 A、B 之前即被目镜再次折射而成为发散光束，A、B 即为发散光束反向延长线的交点，即虚像点。这就显示出伽利略望远镜成像的光路图。

在上述演示基础上，再比较放置和不放置目镜（即双凹透镜）时光路变化的情况，进一步演示和突出伽利略望远镜只经物镜所成的是倒立实像，再经目镜所成的则是正立虚像（相对于所要观察的物而言）。

注意 参看实验 363 方法二的“注意”事项。

方法三

器材 焦距分别为 150mm、500mm、125mm 的凸透镜各 1 只，焦距为 -30mm 的凹透镜 1 只，自制纸质镜筒 4 只等。

操作

(1) 组装二十倍开普勒望远镜模型

以 $f=500\text{mm}$ 的凸透镜作为物镜， $f=25\text{mm}$ 的凸透镜作为目镜。按物镜、目镜大小分别配制两只镜筒（镜筒可用牛皮纸自制，内壁应涂成黑色且不反光，内、外筒密切吻合），物镜镜筒长 500mm，目镜镜筒长 50mm，然后按图（a）所示组装起来。物镜和目镜分别起着照相机和放大镜的作用。

(2) 组装五倍伽利略望远镜模型

以 $f=150\text{mm}$ 的凸透镜作为物镜，它起到类似照相机的作用，使远处物体经物镜成一倒立缩小的实像。该实像对作为目镜的凹透镜（ $f=-30\text{mm}$ ）而言，恰是一个虚物，经目镜发散成一正立放大的虚像。放大率由公式 $K=f_{\text{物}}/f_{\text{目}}$ 可求。给物镜、目镜分别选配一合适的镜筒，物镜镜筒长约 120mm，目镜镜筒长约 30mm，把两者套在一起，如图（b）所示。

注意 组装望远镜时，应使镜片与纸筒轴线垂直，镜片主光轴与纸筒轴心垂直；内外筒密切吻合。

说明 所提供透镜焦距规格仅作参考，可按手边现成材料规格自行设计制作。

测定显微镜、望远镜的放大率

显微镜和望远镜都是助视光学仪器，它们的光学系统十分相似，均由物镜和目镜两部分组成。它们的作用都在于增大被观察物体对人眼的张角，起着视角放大作用。

显微镜和望远镜的视角放大率 M 定义为：

$$M = \frac{\text{用仪器时虚像所张的视角 } \alpha_0}{\text{不用仪器时物体所张的视角 } \alpha_E}$$

用显微镜或望远镜观察物体时，一般视角均甚小，因此视角之比可用其正切之比代替，于是光学仪器的放大率可近似地写成：

$$M = \text{tg}\alpha_0 / \text{tg}\alpha_E$$

测定显微镜或望远镜放大率最简便的方法如图所示。以开普勒望远镜为例，设长为 l_0 的目的物 AB 置于离观察者的眼睛为 -S 处，其视角为 α_E ，从望远镜看到的倒立像 A'B' 位于 -S 处，其长为 -l，视角为 $-\alpha_0$ 。今以 E 为投影中心，将 A'B' 投影到物 AB 所在平面内，得到 A'B' 长为 -l，显然，这样投影后像的视角为 $-\alpha_0$ ，于是

$$M = \text{tg}\alpha_0 / \text{tg}\alpha_E = l/l_0$$

因此，如用一刻度尺作目的物，取其一段分度长为 l_0 ，把观察到的尺的像投影到尺面上，设被投影后像在刻度尺上的长度是 l ，则由 式可求得望远镜在给定物距条件下的视角放大率。

方法一

目的 测定显微镜的放大率。

器材 显微镜，米尺，短尺等。

操作

(1) 如图 (a) 所示，将显微镜夹持好，在垂直于显微镜光轴方向距离目镜 25cm 处放置一毫米分度的米尺 B，在物镜前放置另一毫米分度的短尺 A。调节显微镜，使从显微镜中能看到短尺 A 的像。

(2) 用一只眼睛通过显微镜观察短尺 A 的像，另一只眼睛直接看米尺 B。经过多次观察，调节眼睛使得显微镜中看到 A 尺的像被投影到靠近米尺 B 时(如图 b)，选定 A 尺的像上某一分度 l_0 ，记录相当于 B 尺上的分度 l ，即得放大率 $M=l/l_0$ (图 b 中所示， $M=20$)。重复三次，取其平均值。

(3) 显微镜镜筒改变之后，光学间隔随之改变，因而放大率随之变化。将显微镜镜筒稍作改变，再测一次放大率。重复三次，取其平均值。

说明 本方法是测定读数显微镜的放大率，它的光学系统与一般显微镜相同，只是放大率较低(约 20—30 倍)。它是装置在用螺旋测微装置控制的移动平台上，既可进行垂直方向的测量，亦可进行水平方向的测量。

本实验亦可用作测定在光具座上组装显微镜的放大率。

方法二

器材 光具座 (J 2507 型)，透明刻度尺 (或透明三角板) 等。

操作

(1) 以 $\phi 50$ 、 $f=300\text{mm}$ 的平凸透镜 L_2 作目镜， $\phi 30$ 、 $f=50\text{mm}$ 的双凸透镜 L_1 作为物镜，以透明刻度尺 A 作为观察物，参照实验 363 方法一组装成一显微镜，如图所示。

(2) 另取一透明刻度尺 B (刻度应与 A 相同) 紧靠在刻度尺 A 的旁边。用一只眼睛通过显微镜观察 A 尺的像，另一只眼睛直接观察 B 尺，经过练习使眼睛适应，方可读出 B 尺和 A 尺像的数值，并使 A 尺像投影在 B 尺的位置上。然后选定 A 尺像中相邻两个毫米刻度为单位尺度 1，再读出 B 尺上相对应的刻度 N，则可估测其放大率：

$$M = N/1 = N。$$

方法三

目的 测定望远镜的放大率。

器材 光具座 (J 2507 型)，标尺 (米尺) 等。

操作

(1) 用凸透镜 (f 为 300mm) 作物镜, 另用一凸透镜 (f 为 50mm), 组装成一开普勒望远镜 (参见实验 364 方法一)。

(2) 将米尺放在距目镜 1m 处, 并使尺面垂直于望远镜光轴。用一只眼睛通过自制望远镜观察米尺, 另一只眼睛直接观察远处的米尺, 调节望远镜使成像最清晰。此时人的视觉系统会把两眼观察到的图象重叠在一起。

(3) 测出由望远镜放大后米尺像上某一段分度 l_0 相当于另一眼睛直接看到的标尺分度 l (参看方法二)。由放大率公式 $M=l/l_0$ 求出望远镜的放大率。重复三次, 取其平均值。

(4) 将米尺移至距目镜 2 或 3m 处, 重复实验, 求出对应的放大率。

说明

(1) 本实验可用短焦距望远镜来做, 这时标尺可采用普通米尺, 距离可近些。如果用长焦距望远镜, 由于望远镜是用来观察远而大的物体, 所以测定其放大率时, 作实物用的标尺必须较大, 并放置于离望远镜较远处。

(2) 为便于观察, 可自制一根以厘米为刻度的标尺, 置于物镜前 1m 左右。参照前述观察方法, 测出像尺中一格长度相当于外边刻度尺中 N 个格的长度, 则望远镜的视角放大率

$$M = N / 1 = N。$$

双缝干涉

方法一

目的 观察双缝干涉图样, 认识光的波动性质。

器材 单狭缝屏, 衍射双缝屏及光源等。

操作

将光源照亮单狭缝, 手拿双缝贴近人眼去观察单缝 (如图), 即可看到一组清晰的干涉条纹。条纹的位置在单缝屏处, 中央亮纹与单缝重合。

注意

(1) 单缝与双缝要平行, 干涉条纹才清晰。照亮后的单狭缝是起到线状光源的作用。如光源本身即接近于线状或点状单缝可省去不用, 例如通过双缝去观察氦氖激光器的毛细管, 小电珠及较远处光源等。

(2) 由于狭缝衍射总是伴随着双缝干涉而产生, 因而理想的双缝干涉条纹是难以获得的, 我们所看到的实际上是双缝衍射条纹图样。但在教学或实验中 (限于测量波长而不是研究光强的分布) 可将中央亮区的数条等宽的条纹视为双缝干涉条纹。这些条纹的数量决定于双缝常数: $d=a+b$ 。式中 a 为透明狭缝的宽度, b 为不透明狭缝宽度, a 越小 b 越大条纹数也越多, 一般的双缝可看清 3 条、5 条或 7 条, 也有 9 条的。

说明 本方法所观察到的干涉条纹的图样是虚像, 而实像则是成于人眼的视网膜上, 比起观察成于屏上的实像要清晰得多且无须强光源和暗室, 教师在讲台上安置一小电珠, 学生即可在台下手持双缝进行观察。

建议

可将单缝及双缝分别安装在一个不透明圆筒的两端, 制作成为一个简单的双缝干涉教具。使用时只要把单缝对向光源或窗户外面的蓝天或白云进行观察即可。

方法二

目的 获得并观察双缝干涉的实像，认识光的波动性质。

器材 氦氖激光器，双缝片，短焦距透镜及光屏等。

操作

如图所示，在靠近激光管处放置一短焦距透镜（凹透镜或凸透镜），使发散后的激光束通过双缝投射于光屏（或墙）上，即可观察成于屏上的干涉条纹。

注意

（1）双缝干涉属非定域干涉，如光屏移近双缝则见条纹变细，光强增大，反之条纹变粗，光强减弱，故距离的调节以适合观察为好。

（2）如暗室条件较差时可除去发散透镜，此时干涉条纹很短但强度增大。

建议

（1）使用激光器具有调节容易、实验效果好的优点，但如不具备激光器的条件下进行实验时最好选用较强的平行光源，例如用 50W 溴钨灯平行光源。调节时应使用一个可调单狭缝，光线通过单缝、双缝后投向光屏，旋转单缝屏使单缝与双缝平行，再适当调小单缝宽度即可获得清晰的干涉条纹。

（2）双缝片可自制：将牙膏管剪开用木锤敲平，然后用刀片在上面刻两条相互平行、相距 1mm 的狭缝。狭缝长 12mm，宽 0.1mm。

利用双缝干涉测定光的波长

方法一

目的 以双缝干涉条纹的实像为对象测定氦氖激光的波长。

原理

双缝干涉的公式为 $\lambda = \frac{d}{D} \cdot \Delta x$ 。式中 λ 为光源波长， d 为双缝常数， D 为双缝屏至光屏的距离， Δx 为条纹间的距离。为了减小 Δx 的测量误差应测量 n 个条纹的宽度 L ，按 $\Delta x = \frac{L}{n-1}$ 计算，故波长的计算公式写成：

$$\lambda = \frac{d}{D} \cdot \frac{L}{n-1}。$$

器材

氦氖激光器，短焦距透镜，双缝屏，光屏，卷尺，游标卡尺及读数显微镜等。

操作

（1）按双缝干涉实验方法二的装置与方法调出清晰的干涉条纹。

（2）用卷尺测出 D ；用游标卡尺测出 L 并记下 n ；用读数显微镜测出 d 。

（3）按 式计算波长并估算测量误差。

分析

偶然误差的计算公式为：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta d}{d}。$$

如是单次测量则 D 及 L 基本上取决于测量仪器的精度。如增大 D , L 会相应的增大, 误差的前二项将会减小 (用激光做实验时 D 虽大但条纹仍很清晰), 这时主要的误差为第三项, 即 $\lambda/\lambda = d/d$, 因此对于 d 未知的双缝或是自制的双缝, 最好是用精度为 0.01mm 的读数显微镜作多次测量, 取其平均值为测量结果。

实例

用读数显微镜测 d 多次得 $\bar{d} \pm \Delta d = (0.255 \pm 0.005) \text{mm}$, 用卷尺测 D 一次得 $D \pm \Delta D = (2207 \pm 5) \text{mm}$, 用游标尺测四个条纹宽 L 一次得

$(L + L) = (16.20 \pm 0.02) \text{mm}$, 计算波长: $\lambda = \frac{0.255}{2207} \times \frac{16.2}{4-1} = 6.24 \times 10^2 \text{nm}$, 计算相对误差: $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{\Delta d}{d} \approx \frac{0.005}{0.255} \approx 0.02$ 。

如将测量值 $6.24 \times 10^2 \text{nm}$ 与氦氖激光的公认值 632.80nm 作比较, 其相对误差为 0.014 , 可见二者是接近的。

方法二

目的 以双缝干涉图像的虚像为对象, 用虚衍射测量法测定光源的波长。

原理 以干涉条纹的虚像为测量对象时, 与方法一比较, 基本原理与计算公式是相同的, 但也有所差别:

(1) 虚像中央亮纹的位置与对光狭缝重合, 因而 D 应为对光双缝至衍射双缝的距离。

(2) x 的测量是利用观察到的两组干涉条纹调节到其中一条相重合的方法来解决的

(3) 本方法的测量误差较方法一大。

器材 光具座, 小电珠, 滤光片 (红或紫色), 自制对光双缝, 游标尺, 读数显微镜等。

对光双缝的制作方法

在一硬纸板上用刀片刻划出两条透明的平行双缝, 缝间的距离约 5mm , 长约 15mm 。

操作

(1) 如 (图 a) 在光具座上安装好各部件, 并进行同轴调整。

(2) 用眼贴近衍射双缝可观察到在对光双缝处的以 A 缝和 B 缝位置为中心的两组干涉条纹。

(3) 将双缝屏后移增大 D , 并注意观察干涉条纹随 D 的增大而变宽。当 A 组条纹的正 2 级与 B 组条纹的负 2 级条纹重合时即停止移动 (图 b)。

(4) 记下 A、B 间的条纹数 n , 用游标卡尺测出 L (即对光双缝 A、B 间的距离), $\Delta x = \frac{L}{n-1}$ 。记下对光双缝的位置读数 D_1 及衍射双缝的位置读数 D_2 , 则 $D = |D_2 - D_1|$ 。 d 为未知值, 应用读数显微镜测量。

(5) 按公式 $\lambda = \frac{d}{D} \cdot \Delta x$ 计算波长。

说明 与方法一比较测量的偶然误差较大。主要误差来源于人眼的分辨率, 即两条亮纹对观察者的眼睛张角小于 $1/60$ 度时是否完全重合则人眼不能分辨, 由此

而多一项测量误差，而且是最大的误差项。但总的测量的最大误差一般小于 10%。

建议 将对光双缝及衍射双缝分别安装在两个大小不同的圆筒的前端及后端。两个圆筒要求套叠在一起，基本保持同轴，内筒能自由地拉出推进，如此便制作成为一简单的双缝干涉仪。操作时先将滤色片贴在对光双缝上，并使它对向光源或窗外的蓝天或白云，将内筒慢慢拉出，使干涉条纹重合即可进行测量。

薄膜干涉

为利用通常的光源获得相干叠加，总是采用一个分波器，使发自同一光源的波列在分波器上分解为两个或两个以上的波列。薄膜即可视作分波器。

以下方法一介绍楔形皂膜上干涉条纹的直接观察法；方法二介绍一种投影显示薄膜干涉图样的装置；方法三是演示等厚干涉圆环的简易作法；方法四是空气薄膜干涉的演示与观察。

方法一

器材 细铜丝，皂液，烧杯，食盐，酒精灯等。

操作

(1) 用直径约 2mm 的铜丝，弯成一直径约 50mm 的带柄圆环。拭净圆环后，在皂液中浸一下，使圆环上布满一层皂膜。当皂膜竖直放置并反射白光时，就能观察到彩色的干涉图样。且当皂膜逐渐变薄时，由于表面张力及液体流动的影响，干涉图样千变万化，十分生动。

(2) 往酒精灯内和灯芯上撒适量食盐，点燃后灯焰呈黄色，把肥皂膜竖直靠近酒精灯，通过薄膜的反射可观察到黄色灯焰虚像上布满明暗相间的干涉条纹。

注意 配制浓度适当、性能优异的皂液是成功完成本实验的关键。皂液太稀或温度较高，薄膜容易破裂；皂液太稠，流动性差，形成的皂膜过厚不易生成干涉条纹。

皂液的配制方法可参见实验 177 的方法一。

方法二

目的 用反射投影法演示薄膜干涉现象。

器材 幻灯投影机，铁丝环，凸透镜 ($f=7\text{cm}$)，皂液，红色平玻璃，光屏，方座支架。

操作

(1) 将一根长约 20cm 的木棒夹在方座支架上，木棒的一端装有铁丝圆环。

(2) 在暗室内，按图所示，使幻灯投影机和光屏距铁丝环均为 60cm 左右；调节幻灯投影机和铁丝环的高度，使幻灯投影机发出的光照射到铁环中的皂液薄膜上，经凸透镜折射到白色光屏上。

(3) 调节投影凸透镜位置，使光屏上能观察到直径达 10cm，基本是水平方向的清晰的明暗相间的条纹。由于重力作用，薄膜上部逐渐变薄，下部逐渐变厚，干涉条纹会逐渐变得上宽下密。

(4) 拿开红色平玻璃，使白光照射在薄膜上，光屏上会呈现出彩色条纹。

注意

(1) 各仪器的角度和间距主要根据光的反射定律、成像规律决定。透镜焦距不宜太小，成像不宜太大。

(2) 皂液配制方法参见实验 177 的方法一。

方法三

器材 汽油少许，玻璃板，滴管。

操作 取一块光滑平整的玻璃板，洗净晾干（或用盛有清水的较大容器）。用滴管在其上滴一小滴汽油，油滴均匀地向四周扩散，约几秒钟之后，油层外圈开始出现美丽的彩色圆环，然后彩环逐渐向中央收缩直至最后消失。

说明 产生上述现象的原因是当油滴向四周扩散形成油膜，当油膜扩展到适当厚度时，从膜的两表面反射光产生等厚干涉，形成彩色圆环。这种干涉圆环与通常的牛顿环不同之处在于其中心级次最高，边缘级次较低。随着油膜继续扩张，中央区域逐渐变薄，所以看到圆环逐渐向中央收缩。

方法四

器材 载玻片等。

操作

(1) 将两块载玻片（显微镜用），用肥皂水洗去表面的油垢和灰尘，用清洁干布拭净（手不可直接触摸），将它们合并后摩擦两次，用双手拇指和食指加以紧压，使中间形成一楔形空气膜。这时从玻片的反射光可观察到受压处有木纹状彩色弯曲条纹，形状和色调是不规则的，并随着手指压力而变化。

(2) 隔着玻片对准天空看，从透射光中也可看到干涉花样。

分析

(1) 一般书介绍用两块普通玻片叠合，在一端嵌纸片形成楔形膜。实际上只有用精密磨琢的光学玻片才能做到。若将两块 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的普通玻片洗净后贴合，则由于表面不平（有眼睛说不出的涡纹和纽节）引起的空隙可在 $10\mu\text{m}$ 以上，即使不嵌纸片，也看不到干涉条纹。

(2) 在白光下观察空气膜干涉纹，膜的许可厚度不可超过十几个 μm ；但在单色灯光下，厚度超过数十倍依然能观察到干涉纹。两片任意大的叠合玻片（中间清除尘埃），在日光灯光下，不需紧压也能看到密布的条纹。颜色是紫和浅绿色相间（这是因为日光灯发出汞的荧光光谱，其中含有强度大的单色谱线 $\lambda_1=0.4358\mu\text{m}$ 和 $\lambda_2=0.5460\mu\text{m}$ ，它们的颜色是紫和浅绿的）。

牛顿环

“牛顿环”现象是牛顿于 1675 年发现的，它是光具有波动性的最好证明之一，但当时却无法正确解释它。直到 18 世纪末，才由英国科学家托马斯·扬作出了正确的解释。

以下所述方法一、二简叙了用专门仪器演示牛顿环现象的操作要点；方法三、四介绍了两则观察有关现象的简便易行的方法。

方法一

原理 一块曲率很大的平凸透镜，把它的凸面放在一块很平的玻璃板上，在透镜和玻璃板之间形成一层空气薄膜，其厚度从中心接触点向边缘逐渐增大。这样的光学器件叫做牛顿环。当单色平行光投射在牛顿环上时，在空气膜的上下两个表面上反射的两束光将发生干涉，干涉图样是以接触点为中心的明暗相间、中心疏而边缘密的同心圆环。

若用白光投射在牛顿环上，反射光束和透射光束所产生的干涉图样都是彩色的同心圆环，其中心是暗斑或亮斑。

器材 牛顿环，酒精灯，食盐等。

操作

(1) 均匀地旋紧牛顿环上的三个调节螺钉，在日光下就能看到镜片上出现环状彩色条纹。调节三个螺钉，使光环与镜片同心，并占满整个镜片，如图示。

(2) 在酒精灯内和灯芯上放入适量的食盐（灯内可多放些），点燃酒精灯后火焰则呈黄色（钠光）。当通过牛顿环观察黄色火焰的反射光时，可看到明暗相间的干涉环。

(3) 通过牛顿环背面观察，亦可看到透射光干涉环，其明暗条纹位置与反射光干涉环正好相反。

方法二

器材 光的干涉、衍射、偏振演示器（J 2508 型），低压电源等。

操作

(1) 调节仪器所附牛顿环圆框上的三个调整螺钉，使干涉图样位于环中心部分（参见方法一）。注意螺钉不要拧得太紧，以免玻璃破碎。

(2) 将牛顿环、光源、凸透镜、毛玻璃屏按图中所示位置放置，使投影用的凸透镜（ $f=7\text{cm}$ ）距牛顿环约 7cm。

(3) 用 6—10V 电压点亮灯泡，转动光源，使出射光束的光斑落在牛顿环上，反射光经凸透镜在毛玻璃屏上成像。

(4) 稍稍调整牛顿环的位置，在毛玻璃屏上即可看见清晰的圆环形彩色干涉条纹。条纹越向外越密，条纹的中心是暗斑。

(5) 把凸透镜和光源取下置于牛顿环另一侧，并移动它的位置，使透射光束的干涉图样投影在白屏（或白色墙面）上，就可观察到透射干涉环，其中心是亮斑，和反射干涉条纹是互补的。

注意 若牛顿环反射干涉图样的中心不是暗斑，则表明牛顿环内平凸透镜的凸面或平玻璃面上有灰尘。接触点的空气膜厚度不等于零。牛顿环需洁净处理。

方法三

器材 直径约 20mm 的塑料瓶盖（或拉线开关的盒盖），洗衣粉少许，蒸馏水（或其他“软水”）等。

操作

在容器中装入比例为 1：5 的洗衣粉和水，调匀后用筷拨去泡沫，然后将盒盖盖口在皂液内浸一下，要使盖口的四周边缘都浸到皂液，轻轻外拉使盒盖上附有一

个由皂液构成的凸起的泡状(图 a)。略待片刻即可见到泡上的“牛顿环”(图 b)。“环”的色彩鲜艳,且随着皂液厚度的变化而变化。

方法四

器材 平凸透镜($\phi 50\text{mm}$ 、 $f=300\text{mm}$) 2 块,镜头纸等。

操作

用镜头纸擦去平凸透镜上的灰尘。把两个透镜凸面向外、平面拼在一起,并在透镜的边缘包上一层镜头纸。用双手的拇指和食指捏紧透镜边缘部分,使它倾斜 45° 角在自然光下观察,能看到彩色的干涉圆环。改变两透镜间松紧程度,干涉圆环也随着变化。

建议 本实验所需透镜可用 J 2507 型光具座附件盒中的平凸透镜,应注意小心地取下弹簧圈,取出镜片。

说明 从牛顿环实质上是一组圆形的等厚干涉条纹这个意义上看,本实验中所产生的干涉图样亦可称为“牛顿环”现象。

用面镜构成相干光源

目的 用菲涅耳双面镜构成相干光源,获得干涉条纹,认识光的波动性质。

原理 如图所示, M 为两块平面镜组成的菲涅耳双面镜,其镜面间的夹角较大, θ 为其补角。 S 为点状或线状光源, S_1 与 S_2 是由双面镜产生的虚像,构成相干光源,斜线部分为两光源交叠的干涉区,因而在光屏 P 的 bc 范围内,呈现等宽的干涉条纹。双镜干涉计算波长的公式为:

$$\lambda = \frac{d}{B+D} \cdot \Delta x. \Delta x \text{ 为干涉条纹间的距离,在 } \theta \text{ 很小的情况下 } d \approx 2\theta B,$$

所以 $\Delta x \approx \frac{B+D}{2\theta B} \cdot \lambda$ 。可见当光源选定后要获得较宽的干涉条纹(以便

于观察时), θ 要小(一般在 $\frac{1}{2}$ —1 度)并适当增大 D 。

器材 氦氖激光器,短焦距凹透镜,交角可调的双面镜或自制双面镜及光屏等。

双面镜的制作方法

取两块毛玻璃片(约 $25 \times 40\text{mm}^2$),用胶水贴于另一块普通的玻璃片上,贴时应注意使毛玻璃片的光面向上,并在一片毛玻璃的外侧垫上一小片薄纸,如此可使镜面间构成一夹角。

操作

- (1) 在激光管前面置一凹透镜,使发散后的光束,投向双面镜。
- (2) 在反射光路上放置光屏,可见到在两光波交叠的区域出现干涉条纹。
- (3) 增大光屏与双面镜的距离使条纹间隔变宽便于观察。如借助于放大镜观察更佳。

说胆

(1) 在双面镜干涉的图像中能看到比双缝干涉多得多的等宽的条纹。但仔细观察时会发现有一些复杂的、附加的光强分布,这是受直边衍射的影响。

(2) 用一块面镜按上述方法实验时,同样可获得类似的干涉图像,这就是洛

埃镜实验，它是由光源本身及其虚像来构成一对相干光源的。洛埃镜实验的意义，主要是证实了光在玻璃面上反射时的相位突变，即通常说的半波损失的存在。

光的衍射

光的衍射实验是光具有波动性的重要证明之一，对发展光的波动理论起过重要作用。

用激光演示光的衍射现象能取得较理想的效果。方法一着重介绍了用激光演示泊松亮斑等衍射现象的操作要点；方法二说明了使用衍射演示仪（J 2508 型）进行演示的方法；方法三所介绍的单丝衍射实验，可作为不用激光的场合演示“泊松斑”的替代实验；方法四所述用游标卡尺观察，特别适宜用作研究产生明显衍射现象的条件以及观察衍射图样随缝宽变化的情况；方法五、六简便易行，可作为课外小实验。

方法一

目的 演示泊松亮斑和圆孔衍射、单缝衍射图样。

器材 氦氖激光器，方座支架，聚脂薄膜（ $4 \times 6\text{cm}^2$ ），（自制）金属小圆片，凹透镜（焦距 30cm、口径 7cm），透镜支架，白色光屏，胶水等。

操作

（1）用薄金属片剪成直径 2mm 的小圆片，粘在厚 0.1mm 的聚脂薄膜上，并将该薄膜固定在方座支架上。

（2）将氦氖激光器、金属小圆片和光屏按图示放置在一直线上（凹透镜暂不放）氦氖激光器至金属小圆片的距离为 3m，金属小圆片至光屏的距离为 5m。光屏可用白布做成，也可用白色墙壁代用。

（3）打开氦氖激光器，将聚脂薄膜上金属小圆片的位置调整在激光光束正中，聚脂薄膜平面要与激光光束垂直。此时在光屏上已可看到不太明显的衍射图样。

（4）为了提高衍射图样的清晰度和扩大观察范围，在光屏前约 1m 处放置一片固定在透镜支架上的凹透镜（也可用口径 7cm、焦距 30cm 的凸透镜）经适当调整离屏距离即可在光屏上看到直径大约 10cm 的衍射图像，中心处为亮点（即泊松亮斑）。

注意

（1）本实验要在暗室内演示。为了提高衍射图样的清晰度，聚脂薄膜要薄不宜厚，聚脂薄膜和透镜均要用擦镜纸擦干净，粘贴金属小圆片时特别要注意胶水宜少不宜多，决不能使胶水渗到小圆片外。

（2）制作小圆片是本实验的关键，如果外圈不光滑、不圆，那只能出现衍射条纹而不能观察到泊松亮斑。金属小圆片可用空牙膏管制作，也可用外径 2mm 左右的塑料电线（中间铜丝不要去掉）剪 2mm 长一小段成一圆柱体，直接将圆柱的一个底面粘贴在聚脂薄膜上，效果也不错。

说明

（1）如果在 2mm 厚的胶木板上钻一个直径为 2mm 的小孔，用它替代聚脂薄膜上的金属小圆片，可观察到圆孔衍射图样。

(2) 如果在空牙膏管上用刀片开一个长 12mm 宽 1mm 的狭缝，用它调换聚脂薄膜上的金属小圆片，不用透镜也可观察到单缝衍射图样。

方法二

器材 J 2508 型光的干涉、衍射、偏振演示仪，低压电源等。

操作

(1) 装置如图。套在光源前的单缝缝宽 0.11mm，衍射单缝缝宽 0.08mm，装在光具座上。

(2) 调节光源单缝、衍射单缝和观察筒共轴(具体方法见实验 366 的方法一)后，即可在遮光筒内毛玻璃屏上观察到清晰的衍射条纹。

注意

(1) 调好共轴是保证本实验成功的关键。

(2) 亦可用游标卡尺的外侧脚作为宽度可调的单缝，代替衍射单缝完成上述演示。

方法三

器材 自制单丝屏，其他同方法一。

单丝屏的制作方法

取直径在 0.1mm 左右的细丝(如头发丝、漆包线等)，用胶水竖直地粘在光具架上。

操作 实验装置同方法一，用自制单丝屏替换衍射单缝，并将光源单缝换成宽度为 0.025mm 的，转动光源单缝的位置，使它和不透明的单丝平行。在屏上可观察到与单丝平行的衍射条纹。

注意 应特别注意观察，在单丝的“阴影”中央有一条亮线，其形成原因与泊松亮斑雷同。

说明 通常情况下，在课堂内演示泊松亮斑比较困难，可用本实验替代，较易成功。

方法四

器材 12V、15W 的单直灯丝灯泡(或 8W 日光灯)，低压电源，游标卡尺，彩色(红、绿等)滤色片等。

操作

(1) 用单直灯丝灯泡作为光源，并把它竖直放置(亦可将 8W 日光灯管竖直装在木盒里，在灯管正前方及两侧的盒壁上都开有长孔，让灯光从长孔中射出作为线形光源)。

(2) 调节游标卡尺两外侧脚间距，形成 0.5mm 宽狭缝。并让狭缝竖直地紧靠眼睛观察线光源的灯丝，这时在狭缝的两侧可看到彩色条纹。

(3) 移动游标卡，使缝宽逐渐增大(例如增大到 0.8mm、1—2mm 等)，观察缝宽对衍射条纹的影响。(特别要注意，当缝宽增大到一定程度时，彩色条纹会消失，从而理解产生明显衍射现象的条件。)

(4) 把狭缝宽度减小到 0.2mm，可看到中央亮线两侧的彩色条纹更加清晰，

向两侧延伸得更远。

(5) 在狭缝前加上彩色滤色片后，可观察到相应颜色的明暗衍射条纹。

注意 必须使光源灯丝，测脚狭缝和眼睛对齐在一条直线上，否则因测脚会对光线反射形成灯丝虚像，影响观察。

方法五

器材 铅笔，黑纸（或不透光厚纸），刀片，直尺等。

操作

(1) 将两支铅笔合拢，使其与点亮的日光灯平行，从两笔间的细缝观察灯管（观察时应使单缝贴近眼瞳）可看到单缝衍射图样。

(2) 在长方形黑纸上，用刀片、直尺划一细缝，用相同方法可观察到衍射图样。

注意

(1) 铅笔间缝隙大小不一，应选取较小缝隙，约 0.08mm 为佳。

(2) 在以上两实验中，改变缝宽度观察，可知：只有当缝宽小于一定数值时才能产生光的衍射。

方法六

器材 15W 白炽灯，细针，包装胶卷的黑纸等。

操作 在厚纸上用针尖戳一小孔，如图所示方法通过小孔观察白炽灯的灯丝，可以观察到衍射图样。

注意 圆孔直径以小于 0.5mm 为宜。孔的边缘应尽可能光滑，最好用电火花击穿制作微圆孔。观察时，孔屏距灯大于 0.5m 时图样较明显。

光栅衍射

光栅是由大量等宽等间距的平行狭缝所组成的光学器件。衍射光栅有透射光栅和反射光栅两种。方法一—三都是用透射光栅进行观察；方法四介绍了一个常见的反射光栅——唱片，并说明了用它观察衍射图样的方法。

方法一

器材 光的干涉、衍射、偏振演示器（J 2508 型），低压电源，导线等。

操作

(1) 如图所示，将光源、缝宽为 0.025mm 的光源单缝，凸透镜（ $f=7\text{cm}$ ），毛玻璃屏共轴放置在光具座上。

(2) 调整凸透镜的位置（距光源单缝距离稍大于 7cm），使得光源单缝在毛玻璃屏中央成清晰的放大实像。

(3) 把装有衍射光栅的光具架插在中滑块的第一孔中，缝座上的指示刻线对齐光具架的零刻线。移动中滑块，使光具架靠近透镜。

(4) 转动光源单缝，使之和光栅（或多缝）中的狭缝平行时，在毛玻璃上就可以看见光栅的衍射图样。

分析 为通过演示说明衍射明条纹随着缝数增加而变窄且亮度增强的特点，可在光具架上依次装置单缝、双缝、多缝和光栅，比较它们的衍射条纹的变化。

光栅衍射的明条纹光强大，可直接在毛玻璃屏上观察，单缝、双缝和多缝的明条纹较弱，可用观察筒代替毛玻璃屏。

方法二

器材 自制光栅 2 片，白炽灯，日光灯等。

光栅的制作方法

在一张 $100 \times 60\text{cm}^2$ 的白纸上用鸭嘴笔画 200 条平行线，墨线宽 3mm、间距 2mm。用 135 照相机正面取景拍照，在室外阳光均匀照射全图，光圈取 11—16 之间，曝光时间取 $1/100\text{s}$ 。物距由光栅常数 d 的要求和透镜焦距 f 估算，如光栅常数为 d ，则缩小到原图的 $200d/100=2d$ ，可得

$$u/f = 1/2d, \quad \text{即 } u = f/2d.$$

当 $f=5\text{m}$ 时，则 $u=5\text{m}$ ，可以算出物距取 2.5—10m 时，对应底片上可获得每厘米 100—400 条。摄后底片用 D_{16} 微粒显影液冲洗后晾干装框。

操作 透过自制光栅观察白炽灯光，缝光源或点光源很容易看到彩色衍射花样及扩展开的彩色光谱；并注意比较不同距离、用不同的光栅观察时，衍射图样的变化。

方法三

器材 载玻片，胶水纸，羽毛，激光仪，薄布（薄手帕、黑尼龙纱巾、红领巾均可），15W 白炽灯等。

操作

（1）将羽毛的毛松开些夹于两载玻片间，四周用胶水纸带固定（如图），成为“羽毛光栅”。用激光打在光栅上，可于屏幕上观察到光栅衍射图样。

（2）透过“羽毛光栅”或通过薄布（例如尼龙纱巾等）观察白炽灯灯丝，可见明显的光栅衍射图样。

方法四

原理 在一些物体的光滑表面上，均匀地镌刻许多细痕，就成为一反射型光栅。当光线射到栅面时会发生衍射，其作用和透射光的衍射相类似。因为在有刻痕处光线会发生散射，造成散射光的叠加，从而产生衍射图样，使白色光产生彩色光谱。

唱片上刻有密集的凹槽，它们均匀地排列在唱片上就可以看作一个反射光栅。

器材 黑色唱片。

操作 双手持唱片边缘，水平举到和眼睛差不多高处。对着明亮处，以双手为轴，缓慢变动唱片与水平面夹角，并注意观察从唱片槽纹处反射过来的光线。当角度合适时，就能观察到彩色的衍射图样。

光的偏振

光偏振实验是证实光为横波的重要实验。通常产生偏振光的方式有以下四种：

1. 选择性吸收产生偏振。
2. 反射产生偏振。
3. 多次折射产生偏振。
4. 双折射产生偏振。

以下，着重围绕前两种起偏方式介绍一些演示和学生实验。

方法一

原理 本方法是借助偏振片的选择性吸收产生偏振。自然光通过偏振片就变成完全偏振光，其光振动方向与偏振片的偏振化方向一致。偏振光要用另一块偏振片来鉴别。一般把产生偏振光的偏振片称为起偏器，把鉴别偏振光的偏振片称为检偏器。如图(a)所示，当检偏器以光波传播方向为轴转动时，屏上的光斑会有明暗交替的变化。当起偏器和检偏器的偏振化方向一致时，光斑最亮；当起偏器和检偏器的方向相互垂直时，起偏器产生的完全偏振光不能通过检偏器，光斑消失。当两个偏振片的偏振化方向的夹角在 0° — 90° 之间时，光斑的亮度介于最亮与最暗之间。

器材 光的干涉、衍射、偏振演示仪(J 2508型)，低压电源，导线等。

操作

(1) 将光源及毛玻璃屏分别插在一只短滑块及长滑块上。点亮灯泡，转动光源，使出射光束光斑落在屏中央。

(2) 如图(b)所示，将两只光具架分别插在第二只短滑块及中滑块上，将偏振片装入光具架。为方便演示，起偏器的偏振化方向取铅直(或水平)方向，即偏振片片座上的指针对齐光具架 0° (或 90°)刻线。

(3) 转动检偏器，即可看到毛玻璃屏上的光斑有明暗交替的变化。当起偏器与检偏器的偏振化方向相一致，即片座上的指针相平行时，光斑最亮；当它们互相垂直时，光斑消失；当转到其他位置时能看到亮斑，但不是最亮。

注意

参见“方法二”注意。

方法二

原理 本方法是演示玻片反射起偏产生完全或部分偏振光。该偏振光也用检偏器来鉴别，鉴别完全偏振光的操作方法与前述“方法一”相同，而用检偏器鉴别部分偏振光时，光斑的亮度有明暗交替变化，但不会消失。

图(a)是玻片反射起偏产生完全偏振光或部分偏振光的光原理图。

器材 光的干涉、衍射、偏振演示仪(J 2508型)，低压电源，导线等。

操作

(1) 将光源及玻片反射起偏器分别插在梯形具座的2号孔及4号孔里。玻片片座对齐 $i=57^\circ$ 的定位刻线。在长滑块的前后插孔中分别插上光具架及毛玻璃屏。

(2) 点亮灯泡，转动光源，当入射光束经玻片反射后落在屏中央时，反射光束与光具座导轨平行。此时入射光束的入射角约为 57° ，反射光即为完全偏振光，光振动方向与入射面垂直。

(3) 如图 (b) 所示，把偏振片装入光具架，转动偏振片，屏上的光屏即呈现出明暗交替的变化。在这一装置中，入射平面在水平面方向，所以完全偏振光的光振动方向在竖直方向。当检偏器的偏振化方向在竖直方向，即片座上的指针对齐光具架的零刻线时，光斑最亮；检偏器转过 90° ，即片座指针对齐光具架 90° 刻线时，光斑消失。

(4) 如将光源分别插在梯形具座 1 号、3 号孔里，玻片片座分别对齐 $i=60^\circ$ 及 $i=45^\circ$ 的定位刻线。转动光源，当玻片反射后的光斑落在屏中央时，入射光束的入射角分别为 66° 及 45° 左右。此时反射光均为部分偏振光。垂直于入射面的光振动占优势。转动偏检器时，光斑有明暗交替的变化，但不会消失。当检偏器指针对齐光具架 0° 刻线时，光斑最亮，对齐光具架 90° 刻线时，光斑最暗。

注意

偏振片的偏振化方向通常校准在片座指针所指的方向。演示前，应检查二者方向是否一致，如不一致，可以自行加以调整：首先按上述操作方法由反射起偏获得完全偏振光，然后把偏振片压圈上的三只螺钉松开，偏振片装入光具架内，片座上的指针对齐光具架的 90° 刻线并保持不动，转动偏振片，当屏幕上光斑消失时，拧紧压片上的固定螺钉即可。（由于人眼判断最暗要比判断最亮准确度高，所以采用选取光斑消失的位置来加以校正。）

方法三

器材 圆形偏振片，投影仪，黑纸等。

操作

(1) 在偏振片上，根据其偏振方向，用墨水画一条直线通过其圆心，表示其偏振方向。

(2) 把两块偏振片并列地放在投影仪的台面玻璃上，调整聚焦，使图像清晰。分别缓缓旋转两块偏振片，可观察到透过偏振片的亮度几乎没有变化。

(3) 在暗室中，在投影仪上铺一张挖有圆孔的黑纸（孔径与偏振片的外径等大）。然后将两块偏振片按其偏振化方向相同地叠加在一起，放在黑纸的圆孔上，如图所示。在屏幕上可看到一圆形亮斑。

(4) 使下面一片偏振片不动，而缓慢地旋转叠合在上面的一片偏振片。可明显地观察到，圆形亮斑的亮度随两偏振片的偏振方向（即看到的亮斑中的两条直线）的夹角的增大而变暗。至两线正交时，全黑。

(5) 再延原转动方向，继续缓慢地旋转上面的一片偏振片，又可明显地观察到，圆形光斑渐渐出现，其亮度将随两直线夹角的减小而变亮，直至两线平行时，最亮。从而可以归纳出偏振现象与偏振方向的关系。

方法四

器材 偏振片，平玻璃板，白色面光源（或太阳光）等。

操作

(1) 透过一块偏振片，观察白炽灯光（或太阳光）。

(2) 将两块偏振片叠加一起或者留一部分不重叠,如图(a)所示。透过偏振片观察白色面光源(也可观察窗外的天空或光亮的物体),并慢慢转动其中的一片,能看到光线亮度的周期性变化。

(3) 把一平玻璃板(背面设法用墨汁涂黑更好)放在桌面上,使视线与法线交角约为 57° ,透过一片偏振片观察玻璃板的反射光,如图(b)所示。并慢慢转动偏振片,就能观察到透射光线明暗程度的周期性变化,并且对应光线最亮和最暗的位置,偏振片恰转过 90° 。

说明 偏振片可取自立体电影眼镜的镜片。它是在透明的塑料薄膜纸上涂一层电气石制成的(厚约 0.1mm),呈深绿色,各自的偏振化方向如图(c)所示。把各自的偏振化方向用墨线标出,就是两片人造偏振片。

光的色散

方法一

器材 等边三棱镜,小平面镜,狭缝屏,白屏,铁架台等。

操作

(1) 将棱镜水平放置,调节和旋转棱镜,使太阳光线经棱镜折射后在屏上显示出彩色光带,即光的色散现象(图a)。

(2) 根据需要,亦可借助平面镜将太阳光反射到特定的方向。装置如图(b)所示,经平面镜反射的日光,通过狭缝,经三棱镜折射发生色散,在白色光屏上呈现出彩色光带。若需增大光带的宽度,可适当增加光屏与棱镜之间的距离(一般在 1m 以外),同时增加光线射向光屏的入射角。

(3) 在上述光的色散光路方向上原三棱镜之后,顺放第二块相同的三棱镜,使两个棱镜的底面置于光路同一侧,观察到的仍是排列顺序不变的彩色光带,如图(c)所示(这一现象称作白光的二次色散)。它表明:棱镜并未改变光的颜色,只是把白光展开成单色光。另外,利用二次色散也能扩展彩色光带的宽度。

(4) 如图(d)所示,把另一狭缝置入色散光的光路中,只让其中某一种色光(如红光或紫光)通过,然后在第二块狭缝后再放一块三棱镜,让单色光通过这块棱镜后再落在光屏上。可发现光屏上仍是原来颜色的光。这就演示了单色光通过三棱镜后仍是单色光。

注意

(1) 本实验中,要获得具有理想宽度和亮度的彩色光带,以太阳光作为光源最为理想,其次是选用较强的投影仪光源或平行光源。

棱镜应采用边长 45mm 以上的等边三棱镜或自制水棱镜,并注意通过反复调节后确定光线的最佳入射角度(一般在 40° 以上)。

(2) 如光屏上彩色光带的中间部分呈黄色或白色,这是由于经色散的单色光又部分地重叠复合而成。适当减小狭缝能消除这一现象,但减小狭缝宽度同时会影响光带的亮度。狭缝宽度以 $2\text{—}5\text{mm}$ 为宜。

(3) 为减小光在棱镜内的能量损失、提高光带的可见度,应让光线靠近棱镜的顶部通过。

说明

(1) 水棱镜的自制法

取三块 $5\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的玻璃或有机玻璃，把它们围成一个三棱柱，用细线扎紧。再取一只大小适宜的透明塑料袋放入三棱柱空腔内，注满清水后系紧袋口，如图 (e) 所示。这种水三棱镜的分光效果与玻璃三棱镜差不多。

(2) 幻灯狭缝光源的制作方法

用短焦距书写投影仪作光源时，可取一块适当大小的不透明硬纸板，覆盖住投影的画面窗口，在偏离中心 $4\text{—}5\text{cm}$ 处开一条狭缝，开亮灯具即成狭缝光源，如图 (f) 所示。

方法二

原理 如图 (a)，在盛有清水的容器中放置一平面镜 M，当入射的白光 I 在 O 点折射进水中，变成色散光束，红光和紫光分开，它们在平面镜 M 上反射后抵达水面，并且第二次折射出水面成 R 和 V。按照反射定律，AMB 对光线 I 的色散作用，就相当于一个虚拟的水三棱镜 ABC 对一条虚拟的入射光线 I' (I' 与 I 关于镜面对称) 的色散作用一样，I' 是 I 的虚像。

器材 平面镜，瓷碗，白色光屏，清水等。

操作 如图 (b) 所示，在盛有清水的瓷碗中倾斜放入一块平面镜 M_1 ，使镜面与水面间约夹 30° 角可在屏上 (或墙) 映现带彩色的光斑，适当调节镜面位置 (倾角 $20\text{—}30$ 度)，即可观察到白光被水色散所成的彩色光带。

如在色散光路上再放置另一平面镜 M_2 ，则可将彩色光带稍放大后投射在对面屏幕 (或墙面) 上如图 (b)。

注意 由于水的折射率 (1.33) 比玻璃的折射率 (1.5—1.52) 要小，因此产生的光谱要窄些。若用折射率为 1.47 的松节油代替水，可增加光谱宽度。实验完毕后，浸湿的平面镜应及时取出并擦拭干，以保护反射面。

色光的复合

色光的复合主要有直接混色、时间混色和空间混色三种方式。

方法一—四采用的都是直接混色方式，即将单色光同时射向同一空间位置上直接相加复合。其中方法一详述了演示直接混色各种途径和操作要点，方法二、三、四结合不同器具作了更具体的介绍。

方法五采用的是时间混色方式，即利用人眼的视觉暂留效应将色光加以复合。

方法六采用的是空间混色方式。它是利用人眼的分辨能力有一定限度，从而使眼具有空间混色效应。彩色电视也是采用这种方式混色的。

方法一

目的 采用不同的器具 (反射镜、折射棱镜、凸透镜等)，演示色光的复合。

器材 三棱镜，卤钨灯 (12V、15W)，凸透镜 (焦距 10cm 、 15cm 各 1 个)，光屏，低压电源，棱镜台，透镜支架，带狭缝纸屏，平面镜和狭条形小平面镜 (宽度 0.5cm 左右) 等。

操作

(1) 以卤灯（或用平面镜反射日光）作为光源，按图（a）所示的装置，演示光的色散

(2) 用三棱镜复合

按图（b）所示，沿光的色散实验光路方向上，在原三棱镜后面再倒置放一只三棱镜，使两只三棱镜底面分居光路两侧。这样当几种单色光经第二只棱镜折射以后在屏上产生叠加，在色光的叠加区可看到白色光。图（c）是用投影仪演示时色光复合的光路。

(3) 用凸透镜复合

如图（d）所示，在色散实验光路中，经三棱镜色散以后，获得所需几种单色光，在棱镜后放一凸透镜 L_1 （该透镜直径最好大些），将几种单色光会聚在白色光屏上，复合在一起又成白光。

为了使屏上叠加的光的区域有适当的宽度和强度，必须合理选择透镜 L_1 的焦距，并安排好白色光屏和透镜 L_1 的相对位置。

(4) 用平面镜复合

如图（e）所示，取两块狭条形小平面镜（宽度约5mm）分别插在色散光束的不同部位上（要在近屏处插入），可在光屏上某一位置显示出两个单一颜色的矩形光斑。适当调节小镜片，使两单色光斑叠合，叠合后的光斑即呈另一种颜色。例，红+绿=黄，红+蓝=紫红，黄+紫=粉红等。如果用三块小镜片做上述复合实验，可以使三种单色光复合，例如红+绿+蓝=白。

说明

(1) 图（d）中，演示用凸透镜复合光的实验装置中，屏上的白色光带A B可以看作是棱镜第二折射面上A B的倒立实像。根据凸透镜成像规律，要想在屏上获得清晰的白色光带，透镜与棱镜间距离必须大于透镜的焦距。

(2) 图（d）中，透镜距棱镜愈远，则光屏距透镜愈近，屏上的白色光带愈小，愈亮；透镜距棱镜愈近，则光屏距透镜愈远，屏上的光带愈大，愈暗。

实例 选用焦距为15cm的凸透镜，置于距棱镜约20cm处。另将光屏置于距透镜约1.5m处，在光路上前后移动透镜即可获得一条白色光带。

方法二

器材 投影仪（光源应选溴钨灯或镝灯），三棱镜，铁架台，有缝光屏（缝宽3—5mm）等。

操作

(1) 将有缝光屏平放在投影仪面板上，调节成像凸透镜及反射镜离缝屏间距离，使银幕上的缝像清晰可辨。

(2) 如图所示，将三棱镜固定在铁架台上，放在投影仪的成像凸透镜上方，调整三棱镜的高度和转动三棱镜，使银幕上的白色缝像分解成连续光谱像。

(3) 使彩色光带通过另一个倒放的三棱镜，色光又汇合成白色光带（三棱镜放置法可参见方法一）。

注意

(1) 光源不宜用普通白炽灯的幻灯投影机，因其亮度不足，色温较低，偏黄色。投影幻灯光源一般用溴钨灯，色温较高，分解成的光带色彩鲜艳，明亮可见。PB-D型白昼投影幻灯机中的溴钨灯为“24V、50W”，由变压器将市电降压供电。

(2) 有部分投影幻灯采用高压镝灯做光源(如南京产的 H-T-302 型), 则效果更好, 即使有阳光照射的教室内也能显示较明亮的光带。

说明

(1) 本方法的主要优点在于不用太阳光作为光源, 不需暗室, 不受天气限制, 且所用器材为实验室常用器材。

(2) 方法一中所述有关演示也可借助本装置完成。

方法三

目的

- (1) 观察色光复合的现象;
- (2) 了解色光复合的三原色原理。

器材 凸透镜(口径尽可能大些), 硬纸板, 白色光屏, 剪刀及平行光源等。

操作

(1) 剪一圆形厚纸板, 大小应能覆盖凸透镜面。在纸板上挖三个等大的、半径为 0.5—2cm 的圆孔, 组成品字形, 并在圆孔上分别粘上红色、绿色和蓝色玻璃纸。如图所示。

(2) 让白色平行光束(例如太阳光)直射入圆孔并经凸透镜折射后, 能在白色光屏上形成红、绿、蓝 3 个亮圆斑。

(3) 调节透镜与光屏间距离, 使红、绿、蓝 3 色亮斑复合在一起, 呈现在光屏上的将是白色亮斑。

(4) 这时, 如用手指遮住蓝色孔, 红、绿亮斑叠合将成一黄色斑; 如遮住红色孔, 蓝、绿亮斑复合, 呈现一青紫色亮斑; 如遮住绿色孔, 红、蓝亮斑复合呈现出一品红色亮斑。

说明

(1) 通常用三色陀螺演示色光的复合时, 常因光的强度不够不能呈现“白色”, 而呈“灰色”, 本实验可消除该弊端。

(2) 改变红、绿、蓝三色孔上玻璃纸的深浅, 还能观察复合光颜色变化的情况。

方法四

原理 色光调节器用来说明各种颜色是由红、绿、蓝三种单色光混合而成。让红、绿、蓝三束平行光同时投射到屏幕, 调节这三种光的强度, 可使屏幕出现各种颜色。细心调节, 使三种光的强度成某一比例, 可以呈现白色。

器材 滤色片, 凸透镜, 小灯泡, 线绕电位器, 固定电阻, 三刀双位开关, 电源变压器等。

操作

红、绿、蓝三束平行光用下面的方法取得。如图(a)所示, 将滤色片、凸透镜和小灯泡安装在管子中, 小灯泡位于凸透镜的焦点上。小灯泡规格为“6V、2W”。凸透镜焦距 14cm, 直径 5cm。滤色片采用普通的红、绿、蓝玻璃片。这样就制成了三个单色平行光管。三个平行光管应如图(b)固定在一起, 后端稍分开一些, 使三束光同时照射到圆形的屏幕上。屏幕是一张贴在直径为 6cm 的玻璃片上的白纸。

三盏电灯的电路如图(c)所示, R_1 、 R_2 和 R_3 都是“22 , 5W”的线绕电位器,

R_1 、 R_2 和 R_3 是固定电阻器，其电阻依次为 8.1、2.1、0.8。当三刀双位开关 K 接通 1 时，调节每个电位器就可以改变每种单色光的强度。开始时， R_1 、 R_2 和 R_3 都调到 22，三盏灯因电流太小而没有亮，屏幕是暗的。调节跟红灯串联的电阻器 R_1 ，使它的阻值逐渐减小到零，而 R_2 和 R_3 仍为 22，屏幕显示红色，亮度由小变大；把 R_1 调回到 22，再调节跟绿灯串联的电阻器 R_2 ，使它的阻值逐渐减小到零，屏幕显示绿色，亮度也由小变大；同样调法可以在屏幕上显示不同亮度的蓝色。随意调节 R_1 、 R_2 和 R_3 ，屏幕上呈现由三种单色光混合而成的不同的颜色。细心调节，可以调出白色。将三刀双位开关 K 接通 2 时，不用调节，屏幕上三色光混合呈现白光。

平行光管等零件都装在体积为 $15 \times 20 \times 30\text{cm}^3$ 的匣子里，外形如图 (d) 所示。为使屏幕上呈现的彩色与各单色光进行比较，在安装平行光管时，让三束单色光照射在屏幕上的位置稍微偏开一些，如图 (e) 所示，以便同时看到三种单色光的颜色和它们混合后所呈现的颜色。

注意

(1) 色光调节器在白天使用时，最好在屏幕前加上遮光罩；在暗室里使用，效果更好。

(2) 固定电阻器 R_1 、 R_2 和 R_3 都是用电阻丝自绕，功率为 1W，阻值数据供参考。因为选用的红、绿、蓝三块滤色片透过的光强与滤色片的性能有关，所以三个电阻器的阻值要经过试验方可确定。

方法五

器材 自制手转七色板等。

操作

- (1) 用一张白纸，按图示比例涂上颜色。
- (2) 贴在平整质硬较薄的图形硬纸（或塑料）板上。
- (3) 用图钉把纸质圆板钉在皮头铅笔的橡皮头上。若是金属板，则可用 3—6mm 金属杆用螺母固定。
- (4) 用双手搓动铅笔，观察七色板。

注意

(1) 在通常情况下，当七色板（或三色板）迅速旋转时，一般呈现为较暗的灰白色，而不是纯白色。造成这种现象的原因是：各种颜色色调很难调准确；各种颜色反射的色光强度比例不当或饱和度较高等。

(2) 由于使用各色的色调，深浅很难统一，故本方法中提供的角度比例仅供参考。色盘中各种颜色所占比例（角度）应通过实验确定。

(3) 为便于调试和演示，可按图 (b) 制作三个硬纸圆盘，分别对照彩色电视面板上红、绿、蓝为标准，涂以三色（稍浅些），然后把三个圆盘沿着槽口交错地插在一起，如图 (c) 所示组成三色盘。

实验时，每改变一次三种颜色露出部分的面积比例，旋转的三色板便呈现某一种颜色。若三种颜色露出部分面积比例适当，旋转的三色板便会呈现白色。

方法六

目的 了解利用人眼的最小区分阈限进行色光复合的方法（空间混色法）。

原理

(1) 根据色光复合三原色原理，人眼所观察到的各种色光，大多可由红、绿、蓝三种色光复合而成。当亮度比例合适时，红光与绿光混合可呈黄光，绿光与蓝光可呈青光……这种现象与人眼的颜色视觉特征有关。

(2) 人眼要看清并区分开物体上的两个点，必要条件之一是，该两点对人眼所张视角必须大于人眼的最小区分阈限（通常，人眼的最小区分阈限约为 $1'$ ）。倘若被观察的两个点所张视角小于 $1'$ ，人眼将不能区分，而把它们视为一个点。

(3) 当两个不同的色点（或有色线条）对人眼所张视角小于最小区分阈限时，人眼所观察到的将是这两种色光的复合色点，这亦是进行色光复合的基本方式之一——空间混色效应。彩色电视的画面就是依据这一方式进行色光复合的。

器材 红、绿、蓝彩色笔各 1 支，铅笔，直尺，白纸，图钉等。

操作

(1) 用铅笔在 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 的白纸上画出间距为 2mm 的棋盘状小方格，把一个小方格分别涂上红色和绿色，并使相邻小格颜色不同。

(2) 将画有彩色方格的白纸贴在光线明亮处。人由近及远，边后退、边观察彩色小方格颜色的变化。当退到一定远处时就会发现，整张纸都好像涂成了黄色。

(3) 将红、绿方格分别变换成红、蓝或绿、蓝间隔的方格，重复以上观察，可观察到红+蓝=紫或绿+蓝=青等色光的复合现象。

物体的颜色

方法一

器材 投影仪（或幻灯投影机），三棱镜，带狭缝的硬纸板，白屏，红色、蓝色、黑色、无色透明玻璃各 1 块，红纸和蓝纸各 1 张等。

操作

(1) 利用投影仪（或其他白色强光源），参照实验 374 所述方法，完成光的色散实验（装置如图所示）。

(2) 在棱镜和白色光屏之间的光路上，放一块红色玻璃，屏上只出现一条红光带；将红色玻璃换成蓝色玻璃，屏上只出现一条蓝光带。这表明，某种颜色的透明体只能透过同种颜色的色光，其他的色光几乎都被吸收。

(3) 用无色透明玻璃替换蓝色玻璃，光屏上仍现出七色光带，表明各种色光都能透过无色透明玻璃；用黑色玻璃替换无色透明玻璃，在光屏上几乎看不到光带。

(4) 在棱镜与白屏间的光路上不放任何玻璃，在白屏上贴上红纸后，则屏上只有被红光照射部分是亮的；同样，若在白屏上贴上蓝纸，则只有被蓝光照射部分是亮的。这表明某种颜色的不透明体所反射的主要是同种颜色的色光，而其他的色光几乎都被吸收。

方法二

器材 彩色粉笔（红色、黄色、蓝色），无色透明小瓶数只，清水，平玻璃板等。

操作

(1) 将红色、黄色、蓝色的粉笔碾成粉末状，分别置入小瓶内，加入适量清水，调成稀糊状。

(2) 取适量的黄色和蓝色糊状物在平玻璃板上混合调匀后呈绿色；取适量红色和黄色糊状物，混合调匀后呈橙色，……

(3) 将黄色、蓝色和红色糊状物按不同比例混合在一起，观察混合物颜色的变化。

方法三

器材 小碟子，硼砂少许，彩色画页数张，酒精等。

操作 在小碟子里放一些硼砂 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 药房可以买到)，倒入酒精后在黑暗处点燃，将会呈现明亮的黄光（就是钠光）。

在黄色的钠光下观察各种色彩的画页，原来画页上红色、蓝色、绿色等处都成了同一的暗黑色，只有画面上原来的黄色或白色处显现黄色。

方法四

器材 彩色玻璃纸（红色、绿色等）各数张，红花和绿叶（或彩色塑料花）等。

操作 把附有绿叶的红花插在花瓶中，透过多层红玻璃纸去观察红花、绿叶，发现红花变淡了，绿叶却成了黑色；同样，若透过多层绿色玻璃纸去看红花绿叶，情况恰恰相反。绿叶颜色变淡，红花呈黑色。

说明 借助各种灯光亦能观察物体颜色变化的现象：例如高压水银灯含有较多的蓝色而缺少红光和黄光，高压钠灯则以黄光为主；还有能发出各种颜色的霓虹灯和节日彩色灯等。

方法五

器材 红药水数滴，玻璃片等。

操作 在玻璃片上滴几滴红药水，待干后，在明亮处观察由该玻璃片反射回来的光，是绿色；透过玻璃片观察，却是红色。

说明 如把金制成厚几微米的金箔，也可发现反射光是金黄色，而透射的是青蓝色光（金黄色光的互补色光）。

红外线的的作用

方法一

器材 大凹面镜（直径在 150mm 以上），小铁球（直径约 15mm），酒精灯，自制红外线接收器（或热辐射计）等。

红外线接收器的制作方法

取一玻璃烧瓶（250ml），将瓶壁熏黑（或涂一层墨汁）。瓶口用插有直角形玻璃管的橡皮塞盖紧（玻璃管两端开口、管径 2mm、水平部分长 200mm），管的水平部分注入一小段染色水，并附有一用白色卡纸绘的刻度尺。它实际是一“空气温度计”。

操作

（1）把小铁球放在酒精灯上加热（但不要烧红），小球即成为红外线辐射源，把它置于凹面镜焦点（或稍大于焦点）处，如图（a）所示。

（2）使自制红外线接收器跟凹镜保持一定距离（该段距离应在预演时选择好，使这段距离尽可能大，通常在 1m 以上），少许，可看见烧瓶上染色液滴由于瓶内气体受热膨胀而向外移动。说明烧热的小球确实向外发射一种看不见的有显著热效应的射线——红外线。

（3）除去凹面镜，则液滴移动缓慢或停止移动。表明凹面镜对红外线有反射作用。

说明 如用热辐射计演示上述实验则效果更好。热辐射计，又称射热轮。如图（b）所示，它有一个球形真空玻璃容器，内有一个用云母片制成的 4 片黑、白面顺序不变。当有热辐射经过时，叶轮就会转动。因此，它可较灵敏、明显的检验辐射热的存在。

用辐射计代替图（a）中的自制红外线接收器，使辐射计跟凹镜保持一定距离并慢慢向凹镜移动，就能发现在某些地方辐射计叶轮转得很快，另一些地方转得很慢，甚至不转动。

方法二

器材 小铁球（直径约 5cm）硬卡纸，铝箔纸，赤磷（或硝化棉），加热器，燃烧皿等。

操作

（1）用硬卡纸卷成一圆台状纸筒（圆台长约 0.5m，上、下底外径长分别约为 20mm 和 70mm），圆筒内壁敷贴光亮的铝箔纸（可用卷烟包装纸），该圆筒可看作一红外线传导筒。

（2）将烧热的铁球（烧至暗红色）悬挂在支架上，并把它置于距盛有赤磷的燃烧皿约 60cm 处，这时，赤磷并不烧着。

（3）如图（a）所示，把自制红外线反射筒置于热铁球和赤磷之间，该圆台状筒会使红外辐射得以汇聚，赤磷很快被燃着。

说明

图（b）是上述实验的改进。将热铁球置于右侧凹面镜的焦点处，把赤磷（或硝化棉）置于左侧凹面镜的焦点处，由于两凹面镜对红外线的反射和会聚作用，也可使赤磷等很快燃着。

方法三

器材 幻灯投影机，圆底烧瓶，黑纸（或乒乓球碎片），二硫化碳（或四氯化碳）溶液，碘粒等。

操作 把幻灯投影机的防热滤光器和投影透镜取下来，在一只圆底烧瓶内注入含碘的二硫化碳溶液，放在幻灯投影机前代替聚光镜。由于含碘的二硫化碳溶液能吸收可见光，只让红外线通过，并且盛溶液的烧瓶对红外线同样具有折射作用，就会使红外线在烧瓶后形成一个具有很高温度的红外线焦点。如将黑纸片（或乒乓球碎片）置于该处，很快会被烧焦以至点燃。

注意 该红外线焦点处温度较高，能将手灼伤。

紫外线的作用

方法一

器材 紫外线灯，验电器（或静电计），起电棒，普通玻璃板。

操作

（1）用起电棒使验电器带上正电荷，置于距紫外线灯约 10cm 处。接通电源。验电器箔片在紫外线照射下将迅速闭合。这是因为紫外线对空气有电离作用，从而产生大量正离子和电子，使验电器所带电荷被中和的结果。

（2）用起电棒使验电器带上负电荷，同样用紫外线照射，箔片也会很快闭合。

（3）使验电器带上电荷，并用一块普通玻璃板隔在紫光灯管和验电器之间，则箔片的闭合将明显减缓。表明透明的普通玻璃板对紫外线有较强的吸收作用。

注意 紫外线灯的电路和日光灯电路相类似，其灯管是用高硼玻璃制成，能透过紫外线。紫外线对人眼有害，长时间照射对皮肤也会产生不良影响。因而实验时应给灯管加装罩壳（或者用玻璃挡住），把紫外辐射限制在一定区域，操作人员且应带上防护眼睛（平光眼镜）。

说明 本实验也可用验电羽代替验电器，完成有关演示。

方法二

器材 紫外线灯，废日光灯管，铁支架等。

操作 把 20W 的紫外线灯管夹在支架上。并在该灯管外套上一段废日光灯管，接通紫外线灯电源。未套废日光灯管部分可看见紫外线灯内有微弱的紫色光（这是它同时产生的可见光），而套有废日光灯管那部分，由于紫外线有激发荧光作用，废灯管会像普通日光灯一样发出白色荧光。

注意

（1）同方法一“注意”。

（2）普通日光灯的荧光粉是有毒的，应注意防护。

方法三

器材 紫外线灯，荧光物质，普通玻璃板等。

操作

（1）在暗室里，把有关荧光物质放在桌上，用紫外线照射后会分别发出特有的荧光。例如：

用紫外线照射涂于纸板上的铂钡化钡，会激发出绿色荧光（涂有铂钡化钡的纸板可从伦琴射线管用的荧光屏拆取），若用普通玻璃板遮住部分紫外线，由于普通玻璃对紫外线有吸收作用，则被遮部分不再发荧光。

用紫外线照射含叶绿素的酒精溶液，发红色荧光；照射水晶，发蓝紫色荧光；照射石油，发蓝紫色荧光等。

（2）将硫酸奎宁粉溶在水中制成溶液，盛在玻璃杯中，用紫外线照射液面时，溶液就发出蓝色荧光；如果用普通可见光（可用白光透过普通玻璃后）照射同种溶液，溶液就不发光。

用硫酸奎宁的水溶液在白纸上写字和绘画，干燥后看不见，这时用紫外线照射，即产生蓝色的荧光。

注意

（1）同方法一“注意”

（2）某些荧光物质有毒。

说明

能够用紫外线来激发荧光的物质很多，例如含氧化铀的黄玻璃、萤石（氟化钙）、石蜡油、煤油，还有某些颜料如荧光黄、薇红胺、品红等，统称为荧光物质。过去就是用物体发生荧光来检验紫外线的。

伦琴射线

从阴极结构看，伦琴射线管可分为冷阴极射线管和热阴极射线管两类。示教用的多为冷阴极射线管，结构简单，使用方便。

伦琴射线管内有少量气体，它对产生伦琴射线起着重要作用。管内残留气体压强的变化会影响所产生伦琴射线的性质。依此又可把伦琴射线管分为软管和硬管两种。软管内真空度相对较低。产生的伦琴射线穿透力较弱，适宜用较薄物体的透视和照像；硬管则相反。

下述方法一介绍了伦琴射线穿透作用的演示方法；方法二介绍了伦琴射线电离作用的演示方法；方法三是用伦琴射线照相；方法四介绍一种自制“土伦琴射线管”的方法。

方法一

目的 说明伦琴射线管的基本构造；演示伦琴射线（即x光）的穿透作用。

器材 J2512型演示用伦琴射线管，感应圈，蓄电池组（10-20V），导线，铁架台，荧光屏，被透视物体（手、制图仪器等）。

射线管构造如图（a）所示。它属冷阴极型，主要由阴极、辅助阳极、活性炭、对阴极组成。

阴极是产生电子流的源泉，为一铝制凹面，使从这里逸出的电子能够聚集在对阴极（阳极）上；对阴极用重金属钨制成，是接受阴极射线轰击的地方，也是伦琴射线的发源地；辅助阳极与对阴极相连，用来稳定伦琴射线并对射线有收集作用；活性炭能放出自身吸附的气体，维持管内正常的真空度，以延长管子寿命。

操作

（1）将伦琴射线管夹持在铁架台上，高度适中，调节其倾斜度，使对阴极的板面朝正前方。用较短的导线把管子的阴极和对阴极（阳极）分别接到感应圈高压输出的负极和正极，如图（b）所示。

（2）演示在暗室里进行。通电后，当伦琴射线管正常工作时，对阴极表面射出的射线直达管壁，其中一部分使管壁产生黄绿色荧光（玻璃材料不同，荧光颜色也不同），另一部分穿透管壁射出来。若观察不到上述荧光，可能感应圈输出高压的极性不对，应转换感应圈的“换向开关”。

（3）用人手（或绘图仪器、夹在书中的钥匙等）紧贴在仪器所附的荧光屏未涂荧光物的一面，使涂有荧光物一面向着观察者，就可看到屏上所显示出手的骨骼等的阴影。调整荧光屏与射线管间距，以使能从屏上观察到清晰的透视图像。

注意

（1）教学用伦琴管发出射线能量较弱，但对人体组织也有害，应注意缩短实验时间。

（2）实验时勿使手靠近高压导线或触及管壁，以防触电。为防止黑暗中触及高电压，宜在伦琴管前挡一块玻璃屏。

（3）荧光涂料（硫化锌）有毒，应避免触及，实验完毕应洗手。荧光屏用后应存放在干燥、避光的地方。

方法二

目的 演示伦琴射线使空气电离的现象。

器材 同方法一。另加验电器，毛皮，胶木棒，验电羽等。

操作

（1）用毛皮摩擦过的胶木棒使验电器、验电羽带电，当验电器等没有受到伦

琴射线照射时，所带电荷可保持相当长的时间而不消失。

(2) 把带电的验电器等放在距射线管 0.5m 处，一旦接通射线管实验电路，在伦琴射线照射下，验电器等所带电荷很快消失（金箔合拢）。表明伦琴射线使验电器周围的空气电离的本领很强。

注意 参看“方法一”（1）、（2）。

方法三

器材 冷阴极伦琴射线管，感应圈（输入电压 10-12V、火花间隙 80mm），蓄电池组，放大纸，黑纸，显影液，定影液，清水，铁架台，被摄物体（如小鱼）等。

操作

(1) 把伦琴射线管夹持在铁架台上，把它和蓄电池组、感应圈等连接好，使伦琴射线管正常工作后射出的射线垂直向水平桌面。

(2) 用细线把被摄物体（如小鱼）固定在包好黑纸的放大相纸上，并把它们放在伦琴射线管下，使伦琴射线投射到相纸上“曝光”。

(3) 在暗室中把曝过光的相纸放入显影液中显影（3-5 分钟），并在红灯下观察到清晰的像时，立即在清水中清漂 1-2 秒，再浸入定影液定影 10 分钟，然后清洗 10 分钟，拿出即可观察被摄物的透视像。

注意

实验成功的关键是把握好曝光时间。曝光时间与相纸有关，可采用 3#或 4#放大纸；曝光时间还与距离有关，距离增加为原来的 2 倍时，曝光时间应增加为原来的 4 倍。

实例

用 3#放大纸与伦琴射线管距离 4cm（距对阴极纸 10cm）时曝光时间约 4 分钟；距离伦琴射线管 14cm（距对阴极约 20cm）时，曝光时间约 16 分钟。

方法四

器材 废白炽灯泡（220V、15W），锡箔（或铝箔、铜箔，10mm×10mm），蓄电池组（6V），感应圈，导线，感光胶片，黑纸，木板支架，金属垫圈等。

操作

(1) 制作 $\pm X$ 光管。取“220V、15W”废真空灯泡（这种 15W 灯泡一般是真空的，内部不充气）用胶布在灯泡外壁粘上 10mm×10mm 的锡箔。灯丝和锡箔，分别作为 $\pm X$ 光管的阴极和对阴极如图（a）所示。把 $\pm X$ 光管装在图（b）所示的木板支架上。

(2) 如图（b）所示，把包有感光胶片的黑纸贴在光屏上，在黑纸外再贴一金属垫圈（或硬币）。

(3) 将 $\pm X$ 光管的两极连在感应圈上（注意正负极性），使感应圈正常工作，如灯泡内出现微弱的紫蓝色辉光，说明射线管已正常工作。

(4) 使对阴极发出的射线对感光胶片等曝光（由于射线较弱，曝光时间应长些）后，参照方法三中所述，经过暗房工作（显影、定影、水洗）就可得到金属垫圈等的透视照片。

注意 实验时要注意保持灯泡清洁干燥，以防沿灯泡外壁发生火花放电。

光电效应

方法一

器材 直流高压电源（600-900V，可用 JC 型静电高压发生器，或用市电经三倍压整流获得），紫外光源和红外光源各 1 个，锌板，铜板，静电计，玻璃棒，橡胶棒，丝绸，毛皮，导线，铁架台等。

操作

（1）实验装置如图所示。高压电源的正极接在灯架的铁壳上（也可在灯和锌板间加一个电极），高压电源的负极接在静电计的外壳上，并注意绝缘。锌板放在静电计金属杆顶端的小平台上。

（2）演示时，先开启高压电源。受外电场作用，静电计指针稍有偏转，用手指触摸一下锌板，可使稍有张开的指针重新合拢。再开启紫外线灯，当紫光照射锌板时，可看到静电计指针有明显偏转，说明发生了光电效应现象。

（3）关熄紫外灯。用丝绸摩擦过的有机玻璃棒去接触锌板，会看到静电计指针的张角增大，或用毛皮摩擦过的橡胶棒去接触锌板，会发现静电计指针的张角减小。这表明锌板原来所带的是正电荷，从而验证了发生光电效应现象时，从金属板逸出的是电子。

（4）换用红外线灯照射锌板，或用铜板替代锌板，重复上述操作，没有光电效应现象发生。从而说明光电效应现象的发生与入射光的频率和金属材料的种类有关。

注意

（1）做好本实验的关键是静电计。实验前可对静电计适当进行处理，主要是使静电计金属杆与外壳绝缘要好，并排除其机械方面的毛病，可拆下金属杆与外壳接触处的胶木圆环，放在石蜡中煮几分钟，让其中水分尽量蒸发掉，取出后放回原处，再在金属杆和胶木圆环之间用煮沸的硫磺液体注入，冷却后把金属杆固定在正中央。

（2）锌板要求比较纯净，须用砂纸打光擦净。也可以将打光的锌板入、放在水银槽中，用蘸过 5% 稀硝酸的棉花伴着水银来回涂擦，使锌板汞齐化。汞齐化后的锌板长期放置后取出，实验效果仍然很好。锌板的四周不要留有尖角。如没有锌板，也可以用铝板代替，但同样应打磨光洁。

（3）紫外光源应加防护罩，可戴上眼镜或透过平板玻璃观察有关现象，以防止紫外线对人眼的损害作用。

（4）选用紫外光源效果较好，电离作用强的硬伦琴射线管，不宜使用。

说明

本方法由于附加了一个吸收逸出光电子的外电场，并采取了保证静电计绝缘性能好的有效措施，故实验现象明显，成功率高。

方法二

器材 验电器，铜丝网，锌板（ $70 \times 100\text{mm}^2$ ），起电盘，紫外光源和白炽光源，玻璃板等。

操作

（1）把铜丝网插在验电器导杆上，并用起电盘给它带上正电荷。用紫外光照射铜网，可以看到验电器箔片张角几乎没有变化。

（2）把用细砂皮打磨过的锌板插在另一验电器的导杆上，移至铜网后约 10cm 处，如图所示。可以看到，在紫外光的照射下，带正电的验电器箔片的张角减小，

而带锌板验电器箔片的张角增大。由此说明锌板中有光电子逸出，并移向带正电的验电器铜网，使部分正电荷中和。

(3) 用平玻璃板挡住紫外线，或换用白炽灯光照射，就看不到上述现象。

(4) 如给铜丝网先带上负电，重做上述实验，也不能发生光电效应现象，因为缺乏促使光电子不断逸出的外加电场。

注意

(1) 参见“方法一”注意。

(2) 铜网四周的毛边应去掉，以防发生尖端放电。

(3) 本实验如采用教学用弧光灯作为紫外线光源，则应注意：应取下弧光灯的聚光透镜，因紫外线不能透过玻璃；且弧光灯距验电器上的铜网（或锌板）要大于 40cm，以防止气体热电离现象（弧光灯发光时会使它周围气体温度升高而电离，从而把铜网（或锌板）和验电器上的电荷传来）。

说明

演示光电效应理想的方法是：用紫外线或伦琴射线照射与验电器导杆连接的锌板，由于锌板上的电子逸出，验电器显示出带正电的现象。然而，实际上很难观察到上述现象。其原因是：当光电子逸出后，锌板的电势要升高（由于锌板属孤立导体，电容量很小，少量正电也会使其电势迅速升高），会对光电子产生库仑力，遏止光电子的逸出。当锌板的电势值达截止值时，就不能再发出光电子。由于锌板在紫外线照射下该截止值仅数十到数百伏（可由 $U_m = hr/e$ 加以估算，其中 h 为普朗克恒量， e 为电子电量， r 为入射光频率），要显示出锌板所带的微量正电，即使使用最灵敏的箔片验电器亦达不到。

如用伦琴射线照射，虽可提高锌板的截止电压，但由于伦琴射线具有很强的使空气电离的本领（可使距伦琴射线管前 30cm 处的任何带电体在 3-5s 内都失去全部电荷），由此所带来的干扰在一般情况下是很难排除的。

用附加电场的方法能消除以上弊端。即在锌板附近设置一带正电的物体（铜丝网等），使紫外线照射锌板时逸出的光电子在附加电场的作用下挣脱束缚，同时，由紫外线对空气电离产生的负离子也可以清除，锌板的电势就足以上升到能用验电器显示出来。“方法一”、“方法二”的基本设计思想就在于此。

对于前述“操作”（2）亦可改为：使打磨光亮的锌板接地（或直接用手持锌板），由远处逐渐向铜丝网移近，可看到与铜网连接的验电器箔片的张角逐渐减小并闭合。

为简便起见，实验中还可以不用铜网，把与验电器导杆相连的锌板放在紫外灯前，再把一带正电的有机玻璃棒置于紫外灯和锌板之间（距锌板的 10cm 处），由它建立起附加电场，则验电器箔片亦能逐渐张大到一定角度。

方法三

器材 静电起电机（或激光电源），铝质圆盘（直径 20cm，厚 3mm）2 块，滑轨座，锌质圆盘（直径 8cm、厚 2mm，一面为光洁面）紫外灯，灯罩，支架，放电叉，导线等。

操作

(1) 按图所示安装：两块铝质圆盘间距约为 120mm；使锌质圆盘光洁面竖直向下，用丝线将其悬于支架绝缘柄上，使圆盘静止悬于两铝质圆盘组成的平行板电容器的中心位置处；调整好紫外灯及呈喇叭形灯罩出光口的位置，让其正对锌板的光洁面。

(2) 稳而快地摇动起电机，锌板极静止，无摆动。

(3) 开亮紫外灯,照射锌板的光洁面;锌板摆动,且向平行板电容器的负极板方向运动。表明发生光电效应。

(4) 闭熄紫外灯,移开悬挂锌盘的支架使锌盘翻转 180° ,让非光洁的氧化锌面竖直向下。再次开启紫外灯,照亮锌盘非光洁面。锌盘无摆动。表明氧化锌不发生光电效应。

(5) 闭熄紫外灯,静电起电机停转。用放电叉使两铝质圆盘放电。

说明

摇动静电起电机使平行板电容器间产生电场。该电场有两个功效:

(1) 驱除由紫外线电离空气所产生的空气中的带电离子,驱除从锌盘逸出的聚焦在锌盘附近的电子。

(2) 由该电场对发生光电效应后的带电锌盘的作用,显示锌盘在紫外线照射下逸出电子而带正电,从而表明发生光电效应。

方法四

器材 教学用光电管(GD-28型),演示电表,滑动变阻器(175 Ω 、0.3A),低压电源2台,双刀双位开关,光的干涉衍射偏振演示器(J2508型),导线等。

教学用光电管,由GD-28型光电管、管座、遮光罩、滤色片及光电流放大器等组成。GD-28型光电管的阳极为金属丝框状,光阴极为弧形板状。光阴极的材料是铯、锑(Cs、Sb)。光电管的灵敏度大于10 μ A/流明、工作电压为24V。它有4个管脚,2只连阳极、2只连阴极。管座上的接线柱已用导线与光电管插座上的管脚相连。滤色片有4块,为红、橙红、绿、蓝色。

操作

(1) 按图所示连接电路。光源及光电管均固定在光的干涉衍射偏振演示器的光具座上。演示电表用“G”档,量程为200 μ A。演示电压表量程选25V档。电源 B_1 为低压电源“直流”输出24V档;光源的电源 B_2 接另一低压电源“交流”输出6V档。

(2) 将双刀双位开关K扳到位置1,给光电管加上正向电压。然后接通 K_1 ,并调节变阻器 R_0 ,使电压表指示在15V左右。此时,电流表指针仍在零位,表明电路中没有光电流通过,即光阴极上没有发射光电子。

(3) 接通开关 K_2 ,点亮灯泡D,打开光电管罩壳上的入射光窗,让光照在光阴极上,电流表指针随即发生偏转。表明有光电子发射,且在外加正向电场作用下形成了光电流。关上入射光窗,光电流消失,电流表指针又回到零位。

(4) 将开关K扳到2端,给光电管加上反向电压。当让光照到光阴极上时,电流表指针仍在零位。证明光阴极受光照后发射出来的确是带负电的电子。

(5) 把开关K扳回1端,使光电管在光具座上移动(或改变灯泡的供电电压)。光电管离光源愈远(或供电电压愈低),光电流也越小,表明在光电管上所加正向电压相同时,光电流随入射光强度的增强而变大。

(6) 开关K仍在1端,调节 R_0 ,使电压表指针指15V左右,光源供电电压为6V。在光电管入射光窗上分别插上蓝色、绿色滤色片,电流表指针指某一值。把光源供电电压先后调至4.8V、10V,可发现光电流随光强的变化而变化。当供电电压为4V时,虽入射光很弱,在电路中还有光电流通过。

(7) 在入射光窗处换上红色滤色片,则光电流为零,即使入射光很强(光源供电电压升高至12V)时,电流表仍指零位。这表明红色光照射光阴极时,不能产生光电流。从而说明,要使光阴极发射光电子,入射光的频率 ν 必须超过光电管的光阴极材料的红限频率 ν_0 ,否则,就不能发生光电效应。

注意

(1) 光电管不工作时，应把罩壳上的入射光窗关上，以防光阴极老化、缩短寿命。

(2) 亦可将光电管固定在其他型号的光具座上，用 J2515 型双缝干涉实验仪中的光源（12V、15-24W 的单丝灯泡）。

说明

GD-28 型光电管的光阴极是铯铷，其红限频率为 4.62×10^{14} Hz。红色滤色片的峰值波长为 0.66 μ m，即频率为 4.55×10^{14} Hz，小于光电管的红限频率，故这种红光照射光阴极时，不能产生光电效应。

381 分光镜的调节和连续光谱的观察

原理 中学物理中主要用棱镜分光镜观察光谱。分光镜的外形如图(a)所示,由四个主要部分组成。平行光管,前端装有可调狭缝,另一端装有消色差透镜;三棱镜,一般用火石玻璃制成,它的三个侧面中不需要透光的一面是毛面;望远镜,由物镜和目镜组成,管长可以调节;标度管,外端装有透明的标度尺,里端装有透镜。这四个部件都固定在平台的金属圆盘上,并位于同一水平面内。平台上有遮光罩(图中未画出)把三管的里端和三棱镜都罩起来,可以避免杂散光线的干扰,因此观察时不需要良好的暗室。望远镜筒及标度还可绕圆盘转动。

用分光镜观察光谱时。图(b)中狭缝 S_1 应位于透镜 L_1 的焦平面上,使光源射入狭缝的光线经过透镜 L_1 后形成平行光束,然后投射到三棱镜上。经三棱镜的色散后,变成许多方向不同的单色平行光束进入望远镜的物镜 L_3 ,并在透镜 L_4 焦平面内聚焦形成明亮的狭缝的实像(即线状光谱)。观察时,用目镜 L_4 加以放大成虚像,扩大视界。标度管外端用小电珠照明标度尺 S_2 ,光线经过标度管后成为平行光,经棱镜侧面反射后,也在望远镜内成实像,这个实像的位置与光谱实像位置重合,从而使光谱线和标度尺能同时观察到,并有一一对应的关系。

器材 分光镜(J2551型或J2551-1型),标度尺,照明灯6V、3W(J2507型光具座光源),学生电源,方座支架,白炽灯等。

操作

(1)先调节望远镜,从镜台上取下三棱镜,用望远镜观察室外远处物体,同时前后推拉目镜筒,直至看到最清晰的物像为止,这就使望远镜对无穷远聚焦。

(2)把望远镜对准平行光管(二者拉成一直线),狭缝处于竖直方向,用光源照亮狭缝,伸缩狭缝套筒,并尽可能调窄缝宽,直至从望远镜中能看到最清晰的狭缝的像,这时狭缝正位于透镜焦平面上,从平行光管射出来的为平行光。

(3)反三棱镜装在镜台上,使两个光学工作面向着镜管,固定好三棱镜并加遮光罩。

(4)如图(b)示,把望远镜转到光束射出的三棱镜方向上,仔细调节望远镜的方向,就可由目镜中看到连续光谱。如光谱不清晰可稍伸缩目镜套筒;如光谱偏在视野中一侧或看不到,可稍调节平行光筒与望远镜筒间夹角或三棱镜的方位;如光谱过宽、两端的红色和紫色未完全进入视野,可适当增加狭缝 S_1 到透镜 L_1 的距离,并相应缩短 L_3 到 L_4 的距离。由于各人眼睛的焦距不同,目镜 L_4 应根据各人情况进行调节。

(5)调节标度管:选将平行光管的狭缝遮住,用小电珠照亮标度尺 S_2 ,标尺窗口取水平方向,稍微转动标度管(先放松平台下面的螺丝),使标尺像反射到望远镜筒中,再仔细伸缩标尺套筒,就可看到标尺刻度和数字的清晰的像,可在目镜中看到不少于23个分度。这时去掉狭缝的遮挡物,目镜中就可同时观察到连续光谱和标尺,从左到右颜色的排列为红、橙、黄、绿、靛、紫。

用每个镜管和镜架接口上的螺钉,可调节镜管的俯仰角度,使标尺和光谱的像上下移开,标尺上的数字仅作参考,并不表示光的波长。

注意

(1)观察连续光谱,光源用白炽灯,可选用色温较高的灯泡,如汽车灯泡(约20-25W),J2501型光具盘平行光源所用灯泡(12V,40W)等。

(2)如要观察光谱的某一部分,可将目镜拉出一段,再按上述过程调整平行光管和标度管。这时,所观察到的光谱范围较窄,刻度尺所示格数也较少,但每格

的宽度加大。

(3) J2551 型分光镜采用的是匀标度尺, 适宜于定性地观察和研究光谱, 不能直接读出谱线的波长; J2551-1 型分光镜采用的是波长标度尺(刻度线按波长数目刻, 并不均匀), 经校正波长标尺后, 可直接读出各色光或光谱线的波长值。

表 各色光在真空中的波长范围

颜色	波长 (nm)	颜色	波长 (nm)
红	770-620	绿	580-490
橙	620-600	蓝-靛	490-450
黄	600-580	紫	450-390

382 观察明线光谱

方法一

目的 用分光镜观察光谱管所产生的明线光谱，观察氢光谱。

器材 分光镜 (J2551)，光谱管组 (J2552)，电子感应圈 (J1206-A)，学生电源，白炽灯等。

操作

(1) 调节分光镜，使之能看到白炽灯的连续光谱。

(2) 用光谱管组 (接电子感应圈，感应电压不能太大，否则容易使光谱管组内壁发黑) 代替白炽灯。在高电压作用下光谱管内低压气体电离产生辉光放电，使分光镜的狭缝对准光谱管的狭窄管道部分，即可观察到氢、氮、氧等各种明线光谱。

注意

(1) 实验要在暗室内进行，并贴近分光镜的狭缝放置光谱管。在目镜中可以看到在暗淡的背景上出现几条不连续的明线光谱。

光谱管组每组有 6 只，分别充以氢、氮、氧、二氧化碳、氖和氩等气体。演示时，应重点观察氢原子光谱。一般能看到可见光范围内氢的强度较强的三条谱线， H_{α} (红) : 0.6562 μm ; H_{β} (浅蓝) : 0.4861 μm ; H_{γ} (蓝) : 0.4340 μm 。

(2) 实验时应尽量缩短通电时间，以延长光谱管的寿命。

(3) 谱线不够明亮时，可以在光谱管的后面安放凹镜，或在分光镜狭缝前放一会聚透镜，调节到使光谱管的像落在狭缝上，可以增大谱线的亮度。

建议 亦可用氦氖激光器的电源点燃光谱管，但应限制电流不超过 4mA，否则会缩短光谱管的寿命。

说明 近期生产的光谱管，分别充入氢 (H_2)、氮 (N_2)、氦 (He) 氩 (Ar)、汞 (Hg) 等气体。气压为 10-20 托。

方法二

目的 用分光镜观察钠和其他金属的明线光谱。

器材 分光镜 (J2551 型)，学生电源，大号酒精灯，铁丝网，白炽灯，食盐和其他金属盐类少许，铁架台，波长标尺照明灯 (6-8V、3W)。

操作

(1) 调节分光镜，使之能看到白炽灯的连续光谱。

(2) 在酒精灯的火焰上放置一铁丝网，网上撒一些粉末状食盐 (如食用精盐)，获得钠焰。

(3) 用分光镜去观察钠焰，可以看到钠的明线光谱。再调节分光镜使明线尽可能细而清晰。

注意 在可见光区，钠光谱是两条靠得很近的黄线，波长分别为 0.5890 μm 和 0.5896 μm 。一般从分光镜中只能看出一条黄线，只有分辨本领好的分光镜且仔细调节后才能分辨出两条明线。

说明

(1) 用钠光灯的光照在分光镜狭缝上，也可观察钠的明线光谱。

(2) 在金属网上撒钾、钡、锶或者铜的盐类，就能分别观察到有关金属离子的光谱；另外，也可用各种金属盐的溶液浸泡过的棉线，晾干后作酒精灯芯，点燃后就可从分光镜中观察到有关金属的明线光谱。

(3) 在弧光灯碳棒上的端点处钻一小孔，在孔内放入食盐 (或其他盐类)，通以电流使弧光灯发光，就能获得钠焰及有关金属离子的火焰。

方法三

目的 观察日光灯所产生的明线光谱（汞光谱）

器材 分光镜，标度尺照明灯（6V，3W），铁架台，学生电源，8W 日光灯等。

操作

（1）调节分光镜，使之能看到白炽灯的连续光谱。

（2）将 8W 日光灯点燃后取代上述白炽灯（或用平面镜把日光灯光线反射到平行光管狭缝上），就能观察到在连续光谱背景上出现的几条明线光谱。

说明 日光灯具有低压汞灯的明线光谱，但由于日光灯同时发出白光，因而是在连续光谱背景上出现明线光谱的，其明线光谱的特征和波长如下，从分光镜中至少能观察到其中四条明亮的谱线。

方法四

目的 观察氖管的明线光谱（氖光谱）。

器材 氖管，电阻（1-3M Ω ），其他与方法三相同。

操作

（1）把试电笔中小氖管取出后，串接一电阻（1-3M Ω ）替代 8W 日光灯，接入 220V 交流电源上。

（2）将调节好的分光镜平行光管对准氖管，使氖管产生的鲜红色的辉光照亮狭缝，稍加调节，就可看到氖的明线光谱。

通常能观察到氖的三条谱线，它们的波长分别为 0.6402 μm （红色），0.5852 μm （黄色），0.5401 μm （绿色）。

383 观察钠的特征光谱

方法一

目的 观察钠的明线光谱和吸收光谱。

器材 分光镜(J2551型或J2551-1型),钠盐酒精溶液,平行光源白炽灯(12V、40W),学生电源,标度尺照明灯(6V、3W),多芯酒精灯(可用固体热膨胀演示器的酒精槽代用或自制),拱形盖板(自制),凸透镜(f 约为5cm)等。

钠盐溶液配制:用分析纯的酒精100ml,将约70g的碘化钠(NaI)一连搅拌,一边放入,配制成褐红色的溶液。

酒精槽及拱形盖板可用白铁皮自制,形状如图中所示。

操作

(1)将有关器具按图示位置装置,并注意将光源,钠焰(靠底部部分)和平行光管中心作同轴调节(保证它们在同一直线上)。

(2)调节分光镜及各器具的相对位置使经凸透镜会聚的白光照在狭缝上时,从望远镜筒中能看到连续光谱。

(3)把盛有钠盐溶液的多芯酒精槽放在白光光路中,用硬纸板遮挡白光后,点燃酒精槽,细心调好分光镜,从中可以看到钠的明线光谱(两条邻近的黄线,波长分别为0.5890 μm 和0.5896 μm ,若狭缝不够窄或分光镜质量不好,就只能看到一条),并记住明线的位置。

(4)移开遮挡白光的硬纸片,就在原来明线光谱的位置上可看到钠的吸收光谱(以连续光谱为背景的暗线)。若抽动几次遮光纸片,使明线、暗线交替出现,对比观察,效果更佳。

注意 成功地演示钠的吸收光谱,必须妥善处理以下三个关键问题。

(1) 钠蒸气的浓度和温度

因为吸收光谱是由钠原子吸收了白光中相应频率的光子而产生的,如果没有一定浓度的钠蒸气,也就不可能有足够多的钠原子来吸收足够多的光子,因此也就不可能观察到吸收暗线。此外,对钠蒸气的温度也有一定要求。为了获得有适当温度的、浓度尽可能大的钠蒸气,可从钠盐溶液的配制、燃烧方式的改进以及附加钠气增强器等方面加以考虑,拱形盖板的作用就是使钠焰及其中钠蒸气局限在盖内。

另外,适当增加白光通过钠蒸气的路径也可增加吸收光子的几率。

例如,可选用在酒精中溶入溶解度大的钠盐(如碘化钠、醋酸钠),并用自制多头酒精灯(或用铁皮制成长方形槽中倒入上述钠盐溶液)。

(2) 白光源的温度

白炽光源的温度必须比钠焰的温度高,发光要强。否则会使光谱上的连续谱背景显得暗淡,暗线无法看清。但白炽光源温度亦不宜过高。

一般可采用灯丝电流在1安培左右的灯泡,例如220V、200W的白炽灯,J2501型光具盘平行光源(12V、40W),汽车灯泡,36V、40W的车床安全灯泡等。最好用调压装置改变白光源的温度,使它与钠焰的温度配合好。

(3) 分光镜的调节

必须仔细地调节分光镜,特别是狭缝的宽度调节,对光谱观察影响很大。该狭缝要调得很窄,只有在目镜中看到钠明线光谱的亮线很细窄时,才能看到吸收光谱的暗线;但如果狭缝过窄则光谱亮度不足,暗线也看不清楚。

应注意选用分辨力高质量较好的分光镜并正确使用。

说明 几种钠盐溶液的配制方法如下:

(1) 取 4g 粉末状的无水醋酸钠溶解在 100g 酒精中。

(2) 取 50ml 温水，将至少 40g 亚硝酸钠（不易溶于酒精）放入后，用玻璃棒搅拌至全部钠盐溶解，再取分析纯酒精 200ml 混合成乳白色的混浊液，搅匀后使用。

硝酸钠和氯化钠亦可照此法配制成饱和溶液，前者用量 44g，后者用量 18g。

方法二

器材 分光镜，平行光源，酒精灯，自制钠气增强器等。

钠气增强器的制作方法

钠气增强器的结构和尺寸如图（a）所示。制作材料可用 2mm 左右的白铁皮。

操作

(1) 按图（b）所示的实验装置。接通平行光源的电源，调节好各部分的相对位置，使从平行光源发出的线状光束通过钠气增强器的内腔后射在平行光管的狭缝上，调整好分光镜，观察连续光谱。

(2) 用硬纸板遮挡平行光源发出的光，点燃酒精灯加热盛盐锅里的食盐，当看到增强器两端喷出钠气时，观察钠的明线光谱。

(3) 移去硬纸板，就能在连续光谱背景中原来钠的明线光谱的位置上，观察钠的吸收光谱线。

注意

(1) 分光镜与钠气增强器距离不要太近，以 15-20cm 为宜，以免热气损坏分光镜。

(2) 要选用分辨本领高、质量好的分光镜。

(3) 钠气增强器腔的钠气浓度要足够大，这是实验成功的关键。

384 观察太阳的吸收光谱

器材 分光镜 (J2551 型), 标度尺照明灯 (6-8V、3W), 学生电源, 方座支架等。

操作

(1) 调节好分光镜后, 使平行光管对着太阳光, 让太阳光直接射在狭缝上; 或用普通平面镜将日光反射, 经过凸透镜后, 在狭缝上会聚, 使有足够的光通量进入狭缝, 在望远镜中就能看到太阳的连续光谱。

(2) 点亮标度尺照明灯, 调节狭缝并仔细观察, 可看到在连续光谱中有一些暗线, 这些暗线就是太阳吸收光谱。

表 太阳吸收光谱的主要谱线

谱线代号	波长(um)	元素
C (Ha)	0.6563	H
D	0.5893	Na
E	0.5270	Fe
b	0.5178	Mg
F(H _β)	0.4361	H
G(H _γ)	0.4340	H
h(G _δ)	0.4102	H

注意 如果观察不到太阳光的吸收光谱, 主要原因在于: 望远镜没调好, 或者日光光束不够强, 可从这两方法加以改进。

用作观察放射性现象的云室是 1911 年由英国特理学家威尔逊发明的，其设计思想是巧妙地利用带电粒子或射线经过时产生的离子作为凝结核，使过饱和蒸气凝结成无数微小的液滴，从而显出粒子或射线的径迹。

形成过饱和汽的方法通常有两种：一种是绝热膨胀法（例如橡皮球式和杠杆式云室）；一种是扩散法（例如干冰致冷扩散和强风扇致冷扩散）。

下述方法详述了中学常用的杠杆式云室（J2553 型）的操作要点及故障分析。

目的 观察 α 粒子的径迹。

器材 威尔逊云雾室（J2553），直流高压电源（J1205），平行光源（J2501），滴管，导线，乙醇与乙醚的混合液等。

操作

（1）把威尔逊云雾室侧壁上的金属结合套的塞子旋下。用滴管将适量乙醇、水与乙醚的混合液（按 4:1 比例，尤其是冷天效果特好）从金属结合套的孔里均匀地滴入 3ml 在云室内的绒布上。

（2）从铅罐中取出放射源，装在塞子上（取放时应手持放射源的直柄部分，不要用手触摸球部，也不要碰到去室侧壁）送入云室，旋紧塞子，使云室不漏气。

（3）用导线把 200-300V 左右直流高压电源的输出与云室的接线柱连好（注意正负极，不能接错）接通电源。

（4）平行光源与云室相距 20 厘米，让光束投射到云室透明圆筒上。

（5）一手按住云室底座，一手迅速压下杠杆，使去室聚然膨胀，在膨胀的瞬间，云室里可以观察到清晰的 α 粒子的径迹。这时不要松手，径迹可保留一小段时间。只要一松手，径迹立即消失。

注意

（1）照亮云室内径迹的光源不可离云室太近，以免室内气体因受热不均而产生对流。

（2）在不做实验时，手应离开杠杆，因为手在杠杆上稍有振动，即能引起云室内温度的变化，影响实验效果。每次膨胀后，必须间隔 30-60s，才可进行再次膨胀与观察。

（3）杠杆下压时，加在云室内的高压会自动断开。杠杆回复原位，电路又自动接通。因此多次重复实验时，无须开、关高压电源。

（4）放射源不宜长时间放在云室中，演示完毕应将放射源取出，按原样保存在试管中。在取放射源时，不要使涂有放射性物质的球部和其他物体接触，更不要用手触摸。

实验完毕，须用热水肥皂把手洗净。

分析 在实际教学过程中，本实验是比较容易成功的。现对可能出现的故障分析如下：

（1）密封不严密 若按下杠杆时，能听到轻微的嘶嘶漏气声，需检查和旋紧云室上盖压圈上的螺钉及云室侧壁放射源塞子。

漏气严重时，云室内蒸气达不达到饱和状态，因而看不到 α 粒子径迹；微量漏气时，使云室内气体在数次膨胀后，压强发生变化，会引起 α 粒子径迹弯曲畸变。为此，在经几次膨胀后，可以扭开放射源塞子，使云室内气体压强恢复，再拧紧塞子，即能继续演示实验。

（2）云室膨胀比不恰当 云室膨胀前后容积的比在 1.23-1.26 之间。这个膨

胀比是通过限制器柱头的升降来调节的。若云室在膨胀后，充满白雾、径迹模糊不清，可降低膨胀比（把杠杆下压限位器上的定位点升高）。若云室膨胀后 α 粒子径迹很淡，则应适当增大膨胀比。

另外，如果电场未加上，起不到清洁作用时，云室膨胀后也会充满一片白雾，径迹不清，应检查电路连接情况。

（3）滴入酒精过多或室温过高 在这种情况下，往往会使云室上盖玻璃板上结成雾珠，影响观察。消除雾珠的方法是把放射源塞子拧下，拉几次杠杆，使云室连续进行吸气和排气动作。反复几次之后就可使雾珠消失，玻璃盖恢复透明（这时应用纱布遮住结合套的孔，防止灰尘进入云室，同时要在通风的地方排气，防止污染）。

说明 通常用云室演示时，是用约 1ml 的乙醇和水的混合液滴入云室，其比例视实验时室温高低而定，在室温为 20-30℃ 时，混合液用 60% 的无水乙醇及 40% 的水配制（体积之比）。

当室温较低或仪器有轻微漏气时，蒸气不易达到饱和。本实验采用在乙醇中滴入数滴乙醚，便更容易使酒精达到饱和，提高演示的成功率。但是乙醚的闪点是 -40℃，比酒精的闪点 12℃ 低很多，而且云室的沉淀器两极间加有 200-300V 的直流高压。所以为安全起见，乙醚不能加得太多。

386 用盖革计数器探测放射线

器材 盖革计数器，放射源，计时器，空火柴盒，硬纸板，铜片，铁片，铝片和几块厚度为2-3mm的铅板等。

目前，中学物理演示实验通常使用J2554型盖革计数器，它由计数管和仪器盒两部分组成。计数管型号为J305 β 型，适于探测 β 射线和软 γ 射线，对于 β 射线用钴60在剂量强度为0.1mR/h*时，计数输出1440-2160次/分，可以同时用音响、闪光和计数输出等三种方式定性和相对定量的检测放射性粒子的存在和强弱。

操作

(1) 定性演示时，只须把探头连线插入仪器盒面板上的输入插孔；当需外接计数器计数时，由于各家生产的仪器接口不完全相同，要查看使用说明书，注意计数管的正负极性，才能配套。

(2) 探测宇宙射线

将计数管与仪器箱连好后，打开电源，把计数管探头置于附近没有放射源的环境中，可以听到扬声器发出“咯、咯”声，同时可观察到发光二极管的红色发光，这是由于“宇宙射线”进入计数管引起的。通常情况下，每分钟约25次，称为本底计数率。这个数率不是固定的，它由当时宇宙射线的强弱决定。

(3) 探测放射性元素放出的射线

把几个空火柴盒放在桌面上，其中一个装有放射源。用盖革计数管分别接近各火柴盒，可以发现，在接近有放射源的火柴盒时“咯、咯”声响加快。测得的计数率（每分钟响声次数）减去本底计数率，就是被测放射源的计数率。

在测量时可发现，“咯咯”声响并不规律，各次测出的计数率也不一定相等，这说明了放射粒子在蜕变过程中的随机性。

(4) 放射强度随距离增大而减小的演示

增大探头与放射源之间的距离，计数率会逐渐减小。记录每个位置的计数率，减去由宇宙射线所产生的基底数率，就可表示放射强度的数值。从理论上讲，放射强度是与距离平方成反比的，但由空气吸收和周围物体散射等缘故，实验中测得的强度并不是精确地随距离的平方减弱。

(5) 演示铅对放射线的屏蔽作用

使放射源距计数管约10cm，将一定厚度（2-3mm）的铅板挡在放射源与探头之间，此时仪器的计数率明显减小，依次增加叠放铅板的块数，可以使计数率接近本底计数率，说明铅可以屏蔽放射线。改用硬纸板，木板以及其他金属片演示，计数率减小并不明显。

注意

(1) 使用计数管时，必须避免发生连续放电。有的仪器有调节计数管工作电压的调节旋钮。在升高电压时，要特别注意其计数情况，如发现计数率剧增，要立即降低电压，否则会损坏计数管。

(2) 对于J305 β 计数管，坪长不小于80V，寿命约 10^9 次以上。当所加电压在正常工作范围（380-420V）时，如计数管连续放电，说明寿命已终了，应更换计数管。更换时应注意管子的极性不能弄错。

(3) 实验过程，不要直接接触及放射源；实验结束，要妥善保管放射源和处理盛过放射源的火柴盒等。还应该用热水、肥皂把手洗净，清除放射性污染。

说明

如一时难以找到较大的铅板，可用铅玻璃屏演示铅对放射线的吸收作用，效果

很好（吸收率可达 80%以上）。铅玻璃屏可选用市售电视机防辐射铅玻璃保护屏，微机显示器用铅玻璃视保屏等。

387 闪烁镜

目的 观察 α 粒子的激发荧光作用。

器材 闪烁镜，两用气筒，放射源等。

闪烁镜由一个目镜、碗形的金属外壳和抽气阀组成。装有目镜的金属外壳旋在抽气杆上。拉开目镜后面有一块荧光屏。旋开金属外壳，抽气杆内有一可伸缩的调节杆，可以通过调节此杆的长短来改变放射源的强弱。杆端是放置放射源的内胆，内胆顶端有一铝帽，用以固定锡箔。

操作

(1) 从闪烁镜里取出内胆，将铅盒里米粒大小的 α 放射源植入内胆，旋紧螺口（注意手不可触及放射源，以防污染）。

(2) 在圆形的锡箔上画上符号（或记号），贴置内胆的一端，套上铝帽。然后将内胆旋置在闪烁镜内，调节好位置，把闪烁镜旋紧密封。

(3) 在闪烁镜的另一端将抽气阀用皮管与两用气筒连结，用两用气筒从闪烁镜内抽气。

(4) 用一只眼睛靠近闪烁镜的目镜，调节目镜的位置（伸缩或旋转）并仔细观察，当位置适当时，可以看到荧光屏上相应处连续不断地出现闪光亮点（符号或记号）。这就是 α 粒子轰击荧光屏激发的荧光。

注意 由于闪光较弱，必须把目镜位置调节好。

388 放射线的电离作用

目的 演示放射性粒子或射线能够使空气电离，用带电的验电器检验放射性或射线的存在。

器材 长方形盒（正面嵌有玻璃板、中间有 1mm 厚的铁隔板），相同的验电器 1 对，起电棒，放射源（云雾室中的放射源）等。

操作

（1）先使两只验电器都带上等量的同种电荷（金箔张开的角度相同），在未引进放射源时，两只验电器金箔的张角几乎不变。

（2）把放射源放入铁隔板右侧盒内，并将玻璃窗关好，稍等片刻，可以看到右侧盒内验电器的金箔闭合，而另一侧的仍张开。这是因为放射线能使空气电离，从而使该验电器所带电荷泄漏；同时也能说明射线较难穿透过厚的铁板。

（3）把放射源移到左边盒内，照上法再演示一次，则情况与此相反。

注意

（1）验电器应使用绝缘性能好、灵敏度较高的。盒内隔板最好用铅板。

（2）应先关好左侧窗口，再将放射源移入右侧盒中；放射源质量愈大，现象愈显著（最好能用 10-20g 氧化钍）。

（3）实验时，不许用手直接接触放射源，实验后要用热水和肥皂把手洗净。

说明 在上述演示中，若用一块普通木板代替铁板，则可观察到与放射源同侧盒内验电器的箔片迅速落下，而另一侧的箔片缓缓落下。这除了说明射线的电离作用外，亦能借以说明放射线具有一定的穿透本领。

