学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

物理实验论

BOOK

内部资料 非卖品

总　序

顾明远

师范院校中有一门必修课，叫做教材教法，它是一门培养教师技能的专业课程，但是历来不受人们所重视，在一些专业学科的教师、专家们的眼里，似乎教材教法不过是剖析中小学的教学大纲和教科书，教会师范生如何去上好一堂课，没有什么学术性，他们认为，上好一堂课，保证教学质量的关键主要是有高的学术水平。这是一种误解，但是这种误解不是没有缘由的。原因之一是，这些专家们不懂得，教育既是一门科学，又是一门艺术，只有高深学问，不懂教育规律，没有掌握教育教学的艺术，课就上不好，或者事倍功半。原因之二是，过去的教材教法课确实存在着不少问题，它只分析现有的教材，不对学科、课程以及教育教学的规律进行研究。因此要解决这个问题，除了改变专家们的误解以外，更重要的是研究这门学科的发展，提高学科的理论水平。我认为，师范院校的教材教法不能只分析一门课如何讲授，更重要的是要研究、分析一门科学的发展历史和现状，以及其发展的内在逻辑，结合学生的认知特点，遵循教育规律，把它组织成一门学科。学科并不等于科学。一门科学要变成学校里的学科，需要经过一番改造。改造的理论就是一门学问，本身也应该是一门学科。这门学科是跨学科的，它既要研究某门学科的科学规律，例如数学教材教学既要研究数学教学规律，又要研究教育规律，要把两者有机地结合起来，从这个意义上来讲，教材教法的名称显得落后了。因此把它改为学科教学论或学科教育学是适宜的。

讲到这门学科还有一段历史，不得不讲一讲。我国学位制度建立之初，在教育学门类中就设有教材教法作为二级学科培养研究生，授予学位。但是它的评议因为涉及文理各学科，因此分散在文理各学科评议组中，由于教材教法主要是研究学科教学的理论，文理各学科评议组的专家们认为难以对他们做出评议。这样这门学科的授权问题就处于无人评议状态。1983年在国务院学位委员会召开第二届博士、硕士授权点学科评议组会议期间，我向当时教育学评议组召集人刘佛年教授提出，把教材教法的硕士授权点拿到教育学组来评议，并把名称改为学科教学论，以提高对它的学术要求，从而提高它的学术地位。这个提议得到刘佛年教授的支持和学位委员会的批准，并在以后专业目录调整时把教材教法正式更名为学科教学论。从此学科教学论有了较大的发展，至今全国已有硕士授权点19个，培养了硕士研究生数百名，出版的专著也有几十部，这是十分可喜的现象。学科名称的更改是十分容易的事，要把它发展成一门真正的学科并非易事。当时有人提出改为学科教育学，我们认为时机还不成熟，首先要把学科的教学理论研究好。教育学是一个更广泛的概念，它涉及到教育系统内部各个领域，而学科教学论主要涉及教育系统中教学方面的理论，即使把

这部分研究透彻，成为一门学科也是不容易的。当然，有的学者愿意把它称为学科教育学，如果确已研究成熟，这无疑是对教育科学发展的一个贡献。把教材教法改造成为学科教学论是一次理论上的飞跃。教材教法过去只是教育学中的一个部分。学科教学论则变成了教育科学中的一个重要分支学科。这种飞跃有没有根据，具备不具备条件呢？1988 年我在为《语文教育学》写序时就说，已经具备了必要的条件。这是因为：第一，近几十年来教学论、课程论、心理学、教育测量学、教育评价学等学科有了新的发展，它为学科教学论的建立奠定了理论基础；第二，我国改革开放以来引进了国外的各种教学理论，开拓了我们的视野，启迪了我们的思想；第三，我国有一批长期从事教材教法研究的学者，他们在师范院校有长期的教育实践，积累了丰富的经验，并且有较高的理论修养，这是建立学科教学论的组织基础。应该说，1978—1988 年这门学科的建设是有成绩的，不仅培养了众多研究生和出版了多部专著，而且学科体系基本上建立起来了。更为可喜的事是不少专家都在关心这门学科的建设。得到各学科的专家的重视是至关重要的。因为学科教学论这门学科毕竟是跨学科的，文理各专业学科是它的基础。

这些年来，许多学者把学科教学论又提高到学科教育学的高度来研究，这又是一次飞跃。学科教育学不仅要研究学科的教学理论问题，而且要从教育学的基本原理出发，从培养人的高度来讨论学科教育的问题。它不仅要揭示学科教学的教学规律，还要揭示学科教学培养人的规律。学科教育学不仅要讨论该门学科如何设置课程，如何编制教材，如何选择教学方法，如何组织教学，更重要是要分析本门学科在培养人的整体工作中的地位和作用，并从这个角度出发研究课程、教材、教法，研究它与其他课程的关系，与学校中其他教育活动的关系等等。

广西教育出版社组织全国学科教育理论工作者和实际工作者编写一套大型丛书《学科现代教育理论书系》，我认为正是时候。这刚好是十多年来的一次大总结、大检阅。证明学科教育学这门新兴学科已经在中国大地上成长起来。我当然不可能通览这套丛书。但是从编辑出版计划中的书目可以看到，它涉及语文、数学、物理、化学、外语等中学教学计划中的主要学科，每门学科又分教学论、课程论、学习论、实验论、教育测量与评价等专著，有的学科还著有教学艺术论及其他更细的内容，真是丰富多彩。作者群中有老一代的学科教育学专家，也有年轻一代学者。我认为，这套丛书的意义，不仅在于它总结了十多年来我国学科教育学研究的成果，而且在于它展示了学科教育学发展的广阔前景，在于它锻炼了年轻一代学者。这是从教育理论战线上来讲的。至于对我国教育的实际来讲，这套丛书的出版一定有利于我国广大教师业务水平的提高，有利于教育质量的提高，我预祝出版的成功。

1996 年春节

序

阎金铎

随着社会的进步，科学技术的发展，教育的普及和提高，物理教育研究也日益繁荣。物理教育，研究的对象是整个物理教育过程，即在物理学科范围内，结合物理的内容、特点和方法，研究如何发挥物理学科的实验功能、理论功能、应用功能、教育功能、培养功能等。也就是说，要从理论上和实践上，探讨如何进行物理教育和怎样提高物理教育质量和教育效率。

物理教育作为教育学科群的一个分支，以其特有的功能，在提高全民族的素质、培育社会需要的人才这一使命中，起着重要的作用。

为了进一步发展教育学科群体，构建具有我国特色的物理学科教育理论，反映国内当前的研究水平，深化教育改革，广西教育出版社组织出版了这套《学科现代教育理论书系》中的物理现代教育理论丛书。本丛书各册的作者，都是在该领域内有研究成就的教授、副教授和专家。全体编著者在编写过程中，突出科学性和实用性，力求准确、系统，体现教育改革精神，从物理教育的特点出发，着眼于提高物理教育、教学质量，分别探讨物理教育的有关理论及其应用。

本丛书共 6 册，内容简要介绍如下：

《物理教学论》论述物理教学的认识论研究、系统论研究和结构研究，探讨物理教学的模式、技术和艺术，研究物理概念教学、问题教学和物理教学方法。

《物理课程论》从物理科学与物理课程的概念、特点、课程的结构谈起，简要介绍国外物理课程的特点和我国物理课程的演变和现状，着重论述制订中学物理课程的思想基础、制约因素、教学内容的确定、教材编写要求、教材的评价与选用，以及物理课程的展望等。

《物理学习论》揭示物理学习的特点，剖析影响物理学习的因素，提出物理学习的基本原理，建立公理化的物理学习理论体系，以提高学习的质量和效率。

《物理实验论》以辩证唯物主义认识论为指导，通过对大量教学实例的剖析，论述物理实验的基本思想、基本方法和基本技能。特别是从我国中学物理实验教学的实际出发，对实验研究方法、实验设计方法和实验教学方法进行系统地探究。《物理思维论》系统地论述物理思维的概念、特点、品质、形式和方法，并对物理模型、概念的建立、规律的发现，以及物理创造性的思维的方式、结构进行研讨。

《物理能力测量研究》针对物理能力的概念和测量理论，探讨物理教学中能力培养的规律，提出检测的新方法——等价排除法。

本丛书的出版，得到广西教育出版社的大力支持，在各册成书过程中，

得到不少同行的关心，并考阅和借鉴不少的国内外学者的研究成果，在此一并表示感谢！我衷心地期望本书的问世，能够得到物理教育界的同行和广大读者的关注与指教，使这套丛书在深化物理教育改革和发展，发挥它应有的作用。

1996 年 6 月于北京师范大学

前　言

物理实验作为物理教学的重要基础、重要内容、重要方法和重要手段，在物理教学中具有重要的地位和作用。加强物理实验及其教学的研究，对于促进物理教学及其改革具有重要的意义。

笔者自 1982 年 1 月起，在已故的著名物理教育家朱正元先生的指导下，进行中学物理教材、实验和自制教具的研究工作，并于 1984 年 3 月为本系 80 级本科生首开了中学物理实验选论课程并自编了讲义,使我校成为全国最早开设这门课程的学校之一。之后，又为物理学科教学论研究生开设了中学物理实验教学研究方法课程，并于 1986 年完成了《中学物理实验教学研究方法》讲义。这本讲义共分《实验研究法》、《实验设计法》、《实验教学法》三册，比较系统地阐述了中学物理实验研究的基本思想、基本方法和基本技能。《物理实验论》这本书主要是在《实验研究法》的基础上，结合这些年来教学和研究的成果撰写的。

本书共分八章，内容是：物理实验与物理学发展、物理实验与物理教学、实验原理、实验方法和实验方案、实验装置和实验器材、实验条件的选择和实验操作、课堂演示实验教学策略以及数学方法的应用。

本书有以下几个特点：

1.理论与实践紧密联系，研究方法（思想、技能）与研究实例有机结合，易于理解，易于操作。

2.研究的思想方法从实验的不同环节、不同方面来论述，易于掌握，便于应用。

3.大量的实例为实验教学和研究提供了大量的实验素材和研究范例，实用性强。

本书在撰写的过程中，得到了阎金铎先生的悉心指导和何醒、卢少■编辑的热情帮助，在此表示衷心的感谢。在这本书完成之际，我十分怀念我的导师朱正元先生。他老人家对我的谆谆教导，对中学物理教学、教材、实验和自制教具研究的思想和方法，使我终身受益。特别是他八十几岁高龄依然孜孜不倦地对中学物理教材和实验进行研究，直到生命的最后一刻，他为教育事业贡献毕生的精神，将永远激励我们。

陶　洪

1996 年 10 月于苏州大学

第一章　物理实验与物理学发展

一切自然科学都来自实践，都是在对自然现象观察的基础上从科学实验和生产实践中总结发展起来的。物理学的发展也是如此。但物理实验与物理观察和生产劳动并不完全相同。

物理（科学）实验是人们根据研究的目的，运用科学仪器设备，人为地控制、创造或纯化某种自然过程，使之按预期的进程发展，同时在尽可能减少干扰客观状态的前提下进行观测，以探究物理过程变化规律的一种科学活动。

观察是通过感官感受外部的各种刺激，形成对周围事物的印象。科学观察是有计划、有目的地对自然状态下的客观事物进行系统考察和描述的一种科学活动。科学实验与科学观察有共同点，即都是科学实践中搜集事实、取得经验的途径。但是两者间又有差异。首先，在实验中人们处于一种主动的地位，人们可以充分发挥主观能动性，控制条件、改变客观状态和进程，使自然现象的变化有利于得出规律性的认识；在观察中，人们处于一种被动的地位，人们只能等待自然现象按其本来的进程发展，对现象进行记录和研究。其次，实验结果是可以重复的，它不是简单的纯感性的活动，而是包括着深刻的理性思维。第三，观察常常是取得原始材料的基本方法。

观察常是实验的前提，实验是观察的发展。观察是搜集自然现象所提供的东西，而实验是从自然现象中提取它所要的东西。恩格斯说过：“单凭观察所得经验，是决不能充分证明必然性的。”科学史也表明：只有依靠实验的方法，并借助理性思维，才能达到“必然性的证明”。由此可见，实验和观察是两种不同层次的认识手段，起着不同的作用。

科学实验与生产劳动也有着本质的区别。前者以在科学理论指导下探索自然规律为主要目的，后者以直接改变自然、达到增加物质财富为目的，并不要求得到自然规律。虽然实验工作中也可以有劳动的成分，但它与生产物质财富的劳动有本质的不同。

第一节　物理实验在物理学发展中的地位

物理学是一门实验科学。在物理学中，每个概念的建立、每个定律的发现，都有其坚实的实验基础。实验在物理学的发展中有着巨大的意义和推动作用。

一　物理实验与古代物理学的发展

物理学的发展经历了从萌芽时期（古代物理学时期）到经典物理学时期再到现代物理学时期的发展阶段。在古代，亦即大约公元前七八世纪后，中国和希腊形成了东西方两个科技发展中心，科学已经以经验科学的形态从生产劳动中分化出来。但物理学还只是“自然哲学”的重要组成部分，人们主要是靠对自然现象和生产、生活很不充分的观察，以及简单粗糙的实验，直觉地、笼统地去把握物理现象的一般特性，物理学基本上还处在对现象的描述、经验的简单总结和思辨性的猜测阶段，实验的巨大作用还没有被充分认识到。尽管如此，在古代物理学发展的漫长历程中，不论是在中国还是在外国，有许多人曾做过许多实验或进行观测，对实验现象作过各种解释或总结，也提出过种种理论，还制造出了不少仪器，他们对古代物理的发展起了积极的推动作用。在西方，古巴比伦人曾用“日晷”和水钟计时，还发明了梁式天平；古希腊人泰勒斯最早记录了摩擦过的琥珀会吸引轻小物体，天然的磁石具有吸铁的性质；阿里斯托芬曾有过用玻璃点火熔化石蜡的记录；欧几里德曾有过用凹面镜聚集太阳光试验的记述。

阿拉伯人阿勒·哈增曾做过圆柱面镜、球面镜、锥面镜的反射和折射实验，他还用一根带有五个秤盘的奇妙杠杆，测定在空气中和在水中物体的重量，发现空气也有重量和阿基米德定律在空气中同样适用，等等。

这里，特别要提出的是古希腊阿基米德（公元前约 287—前 212）和托勒密（约 90—168）的实验。阿基米德对杠杆进行了实验和研究，总结出杠杆定律，即二重物平衡时所处的距离与重量成反比。他还发明了阿基米德螺旋提水器，并用滑轮做了许多实验。杠杆定律的发现和应用在当时引起了轰动。阿基米德的另一个重要贡献是做了浮力实验，建立了浮力定律。他在《论浮体》一书中指出：“浸入液体的物体所失去的重量，就等于它排开的液体的重量。”这也是一个从实验总结为理论的定量实验。

托勒密曾用如图 1－1 所示的装置对光的折射进行了实验研究。在一个圆盘的中心 S 处装了两把可以旋转的尺子，将圆盘的一半竖直插入水中，转动两把尺子以便确定入射线和折射线的位置，从而测出入射角和折射角。用这样的方法托勒密测得了从空气射入水中的光线的一系列对应值。如：

入射角	0 °	10 °	20 °	30 °	40 °	52 °	60 °	70 °	80 °
折射角	0 °	8 °	15 ° 31 ′	22 ° 30 ′	29 °	35 °	40 ° 30 ′	45 ° 30 ′	50 °

这些数据足够精确。他断言，折射角与入射角成正比，这个结论只在入射角很小的情况下才近似正确。遗憾的是，他并没有由此发现折射定律。

在我国，从古文献、古器物中可以看到我们古代祖先的许多关于物理实验和应用的记载。早在尧舜时代，我们的祖先就用“圭表”来观象授时；后又使用“日晷”，即利用日影位置的变化测量时间；至春秋时期已普遍使用“刻漏”，利用水滴滴漏的方法来计时，我国在春秋时期的度量衡制已日趋完备；到了秦朝，我国的度量衡制得到了进一步发展和统一。

在力学实验方面，据《墨经》所载，墨家就研究过圆球的随遇平衡问题，已初步认识了简单几何体的重心问题。半坡村出土的欹器（尖底双耳瓶）也说明了古人早就注意到了重心的作用。对于测定固体比重的方法，《考工记》中就记载了用水浮法来进行定性的估测。对于液体比重的测定，最迟到东汉就已测出“水一升重十三两”（《后汉书·礼仪志》）。原始的液体比重计早在唐代《西阳杂俎》中就已有记载：莲子放在水中一定下沉，放在制盐用的咸卤中则能浮着。到元代陈椿（《熬波图咏》）把莲子放在 4 种浓度不同的卤水中浸泡，形成 4 种比重不同的莲子，然后将它们同时放入同一种卤水中，视其浮起来的数目多少来推断卤水比重的大小。这与现代的浮子式比重计原理基本相同。《考工记》中“舆人为车”就记载了水平仪的雏型。到了北魏，水平仪已被配置在较精密的仪器上，如用铁铸成的浑天仪底板上设有“十字水平”，以校准仪器水平。对于浮力的认识，《墨经》中已指出物体所受的浮力是因为水被物体排开的关系。晋代的《苻子》就已记载了利用水浮法称重的实例。《宋史·方技传》记载了利用浮力起重——打捞铁牛的实例。

对于简单机械，早在春秋时期就已有了使用权衡——天平与杆秤的记载。《墨经》中记载了墨家实验研究杠杆原理的做法：天平横梁的一臂加重物，另一臂必需加砝码，两者必须等重才能平衡；杆秤的提纽到重物的一臂比较短，提纽到秤锤一臂比较长，如果两边等重，秤锤一边必下落。到了周代史佚发明了杠杆和滑车的混合体——辘轳。

在声学实验方面，《墨子》中就曾记载了（运用固体传声和气腔共振）将两种稍有不同的坛埋入地以判断地下声源的方法。《庄子·杂篇》中就记载了当时在乐器制作后做过的很细致的共振实验。《异苑》中曾记载了张华（232—300）改变器物的固有频率以消除共鸣的方法。宋人沈括在《梦溪笔谈》中记载了他所设计的世界上最早的用纸人演示共振的实验：“欲知其应者，先调其弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦，则纸人跃，他弦即不动。声律高低苟同，虽在他琴鼓之，应弦亦振，此之谓正声。”在热学实验方面，《考工记》中记载了利用凹球面镜对日聚焦取火。西汉《淮

南子》记载了一种利用两个重量相同而吸湿能力不同的物体来验湿的天平式验湿器，书中还记载了“艾火令鸡子飞”的关于“热气球”的实验设计。唐代盛行的“马骑人物、旋转如飞”的走马灯，宋代的“走线流星”、“地老鼠”等“火箭”，都是利用热空气流直接推动的装置。

在电磁学实验方面，早在《管子》、《吕氏春秋》、《三国志》中就有磁石能吸铁而不能吸铜等其他金属和非金属的记载。对静电力的研究，《春秋纬·考异断》就说“玳瑁吸■”，三国时代发现“琥珀不取腐芥”。晋人《博物志》中记载了摩擦起电。在对磁性的进一步实验研究方面，西汉《淮南万毕术》记载了“慈石提棋”、“慈石拒棋”的磁体相吸、相斥现象，并介绍了鸡血中拌入磁粉和铁粉后晾干，以得到人造磁体的方法。汉代王充的《论衡·是应篇》记载了利用磁体指极性制造指南仪器“司南”。北宋初年《武经总要》记载了用“地磁感应法”制作人造磁体，以及将“司南”改为“指南鱼”的方法。沈括的《梦溪笔谈》记载了“以磁石磨针锋，则能指南”的“磨擦传磁法”，以及对“指南鱼”进行了实验改进，发现了指南针的四种支悬方法，如图 1－2 所示。

在光学实验方面，古人曾做过大量的较系统的研究。《墨经》中阐述了影的成因，本影、半影的生成，反射成影及影的大小的变化规律；记载了小孔成像，光的反射，平面镜、凸面镜、凹面镜反射成像以及像的大小、像的正倒与位置的实验。《墨经》的光学（和光学实验）比欧几里得光学还早一百多年。西汉《淮南万毕术》记载了“高悬大镜，坐见四邻”的潜望镜雏形，以及以冰来制作凸透镜用以对太阳聚焦取火。沈括在《梦溪笔谈》中记载了研究针孔成像、凸面镜、凹镜成像规律的实验。

这里特别要指出的是，宋末元初的赵友钦在《革象新书》中记载了对光的针孔成像和照度进行的设计巧妙的大型实验研究，如图 1－3 所示。他以楼房为实验室，在楼下左右两房间地面上挖两个圆井，井深分别为 $\frac{8}{3}$m和 $\frac{4}{3}$m。左井中可放一个 $\frac{4}{3}$m高的桌子。井底（或桌面上）可放1000

多支蜡烛做光源。井口可分别用中心开孔的木板加盖。楼板下挂两块大木板为固定像屏。实验可分为五个部分。

（1）光源、小孔、像屏三者距离保持不变，孔径有大小之别，可见两个像大小一样，但浓淡（照度）不同。

（2）利用针孔成像来模拟日月蚀，并表明针孔所成之像为倒立像。

（3）改变像距，研究像的大小与照度随像距而变化的规律，实验得到照度随光源的强度增加而增加，随距离的增加而减小（在西方，400 年后才由德国科学家兰伯特得出照度跟距离平方成反比的定律）。

（4）改变物距，实验表明物距变大，像变小变狭，但变浓。

（5）改变孔的大小和形状，研究大孔成像与小孔成像的区别。

赵友钦的这一大型实验可以说在世界物理学史上是首创的。综上所述，在古代物理学的发展中，中外物理学先驱者们的大量的实验工作，不

管是从系统的观测和记录方面来看，还是从在人为条件下重复物理现象、确定量度标准和仪器、制造实验和观测仪器等方面来看，都可称之为物理实验。其中，阿基米德的浮力实验、托勒密的光学折射实验、赵友钦的小孔成像和照度实验等，甚至可称之为卓越的物理实验。

在这一时期，物理实验的特点是：①零星不系统；②定量实验较少、定性实验较多；③大多数实验仅限于现象的描述或一般的解释，没有进行归纳而形成系统的理论；④没有用实验来检验已有的理论。

由此可见，在这一时期的实验方法和实验的科学思想水平还是较低的，这就使得物理学还没有真正走上科学的道路。

二　物理实验与经典物理学的发展

经典物理学是在 16、17 世纪的文艺复兴时期和科学革命中诞生的。以伽利略为代表的一大批杰出科学家，把实验方法与物理规律的研究结合起来，对物理学的发展做出了划时代的贡献。下面我们简单地回顾一些在经典物理发展中有重要地位的著名实验。

在力学实验方面，伽利略（Galileo Galilei，1564—1642）的斜面实验和落体实验，发现了运动定律和自由落体规律。17 世纪中叶在碰撞的实验研究中，瓦利斯（J. Wallis，1616—1703）、惠更斯（C. Huygens，1629—1695）和马略特（E. Mariotte）分别得出了动量守恒定律。

库仑（C. A. Coulormb，1736—1806）的扭秤实验和摩擦实验，得到了库仑力的平方反比定律和摩擦定律。

胡克（R. Hooke，1635—1703）的弹性实验，发现了弹性的基本定律。

傅科（J. B. L. Foucault，1819—1868）的傅科摆实验，验证了泊松（Poisson）的关于地球自转引起的偏转力的理论；傅科继续用实验研究地球自转的力学问题，发明了回转仪。

卡文迪许（H. Cavendish，1731—1810）用扭秤装置测定地球密度，得到了地球密度和引力常数。引力常数是基本物理常数之一，它的数值对物理学和实际工作有重要意义。表 1－1 为历年来实验物理学家对引力常数的测定结果①。

表　1-1　引力常数的测定

年代	人名	方法	引力常数($\times 10^{-11}m^3kg^{-1}s^{-2}$)	不确定度($\times 10^{-6}$)
1798	卡文迪许	静态扭秤	6.75 （4）	6×10^3
1891	波印廷	化学天平	6.6984	
1895	波依斯	静态扭秤	6.6576	
1930	赫尔（Heyl）	动态扭秤	6.670 （5）	7.5×10^2
1942	赫尔	动态扭秤	6.673 （5）	7.5×10^2
1969	罗斯（Rogc）	加速转动参照系	6.674 （3）	4.5×10^2
1972	庞蒂基斯（Pontikis）	动态扭秤	6.67145 （10）	15
1981	卢瑟（Luther）	静态扭秤	6.6726 （5）	75

厄缶（B. ovn.Eotvos，1848—1919）用扭秤方法研究惯性质量和引力质量的等价性，得到了非常精确的结果，为引力理论的确立奠定了重要的基础，被爱因斯坦（A. Einstein）称做“为扩充相对论辩护的著名的物理事实”①。在热学实验方面，最基本的是量热学实验。布莱克（J. Black，1728—1799）和他的学生通过对量热学实验研究发现了热容量，提出了比热的概念，发现了热量守恒定律。量热学实验在热学发展中起了重要的作用，它使热学走上了严格定量的道路。

伦福德（Rumford，1753—1814）的摩擦生热实验和戴维（H.Davy，1778—1829）的冰摩擦生热的实验为热的运动说提供了有力的支持，成了能量守恒与转化定律的前奏。

焦耳（J. P. Joule，1818—1889）从事热功当量实验研究 30 多年，为热和功的相当性提供了可靠的依据，为能量守恒与转化定律的确立奠定了牢固的实验基础。

分子速度分布律是分子运动论和统计力学的重要理论基础。1859 年麦克斯韦（J. C. Maxwell，1831—1879）提出气体分子速度分布律后，就于 1860 年做了著名的气体粘滞性随压强改变的实验，对速度分布律做了间接验证。1911 年杜诺依尔（L. Dunoyer）设计并制成了分子束装置。1920 年后斯特恩（O. V. Stern，1888—1969）等人用分子束实验技术对分子速度分布律进行直接验证，直到 1955 年才被米勒（R. C. Miller）、库什（D. kusch，1911—）精确测定。

布朗运动是分子无规则热运动的有力证据，它的研究对认识分子、分子的存在有重要意义。1827 年布朗发现了布朗运动，并对它进行了长期的实验研究。1906 年爱因斯坦提出了布朗运动理论。佩兰（J.Perrin，1870—1942）对布朗运动理论进行了全面的实验验证，证明了液体中分布微粒的乳浊液分布方程和布朗运动位移公式，为分子的存在提供了直接证据。

在电磁学实验方面，库仑定律的发现和检验是实验的一个重要的贡

献。库仑定律是电磁学的基石，也是麦克斯韦方程的基石。如果库仑力与距离平方反比定律有偏差，那么麦克斯韦方程就要做重大修正，光子就应有静质量，不同频率电磁波就有不同速度，狭义相对论的光速不变原理就要被否定，等等。从 1769 年起，为了证明电荷之间的作用力与距离平方反比的规律，罗比逊的转臂支架实验、卡文迪许的同心球实验、库仑的电扭秤实验和振荡电扭秤实验、麦克斯韦改进的同心球实验等，都做了精确的确定。表 1－2 是历次库仑定律实验验证的结果①。

表 1－2　库仑定律验证结果和光子的静质量

工作者	年代	库尔定律的指数偏差 δ 不大于	由此推算得出的光子静质量大于（g）
罗比逊	1769	6×10^{-2}	
卡文迪许	1773	2×10^{-2}	
库仑	1785	4×10^{-2}	
麦克斯韦	1873	4.9×10^{-5}	
普林普顿、洛顿	1936	2.0×10^{-9}	3.4×10^{-44}
柯克朗、富兰肯	1967	9.2×10^{-12}	3×10^{-45}
巴尔特勒特等人	1970	1.3×10^{-13}	3×10^{-46}
威廉斯等人	1971	$(2.7\pm3.1)\times10^{-16}$	1.6×10^{-47}
薛定谔	1943		$2\times10^{-47*}$
金斯伯格	1963		$8\times10^{-48*}$
尼特、哥德海伯	1968		$4\times10^{-48*}$
凡伯	1969		10^{-44**}
戴维斯等人	1975		$7\times10^{-49***}$

*从地磁数据检验安培环路定律得到的数据。

**根据光的色散得出的数据。

***从木星磁场测得的数据。

奥斯特（H. C. Oersted，1777—1851）对电流磁效应的惊人发现既证实了电与磁之间相互联系的客观存在，又发现了沿垂直方向起作用的一种旋转力。奥斯特实验开创了电磁学的繁荣时期。安培（A. -M. Ampere，1775—1836）把奥斯特实验扩展为电流之间的相互作用，并提出了安培定则。为了定量研究电流之间的相互作用，安培设计了四个极其精巧的实验，并在这些实验的基础上进行数学推演，得出了普遍的电动力公式，为电动力学奠定了理论基础。

法拉第（M. Faraday，1791—1867）对磁产生电进行了多年的实验研究，终于在 1831 年 8 月 29 日发现了电磁感应现象，他还对各种试验结果归纳总结，把产生感应电流的情况分为五类：①变化中的电流；②变化中的磁场；③运动的稳恒电流；④运动中的磁铁；⑤运动中的导线。

罗兰（H.A.Rowlemel，1848—1901）实验确证了电流的磁效应，它不

但进一步明确了电与磁的联系，而且促进了洛仑兹电子论的形成，奠定了电学近代理论的基础，在电磁学发展史上具有重要意义。

麦克斯韦的电磁场理论把电、磁和光三个领域综合在一起，预言了电磁波的存在，预见了光也是一种电磁波，具有划时代的意义。赫兹（H. Hertz，1857—1894）通过实验发现了电磁波，并证实它的传播速度正是光速，有力地证实了麦克斯韦电磁场理论。在光学实验方面，牛顿（I. Newton，1642—1727）从笛卡尔的棱镜实验得到启发，又借鉴胡克和玻义耳的分光实验，成功地进行了白光的色散和复合实验。这一实验具有重要的意义，它不仅对认识光的本性和建立颜色理论奠定了基础，而且为光谱学的发展开辟了道路。

托马斯·杨（Thomas Young，1773—1829）的双缝干涉实验为光的波动学说提供了确凿的证据。

光速是基本物理常数之一，早在 1676 年罗默（O.R■mer，1644—1710）在定期观测木星的卫星运动中，首先获得了光速有限的证据：$c \approx 2 \times 10^8 m/s$。1728 年布拉德雷（J. Bradley，1692—1762）根据恒星光行差算得光速为 $c=3.1 \times 10^8 m/s$。为了能对光的波动说和微粒说进行判决，更需要测出光速。19 世纪 50 年代后，斐索（Fizeau，1819—1896）和傅科分别用实验方法测量了光速。斐索用旋转齿轮法测得 $c=3.153 \times 10^8 m/s$。

傅科用旋转镜法测得 $c=2.98 \times 10^8 m/s$。1874 年考尔纽（M. A. Cornu）改进了斐索的旋转齿轮法，测得 $c=2.9999 \times 10^8 m/s$。迈克尔孙（A. A. Michelson，1852—1931）1878 年测得 $c=3.00140 \times 10^8 m/s$，1879 年测得 $c=(2.99910 \pm 0.00050) \times 10^8 m/s$（图 1－4 为实验示意图），1882 年测得 $c=(2.99853 \pm 0.00060) \times 10^8 m/s$。1923 年迈克尔孙主持了大规模的实验（如图 1－5 所示），直至 1927 年他先后进行了 5 次实验，结果惊人一致，测得 $c=(2.99796 \pm 0.00004) \times 10^8 m/s$。

迈克尔孙和莫雷（E. W. Morley，1838—1923）利用巨大的迈克尔孙干涉仪，为证明以太的存在而进行了一次又一次地测量以太漂移速度的实验，最终测得以太的漂移速度为零。

这是一个具有重大历史意义的实验，它对 19 世纪占统治地位的以太理论以沉重的打击，激励了当时一些著名的物理学家对运动物体的电动力学理论的研究，从而为爱因斯坦创立狭义相对论铺平了道路。

19 世纪初，沃拉斯顿（W. H. Wollaston）观察到太阳光谱的不连续性。弗琅和费（J. V. Franuhofer，1787—1827）用望远镜观测太阳光谱，对太阳光谱中的黑线进行了研究。惠斯通（CharlesWheatstone，1802—1875）用不同的金属电极的电火光做光源，发出了不同金属有不同的谱线，可以作为各自的特征。1859 年基尔霍夫（G. R. Kirchhoff，1824—1887）1859 年对光的吸收和发射之间的关系做了更进一步的研究，发现在同一温度下所有物体对同一波长的光线，其发射本领和吸收本领之比是一常数，

这一定量的基本定律叫基尔霍夫定律。这一定律不仅奠定了热辐射的理论基础，也是光谱学的重要规律。基尔霍夫和本生（R．W．Bunsen，1811—1899）采用的光谱分析实验方法，对自然科学各个分支都有重要意义。

1882 年罗兰成功地刻制了凹面光栅，并用它拍摄了精细的太阳光谱图。凹面光栅大大地推动了光谱学的发展。1896 年塞曼（Pieter Zeeman，1865—1943)效应的发现和 1931 年氘的发现所用的光谱仪器都是罗兰的凹面光栅。物理学由于光谱实验提供了极其丰富的原子信息而引起了深刻的变化。

由上可见，经典物理实验对于经典物理学的发展起到了很大的推动和促进作用，它在经典物理学中的地位是极其重要的。我们现在以伽利略对自由落体问题的研究为例，探讨以伽利略为杰出代表的经典物理实验研究方法和科学思想的特点。伽利略在比萨大学任教时就开始对自由落体进行研究，直到 1638 年才在《关于力学和局部运动两门新科学的谈话和数学证明》中系统地论述这一研究成果。

伽利略首先从一个理想实验得出的详谬入手，对亚里士多德的落体学说（即物体的下落速度与其重量成正比的学说）提出反驳，证明这一学说是错误的。自由落体运动是否符合亚里士多德提出的是匀加速运动呢？伽利略认为应该用实验做出检验。但要直接验证 $\frac{\triangle v}{\triangle t}$ 是恒量在当时是困难的。于是伽利略运用数学，根据他的假设推出了匀加速运动通过的距离与时间的平方成正比，即

$$\frac{s}{t^2} = \text{常量}$$

这一便于直接测定的关系式。

为了“冲谈重力”、减缓下落运动，伽利略进行了著名的斜面实验。实验发现：一个从静止开始下落的物体在相等的时间间隔经过的各段距离之比等于从 1 开始的一系列奇数之比，即为 1：3：5：7…从而证实了落体所经过的各种距离总是同所用时间的平方成正比例。

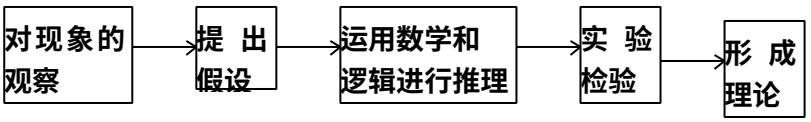
为了把斜面实验的结论推广到竖直情况下的自由落体运动，伽利略提出了等末速度假设，即静止物体不论是沿竖直方向还是沿不同斜面的同一高度下落，到达末端时具有相同的速度，也就是说，物体在下落中所得到的速度只由下落的高度决定，而与斜面的倾斜程度无关。对此，伽利略用了一个单摆实验（如图 1－6 所示）验证了这个假设。根据这个假设，可得到沿斜面下滑的加速度 g_1，与自由下落的加速度 g 之间的关系（如图 1－7 所示）。

$$\frac{g_1}{g} = \frac{t}{t_1} = \sin a$$

由这个关系，不难从 g_1 求出 g。伽利略根据这个关系明确得出了自由落体做匀速运动的结论。

从上面伽利略发现自由落体定律的经过，我们可以看到伽利略实验研究方法和实验科学思想的特点。

（1）把实验与数学结合起来，既注意逻辑推理，又依靠实验检验，构成了一套完整的科学研究方法。其程序大致如下：



伽利略的实验检验包括物理的（实际的）或思想的实验检验，形成的理论包括对假设进行的修正和推广。

（2）有意识地在实验中抛开一些次要因素，创造理想化的物理条件。既要力求使实验条件尽可能符合数学要求，以便获得超越这一实验本身的特殊条件的认识，又要设法改变实验测量的条件，使之易于测量。例如，物体下落时不考虑空气阻力；“冲淡重力”进行斜面实验；把物体自由下落的时间“放大”，以便在当时能够测量。

(3)用实验去验证理论。伽利略认为科学实验是为了证明理论概念(或观察规律）而去做的，不应该是盲目的、无计划的；而理论（数学）又必须服从实验判决。

（4）把实验与理论联系起来。例如，把各物理量之间的关系用数学表达式联系起来，使实验结果上升到普遍的理论高度。再如，伽利略在实验的基础上，进行理论的演绎和逻辑的推理，可得出越过实验本身的更为普遍的理论结论。他认为，“实验可以用来决定一些原理，并作为演绎方法的出发点。”①伽利略把科学的实验方法发展到了一个全新的高度，从此开始了物理学的一个新的时代，使物理学走上了真正科学的道路。爱因斯坦和英费尔德（L. Infeld）在《物理学的进化》中评论说：“伽利略的发现以及他所用的科学的推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。”

三　物理实验与现代物理学的发展

经典物理从 16 世纪到 19 世纪末，历经 300 年的发展，已达到了比较完整和成熟的阶段。当时不少物理学家认为，物理学的基本理论已经完善，以后只需对一些细节问题进行补充和修正，对一些物理常数测得更精确一些就可以了。正当 19 世纪末物理学家庆贺物理学大厦落成之际，科学实验却发现了许多经典物理无法解释的事实。其中，电子的发现、X 射线的发现和放射性现象的发现具有根本的意义，被称为世纪之交物理学的三大发现。这些事实与经典物理的理论产生了尖锐的矛盾，从而引起了物理学的

革命，导致了现代物理的诞生。下面我们简单回顾一些在现代物理发展中具有重要地位的著名实验。

1879 年霍尔（E．H．Hall，1855—1938）在研究载流导体在磁场中受力的性质时，发现了电流通过金属在磁场作用下产生横向电动势的霍尔效应。霍尔效应的应用十分广泛。利用霍尔效应可以确定半导体材料的基本参数。用实验方法研究物质的导电现象——测量霍尔系数和电导率，曾推动了半导体理论的发展。1980 年发现了量子化霍尔效应，利用这种效应可以极精确地测定精细结构常数（精确到 10^{-6}），并提供一种电阻的精确的绝对单位（精确到 10^{-8}）。这项发现的深远意义现在还难以估计。原子光谱的研究在原子物理学的发展中起了重要作用。特别是氢原子光谱，人们对它的研究已有 100 多年，在实验方面进行了精细结构的探测，数据越来越精确，它推动了电子和电磁场相互作用理论——量子电动力学的发展。

塞曼于 1896 年发现的塞曼效应进一步涉及光的辐射机理，被誉为继 X 射线之后物理学最重要的发现之一。反常塞曼效应的研究推动了量子理论的发展。

1897 年 J．J．汤姆逊（J．J．Thomson，1856—1940）于测定了阴极射线的荷质比，发现阴极射线是由比氢原子小得多的带电粒子所组成。他以大量的实验事实证明阴极射线、β射线和光电流都是电子组成的，电子是原子的组成部分。

在热辐射的研究中，普朗克（M.Plank，1858—1947）在综合维恩（Wien，1864—1928）、帕邢（F．Paschen）和鲁本斯的理论和实验研究成果的基础上，推出了黑体辐射的普朗克公式。经鲁本斯用实验验证后，普朗克致力于这个公式理论基础的探索，终于在 1900 年底用一个谐振子能量不连续的假设推出了黑体辐射公式，从而促进了量子理论的产生。

1901 年考夫曼（Kaufmann，1871—1947）用镭放出的β射线做实验，发现了电子质量随速度增加的事实，比爱因斯坦的狭义相对论还早 4 年。1908 年布雷勒（Bucherer，1863－1927）改进了考夫曼的实验，使实验精度更高，实验结果证实了洛仑兹—爱因斯坦公式。

理查森（O． W． Richardson，1879—1959）前后进行了 12 年（1901—1912 年）实验研究，发现了热电子发射所遵从的规律，即著名的理查森定律，为无线电电子学的发展发挥了重要的作用。1905 年爱因斯坦发展了普朗克的量子假说，提出了光量子理论，导出了著名的光电效应方程。这个方程在 1916 年被密立根（R．A．Millikan，1868—1953）的精确实验完全证实。光电效应实验以及光量子理论的解释在物理学发展中具有重大的意义。首先，它证明了普朗克提出的量子现象并非辐射所特有；其次，它揭示了光的波粒二象性；再次，利用光电效应制成的光电管等光电器材，在科技发展中广泛应用，其发展前景十分广阔。固体比热的研究是继黑体辐射和光电效应之后的又一重要课题。1907 年爱因斯坦把量子论用于固体

比热。1910 年能斯特（W．Nernst，1864—1941）通过对低温下固体比热的测量，验证了爱因斯坦的量子理论，引起了不少物理学家的注意，促进了量子理论的发展进入了一个新的阶段。

1909 年密立根独创了著名的油滴实验，测得了基本电荷 e，1917 年测得的 e 的精确值为：

$$e=(4.770\pm0.005)\times10^{-10}$$

1911 年 E.卢瑟福（E．Rutherford，1871—1937）根据大角度α散射的实验结果，提出了有核的原子模型。1913 年盖革（HansGeiger，1882—1945）和马斯登（E．Marsden，1889—）用实验证实了 E．卢瑟福的理论。E．卢瑟福的α散射实验是探测原子结构的重要手段，在 20 世纪 30 年代前发挥过巨大的作用。E．卢瑟福开创的用高能粒子作为探测武器打入原子内部以获取信息的实验方法，现在仍广泛应用于原子核物理和高能物理研究领域。1912 年劳厄（Max von Lane，1879—1960）发现了 X 射线晶体衍射的现象。这是现代物理学发展中的一个重要里程碑。它不仅证实了 X 射线的电磁本性，还证明了晶体空间点阵理论的正确性，同时对晶体材料的研究、控制和改进工艺过程具有非常重要的应用价值。自从 X 射线及其晶体衍射被发现以后，人类对物质结构的认识发生了质的飞跃，它促进了众多科学领域得到了新的重大的发展。

J．夫兰克（J．Franck，1882—1964）和赫兹在 1914 年进行了著名的夫兰克—赫兹实验（用慢电子与稀薄气体的原子碰撞的方法，测量原子的激发电位和电离电位），简单而巧妙地直接证实了原子能级的存在，清晰地揭示了原子能级图像，有力地证明了 N．玻尔（N．Bohr，1885—1962）的原子理论。

1922 斯特恩和盖拉赫（W．Gerlach，1889—1979）使银原子束穿过非均匀磁场，观测到了分立的磁矩，从而证实了空间量子化理论。这一实验在量子理论的发展中起了重大作用。1923 年康普顿（A．H．Compton，1892—1962）对 X 射线进行实验研究，并用光子和电子相互碰撞解释 X 射线散射中波长变长的实验结果。康普顿效应为德布罗意（L.N.deBroglie，1892—）的物质波假设提供了更完全的证据，证实了光量子动量的实在性。

1927 年戴维森（C．J．Davisson，1881—1958）与革末（L．H．Germer，1896—1971）用低速电子进行电子散射实验，证实了电子衍射。同年，G.P.汤姆逊（G．P．Thomson，1892—1975）用高速电子获得电子衍射图样。他们的工作不仅验证了德布罗意物质波假设，为量子理论提供了重要的实验基础，而且发展成一门独立的物理实验技术。

1945 年珀塞尔（E．M．Parccll，1912—）用共振吸收法测核磁矩。布拉赫（Felix Bloch，1905—1983）用核感应法测核磁矩。两人从不同的角度发现了核磁共振。核磁共振方法可使核磁矩和磁场的测量精度大大提高。目前核磁共振已广泛地应用于许多科技领域。

1958 年穆斯堡尔（R．L． Mossbauer，1929—）实现了γ射线的无反冲共振吸收，即穆斯堡尔效应。至今已发现了几十种核素存在着穆斯堡尔效应，它已被广泛地应用于核物理、固体物理、相对论等众多科技领域，对这些学科的发展有着相当重要的作用。

1962 年约瑟夫森（B．D．Jostphson，1940—）从理论上对超导电子对的隧道效应做了预言，不久就被实验证实。这一效应不仅对超导电性的本质有了一步的认识，而且基于这一效应制成了各种实用的超导器件，由此形成了一门新的学科——超导电子学。

由上述事实可见，现代物理是从实验发现开始，并在实验中发展起来的。现代物理实验乃至当前物理实验方法和发展有如下一些特点和趋势。

（1）实验与物理理论越来越紧密地结合，成为不可分割和相互依赖的结合体。物理实验更加需要理论（包括实验理论）的指导，在理论的预测和条件范围内去进行，而不是盲目地瞎碰。

（2）实验需要更先进的技术和仪器设备。常规的仪器设备和简单的方法已不能满足当前探索物理世界的需要。物理学要向新的更加深入的领域进军，探索更细微的结构、更远的距离、更短的时间、更大或更小的压强、更高或更低的温度等，使实验具有更高的精确度。这就需要更先进的技术和仪器设备。

（3）物理实验方法与其他学科的结合和向其他学科渗透，使得新的实验方法和技术更快地在应用领域得到推广使用。

（4）当代前沿的物理实验越来越成为大规模的、集体的、综合的工程。它的设计、建设和运转、使用都需要各方面的科学家和工程技术人员共同合作完成。另外，还需要有许多辅助的和配套的工作。最前沿的科学实验还需要有国际的合作。如 1983 年发现 W 粒子和 Z 粒子的 UAI 合作组，就由包括欧洲核子研究中心和美、英、法、德、意等国 13 所大学与研究机构在内的几十个国家的 135 名物理学家组成。

（5）建立和利用空间实验室，充分利用太空高真空、无污染、失重等许多天然有利条件。

第二节　物理实验在物理学发展中的作用

从物理学发展的历史看，物理实验是物理学理论的基础，也是物理学发展的基本动力。物理实验在物理学发展中的作用主要表现在以下几个方面。

一　发现新事物和探索新规律

在经典物理发展中，伽俐略的斜面实验、胡克的弹性实验、玻意耳的空气压缩实验等都为经典力学提供了实验事实，并在这基础上建立了新规律。在电学方面，库仑定律、欧姆定律、法拉第电解定律和电磁感应定律等的建立，无一不是在大量的实验中做出来的。在光学方面，光的干涉、衍射、偏振等现象也都是首先在实验中发现。在 19 世纪和 20 世纪之交，正当人们纷纷认为物理学已发展到顶点的时候，也正是 X 射线、放射性和电子等的发现，打破了沉闷的空气，揭示了经典物理的不足，从而开拓了新的领域，诞生了现代物理学。这一切都说明了实验是物理学的基础。

二　验证理论

理论是物理学的核心。理论是否正确必须经受实验的检验。实验是检验理论的重要手段。一次单独的实验可以推翻或确证所有可能的论据。麦克斯韦的电磁场理论只有当他预言的电磁波被赫兹的实验证实后才真正成为电磁理论的基础；爱因斯坦的光电子假设直到 1916 年被密立根的严密的光电效应实验证实后，光的波粒二象性才为人们接受；德布罗意的物质波假说也是在发现电子衍射后得到肯定的。理论有一定的适用范围。这个范围往往也要由实验在检验理论的过程中来确定。

理论和实验之间是相辅相成的辩证关系。没有实验，理论是空洞的；没有理论，实验是盲目的。

三　测定常数

物理学中的常数有两类。一类是物质常数，如比热、电阻率、折射率等，这些常数在一定条件下会随某一因素而改变。另一类是基本常数，它是物理学中的普适常数。如真空中的光速、基本电荷、普朗克常数等。

在物理学中，大量的实验是围绕常数进行的，特别是基本常数的研究和确定，在物理学发展史上更占有极其重要的地位。例如，万有引力常数的数值，从牛顿发现万有引力定律以来一直是人们试图测准的对象。

常数之间的协调是检验物理理论的重要途径。基本物理常数的协调不

仅是物理学也是科学技术的重大问题。因为每次协调都是在大量实验、在取得了众多新的研究成果的基础上做出的。例如，光速现在是测得最准的基本物理常数之一。1983 年第 17 届国际计量大会决定以“光在真空中在 $\frac{1}{299792458}$ 秒的时间间隔内行程的长度”作为“米”的新定义，这样就从根据上免去了长度单位的物质基准。

四　推广应用

现代社会的许多技术，如蒸汽技术、电工和电子技术都离不开实验。各种发明创造，都是经过大量的实验研究才日臻完善的。光谱学、激光、核磁共振、穆斯堡尔谱学、超导器件等都凝聚了实验物理学家的心血。

总之，实验在物理学的发展中发挥了巨大的作用。特别要指出的是，作为一年一度的物理科学的最高奖励——诺贝尔物理学奖从 1901—1992 年共有 140 位获奖者，其中国实验而获奖的科学家就有 103 人，约占 74%。正如张文裕先生所论述的：“科学实验是科学理论的源泉，是自然科学的根本，也是工程技术的基础。”①丁肇中教授在 1976 年荣获诺贝尔物理学奖时所写的一封信中说：“事实上，自然科学理论不能离开实验的基础。特别，物理学是从实验中产生的。”

第二章　物理实验与物理教学

在物理教学中做的物理实验是教学实验。它与物理学家进行科学研究而做的物理实验——科学实验既有联系又有区别。科学实验的特点的主要要点有：（1）实验条件可以严格控制；（2）实验可以重复；（3）需要借助各种仪器；（4）可以在特殊条件下或特殊环境中进行。

教学实验和科学实验在本质上有许多共同之处。教学实验是有选择地把一部分研究或探索物理现象和规律的实验和事实，在集中的时间内显现给学生、教给学生。在这一活动中，学生的学习过程与物理学家的探索过程有相似之处，因此教学实验对学生的认识活动所起的作用与科学实验是相似的。但两者在实验的目的、内容和形式上又不尽相同。

首先，从实验的目的来看，科学实验是为了发现新现象、探究新规律；教学实验是为了帮助学生掌握知识和学习方法，培养能力，提高素养。

其次，从实验的内容来看，科学实验的内容由需要探索的新问题而定；教学实验的内容需要按一定的教学目的设计，并根据教学实际的需要安排。科学实验的内容对科学家来说是新的，一般是未知的，而教学实验的内容一般是比较成熟的，但对学生来说是新的。学生在教师的指导下探索、实验，既可享受到探索、发现的乐趣，又可少走历史弯路。

再次，从实验的形式上看，科学实验的一般形式是通过实验的形式和观察现象，测量和记录数据，计算和分析结果，最后总结出物理规律，最终能否得到需要的结论是未知的。教学实验无论是教师演示，还是学生实验，都有肯定的结果，且较易得到结论。本章主要是简要地论述物理的教学实验在物理教学中的地位和作用。

第一节　物理实验在物理教学中的地位

物理实验及其教学是物理课程和物理教学的一个重要的组成部分。它既是物理教学的重要基础，又是物理教学的重要内容、方法和手段。它在物理教学中的地位主要表现在四个方面。

一　实验是物理教学的重要基础

实验是物理学的基础。在物理教学中运用实验的目的主要在于给学生学习物理创造一个良好的环境，使学生能主动地获取物理知识和发展能力，促进学生科学品质和世界观的形成；同时，通过学生的观察实验，使学生掌握实验的基础知识和基本方法，培养他们的实验技能和能力。中学物理教学必须以实验为基础，这是由实验本身的特点及其在物理教学中的作用所决定的。

二　实验是物理教学的重要内容

把物理实验作为物理教学的重要内容可以从三个方面来认识。

1.物理实验本身就是物理学的不可分割的重要内容物理学的任何一部分内容（包括物理量、定律、理论）的结构及其发展都可以分解为三种因素：实验（事实）、物理思想（逻辑、方法论等）和数学（表述形式或计量公式）。可见，实验内容本身就是教师要教、学生应该学的重要内容。

2．实验教学是物理教学的重要组成部分

实验是物理概念、规律教学中必不可少的基础。离开了实验的物理教学只能是“空中楼阁”，即使照本宣读、在黑板上做实验，也不过是“纸上谈兵”，而且会把本来生动的、丰富的物理知识变成一堆枯燥难懂的材料，不利于激发学生的学习兴趣、调动学习的积极性。

3.实验是培养学生实验能力（特别是操作能力）的保证从教师的演示、示范和学生自己的动手操作中，学生可以从中学到实验的基本知识、基本技术和基本方法，可以发展能力，培养良好的实验素质。这是实验的任务也是教学的任务。由此可见，不做实验的物理教学是没有完成教学任务的教学，不做实验的教师是不负责任的教师，不具备实验条件的学校是不合格的学校。

三　实验是物理教学的重要方法

1．实验是物理学研究的重要方法

实验（研究）方法是人们根据研究的具体目的，利用一定的仪器设备，

人为地制造、控制或模拟自然现象，使某些现象反复再现以便让人们反复进行观察研究的一种方法。

实验方法的优点是能将复杂的条件进行简化和纯化，借助仪器设备，突出研究对象的主要因素，排除次要的非本质因素，创造一个恰当的实验环境，使需要认识的某种性质或关系以比较纯粹的形态表现出来，以便人们能比较容易比较精确地发现规律。

2．实验是教师教物理、学生学物理的重要方法通过观察与实验，使学生知道科学家探索发现物理规律的过程，培养和提高学生的观察能力和逻辑思维能力，培养学生的实验动手能力和创造能力，帮助学生掌握科学的学习方法。要做到这一切，离开了实验，不让学生亲自动手实践是不可能的。要让学生像物理学家那样去探索物理世界的秘密，就应该让学生像物理学家那样，主要靠观察、实验和思考去探索、去学习，把实验当作物理教学的一种重要方法。

四　实验是物理教学的重要手段

好的教学方法需要通过适当的教学手段才能发挥它应有的作用。实验，直观具体、形象生动；实验教学，从感性到理性、从具体到抽象、从简单到复杂适合学生的心身特点，符合学生的认识规律。实践证明，在教学中运用实验手段，能取得很好的教学效果。实验是物理学中必不可少的重要手段。

第二节　物理实验在物理教学中的作用

实验在物理教学中的地位和实验本身的特点，决定了它在物理教学中能起重要的作用。

一　培养学生的兴趣和激发学生的求知欲

实验对培养学生学习物理的兴趣很重要，这主要有两个原因。

1．实验具有真实、直观、形象和生动的特点，易于激起学生兴趣

对于中学生（特别是初中学生），物理实验有很强的吸引力，极易唤起他们的直接兴趣。中学生天生好奇、好动。让他们观察生动有趣的实验，他们的注意力会高度集中。新奇的实验现象常常出乎他们意料之外，使他们兴趣盎然。

2．实验是一种有目的性的操作行为

学生观察实验，自然也会产生自己动动手的欲望。设法让学生多动手做实验（边学边实验、分组实验、课外实验），不仅可以满足学生操作的愿望，更重要的是可以让学生不断体会和尝到“发现”和“克服困难解决问题获得成功”后的喜悦，从而提高兴趣、增强信心、增强学习的欲望，进而转化为一种热爱科学的素质和志向。

“热爱是最好的老师。”只有有了学习的兴趣，才谈得上学习的积极性、主动性和创造性。

正因为上述两个原因，所以教师不仅需要自己多做实验，而且要设法让学生多做实验；不仅要注意选择能说明教学中需要说明问题的实验，而且要尽可能使所选的实验能激发学生的兴趣。

二　创设学生有效掌握知识的学习环境

我们知道，许多物理概念和规律都是从大量的具体事例中抽象出来的。在教学中，必须重视感性认识。使学生通过对物理现象、过程获得必要的感性认识，是形成概念、掌握规律的基础。这种感性认识可以来源于学生的生活，也可以来源于实验提供的物理事实。从生活中得到的感性材料通常来自复杂的运动形态，本质的、非本质的因素通常交融在一起，仅仅通过这种途径来使学生建立概念、认识规律有时会遇到很大的困难。而实验则可以提供精心选择的、经过简化和纯化了的感性材料，它能使学生对物理事实获得明确、具体的认识。

与生活实例相比，实验有下面一些特点。

1．实验具有典型性

实验能创造一个确实的、排除了干扰的环境，它对产生各种现象的条

件进行了严格、精密的控制，排除了次要因素的影响，突出了现象的本质和规律。

2．实验具有重复性

实验能在相同的条件下进行多次的反复，以供学生反复观察。

3．实验具有趣味性

实验能充分运用学生的各种感官，激发学生的学习兴趣，让学生在心情舒畅的状态下自觉主动地学习。

4．实验具有定性和定量研究的全面性

实验不仅能观察现象的全过程，进行定性研究，还能测量有关数据，计算各量之间的数值关系，进行定量研究。“我听了，忘记了；我看了，记住了；我做了，理解了。”这是对实验与掌握知识的关系的通俗概括。因此，让学生进入实验环境，在教师的引导下，通过观察、实验、操作、游戏等亲身实践体验，主动去探索新知识、获取新知识，是使学生牢固地掌握知识的有效途径；同时，也是教师突破教学重点难点，完成教学任务，提高教学质量的重要保证。

三　训练学生的科学方法

实验能够创造最确实、最少受干扰，并保证过程以其纯粹形态进行的物理环境。它创造了理论密切联系实际的学习过程。在这个过程中蕴藏着极其活泼的因素。它不仅能活化学生学到的物理知识，而且能引导学生像科学家那样去观察周围的事物，用实验手段去验证事物的属性，发现事物的变化、联系和规律，让学生从中学习科学的研究方法，掌握科学的学习方法。实验是对学生进行创造意识训练和科学方法训练的有效途径。而实验本身就是一种基本的科学（研究）方法。一般来说，物理实验的基本方法有四类，学生通过物理实验，能使这些科学方法得到训练。

1．实验归纳法

这是一种由个别到一般的研究方法。也就是根据研究目的人为地控制条件，从大量的实验现象中寻找其普遍特征，进而概括出规律的方法。例如，伽利略 18 岁时在教堂烛架摆动的启发下，研究了单摆运动，归纳概括出了单摆运动的等时性。就是采用了这样的方法。

实验归纳法的特点是：实验在前、结论在后；实验就是探索规律的主要手段。这种实验常称为探索性实验。这是中学物理教学中最常见的实验方法。

2．实验验证法

这是一种推理、判断在前，实验验证在后的研究方法。也就是在已知的物理理论和实践的基础上，或是在出现了与已知理论根本冲突的物理事实时，经过推理、做出假设和预言，并通过实验来检验其真理性，最后肯

定或否定论断，从而得出可靠的结论。例如，麦克斯韦在总结了从库仑、安培到法拉第等人的电磁学说全部成就的基础上，提出了“涡旋电场”和“位移电流”的假设，并由此预言了电磁波的存在。1887—1889 年，赫兹的振荡器实验证实了电磁波的存在，并证明了电磁波和光波的共同性质，把光波和电磁波统一了起来。从此，麦克斯韦的电磁学说便成了电磁理论的基石。

实验验证法往往与想象、推理、判断等思维形式结合在一起构成所谓“演绎”的科学方法。它是人的认识能力的创造性表现。这种能力能促使科学家超前于实验而推动科学的发展。在这里，物理实验既能鼓励科学家们大胆设想、勇于创新的精神，发展其预见能力；又能无情地否定那些谬误，防止科学家走上歧途（对于学生也是如此）。因此，验证性实验仍然可以说是科学发展的动力之一。探索性实验与验证性实验是两种类型的研究方法，教学中运用得当，都具有启迪思维、探索真理的作用。

3．真实实验与理想实验相结合的方法

真实实验是人们能够实际进行的实验活动。理想实验是人们在头脑中塑造的一种理想过程，是逻辑推理的一种方法和形式。理想实验和真实实验有着相似的特征和目的，就是将研究的对象加以“纯化”，以便在最少受干扰和影响的条件下，概括出所研究对象的特性和本质。所谓真实实验与理想实验相结合的方法，就是在有限的实践基础上，经过推论、判断，得出理想条件下的物理规律的方法。例如，伽利略建立惯性定律时设计的理想斜面实验、爱因斯坦建立狭义相对论时设计的关于同时性的相对性实验，等等，都是理想实验。

真实实验是具体的实践活动，可以作为检验物理真理的标准，而理想实验不但不能作为检验真理的标准，而且它本身得出的结论还要由真实实验来判断正确与否。因此，理想实验要依赖于真实实验。另外，真实实验的纯化是相对的，无论在什么条件下都不能创造出绝对纯的环境，总要受到外来干扰的影响，因此真实实验总是具有误差。而理想实验的纯化是绝对的，它想纯化到哪个程度就能纯化到那个程度，且不会产生误差。特别是真实实验要受到当时科学技术水平的制约，而理想实验则可以超越当时的科学技术水平而充分发挥人的思维能力，比真实实验更抽象、更概括、更深刻。因此，理想实验又高于真实实验，它能通过直觉更深刻地反映物理现象的本质，揭示出事物间的内在联系，它是人们认识能力高度发展的体现，在推动物理学发展的过程中起着重要的作用。

在中学物理教学中也需要借助这种研究方法，以帮助学生建立概念和认识规律。例如，在测定有限次平均速度的基础上，推论到位移趋于零时平均速度的极限，从而建立即时速度的概念。运用这种理想化方法，可以发展学生的想像力和逻辑推理能力。

4．追溯机遇的方法

由于偶然因素，物理实验有时会出现实验者并未意料到的、有重要科学价值的新现象，这就是机遇。由于已知的物理理论不容易解释这种新现象，所以，机遇常常预示着物理理论的新发展，是新理论的先兆。追溯机遇的方法，关键在于凭借丰富的知识积累和敏锐的洞察力及时抓住预定实验目标之外而常被人们看做微不足道的偶然目标，追根溯源以获得科学上的重大突破。例如，奥斯特在一次偶然的机会中发现了通电导线使附近小磁针发生偏转的现象；伦琴在一次偶然的机会中发现了 X 射线，都可以作为这种方法的实例。

四　培养学生的各种能力

首先，实验能培养实验能力。实验能力是不能仅依靠教师的讲解来传授的，而必须在相应的实践活动中才能得到发展，只有通过实验才能培养实验能力。除此之外，通过实验还可以培养学生的想像能力、思维能力等。例如，在进行观察与实验中，需要用精细敏锐的感知和观察力，去及时捕获一些重要现象，从而培养了观察能力；通过设计实验、分析结果等能锻炼和培养想像能力和分析能力；在研究原因、结果和形成概念的过程中，要进行概括、抽象的逻辑思维和辩证思维，通过分析、比较、判断、推理等能培养逻辑思维能力（归纳能力、分析能力等）；通过想像、假设能锻炼和发展想像能力、创造能力；在实际操作和汇报实验结果的过程中，还能培养组织能力、表达能力等等。

五　培养学生良好的科学素质

有人认为，素质主要由三个方面的因素构成：知识因素和智能因素和非智力因素。实验除了对知识的掌握、智能的提高有明显的作用之外，对非智力因素的培养也有显著的作用。实验不仅能培养学生实事求是的科学态度、严谨细致的工作作风和坚韧不拔的意志品质，而且能有助于学生形成正确的观点观念、优秀的道德品质，培养高尚的思想情操和浓厚的学习兴趣。

第三章　实验原理

我们知道，物理实验不仅是物理教学的重要基础、重要方法和重要手段，而且也是物理教学的重要内容。随着物理教学改革的不断深入，实验教学将发挥越来越大的作用。因此，深入开展中学物理实验教学研究，对探讨物理实验教学研究的基本思想、基本方法和基本技能，具有十分重要的意义。物理实验教学研究包括“硬件”（实验等）研究和“软件”（教学等）研究。其研究方法可据此分为互相联系的三个部分：实验研究法、实验设计法和实验教学法。本书主要阐述实验研究法。

要研究实验，首先要明确实验的目的、内容和要求，然后从分析研究实验原理入手。只有弄懂了实验原理，才能真正掌握实验的关键、操作的要点，才能合理地选择实验装置、器材和实验条件，才能正确地处理数据、估计误差、得出结论，才能正确地进行实验的设计、改进和自制教具工作……总之，研究实验原理，是研究中学物理实验这一过程中最重要、最基本的一环，是其他各方面研究的基础。

第一节　分析原理是研究实验的基本方法

如果我们刚接触一个实验，怎样对这个实验进行分析研究呢？下面，我们先通过两个简单的实验研究实例，看看实验研究的基本方法是怎样的。

低压沸腾实验

在瓶里装入低于 100℃的水，用针筒抽气降压，就可看到水也会沸腾，如图 3-1 所示。

这一实验看起来简单，但不一定能成功。怎样才能确保实验成功呢？对此，可这样分析（简述）。

（1）实验目的：说明压强减小、沸点降低。

（2）实验要求：明显地显示出减小瓶内压强（抽气）后，瓶内原来不沸腾的水发生沸腾（冒气泡）的现象。

（3）实验原理：抽气→减压→沸点降低→沸点低于水温→沸腾。

（4）实验关键：水温要高于被降低的那个沸点。这要由两个因素共同决定：①水温；②降压的程度。

（5）对实验器材（和实验条件）的要求：

①水温不要太低（例如在 85℃以上）。

②瓶内的水不能装得太少。例如，要在保证针筒活塞抽出的过程中，至少能使瓶内水面上面那部分空气的体积增大 1 倍以上，这样，气压就降到原来的一半以下，水的沸点就降到 85℃以下。

③橡皮管不能太长、太软，瓶塞等处不能漏气。满足了上面三个要求，也就解决了实验的关键问题，就能确保实验成功。

直导线切割磁力线产生感应电流实验

这是一个最基本的电磁感应实验。这个实验在初高中的物理教学中都要演示，如图 3-2 所示。

（1）实验目的（略）。

（2）实验要求：当直导线切割磁力线时，电流计指针有明显的偏转，以清楚地表明感应电流的产生。

（3）实验原则：切割磁力线 $\rightarrow$ 产生感应电动势（$\varepsilon = Bvli\sin\theta$

$\xrightarrow{\text{在闭合电路中}}$ 产生感应电流 $I = \dfrac{\varepsilon}{(R + r_A)}$ $\rightarrow$ 电流计指针偏转。

（4）实验关键：从原理分析可见，要使电流计指针偏转明显（满足实验要求），关键在于两个要素：①感应电流要大；②电流计要灵敏、可见度大。而感应电流又是由 B，v，l，sinθ，R，r_A 六个因素决定的，因此，要使实验达到满意的效果，关键在于对上面七个因素的控制：

$$
\text{关键}\begin{cases}
I\text{大}\begin{cases}
\varepsilon\text{——大}\begin{cases}B\text{——大}\\ V\text{——大}\\ L\text{——大}\\ \sin\theta\text{大}\end{cases}\\
L\left(\dfrac{I}{R+r_A}\right)\text{——大}\begin{cases}R\text{——小}\\ r_A\text{——小}\end{cases}
\end{cases}\\
\text{电流计——灵敏、可见度大}
\end{cases}
$$

用一块永久磁铁、一只一般的演示电表、一根直导线来演示直导线切割磁力线实验，常常不能得到预期的效果，这主要是没有把握住实验关键，对器材选择不当。

（5）对实验器材的要求：

①增大 B。用强磁性磁铁，或将几块磁铁或磁块组合在一起（这样又增大了磁场区域）。

②增大 l。可用一个线圈的一条直边。

③减小 R。导线电阻和接触电阻要尽可能小。

④减小 r_A。选内阻较小的电表。

⑤显示仪器灵敏、可见度大。对此，可选择的器材有：灵敏检流计（或微安表头，对刻度和指针进行投影放大）；光点检流计（贵重、调整烦，大部分中学没有）；示波器（初中不适宜）；加电流放大器的演示电表。

根据对器材的要求，就可以有目的地去选择器材。当然，并非上述要求都要满足后实验现象才明显。事实上，上述五个要求中最重要的是①，②，③三个要求。

（6）对实验操作的要求：

①较快移动直导线切割磁力线。

②使直导线、运动方向和磁力线三者能互相垂直。

如按上述要求选择器材和操作，能确保实验成功。从上面两个实例的分析可见，在一般情况下，从分析实验原理入手研究实验的最基本的方法是：首先，明确实验的目的、内容和要求；其次，认真研究实验原理，对定量或半定量实验，需要分析实验的误差原因及其影响程度；再次，确定实验关键；最后，对实验装置、器材和实验条件提出要求并进行选择，确定操作要点和注意事项。

上面的研究方法，对刚接触的实验或者要对实验进行初步研究是很有效的。

在原理研究中有两个问题应该特别重视。下面看一个实验研究实例。

平行板电容器的电容与两极板间距的关系的实验

（1）实验目的：说明平行板电容器的电容 C 随两极板间距 d 的增大而减小的规律，如图 3-3 所示。

（2）实验要求：当两极板间距 d 变化时，静电计指针的偏角 θ 有明显的变化，即△θ 尽可能大。

为了方便起见，假定：①用厂制仪器进行实验，不另选仪器；②实验过程中不存在漏电现象、两极板相对面积不变；③仅考虑两靠近的极板逐渐拉开的实验过程。

（3）实验原理：

研究1根据公式，$U=\frac{Q}{C}$，在极板带电量Q一定的情况下，$C\downarrow\rightarrow U\uparrow\rightarrow\theta\uparrow$。

因为，$C=\frac{\varepsilon_0 S}{d}$，在$\varepsilon_0$，S一定的情况下，$d\uparrow\rightarrow C\downarrow$。

所以，当 d 由 $d_0\rightarrow d'$，变化=△d 时，有：

C 由 $C_0\rightarrow C'$，变化△C；

U 由 $U_0\rightarrow U'$，变化△U；

θ 由 $\theta_0\rightarrow\theta'$，变化△θ。

实验要求△θ尽可能大。显然，要使△θ大，就需要△U 大，就需要△C 大。要使△C 大，就需要使△d 大。

（4）实验关键：要使△d 尽可能大。

（5）操作要点：将两极板拉得越开越好。

实验结果：效果不能令人满意。显然，上面的实验研究不确切或不全面。

研究 2 从上面的分析可见，要使△θ大，就需要△C 大。但△C 的大小并非仅仅决定于△d 的大小。对此，可做下面的分析。

①由 C 与 d 的反比关系图（如图 3-4）可以很直观地看出：初始位置 d 不同，初始电容 C 也不同；对于不同的初始位置 d，即使△d 相同，△C 却是不同的。

②由公式$C=\frac{\varepsilon_0 S}{d}$可得：

$$\triangle C=\frac{\varepsilon_0 S}{d^2}\triangle d$$

可见，△C 不仅取决于△d 的大小，还取决于初始间距 d_0 的大小。

（4）实验关键：d_0 要小，△d 要大。

（5）操作要点：两极板靠近些再拉开些。

实验结果：效果不能保证令人满意（△θ不稳定，且通常不很大）。

研究 3 接上面分析，考虑实际情况，静电计和连线都有一定的电容（如图 3-5）。所以，在平行板拉开的过程中，平行极板上的电荷并非不变（但是这三个并联电容器上的电荷是不变的）。静电计的电容 $C_{计}$和连线的电容 $C_{连}$是否可以略去不计呢？笔者就图 3-3 装置用 SQ18A 型万用电桥进行了测量，结果如下：

$C_{计}$=5pF　　$C_{连}$=1pF

平行板的直径为 20cm。对于不同的间距 d，按平行板公式算出的电容理论近似值 $C_{板\cdot理}$、实际测出的近似值 $C_{板\cdot实}$以及整个装置的电容实测近

似值 $C_{实}$（$C_{板·实}+C_{计}+C_{连}$）如下表所示。

d（cm）	$C_{板·理}$（pF）	$C_{板·实}$（pF）	C 实（pF）
0.5	56	26.2	32.2
1.0	28	16.4	22.6
2.0	14	10.5	16.5
5.0	5.6	5.9	11.9
10.0	2.8	3.7	9.71
5.0	1.9	2.9	8.9
20.0	1.4	2.6	8.6

从上面的数据可见：

①静电计和连线的电容不能忽略。

②d 达 10cm 后，系统的总电容基本不变；既然 $C_{末}$基本不变，那么要使△C 大，就需要使 $C_{初}$大，即 d_0 要小。

（4）实验关键：d_0 要小。

（5）操作要点：d_0 要小，可控制在 0.5～1cm 内；△d≥10cm 即可（这样可使系统的电容减小到初始电容的$\frac{1}{3}$左右，电位差增大3倍左右）。

实验结果：效果仍不能确保令人满意。

研究 4　在这一实验中，电容的变化由电位差的变化来反映，而电位差的变化则由静电计指针偏角的变化来反映。在上面的分析中，对测量（显示）仪器——静电计的特性特别是静电计指针偏角对电位差的响应情况并没有予以考虑。我们知道，静电计指针偏角 θ 与电位差 U 不成线性关系。笔者用静电高压发生器和静电电压表对“文革”前的老静电计和“文革”后的新静电计进行了测试，分别得到了它们的 θ-U 关系，如图 3-6 所示。

如前所述，若 d_0 约 0.5～1cm，那么极板拉开后 U 可增大 3 倍左右。从 θ-U 图线可见，要使△θ 尽可能大，可使 θ_0 在 15°左右，这样可使△θ 在 30°以上，确保变化明显。

（4）实验关键：

①使 d_0 约为 0.5～1cm。

②使 θ_0 在 15°左右。对此，用可感应带电的方法给极板带电，控制 θ_0；也可用接触带电的方法，若所带上的电荷较多，可以用手指多次快速接触连线绝缘包皮使其适当漏电的方法来控制 θ_0 的大小。

按上述要点操作，实验效果很好，可确保△θ 在 30°以上。

从这一实验的原理分析，我们可以得到两点启示。

a．所谓实验原理，并不是仅仅指实验目的中所要说明的物理道理。广义地讲，实验原理是实验的方法、实验的装置和器材、实验过程、实验结果分析等所依据的物理道理。原理分析中所涉及的许多情况、因素和信息，

往往并没有给出，而要靠自己去寻找、收集、探究、试验。原理分析时需要一定的“理想化”、需要略去一些次要的因素或做一定的简化和抽象，但其程度的把握是至关重要的。

b．无论对定量实验，还是定性实验，在分析原理时，应有“量”的意识，能做定量或半定量分析的不要轻意放弃。定性分析固然简明、快捷，但是在许多情况下，仅仅停留在定性分析的基础上是不够的，因为“量”变常常会影响实验现象和效果（结果）的质的变化。

上面两点，在分析研究实验原理时应该予以重视。

第二节　实验原理的科学性和可行性

分析一个实验的原理，必须同时考虑其科学性和可行性。无论是选择实验方案，还是设计、确定实验方案，这都是首先需要考虑的。

实验原理的科学性主要指：物理原理是否正确；物理原理是否确切。

实验原理的可行性主要指：从仪器制作、器材选择、实验条件和操作等方面来看实验能否成功；实验能否应用于实际教学过程、达到某一教学目的；对整个教学过程来讲，实验是否会引起逻辑混乱。

如果实验原理不能满足科学性和可行性的要求，那么，实验再精彩、方案设想再好也是不可取的。

一　原理的正确性

要做到原理正确，需要注意两点：

（1）不能虚伪。弄虚作假、制造假象欺骗学生是不允许的（当然，这应该和模拟实验相区别）。

（2）原理无错误。首先应该区分错误和误差。误差是由于实验系统和条件的非理想化产生的。中学物理实验中允许有一定的误差。至于允许多大的误差，则由实验方法、仪器、实验条件和教学要求来决定。为了教学的需要，有时还故意扩大实验误差，让学生分析误差的来源等等。但是，实验原理的错误是不允许的。

静电感应的实验

用静电感应的方法，能使两个带有绝缘支柱的枕形导体带上等量异种的电荷。

如图 3－7 所示，将两个不带电的枕形绝缘导体 A，B 靠在一起，再将一带电体 E 靠近枕形导体 A 的一端。这时，在枕形导体 A 的左端和 B 的右端分别感应出了正、负电荷。保持带电体 E 不动，移开枕形导体 B，这样，枕形导体 A，B 上就分别带上了等量异种的电荷。

为了说明“等量异种”这一点，有人设计了这样一个实验方案，如图 3－8 所示。先将已带了电的枕形导体中的任一个，例如带正电的 A 与验电器接触。验电器传得电荷后张开一个角度，如图 3－8（a）所示；移开这个枕形导体，验电器保持张角不变，如图 3－8（b）所示；再将另一个带负电的枕形导体与验电器接触，这时，枕形导体的负电荷就跑到验电器上，与验电器上原有的正电荷中和，整个验电器就不带电，验电器箔片也就不张开，如图 3－8（c）所示；移开枕形导体，验电器箔片仍不张开如图 3－8（d）所示。由此说明两枕形导体带等量异种的电荷。

尽管有与上述方案预言的结果相同的实验现象出现，但是，这个实验的原理是否一定正确呢？对此，可进行如下分析。

设：两枕形导体的电容都为 C_1，验电器的电容为 C_2。用静电感应的方法，使两枕形导体都带上 Q 的电量（先不考虑种类），对地电位差都为 $U=\frac{Q}{C_1}$。在图3－8（a）所示的情况下，枕形导体A上的电荷有一部分传到验电器上（不是全部！）。假定枕形导体与验电器接触后两者的电容都没有改变，那么，验电器上分得的电荷为：

$$Q_{2a}=\frac{C_2}{C_1+C_2}Q$$

验电器和枕形导体 A 的对地电位差 U_a 为：

$$U_a=\frac{Q}{C_1+C_2}=\frac{C_1}{C_1+C_2}U$$

当把另一枕形导体 B 与验电器接触时,将有 $-Q_2$ 的电荷先与验电器上的电荷中和，然后，剩下的负电荷（Q_1-Q_{2a}）再按枕形导体和验电器电容的大小而分配给两者。此时，验电器分得的电量 Q_{2b} 应为：

$$Q_{2b}=\frac{C_2}{C_1+C_2}(Q-Q_{2a})=\frac{C_2}{C_1+C_2}\left(\frac{C_1}{C_1+C_2}Q\right)$$
$$=\frac{C_1C_2}{(C_1+C_2)^2}Q \qquad (1)$$

其对地电位差 U_B 为：

$$U_b=\frac{C_1}{(C_1+C_2)^2}Q=\frac{C_1^2}{(C_1+C_2)^2}U=\frac{C_1}{C_1+C_2}U_a \qquad (2)$$

从（1）、（2）式可见，枕形导体 B 与验电器接触后，虽然中和了验电器上的正电荷，但却使验电器带上了负电荷。尽管此时验电器对地电位差没有第一次（U_a）大，但毕竟还有。至于这个电位差使验电器张开多大的角度，则由 U 的大小决定，亦即由枕形导体原先带的电量 Q 和两者电容的大小所决定。

就实际情况来看，实验中常用的枕形导体的电容与验电器的电容是同数量级的。测量结果表明，前者的电容为 3～7pF，后者的电容为 1～6pF。如果开始时枕形导体带的电量 Q 不多（或 U 不大），验电器的电容不比枕形导体的电容小多少，那么 U_b 就可能比较小，验电器的张角可能小到不易觉察的程度[如图 3－8（c）]。但是，这种情况仅是可能出现的多种情况中的一种。如果开始时枕形导体带的电量比较多，验电器箔片仍可张开一个明显的角度（从演示实验中可以看到这种情况）。因此，上述实验方案从原理上来说是不可取的。

二　原理的确切性

（1）原理与教学中需要说明的问题要一致。有时我们需要通过对实验现象的本质（原理）的分析来说明某一教学问题，如果两者对不上号，即

原理不确切，这种情况是不允许的。

“空气多么重啊！”小实验

将一块窄长的薄木条放在桌面上，并向桌外伸出一小部分，在桌面的木条上盖一张没有洞的报纸，把报纸摆平。然后，用拳头或锤子迅速锤击木条的伸出端的部分，这时你会发现，你并没有把报纸挑到空中，而是将木条的伸出部分折断了①。这是一个很生动的实验，通常被用来说明大气压的存在。事实上木条的折断并非由于大气压压住了报纸的缘故。即使不盖报纸，只要打击迅速，木条也会折断。如果打击时很慢，在第一种情况下报纸还是要被挑起，木条也不会折断。当然，覆盖了报纸，木条更易折断。报纸的作用，仅是增加了木条在桌面上的那一部分向上运动时所遇到的阻力。

至于木条为什么会被折断，请大家在看了（或做了）上述的三个对比实验（二次快打，一次慢打）之后，自己分析解释。一个关于大气压力的实验及解释。

一个关于大气压力的实验及解释

有一道习题：取两个粗细相差很小的试管，在大试管里装满水，把小试管底朝下放在大试管里。把这种装好的两个试管倒过来，就会看到大试管里的水漫漫流出，同时小试管自动上升到大试管里，解释这个现象。

不少教学参考资料中解释说：小试管在大气压的作用下渐渐升至大试管的顶端。做这样的解释也许出于这样的考虑：小试管顶端在水中，水对顶端的压力（压强）由小试管顶端到大试管顶端这一段距离的水柱所决定，它远小于大气压力。因此，小试管的上升主要由小试管在水外的各玻璃壁受到的大气压力所决定。

小试管的上升是否是由于大气压作用的结果呢？

假定在两试管倒过来的一瞬间成如图 3－9 所示的情况（这时刻，水和小试管还基本处于静止状态）。我们取小试管为研究对象，小试管主要受到三个力：重力 G、向上的大气压力 $F_1=p_0S$（P_0 为大气压强、S 为小试管外径截面积）、水对小试管顶部外壁的向下的平均压力 $F_2=pbS$（pb 为小试管顶部外壁所受平均压强，可以认为是 b 点的压强）。小试管所受向上的合力为：

$$F=F_1-F_2-G$$

式中，G 和 F_1 是恒定的，而 F_2（p_b）是随实验条件而变化的。

若开始时细试管插入粗试管水中的深度是 h。那么，只要水是静止或流速很小，可以认为这时大气压强在水中传递的过程中压强的大小不变，而且各向同性。因此，小试管顶部 b 处的平均压强为：

$$p_b=p_a-\rho gh=p_0-\rho gh$$

因而，

$$F_2=(p-\rho gh)S$$

由此得到向上的合力的大小为：

$$F=F_1-F_2-G=\rho ghS-G$$

由上式可知，在两试管倒过来的这一瞬间，如果 $\rho ghS>G$，则 $F>0$，小试管就要向上运动；如果 $\rho ghS<G$，则 $F<0$，小试管就要向下运动。而 hS 就是开始时小试管排开大试管中水的体积。所以，这一实验要能做成功，必须满足的一个条件是：开始时小试管排开水的重力 ρghS 要大于小试管本身的重力 G。为了使这个条件得到满足，在操作时应先将大试管差不多灌满水，再将小试管放在大试管中，使其正好浮在水中，这时 $\rho ghS=G$，然后将小试管尽可能往水中按下一些，使得 $\rho ghS>G$，最后迅速将两试管倒过来。若实验的初始条件选择得不当，如 h 太小或 G 太大，此实验都难以成功。

当细试管向上运动后，粗试管中的水就被排挤而流出。这时，影响小试管向上运动的因素（力）共有四个，总的效果仍使 F 保持向上，即保持小试管渐渐上升。

由上分析可见，小试管的上升，并非仅由于大气压力作用的结果（事实上，开始时大气压对小试管的压力之和是为零的）。把小试管上升的原因仅归结为大气压力对小试管的作用是不确切的。

题目所说“两管粗细相差很小”也是一个重要条件。若粗细相差较大，即使刚开始的瞬间满足 $\rho ghS>G$ 的条件，但由于水迅速沿两管壁流下，因而 h 迅速减小，从而使得 $F<0$，小试管落下。（2）因教学需要要求出现的实验现象，就原理来讲必须是唯一的，而不应该是可能会出现的。

吸桔子水实验

用麦秆可以把瓶子中的水吸到嘴里，如图 3－10 甲所示，这是为什么？如果把玻璃管通过塞得很紧的橡皮塞插入盛水的瓶子里，用嘴吸玻璃管，如图 3－10 乙所示，还能把水吸上来吗①？人吸东西，实际上是利用口腔造成一个低压区，被吸的东西在外界压强（这个压强必须大于口腔内的压强）的

作用下压进口腔，图 3－10 乙中的情况也是这样。

假设人口腔中的气压为 P_1（比大气压强 P_0 小一些）。在吸的过程中，开始时瓶内的气压 p_0（实际上略大于 p_0）大于口腔中的气压 p_1，它将把水通过玻璃管压上去，在玻璃管中上升一段距离，设上升 h，$h<H$（H 为瓶内水面到口腔的高度）。这时，随着水在玻璃管中上升，瓶内空气柱体积将增大，气压将降低。如果瓶内空气在体积增大 hS（S 为玻璃管内截面）之后的气压比 $P_1+\rho gh$ 大一些，那么水将继续上升；如果瓶内体积增大了 HS 后的压强比 $P_1+\rho gH$ 大，那么瓶内的气压就能把水压上 H 高度而到口腔中（这里假定 hS 的体积比口腔的体积小得多，否则水在玻璃管中上升的时候，口腔内的气压在增大）；如果不大于 $P_1+\rho gH$，那么它就不能把水压入口腔。

三　原理的可行性

（1）往往有这样一种情况，设计的实验方案从原理上讲并没有错误，但在实验的实施过程中，常受到装置、器材、实验条件等方面的限制，以至成为理想化的实验方案而无法实施。因此，在设计和选择方案时也必须注意从原理上来分析方案是否可行。

（2）有些实验虽然在科学性上并没有错误，但其主要的实验原理学生不易理解，或要在以后一个阶段才能学到。那么，这些实验就不能较好地发挥其应有的作用，这些实验在教学中就不一定可行，这种情况是应该尽可能避免的。

“竹筷提米”实验

在一个玻璃杯中倒满大米，并将其按紧①，然后插入一根竖直的毛竹筷（或细木棒），这时，拿住筷子就可以把装满大米的玻璃杯提起来。

一些初中物理教材安排这个实验在“滑动摩擦”之后，由学生自己做。这个实验的原理涉及静摩擦力的作用，而静摩擦力内容要到高中才开始讲授，初中二年级学生做了这个实验之后也未必能想出其中的道理。因此，在初中二年级安排这个实验与教学大纲要求不相符合，是不适宜的。

（3）人们往往容易忽略这样一种情况：从某些实验来看，原理上并没有错误，学生也容易理解，但运用于教学中，把它们放在一起来考虑就会出现逻辑错误。

牛顿第三定律和牛顿第二定律实验

用两个质量相等的物体相互牵引或推斥的位移相等来说明牛顿第三定律，并用两个质量不等的物体相互牵引或推斥的拉移与质量成反比来说明牛顿第二定律。

前一个实验实质上是以牛顿第二定律为基础来导出牛顿第三定律，后一个实验又以牛顿第三定律为基础来导出牛顿第二定律，这样就出现了逻辑循环。这种情况是需要避免的。

四　应注意的几个问题

分析研究实验原理的科学性和可行性，还应注意以下几个问题。

（1）不能轻信“原理和结果的吻合”。

实验出现的现象（或结果）与（前人叙述的）实验原理所预期的现象（或结果）吻合，未必说明此实验原理就一定没有问题。对此，人们常常会忽视。实验原理的科学性错误，多半是由于人们轻信这种原理和结果的吻合，被这种假象所迷惑，从而放松了或停止了对实验原理的深入研究所引起的。

验证 a∝F 的实验

将两个质量相等的小球分别放在两条长度 L 相同、高度为 1 与 2 之比的斜槽（或斜面）上（θ都不大）。让它们同时滚下，其中一个在斜面中点，另一个在斜面顶端，如图 3－11 所示。

有些书籍介绍这个实验的原理是这样的。由于这两个小球的重力 G 沿斜面的分力为：

$$F_1 = G\frac{h}{L} = mg\sin\theta_1$$

$$F_2 = G\frac{2h}{L} = mg\sin\theta_2$$

两分力之比为：

$$F_1 : F_2 = 1 : 2$$

因此，两球的运动加速度之比：

$$a_1 : a_2 = \frac{F_1}{m} : \frac{F_2}{m} = 1 : 2$$

又由于两球离斜槽底端的路程之比：

$$s_1 : s_2 = \frac{1}{2}L : L = 1 : 2$$

因此，两球运动到斜槽底端所需的时间为：

$$t_1 = \sqrt{\frac{2s_1}{a_1}} = \sqrt{\frac{2s_2}{a_2}}t_2 \qquad \text{(相等)}$$

由于两球是同时滚下的，因此它们将同时到达斜槽底端。如果斜槽底端是两块挡板，那么我们将听到两球撞击挡板的声音是一声；如果斜槽底端是两把分别与电池和小灯相连接的碰撞开关，那么我们将能看到两个小灯同时亮。

实验表明，实验结果与实验原理分析时所预期的结果一致。由于原理与结果吻合，这个实验流传了几十年，被许多人所接受。如果能冷静地再分析一下实验的话，就不难发现这个实验原理是有问题的，其问题主要在于球与斜槽之间的摩擦力 f 能否忽略不计。

如果 f 可以不计，那么两个球的加速度应分别为 $g\sin\theta_1$ 和 $g\sin\theta_2$。但实验测出小球运动的时间 t 后，按 $a = \frac{2s}{t^2}$ 算出的加速度却比 $g\sin\theta$ 要小得多。可见，f 是不可以忽略的。而原实验原理对球在斜槽中的摩擦情况并没有考虑，似乎任何摩擦情况对实验结果都没有影响，这显然不妥。

对于一般情况，不忽略摩擦力 f 的影响。为分析简便起见，这时仅考虑两种简单的情况（也是极端情况）：只滑不滚和只滚不滑。

只滑不滚的情况在实验中不会出现，即使出现，滑动摩擦显然不能忽视。

按原实验叙述只滚不滑的情况是完全可能出现的，在这种情况下，摩擦作用包括静摩擦力和滚动摩擦力偶两部分。当然，如果球与斜槽接触处

的形变很小，滚动摩擦力偶的作用是可以忽略的。但静摩擦力 f 却不能忽略。静摩擦力 f 一方面对球心的运动起减速作用；另一方面对球的转动起加速作用，没有这个摩擦力小球不可能滚动。考虑静摩擦力 f 后，我们可以这样分析。如图 3－12 所示，设球半径为 r，

由于只滚不滑，因而有下述关系式：

$$F-f=ma_c \qquad (1)$$

$$rf=I\beta \qquad (2)$$

$$ac=r\beta \qquad (3)$$

因为$I_{球}=\frac{2}{5}mr^2$，所以解得：

$$a_c=\frac{2}{7}g\sin\theta \qquad (4)$$

$$f=\frac{2}{7}F=\frac{2}{7}mg\sin\theta \qquad (5)$$

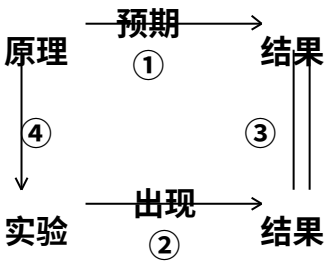
$$F-f=\frac{5}{7}F=\frac{5}{7}mg\sin\theta \qquad (6)$$

从（4）、（6）两式可见，在实验中，正因为两球的 m，r 和 I 都相等，所以得：

$$\frac{a_{c1}}{a_{c2}}=\frac{F_1-f_1}{F_2-f_2}=\frac{F_1}{F_2}=\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{1}{2}$$

这就是这个片面的实验原理推出正确的实验结果$\left(\frac{a_{c1}}{a_{c2}}=\frac{F_1}{F_2}=\frac{1}{2}\right)$之所以然。

从思维方式的角度来看，上面的实验之所以会出现物理原理的科学性错误，是因为用了这样的思维模式：



显然，这种思维模式是不完备的。可见，在分析实验原理乃至实验研究的整个过程中，我们必须重视逻辑思维。

（2）不能想当然。

分析和研究实验不能想当然，设计实验更不能想当然。我们不能只看原理与实验结果是否吻合，也不能只看现象而想其当然原理，或只看原理而想其当然实验结果。

伽利略的惯性原理理想实验

让小球沿一个斜面从静止滚下来，小球将滚上另一个斜面。如果没有摩擦，小球将上升到原来的高度。伽利略推论说，如果减小第二个斜面的倾角，小球在这个斜面上达到原来的高度就要通过更大的距离，继续减小第二个斜面的倾角，使它最终成为水平面，小球就再也达不到原来的高度，而要沿着水平面以恒定速度①。

下面我们用理想的方法来研究这个理想实验。

伽利略这一理想实验是建立在这样一个假设条件——如果没有摩擦。这里的摩擦是指滑动摩擦、静摩擦、滚动摩擦，还是笼统指三者？

在这个理想实验中，小球的运动状态是“滚”。对于只滚不滑的情况，没有滑动摩擦；假定小球和斜面都是理想刚体的话，也没有滚动摩擦力偶，但是静摩擦却不能没有！否则，小球不可能从斜面上滚下。由此，很容易产生两个问题。

（1）如果仅存在静摩擦，那么小球能否再滚到原来的高度呢？在上滚的过程中，由于静摩擦力的方向与运动方向相同，它将阻止球转动，使球的转动越来越慢，直至停止滚动。又由于这个静摩擦力不做功。因此，由机械能守恒定律可知，小球能滚到原来的高度。

（2）如果第二个斜面变成了水平面，小球能否沿着水平面以恒定的速度（速率）持续运动下去？这是可能的，因为这时静摩擦不存在。对此，可做如下分析。

如果静摩擦力存在，那么小球在水平方向上仅受到这个摩擦力的作用，这个作用必将改变小球的运动状态。如果这个摩擦力与小球的运动方向相反，如图 3－13（a）所示，那么这个力一方面要使小球的平均速度减慢，另一方面要使小球的转动角速度加快，亦即使平动速度加快。如果这个摩擦力与小球的运动方向相同，如图 3－13（b）所示，那么，这个力一方面要使小球的平动速度加快，另一方面要使小球的转动角速度变慢，即使平动速度减慢。可见，如果静摩擦力存在，都会使得本来不滑动的小球在这个静摩擦力的作用下发生滑动，这显然是不合理的。因此，这个静摩擦力的方向既不可能向前，又不能向后，亦即这个静摩擦力并不存在。小球在水平方向不受外力的作用，它就必然以恒定的速率沿水平面持续运动下去。

从上面的分析可见，伽利略这一理想实验若要确保原理正确，其假设条件不应该是“如果没有摩擦”，而应该是“小球只滚不滑，且小球与斜面都为理想刚体”。

当然，伽利略在设计这一理想实验时的上述不足，并不一定就是伽利略的疏忽。这也许是后人在叙述这一理想实验时外加的，也许是伽利略的知识局限性所引起的，因为在当时关于摩擦的知识还比较缺乏。

（3）不能“迷信”。

进行实验研究不能迷信，凡事应该经过自己分析研究后做出结论，或

决定取舍、决定承认与否。我们应该信任专家权威，但这不等于说他们写的、说的都是正确的，也不等于说我们不能对他们的论述重新验证、修正或否认。不加思索、盲目接受、一切照搬的作风是不可取的。

静电实验中的绝缘问题

大家知道，静电实验比较难做，往往难就难在绝缘问题上。为什么静电实验中绝缘问题如此重要呢？一般都认为，因为静电具有电压高、电量少的特点，电压高容易漏电，电量少一漏就光。所以，静电实验的关键要解决绝缘问题。笔者认为这样的解释不确切。

①静电有电压高、电量少的特点吗？

把电压高、电量少作为静电的特点，是以下面两个实验①为基础的。

a．说明静电有“电压高”的特点的实验。

将直流电压为 220V 或 380V 的火线用绝缘导线接到金箔验电器的导棒上去，把地线接到验电器的外壳上，便见金箔张开，但其张角并不大。若把某一带静电的带电体去接触验电器导棒，金箔张角要大得多，有时几乎张成直角。可见，金箔的电压（亦即带电导体对地而言的电势差）高到几百伏乃至几千伏，这就表明一般的带静电导体的电压是相当高的。

笔者认为，就上述实验本身（现象）来说没有问题，但由此推论静电有电压高的特点是不够严密的。对此，先请看下述事实。一般的干电池两端有静电荷，但由这些静电荷产生的电压（不大于电池的电动势）是很小的，它不足以使验电器张开一个可见的角度。由此，是否说明了静电电压低呢？

用感应带电的方法可以使物体带上少量的静电荷。这些电荷可以使验电器仅张一个很小的角度，这是否说明静电电压低呢？

一般远距离输电的电压都在万伏以上，比起“几百伏乃至几千伏”的静电来说，电压要高，这是否又说明了静电电压低呢？也许，有人认为用摩擦的方法获得的静电有电压高的特点，事实亦并非如此。两个物体相摩擦，组成物体的材料以及它们接触的情况和摩擦的速度不同，产生的电荷的多少就不同，它们能使验电器箔片张开的角度的大小也是不同的。其实，静电荷能产生多高的电压，不仅取决于电量的多少，还取决于静电荷的分布情况。对于一定量的静电来说，如果分布在一个电容很小的导体上，那它产生的电压就高；如果分布在一个电容较大的导体上，那它产生的电压就低。对于一定的带电导体来说，如果所带电荷多，那它的电压就高；如果所带电荷少，那它的电压就低。因此，我们没有理由说静电的电压一定高（即有“电压高”的特点），更没有理由说静电的电压一定比“动电”的电压高。

b．说明静电有“电量少”的特点的实验。

使两个用绝缘丝线吊着的轻薄的小纸片感应带电（使其带上同种电荷）。然后提起丝线，两张片相斥推开。根据纸片所受的重力 G、静电力 F

和丝线的张力 T 三力平衡，可估算出纸片上的电量为 10^{-9}C 的数量级，而一个手电筒小电珠上每秒钟所流过的电量约为 $\frac{1}{3}$C。这个数量约为纸片带电量的 1000 万倍。可见，纸片所带的电量非常微小。

上述论证也是不严密的。一般来说，静止物体和运动物体从数量上不是都能进行比较的。上述论证中，将静电荷与流过某一物体（截面）的动电荷从数量上进行比较必然涉及到时间的因素。在 1 秒钟内相比，静电少得可怜。但，在亿分之一秒、千亿分之一秒的时间内相比，静电是否还比流过小电珠的电量少得可怜呢？事实上情况是不同的。

综上所述，静电并没有所谓“电压高、电量少”的特点。

②为什么通常的静电实验需要较高的电压？

在许多静电实验中，要求带电体的电压比较高。这主要是由两个因素决定的。

a．测量仪器的灵敏度。一般用的静电测量仪器，如箔片验电器、静电计的灵敏度都不高。一般认为较灵敏的纯金金箔（箔的厚度约为万分之一厘米）验电器，要使其张开一个看得见的小角度，也需近百伏的电压。一般的厂制指针静电计则需好几百伏的电压才能张开一个显见的角度。

b．显示装置的灵敏度和器材的性质。如带电体吸引中性体的实验，若带电体的电压不高，就很难使这个吸引作用能清楚而明显地显示出来。再如，介质的极化、电压不高、极化作用不大，也难以表现出来，等等。

③为什么静电实验的关键要解决绝缘问题？

要保证静电实验能顺利进行，就需使得带电体不容易漏电。静电实验中的漏电，就是带电体向周围的物体转移电荷。带电体是否容易转移掉电荷，主要取决于什么呢？对此，我们可以通过下例来粗略地分析。

设一个电容为 C、带电量为 Q_0 的导体球，由一根电阻为 R 的绝缘棒支撑着（假定周围空气的绝缘性能十分好），如图 3－14 所示。由导体通过绝缘支柱放电的微分方程：

$$\frac{Q}{C}+\frac{dQ}{dt}=0 \qquad (1)$$

可得导体球上的电量的变化情况由下式决定：

$$Q=Q_0e^{-\frac{t}{Rc}} \qquad (2)$$

导体球的电压（电位）随时间的变化情况

由下式决定：

$$U=\frac{Q_0}{C}e^{-\frac{t}{RC}} \qquad (3)$$

假如导体球的电容为 5pF（直径约 10cm），开始时的电压为 2000V，绝缘支柱长为 20cm，半径为 0.5cm，材料是干燥的木棒（其电阻率 ρ 约为 $10^{14}\Omega\cdot mm^2/m$），其电阻 R 约为 $2.5\times10^{11}\Omega$，那么，时间常数 $\tau=RC=1.25s$，由（2）、（3）式可得，ts 后导体球上电量和电压的量值如下表所示

（U_0=2000V，Q0=CU0）：

t(秒)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Q/Q_0	1	0.449	0.202	0.091	0.041	0.018	0.008	0.004	0.002
U(V)	2000	899	404	181	82	36	16	7	3

如果绝缘支柱是石蜡（电阻率约为 $10^{22}\Omega\cdot mm2/m$）做的，其电阻约为 $2.5\times10^{19}\Omega$，那么，$\tau=1.25\times10^{8}s$，即约为 4a，由（3）式可得，1h 后，导体球的电压才从 2000V 下降到 1999.9V。显然，这个带电导体球如果用干燥木棒做绝缘支柱的话，电荷很快就漏光，根本无法用以实验；如果用石蜡做绝缘支柱的话，电荷不易漏掉，基本上能在实验时间内保持电荷不变。由（2）、（3）两式和上例实际数值的计算可见，带电导体球是否容易漏电主要取决于 RC 的大小；如果导体球的电容和绝缘支柱的形状、大小一定，那么带电导体球是否容易漏电，主要取决于绝缘材料的电阻率 ρ 的大小。因此，为了使实验中没有明显的漏电现象，以保证实验能顺利进行，必须解决实验中的绝缘问题，选用绝缘性能好的绝缘材料。

（4）注意“偶然现象”。

要随时准备发现实验中出现的偶然现象。实验中的偶然现象，有时并非偶然，而可能包含着我们还没有认识的事物和规律。它常能暴露我们思维的缺陷和实验的不足。善于抓住偶然现象，发现问题，深入研究，这也是实验研究者应有的一种素质。

物体的稳度

高中物理课本甲种本和乙种本（人民教育出版社 1983 年版）都把物体不易倾倒的稳定程度叫稳度。并且通过对砖的三种放置状态、稳定情况的实验和分析，以及对照相机三角架稳定情况的论述，说明：稳度的大小跟物体的重心的高低和支面的大小都有关系，物体的重心越低、稳度越大，支面越大、稳度越大。然而，日常生活和工农业生产中的许多实例说明，稳度的大小并非简单地决定于重心的高低和支面的大小。例如，如图 3－15 所示的两个大小和重量相同但形状不同的物体（可以是堆砌的砖块等），虽然重心高低和支面大小相同，但是很显然甲物体比乙物体稳。再如，如果将图 3－16 甲中照相机三角架的 b 杆拉长，C 杆向后移（a，b 杆的撑地点不变），如图 3－16 乙那样，尽管三角架（连照相机）的支面增大了，重心降低了，但是它的稳定程度反而降低了（用三角架支撑竹杆晒衣服的情况与此相同）。

说稳度与重心高低和支面大小有关，这仅是一种经验。稳度到底是由什么决定的呢？对此，可做下述分析。

从稳度的意义来看，对于一定的物体，如果我们使物体倾倒所需的最小功越小，那么这物体的稳度就越小；反之，越大。因此，我们可以用使物体离开平衡位置而倾倒所需的最小功的大小来表示稳度的大小。这里说的最小功（W_0）是指使物体向着离开重心垂线最近的那一点（如 N）或那

一边（如$\overline{AB}$）倾倒所需的功，如图3－17所示（图中O点为物体重心所在处）。这一点（N）称为易倾点。这一点所在的那条边，或过这一点的切线（$\overline{AB}$）称为易倾轴。重心垂线到易倾点的距离（$\overline{PN}=a$）叫易倾距。由此，我们可以用下述公式来计算物体的稳度：

$$W_0=mg(L-h)$$

或

$$W_0=mg(\sqrt{h^2+a^2}-h)$$

式中，m 为物体的重力。此式也表示为了要将物体倾倒至少需使物体重力势能增大的数值。

由上面两式我们可推得下述结论：

①在物体的重力和重心高度一定的情况下，易倾距 a 越大，稳度越大；反之越小（如图 3－17 所示的情形）。②在物体重力一定的情况下，重心到易倾点长度 L 与重心的高度 h（如图 3－17）之差越大，稳度越大；反之越小（如图 3－16 所示的情形）。

③在物体重力和易倾距一定的情况下，重心越高，稳度越小；反之越大（因为$\frac{dW_0}{dh}=\frac{1}{\sqrt{1+\frac{a^2}{b^2}}}-1<1$，所以$W_0$随h的增大而减小）。

④在物体重心高度和易倾距一定的情况下，物体越重，越不易倾倒，稳度越大；反之越小。

上述推论与实验事实完全相符，这里不再一一列举。

第四章　实验方法和实验方案

实验需要有一定的方法和实验方案实施。实验方法和实验方案决定了实验一定的“框架”和“工艺”。因此，实验方法和实验方案的研究是实验研究中最能体现人的想像力等创造性思维能力的领域之一。进行实验方法和实验方案的研究，要善于了解实验的设计思想、实验手段、显示方法等，以便吸取实验设计中的精华，发现实验方法的关键所在以及巧妙之处。在进行实验方法和实验方案研究时，我们的思维不能被具体的实验所局限（限制），而应该进行抽象思维。要注重实验方法，尽可能透过每一个实验方案的原理、装置、器材等方面的具体形式和参数，抓住其本质的属性和典型的特征，也就是说要善于建立恰当的实验模型。

概括实验方法、建立实验模型的主要目的是：

（1）便于更好地选择实验方法和实验方案，充分挖掘实验潜力，这样利于掌握实验关键和要点。

（2）开阔思路，利于实验的设计和改进。取“人”之长，能举一反三；鉴“人”之短，可少走弯路。

（3）利于自制教具。

第一节　分析归纳设计思想

一　分析归纳设计思想的基本要求

要进行实验方法和实验方案的研究，首先要善于分析、归纳实验的设计思想，找出实验中要解决的重点和难点以及其解决的方法。有可能的话，还可探究设计者完成这一实验的可能的思维方法和过程。

我们不仅要分析整个实验的设计思想，而且还要注意分析实验中某一过程或某一方面的设计思想。设计思想是为了解决问题而思维的结果。因此，分析设计思想首先要分析、判断设计思想所要解决的问题和所能解决的问题，只有这样才能为我们评价设计思想的优缺点，进而为评价实验实施方案的优缺点提供有实际意义的根据。

闭合电路欧姆定律实验演示

闭合电路欧姆定律演示实验，一般用拆开原电池法，如图 4－1 所示（这是其中之一种）。为什么要拆开原电池？拆开原电池要解决什么问题？它能起到多大的作用？对此，在接受这个实验前，我们需要进行分析思考。孔子说：“视其所以，观其所由，察其所安，人焉瘦哉！”要了解一个人应该这样，要了解实验的设计思想，也应该首先从外表上观察它怎么做、起什么作用，然后分析它为什么要这样做，最后检查它这样做的效果如何，内容、效果与原理是否一致。

我们知道，闭合电路欧姆定律演示实验需要使学生都能清楚地看到：当外电路电阻变化时，①内、外电压之和为一常数；②内、外电压有明显的变化（变化幅度尽可能大）。

要满足上述两点实验要求，必须使得：①电源的电动势较稳定；②电池的极化现象要小——电流不能太大，所以内阻不能太小；③测内电压用的探针的极化电动势要小——选合适的材料做探针；④需加大电池内电阻，内电阻与外电阻的大小关系恰当；⑤演示电表的量程及内阻恰当。①、②、③为满足第 1 个实验要求，④、⑤为满足第 2 个实验要求。这里，增大电源（电池）内电阻是实验方案要解决的一个关键问题。

增大电源内电阻的常用方法有两种：①在两个内阻很小的电源中串一个电阻，作为模拟电源内电阻；②拆开原电池，控制电池内离子通道，如减小其截面积、增大其长度，以此来增大内电阻。图 4－1 所示的拆开原电池，在两个半电池之间用盐桥连接以增大内电阻就是采用这种方法。

几何光学实验演示

在几何光学实验中，我们可以用光盘来实验，也可以用烟箱来实验，还可以用混入少量的悬浊质的水箱来实验。这是因为几何光学实验装置所要解决的一个主要问题是光路的显示问题。而解决这个问题的基本方法是利用白屏对光的漫反射，或利用水中的悬浊质和空气中的烟尘等微粒对光

的散射来显示光路。认识到这一点，就有利于抓住实验关键和自制实验装置。

二　分析设计思想的三个角度

分析设计思想，一般总是从三个方面来考虑：(1)物理原理；(2)教学要求或实用要求；(3)仪器制作或装置搭配中的一些工艺和选材等问题。其中，第(3)最容易忽视，而第(1)最重要，如果没有弄懂重物原理往往就不能正确地分析设计思想或判断设计思想的正确与否。

医用温度计

医用温度计（即体温计）的设计思想是为了使体温计在离开人体以后还能表示人体的温度（即水银柱不缩回），体浊计制作时在如图 4-2 所示的 A 点附近的管子要做得非常细，这样，体温计插入口腔后，水银受热膨胀，水银可以通过这里升到上面去，体温计离开人体后，水银变冷收缩，水银柱就在这里断开，使上面的水银退不回来①。

为什么水银柱退不回玻璃泡呢？如果说，水银柱的上升是由于水银受热膨胀、水银内部的分子力克服了水银柱上方的气体压力和水银的重力的缘故的话，那么，当水银柱在 A 处断开后，在此处就出现真空，水银柱上方的气体压力和水银的重力为什么不能将水银柱压下（退回），以填补这一真空呢？体温计的设计思想（原理）究竟是怎样的呢？

第二节　根据知识结构建立实验模型

物理实验是物理教学的基础，也是建立物理知识结构的基础。不同的物理内容和知识结构，必有其相应的实验模型和实验方法。所以，从物理内容和知识结构出发，有利于我们抓住实验中所要解决的关键问题，为确定实验设计的思维方向提供依据。

运动学、动力学实验方法概述

力学实验要解决的主要问题是对位移（位置）、时间、质量和力的测量（测定、估计、比较）和显示。如果我们能测出上述各力学量，我们就能间接地测量出其他力学量，就能用以探索或验证物理规律。正因为如此，所以位移（长度和角度）、时间、质量和力的测量仪器是力学实验的基本仪器。

运动学实验主要要解决对位移和时间的测量和显示；动力学实验主要要解决对位移、时间、质量和力的测量和显示。在一般情况下，质量和力还是比较容易测量的，如用天平和测力计等。因此，在运动学和动力学实验中，对位移和时间的测量和显示是实验中所要解决的主要问题。

在教学实验中测量或显示位移和时间的基本方式一般在三类。

1．定位测量

即先将物体某一段运动路程中的始点和终点确定下来，然后再测定物体经过这段路程所用的时间。常用的方法和仪器如下：

(1)秒表、电动秒表，用手控、或电磁碰撞（同步）开关等等。如图 4-3 所示的，用电动秒表测重力加速度的实验装置。

(2)电子数字计时器。例如，气轨实验、测重加速度的实验等。

(3)利用声光等比较时间。例如，验证 $a \propto F$，实验装置如图 4-4 所示。

2．定时测位

即让物体在规定的时间内运动，测出在这段时间内物体运动的位移。

(1)用节拍器、或滴水的等时声响测位。如①阿特式德机实验①；②斜槽实验①；③滴水法测重力加速度②。（2）根据摆的等时性测位。例如，粗测重力加速度，实验装置如图 4－5 所示。

（3）等时间隔描迹定位。例如，①电磁打点器；②注液打点器；③滴液小车；④粉沫图计时器；⑤弹簧或单摆等时振动；火花打点计时器；⑦闪光照相；⑧电化法打点等。

（4）等时测位比较。如：①双车实验③；②落体计时。

3．定位、定时（大多用于验证和比较）

（1）用于匀变速运动。例如，斜槽实验。用图 4－6 所示装置验证匀变速直线运动中路程与时间的关系。

（2）用于匀速运动。例如，钢球在粘滞度较大的介质中下落；阿特武德机实验等。

第三节　根据实验和教学要求建立实验模型

需求是创造发明的源泉，也是实验设计的源泉。因此，实验设计思想中必然包含着对实验的要求和教学的要求。分析实验要求和教学要求，常常能激发灵感、产生设计思想的萌芽；同时，也利于比较、选择或改进实验方法或方案。

通电导线在磁场中运动的实验

从实验要求和教学要求来看，实验方案模型中应包含两个内容：①磁场；②可以通电的，且可以运动的导体。实验主要要观察的是导体的“动”。如何使导体“易动”且“动得明显”，是实验设计中首先要考虑的问题。一般课本都采用如图 4－7 所示的实验装置，这个装置采用的方法是让通电导线在磁场的作用下，在水平方向滚动。

除了“滚动”的方法外，还有哪些“易动”且“动得明显”的方法呢？对此，至少还有下列几种。

（1）摆动。实验装置大致如图 4－8 所示。

（2）转动。实验装置大致如图 4－9 所示。

（3）竖直平面内的运动。装置大致如图 4－10、图 4－11 所示。

第四节　抽象出实验模型并设计其他实验方案

假如一个实验可以有多种实验方案的话，那么，这些方案必然有某种联系或共同的特征。如果我们能根据某一实验方案，分析出它们的共同的特征，就可以抽象为某一实验模型。那么，我们就完全有可能再设计出其他的实验方案。

牛顿第三定律实验

有一个验证牛顿第三定律的实验方案是这样的。在一个圆盘测力计 A 上挂一块磁铁，在另一个相同的圆盘测力计 B 上放一块铁（使其与磁铁等重），两测力计的示数相同，如图 4－12。然后，将测力计 A 移到测力计 B 的上方。这时，铁块与磁块要相互作用，作用的结果使得两测力计的示数发生了变化——A 的示数增大、B 的示数减小，如图 4－13。这说明铁块对磁铁的作用力的方向向下，磁铁对铁块的作用力的方向向上。A 增加的示数等于 B 减小的示数，由此说明铁块与磁铁之间的相互作用力的大小是相等的。综上所述，可得到结论：铁块与磁铁之间的相互作用力大小相等、方向相反、且分别作用在不同的物体上。

这个实验用了这样一个模型：准备两个包含测力装置（如测力计）的系统（如图 4－12）中虚线圈起来的 a 和 b），让这两个系统或系统中的一部分（如磁铁和铁块）相互作用，作用的结果由各自的测力装置反应出来，分析测力装置示数的变化从而验证牛顿第三定律。

根据这个模型，可以设计几十个实验方案。下面举 3 个例子。

（1）上面这个实验说明了磁引力满足牛顿第三定律。如果将图 4－12 中的马蹄形磁铁和铁块都换成圆形磁铁，并且使其极性相对，即可演示说明磁斥力也满足牛顿第三定律。

（2）如图 4－14 所示，将重物 P 搁在托盘测力计的托盘上。可见，弹簧秤减少的读数与托盘测力计增加的读数相同。由此说明重物 P 与托盘之间的相互作用力（弹力）满足牛顿第三定律。

（3）如图 4－15 所示，将废电池 P 浸在杯里的水中。可见弹簧秤减小的读数与托盘测力计增加的读数相等。由此说明电池对水的压力与水对电池的浮力（两者都是弹力）满足牛顿第三定律。

“远距离高压输电”模拟

远距离输电模拟实验，首先要说明在输电过程中“导线越长、损耗越大”，然后提出问题“在电能的输送中要研究如何减少这种能量损耗，以便有效地利用电能”①。这里，实际上提出了“效率”问题，或“损耗比”问题。为此，中学物理教学法的一些教材中提出了如下的一种实验方案②。

方案 1　实验装置如图 4－16 所示。图中 B_1，B_2 为自耦变压器，r 为电炉丝（1kW 电炉所用电阻丝）用于模拟“输电线路”。

实验时先演示“低压”输电。调节 B_1 使 V_1 读数为 U_1（如 30V），再调

节 B_2，使 A 读数为 I（如 0.8A），记下这时 V_2 读数 U_2。由此可分别算得电源供给线路的电功率（总功）$P=U_1I$，线路上损失的电功率 $P_1=(U_1-U_2)I$。

然后，实验演示“高压”输电。调节 B_1 使 V_1 读数为 U'_1（如 $120V=4U_1$），再调节 B_2，使 A 读数为 I'（如 $0.2A=\frac{1}{4}$），记下这时 V_2 读数 U'_2 由此可此可算出总功率 $P'=U'I'$ 以及线路上损失的电功率 $P'_1=(U'_1-U'_2)I'$。

比较上述实验结果，可得出在输送相同电功率的情况下，提高输电电压能有效地减小线路上的能量损失，从而提高输电效率。这一方案实际上采用这样的“模型”。因为 $P=P_1+P_2$（这里 P 为总功；P_1 为线路上的损耗功率——无用功率；P_2 为线路终端获得的功率，就作为负载获得的功率——有用功率）。在 P 一定的情况下，通过比较两种输电方式下 P_1 的大小（也就比较了 P_2 的大小），进而比较说明两种输电方式的“效率”问题（或“损耗比”问题）。或者说，通过比较两种输电方式下，P，P_1，P_2 中的两个量，进而比较说明其“效率”问题。

由此可见，比较 P，P_1，P_2 中两个量的方式，不只上述方案一种，对此，我们至少可设计下面几种方案。

方案 2 使 P_2 一定，比较两种输电方式下 P_1 的大小。

“低压”输电采用如图 4—17 所示电路。

“高压”输电采用如图 4－18 所示电路。

实验时，调节自耦变压器 B，使得 $I_1=I_2'$，即使两种输电方式下流过负载 D 的电流相同，这就保证了 $P_2=P_2'$。因为线路的电阻相同，所以比较 I_1 和 I_1' 的大小就可以比较 P_1 和 P_1' 的大小。实验显示 I（P_1）比 I_1'（P'_1）大得多，进而可以说明……“高压”输电效率高。

图 4—17、图 4－18 所示的线路，可以用同一块示教板或同一个装置（只是连接器件时不同）。在电路中，负载 D 获得的功率相同也可不用 A 表的示数说明，而从 D 亮度相同说明；流过线路上电阻 r 的电流的大小也可不用 A_1 表的数说明，而在 A_1 表位置换一个灯泡（如与 D 相同），由灯 L 的亮度的不同来比较说明 I_1 和 I_1' 的大小（十分明显，低压输电时 L 与 D 一样亮，高压输电时灯 L 几乎不发光）。这样，装置中可不用交流电流表，而只在 A_1 位置摆脱用一个与 D 相同的灯泡 L。

方案 3 使 P_1 一定，比较两种输电方式下 P_2 的大小。

将图 4－18 所示的电路改成图 4－19 所示电路。图中 A_1 可改用灯泡，负载大小可根据具体情况而定。实验时，使 $I_1=I_1'$，而这时负载获得的 $P_2'>>P_2$。由此分析说明高压输电“效率”高。

方案 4　比较两种输电方式下 P_1，P_2 的大小。

“低压”输电可采用图 4－20 所示电路。

“高压”输电可采用图 4－21 所示电路。

这一方案只需定性比较。实验显示：“低压”输电时，L 灯亮、D 灯暗；

“高压”输电时，L 灯暗、D 灯亮。由此分析说明：“低压”时 P_1 大、P_2 小，“高压”时 P_1' 小、P_2' 大；而且 $P_1 > P_1'$，$P_2 < P_2'$，即“低压”时“损耗”大而“收获”小、“高压”时“损耗”小而“收获”大。由此说明高压输电“效率”高。

方案 2，3，4 对器材的要求比方案 1 低得多，这对器材不充足的学校、对自制教具是有利的。

第五节　用相同的实验方法解决不同实验中的相同问题

往往有不少实验，虽然它们的实验目的不同，但是实验中需要解决的问题是相同或相似的，因此在实验装置的设计中所用的解决这些问题的方法也就相同或在原理上相似。我们在分析某实验的设计思想和实验的方法后，不仅要考虑这种方法（或模型）的优缺点，以及由此设计出其他的方法或不同的方案，而且也要考虑这种方法（或模型）能否应用于其他的实验之中。

微小形变的显示

一切物体在受到压力或拉力时都要发生形变，钢丝也不例外，只不过它不像橡皮筋的形变那样显而易见。

在一般情况下，钢丝受到外拉力后的相应伸长是微小的。如何让这个微小的伸长显示到足以使学生能明视的程度，是钢丝受力伸长实验的装置中必须要解决的问题。解决的办法显然只能设法放大，因为取一段很长的钢丝的办法是不可取的。放大的方法有多种，如用力学的方法、电学的方法、电子学的方法、光学的方法等等。这些方法在这个实验中都可以用，但是最方便的方法还是利用杠杆原理进行杠杆放大的方法。根据这一思想可以设计如图 4－22 所示的实验装置。

初中的热膨胀实验也是一个需要解决微小的长度变化放大问题的实验，它也可采用与图 4－22 所示的装置原理和结构类似的装置，如图 4－23 所示。

在图 4－22、图 4－23 所示的杠杆放大装置中，装置的放大倍数是不大的。上述的放大形式称为一级放大。若需放大倍数大些，可采用二级放大的形式（如图 4－24 所示）。

若需要说明铜和铁的热膨胀系数不同，可把两个如图 4－24 所示的装置并在一起（成为一个仪器），然后让长度相同的铜棒和铁棒在相同的情况下加热，由各自指针偏角不同来说明之。

第六节　实验方法和实验方案的比较和选择

对每一个实验，要尽可能多地收集和设计实验方法和方案，以便于比较选择。

一　实验方法和实验方案的比较

一个实验，往往可有多种不同的实验方法。例如，测定重力加速度的方法有：落体法、单摆法、圆锥摆法、振子法、机械能守恒法等。这些方法都依据于不同的实验原理，可用于不同的教学阶段和服务于不同的教学目的。

同样，对于一种实验方法，也可有不同的实验方案。

加大内电阻的方法

闭合电路欧姆定律实验装置中加大内电阻的方法，一般有两种。其中一种是用减小原电池内部离子通道截面积和增加长度的方法来增加内电阻。这种方法常用的方案有以下几种。

（1）用盐桥拆开原电池，如图 4－25 所示；

（2）用隔板拆开原电池，如图 4－26 所示；

（3）用可变内阻的蓄电池，如图 4－27 所示；

（4）用半透膜隔开原电池，如图 4－28 所示；

二　实验方法和实验方案的选择

尽可能多地收集或设计实验方法和方案，有利于对我们整个实验有比较全面的认识。由于教学时间所限，我们不可能将同一个实验的各种方案都在课堂内演示或用于教学，而必须有所选择。无疑，选择实验方案必须服从教学目标，从教学要求出发，同时还必须从演示实验和学生分组实验的要求出发。一般来说，下述几个方面尤应注意：

（1）仪器装置简单明了、易于搭配或制作；

（2）现象清晰、效果明显、易于操作、安全可靠、重复性好；

（3）紧密配合课堂教学；

（4）学生容易接受。

在同一个实验的各种方案中，也许有一个或几个比较适合于你的实验能力、你所能利用的实验器材和设备、你的学生的心理水平、你准备采取的实验教学策略等实验方案，但不一定有一个普遍适合的最佳方案；也许一个方案很适合于你，但不一定很适合于其他人。因此，实验方案需经过自己分析后选择确定。

通电导线在磁场中的运动

比较图 4－7 到图 4－11 所示的装置，从结构来看，图 4－7、图 4-8 的装置简单明了、易于搭配；从效果来看，也是图 4－7、图 4－8 的装置现象清楚较直观；从便于课堂教学讲解来看，对于初中学生，似乎图 4－7 的装置更直接，更方便一些。在图 4－7 所示的实验中导线向右运动就只向右运动，而在图 4－8 的装置中，导线向左运动后还要向右摆回来，然后还有一个振动过程。因此，综合起来看，还是图 4－7 所示的装置好。

吸气球实验

先在一个空瓶（如盐水瓶、三角烧瓶等）里倒入 $\frac{1}{4}$ 容积的热水，晃动一下瓶子，将水倒出，随后迅速将一只气球套在瓶口上，让瓶内的空气与瓶外空气隔开，然后把瓶子放在盆里用冷水浇瓶的四周（或将瓶子插在冷水中），使瓶内的空气较快冷却，可见，气球被吸入瓶内，且渐渐变大，如图 4－29 所示。

这个实验常被用来说明大气压的存在。当然，气球的吸入与大气压不无关系，但如何向初中学生讲清这个实验的原理，而又能为学生所理解和接受呢？这是很困难的。因为初中学生并没有这样的知识：一定质量的气体，当其温度降低时，其压强要减小。所以，这个实验在初中讲授大气压强时演示不太合适，而应当在高中讲气体性质时演示。

第五章　实验装置和实验器材

要进行实验，光有方法和方案不行，实验仪器和材料是必不可少的。如果我们不弄通实验装置的原理，不了解清楚仪器的原理、结构、性能，不了解材料的特性，就不能合理地选择器材，不能很好地使用仪器、充分发挥实验器材的作用，也不能有效地进行实验。同时，加强对实验装置和器材的研究，对于仪器的自制、实验的设计、装置的确定和搭配等都是相当有益的。

第一节　分析装置的原理和特点

一　分析装置的原理

不了解装置原理就不能合理地选择器材，不能抓住实验要点并正确地进行操作。而装置原理大多都是由设计思想所决定的，因此，分析装置原理，进一步了解设计思想和实验方法，有利于了解装置特点（优缺点），有利于实验装置的改进，以及激发设计新的实验装置的灵感。

演示用三相电源（单相裂相电源）

在做三相旋转磁场和异步感应电动机原理演示时需用三相电源，一般都用单相交流电经电阻、电容移相变成三相交流电源（即单相裂相电源），其装置电路如图 5－1 所示。其中电阻用 100W200V 的灯泡代替，电容用 10μF250V 的油浸电容，也可以将两只 4.75μF 的日光灯电容器并联使用。输出端 a，b，c 分别与三个作“Y”形联接的，互相成 120°角的定子线圈的始端相接。若在定子线圈中央放置一个可灵活转动的小磁针或闭合铝框，那么，将裂相电源通 220V 交流电后，即可见小磁针或铝框转动起来。

对这个装置的原理简要分析如下。

整个装置的电路如图 5－2 所示。其中 r 为每组定子线圈的电阻，实际测得阻值约为 19Ω；R 为通电后灯泡的电阻，假定它仍由 U^2/P 决定，则 $R=220^2/100=484\Omega$。

设 $\dot{I}_{dco}=\dot{I}_1$，$\dot{I}_{dbo}=\dot{I}_2$，$\dot{I}_{oa}=\dot{I}$，则 $\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2$。

又 $Z_{dco}=\sqrt{318^2+19^2}\approx 319\Omega$，$Z_{dbo}=484+19\approx 503\Omega$

以 $\dot{I}_2$ 即 U_{do} 为基矢，做矢量图，如图5－3。

显然，$\dot{I}_1$ 超前 $\dot{I}_2$ 为：

$$\varphi=\mathrm{gt}\frac{318}{19}\approx 87^\circ$$

且 $\dot{I}_1$ 的大小为：

$$\dot{I}_1=\frac{503}{319}\dot{I}_2\approx 1.58\dot{I}_2$$

$\dot{I}$ 的大小由余弦定律可得：

$$\dot{I}=[\dot{I}_1^2+\dot{I}_2^2+2\dot{I}_1\dot{I}_2\cos\theta]^{\frac{1}{2}}=1.91\dot{I}_2$$

$\dot{I}$ 与 $\dot{I}_2$ 的夹角为：

$$a=\mathrm{tg}^{-1}\frac{\dot{I}_1\sin\theta}{\dot{I}_2+\dot{I}_1\cos\theta}\approx 56^\circ$$

因此，$\dot{I}_1$，$\dot{I}_2$，$\dot{I}_0$分别在互成120°的三组线圈中产生的磁场的变化规律为：

$$\dot{B}_2 = K_2 e^{j\omega t}$$

$$\dot{B}_1 = K_1 e^{j(\omega t + \frac{207}{360}2\pi)} = K_1 e^{j\omega t}(\cos 207° + j\sin 207°)$$

$$= K_1 e^{j\omega t}(-0.891 + 454j)$$

$$\dot{B}_0 = \dot{B} + \dot{B}_1 + \dot{B}_2 \approx K_0 e^{j\omega t}$$

可见，这三组通电线圈的合磁场是一个以ω为角频率的旋转磁场。从上述原理浅析可见，旋转磁场 B_0 的形成主要是由于 dco 支路中电容的作用。这个电容使得 dco 支路中的电流与 dbo 支路中电流有一个较大的相位差。从原理上来讲，这无非是依据了纯电容电路中电流与电压之间有 90°的相位差的道理。由此设想纯电感电路中电流与电压之间也有 90°的相位差，在上述电路中，用一个感抗与上面电容容抗相近的“纯”电感线圈来代替上面的电容器，从原理上来讲应该是

可行的。如果我们选择 20W（或 40W）的日光灯整流器（它的参数约为：$R_{直}$=27Ω、L=0.92H、R_L（50Hz）=298Ω）代替电容器（如图 5－4），实验表明，实验效果相同。

二　分析装置的特点

验证干电池两端带有静电荷的实验如图 5－5 所示,非静电力把正电荷移送到 A 极，A 极就有了多余的正电荷，B 极就有了等量的负电荷，于是在电源内部形成了电场。这个电场是阻碍正电荷从 B 极移到 A 极的，两极上的异种电荷越多，阻碍正电荷从 B 极移到 A 极的静电力越大。如果外电路是断开的，当两极上的异种电荷达到一定值时，静电力和非静电力对电荷的作用达到平衡，正电荷从 B 极移到 A 极的过程停止。这时电源两极间就建立了一定的电压①……说电源两端有电压（或电势差），学生是容易理解的。但说这个电压是由静电荷产生的，即电源两端有静电荷，学生往往难以理解。

如何来验证电源（如干电池）两端带有静电荷呢？对此，我们可以这样来思考。

虽然在外电路断开时，两电极的电势差为一定值（等于电池的电动势）。但是，两电极所带的电荷的多少却没有一个确定的值，而是由两电极的形状、大小所决定的电容的大小所决定。这个电容越大，两极电量就越多。如果我们能设法加大两极极板的电容，使极板上带大量的电荷，然后使极板与电池脱离，亦即使得极板上的电荷保存下来，最后只要检验出极板上有电荷（而且是异种电荷），就能说明电源（这里指直流电源）两极是带有静电荷的（而且带的是异种电荷）。

根据上述设想可以设计一个实验方案，如图 5－6 所示。将平行板电容

器的两个极板与干电池（如 15V 或 22.5V 的电池）两极相连，以作为电池的两新极板。

为使两新电极的电容增大，可将极板紧紧相靠，靠得越近，电容越大。为了使它们靠得很近又不接触，可在其中一块极板上套上一只干净的塑料食品袋，以作为两极板间的绝缘介质，如图 5－6（a）。这时，虽然两极板间的电势差仍等于电池的电动势（如 15V），但由于两极板的电容比较大，所以两极板上的电量已相当多。然后把两极板与电池断开，将其中的另一块极板与一只金箔验电器的导棒相接触，即可见验电器箔片张开了一个明显的角度，如图 5－6（b），由此说明电池两端有电荷。进一步检验可发现电池两端带有异种电荷。

演示结果与上述方案中预料的实验结果完全相同。这个实验似乎已经证明了电池两极是带电的。然而，事实上这个实验是不能说明问题的。如果在图 5－6（a）中，我们不用干电池正负极与两极板相接触，而是用我们手的拇指和食指与两极板接触（甚至不接触），图 5－6（b）所示的情况同样能出现。这是否说明拇指和食指之间存在电位差呢？显然不是。这里，验电器箔片的张开主要是由于极板 P_1 在跟 P_2 靠紧的过程中与塑料食品袋的接触以及以后分开的“摩擦”作用，使 P_1 和塑料食品袋带上了电所引起的。只有当 P_1，P_2 都套上塑料食品袋时，由于在相同条件下的同种物体相“摩擦”不致于产生足以影响实验结果的电荷，才使电池两极的电荷能起主要的决定性作用。这样，实验原理才没有问题。事实上，不套食品袋，只要将两板尽可能靠得近些，实验同样能成功。在上述验证干电池两端带有静电荷的实验中，我们实际上是利用了平行板电容器的原理，设计了实验方案，如图 5－7。

这个实验装置的特点是：能使得用较小的电压给平行板带上的电荷，足以用验电器检验出来。或者说，用验电器检验出了平行板上带有电荷，而说明了较小电压的存在；或者说，为了比较小的电压给某一金属板带上足以用验电器检验出的电荷，可以根据平行板电容器的原理，采用“平行板”的方法；或者说，为了给某一绝缘导体带上更多的电荷，可以采用组成电容器的方法。

如果我们能从上述四个不同的角度来看待图 5－7 所示装置的特点的话，我们完全可以将这一装置“迁移”到其他一些实验之中，并可能得到较好的效果。

感生电动势的演示

高中物理课本在引入感生电动势概念后便指出，“在电磁感应现象中，不管电路是否闭合，只要穿过这个电路所围面积的磁通量发生变化，电路中就有感生电动势。如果电路是闭合的，电路里就有感生电流，如果电路是断开的，电路中就没有感生电流，但感生电动势仍然存在。”

为了帮助中学生理解这段话，我们应该创造条件让学生观察到当电路

不闭合时，感生电动势仍然存在的现象。为此，可采用如图 5－8 所示的实验装置。图中，C 为线圈，S 为碰撞开关，A，B 为靠得很近但不接触的绝缘金属平板。

装置左边的虚线框中的部分相当于一个电池，右边的虚线框中的部分就是图 5－7 装置的“迁移”——用以显示感生电动势存在的显示装置。

当条形磁铁从线圈中迅速抽出时，线圈中的磁通量迅速变小，线圈导线中的自由电子在涡旋电场的作用下，向某一平板堆聚，从而使两平板带上大量异号电荷。当条形磁铁冲击碰撞开关，切断了 A 板与线圈的通路，A 板上的大量电荷就被保留下来了。这时，A 板上的对地电压是不大的（充其量等于磁铁抽出产生的最大感生电动势），它不一定能使验电器张开一个可见的角度。然后，移开 B 板，使平行板电容器的电容大大减小，这时，A 板的对地电压就大大增大了，可见，验电器箔片张开了一个明显的角度。由验电器箔片的张开，说明了平行板两极板上带上了电荷，说明了在磁铁抽出线圈——线圈内磁通量变化时，两极板间——线圈的两端存在着电压，即线圈内存在着电动势——由电磁感应而产生的感生电动势。

光电效应演示实验

高中物理课本在讲到光电效应时，都首先介绍了这样一个实验：把一块擦得很亮的锌板连接在灵敏验电器上，用弧光灯照锌板（图 5－9），验电器的指针就会张开一个角度，表示带了电，进一步检查知道锌板带的是正电，这是因为它的电子在紫外线的照射下从表面飞出，锌板中缺少了电子，于是带正电。

这个实验按课本所述的方法，一般不太容易成功。其原因是：开始时，锌板上的电子在紫外线的照射下从表面飞出去，锌板就带上了正电，在周围的空间里就形成了一个电场,这个电场对电子的飞出有一个阻碍作用(即锌板上的正电荷对飞出电子的吸引作用）；随着飞出的电子增多，锌板上所带正电荷增多、电位升高、周围的电场增强、对电子飞出的阻碍作用增大，直到电子飞出时的最大初动能与电子在电场中的电势能相等时，电子就无法飞离锌板，锌板上的电荷就不会再增强，电位也就不再升高，于是就达到了平衡状态。这时，锌板的电位可以高到多少伏呢？对此，我们可以这样来推算，根据爱因斯坦光电效应方程（$\frac{1}{2}mv^2 = hv - w = hv - hv_0$）及达到平衡状态时电子的最大初动能等于其静电势能（$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU$）可知，锌板可达到的电位为：

$$U = \frac{h(v - v_0)}{e}$$

式中：$h=6.63\times10^{-34}J\cdot s$，$v_0=8.065\times10^{-19}Hz$，$e=1.60\times10^{-19}C$。

一般弧光灯发出的紫外线频率 γ 的数量级可达 $10^{15}Hz$，所以，U 的数量级仅为 10°V，即至多达到几 V（最多不超过几十 V），而一般指针验电

器对几伏的电位差是检验不出来的，这就是课本所述的方法一般不易成功的道理。

有些书在介绍这个实验时，通常总是说先给锌板带负电，使验电器指针张开一个角度，然后，用弧光灯照射锌板，可看到验电器指针迅速合拢。由此再说明锌板上的电子在紫外线的照射下飞了出来。由前面的分析可见，这个方法之所以易于成功，是因为开始时锌板的电位为负，它对光电子不是起阻碍作用，而是起加速作用；随着光电子的飞出，锌板的电位升高，最后当锌板的电位达到正的几伏时，光电子不再飞离锌板面，从而达到平衡状态，在这个过程中，锌板上电位的变化幅度较大，验电器指针的摆动就能清楚地显示出来了。

但是，这种方法常会使学生误解，认为只有带负电的金属板在光的照射下电子才能从金属表面飞出而产生光电效应。为了避免这些问题，又能把课本所述的实验做成功，我们可利用平行板电容器在所带电量（基本）不变的情况下，两极板间的电位差随电容器电容的减小而增大的原因，对课本所述的实验装置进行了改进。改进后的装置如图 5－10 所示。P_1（锌板）和 P_2（金属板）组成平行板电容器；两极板相对面上分

别贴上相同材料的塑料薄膜，两板紧靠，将金箔验电器的导棒和外壳分别与 P_1 板和 P_2 板连接。演示时，先用砂纸把 P_1 板向外的一面打光，然后，用弧光灯或紫外灯照射锌板 P_2，锌板就有光电子飞出，随之，锌板的电位升到几伏（达到平衡状态），这时，验电器箔片并不张开。但是由于 P_1、P_2 组成的电容器的电容很大，所以 P_1 板上积聚的电荷较多。熄掉弧光灯箔片仍不张开（P_1 和 P_2 间的电位差仍只有几伏）移走 P_2 板，即减小电容器的电容，这时由于 P_1 板上的电量基本不变，所以 P_1 板的电位迅速升高，从而使得验电器导棒的电位（即导棒与外壳的电位差）迅速升高，验电器箔片就张开了一个明显的角度。

验电器箔片的张开说明了两极板之间有电位差，即 P_1 板上带有电荷，通过检验可知，它带的是正电。由此可说明锌板在弧光灯紫外线照射下发生了光电效应现象。如果再把它与白炽灯代替弧光灯照射锌板面不发生上述现象加以比较，则能说明光电效应的发生与入射光频率有关的事实。

第二节　分析和掌握仪器的结构、原理和性能

一　分析仪器的结构和掌握仪器的工作原理

在使用仪器前首先要熟悉仪器的结构，了解其工作原理、使用方法和操作规程。如果有仪器说明书，那么，我们可以从说明书上了解一部分；如果没有说明书，那么，我们就应该分析仪器的结构和工作原理。

分析仪器的结构，要注意仪器的外形大致分几个部分，各部分的器件及其所用材料和大致作用，各部分的作用和相互联系，实验者操作的部件，仪器主要的工作部件、活动部件和易损部件等。必须对仪器结构有清晰的了解，必须在了解仪器结构的基础上来分析其工作原理或做其他的分析研究。

应当明确，仪器的工作原理与仪器的设计思想之间的区别与联系。设计思想常带有“理想化”的色彩。按设计方案制作的仪器，常会因选材、搭配、加工、组装以及实际使用等因素的影响，而使其工作情况和原理偏离设计方案，甚至完全是另外一回事。因此，即使在了解了设计思想的情况下，仍应再针对具体的仪器，分析其工作原理和工作情况。值得注意的是，不少仪器说明书中所说的原理，仅仅是“理想化”的设计思想的原理，不一定就是这些仪器的工作原理。

韦氏感应起电机的工作原理

韦氏感应起电机的结构如图 5－11 所示。图中的两个圆表示起电机前后两个圆盘，前盘顺时针向转动、后盘逆时针向转动；a_1，a_2，…和 b_1，b_2，…分别表示前后两盘上的金属箔片（位置）；E_1，E_2 和 F_1，F_2 分别表示前后两对导杆上的电刷（感应电刷）；S_1，S_2 为两集电电梳；T_1，T_2 为两放电杆；C_1，C_2 为两莱顿瓶；J_1，J_2 为两接连柱，中间连有一个连接片。

通常认为韦氏感应起电机是这样起电的。

假定开始时两盘箔片上所带电荷不平均，可以把它看做仅 b_3 上带有负电荷，这时 a_1，E_1，E_1，a_5 组成一个导体系统，由于 b_3 的感应作用，使 a_1 带正电、a_5 带负电。随着盘的转动，a_1，a_5 分别与 E_1，E_2 脱离，因而分别保留了正、负电荷。当 a_1 转到 a_3 位置时，b_1，F_1，F_2，b_5 也组成一导体系统，与前所述相似，由于 a_3 的感应作用，使 b_1 带负电、b_5 带正电。b_1 转到 b_3 位置时，又使在 a_1 位置的箔片带正电、a_5 带负电……下半盘的情况与上述相似。

这样，前盘上方 a_1~a_4 的箔片和后盘下方 b_5~b_8 的箔片总是带同种电荷（在现在所设条件下为正电）。当它们转到 a_4 和 b_8 的位置时，将被集电梳 S_1 通过尖端放电而收集，从而使 S_1，T_1 和莱顿 C1 内壁金属箔组成的导体系统带正电。同样，前盘下方 a_5~a_8 的箔片和后盘 b_1~b_4 的箔片也带同种电荷（现在为负电），为 S_2 收集而使 S_2、T_2 和 C_2 内壁金箔带负电。

随着两盘继续转动，两盘上箔片间的感应作用越来越强，经过 S_1，S_2 的箔片也越来越多，它们收集的电荷也越来越多，它们之间的电势差也越来越大，到一定程度后，T_1，T_2 之间（或其他地方）的空气被击穿而产生火花放电。

笔者认为，起电机起电过程并非这样“理想”。从起电机的实际结构来看，E_1，E_2 和 F_1，F_2 两根导杆都横套在金属轴上，而且金属轴又通过皮带和铁支架与下面的转轴、摇手柄、木底座连接。操作时手转摇柄，可以认为 E_1，E_2 和 F_1，F_2 是互相连通且接地的。这样，在前面的分析中，b_3 对 a_1 感应的结果就只能使 a_1 带正电而不能使 a_5 带负电①。同样，a_3 感应的结果也只能使 b_1 带负电而不能使 b_5 带正电。前后两盘上半部箔片相互反复感应的结果使得 S_1 收集正电荷、S_2 收集负电荷。

两盘下半部的情况与上半部基本相似。如果下半部也使 S_1 收集正电、S_2 收集负电，那么这时起电效率较高；如果下半部使 S_1 收集负电、S_2 收集正电，那么这时起电效率较低（但由于圆盘转速大而不容易感觉出）。偶而也许会有 S_1，S_2 收集到的上、下半部的电荷正好相互中和的情形，但只要起电过程中有一瞬间上、下半部 b 片（或 a 片）带电量不等，就会因连续感应，以致这种差异保持并扩大，使得 S_1，S_2 收集的电荷不能中和……

从上述分析可见，以往的参考书或仪器说明书中所述的仅仅是韦氏起电机的“设计原理”，而不是它的实际工作原理。韦氏起电机的放电过程是应该这样的。随着前后两盘相反方向旋转，感应起电的作用越来越强，两电容器 C_1，C_2 积累的正负电荷越来越多，放电杆 T_1，T_2 顶端金属球之间的电压越来越高。当两球间的电压高到两球间空气的击穿电压时，空气被击穿，C_1，C_2 中储存的异种电荷瞬间释放，使两球间发生火花放电，出现明亮的、婉蜒在两球间的细狭电火花。这时电流路径中的空气被骤然升温膨胀，发生爆炸性的声响。火花放电时，莱顿瓶的电压迅速下降，直至停止放电。接着又开始重新积聚电荷。所以，起电机 T_1，T_2 间是呈现间歇性的火花放电。

如果接线柱 J_1，J_2 间的连接片断开，相当于在 C_1，C_2 间串联了一个空气介质的电容器，从而使得整个系统的电容变小、储存电能较少，所以放电距离较短，火花较暗，呈现连续性的放电，发出嘶嘶的响声。当接线柱 J_1，J_2 间连通时，莱顿瓶 C_1，C_2 的介质就是它们的瓶壁，电容量较大，储存能量较多，积聚过程的时间较长，因而放电距离较长，火花较亮，声响较大，间隔时间也较长。韦氏起电机两根导杆的位置是不能互换的，如果位置互换了，那么在正常（顺时针）摇动手柄时，就不能起到反复感应起电的作用，因而不能起电。两根导杆的位置，不一定非要与水平方向成 45°角。只要不与电刷和另一杆靠得较近就可以了。从韦氏起电机的工作过程来看，起电机两电极究竟哪个带正电、哪个带负电，是由起电初态所决定的。但是，还是可以检验的。检验的方法一般有下面四种。

（1）将起电机的任一电极接到一个锥形导体（或一缝被子的针）上，在尖端前放置一支点燃的蜡烛（靠近！）。若火焰被吹离尖端，则此极带正电（另一极带负电）；若火焰倒向尖端，则此极带负电（另一极带正电）。这种方法不很可靠。

（2）先给一验电器带上少量的已知电荷，金箔张角不能太大，然后将此验电器慢慢从正面靠近方法（1）中所讲的锥形导体的尖端（或某一个电极）。若验电器金箔张角开始逐渐增大，那么，此电极与验电器所带的电荷同种，反之异种。

（3）将测电笔中的氖管固定在塑料筷子的一端，并在氖管的一端焊一长约 2cm 的导线作为尖端。手握塑料筷子的另一端，让导体尖端接近（或接触）起电机的一个电极。如果氖管的辉光发生在靠近手的一端，说明此电极是正极，反之是负极。（4）起电机能正常起电后，暂停摇动，充分放电，断开 J_1，J_2 间的连接片，然后，将两放电球移到 1cm 左右，慢速摇动起电机，使其发生火花放电。发射火花的球为正电极，另一球为负电极。为使起电机容易起电，且给定两电极的极性，可采用下述方法。将一经摩擦后带电的塑料薄膜靠近起电机前圆盘，并置于如图 5－11 中所示的金属片 a_1 之前。这样，电极 T_1 带负电、电极 T_2 带上正电。其原理是：在常温下用手或纸、布摩擦后的塑料薄膜带负电。当塑料薄膜放在 a_3 前面后，它要对 a_3 和 b_1 产生感应作用。感应的结果使 b_1 向着塑料膜的一面带正电，而等量的负电荷通过导杆 F_1，F_2 流入大地。随着圆盘的转动，b_1 与 F_1 脱离，且保留了感应出的正电荷。当 b_1 转到 b_3 的位置时，它即对 a_1 感应……使 a_1 带负电……最后，S_2 收集了正电荷，S_1 收集了负电荷……这种方法是很有效的。

验电器

验电器是静电实验的必备仪器。现在常用的验电器一般由：1.外壳；2.绝缘塞；3.导棒；4.按在导棒下端的箔片（或指针）等部件组成，如图 5－12 所示。

用验电器进行静电实验或测量，主要通过验电器箔片张角的变化来显示实验或测量结果。由于对于验电器工作原理的认识不同，以至人们对于验电器到底是怎样的测量仪器也有着不同的见解。对此，可归结为两种意见。

（1）验电器箔片上带有电荷之后，由于受到导棒下端同种电荷的斥力，以及外壳感应电荷的吸引而克服重力张开一定的角度。箔片上电的多少决定了箔片所受静电力的大小，也就决定了箔片张角的大小，而箔片上电荷的数量又与传给箔片电荷的带电体所带电荷的数量有关，所以，验电器是量电量的仪器。

（2）验电器箔片和外壳之间存在电势差时，箔片和外壳之间必存在电场。金箔同外壳的内表面之间也就有了电力线，这电荷在静电力作用下使

箔片与导棒间张开一个角度。由于箔片与外壳之间的电势差决定了电场，电场决定了箔片上的电荷密度，箔片上的电荷密度又决定了箔片上单位面积所受的电场力，这个电场力又决定了张角的大小，所以，验电器是量电势差的仪器。

笔者认为这两种说法是等价的。

现在，一种主导意见是，验电器是一个电势差计，是量电势差的，而不是量电量的。这种观点有下述两个实验作为基础①。

（1）如图 3－13（a）所示，先把金箔验电器放在石蜡垫块上，使验电器跟地绝缘，再用带电棒使验电器带电，金箔张开。

然后，用放电叉将验电器金属球与外壳接通，如图 3－13（b），使验电器导棒、箔片与外壳等电势，箔片立即下落并拢。这时验电器上原电荷显然并未漏掉，只是由于外壳与箔片之间没有了电势差，所以箔片不会张开。

最后，移开放电叉，用手指接触验电器的金属球（或接触验电器的外壳），使其接地，结果验电器导棒和外壳之间又产生电势差，这时验电器箔片又重新张开，如图 3—13（c）。可见验电器导棒与外壳间存在电势差时，箔片才会张开，箔片的张角大小与电势差大小有关，从观察的验电器张角的大小就可判断出带电导体电势的高低。

笔者认为，这个实验只能说明箔片的张开仅决定于箔片上电荷的多少。当然，只有当验电器导棒与外壳之间存在电势差时，箔片上才可能有电荷。箔片张角的大小也确实反映了验电器导棒与外壳之间的电势差。但是，这个电势差是否能代表带电导体（在接触验电器前）电势（对地电势差）的高低呢？这个实验并没有说明。

（2）用静电感应的方法，使两个大小不同的球带上等量（异种）电荷，然后将它们分别与验电器接触。可见，箔片两次的张角是不同的。这说明，验电器并不能比较电量的多少。因此，验电器是量电势差的，而不是量电量的。

我们知道，测量，从某种意义上讲就是一种比较。如果说验电器是测量电势差的，那么，它一定能比较出两个导体对地电势差的大小；如果验电器是测量电量的，那么，它一定能比较出两个导体带电量的多少。这个实验说明验电器不能比较电量的多少，但由此就说验电器能比较电势差的大小，是量电势差的仪器似乎也过于草率。对此请看下述实验。

用接触带电的方法，给两个互相接触的、大小又不同的导体球带电之后，再将两球分开。这时，两个球上的电量不等（大球多，小球少），但电势（或对地电势差）却是相等的。然后，将两个球分别与验电器导棒接触，可见，箔片的两次张角不同。大球接触时箔片张角大，小球接触时箔片张角小。由此是否可以得到验电器并不能比较电势的高低，而只能比较电量多少的结论呢？

由上面的分析和实验事实可见，无论是认为验电器是量电量的，还是认为验电器是量电势差的，都会遇到与各自的观点相矛盾的实验事实。验电器到底是量电势差的仪器，还是量电量的仪器呢？对于这个问题，笔者的看法是：

（1）验电器既能量电势差，又能量电量，其测量值的准确度由被测导体和验电器的电容以及其它们的接触情况决定。

（2）验电器能比较两电容相同的导体的电势的大小或电量的多少，但不一定能比较两电容不同的导体的电势的大小或电量的多少。

（3）箔片张角的大小是否能说明被测导体所带电量的多少，或被测导体电势的大小，需根据具体情况而定。

（1）、（2）两点是很显然的，对于第（3）点[实际上（1）（2）两点包含在第（3）点内]，可以由下面的分析说明。

假如有两个带电导体 S_1，S_2，它们的电容、电量和电势有如下关系：

$$\begin{cases} C_1 = nC_2 \\ Q_1 = \alpha Q_2 \\ U_1 = \beta U_2 \end{cases} \qquad (1)$$

而验电器 E 的电容 C_0 与 C_1，C_2 有如下关系：

$$C_0 = \frac{1}{m}C_2 = \frac{1}{nm}C_1 \qquad (2)$$

将 S_1、S_2 分别与 E 接触之后，E 上的电势和电量①分别为：

$$\begin{cases} U_{10} = \dfrac{nm}{nm+1}U_1 = \dfrac{nm}{nm+1}\beta U_2 \\ Q_{10} = \dfrac{nm}{nm+1}C_0U_1 = \dfrac{Q_1}{nm+1} = \dfrac{\alpha Q_2}{nm+1} \end{cases} \qquad (3)$$

和

$$\begin{cases} U_{20} = \dfrac{m}{m+1}U_2 \\ Q_{20} = \dfrac{m}{m+1}C_0U_2 = \dfrac{Q_2}{m+1} \end{cases} \qquad (4)$$

下面我们分几种情况讨论。

（A）如果无法比较电量（即箔片张角相等），即：

$$Q_{10}=Q_{20}$$

那么有：

$$\alpha = \frac{nm+1}{m+1}$$

又

$$\alpha = n\beta$$

所以

$$U_{10} = \frac{nm}{nm+1}\beta U_2 = U_{20}$$

即对测量前两带电导体电势的大小也无法比较。

（B）如果 $n>1$，$\alpha>1$，$\beta>1$，即：

$$C_1>C_2，Q_1>Q_2，U_1>U_2$$

那么必有：$U_{10}>U_{20}$，$Q_{10}>Q_{20}$

（C）如果 $n>1$，$\alpha>1$，$\beta<1$ 即：

$$C_1>C_2，Q_1>Q_2，U_1<U_2$$

那么由（3）、（4）式可得，当 $\beta>\frac{mn+1}{n(m+1)}$ 时，

$$U_{10}>U_{20}，Q_{10}>Q_{20}$$

即能比较出电量的多少，但不能比较出电势差的大小。

当 $\beta<\frac{mn+1}{n(m+1)}$ 时，

$$U_{10}<U_{20}，Q_{10}<Q_{20}$$

即能比较出电势差的大小，但不能比较出电量的多少。

（D）如果 $n>1$，$\alpha<1$，$\beta>1$，即：

$$C_1>C_2，Q_1<Q_2，U_1>U_2$$

这种情况不存在。

（E）如果 $n<1$，$\alpha>1$，$\beta>1$，即：

$$C_1<C_2，Q_1>Q_2，U_1>U_2$$

结果同（C）。

（F）如果 $n<1$，$\alpha<1$，$\beta>1$，即：

$$C_1<C_2，Q_1<Q_2，U_1>U_2$$

结果 $n<1$，$\alpha<1$，$\beta<1$

（G）如果 $n<1$，$\alpha<1$，$\beta<1$，即：

$$C_1>C_2，Q_1<Q_2，U_1<U_2$$

结果同（C）。

（H）如果 $n=1$，$\alpha=1$，$\beta=1$，即：

$$C_1=C_2，Q_1=Q_2，U_1=U_2$$

则必有：$U_{10}=U_{20}$，$Q_{10}=Q_{20}$

由上述分析可见，箔片张角的大小，如能反映电势的大小不一定能反映电量多少；如能反映电量的多少，不一定能反映电势的大小。

二　了解仪器的制作过程

尽可能了解仪器的制作过程，对于弄清仪器结构、原理，对于正确操作、正确使用仪器，对于修理仪器以及仿制、改进、自制仪器都是相当有益的。

玻璃液体温度计

物理实验中常用的玻璃液体温度计有：水银温度计、酒精温度计、煤

油温度计。它们都是根据充灌温度计的液体受热膨胀、遇冷收缩的原理制造的。温度计的测温范围，由所充液体的沸点和凝固点，以及所用的玻璃的软化温度所决定。用一般玻璃制造的温度计的测温上限不超过 360℃，用特种玻璃制作的温度计可达 1200℃。

对于温度计，不少教师对下述两个问题不甚了解：（1）温度计液柱上面的空间是否与大气相通？是否是真空？（2）在常压下，酒精的沸点只有 78.4℃，为什么酒精温度计还能测量到 100℃？要弄清上述两个问题，需对常用温度计的制作情况有所了解。下面对几种常用温度计制作情况作一简单介绍。

1．水银温度计

水银的凝固点是-38.87℃，在一个大气压下的沸点是 356.7℃。为了防止水银被氧化和提高水银的沸点，从而提高水银的测温上限，制造时将温度计中的空气抽出，充以惰性气体，如氦气、氩气或氮气等。若充入氮气的压强为 2.5×10^6Pa，则测温上限是 550℃；若充入氮气的压强为 7×10^6Pa，则测温上限是 750℃。水银温度计的测量范围可达-30℃～+1200℃。

2．酒精温度计（酒精常染成蓝色）

酒精的凝固点是-112℃，在 1.01×10^5Pa 下的沸点是 78.4℃。仪表厂制造酒精温度计时，设法在测温液柱上增压 3×10^5Pa 左右来提高酒精的沸点。酒精温度计的测量范围是-100℃～+100℃。

3．煤油温度计（煤油常染成红色）

煤油为有机混合物。在石油分馏产品中分子所含碳原于数 C_{11}～C_{16} 的统称为煤油。所以，煤油有各种不同牌号，其沸点、凝固点均不同。在《化工手册》中可查得煤油的沸点和凝固点：在 1.01×10^5Pa 下，沸点为 110℃～325℃、凝固点＜-10℃，根据常州、温州等温度计厂的数据，煤油温度计的测温范围是-50℃～+100℃。煤油里配入适量的烛红染成了红色。煤油温度计的液柱上方是不充气加压的。

三　了解仪器的技术参数和一般用途

1．了解仪器的技术参数

仪器的技术参数决定了仪器的使用范围以及使用中的许多问题（如仪器的选择、误差来源及大小等等）。因此，在使用仪器前应先了解一下仪器的技术参数。如，用天平时至少应先了解天平的最大称量、感量、游码标尺误差等几个参数。再如，用电表时，至少应先了解电表的表头结构形式（如磁电式、电磁式等），电表的级别，测量的范围（灵敏度）、放置形式等。如果这些不甚了解，我们就不能很好地使用仪器，以及不能对测量的数据作正确的解释。

例如，用一只 2.5 级、测量范围为 0～3V 的电压表来测量电压，我们

可以说用这个表测出的 3V 以下的电压值，可能出现的最大相对误差在 2.5%以上。如果一次测量值是 2V，那么，其电压的真实值可能在（2±3）×2.5%V 范围内。

了解仪器的技术参数，有时还有利于我们改进实验方法，提高实验结果的准确性。

天平

天平有一项技术参数为“不等臂性”。不等臂性是指因天平横梁两臂不等所引起的称量误差最大值（常以“毫克”为单位）。这个参数常会因天平的使用次数以及使用情况、使用时间的长短和保养等因素的影响而有所变化。因此，单看出厂时的技术参数也未必正确（除非在每次使用前再重新测量一下，但又不经济）。对此，人们为消除这一误差而设计了下述方法：

（1）复称法：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，于是，更为精确的测量值 $M=\sqrt{M_1 \cdot M_2}$。

（2）替代法：左盘载物，右盘加干砂，使天平平衡，拿起左盘被称物，代之以砝码，再使天平平衡（右盘的砂子不能动），砝码所示值即被称物质量。

（3）减码法：右盘放一定值的砝码（砝码质量应大于被称物），左盘放入小砝码，使天平平稳。将被称物放在左盘中，减少左盘中的小砝码，使天平恢复平衡，减少的砝码总量即被称物质量。

2．了解仪器的一般用途

了解仪器的一般用途，有利于更有效地发挥仪器的作用。仪器的名称，有些是根据仪器的原理和作用而定的（如：电磁打点计时器、数字计时器）；有些是根据仪器所用材料和形状而定的（如：弹簧秤、杆秤）；有些是根据仪器的某些用途而定的（如：验电器）。往往有这样的情况，仪器的用途并不是在制成仪器时就已经都被人们全面了解，而是在使用的过程中被人们逐步认识的。

验电器的用途

早在 16 世纪，英国的吉尔伯特在系统地观察静电现象时，制作了第一只实验用的验电器。他用一根极细的金属棒，中心支承在支座上，使棒可以自由转动。当摩擦后的带电物体靠近金属棒时，金属棒会被吸引而向带电体转过来。由此可以探测物体是否带电。

18 世纪 30 年代，法国的杜费为了对电现象做深入一步的研究，他在吉尔伯特工作的基础上，对验电器作了改进，用金箔代替了金属细棒。同时，他还设计了一种仪器，在带电时它的线能散开。

在以后的几十年中，人们设计、使用了各种各样的验电器（或静电计），其中最出名的是 1786 年 A．贝内特的金箔验电器——我们现在常用的验电

器。

可见，当初人们把用静电方法检验物体是否带电的仪器称为“验电器”。验电器的作用也仅仅局限于检验物体是否带电。随着人们对静电现象的研究以及对验电器的大量使用和研究，验电器的用途已远不止上述的一种。就现在来看，我认为验电器的用途大致有以下六个方面。

（1）检验物体是否带电。将待检验物体靠近或接触验电器的金属球，根据金箔是否张开可判断该物体是否带电。

（2）辨别电荷的种类。先使金箔带上某种已知电荷（例如正电），箔片张角宜在 40°～60°左右。再将待测带电体渐渐移近验电器的金属球，根据金箔张角的增减判断带电体电荷的正负。

（3）检验物体的绝缘性。先使验电器带电，金箔张开。然后用待测物体去接触验电器的金属球，若金箔张角不变，表示该物体绝缘性很好；若金箔立即下落，表示该物体的绝缘性很差；若金箔缓慢落下，表示该种物体的绝缘性不佳。

（4）估测导体的电势。这主要指三个方面内容：

①对于有金箔或指针张角对应电压刻度的验电器（或静电计），可用其估测高压电源的开路电压；

②比较电容相同的带电导体的电势的大小；

③估计带电导体的对地电势差，估计精度由带电导体和验电器的几何形状及接触情况所决定。

（5）估测导体的带电量。这也主要指三个方面的内容：

①估计带电导体的电量，估计精度由带电导体和验电器的几何形状及接触情况而定；

②比较电容相同的带电导体带电量的多少；

③将验电器导棒与法拉第冰筒连接后，可测量一定形状的带电导体的带电量的多少。

（6）比较导体电容的大小。

方法是：让两导体带等量的电荷或让两导体电势相同，然后，让它们分别与不带电的验电器接触，根据两次金箔张角大小的不同，可判断两导体电容的大小。

四　了解仪器的调整方法与分析其作用和原理

仪器在实验使用前应该处于最佳工作状态。要判别是否处于最佳工作状态，需作检验。要使仪器回复到最佳工作状态，就需调整。检验和调整仪器不仅需要了解其方法，而且要分析其作用和原理，知其所以然。对此，必须引起重视。

电磁打点计时器的检验与调整

电磁打点计时器是中学力学实验中的常用仪器。J0230 型电磁打点器的构造如图 5－14 所示。胶木底板上有一个线圈 1，线圈两端与电源接线柱 8 相接。2 是永久磁钢上的两块磁极片。3 是钢质振动片，它在两磁极片的间隙中间并穿过线圈 1，其一端由调整螺丝 9 固定在底板小台上，另一端悬着，悬端装有打点针 6。17.5㎜ 的纸带 12 穿过限位孔紧贴打点基板。圆形复写纸 11 装在螺钉 10 上，压在纸带上。压纸框架 7 压在复写纸上。

打点器线圈接上 6V 交流电源后，成为一个通电螺线管，产生交变磁场，并使振动片磁化为一个薄的磁性交变的条形磁铁。振动片因此受到永久磁铁磁场的交变力作用而做周期振动。当振动片悬端向打点基极运动，使打点针与基板上的复写纸撞击后，在纸带上就打下了一个点。通入的交流电变化一个周期，打点器就打下了一个点。J0203 型打点器用 6V 交流市电，电源频率为 f_0=50Hz，即 T_0=0.02s。用这种打点器打出的实验纸带，除起始点以外，每相邻两点间的时间间隔为 0.02s。

电磁打点器工作状态是否正常，通常从三个方面来评价：打点频率的稳定性（等时性）、打点质量、打点器给纸带的阻力的大小。电磁打点器的检验和调整也可以从这三个方面进行。

1．电磁打点器打点频率稳定性的检验

评价打点器工作是否正常的三个方面是互有联系、互有影响的，但打点等时性差对纸带质量、实验结果的影响最大。打点等时性可以根据匀变速直线运动规律和自由落体运动规律来检验①也可以用下述方法检验。

（1）用示波器检验。

检验装置如图 5-15 所示。打点器振动片固定端和打点基板分别与示波器“Y 输入”和“地”端连接；同时，通过 R_1，R_2（可取 R_1=100kΩ，R_2=10kΩ）的分压电路，使部分正弦交流电压在示波器“Y”、“地”两输入端（如果不用分压电路，由于交流市电的感应，“Y 输入”端也有一定的感应电压，屏幕上也能显示出 50Hz 市电的正弦电压波形；但由于各种干扰，正弦波形常较差，有时会妨碍检验观察）。调节示波器，使屏幕上呈现 1 个周期（或 1～2 个周期）的稳定的电压波形。拿走纸带和复写纸，使打点针接触基板，“Y 输入”和“地”两端短路，则屏幕上仅出现一条扫描迹线。

打点器工作时，打点针瞬时接触基板，“Y 输入”端的电压也瞬时为零，则示波器屏幕上的正弦波形上就出现一个缺口，缺口的相位正好对应每个周期内打点针接触基板的时刻（由于线圈的电感和磁滞等作用，打点时刻不是在波形曲线的极大和极小位置），如图 5－16 所示。由于打点针瞬时接触基板，缺口常不很清楚，但能清楚看到对应于“缺口”的在“扫描迹线”上的一个点，因此，可由这“点”的位置来判断“缺口”的位置。

如果打点周期稳定，正弦波形上的缺口位置也稳定。如果打点周期不稳定，则波形上缺口位置也不稳定（如跳跃变化），或一个周期的正弦波形内缺口的数目多于一个。缺口的个数越多、缺口位置变化的幅度越大，

打点周期的等时性就越差。除如图 5－15 所示装置外，还可用如图 5－17 所示装置：从“Y 输入”、“地”端直接输入 50Hz 低频信号。在这里，如果打点周期稳定，那么，当打点频率（市电频率）等于 50Hz 时，缺口稳定不动；当打点频率小于或大于 50Hz 时，缺口将向左或向右匀速地移动（但一个周期内仍为一个缺口，不影响对打点周期稳定性的判断）；两频率相差愈大，移动速度也愈大。如果低频信号源频率微调有示数，那么，可通过微调使缺口稳定，并由此判断打点频率的大小，进而判断当打点周期仍为 $\frac{1}{50}$ 秒算时所引起的系统误差。如果打点周期不稳定，则波形上缺口位置也将跳跃变化或一个周期内缺口数目多于一个。

（2）由视、听觉判断。

这种方法在很大程度上依赖于经验。如果振动片悬端振动幅度较大，如果打点针直接打在打点基板上的声音很清脆、恒定，没有强弱或音调的变化，没有“沉重感”，一般来说，打点等时性较好。这种方法并不十分可靠，但能作出快捷的判断。

2．电磁打点器点频率稳定性的调整

（1）造成打点频率不稳定的一些原因。

我们知道，振动片除了受到一个永久磁铁所给的随电源的交变周期而周期性变化的磁力作用外，还受到一个打点基板所给的周期性的“瞬时”反作用力。只有当这两个力的合力是与交变磁力相似的交变力或者是一个变化周期稳定的周期性变化的力时，振动片的振动频率才会稳定才会与电源频率相同。要做到这一点就要求打点器各部件的参数，如永久磁钢的磁场强度、两磁极的间距、线圈匝数、振动片的弹性系数和长度等等，都要很好地匹配。但是，由于各种原因，也可能造成打点频率不稳定：

①一些固定部件移位，特别是由于安装不好或固定螺钉 9 松动而使振动片“移位”。

②振动片的固有频率发生了变化或与电源频率不一致了。固有频率的变化主要是有效振动长度的变化。

③打点针过长或打歪、损坏等。

一般情况下，调整打点器使之打点频率稳定主要是要解决上述问题。

（2）打点频率的调整。

在固定部件完好、位置正常、打点针无损的情况下，调整打点频率主要是调整振动片的固有振动频率和打点针长度（即打点针与基板的间距）。一般来说，振动片的弹性系数，即振动片上冲压的 V 形槽最好不要改变，因此，调整振动片的固有频率，主要是调整振动片的有效振动长度。

比较简便的调整方法是：

①移走纸带和复写纸，缩短打点针的长度；

②松开固定螺钉 9，微微改变振动片的长度（振动片缩短 1mm，其固有频率约增加 1Hz），旋紧螺钉 9，重复这一步骤，使振动片悬端振动幅度最

大为止；

③逐步增大打点针长度，并作适当的比较、微调，使打点针打在基板上的声音很清脆。

固定螺钉 9 的松紧程度会影响有效振动长度，因此，每次调试时都应把它旋紧。但是，有时为了快捷地调整打点频率，上述第②步可直接通过调节固定螺钉 9 的松紧程度而使振动片振幅最大。固定螺钉 9 共有两个，调节时应保持离打点针远的一个螺钉旋紧不动而改变另一个螺钉的松紧。

3．打点质量的检验及调整

打点质量的好坏直接影响对纸带数据的测量及测量误差。按打点器的技术要求，当纸带的移动速度≤3m／s 时，纸带上点子的长度不允许超过 0.3mm，点需清晰可辨。打出的点子质量差通常主要表现在五个方面：①点子拖长（称拖尾）；②靠得很近的双点（称重点）；③漏点；④点过粗；⑤点过淡。

在打点器打点频率已经调整好的情况下，出现①、②的原因主要是打点针长了些（与基板近了些），只需将打点针稍微缩短些。如果在调整打点频率时用示波器监视，只要使 X 增益增大些，从波形上就可发现，在调整打点频率时就可克服。出现③的原因主要是打点针短了些，只要将打点针稍微放长些。出现④的原因主要是打点针太钝，应稍磨尖些。出现⑤的原因主要是打点针短了些与复写纸复印效果差，应将打点针稍微放长些，或将复写纸移动一下或换新的复写纸。

4．打点阻力大小的检验和调整

按打点器的技术要求，当打点器正常工作时，纸带通过打点器时受到的平均阻力应不大于 3 克力。检验纸带所受的阻力可用与验证牛顿第二定律相似的实验方法或用落体法测重力加速度的实验结果来判断。

打点频率调整好后，如果纸带受到的阻力太大，一般情况下主要有两个原因：①压纸框架 7 压得太紧；②打点针尖过于尖锐。对于①可调节框架上的螺钉，使之压得松一些，只要复写纸能随着纸带的移动而微微转动就行；对于②可用细沙纸磨一下针尖（但不要使针尖太钝）。

五　分析仪器的结构原理与改进和自制仪器

许多仪器，大多是经过使用、不断改进，逐步完善的。改进仪器、仿制仪器必须在分析了解仪器的结构和工作原理的基础上进行的。

1．改进方案要有理有据

对于仪器中进行改进的部分，要能说出改进的道理。这些部分在改进前有何优缺点、改进后有何优缺点、综合起来看改进后有何好处等等。不要只看到改进前的缺点和改进后的优点，也不要认为对仪器的任何改动都是好的、都是“改进”。

气体受热膨胀

初中物理课本①介绍用如图 5－18 所示的仪器来演示气体受热膨胀的现象。

图中 1 为烧瓶，2 为直角玻璃管，3 为橡皮塞，4 为小水柱。用手握着烧瓶，使烧瓶里的空气受热，温度升高，空气的体积要膨胀，可见玻璃管中的小水柱向右移动。

这个实验中，空气受热后体积是否膨胀，是通过在直角玻璃管中的水柱的移动来显示的。显示部件用直角玻璃管的优点主要是使显示部分较灵敏。因为在水平玻璃管中，水柱容易流动（玻璃管内壁给水柱的阻力可忽略不计），水柱两端只要有一个较小的压力差，就能使水柱移动。但是，这一显示部件也有缺点。

①实验前需保持水平玻璃管处于水平状态，否则，水柱会“自动”移动，甚至会流出管外或流入瓶内，因此，实验前的调整较困难。

②实验中又不能破坏这种平衡，否则，难以向学生说清水柱是由于瓶内空气体积膨胀而移动的。

③封水柱的操作不容易掌握好。

④空气体积膨胀推动水柱向右移动，很容易将水柱推出管外。这样再演示（课本上所讲的）手离开烧瓶，瓶里空气温度降低，体积收缩，水柱向左移动的现象时，需重新灌封水柱，麻烦。由上述可见，这显示部件——直角玻璃管+小水柱——不够完善，有改进的必要。怎样改进呢？

一般说来，改进仪器有下述两条基本思路：

（1）从原仪器结构出发，在原仪器结构的基础上“取长补短”，哪不满意改哪。如将直角玻璃管改成如图 5－19 中所示的直角曲玻璃管。这样，它既保持了原直角玻璃管的显示部分较灵敏的优点，又克服了直角玻璃管的①、③、④三个缺点[为什么克服不了第②个缺点？]。虽然弯曲玻璃管麻烦一些，但也是容易办到的。总的来看，完全可以认为图 5－19 所示的仪器比图 5－18 所示仪器改进了。

（2）从实验要求和工作原理出发，另想办法，设计新的结构。图 5－18 所示的仪器中的小水柱的作用，一方面密封烧瓶的空气，另一方面显示密封空气的膨胀和收缩（参照标记）。水柱处于水平状态主要是为了将水柱重力的影响降低到可忽略的程度。如果水柱不处于水平状态，充其量由于重力的影响而降低显示部分的灵敏度。但瓶内空气变热后使水往外移动是必然的，至多手握的时间长一些，水柱移动的速度慢一些。因此，我们可以将直角玻璃管改成竖直玻璃管，如图 5－20 所示。实验表明这个仪器的灵敏度仍能令人满意，同时也克服了图 5－18 仪器的①、②两个缺点，但封水柱的操作仍不太容易掌握好，而且，若玻璃管不太长，空气受热膨胀仍容易将水柱推出玻璃管外，以及空气受冷收缩时将水柱吸入瓶内。总的来看，仍可以认为图 5－20 所示的仪器优于图 5－18 所示的仪器。

上述两条“基本思路”在实际研究中常需结合起来考虑或交叉考虑。如图 5－20 所示的仪器虽然在结构与图 5-18 所示的仪器有不同,更进了一步，但它还不够完善。我们可在图 5－20 基础上，再进一步完善。如将竖直玻璃管改为直、曲玻璃管，如图 5－21 所示。这样，就保持了图 5－20 仪器的优点，又克服了其封水柱操作不容易掌握好的缺点。

不管用哪条思路，考虑问题的着眼点不同，思维的结果（改进的方式、部件和效果等）也可能不同。例如，如果只要能让学生看到水柱向外移动或上升（以此说明空气体积增大）而不必一定要使这个过程较为迅速（即显示部件很灵敏）的话，那么，就可改为如图 5－22 所示的仪器。这个仪器不存在图 5－18 所示仪器的任何缺点，操作简单、方便、效果明显，唯一的不足是向初三学生解释现象时，比前面几个仪器要多说一、两句话。

上面，我们对图 5－18 所示仪器提出了四个改进方案。由此可见，如果一个仪器不够完善，可以改进的话，那么，改进方案往往有好多个。因此，我们不能满于提出一个改进方案，而应该尽可能朝两个基本思维方向，从不同的角度反复考虑，尽可能多地提出改进方案，从而分析、比较选出最佳的或最易办到的改进方案。

2．改进方案必须切实可行

对于仿制仪器要能够就结构、选材、使用等方面说出道理。选材必须从原仪器的设计思想和工作原理出发，用仪器对所需材料的要求来衡量。所选用的材料不必一定要与原仪器所用材料相同，只要能满足仪器结构对材料的要求就行了。

惯性演示器

厂制惯性演示器如图 5－23 所示。它由：1．底座；2．按在底座上的顶端有一小坑的立柱；3．弹片组成。演示时，在立柱顶端放一块薄木板或硬塑料衬板或硬纸片 4.在 4 上放一钢球 5.一手按住底板,一手用弹片将塑料衬板弹出。可见，钢球并没有跟塑料衬板飞出，而是停留在立柱顶端的小坑里。由此可说明惯性现象。

这个仪器的结构很简单，各部件的作用是：底座 1 用于固定立柱，使其在实验中不易动，不至于在弹片将衬板弹出时倒下或移动位置，从而接不住钢球；固定弹片，便于一只手操作弹片。立柱 2 用于支持塑料衬板、钢球，以及接住钢球。弹片 3 只要能迅速有效地将衬板弹出，又不至于打在立柱上，影响立柱的位置就行了。

从上面对各部件作用的分析来看，这个仪器中最主要的部件是立柱。必须确保立柱稳定不动。要做到这一点有两个办法：①使其与底座固定在一起（在实验中保持底座不动）；②是增大立柱的质量，这样就不至于在衬板飞出时使立柱移位。如果按后一个办法做，那么，底座就完全没有必要（因为我们可以用两只手来操作弹片）。

如何仿制这个仪器呢？首先选择制作立柱。如果按上面后一个办法

做，我们用一个装了大半杯水的玻璃杯作为立柱就行了（为什么？）。弹片可用一根钢锯条（或弹性较好的薄竹片）代替。这样，我们就把这个仪器改成了装置。实验时将玻璃杯放在桌子（作为底座）边上，如图 5-24 所示，在杯子上面放一小块塑料衬板（注意衬板与锯条的位置），衬板上放一个鸡蛋（代替钢球，鸡蛋可先烧熟）。一手将锯条按在桌子边缘，另一手用锯条上端将衬板弹出。可见，鸡蛋掉入玻璃杯水中。

这里，用鸡蛋代替钢球，既能像钢球那样确保掉入杯中，又不至于打破玻璃杯，且使实验更为生动，更吸引学生（因为许多初中学生担心弹片打衬板会把鸡蛋碰下来打碎）。

第三节　分析和了解材料的特性和用途

无论是实验装置、实验仪器所用的材料，还是实验中所用的材料，选用得是否适当，对于装置、仪器的性能，对于实验结果都会产生很大的影响。因此，我们应该对材料的特性和用途有所了解，并进行必要的分析研究。

一　了解材料的特性和作用及合理应用

分析了解材料特性，扬长避短、合理应用，在实验研究的许多方面都是很必要的。

绝缘材料的选用

橡胶、塑料、有机玻璃、石蜡是现在静电实验中常用的绝缘材料。就性能来讲，橡胶、塑料、有机玻璃表面易附着灰尘和水气，在空气湿度较大的天气里，其缘绝性能常变得很差，以致实验无法进行。但它们有一定的机械强度，气温较高时不至于变软、变形。石蜡是水的不浸润物体，水珠在石蜡表面不会连成片，即使在空气湿度较大的天气里，仍能保持良好的绝缘性能。但石蜡的机械强度较差，气温较高时又易变形。

为保持塑料、有机玻璃等绝缘材料的绝缘性能，通常采用擦净、烘（吹）干等方法，以克服其性能上的缺点。但这样麻烦费时，有时也不太有效。综合上述绝缘材料性能上的优点，就为我们提供了一个保护绝缘材料绝缘性能的有效办法：将用橡胶、塑料、有机玻璃等做的支柱、垫子、塞子、手柄等的表面洗净、晾干，然后在其表面浇一层干净的熔化了的石蜡，待石蜡重新凝固后即可使用。经这样处理后的绝缘材料，既有一定的机械强度，又不怕湿，实验效果相当好。

二　扩大材料的应用范围

材料的用途，可分为常规用途和特殊用途。所谓常规用途就是常见的用途，它最经济实惠，自然恰当。如纸的常规用途之一是用于写字。当然，能够写字的还有许多物品，如布、竹片、树皮等，但用纸写字最经济，最恰当。而用布、竹布等写字在现在的情况下，就显得不经济，不自然，故不常用或基本不用了。布、竹片能用于写字，这不是布和竹片的常规用途，而是特殊用途。特殊用途通常在不得已的情况才利用。

在实验研究中，扩大材料的应用范围，主要是利用常规用途，使其材料尽可能在多个实验、在不同的实验情境中发挥作用。对此，通常有两种形式：（1）从其一、两个实验的研究中了解材料特性，然后考虑利用材料的性能能否应用于其他实验；（2）直接了解材料特性后，考虑它的其他“用

武之地”。

用橡皮筋验证胡克定律的实验

实验装置如图 5-25 所示。取 4 根粗细相同的橡皮筋，其中 3 根等长，另一根的长度只有前面的一半，将它们按图 5-25 挂着；在每根下端扎线的地方各栓一条红色塑料签，在支架背面衬贴的白纸上用墨笔或黑纸标签标出 3 个红色塑料签的原始位置，及挂了 50g、100g 砝码的位置。这个实验说明：弹性体的伸长量△l 与外力 F 成正比，同原长 L 成正比，同横截面积 S 成反比。如果引入一个比例常数 E，就可以写成公式：

$$\triangle l = \frac{FL}{SE}$$

这个装置中主要的器材是橡皮筋。橡皮筋容易拉伸，显示拉力张力存在或比较拉力大小的现象较简便明显。这是它的优点。但它的伸长量与外力的关系是一条曲线；如图 5-26 所示，这是它的缺点。因此，在上述实验中，要说明伸长量与外力成正比，外力的大小应在曲线的近似线性范围 AB 内。由于橡皮筋有这样的特点，而且，它取材容易，因此，我们可以设法将它应用于显示拉力、张力存在和方向，以及比较拉力大小的实验中，以起到结构简单、花钱少、效果又明显的作用。分力可以大于合力的实验

实验装置如图 5-27 所示。取 3 根等长（如 10～12cm 的橡皮筋 a，b，c，每根橡皮筋一端都扎住一小钩，另一端连接起来，将 a，b 的小钩挂在支架的 A 钩上，c 的下端挂一重物 W。现在研究 O 点，O 点受到 3 个力，即橡皮筋 a，b，c 的拉力。这些拉力的大小与各橡皮筋的伸长有关 C 的拉力的大小与各橡皮筋的伸长有关。c 的拉力可认为就等于 W 的重力 G，它可看做是“合力”，a，b 中拉力可看做是“分力”。准备好一把红白间隔刻度的“尺”（演示时需要，让学生动手研究时只需一般刻度尺）。

实验时，依次将 b 上的小钩挂在 A，B，…，D 上，每次都量出 a，b，c 的伸长量，并以此来比较合力与分力的大小。实验表明，c 大。由此说明在合力一定的条件下，相等的两分力随其夹角的增大而增大，而且分力的大小可以超过合力。

若指导学生以合力公式$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2\cos\theta}$推得a，b的拉力$f=F/\sqrt{1+\cos\theta}$，即可通过实验证明，当$\theta>120°$时，$f>F$，即a，b的伸长量都大于c的伸长量。

撑杆（二力杆）中受力方向的演示

在如图 5-28 所示的撑杆中，挂了一个重物 W 后，如果撑杆的 A，B，C 端不是固定死的，那么，我们总认为两杆受力的方向如图中 F_1，F_2所示，即 BC 杆受的是压力，AC 杆受的是拉力。对此可用实验来说明。

实验装置 5-29 所示。将两杆 A，B 端点。通过橡皮筋与支柱连接起来（A，B 端固定在橡皮筋中点，橡皮筋两端固定在支柱上）。当 C 点挂上重物以后，从 A，B 处橡皮筋的形变可看出（说明）两杆受力的方向。

第四节　实验装置和实验器材的选择

实验装置、器材选择的恰当与否，直接影响实验结果（效果）的好坏，也影响实验教学效果的好坏。总的来说，选择实验装置和实验器材的主要依据是两个方面，即物理原理和教学要求。另外，还应该尽可能做到取材容易、经济实惠。

一　实验器材的选择

选择器材时，还应该注意下面两点：

1．器材的特性，如机械强度、尺寸大小，物理和化学等方面的性能参数

2．加工方便、经久耐用

稳度的演示

高中物理课本有这样一个小实验，如图 5-30 所示。D 为水平桌面，A 为长方形木块，B 为小重锤，C 为木板。将木板的一端慢慢抬起，观察重锤在什么位置时木块才会倾倒①。

按教学要求，希望学生能看到：当板倾斜至重垂线的延长线超出木块的支面之外时，木块即翻倒。但是，并不是任何长方形木块都能使这个实验成功。如果长方形木块选择得不当，木块就有可能在翻倒之前滑出木板。

这是什么原因呢？看图 5-31，木块要翻倒，其α角必满足：

$$a > \mathrm{arctg} \qquad (1)$$

而要使木块不在木板上滑下，又必须满足：

$$\mathrm{tg}\alpha < \mu \qquad (2)$$

式中μ为（最大静摩擦）摩擦系数。将（1）、（2）两式综合起来可以看出，要使木块翻倒而不滑动，必须满足：

$$\frac{b}{a} < \mu \qquad (3)$$

在一般情况下，木和木的滑动摩擦系数在 0.2（纤维互相垂直）～0.4（纤维相互顺着）之间。可见，如果长方形木块的宽长之比大于 4：10，则实验不会成功。因此，在选择木块时应选择“瘦高个”，以满足（3）式，确保实验成功。

二　实验仪器的选择

在选择仪器时，一般还需注意以下几点：

1．仪器尽可能简单、明了、直观例如用惠斯登电桥测电阻的实验，选板式电桥比选用箱式电桥好。一则，直观性好，实验电路的外形与电路图

相似，便于学生进行直觉思维；二则，操作方便（若进行学生分组实验的话），便于研究误差的来源和减少误差的方法。

2．合理选择仪器的精度

（1）所选仪器的精度，需根据具体实验的目的要求来考虑，不可盲目地追求仪器的精度，从教学效果来看，并非仪器越高级越贵重越好。例如，在惠斯登电桥测电阻的实验装置中，检流计就没有必要用在一般实验室中算是高级的光点检流计。一则，实验目的主要在于说明电桥的原理和使用方法，将电阻测到怎样的精度并不是主要的；二则，用光点检流计做演示实验，占用时间过长，而且对精度不高的电桥来说，将使测量过程麻烦（光点不易稳定）。

有时需要仪器较“粗”时，过“精细”反而会给教学带来一些不必要的麻烦。

验证焦耳定律的实验

为验证电流流过导体产生的热量跟电流强度的平方成正比，一般采用这样的装置：在甲、乙两相同的瓶子里装满红色的煤油或水，各放一根电阻丝，阻值必须相等（为 R）。如果有电流通过电阻丝，电流产生的热量就使煤油或水的温度升高，体积膨胀，在玻璃管内上升，如图 5-32 所示。

实验上，甲、乙两个瓶相当于两个液体温度计。煤油在玻璃管中上升的高度，与煤油的温度有关。如果在同样时间里，电流产生的热量越多，煤油在玻璃管中就上升得越高。因此，注意观察玻璃管内煤油上升的情况，就可以比较电流通过这两根电阻丝产生的热量。

接上电源，这时两电阻丝中流过的电流为 1∶2，它们产生的热量应为 1∶4。如何显示这一点呢？一般都给两电阻丝通上相同时间的电，然后由在相同时间内煤油在两玻璃管内上升高度为 1∶4，来说明两瓶煤油（平均）温度的变化为 1∶4，即吸收的热量为 1∶4，由此说明 $Q \propto I^2$。

这里，最主要的是看液体上升的高度之比是否为 1∶4。如果衬着玻璃管的白底黑线条的背景标尺上线条较粗，且间隔不密，而且，玻璃管中煤油上升的距离由鳄鱼钳来标定（即用“粗”的标尺作“粗”的处理），就容易看出 1∶4 的关系。但是，如果标尺上的线条较细，且间隔较密，如用一般毫米刻度尺，而且煤油上升的距离由始末两位置之差来量度，那么，将看到上升高度之比同 1∶4 有一定的误差。

当然，实验中是允许出现一定的误差的，但是，要得到定量或半定量结论时，有误差就必定给教学带来麻烦。若视误差而不顾，学生必然对实验结论不确信；若要去解释出现这些误差的原因，一是可能冲淡“主题”和浪费时间，二是有些原因学生可能不懂，可能越说学生越糊涂。因此，在进行要得到定量或半定量结论的演示实验时，尽可能不要突出误差。有时宁“粗”，而不要过“细”。

（2）所选仪器的准确度，应从有效数字的计算和误差理论统盘考虑，

不要片面追求于某一仪器的精度。

3．所选仪器要保证满足实验条件

实验条件的确定，主要要从物理原理和教学要求两方面考虑。所选仪器必须确保实验条件得到满足。任何只根据装置图随便找些装置图上画出的仪器来做实验的做法是草率的、错误的。

电势差计原理的演示

电势差计的原理①如图 5-33 所示，只要待测电动势 ε_x 和标准电动势 ε_s 都小于电源电动势 ε，那么，当开关 S 打在“1”处时，滑线触点 C 总能均匀的电阻线 AB 上找到一点 C_1，使检流计不偏转。当开关打在“2”处时，滑线触点 C 也总能在 AB 上打到一点 C_2，使检流计指针不偏转。由此可得：

$$\varepsilon_x = \frac{l_2}{l_1}\varepsilon_s$$

（式中 $l_1=AC_1$，$l_2=AC_2$）

按上述（书上）说法，这个演示的实验条件是要保证滑线触点 C 在 AB 上找到使检流计指针不偏转的 C_1 点和 C_2 点，而要满足这一条件必须使：

$$\varepsilon>\varepsilon_x\ (和\varepsilon_s)$$

事实上，如果根据 $\varepsilon>\varepsilon_x$（和 ε_s）这一点来选择实验仪器，那么，很可能在 AB 上找不到 C_1 和 C_2 点而使实验失败。这是因为从原理来讲，要使滑线触点 C 在 AB 上找到 C_1 和 C_2，应该保证 $U_{AB}\geq\varepsilon_x$（和 ε_s）。也就是要保证：

$$U_{AB} = \frac{R_{AB}}{r+R+R_{AB}}\varepsilon \geq \varepsilon_x(和\varepsilon_s) \qquad (2)$$

成立。可见，在我们选择电源、控制电路中电流的变阻器 R 和电阻线 AB 时，应该依据的是（2）式，而不是（1）式。

三　实验装置和器材的选择

选择装置形式和器材，即最后确定实施的实验器材，需要从许多方面来综合考虑。但总的来说仍然是两个方面，即物理原理和教学要求；取材容易、经济实惠。

通电导体在磁场中运动实验装置的确定

前面我们已确定了在水平面上演示通电导体在磁场中运动的方案。这个方案需要的主要仪器和材料是：1．磁体；2．运动导体和导轨；3．电源。怎样实施这个方案，也就是怎样选择这个方案（装置）的具体形式、怎样选择器材呢？下面做一简要分析。

1．磁体

磁体是使通电导体受力且直接影响受力大小的重要因素之一。装置对

磁体的要求不仅要提供强磁场，而且强磁场的区域要大一些。对此，我们可以把若干块小磁体（圆柱型或长方体型）并起来，组成一块大的“板”型磁体（如图 5-34 甲）或一块大的“蹄”型磁体（如图 5-34 乙），也可以直接选用蹄型磁体。

2．运动导体和导轨

通电导体在水平方向滚动，根据导体和导轨形状的不同，可以有多种组合方式。如：

①导体为圆柱体，导轨为两根金属棒；

②导体为圆管，导轨为两根金属棒；

③导体像车轮、车轴形状，导轨为两块金属平板，如图 5-35 所示。

在这三种组合方式中，哪一种比较好呢？下面来分析这个问题。

我们先来比较导体为圆柱和圆管这两种方式。假定圆柱和圆管长度相同，圆柱的质量为 m_1、半径为 r_1，圆管的质量为 m_2、外半径为 r_2、内半径为 r'_2。假定导体与导轨之间的静摩擦足够大，使得导体在导轨上只滚不滑。

我们知道，运动导体是否容易滚动主要决定于运动导体对（垂直于图 5-36 中 D 点的）瞬时转动轴的角加速度 β 的大小。β 的大小取决于两个因素：一是运动导体受到的对于瞬时转动轴的力矩的大小，二是运动导体对于瞬时转动轴的转动惯量 I 的大小。运动导体是否动得明显，主要决定于运动导体质心加速度的大小。

为分析方便起见，假定圆柱和圆管的粗细相同（$r_1=r_2=r$），它们受到的安培力 F 大小相等，那么，它们受到的力矩也大小相等。下面分别比较①、②两种方式中转动惯量 I、角加速度 β、质心加速度 αc 的大小。

圆柱的转动惯量，根据平行轴定理为：

$$I_1=\frac{1}{2}m_1r^2+m_1r^2=\frac{3}{2}m_1r^2 \qquad (1)$$

根据转动定理：

$$F\cdot r=I\beta$$

可得圆柱的角加速度为：

$$\beta_1=\frac{Fr}{\frac{3}{2}m_1r^2}=\frac{2}{3}\cdot\frac{F}{m_1r} \qquad (2)$$

圆柱的质心加速度：

$$\alpha c_1=r\beta_1=\frac{2}{3}\cdot\frac{F}{m_1} \qquad (3)$$

圆管的转动惯量：

$$I_2=\frac{1}{2}m_2(r^2+r'^2)+m_2r^2 \qquad (4)$$

假定圆管壁很薄，内半径 r' 接近外半径 r，则 I_2 将近 $2m_2r^2$

$$I_2 \leq 2m_2r^2 \qquad (5)$$

或者说 I_2 最大等于 $2m_2r^2$，现在就当作 $2m_2r^2$ 处理。圆管的角加速度为：

$$\beta_2 \geq \frac{F}{2m_2r} \approx \frac{F}{2m_2r} \qquad (6)$$

圆管的质心加速度为：

$$\alpha c_2 \geq \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{m_2} \qquad (7)$$

比较（3）、（7）两式可见，要使 $\alpha c_2 > \alpha c_1$，也就是要使圆管比圆柱容易动、动得快，应该满足的条件是：

$$m_2 < \frac{3}{4}m_1 \qquad (8)$$

对于同种材料制成的圆柱和圆管，这个条件总能满足；对于不同材料制成的圆柱和圆管，这个条件也比较容易满足。上面的分析说明导体为圆管的方式优于导体为圆柱的方式。下面，我们来比较导体为圆管和车轮状这两种方式。除了前面分析时作的一些假定，如只滚不滑、安培力大小相等之外，为分析方便起见，再假定两轮的质量 $m_{轮}$ 与轴杆的质量 $m_{杆}$ 相等，即等于车轮质量 m_3 的一半；轴杆很细，比车轮半径 R 小得很多，也就是略去轴杆对于轴心线（两轮中心连线）的转动惯量。经过这样的假定后，可得到车轮对瞬心的转动惯量为

$$I_3 = \frac{1}{2}m_{轮}R^2 + m_3R^2 = \frac{5}{4}m_3R^2 \qquad (9)$$

车轮对瞬心的角加速度为：

$$\beta_3 = \frac{F}{\frac{5}{4}m_3R} \qquad (10)$$

车轮的质心加速度为：

$$\alpha c_3 = \frac{4}{5} \cdot \frac{F}{m_3} \qquad (11)$$

比较（7）、（11）两式可见，要使 $\alpha c_2 > \alpha c_3$，需满足的条件是：

$$m_2 < \frac{5}{8}m_3 \qquad (12)$$

也就是圆管要比车轮轻一半。

上面，我们对圆柱、圆管、车轮三种运动导体进行了分析比较，圆管和车轮这两种形式似乎都是可取的。但是如果从装置对运动导体和导轨的要求来看，对车轮型方式的机械要求要高得多。如两车轮要圆、大小一致、圆心同轴、两轮平行；导轨金属板表面必须平整、安装牢固，等等。这对自制教具来说有一些难度。因此，圆管型方式应该是我们的首选方式。下面来对这一方式进行选材。

装置对圆管的要求是：一方面质量要小（质心加速度与质量成反比），要质量小就需使管壁薄一些、管子细一些（管子的长度根据磁体的磁场区

域而定，尽可能不要太长）；另一方面作为课堂演示实验，运动导体不能太小，特别是截面不能太小，也就是管子要粗一些。把这两方面的要求综合起来看：管壁要薄一些，管子粗细要适当，要让学生看得清楚。还有一个需要考虑的问题是管子的材料。显然铝管比铜管好，铝管轻。虽然铝管表面容易氧化，但实验前用砂纸打一下，能够保证接触良好。

自制铝管也很方便。取香烟盒中的铝箔纸，用软纸将铝箔表面轻轻擦平，然后将铝箔卷在铅笔（或其他粗细合适的圆柱体）上，先卷紧后松开，退出铅笔即成一圆管（也可在退出铅笔前在圆管的两端和中间用塑料胶带各粘一圈）。这圆管取材容易，制作方便，可随用随做。

导轨的一个作用是为运动导体输电。这就要求导轨是良导体，它与运动导体间的接触电阻要小，它的表面应该光滑平整、无氧化层，每次使用前需用细砂纸打光。导轨的另一个作用是为运动导体提供运动轨道。为了便于导体运动，两根导轨需平直、光滑、水平、平行，而且导轨必须足以支持运动导体的重量而不变形。如果运动导体是用香烟盒中的铝箔纸做的，由于铝箔纸很轻，所以，对导轨的要求就较低，一般选用直径 2mm 以上的铜导线或漆包线（表面漆刮去）就行了（而不必像厂制仪器那样用两根粗的铜棒做导轨）。至于导轨的支架，用四块小木块，或用四块橡皮泥就足以支撑两根铜导线了。

3．电源

以往普遍认为这个实验所用的电源要能提供大电流，并把这看做是实验的关键所在。所以，在选用电源时一般要求用蓄电池组或低压大电流演示电源，有的甚至用大电容放电的方法来提供大电流。这些做法并没有错。在磁场（磁铁）一定，运动导体转动惯量比较大的情况下，也只有通过加大电流的方法来提高演示效果。但如果我们用了磁性较强的磁体、用了很轻的铝箔纸圆管，对电源的要求就降低了，电源用 1～2 节 1 号干电池就足够了。应该注意，实验时外电路接近短路，所以通电时间不易过长。正因为外电路接近短路，所以电池内阻的大小对电路中电流的大小影响很大。由此可见，所选电池应较新。

按上述要求选择装置和器材，不仅装置简单、取材容易、加工方便、成本低廉，而且操作简便、过程清晰、现象明显、效果很好。

第五节　注意一物多用和挖掘实验潜力

利用现有的装置，进行尽可能多的实验，显示尽可能多的实验现象，说明不同的物理原理；根据现有的仪器和材料的性能，设计新的实验方案，尽可能多地应用于不同实验之中……充分提高装置和实验器材的利用效率、挖掘实验潜力，这在当前仪器普遍缺乏的情况下是一种有效且经济的办法。

要做到一物多用，首先需要充分了解装置、器材的结构、原理和性能，然后再考虑：

（1）它能否代替其他的装置或器材（从原理、结构、性能和实验中能起的作用等方面考虑）；

（2）它能否应用于其他实验中；

（3）应用它能否设计新的实验方案。

随后拟定出具体方案，进行试验（检验其可行性和分析优缺点）、决定取舍（或提出改进方案，进一步完善方案）。

针筒在物理实验中的应用

医用注射针筒结构简单、比较常见，应用于中学物理实验有其独到之处（特点）：

（1）作为有刻度的透明容器，易于观察和测量；

（2）能打气（压水）和抽气（抽水），在要求不太高的情况下，可作简易气泵和水泵使用，而且易于操作；

（3）密封性能好，能随意封闭一定质量的气体和水进行实验。

利用针筒的上述特点，将它应用于物理实验中能取得较好的实验效果。下面扼要列举部分应用实例。

①大气压的演示（一）（如图 5-37）。

在水中用橡皮帽将注射器头部封死后，用厚纸片盖住管筒口，出水后纸片不落下，将橡皮帽拿去后，厚纸片落下。

②大气压的演示（二）（如图 5-38）。

在针筒活塞向上抽动时，大气压使水随活塞上升而上升。

③大气压的演示（三）（如图 5-39）。

（用另一针筒）将图中针筒内的空气抽出一定数量后，就可能握住针筒将下面的木块（或其他重物）提起。

④大气压的演示（四）（如图 5-40）。

用针筒抽气，可见气球逐渐增大。

⑤大气压强各向同性（如图 5-41）。

将针筒向各个方向转动，可见活塞位置（即活塞指示的读数）不变。

⑥粗测大气压强（如图 5-42）。

将针筒先抽水后压出水，再用橡皮帽封住口。根据刚好能拉动活塞的

砝码重量和针筒截面积，粗测大气的压强。

⑦喷泉的演示（一）（如图 5-43）。

随着针筒抽气，彩色水像喷泉一样喷入瓶中。

⑧喷泉演示（二）（如图 5-44 甲、乙）。

⑨压缩式喷雾器原理的演示（如图 5-45）。

⑩压缩空气做功（如图 5-46）。

随着针筒 B 压气，针筒 A 的活塞将砝码举起

（11）蒸汽做功（如图 5-47）。

实验时，先将针筒浸入热水中预热。演示时要防止活塞从针筒中脱出而损坏。

（12）空吸抽水机工作原理（如图 5-48）。

（13）模拟锅炉水位计（如图 5-49）。

（14）气体压强的应用（如图 5-50）。

（15）帕斯卡球实验（如图 5-51）。

（16）液体传递压强的演示（如图 5-52）。

（17）液体对容器底部有压强的演示（如图 5-53）。

（18）液体的压强的演示（如图 5-54）。

（19）连通器原理（如图 5-55）。

（20）液压机模型（如图 5-56）。

（21）液体内部的压强仅与自由液面高度有关的演示（如图 5-57）。

（22）流速与截面的关系（如图 5-58）。

（23）反冲的演示（如图 5-59、图 5-60）。

（24）潜水艇原理的实验（一）（如图 5-61）。

（25）潜水艇原理的演示实验（二）（如图 5-62）。

（26）物体受到的浮力等于其排开水的重量（如图 5-63）。

（27）液体的扩散（如图 5-64）。

用针筒吸入硫酸铜溶液，并通过针头（或输液细管）将硫酸铜溶液注入水的底部。

（28）液压传动刹车模拟（如图 5-65）。

（29）液体沸点与压强的关系（如图 5-66）。待水加热到沸腾时接上针筒，用针筒向烧瓶内压气，立即可见到水停止沸腾；待水沸腾后，移去酒精灯，接上针筒抽气，即可见到水重新沸腾。

（30）绝热膨胀致冷（如图 5-67）。

在瓶内注入少量酒精，用大针筒向瓶内打气（如打入 2~3 针筒气），然后突然打开瓶塞，瓶内即充满白色雾状。

（31）气体在绝热压缩时温度的变化（如图 5-68）。

（32）饱和蒸汽和未饱和蒸汽的演示（如图 5-69）。

橡皮帽不要塞得太紧，通过细针头，将乙醚注入图中针筒内，使其成

未饱和汽（或饱和汽），然后进行实验。

（33）验证玻义耳-马略特定律（一）（如图 5-70）。

（34）验证玻义耳-马略特定律（二）（如图 5-71、图 5-72）。

（35）验证玻义耳-马略特定律（三）（如图 5-73）。

（36）验证玻义耳-马略特定律（四）（如图 5-74），

（37）查理定律的验证（如图 5-75）。

（38）盖-吕萨克定律的验证（如图 5-76）。

（39）在静电的作用下，水流弯曲的演示（如图 5-77）。

（40）滴水感应起电实验（如图 5-78）。

第六章　实验条件的选择和实验操作

第一节　实验条件的选择

实验条件选择得是否恰当，对于实验的成败和效果的好坏影响很大。装置、器材都会影响实验条件，因此，在选择装置、器材时应该注意满足实验条件（对此，前面已谈到）。此外，在实验过程中，实验中物理参数的个数与数值、实验次数、实验程序、实验操作和观察时间，等等，都可能影响实验条件。一般来说（除前面几章已谈到的装置、器材的选择等方面外）在选择或确定实验条件时应注意以下几个问题。

一　根据实验原理选择实验条件

许多物理学的规律是在一定的条件下成立（或近似成立）的。所以，在验证（或探索）某一公式或规律时，就必须要使实验环境（条件）符合这一物理规律的适用条件，否则，就容易使实验失败，或影响学生对物理规律适用条件的认识（或产生错觉）。

关于变压器的实验

中学物理对变压器介绍了两条规律，用公式来简单地表示可写成：

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2} \qquad (1)$$

$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{n_1}{n_2} \qquad (2)$$

这两个公式是在把变压器当做理想变压器的情况下推导出来的。实际上，这两个公式都是近似式，而且，它们都在一定的条件下近似成立。（1）式近似成立的条件是变压器需做空载运行；（2）式近似成立的条件是变压器需做满载运行（而且变压器的铜损、铁损、漏磁都可忽略不计）。因此，用实验来验证（或推出）（1）式时（如图 6-1 所示），应该使副线圈处于空载状态；用实验来验证或推出（2）式时（如图 6-2 所示电路），应该使副线圈所接的最大负载达到满载状态（即变压器的额定功率）。

二　根据仪器技术指标（参数）选择实验条件

在定量实验中，由于仪器的“非理想化”，必定会对实验有影响，带来误差。这种影响的程度，通常取决于仪器的技术指标（参数）。因此，我们在选取实验条件时候，不能忘记技术指标（参数）这一因素。

牛顿第二定律实验

高中物理甲种本①和乙种本②都按如图 6-3 的装置来进行牛顿第二定

律的定量实验。在选定实验条件前，首先要了解教学要求。

按甲种本的要求，通过实验要得到的结论是：

$$\begin{cases} \dfrac{a_1}{a_2}=\dfrac{F_1}{F_2}=\dfrac{m_1g}{m_2r}, \ \alpha \propto F & (1) \\ \dfrac{a_1}{a_2}=\dfrac{M_2}{M_1}, \quad \alpha \propto \dfrac{1}{M} & (2) \end{cases}$$

式中，M 为小车的质量，m 为砝码（连砝码盘）的质量。反映在图线上，得到的$a-F$图线和$a-\dfrac{1}{M}$图线都为一条通过原点直线。

按乙种本的要求，通过实验得到的结论是：

$$\begin{cases} \dfrac{a_1}{a_2}=\dfrac{F_1}{F_2}=\dfrac{m_1g}{m_2g}, \quad a \propto F & (3) \\ \dfrac{a_1}{a_2}=\dfrac{M_2+m}{M_1+m}, \quad a \propto \dfrac{1}{M+m} & (4) \end{cases}$$

反映在图线上，得到的$a-F$图线和$a-\dfrac{1}{M+m}$图线也都为一条通过原点的直线。

在电磁打点计时器、纸带、小车、砝码盘、斜面、细绳、砝码等都已齐全的情况下，是否取任意的 M 和 m，都能得到所要的实验结论呢？实验表明，并非如此！那么，怎样来选择实验条件，能使实验的误差尽可能小，而使学生通过实验得到加速度与质量、加速度与外力的关系呢？对此，需从实验原理的分析入手。

按图 6-3 所示的实验装置，设：定滑轮的质量为 m′，半径为 R，其转动惯量$I' \approx \dfrac{1}{2}m'R^2$；小车车轮的质量为$M_2$，半径为$r$，转动惯量$I \approx \dfrac{1}{2}M_2r^2$；小车车轮受到的静摩擦力为$f$（假定车轮只滚不滑），车轮受到的滚动摩擦力偶为 Nδ①；线中水平段的张力为 F，竖直段的张力为 F′；打点计时器给予纸带的平均阻力为 f′；线和纸带的质量可略去不计；小车的加速度为 a。

由运动方程可得：

$$\begin{cases} mg-F'=ma & (5) \\ (F'-F)R=I'\beta'=\dfrac{I'a}{R} \text{ 或} \\ F'-F=\dfrac{I'a}{R^2} & (6) \\ F-f-f'=Ma & (7) \\ fr-N\delta=I\beta=\dfrac{Ia}{r} \text{ 或} \\ f-\dfrac{N\delta}{r}=\dfrac{Ia}{r^2} & (8) \end{cases}$$

将（5）、（6）、（7）、（8）四式相加后解得：

$$a=\frac{mg-f'-\frac{N\delta}{r}}{M+m+\frac{I'}{R^2}+\frac{I}{r^2}} \qquad (9)$$

若令：$\frac{I'}{R^2}+\frac{I}{r^2}(\approx\frac{1}{2}m'+\frac{1}{2}M_2)=\triangle M$——折合质量，则（9）式可写成：

$$a=\frac{mg-f'-N\delta}{N+m+\triangle M} \qquad (10)$$

式中，如采用部颁标准仪器：J0203 型电磁打点计时器和 J2108 型斜面小车进行实验，按出厂仪器的技术要求$f'\leq 2.94\times10^{-2}N$、$\frac{N\delta}{r}\leq 5.88\times10^{-2}N$ 和$\triangle M\leq 1.4\times10^{-2}kg$。

如果我们采用“抬高斜面法”基本抵消了$\frac{N\delta}{r}$①，

若按乙种本②要求验证

$a=\frac{mg}{M+m}$，应注意使实验条件满足：

$$\begin{cases} mg >> 2.94\times10^{-2}N \\ M+m >> 1.4\times10^{-2}kg \end{cases}$$

③

若按甲种本④要求验证

$a=\frac{mg}{M}$，应注意使实验条件满足：

$$\begin{cases} mg >> 2.94\times10^{-2}N \\ M >> m+1.4\times10^{-2}kg \end{cases}$$

⑤

如果不用“抬高斜面法”抵消$\frac{N\delta}{r}$，就应使实验条件满足：

$$\begin{cases} mg >> 2.94\times10^{-2}N+5.88\times10^{-2}N=8.82\times10^{-2}N \\ M >> m+1.4\times10^{-2}kg \end{cases}$$

对于这个问题，笔者认为甲种本教材没有予以重视。

首先，对于验证 $a\propto F$ 的实验，以甲种本介绍的数据（即表 6-1）来看，可以认为小车质量 M 在 1kg 左右。该课本所选择的实验条件不太佳。虽然表 6-1 所示的实验结果令人满意，但是，如果实验装置用部颁标准仪器，在正常工作状态下，要得到这样好的实验结果是极其困难的。对此，如果用（10）式估算一下，或与《中学物理实验·上册》①中介绍的关于牛顿第二定律的 4 张实验数据及处理、分析结果表格进行分

析比较一下是不难看出的[注意：（1）此书采用“抬高斜面法”抵消了 $\frac{N\delta}{r}$；（2）表格中的实验结果都在由（1O）式决定的实验结果范围之内]。

表 6-1

FN	a m/s²
0.20	0.193
0.040	0.392
0.060	0.588
0.080	0.775
0.100	0.955

表 6-2

M kg	$\frac{1}{M}$ 1/kg	a m/s²
0.300	3.33	1.20
0.400	2.50	0.90
0.500	2.00	0.81
0.600	1.67	0.71
0.700	1.43	0.62

其次，对于验证 $\propto \frac{1}{M}$ 的实验，从甲种本②介绍的数据来看，可以认为砝码的质量 m 在 40g 左右。这样，当 M 取 50g 时，由于没有计入砝码的质量和折合质量（m+δM≈54g）就使理论值（$a=\frac{F}{M}$）与由（10）式决定的实验值产生了大约10%的误差。显然，由于实验条件不满足 M>>m+14g，所以理论值与实验值的偏差过大，以致 $a-\frac{1}{M}$ 图线不可能如课本介绍的那样为一条通过原点的直线。对此，如果按表6-2中的数据，在图表纸上作出 $a-\frac{1}{M}$ 图线就能清楚地看到这一点。顺便指出：甲种本③图 3-6 中 $a-\frac{1}{M}$ 图线中的坐标点过于粗略；而且，即使由图3-6中 $a-\frac{1}{M}$ 图线也不能得到“图像正是一条通过原点的直线”的结论，因为直线在纵标上通过的是（0，0．4）这一点，而不是原点（0，0）。笔者觉得，对于牛顿第二定律学生分组实验，使用甲种本时似应按乙种本所述的那样：（1）验证 $a\propto\frac{1}{M+m}$，而不是验证 $a\propto\frac{1}{M}$；（2）用“抬高斜面法”抵消力 $\frac{N\delta}{r}$，且注意使实验条件满足 mg>>2．94×10⁻²N、M+m>>1．4×10-2kg，以尽可能减小实验误差。

三　根据误差理论选择实验条件

用惠斯登电桥测电阻

用惠斯登电桥测电阻的实验电路如图 6－4 所示。图中，R_x 为待测电

阻、R_s为电阻箱、直线 AB 为一长为 L 的电阻丝（滑线）、A 为检流计。当电桥平衡时，待测电阻 R_x 由下式决定：

$$R_x = \frac{l}{L-l} R_s$$

如果触点 d 在滑线上的位置在测量时有一个读数误差△L,则 l 的测量值就为 l+△l，而 L-l 的测量值就为（L-l）-△l。由于长度测量的误差而引起的 Rx 的测量的相对误差（绝对值和法）由公式

$$\delta = \left|\frac{\triangle R_x}{R_x}\right|$$

得：$$\delta = \left|\frac{\triangle l}{l}\right| + \left|\frac{-\triangle l}{L-l}\right| = \frac{L\triangle l}{l(L-l)} = \frac{L\triangle l}{\frac{L^2}{4} - \left(\frac{L}{2} - l\right)^2} \qquad (2)$$

从（2）式可见，要使长度测量误差对实验结果的影响减小到最低程度，亦即使δ取极小值，显然需使$l = \frac{L}{2}$。因此，在实验中我们应尽可能使触点 d 在滑线的中点处。

四　根据理论图线选择实验条件

（1）不少实验要求将实验结果用坐标图上的图线表示出来。这图线能否很好地反映物理规律，或者说能否与理论图线相一致，这是衡量实验结果好坏、实验成功与否的一个重要依据。因此，我们在选择实验条件的时候，必须要考虑如何使所取的实验条件（横坐标上的“实验点”）能使理论图线上的细节或特征、使理论图线的全貌得到很好的反映。

研究电源的输出功率

实验电路如图 6-5 所示，图中电源用蓄电池（内阻 r 可忽视）、定值电阻 R_0 作为电源内阻 r，R 为电阻箱。图中左边虚线框内为一模拟电源。

实验要求取若干个 R 的数值，测出 I 和 U，算出输出功率 $P_{出}$出；然后作出 $P_{出}$出-R 图线，从图线上反映 $P_{出}$随 R 变化的规律。

这里，能否恰当地选取若干个 R，是能否作出较好的 $P_{出}$-R 图线的关键。虽然现在我们没有现成的 $P_{出}$-R 理想图线用以仿照，但我们可以从 $P_{出}$-R 的函数关系中去寻找 $P_{出}$-R 图线的特征，然后根据这些特征来确定 R 的若干取值。

从图 6-5 所示电路，我们可以得到 $P_{出}$-R 的函数关系为：

$$P_{出} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R+r)^2} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R-r)^2 + 4Rr} \qquad (1)$$

对（1）式求导得：

$$\frac{dP_{出}}{dR}=\frac{r-R}{(R+r)^3}\varepsilon^2 \qquad (2)$$

$$\frac{d^2P_{出}}{dR^2}=\frac{R-2r}{(R+r)^4}\varepsilon^2 \qquad (3)$$

由（2）、（3）式可见：

①当 R=r 时，$P'_{出}=0$，$P''_{出}<0$，在 R=r 附近图线向上凸。也就是说 R=r 时，$P_{出}$有一极大值，且是唯一的极大值。

②当 R=2r 时，$P''_{出}=0$，即 R=2r 的点是拐点（向上凸和向下凹的分界点）。因此，$P_{出}$-R 的理论图线应大致如图 6－6 所示。若要使实验图线反映理论图线的特征，我们就应该保证在 R=r 和 R=2r 附近的取“点”较其他地方密一些。

（2）在不少情况下，理想图线是难以得到的。实验中种种非理想化状态使得理想图线的某些细节和特征难以明显而清晰地表现出来。如萘的熔解实验，要出现课本中的理想熔解图线（如图 6-7）是不可能的。因为对于很少一部分体积的萘来说，其熔解前后过程的温度变化情况，是图像中所描述的那样。而对于由许多小体积的萘所组成的整体来讲，其熔解的情况和温度变化的情况是不均匀的，温度计所测出的温度（如果搅拌均匀的话）可看做是整体的平均温度，这个平均温度不能像理想图线那样在 B，C 两点处有明显的转折。为了把萘熔解前、后两个阶段温度的变化比较细仔地记录下来，使溶解图线更清楚地显示 B，C 间的水平段，以便于说明萘溶解时温度不变的规律，以及由此求得萘的熔点，我们应该从萘熔解前温度比熔点低 2℃～3℃起，适当地缩短读温度值的时间间隔，如将 1 分钟读 1 次，改为半分钟读 1 次。这样就能更好地反映出 B，C 两点处的细节，使其更接近于理想图线。

第二节　实验操作

无论是对技巧性较大的实验，还是对于一般的实验，操作在很大的程度上影响着实验结果。对于相同的器材，并不是任何一个人都能将实验做到同样好的程度。如在桌面上放一窄条纸，用一支粉笔竖直地压在纸条上，您能否将纸条取出但又不移动粉笔呢？这不完全是实验技巧的问题，还反映出实验者对实验原理的理解程度、对实验条件和操作步骤的明确程度等。

不要简单地认为实验操作就是把实验装置搭配起来，按实验内容做做就行了。应该明确，实验操作是实验实施的过程。我们应该明确操作步骤，它们决不是随意定的，每一步骤操作都要能说出其道理，要了解它的作用，以及它所产生的后果。应该知道每一步操作是由一个或几个动作组成的。每个动作都有一定的要求、都要到位，都要符合一定的规范，只有这样，才能确保正确地操作。正因为如此，操作的问题是很值得研究的。

一　操作依据

操作要以实验原理为依据，不从物理原理出发去考察（或确定）操作（及其动作）的道理、作用和后果，就容易使操作带有一定的盲目性，最终影响实验的成效。

摩擦起电

用绸布包住有机玻璃棒来回不断地摩擦较长时间所起的电荷，可能不如将绸布（中间是有机玻璃棒）紧紧地握在手中，迅速地有力地抽出有机玻璃棒一次所起的电荷多。这是因为（在两摩擦体表面的物质及粗糙程度相同的情况下）“摩擦的起电作用主要在于摩擦后物体表面温度的增高，因而该处电子的动能增大，增加了接触面间电子流动所发生的效果，因此两接触表面一个电子过多，一个电子过少的现象就显著起来，也就是产生了显著的带电现象”①。增大正压力迅速摩擦，有利于使物体表现温度的增高，起出更多的电，又利于减小因有机玻璃棒与绸布接触而发生的漏电。

检验电荷的种类

利用带电体上所带的已知电荷，来检验验电器上所带电荷的种类（反之亦然）的方法是：将带电体靠近验电器导棒顶端，看验电器箔片张角的变化。如果张角变大，则验电器与带电体带的是同种电荷。同样是“将带电体靠近验电器导棒顶端”这一动作，如果不得要领，检验时可能会得到错误的结论。例如，假定将一个带正电荷的带电体靠近一个带负电荷的验电器的导棒顶端，如果带电体所带电荷很多，当它迅速置于验电器导棒顶端时，验电器箔片张角会增大（图 6-8）。实际上验电器箔片的张角经过了较大—小—大的过程（如图 6-8 乙），只不过在演示实验中不易被大多

数学生观察到。正确的操作方法是：将带电棒从正上方慢慢靠近验电器导棒顶端，看箔片张角是在慢慢增大，还是在慢慢变小，由此来判断电荷的种类。

二　操作的具体要求

操作要规范，动作要清楚明了、干净利索。教师的操作，对于学生说来是一种示范，它对于学生实验技能的培养有着不可忽视的作用。因此，教师的操作要尽可能规范。凡要学生注意的、对学生规定的操作事宜，教师也应该同样要求自己。如：调节天平时要先调底座水平、游码拨到左端再调横梁平衡；砝码不能用手拿；用温度计时手不能握住玻璃泡，要小心轻放；用电表时指针要校零，电表读数时必须从垂直表盘方向去读数；用光学元件时不能用手拿住光学面，等等。

教师的操作动作要清楚明了，不能让学生产生误解；要干净利索，以便于学生观察。实验操作必须拟定一定的步骤，并要让学生能看清、看懂您的每一个步骤。

静电感应

在静电感应实验中，使两个互相接触，但不带电的绝缘导体感应带电（等量异种）的过程，一定要按三步进行：（1）带电体靠近一个绝缘导体；（2）移开另一个绝缘导体；（3）移开带电体。不应该将（2）、（3）两步合起来，即在移开另一个绝缘导体的同时移开带电体。给验电器感应带电也是利用了解电感应的原理，其步骤如图 6-9 所示。

（1）把一个带电体（例如带正电的有机玻璃棒）移近验电器顶端的金属球，验电器的球上就因感应带负电，而远端箔片上就带正电，箔片张开（图 6-9 甲）；

（2）用手指接触一下验电器的金属球，验电器箔片上的正电荷就经过人体入地（或者说正电荷被从地上经过人体而导入的负电荷所中和了），验电器箔片合拢（图 6-9 乙）；

（3）移去手指，验电器箔片仍然合拢（图 6-9 丙）；

（4）移开带电体，这时，验电器球上的负电荷重新分布在箔片和球上，箔片张开（图 6-9 丁）。

这里，（2）、（3）两步相当于静电感应实验的第（2）步。操作时也不应该在手指接触球时移开带电体，或手指和带电体一起离开。

要做好给验电器感应带电的实验，光记住上面的四个步骤还不够，还应该知道各动作的要领，操作时动作要到位。如，第（1）步，带电体应从正上方靠近电器导棒顶端小球，以提高感应效果。第（2）步，手指应接触球的下部或球下面导棒（离带电体远一些），以使手指上尽可能没有负电荷，以免第（3）步手指移开时带走较多的负电荷，使验电器（导棒、球、

箔片）上净的负电荷减少，从而降低感应带电的效率。如果第（2）步操作的动作到位（带电体的位置又没有改变），那么，在第（3）步中验电器箔片应该合拢。这可作为检验第（2）步操作正确的一个标准。如果整个实验操作正确，那么第（4）步中验电器箔片的张角只比第（1）步中的箔片张角略小一些。

三　要善于分析比较操作方法的优缺点

对于实验操作方法，我们不仅要知其然，知其所以然，而且还要了解其利弊，以便取长补短，具体情况具体运用。

给验电器带电

有不少静电实验需要验电器一开始就带有一定量和一定种类的电荷。给验电器带电的方法有三种：（1）接触传导法；（2）感应法；（3）尖端放电法。这三种方法各自有下述特点。（1）接触传导法。

①一般无法控制带电量的多少。

②有时无法控制带电种类。

例如，用带电有机玻璃棒给带圆盘的验电器带电，由于有机玻璃棒上所带电荷大多为束缚电荷，所以当有机玻璃棒与验电器圆盘接触时，只有相互接触的一些点传递电荷，量不多。只有在圆盘上来回擦几次，才能使接触的点增多，使较多的电荷传给验电器（如图 6-10 所示）。由于起电棒在擦动的过程中，一方面传给圆盘同种电荷，另一方面由于摩擦作用使圆盘带异种电荷。如果后者起主要作用，有机玻璃棒将使金箔带异种电荷，所以金箔所带的电荷有时就难以确定。如果按图 6-11 所示擦动，由于圆盘边缘曲率较小，容易与有机玻璃棒发生尖端放电现象，此时摩擦作用往往退居于次要地位，所以金箔所带电荷在大多数情况下与有机玻璃相同。对于顶端是小球的验电器，我们同样不敢保证能控制带电种类。

③带电体所带电荷过多，产生的电压过高时不能进行；否则，容易使验电器箔片或指针损坏。

（2）感应法（方法见上例）。

①基本上能控制带电量的多少（控制张角）。

②能控制带电的种类（验电器带上与带电体异种的电荷）。

③不会损坏验电器。

（3）尖端放电法。

①难以控制带电量的多少。

②带上与带电棒同种的电荷。

③带电棒所带电量较少时也可进行。

④容易漏电（如果验电器带电后不取走尖端的话）。

实验中一般常用接触法和感应法给验电器带电。比较这两种方法的特

点可知，感应法优于接触法（特别是在要给验电器带上已知种类的电荷以及控制箔片张角的时候）。故此，应尽可能用感应法带电。

第七章　课堂演示实验教学策略

课堂演示实验，是在课堂上主要由教师操作，并通过教师的启发引导，帮助学生对实验进行观察思考，以达到一定教学目的的实验教学方式。

在课堂演示实验教学中，教师是实验主体，处于主动地位；学生是观察主体，处于被动地位。而课堂演示实验的教学效果主要是以学生能否达到预期的学习效果来衡量的。因此演示实验的教学效果并不仅仅取决于实验本身（实验能否出现预期的物理过程和现象），还取决于教师主导作用的充分发挥。而主导作用能否充分发挥，不仅取决于教师自身的实验技能和教学的基本素质，还取于教师对演示实验所采取的教学策略以及对教学过程（程序）的设计。

第一节　课堂演示实验教学设计的基本方法

课堂演示实验（硬件）有比较系统的实验设计方法。它主要由用于测量物理量和显示物理现象的实验方法、实验设计技法（设计的思想方法）和技术设计方法（设计的技术方法）有机组成。演示实验（硬件）设计一般需经过方案形成与论证、总体设计、技术设计、试制与试验、鉴定与定型这样五个阶段。课堂演示实验教学（软件）的设计与上述硬件设计有所不同。由于教学活动的多样性、灵活性和复杂性，常无法对影响实验教学活动的诸多因素及其变化作出比较全面的了解和确定，因而无法得到一整套像实验设计和其他工程技术设计那样比较确定的技术型设计方法。但课堂演示实验教学设计仍有其规律性。简单地讲，课堂演示实验教学的设计思路是这样的：第一，必须选择实验教学目标，确定方向。第二，必须选择能够达到这些目标的教学策略。作为教学策略的一部分，必须选择内容和总的步骤。第三，必须选择能实施和实现上述教学策略的教学手段和方法。第四，必须选择适当的手段和方法来评价和检查所做的工作。

一　课堂演示实验教学模式

在上述演示实验教学设计的基本思路中，确定怎样的教学策略是关键。作为教学策略的一部分，运用怎样的教学模式是至关重要的。教学模式不仅直接决定了教学过程的结构，而且还决定了教学活动的基本程序。

课堂演示实验教学无论从功能到形式有很多种，其教学过程可用不同的教学模式。这里仅介绍一种在物理规律教学中适用性轻强的演示实验教学模式（如下页图 7-1 所示）。

实验操作产生的物理过程和现象，由观察者感知得到一定的物理表象——感性认识（感性的具体），这些表象经初步的思维加工而得到观察结论（抽象的规定），经进一步的思维之后就得到实验结论（绝大多数情况下已是理性的认识、理性的具体）①。

在这个教学模式中，实验操作是基础；而教师的操作又必须通过学生的有效观察而起作用，观察是关键。思维不仅是得到实验结论之必需，而且还可提高观察的各种品质、提高观察的质量，可使操作更具目的性和条理性，思维是核心。

浮力的大小与哪些因素有关

“浮力的大小与哪些因素有关”的实验，可以作为“阿基米德定律”实验的前置实验，以引出“浮力的大小与物体排开液体的体积和液体的密度有怎样的关系”这一研究课题。

这里如用“浸入液体中的物体受到浮力”的实验引出“浮力的大小与哪些因素有关”的实验课题，学生可能以为（或估计、猜想、假设）影响

浮力大小的因素有：物体本身的形态、重力、体积、密度，物体排开液体的体积、浸没在液体中的深度和位置，液体的密度，等等。教师可用实验对各可能因素进行研究，找出真正影响浮力大小的因素。如研究“物体所受浮力的大小与其排开液体的体积是否有关”的大致教学程序如图 7-2 所示。

最后，将对各因素研究的结论进行归纳、综合，得到实验的最后结论（如图 7-3 所示）。

二　课堂演示实验教学设计的基本程序

演示实验教学（软件）设计一般需经过选题与实验教学目标制订、实验方案的设计与选择、局部设计和总体设计、方案评价（以及试教与修改定型）等阶段。设计的一般程度如下页图 7-4 所示。

1．选题

根据课堂教学的目的、要求和内容，确定实验教学课题。

2．制订实验教学目标

简单地讲，实验教学目标主要着眼于：（1）知识（物理基础知识、实验现象及实验基础知识、实验研究方法等）；（2）能力（观察能力、思维能力、实验操作能力等）；（3）个性、素养（兴趣、动机、态度、习惯等）。

3．设计与选择实验方案

一个实验内容往往可以有不同的实验方法。选择实验方案的依据主要有：（1）所选课题的实验目的、要求、内容；（2）演示实验（硬件）的基本要求（如：目的性、科学性、简便性、明显性、趣味性等）；（3）学校实验设备情况；（4）学生的情况（物理知识、接触过的实验、实验知识和技能、思维与生理心理特征等）；（5）实验时间和教学所允许的时间；（6）是否与实验体系和演示实验教学体系相协调。

这里，所选的实验方案往往不是一个。有时，可能是围绕一个教学主题的系列实验。

4．进行总体构思

根据教学目标和所选实验方案，设计或选择适当的教学策略，建立（选择）教学模式（结构模式）；对整个教学过程进行总体构思，决定主要的教学环节和大致的教学程序。

5．确定局部（子）课题

根据所选定的教学策略（及总体结构模式），逐一分析实验要点，分析学生学习的重点、难点，分析判断学生在观察与思考时可能产生的问题和困难。在此基础上确定教学过程中需重点解决的若干局部（子）课题。

6．局部设计

对确定的各子课题分别进行分析，初步定下在实验、观察、思考等方面的相应对策。如分析：（1）实验时应重点显示（或测量）什么？重点表演什么？表演时应注意什么？（2）指导观察时，应指出什么？交待什么？提醒什么？指导什么（观察方法）？得到什么观察结论？（3）启发引导学生积极思维得到实验结论时，应讲解什么？提问什么？讨论什么？启发什么？分析归纳什么？怎样从观察结论得到实验结论？实验结论应是什么？等等。初步确定所要采用的教学手段与教学方法，初步确定具体的实施方案。

7．确定总体设计方案

根据总体构思，将局部设计方案汇合、串接，调整、加工成为一个完整的总体设计方案。

这里需注意：（1）各局部设计、各环节的“接口”（过渡、衔接）须自然、恰当。（2）教学方法和教学手段的选用须与演示实验内容相融洽、与实验操作相配合，并以实验内容和实验操作为中心。在围绕一个实验内容的教学中，教学方法和教学手段的种类不宜用得太多。

8．评价

根据实验教学目标，对总体方案进行必要的评价和判断，看其能否达到拟定的实验教学目标，如没达标，则须从第 3 步开始重新设计（或修改）；如达标了，实验教学设计通常可算完成了。就完整的设计而言，还要进行试教（试验），根据试教的情况再进行评价、修改、定型。

“保险丝作用”的演示

1．课题：保险丝作用的演示

2．实验教学目标

（1）理解保险丝的作用；

（2）了解保险丝的使用常识；

（3）进一步加深对安全用电（包括安全操作）的认识；

（4）指导全面观察和比较观察方法，提高观察的目的性、全面性，提高形象思维水平，提高兴趣水平层次。

3．选择实验方案

选择保险丝作用演示实验方案的最基本的要求是：

（1）便于模拟（如烧）、便于对比（如没有、有保险丝的后果）；

（2）便于更换保险丝；

（3）便于进行短路操作；

（4）操作安全。

为此，初步选择如图 7-5 所示的实验装置（示教板）。图中 A～H 为接线柱，M～Q 为香蕉插座（另备两根香蕉插头连线），L 为 6～8V 的汽车灯泡，G，H 之间连接一根电炉丝，C，D 和 E，F 之间可连接铜丝和保险丝等。

4．确定教学策略、建立（选择）教学模式和总体构思

（1）利用真实+模拟的方法和对比演示的方法，形象、直观地表明保险丝的作用。

（2）利用如图 7-1 所示的演示实验教学模式，通过生动、明显的演示，指导学生进行全面、细致的观察，并配合简明的讲解，引导学生进行形象的思维，以建立清晰的物理图像，得到直观（理性的具体）的结论。

（3）实验的主要程序应依次说明：

①电路中没有保险丝……怎样？

②电路中有了保险丝……怎样？

③为什么要选择一定规格的保险丝？

④保险丝能用铜丝代替吗？

5．确定局部课题

从演示效果和学生可能产生的问题来看，可确定下述子课题：

（1）怎样模拟电流过大后电线（电器、设备）被“烧”？

（2）怎样让学生看清保险丝断？

（3）保险丝为什么能“保险”（容易断）？

（4）保险丝是怎样熔断的（过程怎样）？

（5）为什么要选用合适规格的保险丝？

（6）一般电器所用的保险管中为什么可用铜丝（适合基础较好的学生）？

6．局部设计

对上述各课题，可分别进行局部设计（简述）。

（1）在半根电炉丝上搁上数层“Λ”形塑料纸（用夹子夹住塑料纸下边）。这样，当大电流流过时，半根电炉丝逐渐变红，另半根上的塑料纸逐渐冒烟、燃烧。

（2）在保险丝上挂标志物：若保险丝红、挂件垂下；保险丝断、挂件掉下。

（3）加辅助实验说明保险丝：

①电阻率大（实验方案略，也可直接用电阻率表上的数据来比较）；

②比热小（可从固体比热表上的数据大致说明）；

③熔点低（可用酒精灯或火柴烧，也可对物质的熔点表上的数据进行比较说明）。

由此可（大致）说明保险丝为什么易断（关键词）：电阻大、易发热，比热小、易升温，熔点低、易熔断。

（4）将装置中一盏灯改为并联数盏灯

（如图7-6所示）：逐渐增加并入灯数 $\xrightarrow{\text{指导观察}}$ 保险丝逐渐变红……直至熔断。

（5）对比演示：粗保险丝……不断……细保险丝……断……进而说明之。

（6）对比演示 粗铜丝……不断……细铜丝……断……进而说明之（对于基础较好、接受能力较强的学生可进行这一内容）。

7．确定总体设计方案（这里纲要性说明大致程序）

（1）没有保险丝（或用一般铜丝和铁丝代替保险丝）……（短路或过载）……“烧”

（2）有了保险丝……“断”（起保护作用）。

（3）保险丝怎样熔断的（过程）。

（4）保险丝为什么能起“保险”作用（容易断）。

（5）为什么要选用合适规格的保险丝（对比实验）……怎样选择……

（6）对铜丝是否可作保险丝的进一步认识（对比实验）……适当介绍各种形式和材料的保险丝及其特点、用途（适合基础较好、接受能力强的学生）。

（7）家庭电路保险盒、闸刀保险丝的安装及要求。

8．评价

上述实验教学程序能达到拟定的实验教学目标（实际上，“保险丝”一节的教学内容已由这一实验教学程序串联起来了），可以实施。

第二节　实验教学层次（程序）必须一切从学生出发

不论采用怎样的教学策略、怎样的教学方法和教学形式，实验的教学层次（程序）对于实验者来说应该便于其顺利地进行实验，并向实验观察者清楚、自然地讲解；对于实验观察者来说应该便于其观察、思维，只有这样才能使实验有效地沟通师生的心理，收到良好的教学效果。一个实验的教学层次（程序）没有固定的模式，因此，在研究实验教学层次（程序）时，切不可自己给自己带上枷锁，教条地套用一种模式，而应该实事求是，因材施教。下面所讲的几个问题，仅仅是在进行实验教学层次（程序）研究（设计）时一般应该考虑的几个相关因素，实际研究时仍需将它们综合起来考虑。

一　配合讲解与层层深入

进行实验演示时，教师应该根据教学内容的需要和学生心理状况，给演示配以适当的讲解（启发、引导）或讨论，并在能使学生接受的条件下层层深入，引导学生对演示的现象进行观察和分析，认识现象的本质属性和现象之间的因果关系，从而逻辑地得出结论。

这里，演示与讲解的协调是十分重要的，要将学生的思维引入教师精心设计的轨道，光有教师实验表演是不够的。打个比喻，学生的思维像一条小船，实验像条河，讲解就像给船桨（或篙），要将小船驶到对岸必须要有桨（或篙），并且最好要使桨适合于船，用起来顺手。因此，讲解无论是内容还是语言，对于学生来说都应该“顺其心”、“顺其手”，这样才能使学生容易接受，利于观察、思考。要使实验和讲解层层深入，有时光靠一个实验不行，而必须有几个实验的相互配合。对于这个问题在下面系列实验研究的问题中论述。

二　直观简明与形象生动

实验及其教学层次（程序）对于学生来说应该力求形象生动。这样不仅能吸引学生观察，而且也便于学生进行直觉思维。

人体触电模拟

初三在“安全用电”这节中对人触电的各种情况作了论述。为了便于学生对人体触电的各种情况有比较形象的认识，我们可以设计下述模拟示教板和教学层次（程序）进行教学。

1．示教板

如图 7-7 所示。a，b，o 为接线柱，c，d，…l 为香蕉插座；N 为一测

电笔中的氖泡，人若触电，氖泡即发光；R_1为保护电阻，约 150kΩ；R_2约为 500kΩ；R_3约为 350kΩ；另外，准备两根两端带有香蕉插头的接线。

2．教学层次（程序）

（1）在 a，b 两端接通 220V 交流电，接通 e，c，氖泡不发光。这说明，人若仅用一只手（或身体的一部分）接触火线，身体的其他部分与地线、墙壁、大地等绝缘的话，人不会触电。

（2）再接通 d，f，氖泡仍不发光。这说明：人若用两只手拿一根火线，而身体的其他部分与地线、大地等绝缘的话，人仍不会触电（鸟的两只脚站在同一根输电线上、身体的其他部分不与其他输电线接触时，鸟不会触电的情况与此相同）。

（3）断开 d，f，若接通 l，f，氖泡发光。这说明人虽然与地绝缘，但两手同时接触两根电线，人就会触电。

（4）断开 l，f，接通 g，f，氖泡发光。这说明虽然人与地绝缘，但一只手与火线接触，另一个手与墙壁接触，人也会触电。

（5）断开 g，f，接通 h，j，氖泡发光。这说明人若站在地上，一只手与火线接触，人就触电。

（6）断开 h，j，然后将与 b 相接的一根电源线断开，使之与接线柱 o 接通，以模拟一高压输电线落在地面上，可见，氖泡不发光。这说明若有一根电线掉在地上，只要人与地保持绝缘，人就不会触电。

（7）接通 i，k，氖泡不发光。这说明在落地电线附近，人若单脚着地，一般不会发生触电事故。

（8）再将 h 与 k 相接触，氖泡不发光。这说明在落地电线附近，人若两脚拼拢站在同一“点”上，亦即使两脚与落地电线距离大致相等，一般也不会触电。

（9）断开 h，k，接通 h，j，氖泡发光。这说明由于两脚之间有跨步电压，人就触电了。

三　通俗讲解与恰当比喻

往往有这样一种情况，就实验及其操作步骤来说没有什么不妥之处，但学生却不易理解，甚至产生错觉或疑惑，不能正确地思维，更不能得到自己确信的结论。因此，我们在进行实验研究时，应该设身处地地为学生着想，实验教学层次（程序）不能使学生产生错觉，不能使学生对实验现象和结果似信非信。我们应该针对学生在实验观察和思维上的种种难点，进行通俗的讲解和比喻，甚至可以辅以另一简单的实验或实例来加以说明，以确保实验教学的效果。

低压沸腾实验

有一种低压沸腾的实验演示方法是这样的，将圆底烧瓶里的热水烧至

沸腾，移去酒精灯，用塞子塞紧烧瓶，此时水不再沸腾；把瓶子倒过来，在瓶底上面浇冷水，可见瓶内的水又沸腾了。这个实验现象是清晰的，但对于初中学生来说，由于没有一定质量和体积的气体，当其温度降低后其压强也要降低的知识，对于浇了冷水后瓶内的水沸腾是在低压下的沸腾这一点，常常是半信半疑的。如要消除这一疑惑，在实验教学层次（程序）

中就需要增加这样的内容：让学生确信浇了冷水后，瓶内的气压小于大气压。为了说明这个问题。可对实验仪器稍加改进：在橡皮塞子上插一根玻璃管（如图 7-8 所示），玻璃管外端套一橡皮管，用一夹子将橡皮管夹紧，不使其漏气。按原方法进行演示，最后，将橡皮管的下端置于红色水中，打开夹子，可见红色水在烧瓶内喷出（即表演低压喷泉实验）。由此说明了浇了冷水之后瓶内气压低于大气压这一事实。

玻璃瓶受力形变

高一在“弹力”这部分内容中提到：任何物体受到任意小的力，都要发生形变；不发生形变的物体是不存在的。为说明这一点，不少资料上介绍了下述玻璃瓶受力形变的实验。

如图 7-9 所示，在三角玻璃烧瓶的瓶塞中插一根细玻璃管，瓶内装满红色水，在玻璃管中水面处用小橡皮圈做上记号。

演示时，用手压玻璃瓶底，可以看到玻璃瓶上面玻璃管中的水面会升高；撤去压力，玻璃管中的水面就会回到橡皮圈所在位置。实验说明玻璃瓶在外力作用下发生了形变。

这个实验的原理可简述为：

玻璃瓶受力—形变—容积减少（由于液体不可压缩）—水往上升然而，学生在看这个实验时，常会产生两个错觉：（1）瓶不是玻璃的；（2）手接触瓶子后传热给瓶子，使瓶内的液体受热膨胀。为避免学生产生上述错觉，许多老师采取下述改进措施：（1）演示前先用金属棒敲瓶子，使学生确信这是玻璃瓶。（2）瓶子选用 1kg 装的椭圆形底的墨水瓶。这样，当瓶子椭圆截面的短半轴方向受压力时（如图 7-10 所示），水柱上升；当瓶子椭圆截面的长半轴方向受压力时（如图 7-11 所示），水柱下降。如果前者“能”用“受热膨胀”来解释的话，那么后者用“受热缩小”是解释不通的。可见水柱高度变化的原因并非受热膨胀。

但是，上面的演示不能使学生确信，不论水柱是上升还是下降，都是由于受力形变的缘故。虽然我们可以向学生做这样的解释：在瓶子椭圆截面的周长基本不变的情况下，椭圆截面短半轴方向受压力后，短半轴更“短”了，即截面积（$S=\pi a\cdot b$）变小—容积变大—水柱上升；而椭圆截面长半轴方向受压力后，长半轴变“短”了，同时短半轴变“长”了，这样，长半轴 a 和短半轴 b 的乘积增大了，则截面积变大—容积变大—水柱下降。但是，学生对此还是不容易理解的（尽管上述解释很费口舌），因为高一学生对于椭圆的一些几何知识和面积计算还是比较生疏的（一般在

高二或高三才学到）。

那么，怎样使学生接受不论水柱是“上升”还是“下降”都是由于受力形变的缘故呢？对此，可用一个简单的实例类比。大家都有挤牙膏的经验。牙膏壳的截面可以近似地看做是一个椭圆，我们可以向学生提出类似下述的问题：挤牙膏你是怎么挤的？你是沿短半轴方向挤、还是沿长半轴方向挤？如果挤出的牙膏太多了，要使挤出的牙膏缩回去一些，你将怎样？你是沿短半轴方向挤一下呢，还是沿长半轴方向挤？用牙膏实际操作，当学生看清这个熟悉的现象，并相信这个现象后，他自然也就相信了水柱“上升”、“下降”都是由于受力形变的缘故了。

四　适当设疑与激发兴趣

我们要引导学生观察，启发学生思维，还应该利用中学生的好奇心，激发学生的兴趣，集中学生的注意力。对此，方法不少，而适当设疑是其中比较有效的一种。这里说的“疑”应该称得上是疑，不应该是为了设疑而做的简单凑合，不应该是教师一说出口学生就能回答出的问题。

可设疑的方面较多，如可以利用教材的难点设疑；利用学生容易弄错的问题设疑；利用学生错误的前概念设疑，等等。而通过实验来设疑的方法一般有以下几种：（1）出人意外的现象的分析；（2）似是而非的问题的回答；（3）貌似相同的问题的对比，等等。

变压器的原理

若问学生：变压器的原理是什么？学生很快就会回答是根据电磁感应的原理。学生是否真的理解了变压器是根据互感原理制成的呢？若问：变压器能否改变直流电的电压？回答是不能。这说明学生的理解是片面的。若追问，直流电能否使一个线圈中的磁通量变化？互感现象的产生难道仅限于交流电路吗……学生常会因此而疑惑不解或难以判断。对此，可先演示下述实验，然后帮助学生纠正错误认识。

如图 7-12 所示，这里，变压器不要用自耦变压器。按动开关 S，可见两电压表指针都有摆动；快速连续按动 S，可见两电表指针基本各偏于某一位置（在这位置附近做小振动）。这说明直流电“能”通过变压器（如在变压器次级串一只二极管，则流过变压器次级负载的电流为直流电）。若固定 L_1 于某一匝数，改变 L_2 的匝数，即改变 L_1 与 L_2 的匝数之比，可见，两电压表的读数之比也随之改变。

有关电动机的实验

高中课本①在讲到“含有反电动势电路”时指出：在电流通过电动机时，电动机里有反电动势存在。这个反电动势是由于转子线圈转动，切割磁力线而产生的。仅从这一点来讲，转子中流过的电流越大，转子受到的力（转动力矩）越大，转子就转动得越快、切割磁力线的速度就越大，产

生的感应电动势——反电动势就越大。对此，学生比较容易接受。如果我们将（1）初中学生实验“安装电动机模型”中所做的实验，（2）高中“用电动机演示反电动势”的实验放在一起做，并且边做边得出各自的结论：

（1）如图 7-13 所示，改变滑线变组器 R 阻值的大小，电流的大小可通过小电珠 L 发光亮度的变化来反映（也可直接串接上电流表）。实验表明：电路中的电流变大，电动机转速变快；反之，就变慢。“转速”与“电流”成正比。

（2）在图 7-13 的电路中。固定滑线变阻器于某一位置，以使小电珠亮度一般；用手指或笔杆在电动机皮带轮或转轴上逐渐加压，可见电动机转速逐渐变慢，小电珠的亮度却逐渐变亮；电动机停止转动，小电珠最亮。实验表明：电路中电流变小，电动机转速变快；反之，就变慢。“转速”与“电流”成反比。

上述两个实验结论是“相互矛盾”的，但，似乎都是正确的。如果教师能引导学生用反电动势的概念来解释这两个实验，那么，将使学生对反电动势的概念（以及电动机运行的有关问题）有较深切的认识。

第三节　实验层次（程序）要与教学要求相适应

即使是同样的实验装置、器材等，在不同的教学阶段或对不同的教育对象，需有不同的实验教学层次（程序）。换言之，实验的层次（程序）必须与不同的教学要求相适应。

一　与知识深度相适应

通电导线在磁场中运动的实验

在初中，只要演示说明通电导线在磁场中要受力而运动，观察运动的方向（即受力方向）与电流和磁场方向的关系，从而归纳出左手定则。

在高中物理下册①为引入 B 的概念，则主要演示说明通电导线在磁场中运动的快慢，即受力大小与 L，I，B 的关系。之后，又要演示说明通电导线在磁场中受力的大小与电流和磁场夹角 θ 之间的关系。显然，对于这一实验，在初、高中所要演示的内容和实验层次（程序）是不同的。

二　与要说明的问题的侧重点相适应

抽纸实验

将一只玻璃杯装满水，放在桌边的一纸条上，抽动纸条。是快抽，还是慢抽呢？

在初中，抽纸实验主要用以说明静止物体具有惯性。如果先慢抽纸条——玻璃杯被纸条拖着走；拖到桌边时迅速抽动纸条——玻璃杯保持在桌边不动，并不随纸条一起离开桌面。这样演示必定会给在向初中学生解释这一现象时带来一些麻烦：（1）惯性，即物体保持原来运动状态之属性。为什么慢抽时玻璃杯不保持静止不动，反而随纸条运动？为什么快抽时玻璃杯不保持运动，反而静止？（2）如果说快抽时玻璃杯有惯性，表现为不随纸条运动，那么慢抽时玻璃杯也有惯性，为什么没有表现出来？因此，在初中只适宜演示快抽。

在高中，讲授动量定理时，为说明动量的变化仅决定于冲量的大小，也可演示抽纸实验。此时，就适宜既演示慢抽，又演示快抽，以利于比较说明。

三　与课型或教学要求相适应

液体有向上的压力的实验

（1）初二课本①在液体压强公式讲过之后，把这个实验放在习题中。在推导液压公式时是把压强归结为某液面上液柱重力所产生。重力的方向

是向下的，液压公式是否适用于向上压力呢？这个实验只是提供了一种验证方法。

（2）初二课本②在液压公式推出之前，把这个实验作为学生小实验。它要学生有这样的认识：某一液面上所受到的压力与此液面上液柱的重量相等。这就为下面一节用“钢化法”模型导出液压公式做好了准备。

（3）如想充分利用这个实验，在学生做过小实验之后，再做演示，可用以说明：液压 p 与深度 h 有关，与密度 ρ 有关。第四节实验教学体系的设计与研究前面所讲的都是关于单个实验教学层次（程序）的问题。在实际的教学过程中，还需经常考虑教材的章、节结构和内容的系统性，以及各部分内容之间的联系。因此，我们不仅要考虑到单个实验在各自教学环节中的作用，还要考虑这个实验在整个或某一部分教材体系中的作用，以及它与其他实验的相互联系等，尽可能使各实验教学环节保持连贯性，随着教学内容的深入，实验教学也逐步深入。这就要求我们应根据教材的体系和教学的需要，注意相关实验、系列实验（实验教学体系）的研究和设计问题。

一　相关实验

所谓相关实验，就是这样一些实验：前面的实验一方面应当时的教学需要，另一方面为后面的实验做基础；后面的实验一方面应当时的教学需要，另一方面也是前面实验的继续、深入和扩展。譬如，用磁铁插入或抽出线圈，根据电表指针偏转方向的变化来分析、归纳出楞次定律的实验，就需要有通过电表的电流方向不同，电表指针偏转方向不同的实验为基础。因此在前面讲到用电流表测电流强度时，应做电流方向不同，电流表指针偏转也不同的实验进行演示（在那时，也可以用此实验说明为什么电流表的极性不能接错）。

二　系列实验

所谓系列实验，就是围绕一个主题、按一定逻辑关系组合而成的一系列实验；或者，按某一教学意图而分层次进行的一系列实验。就系列实验中的某个实验来看，它有自己的实验层次（程序），旨在说明某个物理内容；但，把这些单个实验集中起来看，它们是一个整体，是按教材内容和教学需要而有机地结合起来的一个整体。如果能注意到系列实验，能设计好系列实验，对教学是十分有益的。

“浮力”一章的系列实验

1．教材结构和基本内容简介

下面我们以 1983 年版初二物理课本①中浮力一章为研究对象。这一章

共有 5 节。

第一节“浮力”。这一节主要叙述浮力的概念和浮力产生的原因（$F=F_{向上}-F_{向下}>0$）。“浮力”的概念是这一章的基础（这一节说明了浮力”是什么）。

第二节“阿基米德定律”。这一节主要叙述阿基米德定律的内容，即浮力等于物体排开液体的重量，$F_{浮}=\rho_{液}gV_{排}$。阿基米德定律是这一章的重点和难点（这一节说明浮力的大小等于什么）。第三节“物体的浮沉条件”。这一节主要叙述决定物体浮沉的条件：$F_{浮}>G_0$，上浮；$F_{浮}<G_0$，下沉；$F_{浮}=G_0$，悬浮。物体的浮沉条件也是本章的重点（这一节说明物体浮沉决定于什么）。第四节“研究物体浮在液面的条件”。这一学生分组实验主要为了使学生更具体更深入地认识物体的浮沉条件。第五节“物体浮沉条件的应用”。这一节主要通过对物体浮沉实例的分析，使学生加深对物体浮沉条件的认识。这一章的教学是在前几章教学的基础上进行的。这一章要综合运用到力、二力平衡、密度、压强、液体的压强等知识。同时，在前三节中，需用到较多的抽象分析和推理的方法。这正是学生学习的困难所在。

2．系列实验

在这一章中，系列实验设计的指导思想是：通过一系列具体实验，引导学生在进行直觉思考的基础上，进行归纳、推理，从而帮助学生了解和掌握本章的概念、定律和规律。

下面是这一章实验系列中主要的一部分系列实验的简单介绍。

（第一节“浮力”）

（1）石蜡块能浮在水面上处于静止状态（图 7-14）。从二力平衡的知识可知，石蜡块除了受到一个向下的重力作用之外，必然还受到一个向上的托力作用。这个力是水给的，叫做浮力。

（2）放在水里要浮在水面上的物体会受到水给它的浮力。放在水里要沉下去的物体，如电池、橡皮泥等，是否要受到浮力的作用呢（图 7-15）……实验表明水对浸在其中的物体（不管是要沉，还是要浮）都有一个向上托的力……浮力的作用。

（3）水对放在其中的物体有浮力，其他液体对放在其中的物体是否也有浮力呢？实验表明：酒精、盐水对浸在其中的物体也有浮力（图 7-16）。当然，我们不可能拿各种液体来一一做试验，但如果要试的话，结果与前面三种液体一样。这说明，所有液体对浸在它们里面的物体都有浮力。

注意：（1）、（2）、（3）旨在说明液体浮力的存在。（4）浮力是怎样产生的呢？假如物体是一个正方体完全浸没在水中，它的前后左右四个侧面受到的水的压力大小相等，方向各各相反，彼此平衡，唯有上、下两个面受力不平衡，下面受到的向上的压力大于上面的受到的向下的压力。如图 7-17 所示的物体，当它浸没在水中时，四周受到的压力是平衡的，

但上、下两个面上蒙的橡皮膜向中央凸的程度不同，下面的向上凸的程度比上面的向下凸的程度大。这说明水给物体的向上的压力大于向下的压力，因此，水给物体的总的压力 $F_{浮}=F_{向上}-F_{向下}$就是浮力。（5）由上可见，水对物体的浮力是水对物体的向上向下的压力差（这是浮力的本质）。石蜡块浮在水面上：$F_{向下}=0$，$F_{浮}=F_{向上}$。假如 $F_{向上}=0$，$F_{浮}$是否等于 $F_{向下}$呢？如图 7-18 所示,将原先能浮在水面上的石块的平整的一面放在烧杯底部平整的石蜡薄层表面上，然后倒入水。当水将石蜡完全浸没后，石蜡块仍不浮起。这是由于水难于进入石蜡块底面和烧杯底石蜡层之间的空隙，水对石蜡块没有向上的压力（或者这个压力很小），所以 $F_{向上}-F_{向上}$小于零，即水对石蜡块的总压力是向下的，这时浮力没有了①。从这里我们可以看到：

①只有当 $F_{向上}>F_{向下}$时才有浮力存在(浮力是液体对物体的向上和向下压力之差，但压力差不一定都是浮力）。

②（进一步明确）“浮力”的“浮”字，它规定了“浮力”的方向必须是竖直向上的。

（6）如图 7-19 甲所示，在一根杠杆（米尺）的一端挂一个打足气的篮球和扎有一只气球的打气针，另一端用一些重物配重，使杠杆平衡。然后将打气针插入篮球气孔内，篮球即通过打气针向气球充气。随着气球逐渐变大，可见杠杆逐渐失去平衡（如图 7-19 乙）……实验表明物体在空气中也受到浮力。

（第二节“阿基米德定律”）

由上可知，形状规则的正方体浸没在水中，受到的浮力与它的上、下表面受到的水的压力差有关，对此，浮力的大小可通过液体压强公式和压力的定义求得。但是任意形状的物体受到的浮力的大小与哪些因素有关呢？下面就来研究这个问题。

（7）在大型橡皮筋测力计上挂一块橡皮泥，将其浸没在水中，可见橡皮筋测力计的指针由 x_1 缩短到 x_2，这表明橡皮泥受到了浮力。提着测力计改变橡皮泥在水中的深度和位置，可见，测力计仍指在 x_2 处。这说明：物体浸没在液体中时，所受浮力与物体在液体中的深度和位置无关。实验如图 7-20 所示（x_1，x_2 的位置，用鳄鱼夹定标以便于观察）。

（8）在上一个实验中，用手任意改变橡皮泥的形状（只要不在其中间留有空隙），可见，橡皮泥受到的浮力不变（即橡皮筋测力计的指针仍指在 x_2 处）。这说明：浮力的大小与物体形状无关。（9）用线系住一个瓶盖盖紧后不漏水的空瓶子，在瓶中放些砖块或铁螺帽，使其盖紧瓶盖后刚好能沉入水中，将线挂在弹簧秤上，先记下这时弹簧秤的读数 G_0，然后将瓶子沉没在水中，记下这时的读数 F_0，算出浮力 $F=G_0-F_0$[如图 7-21（a）所示]。再在瓶中加砖块和铁螺母，改变整个瓶的重量，重复上述实验步骤[如图 7-21（b）所示]，测出重瓶受到的浮力。实验说明：浮力的大小与

物体的重量无关。

（10）在橡皮筋测力计上挂一长条橡皮泥，将橡皮泥逐渐浸入水中（如图 7-22 所示），可见测力计的示数也逐渐变小，即浮力逐渐增大。这说明：浮力的大小与物体浸入（排开）液体的体积有关，而且随着浸入（排开）液体的体积的增大而增大。

（11）将体积相同的废电池和橡皮泥（也可以是其他物体），分别放在量筒里的水中，证明它们的体积相同。然后把它们分别挂在弹簧秤上，再分别放入水中，测出它们受到的浮力（图 7-23）。实验说明：只要浸入水中的体积相同，由不同的物质组成的物体受到的浮力是相同的。

（12）在橡皮筋测力计上挂一大块橡皮泥，将它分别浸入酒精、水、盐水中（图 7-24）。可见，橡皮泥受到的浮力是不同的，而且依次增大。这说明：在浸入液体的体积不变的情况下，浮力的大小与液体的密度有关。而且随液体密度的增大而增大。

（13）从上面一组实验可见，对于任意形状的物体，所受的浮力的大小仅与物体浸入液体中的体积有关，与液体的密度有关。到底有什么关系呢？两千多年前的希腊学者阿基米德研究并解决了这个问题，提出了著名的阿基米德定律。下面我们用实验来说明这个定律（方案略）。

（第三节“物体的浮沉条件”）

既然物体在液体中都要受到浮力，为什么不是所有的物体都能浮在水面上呢？物体的浮沉由什么因素所决定呢？下面就来研究这个问题。

（14）用半支牙膏壳，捏扁了放在水中将沉入水底；若把它撑开了放入水中，它将浮在水面上（图 7-25）。在这种情况下，牙膏壳的重量未变（G_0 不变），所不同的是第二次排开水的体积比第一次大，即第二次受到的浮力比第一次大。这说明：物体的浮沉与物体受到的浮力的大小有关（与 $V_{排}$ 有关）。

（15）用一个中间灌以砂粒的盖紧盖子的小药瓶，分别放入水和浓盐水中，可见小药瓶分别表现为沉、浮（图 7-26）。在这两种情形中，小药瓶的重量和体积未变，所不同的是液体的密度变了，即小药瓶受到的浮力的大小变了。这仍说明：物体的浮沉与物体受到的浮力的大小是有关的（与 $\rho_{液}$ 有关）。

（16）一个装满碎砖块的药瓶能沉入水底。若将其中的碎砖块倒出后再将其放入水中，可见瓶子浮在水面上（图 7-27）。在这两次试验中，玻璃瓶的重量变了。这说明：物体的浮沉也与物体的重量有关。

由上述实验可见，物体的沉、浮由物体的重量和物体所的浮力这两个因素有关。到底有什么关系呢？（按书上）分析物体的受力可得：

$$\begin{cases} F_{浮} > G_0 \text{上海} \\ F_{浮} < G_0 \text{下降} \\ F_{浮} = G_0 \text{悬浮于液体中} \end{cases}$$

（第四节“实验：研究物体浮在液面的条件”）

（17）研究物体浮在液面的条件（略）。

（第五节“物体浮沉条件的应用”）

要改变物体的“浮沉”状态，有三种基本的方法：①改变 $V_{排}$；②改变 $\rho_{液}$（①、②都可以改变 $F_{浮}$）；③改变 $G_{物}$。

（18）改变物体排开水的体积，即改变物体所受浮力的大小，从而改变物体的浮沉。例子——“打捞沉船”模拟实验（见图 7-28）。

（19）液体的密度不同，物体浮沉的情况也不同。例子——密度（比重）计（见图 7-29）。

（20）改变物体本身的重量，从而改变物体的浮沉。例子——潜水艇的浮沉（见图 7-30）。

（21）小实验：鸡蛋的浮沉。准备一杯浓盐水和一杯清水，将一只新鲜鸡蛋或一只装有砂粒的乒乓球分别放入盐水和清水中，可见前者浮后者沉。这是什么缘故？另外准备一个杯子，先倒入半杯浓盐水，将一只新鲜鸡蛋放入，可见鸡蛋浮在液面上。然后，小心地、慢慢地沿杯子壁倒入清水直至将近倒满，可见鸡蛋悬浮在液体中间（如图 7-31 所示）。让学生思考又是什么缘故？

第八章　数学方法的应用

在实验研究中，正确有效地应用数学方法，不仅能更可靠更有效地记录、处理和分析实验的数据、资料和结果，而且还能为实验方法的确定和实施提供科学的依据。因此，数学方法是实验研究中不可缺少的重要工具。本章主要研究误差理论和图像法在中学物理实验及其研究中的应用。

第一节　误差理论的应用

要深刻地认识和了解实验，深入地研究实验，必须借助实验误差理论知识。误差理论在中学物理实验研究中的应用，大致有以下几个方面。

一　确定实验误差和实验结果的取值范围

确定实验结果的误差范围，是误差分析的基本职能。对于确定的实验来说，它不仅为教师提供了实验结果的正确性标准，而且，它为进一步深入研究实验提供了依据。因此，确定实验结果的误差范围，是实验研究者应有的基本功，也是物理教师必须具备的实验能力。

在中学阶段确定实验结果的范围，一般分两种情况作简单处理。

1．已知真值（或真值的理想近似值）N′

这样，只要确定系统误差 ΔN_1 和偶然误差 ΔN_2，就可以确定实验结果 N 的范围应在

$$N=N'+\Delta N_1 \pm \Delta N_2 \qquad (1)$$

之中。这里 $\Delta N=\Delta N_1 \pm \triangle N_2$ 为实验误差①。对于只进行一次测量的情况，ΔN_2 以最大偶然误差估计：

$$N=N'+\Delta N_1 \pm \Delta N_{2m} \qquad (2)$$

对于要求进行多次（如 n 次）测量求平均的情况，N（平均值）的范围可以按（2）式估计（作最大估计）。如要求测量的次数较多（n 较大），可以由教师先用学生将要使用的实验仪器进行 n 次测量，以求得测量的标准误差 σ_N：

$$\delta_N=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(N_i-\overline{N})^2}{n(n-1)}} \qquad (3)$$

然后以：

$$N=N'+\Delta N_1 \pm \sigma_N \text{（置信度为 0.68）} \qquad (4)$$

或

$$N=N'+\Delta N_1 \pm 2\sigma_N \text{（置信度为 0.95）} \qquad (5)$$

作为实验结果 N 的取值范围。

2．不知或不易得到真值 N′的情况

这时可由教师先用学生将要进行实验用的仪器进行实验。实验次数应该尽可能多，将其实验结果的平均值 $\overline{N}$ 作为“实验真值”，即认为：

$$\overline{N} \approx N' + \triangle N_1$$

这样，学生实验结果的范围应在：

$$N=\overline{N} \pm \triangle N_2$$

之中。这里，ΔN_2 可按前面所述的方法确定。

实验结果范围的确定，在教学中具有很实际的意义，特别是在评价学生实验结果时尤为重要。

用单摆测定重力加速度 g

实验装置如图8-1所示。摆长$l = l_1 + l_2 = l_1 + \frac{d}{2}$；周期$T = \frac{t}{50}$，其中 t 为单摆做 50 次全振动所用的时间。

（1）确定真值。

g 值因地而异。如能得知当地的 g 值（如查表或向地质部门询问）最好；如不能得知准确值，那么，只能由教师进行足够多次测量，以$\overline{N}$作为真值 N′的最佳估计值。

（2）估计最大误差ΔN。

由公式$g = \frac{4\pi l}{T^2}$得（用绝对值和法）：

$$\frac{\triangle g}{g} = \frac{\triangle l}{l} + 2\frac{\triangle T}{T} + 2\frac{\triangle \pi}{\pi} \qquad (1)$$

或

$$\frac{\triangle g}{g} = \frac{\triangle l_1 + \frac{1}{2}\triangle d}{l} + 2\frac{\triangle T}{T} + 2\frac{\triangle \pi}{\pi} \qquad (2)$$

这里，l_1用米尺测量①。取 $l_1 \approx 1$m。考虑到测量条件所限，可以认为$\Delta l_1 \approx 2\times10^{-3}$m。小球直径 d 是用游标卡尺测量的。Δd 不大于 5×10^{-5}m。可见，$\Delta d \ll \Delta l_1$，所以。

$$\frac{\triangle l}{l} \approx \frac{\triangle l_1}{l_1} \approx 0.002$$

t 是用秒表测量的。秒表的精度为 0.1s，共测 50 个周期，所以$\triangle T \approx \frac{0.1}{50} = 0.002$s。

因为 $l \approx 1$m 时，$T \approx 2$s，所以，

$$\frac{\triangle T}{T} \approx 0.001$$

由于π是无理数，当我们用 3.14（或 3.142）来代表π时，就引进了误差。其相对误差的大小$\frac{\triangle \pi}{\pi} = \frac{3.14 - \pi}{\pi}$。用十位计算器算得：

$$\frac{\triangle \pi}{\pi} = 0.0005$$

由上可得：

$$\frac{\triangle g}{g} = 0.002 + 2\times0.001 + 2\times0.0005 = 0.5\%$$

至此，可以确定实验结果的正确范围应为 g±0.005g②。如，苏州的 g 值（取 4 位有效数字）约为 9.795m/s²，因此，实验结果的正确的范围应

为 9.795±0.049ms²（即 9.746m/s²～9.844m/s²）。

二　确定分误差的大小及抓主要因素

能够确定影响误差的主要因素，对于确定实验方法、操作步骤、数据处理方法、以及选择器材、改进实验等都有很大的好处。确定影响误差的主要因素，主要是通过比较分误差的大小。这里，我们不仅要注意各直接测量值的误差（绝对误差或相对误差）大小，还要重视各误差传递系数的大小。

用冲击摆测弹丸的速度

用冲击摆测弹丸速度的实验如图 8-2 所示。按高中教学的要求，根据动量守恒和机械能守恒定律，用冲击摆测出的弹丸速度由下式算出：

$$v=\frac{M+m}{m}\sqrt{2gh}$$
$$=\frac{M+m}{m}\sqrt{2gL(1-\cos\theta)} \qquad (1)$$

式中：v 为弹丸的速度，M 为摆块质量，m 为弹丸质量，L 为悬线长度，θ为指针偏转的角度。

根据误差传递的绝对值和法公式，由（1）式可得速度 v 的最大相对误差为：

$$\delta_v=\frac{\triangle M}{M+m}+\left(\frac{1}{M+m}+\frac{1}{m}\right)\triangle m+\frac{\triangle L}{2L}+\frac{\triangle g}{2g}+\frac{\sin\theta\triangle\theta}{2(1-\cos\theta)} \qquad (2)$$

当我们按$g=9.8$计算时，一般$\frac{\triangle g}{2g}$只有万分之几，所以此项可以略去不计。

如果用厂制仪器，采用部颁仪器标准中规定的参数：M=80±2g、m=7.6±0.1g、悬线长 L=270±2mm 来计算误差，则δ_v的前 3 项的最大相对误差δ_v'为：

$$\delta'_v=\frac{\triangle M}{M=m}+\left(\frac{1}{M+m}+\frac{1}{m}\right)\triangle m+\frac{\triangle L}{2L}$$
$$=\frac{2}{80+7.6}+\left(\frac{1}{80+7.6}+\frac{1}{7.6}\right)\times 0.1+\frac{2}{2\times 270}$$
$$=0.023+0.014+0.004$$
$$=4.1\%$$

如果实验中用学生天平（感量 0.02g）来测质量，则ΔM=0.01g，Δm=0.01g，用米尺测悬线长度，ΔL 仍可计为 2mm，那么δ_v'为

$$\delta'_v=\frac{0.01}{87.6}+\left(\frac{1}{87.6}+\frac{1}{7.6}\right)\times 0.01+\frac{2}{540}$$
$$=0.0001+0.0014+0.0037$$
$$=0.5\%$$

再看由于测量θ引起的误差。因为刻度盘最小分度值为 0.5°，加上零点误差，故角度的读数误差 $\frac{0.5}{2}+\frac{0.5}{2}=0.5°$。另外，由于指针轴存在摩擦呈现的阻力，使指针的最大偏角较实际的要小，其值因仪器调整情况不同而有显著差异，在调整适当时可按 0.5°计算。综合这两项影响，相当于 $\Delta\theta=1°$。而误差的传递系数 $\frac{\sin\theta}{2(1-\cos\theta)}$ 是随角度θ的增大而减小的。

按部颁规定仪器的规格，发射弹丸的弹簧枪有 3 挡。如果采用低速挡，则偏角 θ≈15°；如果采用中速挡，则偏角 θ≈19°；如果采用高速挡，则偏角 θ≈22°。由此，我们可以算出这 3 挡Δθ的分误差的大小：

$$\delta_{\theta_{15°}}=\frac{\sin 15°}{2(1-\cos 15°)}\times\frac{2\pi\times 1°}{360°}=6.6\%$$

$$\delta_{\theta_{19°}}=\frac{\sin 19°}{2(1-\cos 19°)}\times\frac{2\pi\times 1°}{360°}=5.2\%$$

$$\delta_{\theta_{22°}}=\frac{\sin 22°}{2(1-\cos 22°)}\times\frac{2\pi\times 1°}{360°}=4.4\%$$

综合上述，我们得到这样的结论：在仪器调整适当的情况下，用冲击摆测定弹丸速度的最大相对误差为：

(1)若用学生天平测重量、用米尺测摆长，低、中、高 3 挡的速度误差分别为 7.1%，5.7%，4.9%。

(2)若用说明书上给出的 M，m，L 值进行计算时，低、中、高三挡的速度误差分别为 10.7%，9.3%，8.7%。

下表给出的弹丸速度的标准值是通过用平抛法测得的。表中速度的每个数值都是 3 次测量的平均值（实测 M，m，L 和θ的数据略）。

表 8-1 弹丸速度的标准值

枪机挡位	弹丸速度 v(m/s)（用冲击摆测得）	速度标准值 v(m/s)（用平抛法测得）	相对误差(%) $\left(\frac{v-v'}{v'}\right)$
低速挡	5.03	5.39	6.7
中速挡	6.14	6.48	5.2
高速挡	7.15	7.45	4.0

上表中的相对误差在最大相对误差范围内。

从上面对分误差大小的分析可见，弹丸速度的测量误差，主要决定于偏角的测量精度。如果仪器调整不当，使指针偏转时所受摩擦过大；或者操作不当，弹丸射入摆块绕竖直轴摆动，从而使摆块向上摆时发生扭动，甚至与刻度板相擦，等等，都会使指针最大偏角比实际应有的偏角更加小，所引起的误差将更大。因此，如何保证指针转动灵活，使学生操作得当，

是教师在准备实验及教学过程中必须重视的一个问题。

（这里，弹簧枪有机械故障或有所损坏而引起在同一挡弹丸出口速度相差较大，由此而引起的误差不能作为测量误差而加以估计。）

测定金属的比热

初中“测定物质的比热”的实验步骤如下：

(1)用天平称出量热器内筒及搅拌器的质量 m_1，将内筒装入适量的水后再称一次，求出水的质量 m_2。

(2)称出被测物（如“圆柱体组”中黄铜柱体）的质量 m_2。

(3)用细线吊住被测物，放入加热器内的开水中加热。

(4)把内筒放入量热器外筒内，组成量热器。用温度计测出水的初温 t_2。

(5)当被测物被加热几分钟（如水被烧开）后，用温度计测出加热器中水的温度。这个温度就是被测物的初温度 t_3。从加热器中取出被测物，迅速放入量热器，盖好盖子。

(6)用搅拌器轻轻地上下搅拌，读出混合后的最高温度 t。

(7)根据实验记录，利用公式：

c_2m_2（$t-t_2$）=c_2m_2（t_3-t）求得被测物的比热

$$c_3=\frac{c_2m_2(t-t_2)}{m_3(t_3-t)} \qquad (1)$$

对于这个实验的误差来源，不少书和杂志都作了定性的叙述，如：内筒吸热、测温不准、散热、金属块带入热水等等。当然上述都是造成误差的原因。如果仅满足于此，那么，并不能对我们做好这个实验带来多少实在的帮助。因为我们还不清楚这些因素的影响大小，以及为控制这些误差大小必须要做的努力和依据。为此，我们先从这个实验的原理入手，分析各误差因素的影响程度。

假定实验中没有热量损失，那么，根据热平衡方程

（$c_0m_0+c_1m_1+c_2m_2$）（$t-t_2$）=c_3m_3（t_3-t）

可得：

$$c_3=\frac{(c_0m_0+c_1m_1+c_2m_2)(t-t_2)}{m_3(t_3-t)} \qquad (2)$$

式中，c_0m_0 为温度计插入水中后的热容，c_1m_1 为量热器内筒（包括搅棒）的热容。

按初中教学要求，实验中不计温度计的热容 c_0m_0 和量热器内筒的热容 c_1m_1，这就引起了系统误差。为了计算方便起见，我们可将这两项误差归于对 m_2 的测量误差之中。这样，对水的质量 m_2 的测量误差 Δm_2 有三项：

①水的实测误差 m_2'；

②温度计的水质量$m_0'\left(=\frac{c_0m_0}{c_2}\right)$，$m_0'\approx 0.5Vg$，之中V为温度计插入水中的那部分体积（单位为 cm³）；

③量热器内筒的水的质量$m_1'=\frac{c_1m_1}{c_2}$。

当把 $c_0m_0+c_1m_1$ 归于 m_2 的测量误差之后，可在(2)式中删去这两项[于是(2)式就成为(1)式了]。然后，根据(2)式可得：

$$\frac{\triangle c_3}{c_3}=\frac{\triangle m_2}{m_2}+\frac{\triangle m_3}{m_3}+\frac{\triangle(t-t_2)}{t-t_2}+\frac{\triangle(t_2-t)}{t_3-t} \qquad (3)$$

下面先对(3)式中各最大绝对误差进行分析和确定。Δm_2。

温度计（0～100℃或 0～50℃）插入水中的体积 V≈2cm³，则 m_0'（=0.5V）=1g（水）。

内筒≈20g（铝），搅棒≈6g（铜）相当于 2.5g（铝）（从热容来看），所以m_1相当于22.5g（铝），$m'=\frac{c_1m_1}{c_2}\approx 5g$（水）。

用托盘天平测水的质量，实测误差 $m_2'\approx 0.2g$。所以：

$\Delta m_2\approx 1+5\pm 0.2\approx 6g$。

由于实验中不计 m_0，m_1，所以，这里的$\Delta m_2\approx 6g$ 为负误差。

②Δm_3。

铜块带入热水的多少，与铜块的大小（一块还是两块）、线的粗细和系法、放入量热器前的操作有关。如用细丝线系铜块圆截面两圈，放入量热器前抖一抖，带入的热水可达 0.2g，相当于 2g 铜（从热容来看）。铜的实测误差远小于 2g。所以

$\Delta m_3\approx 2g$。

此项误差为正误差。

③Δt_2，Δt_3，Δt。

如用 0～100℃温度计分别测 t_2，t_3，t，则

$\Delta t_2=\Delta t_3=\Delta t\approx 0.5℃$。

如用 0～50℃温度计测 t_2，t，则

$\Delta t_2=\Delta t\approx 0.2℃$。

为分析方便起见，假定 t_2=20℃，t_3=100℃，对于不同的 m_2 和 m_3，就有不同的t，也就有不同的$\delta\left(=\frac{\triangle c_3}{c_3}\right)$：

$$t=\frac{c_3m_3t_3+(c_0m_0+c_1m_1+c_2m_2)t_2}{c_3m_3+c_0m_0+c_1m_1+c_2m_2}$$

$$\delta=-\frac{\triangle m_2}{m_2}+\frac{\triangle m_3}{m_3}\pm\frac{\triangle t+\triangle t_2}{t-t_2}\pm\frac{\triangle t+\triangle t_3}{t-t_3}$$

$$\delta=-\delta_1+\delta_2\pm\delta_3\pm\delta_4$$

如果用 0～100℃温度计测 t_2，t_3，t，铜块可用一块（$m_3\approx 83g$）或两

块（$m_3 \approx 166g$），那么，对于不同的 m_2，可算得各分误差和总的误差范围如下表 8-2。

表 8-2

m_3(g)	m_2(g)	t(℃)	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ
83	40	31.6	15.0	2.4	8.6	1.5	(-22.7，-2.5)
83	80	26.7	7.5	2.4	15.0	1.4	(-21.5，+11.3)
83	100	25.5	6.0	2.4	18.2	1.3	(-23.1，+15.9)
166	60	35.3	10.0	2.4	6.5	1.5	(-15.6，+0．4)
166	80	32．3	7.5	2.4	8.1	1.4	(-14.6，+4.4)
166	100	30.3	6.0	2.4	10.0	1.4	(-15.0，+7.8)
166	120	28.8	5.0	2.4	11.4	1.4	(-15.4，+10.2)
166	140	27.7	4.3	2.4	13.0	1.4	(-16.3，+12.5)
166	160	26.9	3.8	2.4	14.4	1.4	(-17.2，+13.4)

如果用 0~50℃温度计测 t_2 和 t；用 0~100℃温度计测 t_3，铜块可用一块或两块，那么，对于不同的 m_2，可算得各分误差和总的误差范围如下表 8-3。

表 8-3

m_3(g)	m_2(g)	t(℃)	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ
83	40	31.6	15.0	2.4	3.4	1.0	(-17.0，-8.2)
83	60	28.4	10.0	2.4	4.8	1.0	(-13.4，-1.8)
83	80	26.7	7.5	2.4	6.7	1.0	(-12.8，+2.6)
83	100	25.5	6.0	2.4	7.3	1.0	(-11.9，+4.7)
83	120	24.7	5.0	2.4	8.5	1.0	(-12.1，+6.9)
166	60	35.3	10.0	2.4	2.6	1.1	(-11.3，-3.9)
166	80	32.3	7.5	2.4	3.2	1.0	(-9.3，-0.9)
166	100	30.3	6.0	2.4	4.0	1.0	(-8.6，+1.4)
166	120	28.8	5.0	2.4	4.5	1.0	(-8.1，+2.9)
166	140	27.7	4.3	2.4	5.2	1.0	(-8.1，+4.3)
166	160	26.9	3.8	2.4	5.8	1.0	(-8.2，+5.4)
166	180	26.2	3.3	2.4	6.4	1.0	(-8.3，+6.5)

分析表 8-2、表 8-3 可知：

（1）当铜块一定时（只用一块，或只用两块），

$$m_2 \uparrow \begin{cases} \delta_1 \downarrow \\ t \downarrow \begin{cases} \delta_3 \uparrow，\delta_4 \downarrow \\ (\delta_3 + \delta_4) \uparrow \end{cases} \end{cases}$$

（2）如用一块铜块（m_3=83g），用 0~100℃温度计测 t_2，t_3，t，则当 m_2 在 60~80g 时（保证圆柱体能完全浸没在水中），δ 较小。如果用 0～

50°C温度计测 t_2 和 t；则当 m_2 在 100g 左右时，δ较小。

（3）如用两块铜块（m_2=166g），用 0～100°C温度计测 t_2，t_3，t，则当 m_2 在 80g 左右时，δ较小。如用 0～50°C温度计测 t_2，t，则当 m_2 在 120g 左右时，δ较小。

(4)当 m_2 一定时，

$$m_3\uparrow \rightarrow \left.\begin{cases}\delta_1\downarrow \\ t\uparrow \rightarrow (\delta_3+\delta_4)\uparrow\end{cases}\right\} \rightarrow \delta\downarrow$$

这说明增加铜块的质量，即增大待测金属块的热容，可减少误差（这就是为什么实验要用“圆柱体组”中的铜圆柱体而不用铝圆柱体的道理）。

(5)温度测量的相对误差主要用 δ_3 决定。提高 t 亦即增大 $t-t_2$，就可减小 δ_3。对此，可使 t_2 低于室温（在铜块投入前测 t_2），而且要测准 t。

(6) δ_2 的大小主要由铜块带入的热水的质量决定，这是一个正误差。它虽然对由于不计内筒、搅棒、温度计的热容而引起的负误差 δ_1 以及实验过程中由于散热而引起的负误差有一定的补偿作用，但教师应该对细线及其系法，对“取出”和“放入”等操作方法进行实际试验，对可能带入的热水进行控制。上面，我们通过对各分误差和总误差的分析，了解了影响各误差大小的因素以及相互关系，确定了实验条件的选择根据以及部分操作要点，这对我们做好这个实验以及准确评价学生的实验结果有很大的帮助。

三　选择和确定实验方案

在选择和确定实验方案的时候，主要要考虑系统误差，有时也要适当考虑偶然误差（如测量次数很少时），或者某些量的偶然误差。在了解各实验方案的系统误差之后，根据系统误差的大小以及某些实际情况（如器材、操作等）来确定实验方案。

用伏安法测电阻实验方案的确定

(1)一般“用伏安法测电阻”的实验方案有两种形式：①电流表外接法（图 8-3）。

②电流表内接法（图 8-4）。

用哪一种形式测量未知电阻 R_x 误差较小呢？这主要取决于电流表和电压表的内阻、R_S 的大小以及两电表的准确度、使用范围、读数误差等因素。若不考虑后三个因素，一般认为测低电阻时（R_xR_V）用外接法，测高电阻时（R_xR_A）可用内接法。这仅是经验，到底用哪一种形式，还需从方案的系统误差来考虑。

(2)误差浅析。

设：电压表的内阻为 R_V，读数为 U，电流表的内阻为 R_A，读数为 I，待测电阻值为 R_x。

①用外接法。

真实值：

$$R_x' = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} \qquad (1)$$

测量值：

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{R'_x R_v}{R_x' + R_v} \qquad (2)$$

相对误差：

$$\delta_{外} = \left|\frac{R_x - R_x'}{R_x'}\right| = \frac{R_x'}{R_x' + R_V}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_x'}} \left(= \frac{R_x}{R_V}\right) \qquad (3)$$

由(3)式可见，如果电压表内阻比待测电阻大得越多，所引起的误差越小；反之越大。

②用内接法。

真实值：

$$R_x' = \frac{U}{I} - R_A \qquad (4)$$

测量值：

$$R_x = \frac{U}{I} = R_x' + R_A \qquad (5)$$

相对误差：

$$\delta_{内} = \left|\frac{R_x - R_x'}{R_x'}\right| = \frac{R_A}{R_x'} \qquad (6)$$

由(6)式可见，如果电流表内阻比待测电阻小得越多，所引起的误差越小，反之越大。

设有一个电阻 R_0，无论用哪种接法，所引起的相对误差相等，那么，由(3)、(6)式可以断定，当 $R_x > R_0$ 时，用内接法测量的相对误差较小；当 $R_x < R_0$ 时，用外接法测量的相对误差较小。这一电阻可称为临界电阻。显然，临界电阻应满足下式：

$$\delta_{外} = \delta_{内}$$

$$\frac{R_0}{R_0 + R_V} = \frac{R_A}{R_0} \qquad (7)$$

即 $R_0^2 - R_A R_0 - R_A R_V = 0$

$$R_0 = \frac{R_A + \sqrt{R_A^2 + 4R_A R_V}}{2} \qquad (8)$$

（因为 $\sqrt{R_A^2 + 4R_A R_V} > R_A$，又 $R_0 > 0$，故舍去 $R_0 < 0$ 的根仅得到

此根）

一般情况下，$R_V>>R_A$，所以

$$R_A^2+4R_AR_V\approx 4R_AR_V$$

$$R_A+\sqrt{R_{A^2}+4R_AR_V}\approx R_A+\sqrt{4R_AR_V}\approx 2\sqrt{R_AR_V}$$

$$R_0=\sqrt{R_AR_V} \qquad (9)$$

由(8)式或(9)式，就可确定用怎样的接法了。

“用电流表和电压表测电池的电动势和内阻”实验方案的选择

根据闭合电路欧姆定律（$\varepsilon=IR+Ir$），用电流表和电压表测电池的电动势和内阻时，只要改变外电阻 R 的阻值，测出两组 I，U 的数据，代入方程组：

$$\varepsilon=U_1+I_1r$$

$$\varepsilon=U_2+I_2r$$

就可以求出电动势 ε 和内阻电阻 r①。用电流表和电压表测电池的电动势和内电阻的实验方案和方案误差如表 8-4 所示。

单就表中各个方案误差来看，很难说哪个方案好些。对此，要作方案比较必须考虑实验的（可能的）实际情况。就中学这个学生分组实验来说，一般是测量一节 1 号干电池的电动势和内电阻。如果电池不太旧，那么，其电动势在 1.5V 左右，其内阻 r′在零点几个欧姆到几个欧姆之间。电流表一般用学生用双量程直流电流表的 0～0.6A 这一挡，这时其内阻 $R_A\approx 0.125\Omega$。电压表一般用学生用双量程直流电压表 0～3V 这一挡，这时其内阻 $R_V\approx 1k\Omega$（不同型号，不同厂家生产的电流表、电压表内阻不一定相同，但数量级基本一致）。由于一般干电池的正常放电电流约为 0.3A，所以，外负载电阻 R 一般选在 5Ω以上。

根据上述实际情况，我们来对四个方案误差进行估计比较。第一，σ_ε 的比较：

方案 3，4 的误差 σ_ε 的算式是一致的，实际上都为：

$$\delta_\varepsilon=\frac{U_1-U_2}{I_2-I_1}\cdot\frac{I}{R_V}\approx\frac{r'}{R_V}$$

在现在的情况下，σ_ε 只有千分之几的大小。这一点误差是完全可以略去不计的。所以，可以认为，上述四个方案对于测量电池的电动势来说，都是可行的。

第二，σ_r 的比较。

在方案 1，2 中，由于 R_A 与 r′基本处于同一个数量级，因此，$\sigma_r=\left(\frac{R_A}{r'}\right)$ 可有 10^{-2}～10^{-1} 的数量级。既使在中学物理实验中，这样大的误差也是不能容忍的。而在方案 3，4 中，由于 $R_V>>r'$，所以，σ_r 可忽略不计。

综合上述，我们应选择方案 3 或方案 4。

将方案 1，2，3，4，及其方案误差算式与上例中的(6)式和(3)式比较可见，用方案 1，2 测电池内阻时，相当于用“电流表内接法测电阻”$\left[\sigma_r = \frac{R_A}{r'}\right.$与(6)式相同$\left.\right]$；用方案3，4测电池内阻时，相当于用“电流表外接法测电阻”$\left[\sigma_r = \frac{r'}{r'+R_V}\right.$与(3)式相同$\left.\right]$。因此，我们可以断定当：$r' > R_0$（$\approx\sqrt{R_A R_V}$）时，用方案1，2测电池内阻时误差较方案 3，4 小；当 $r' < R_0$ 时，用方案 3，4 测电池内阻时误差较小。这可以作为我们选择“用电流表、电压表测电池的电动势和内阻”实验方案时的一个参考依据。

四　恰当选择器材

根据误差分析，恰当地选择器材，限制影响误差的若干主要因素，将实验的最大误差控制在较小的范围内，这无论对于学生实验，还是对演示实验，都必须重视。

恰当地选择器材，一般指下述三个方面的内容。

1．根据要求选择器材

在中学物理实验中，不管是定量实验，还是定性实验，对于“量”都有一定的要求——有些是显见的、有些是隐含的。这些要求或者以人的视觉和听觉的分辨程度为依据，或者以某些理想值的大小为依据，或者以一定的教学目标、教学要求为依据。对于如何根据这些要求来选择器材的问题，前面已谈了一些，这里主要谈如何从误差理论出发来恰当地选择器材。

在选择器材时要考虑：(1)实验方案、装置形式及方案误差；(2)器材的使用情况及由此产生的系统误差（仪器误差）和偶然误差。这两方面需兼顾。也就是说需从总的误差情况及器材的来源、使用等一些非物理因素来通盘考虑。

“伏安法测电阻”实验器材的选择

(1)被测电阻 R■的选取。

根据初中教学要求，本实验采用“电流表外接法”的实验装置。

这一装置形式确定之后，为了使由测量方法所引起的系统（方案）误差尽可能小些，必须适当选择待测电阻 R_x 的值。根据本节“用伏安法测电阻实验方案的确定”中的(3)式，要使相对误差较小，则必须使 $R_x \ll R_v$。

如果我们要使$\left|\frac{\triangle R_x}{R_x}\right| < 1\%$，则$R_x < \frac{Rv}{100}$，即$R_x$的值的选取与所选用的电压表的内阻 R_V 有关。今采用中学学生实验常用的电压表，例如 0～3V，0～15V 双量限 2.5 级的直流电压表。量程 0～3V，其内阻 $R_V \approx 1k\Omega$；量程 0～15V，其内阻为 $R_V \approx 4k\Omega$。因此，R_x 可取不大于 10Ω的阻值。今试选取 R_x=5

Ω，则若用 0～3V 量程的电压表，引入的系统相对误差 0≤0.5%。对用 0～15V 量程的电压表，引入的系统相对误差可以更小。今初步确定用 R_x=5Ω 的电阻作为待测电阻。

(2)电压表、电流表的选择及使用范围的确定。根据所用实验方案，直接测量出U及I，再利用函数式$R_x=\frac{U}{I}$算出待测电阻R_x的值。根据误差理论，得出其最大的相对误差（绝对值和法）为：

$$\left|\frac{\triangle R_x'}{R_x}\right|=\left|\frac{\triangle U}{U}\right|+\left|\frac{\triangle I}{I}\right|$$

前面已确定了R_x的阻值，如使两电表的测量值在电表量限的$\frac{2}{3}$以上，若用 0～3V 表，就要求加在 R_x 两端的电压值在 2～3V 之间。由此也就确定了电流表的使用范围在 0.4～0.6A 之间。故应选择量限为 0～0.6A 的电流表。同理，若用 0～15V 的电压表，则可选择 0～3A 的电流表。

这样，由电表精度和使用范围$\left(\text{量限的}\frac{2}{3}\text{以上}\right)$决定的最大相对误差为：用 0～3V 量程的电压表，U_m=3.0V，ΔU=2.5%×3.0V=0.075V，测量时，使电压值不小于$U_{min}==\frac{2}{3}U_m=2V$，则$\left|\frac{\triangle U}{U_{min}}\right|=\frac{0.075}{2}=3.8\%$；用$0\sim0.6A$量程的电流表，$I_m=0.6A$，$\triangle I=2.5\%\times0.60A=0.015A$，测量时，使电流值不小于$I_{min}=\frac{2}{3}\times I_m=0.4A$，则$\left|\frac{\triangle I}{U_{min}}\right|=3.8\%$。

由于两电表表面的最小刻度为 0.1V 和 0.02A，所以由读数偏差所决定的最大误差为：

$$\left|\frac{\triangle U}{U_{min}}\right|=\frac{0.01}{2}=0.5\%,\quad \left|\frac{\triangle I'}{I_{min}}\right|=\frac{0.002}{0.4}=0.5\%$$

用 0～3A 表和 0～15V 表所定的最大误差均与上述相同。(3)电源电压的选择和待测电阻 R_x′的额定电流的确定。根据上述讨论，若取 R_x=5.0Ω，考虑到电压表及电流表的测量范围的限制，可以试提出如下表所列的两种器材选择方案。

表 8-5

方案	待测电阻 R_x	电压（V）	电流（A）	电源电压（V）
1	5.0 Ω，额定电流不小于 0.6A	2.0～3.0	0.40～0.60	不大于 3.0
2	5.0 Ω，额定电流不小于 3.0A	10.0～15.0	2.0～3.0	不大于 15

(4)实验器材方案的最终确定。

比较上面试提出的两个方案可见，方案 1 有较多的优点：第一，需要电源电压低、材料省；第二，待测电阻中通过的电流小、热功率小，电阻因温度升高带来的影响小。因此，决定选用方案 1。下面来拟定器材。

①电源若用 J1202 型学生电源，则只能选择 2V 挡。这时，待测电阻可选用 J2358 型 5Ω，1.5A 的电阻圈，也可用电炉丝，如在 300W 以上的电炉丝截取 5Ω左右一段制成。在这种情况下，系统误差（方案误差和仪器误差）约为：

$$\delta=3.8\%+3.8\%=7.6\%。$$

②电源若用两节干电池（不太新），则一般能满足输出电压不大于 3V 的要求。但是，由于干电池的正常放电电流约为 0.3I（即负载电阻应不小于 5Ω），若电流过大，容易损坏电池，而且，电流过大，电动势下降较快，测量数据不稳定，因此，若用两节干电池做电源，待测电阻应不小于 10Ω。由此，选待测电阻的大小为 10Ω。可选用 J2358 型 10Ω，1A 的电阻圈。在这种情况下，系统误差约为：

$$\delta\approx2.5\%+5.0\%=7.5\%$$

注意：如果要用 4V 电源，实验电路需作变动，如改成图 8-5。

但由此带来的问题是，按照初中物理教学进度，“用伏安法测电阻”的实验之后才讲到滑动变阻器的结构和用法（后一个学生分组实验是“用滑动变阻器改变电流强度”）。因此，能否用图 8-6 所示的电路，需根据实际教学情况和学生情况而定。

在电流表（学生用 2.5 级 0～0.6A，0～3A 双量程直流电流表）、电压表（学生用 2.5 级 0～3V，0～15V 双量程直流电压表）既定的情况下，上面所述的对电源和待测电阻的两种选择都是可行的。

2．根据分误差的大小选择器材

实验中的每一个器材对实验结果都有程度不同的影响。这个影响的程度可由分误差的大小来反映。由误差理论可知，在误差合成时起主要作用的常常只是其中一、二项或少数几项分误差。通常某一项分误差小于最大的分误差的$\frac{1}{3}$以下时就可以略去不计。因此，我们在选择仪器时，并非每个仪器都越精密越好，而应该根据中学教学的实际和仪器可能产生的各分误差的大小来合理地选择。在选择材料时，也应该根据中学教学的实际，和它们可能产生的各分误差的大小来合理选择。无论是选择仪器，还是选择材料，下面的两个步骤是不可少的。

（1）确定分误差大小的分配；

（2）根据分误差大小分配情况，确定器材的规格。

测固体密度实验器材的选择

初二课本①要求学生用天平和量筒来测量金属块的密度，以便让学生了解量筒的使用方法和进一步熟悉天平及其操作。这样量具就已经确定了，如，用感量为 0.02 克的学生天平和最小刻度为 1cm³ 的量筒。下面要

选择金属块。假如我们选择的金属是铜块，那么，应该选择多大的铜块呢？对此，必须先确定对测量结果的要求。如果我们要求测量的结果在 5%的范围以内，也就是说要求学生正确测量的结果在 8.9±0.4g/cm³ 范围以内，那么，我们可以按下述步骤来确定铜块的大小：

（1）确定误差大小分配。

根据误差合成公式（绝对值和法）：

$$\left|\frac{\triangle\rho}{\rho}\right| = \left|\frac{\triangle m}{m}\right| + \left|\frac{\triangle V}{V}\right| \qquad (1)$$

可得由Δm，ΔV 所起的分误差之比为：

$$\frac{\frac{\triangle V}{V}}{\frac{\triangle m}{m}} = \frac{\triangle V}{\triangle m}\cdot\frac{m}{V} = \frac{\triangle V}{\triangle m}\cdot\rho \qquad (2)$$

由于 $\Delta V=\Delta V_2+\Delta V_1=1cm^3$（假定用最小分度为 1cm³ 的量筒）、Δm=0.01g，ρ≈9g/cm³，所以

$$\frac{\frac{\triangle V}{V}}{\frac{\triangle m}{m}} = \frac{1}{0.01}\times 9 = 900 \qquad (3)$$

（2）根据误差大小分配情况，确定铜块的大小。

由（3）式可知：由Δm 所引起的分误差仅是由ΔV 所引起的分误差的 $\frac{1}{900}$，因此，可以认为测量结果的误差等于由ΔV引起的误差即：

$$\frac{\triangle\rho}{\rho} \approx \frac{\triangle V}{V} \qquad (4)$$

因为：$\frac{\triangle\rho}{\rho} = 5\%$，$\Delta V = 1cm^3$，所以，由（4）式可得：

$$V = \frac{1}{0.05} = 20(cm^3)$$

由此，我们确定了实验中所要用的铜块的体积不得小于 20cm³、质量不得小于（20×8.9=）178g。

由（3）式还可看到，体积测量的误差起决定性的作用。因此，在学生天平缺乏的情况下，即使用托盘天平代替，它产生的误差比起量筒测量产生的误差来仍可略去不计。

3．根据某器材的特性（或技术参数）来选择其他器材。

用物像法测焦距

高中物理课本①要求用物像法根据公式

$\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f}$ 来测量透镜的焦距。

选择器材时首先要选择透镜。由于透镜的焦距 f 本身仅对理想的透镜

才有严格的数值，一般的球面透镜对不同颜色的光线有不同的 f 值，对通过透镜不同位置的光线（通过中心还是通过边缘）也有不同的 f 值，也就是说 f 本身存在定义误差。对于中学物理实验中常用的双凸透镜来说，这一定义误差的数量级在 2%以上（若直径 d=40㎜，则 f=100±2㎜；若直径 d=30㎜，则 f=50±2㎜）。

实验时（为讨论简单起见），取 u=v，故有：

$$u = 2f；\frac{\triangle u}{u} = \frac{\triangle f}{f}$$

如选取$f = 100 \pm 2\text{mm}$的透镜，那么，$\frac{\triangle f}{f} = 2\%$，所以

$$\frac{\triangle u}{u} \approx 2\%$$

又因为 u=200㎜ 所以Δu=4㎜。

这就是说，我们对 u 测量时，仪器误差不能超过 4㎜，因此对 u 的测量用米尺就行了。

如选取$f = 50 \pm 2\text{mm}$的透镜，那么，$\frac{\triangle f}{f} \approx 4\%$，所以

$$\frac{\triangle u}{u} \approx 4\%$$

又因为 u=100㎜，所以Δu=4㎜。

因此，不论我们选用上述两个透镜中的哪一个，对 u 的测量用米尺就已足够了，不必苛求。

五　确定操作步骤和测量方法

在确定操作步骤和测量方法前，应先分析误差来源，特别是由于测量方法和实验操作所引起的误差因素及其影响程度。然后，通过分析（设想）、比较，确定能够消除或减小误差的操作和测量方法。

例如，在用天平测量时，由于天平中间刀口的距离总会有微小差别，使天平支点两边力臂不相等而造成测量误差。为消除这一误差可用复称法、替代法、减码法等测量方法。再如，在用惠斯登电桥测电阻时，为了减小由于滑线电阻不均匀所造成的误差，可用交换待测电阻 R_x 和电阻器 R_0 的测两次的方法——分别测得两个 R_x 的值 R_{x_1} 和 R_{x_2}，然后用公式

$$R_x = \sqrt{R_{x_1} \cdot R_{x_2}}$$

算得待测电阻的阻值。

六　更好地处理数据

实验数据处理不当，也会引入误差，或增大误差。因此在处理实验数据或确定处理数据的方法时，应该考虑由此对误差的影响程度。

从电磁打点计时器打出的“纸带”求得加速度

为处理纸带方便起见，对纸带上的一列点子应标上计数号码。标注计数号码的方法因实验要求不同而异。

一般来说，纸带上第一点对应于物体静图 8-7 止时的位置，而第一点和第二点之间的位移不一定正好是物体在最初 0.02 秒时间内的位移，所以，除非特殊要求，通常将计数起点 0 选在靠近第一点的某一清晰点上。以后各点顺序标以计数号码 1，2，…，n-1，n，n+1，…考虑到实验中加速度常不很大（有时点较密集）；不一定要算出各点（时刻）的即时速度；读数误差的影响及数据处理简便等因素，计数点常不以各点顺序逐点标注，而是间隔几个相同数目的点子来标。图 8-7 是每隔 3 个点标有一个计数号码。间隔几个点子，取几个计数点可根据具体情况而定。有时甚至可以根据纸带的有效长度，只取间隔点子尽可能多的 3 个计数点。物体做匀变速直线运动，其加速度常用下述公式计算法和图像法确定。

1．公式计算法

①根据匀变速直线运动中加速度的定义来计算。

$$a=\frac{v_n-v_i}{(n-i)T} \qquad (1)$$

②根据匀变速直线运动中位移和时间的关系来计算。如果将打出的第一个点（v_0=0）作为计数起始点 0，那么

$$a=\frac{2x_n}{(nT)^2} \qquad (2)$$

如果不以第一个点为计数起始点，那么，

$$a=\frac{s_n-s_{n-1}}{T^2} \qquad (3)$$

或者

$$a=\frac{s_n-s_{n-k}}{kT^2} \qquad (4)$$

③根据匀加速直线运动中位移和速度的关系来计算。

$$a=\frac{v_n^2-v_i^2}{2(x_n-x_i)} \qquad (5)$$

2．图像法

①根据 v-t 图线，直线的斜率就是加速度：

$$a=tga\left(=\frac{\triangle v}{\triangle t}\right) \qquad (6)$$

②根据 s_n-t 图线，直线斜率为 tgα=αT，所以

$$a=\frac{tga}{T} \qquad (7)$$

根据 s_n-n 图线，直线斜率为 tgα=αT^2，所以

$$a = \frac{tga}{T^2} \qquad (8)$$

这种方法 n 总是正整数，s_n 可以用圆规直接从纸带上“移”过来，这样可省去了许多测量和计算工作。

如果用最小刻度为 1mm 的长尺来测量长度，又假定打点周期 T_0=0.02s 而且没有误差，下面就用（2）、（3）两式计算加速度值，对纸带各点测量的误差所引起的偶然误差进行分析：

第一，当用 $\alpha = \frac{2x_n}{(nT_0)^2}$ 计算时，由于

$$\delta_1 = \left|\frac{\triangle x_n}{x_n}\right| + 2\left|\frac{\triangle(nT_0)}{nT_0}\right| \qquad (9)$$

而 Δx_n 可记为 0.5mm+0.5mm=1mm，第“0”点与第“1”点之间的时间间隔与 T_0 之间的偏差可达 $\frac{1}{2}T_0$，即 Δ（nT_0）可记为 $\frac{1}{2}T_0$，所以（9）式可写成：

$$\delta_1 = \frac{1mm}{x_n} + \frac{1}{n} \qquad (10)$$

x_n 决定于纸带的有效长度，通常为 $600 \sim 800mm$，所以 $\frac{1mm}{x_n}$ 可略去不计。n 决定于加速度 α 的大小，显然，α 值越小，n 越大，δ_1 越小；α 值越大，n 越小，δ_1 越大。高中物理甲种本①介绍的牛顿第二定律实验的数据范围：$0.2m/s^2 < \alpha \le 1.2m/s^2$。若 $x_n \ge 600mm$、$n > 50$，则 $1\% < \delta_1 < 2\%$。

第二，当用（3）式 $\alpha = \frac{s_n - s_{n-1}}{T^2}$ 计算时，由于

$$\delta_n = \frac{|\triangle s_n| + |\triangle s_{n-1}|}{s_n - s_{n-1}} + 2\left|\frac{\triangle T}{T}\right| \qquad (11)$$

则（由于 $|\Delta s_n| = |\Delta s_{n-1}| = 1mm$，$\Delta T=0$）：

$$\delta_n = \frac{2mm}{s_n - s_{n-1}} \qquad (12)$$

可见，δ_n 的大小完全决定于 $s_n - s_{n-1} = x_n - x_{n-2}$ 的大校而 $x_n - x_{n-2}$ 的大小决定于各相邻计数点之间的时间间隔 T。T，$s_n - s_{n-1}$ 增大，δ_n 就减小。

因此，在T既定的情况下，用（4）式 $\alpha = \frac{s_n - s_{n-1}}{kT^2}$ 来计算 α 值比用（3）式来计算 α 值，可使 δ_n 减小。而且，当用（3）式计算 α 后求平均值，得：

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \cdot \frac{s_{n+} - s_1}{T^2} \qquad (13)$$

这与令 k=n 的（4）式完全相同（$\because s_n - s_{n-k} = s_{n+1} - s_{n+1-k}$）。

若直接用（13）式计算α，则

$$\delta_n = \frac{2mm}{s_{n+1} - s_1} \qquad (14)$$

由于 $s_{n+1}-s_1=n\alpha T^2$，所以

$$\delta_n = \frac{2mm}{naT^2} \qquad (15)$$

可证，当 n=1 时，T 最大，δ_n最小。

根据上述结论，我们可这样简捷地处理数据：尽可能选择靠近两个端点的两个清晰点（使 s 尽可能大），并使其包含的点为奇数，将所选范围内的那些点分成两半，然后量出 s_1，s_2，再用

$$a = \frac{s_2 - s_1}{t^2} \qquad (16)$$

计算。用（16）式可免去用 $\alpha = \frac{s_n - s_{n-k}}{kT^2}$ 后求平均值$\overline{\alpha}$的计算。

根据上述分析，在“用重锤落体法测重力加速度”的实验中，可这样来简捷地测出重力加速度值：取 11 个连续点，一分为二，读出前一段的长度 s_1和后一段的长度 s_2（厘米数），s_2-s_1之值就是重力加速度（单位：m/s²）的实验值。

从上面对（2）、（3）式的误差分析综合来看，对于加速度较小的实验，这两个公式（两种方法）都可用，因为它们产生的误差相差无几，而且，这些误差都比方案误差小。如，从甲种本①所提供的数据（略）可见，对于α-F 关系实验，其方案误差在 1.5%～3%之间；对于第一种方法计算α时的最大误差（设 s=600mm）只在 1%～1.8%之间；对于α-M 关系实验，其方案误差在 7.7%～18%之间。即使用了乙种本②所提供的实验方法，方案误差也在 2%～4.1%之间，而用（2）式计算α的误差只在 1%～2%之间。但是，由于（2）式的误差随着加速度的增大而增大，而（3）式的误差（基本上）与加速度的大小无关，因此，对于加速度较大的实验（如用电磁打点计时器测重力加速度 g），这两种方法的误差相差很大。若以王兴乃等主编的《中学物理实验·上册》③中的一条（测 g 值）纸带的数据为例，可以大致看出其差异的大小。

如用（2）式，n=18，s=605mm，则

$$\delta_1 \approx \frac{1}{605} + \frac{1}{18} \approx 6\%$$

如用（3）式，s_1=178.6mm，s_2=426.9mm，则

$$\delta_2 = \frac{2}{426.9 - 178.6} \approx 0.8\%$$

因此，在α较大的情况下，我们应该采用（3）式。

图像法是一种常用的处理实验数据的方法。尽管它具有简单明了、形象直观等特点，但是，由于各个 v_1（或 s_1）值有一定的误差，而且，我们不能确保作出最佳直线（亦常无法画出斜率最大和最小的直线），也不能

排除测量斜率时的误差。因此，我们不能期望从图线中得到有关误差的定量情况，更不能期望得到精确的斜率——加速度值。因此，在这个实验中，如果没有其他的特殊原因，应该采用公式法处理数据。

七　为改进实验提供依据

对于定量实验，根据误差理论来决定实验是否需要改进并了解改进的效果如何是比较可靠的。在一般情况下（或在实验可以较方便地重复多次的情况下），只需以实验的系统误差为依据，这里特别要注意仪器误差（这是易为人们所遗忘的）。对于不易重复的实验，还需考虑偶然误差。如，在温度变化的某一时刻来测温，或在电流（或电压）逐渐减小的某一时刻来测电流（如“利用电容放电来测定电容”）时，就必须考虑偶然误差。

表头内内阻的测量

1．并联半值法

高中物理课本①中学生实验“把电流表改装为电压表”是利用图 8-8 所示的电路来测定电流表的内电阻 r_g 的。图中，R 是一个（470kΩ）的电位器，R′只是电阻箱。合上开关 S_1，调整电位器 R，使电流表指针偏转到满刻度（不得超过满刻度）。然后，再合上开关 S_2，调整电阻箱 R′的阻值，使电流表指针偏转到正好是满刻度的一半。当 R 比 R′大很多时，接入 R′后，干路中电流变化不大，因此可以认为 r_g=R′。这种方法通常称为并联半值法。下面来对这一方案进行分析。

（1）实验原理。

在图 8-8 中设流过电流表的电流为 I_1，流过电阻 R′的电流为 I_2，流过总干路（R）的电流为 I，电源内阻为 r。

当只合上 S_1 时（满偏）有：

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R + r_g + r} \qquad (1)$$

再合上 S_2 时（半偏）有：

$$I_1' = \frac{\varepsilon}{R + \frac{R' r_g}{r_g + R'} + r} \cdot \frac{R'}{R' + r_g} \qquad (2)$$

由（1）、（2）式解得：

$$r_g = \frac{(I_1 - I_1')(R + r)}{I_1'\left(1 + \frac{R + r}{R'}\right) - I_1} \qquad (3)$$

在不考虑电阻箱和电流表的仪器误差的情况下，由于 $I_1 = I_g$，$I_1' = \frac{1}{2} I_g$，以此代入（3）式可得：

$$r_g = \frac{R+r}{R+r-R'}R' \qquad (4)$$

若 R》R'（如 R≥100R'）那么，R+r-R'≈R+r，因此有：

r_g=R'（5）

（2）误差分析。

①方案误差。

比较（3）、（4）两式可知，用（5）式代替（4）式引起的相对误差为：

$$\delta_1 = \left|\frac{R'-r_g}{r_g}\right| = \frac{R'}{R+r}\left(\approx \frac{r_g}{R+r}\right) \qquad (6)$$

由（6）式可见，δ_1的大小取决于 r_g与 R 大小的关系（一般电源用蓄电池或干电池，其内阻通常比 R 小得很多，可略去不计；也可将 r 当做包含在 R 之中）。如果 R≥100R'≈100r_g，那么，δ_1≤1%。R 的作用相当于一只限流电阻，它使得只合上 S_1时，电路中的电流为电表的满刻度值。因此，若要增大 R 的数值（即增大 R 与 r_g的比值，以减小δ_1的大小），就应该提高电源的电动势。如，通常实验用的电流计（如 J-DB2×A 型、J0409 型、JHK—G 型、J0409—1 型）的表头灵敏度为 300μA，内阻在100Ω左右。假如电源用一节干电池（电动势为1.5V），则$R = \frac{1.5}{3\times10^{-4}}$-100≈5000Ω，δ≈2%。若电源用二节干电池（电动势为 3V），则 R≈10000Ω，δ≈1%。若电源用三节干电池（电动势为 4.5V），则 R≈15000Ω，δ≈0.7%。

②仪器误差。

在（3）式中，考虑到实验所满足的条件：R>>R'（r 计入 R 之中或略去不计），可将（3）式近似为

$$r_g = \frac{I_1 - I_1'}{I_1'}R' \qquad (7)$$

在（7）式中，I_1，I_1'，R'的直接测量误差，都会引起 r_g的（间接测量）误差。由（7）式，根据误差公式（用绝对值和法）可得：

$$\delta_2 = \frac{|\triangle I_1|}{I_1'} + \frac{2|\triangle I_1|}{I_1 - I_1'} + \frac{|\triangle R'|}{R'} \qquad (8)$$

设：电流表的准确度等级为 k 级①；电阻箱的准确度等级为α级，常数为 b（Ω）②。那么，以 I_1=2I_1'代入上式可得：

$$\delta_2 = 6\cdot k\% + a\% + \frac{k}{R'} \qquad (9)$$

通常如 J0409—1 型电流表等的准确度为 2.5 级；简式电阻箱（J2362 型）的精度为 1.5 级，b=0.01Ω；教学用电阻箱（J2361 型和 J2361—1 型）的精度为 0.5 级，b=0.002Ω。因此，δ_2的大小为：

δ_2=15%+1.5%（9）'

或

$$\delta_2=15\%+0.5\% \quad (9)''$$

考虑到实际情况，J2362 型简式电阻箱和 J2361 型教学用电阻箱的最小步进值均为 1Ω。如果 r_g 值介于某两步进值之间（如 95.6Ω），那么，由于电流表的精度不够高，当电阻箱示数偏离 r_g 值而指示某一靠近值（如 96Ω）时，电流表指针偏离“半值”的程度不足以使人观察出，从而造成测量的误差可达 0.5Ω。对于上述的电流表来说，这个误差可达 0.5%。在这里及下面的讨论中，为方便起见，这一误差暂不记入。

综合以上所述，“并联半值法”的实验误差（最大系统误差，下同）由下式决定：

$$\delta=\frac{R'}{R+r}+6\cdot k\%+a\%+\frac{b}{R'} \qquad (10)$$

实验误差主要决定于仪器误差。对于用一般中学常用仪器来进行实验的情况来说，实验误差可达 16%左右。

即使对于中学学生实验，这样大的误差（尽管是最大系统误差）也是不能令人满意的。下面提出（或提供）若干改进方案，并对其误差情况进行分析。

2．改进方案（一）——增大电动势

不少文章对“并联半值法”仅仅进行了方案误差分析后，认为只要提高电源电动势、减少内阻，就可使误差大大减小。从我们前面的分析可见，提高电动势，必然要增大 R 的数值，这样确能减小方案误差。但是，由于方案误差比起仪器误差来说小得多，因此，提高电动势决不能使实验误差减小到可观的程度，也就是说，这个方案不能从根本上解决问题。

3．改进方案（二）——加电流表限流

在图 8-8 中，当合上 S_2 并上 R′ 后，将改变电路中的电流强度（使 I′＞I），使得流过电流表的电流 $I_1'\left(=\frac{1}{2}I_g\right)$ 不等于流过 R′ 中的电流 I_2'：

$$I_2'>I_1'$$

所以：

$$R'<r_g$$

这就使得实验值小于真实值，从而引起方案误差。

如果能使 I′=I，即 $I_2'=I_1'$，就可消除这一方案误差。为此可在电路中串连一只量程大于（稍大于）被测表的电流表 A_0，如图 8-9 所示。这样当合上 S_2 后，可调节 R′ 和 R①，

使 $I_1'=\frac{1}{2}I_g$，同时使 I′ 仍等于 I。

这个方案与前一个方案一样不能消除原有的仪器误差（而且，如果接入电流表 A_0 的准确度级别较低、量限过大，还可能由此再引入一些误差），

也不能将实验误差减小到可观的程度。

4．改进方案（三）——加毫伏表限压

如图 8-10 所示。先调 R 使其为一个较小的阻值 R_1（或调为零）。合上 S，调节 R_0 和 r，使其电流表满偏，记下毫伏表读数 U_{AB}，根据欧姆定律可得：

$$U_{AB}=I_g\ (R_1+r_g) \qquad (11)$$

然后，调节 R，r 和 R_0，使得电流表半偏，而毫伏表读数 U_{AB} 不变。此时 R 的阻值为 R_2，由此得：

$$U'_{AB}=U_{AB}=\frac{1}{2}I_g(R_2+r_g) \qquad (12)$$

由（11）、（12）两式可得：

$$r_g=R_2-2R_1 \qquad (13)$$

这一方案虽然消除了方案误差，但其由电流表、毫伏表、电阻所引起的仪器误差要比图 8-8 所示的方案大得多。故此，这方案谈不上改进。

5．改进方案（四）——串联半值法

串联半值法是在并联半值之前所采用，后为并联半值法所取代的方法。有些文章认为，只要保持如图 8-11 所示的 A，B 两端的电压恒定，那么，利用“半值法”可精确地测出 r_g 的值（原理与上一改进方案相同）。在 A，B 两端提供恒定电压的方法可以用如图 8-12 所示的分压法（如果图中的 R'比 $R_{AB}=R+r_g$ 小得很多，就可以认为 U_{AB} 不会因 R 的变化而有所改变）。这一方案的误差情况与上一方案相似，故也不宜采用。

6．改进方案（五）——测 U_g 的方法

在 I_g，U_g，r_g 三个量中，I_g 是确定的（满刻度值），如果能测得 U_g（电压灵敏度）即可利用

$$r_g=\frac{U_g}{I_g} \qquad (14)$$

求出 r_g。

要测 U_g，可用如图 8-13 所示的电路（不用分压器也可以，用分压器更便于调节）。调节 R'，R，测电流表满刻度时的毫伏表的示数 U_g，然后由公式（14）求出 r_g。

这一方案的原理比较简单明了，不存在方案误差。其实验误差完全由电表的测量误差决定：

$$\delta=\frac{\triangle U}{U_g}+\frac{\triangle I}{I_g} \qquad (15)$$

如果毫伏表的量程为 U_0，准确度级别为 e，电流表的准确度级别为 k，那么，（15）式可写成：

$$\delta=\frac{U_0}{U_g}\cdot e\%+k\% \qquad (16)$$

7．改进方案（六）——替代法（1）

将电流表作为一只未知阻值的电阻看待，如果它在电路中的作用可用一只已知阻值的电阻来替代，那么可以认为这一未知电阻的阻值与这一已知电阻的阻值相等。这种测量未知电阻的方法叫替代法。

如图 8-14 是一个替代法方案。A_0 表为一指示电表，它的量限可与 A 表基本相同。实验时，先将 S 合向“1”，调节 R'，使 A_0 表指示某一数值 I_0（在不超过 A_0 表的量限的前提下，使 I_0 尽可能大，且指示在刻度线上，以减小读数误差），记下 I_0 的数值。将 S 合向“2”，调节电阻箱 R，使 A_0 表的示数仍为 I_0。这时，电阻箱的示数 R 可看做与 r_g 相等

$$r_g=R$$

这种方案的实验误差由指示电表和电阻箱的测量误差所决定：

$$\delta=\frac{\triangle I}{I_0}+\frac{\triangle R}{R} \qquad (17)$$

如果指示电表的量限为 I，准确度为 k 级；电阻箱的级别为 α，那么上式可写为：

$$\delta=\frac{I}{I_0}\cdot k\%+a\% \qquad (18)$$

在现在所设情况下

$$\delta\approx k\%+a\% \quad (18)$$

如果指示电流表、被测表和电阻箱都用前面所说的厂制教学仪器，那么，

$$\delta=4\% \text{（用 J2362 型简式电阻箱）}$$

或

$$\delta=3\% \text{（用 J2361 型或 J2361—1 型教学电阻箱）}$$

A_0 表亦可按图 8-15 所示的电路连接（实验步骤略）。这个方案的误差与图 8-14 所示的方案的误差相同。

8．改进方案（七）——替代法（2）

如图 8-16 所示的电路也是一个替代法方案。

这个方案的误差由下式决定：

$$\delta=\frac{\triangle U}{U_0}+\frac{\triangle R}{R} \qquad (19)$$

或者写成：

$$\delta=\frac{U}{U_0}\cdot e\%+a\% \qquad (20)$$

如果没有毫伏表，是否可用一般中学都有的 J0408 型（或其他相似的）双量程（-1～3V，-5～15V）直流电压表进行实验呢（有的资料认为可以）？有一方案如下，实验电路如图 8-17 所示。

先将 S 合向“1”，调节 R'和 R，使电压表指示某一接近满刻度的读数 U_0（最好指示在某一刻度线上）。这时，电流表指针不超过满刻度，电阻箱 R 的示数为 R_1。然后将 S 合向“2”，再调节 R'和 R，使电压表示数

仍指向 U_0，这时，电阻箱 R 的示数为 R_2。由此可得：

$$r_g=R_2-R_1 \qquad (21)$$

这一方案的实验误差由下式决定：

$$\delta=\frac{U}{U_0}\cdot e\%+2a\% \qquad (22)$$

$$\delta\approx e\%+2a\% \qquad (22)'$$

如用上述中学实验常用的厂制教学仪器进行实验，那么，实验误差为：

δ≈5.5%（用 J2362 型简式电阻箱）

δ≈3.5%（用 J2361 型教学电阻箱）

按上面的分析，图 8-17 所示的方案似乎是可行的。然而，这一方案要确定可行，关键在于对于一个 U_0 值，R_1（或 R_2）是否是一个确定的值，或者说，当 R_1 在多大范围内变化时，U_0 的值看不出有所变化，R_1 的这一变化范围是否为实验所允许？如果这一变化范围过大，那么，由此而引起的实验误差就很大，这一方案就不可行。对此，可作下述分析。

设：电源电动势为 ε，内阻为 r。根据欧姆定律可得：

$$U=\frac{\varepsilon}{R+r_g+R'+r}(R+r_g) \qquad (23)$$

对上式微分可得：

$$\triangle U=\left[\frac{\varepsilon}{(R+r_g+R'+r)}-\frac{\varepsilon(R+r_g)}{(R+r_g+R'+r)^2}\right]\triangle R$$

$$=\frac{\varepsilon(r+R')}{(R+r_g+R'+r)^2}\triangle R \qquad (24)$$

设：U_0=3V，由于 $I_g=3\times10^{-4}$A，

所以，$R+r_g=\frac{U_0}{I_g}=10000\Omega$

再设：电源用两节干电池，ε=3V，r=1Ω，R'=0。因为（-1～3V）挡的直流电压表的最小分度是 0.1V，所以，可以肯定，当电压值有±0.005V 以内的波动时，电表指针决不能反映出来（这是很保守的估计）。故设ΔU=0.005V。由此，根据（24）式可得：

$$\triangle R=\frac{(R+r_g+R'+r)^2}{\varepsilon(R'+r)}\cdot\triangle U$$

$$=\frac{10001^2\times0.005}{3\times1}$$

$$=166667(\Omega)$$

如用 4 节干电池，那么，

$$\varepsilon=6V，R'+r=\frac{U}{I_g}=\frac{\varepsilon-U_0}{I_g}=10000(\Omega)$$

$$\triangle R=\frac{(10000+10000)^2}{6\times10000}\times0.005=33(\Omega)$$

如用 J1202 型学生电源，那么，最大挡电压 ε=14V，

$$R' + r \approx \frac{\varepsilon - U_0}{I_g} = 36667(\Omega)$$

$$\triangle R = \frac{(10000+36667)^2}{14\times 36667}\times 0.005 \approx 21(\Omega)$$

由上述分析可见，用中学学生实验器材来进行实验时，由于 R 的不确定性而给实验结果造成的最大误差不少于 42%（∵ $\Delta R_1=\Delta R_2=\pm 21\Omega=\pm 0.21r_g$）。因此，这一方案是不可行的。通过对图 8-17 方案的进一步分析，使我们看到了替代法的缺陷，即用以替代的电阻（R）的阻值能否（在实验允许的情况下）唯一确定的问题。由此，自然使人连想到图 8-14、图 8-15、图 8-16 所示方案的可行性问题。对此，我们就中学学生实验器材的实际情况，以图 8-14 的方案为例，来分析它的可行性问题。

设：A_0 表是与 A 表同样规格的表，即 I_g=300μA，V_g=30mV，r_g≈100Ω，流过 A_0 表的电流为 I；电池用 1 节干电池，ε=1.5V，则：

$$I = \frac{\varepsilon}{r_g + R + R' + r)}(\approx I_g) \qquad (25)$$

$$\triangle I = \frac{\varepsilon}{(r_g + R + R' + r)^2}\triangle R$$

$$\triangle R = \frac{(r_g + R + R' + r)^2}{\varepsilon}\triangle I$$

$$= \frac{\varepsilon}{I_g^{\ 2}}\cdot\triangle I \qquad (26)$$

由于 A_0 表的最小分度为 20μA，所以，当 ΔI=±1μA 时，A_0 表的指针不能反映出来（保守估计）。故此，由（26）式可得：

$$\triangle R = \frac{1.5}{(3\times 10^{-4})\times 10^{-6}} \approx 17(\Omega)$$

这说明对于图 8-14 的方案，在现在所设条件下由于 R 的不确定性，给实验造成的最大误差可达 17%，因此图 8-14 的方案也不可行，必需进一步改进。

从（26）可见，在 I_g 和 ΔI 既定（即 A_0 表既定）的情况下，ΔR 的大小主要决定于电路电动势 ε 的大小。ε 越小，ΔR 就越小。如果我们能使 ε 降低到 2 个电表的电压灵敏度大小之和的程度，即 ε=30mV+30mV=60mV，那么，由（26）式可得：

$$\triangle R = \frac{60\times 10^{-3}}{(3\times 10^{-4})^{(-2)}}\times 10^{-6}$$
$$= 0.7(\Omega)$$

这给实验造成的误差为 1%。这点误差是允许的。

这里，关键是如何提供微小的电动势。对此，可采用如图 8-18 所示的电路。

这一电路利用分压法为 A，B 两端提供微小电压。图中，R' 可由一个

定值电阻和一只阻值不大的电位器或滑线电阻组成（如图 8-19 所示），也可直接由若干定值电阻组成（如图 8-20 所示）。R″的作用在于微调 U_{BC} 的大小，以使 A_0 表的指针不超过满刻度（A 表也不超过满刻度），且指在某一刻度线上。

对于图 8-15、图 8-16 的可行性问题请读者自己分析。图 8-15、图 8-16 都应该采用图 8-18 中那样的分压形式，以确保方案可行。

比较上述 8 个方案可见：

（1）替代法的实验（系统）误差最小，仅从这方面来说，是比较理想的。但是，它要用两只电表，使器材增多，这给缺乏电流表或毫伏表的中学实验室增加了一定的困难。

（2）如果只能用或只有一只电表——待测电流计进行实验，那么，还是用“并联半值法”好。至于用提高电动势来减小方案误差的措施，并非十分重要。

总之，在条件允许的情况下，应尽可能用替代法来进行实验。

第二节　图像法的应用

图像法是处理实验数据常用的一种方法。它不仅具有简单明了、形象直观的特点，还能起到一般计算法所起不到的作用。图像法除了一些常规用途之外，在中学物理实验中，还能在下述几个方面发挥它的作用。

一　简化方法

简化方法主要指：

（1）简化实验方法；

（2）简化处理数据的方法（广言之，这也包含在实验方法之中）。这里所讲的简化，并非指步骤上（手续上、时间上）的缩简，而主要是指方法上的简化。

利用图像法常使人们较容易地抓住主要矛盾，抛开一些次要的未知因素或复杂因素，排除干扰，以使人们在确定实验方法时，不为过多的细小问题搞昏了头，在处理数据时，不为繁难的数学运算和大大小小的实验误差束缚了手脚。

玻-马定律实验

如果我们没有玻义耳-马略特定律实验装置，那么，我们就可以用一根一端封闭、粗细均匀、管中封入一段水银的细长玻璃管来进行实验（如图 8-21 所示）。采用怎样的实验方法呢？

我们要验证 pV=C（常量），常用的方法是：改变压在密封气体上面的物体（水银）的重力，测量相应的气体体积，进行若干次，以得到若干组数据：

$$p_1 = p_0 + \frac{G_1}{S}，V_1 = l_1 S$$

$$p_2 = p_0 + \frac{G_2}{S}，V_2 = l_2 S$$

$$\vdots$$

$$p_i = p_0 + \frac{G_i}{S}，V_i = l_i S$$

$$\vdots$$

$$p_n = p_0 + \frac{G_n}{S}，V_n = l_n S$$

其中，p_0 为大气压强，G_i 为压在密封气体上面的物体的重力，S 为玻璃管的内截面，l_i 为密封气柱的长度。

得到上述数据后，再看是否有：

$$p_1V_1=p_2V_2=p_3V_3=\cdots=p_nV_n$$

如相等，则说明 pV=C（常量）成立，即玻-马定律成立。这里，关键是如何改变封闭气柱上方水银柱的重力。当然，我们可以逐次向玻璃管内

灌入一定量的水银。但问题是：(1) 是否有那么多水银（对学生实验来说）？（2）学生的操作技能如何？能否确保安全？（3）能否确保玻璃管垂直（又需附加器件）？（4）是否有气压计，确保 p_0 的测量准确，等等。所有这些，都将给实验带来更多的要求和一定的困难（同时，由 p_1V_1，p_2V_2，…，p_nV_n 这几组数据的近似相等而得到 pV=C 的规律，如此归纳是不够完全的）。是否可用图像法呢？对此可这样分析。在现在的情况下，我们要验证 pV=C，也就是要验证：

$$(p_0+\rho gh)V=C \qquad (1)$$

即证：

$$(p_0+\rho gh)l=c' \qquad (2)$$

这里，l 为封闭空气柱的长度，h 为空气柱上方的水银柱竖直高度。

对于不同的 h 值，l 也有相应的变化，因此，可将 l 看做是 h 的函数。将（2）式变形得：

$$\frac{1}{l}=\frac{p_0}{C'}+\frac{\rho g}{C'}h \qquad (3)$$

从上式可见，若 $pV=C$ 成立，那么 $\frac{1}{l}h$ 图线为一直线。现在的问题是检验 $\frac{1}{l}-h$ 图线是否为一直线。

这里，关键要改变 h。改变 h 的方法有两种：一种是如前所述的改变水银柱的长度；另一种是改变水银柱的倾角，即改变玻璃管的倾角，后一种方法是极易办到的。如图 8－22 所示。

$$h=\frac{a}{L}\cdot D \qquad (4)$$

（4）式代入（3）式得：

$$\frac{1}{l}=\frac{p_0}{C'}+\frac{D\cdot\rho g}{LC'}\cdot a \qquad (5)$$

$$\frac{1}{l}=ka+b \qquad (6)$$

因此，我们只要改变玻璃管的倾斜状态，测出若干个状态下的 a 值和 l 值，然后，作 $\frac{1}{l}-a$ 图线，如果 $\frac{1}{l}-a$ 图线为一直线，那么，即可认为 pV=C 成立。由此可见，采用图像法之后，这一实验的实验方法和数据处理方法就简便多了。

在这一实验方法中，如果没有气压计测出准确的大气压 p_0（没有测出玻璃管的内截面积）也不影响实验的进行。而这对于前一种方法是办不到的。

液体密度的测定。

国外曾有过这样一个实验试题：“试用大号试管、铅丸、学生用刻度尺、米尺、缸和水测定某液体——可能是甲醇、酒精等的混和物的密度。”

由于没有答案，下面我们来分析一下应该用怎样的方法测定该液体的密度。

这里，器材中没有天平。对此，人们一般很容易想到利用阿基米德定律，通过比较测得待测液体的密度。方法是：在大试管中装适量的铅丸，使其能竖直地浮在待测液体和水中，设待测液体密度为 ρ_x，根据阿基米德定律有：

$$G=\rho_x gV_x$$

$$G=\rho_{水} gV_{水}$$

故有：

$$\rho_x gV_x=\rho_{水} gV_{水} \qquad (1)$$

$$\rho_x=\frac{V_{水}}{V_x}\rho_{水} \qquad (2)$$

由（2）式可见，只要比较试管排开水的体积 $V_{水}$和排开待测液体的体积 V_x 就能测出未知密度 ρ_x。问题是如何比较 $V_{水}$和 V_x。如果试管是平底试管，那么，我们可以通过试管进入液体的长度 l 而进行比较。如图 8－23 所示。

$$\frac{V_{水}}{V_x}=\frac{l_{水}}{l_x}=\frac{H-h_{水}}{H-h_x} \qquad (3)$$

用直尺量出H，$h_{水}$，h_x后，即可求出 $\frac{V_{水}}{V_x}$。但是，现在的试管不是平底试管（如图 8－24 所示）。如要用上述方法，需对试管底部圆端进行修正。即用 H_0 来代表（3）式中的 H（设试管所能排开液体的最大体积为 V_m，那么，$H_0S=V_m$）。尽管我们能够通过一系列的测量值，求出若干个 H_0 的个别值，然后求出 H_0 的平均值[求出 H_0 后，再根据（2）、（3）两式求出若干个 ρ_x 的值，最后求出 ρ_x 的平均值]，但这样做无论从实验方法还是从数字运算等方面来看，都显得繁琐。

能否不用求 H_0，即用不对试管底部圆端进行修正的方法来进行实验呢？对此，可以先这样分析。从图 8-24 来看：

$$H_0=H-a \qquad (4)$$

这里，H 以及 H_0 与 H 的差值 a 都是一定的。因此，根据（4）、（2）、（3）式，可得：

$$\rho_x=\frac{H-a-h}{H-a-l}\rho_{水} \qquad (5)$$

（5）式中用 h 代替 $h_{水}$，l 代替 h_x。由于 $\rho_{水}$=1kg//m³，所以若取 ρ_x 的单位为 kg/m³，那么，由（5）可得：

$$h=\rho_x l+(1-\rho_x)(H-a) \qquad (6)$$

由（6）式可见，如果我们将 h，l 的单位长度取得相同，那么 h-l 图线为一直线，其斜率在数值上就等于待测液体的密度值。

由此，我们可逐次在试管中加铅丸，并将其分别竖直地浮在待测液体和水中，分别测得 l_1 和 h_i；测得若干组数据后，在单位长度相同的直角坐标上作出图线（直线），然后得其斜率值 ρ_x 即可。

由上可见，这里用了图像法之后，就简便多了。

二　抑制若干误差因素的影响

作图描线的过程，实际上是根据图线的总的趋势（大部分数据的离散情况），对各实验数据进行修正，而画出一条“平均线”的过程。在这一过程中，偶然误差的影响将被大大降低。这就为我们抑制若干主要的误差因素的影响提供了一种有效的方法。

玻-马定律实验

高中课本①，都要求用一个带有刻度的针筒来验证玻-马定律。如示意图 8—25 所示，逐次改变加在针筒活塞上的砝码的重量 G，然后期望得到各个

$$\left(p_0+\frac{G_0+G_i}{S}\right)\cdot V_i$$

都相等的结论（上面 G_0 为活塞和框架的重量）。

事实上，上面的算法是近似的。由于针筒活塞与针筒内壁之间的摩擦力 f 的影响，使得封闭气体所承受的压力，除大气压力之外是 G_0+G_i+f。而 f 可正可负！针筒出厂时的松紧程度不同、使用时间的长短不同、操作情况不同、活塞上涂的润滑剂不同，f 的大小就不同。这就使得各个 p_iV_i 有较大的差异，如采用图像法，那么，f 的影响就可大大降低。

按原理，我们实际上要验证：

$$\left(p_0+\frac{G_0+G+f}{S}\right)\cdot V=C \qquad (1)$$

将上式变形可得：

$$G=\frac{CS}{V}-(p_0S+G_0+f) \qquad (2)$$

由于f的影响将使坐标图上各个点$\left(G_i,\ \frac{1}{V_i}\right)$有所离散。但，由于f可正可负，这就使得这种离散程度可以在描线时得到修正。因此，当我们按中学的要求，不计摩擦力 f，而按

$$G=\frac{CS}{V}-(p_0S+G_0) \qquad (3)$$

或按（∵V=LS）

$$G=\frac{CS}{SL}-(p_0S+G_0)$$
$$=\frac{C}{L}-(p_0S+G_0) \qquad (4)$$

这一函数式作$G-\frac{1}{L}$图线时，仍能得到一条直线，并由此而验证pV=C这个规律。

三　便于对实验进行深入分析

物理图像能直观地显示相应的物理量之间的相互关系和变化规律，反应一定的物理原理。图像不仅反应了物理量在若干个特定条件下的数值和状态，而且常能反应一般情况下的数值和状态。因此，我们可以由若干个特定条件下得到的数据，绘出图像，然后，根据这一图像去推测其他条件下（状态下）的可能数据，并由此进行分析，以得到尽可能多的实验结论，或期望得到我们的实验无法直接得到的实验数据。对此，用得比较多的是“外推法”。中学物理常用的“外推法”是将图线经过适当延长，使之与坐标轴相交，然后，研究其交点所赋予的物理意义及由此而说明的物理原理。

气体的等容变化（查理定律）

用如图8－26的装置来研究气体的等容变化规律（实验过程略）。通过实验，得到一组压强p和温度t的对应数据（略），由实验数据表明：一定质量的气体，在体积不变的情况下，它的压强随着温度的升高而增大，随着温度的降低而减小。

如果我们将p，t的对应数据在p-t图上标出，并以此绘出p-t图线的话（如图8－27），那么，我们就可以由此图线而（近似得到以下结论：

（1）p随t的增大而线性增大。

（2）图线在纵坐标上的交点为p_0，它是t=0时的压强值，直线的斜率为$\frac{\triangle p}{\triangle t}\approx\frac{1}{273}$，由此可知，p随t的变化规律为：

$$p=p_0\left(1+\frac{\triangle p}{\triangle t}\cdot t\right)$$

$$p=p_0\left(1+\frac{t}{273}\right) \qquad (1)$$

这就是查理定律①，。

（3）图线的反向延长线与横坐标的交点约为-273℃。如果我们将纵坐标向左平移至－273℃这一点②，，那么，我们可以认为p与t+273（℃）成正比：

p=k（t+273）（2）

或写成：

$$\frac{p}{t+273}=k \qquad (3)$$

如果我们用一个新的温度T，使得：

$$T=t+273 \qquad (4)$$

那么，（3）式就可以写成：

$$\frac{p}{T}=k \qquad (5)$$

这个新的温度 T 被称为热力学温度。因此，查理定律可以表述为：一定质量的气体，在体积不变时，它的压强跟热力学温度成正比。

显然，如果不用图像法处理 p，t 的实验数据，要得到上述三个结论是困难的。

用电流表和电压表测电池的电动势和内电阻

高中物理课本①，在“用电流表和电压表测定电池的电动势和内电阻”的实验中，都要求按图 8－28 所示的电路，利用变阻器 R 测出几组 I，U 值后，在坐标纸上以 I 为横坐标，U 为纵坐标，画出 U-I 关系图像（如图 8－29 所示），并由此图像得到电池的电动势和电阻。

根据全电路欧姆定律，有：

$$U=\varepsilon-Ir \qquad (1)$$

根据图 8－29，显然有：

$$\varepsilon=U_m \qquad (2)$$

$$r=\frac{\varepsilon}{I_m}=\frac{U_m}{I_m} \qquad (3)$$

如果对图 8－29 进一步分析，我们还能得到下述四个方面的有意义的推论。

（1）从图线斜率为负可见：外电压 U 随着电流 I 的增大而减小，或随着电阻 R 的减小而减小。也就是说，电源的负载越大，电源的输出电压越小，输出电流越大①。

（2）功率问题。

U-I 图线上某一点 A，它的坐标是（I_A，U_A）。由此可得，当外电阻为 R_A 时，它所获得的电功率（即电源的输出功率）为：

$$P_A=I_A\cdot U_A \qquad (4)$$

可见，P_A 的大小等于 A 点与坐标轴所构成的矩形的面积的大小（如图 8－30 所示）②。

何时电源的输出功率 P 最大呢？当 $U=\varepsilon$ 时，$P=I\cdot U=0\times\varepsilon=0$；当 $I=I_m$，$P=I\cdot U=I_m0\times0=0$。可见，当电压（或电流）最大时，输出功率并不是最大，反而是最小。

由图 8－30 可见，要求电源的最大输出功率，亦即要求在三角形 εI_m0 中内接矩形的面积最大。由平面几何知识可知，当 $U=\frac{1}{2}$，$U_m=\frac{1}{2}\varepsilon$，$I=\frac{1}{2}I_m=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon}{r}$ 时，内接矩形的面积最大，其值为：

$$P_m = \frac{1}{2}I_m \cdot \frac{1}{2}U_m = \frac{\varepsilon^2}{4r} \qquad (5)$$

此时，R 的值多大呢？由全电路欧姆定律很容易得：

$$R=r \qquad (6)$$

（3）效率问题。

对于任意一个状态，外电阻为 R_A，电流 I_A，输出电压为 U_A 那么，显然，电源的总功率为：

$$P_{总}=I_A\varepsilon \qquad (7)$$

其输出功率（有用功）为：

$$P_{有}=I_AU_A \qquad (8)$$

其电源本身消耗的功率（无用功）为：

$$P_{无}=I_A(\varepsilon-U_A) \qquad (9)$$

反映在图像上（如图 8－31 所示）即：

$$P_{总}=S_{\varepsilon A'I_A^0} \qquad (10)$$

$$P_{有}=S_{U_AAI_A^0} \qquad (11)$$

$$P_{无}=S_{\varepsilon A'AU_A} \qquad (12)$$

由上，即可得其效率为：

$$\eta = \frac{P_{有}}{P_{总}} = \frac{U_A}{\varepsilon} \qquad (13)$$

由此，利用 U-I 图线，读出 ε，U_A 的数值后极易求得 效率。从上面的分析我们可以得到下述结论：

①（R↙→）U↙→η

②当 R=r，即 $P_A=P_m$ 时，其效率并非最大，而仅是：

$$\eta = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{2}$$

（4）充电问题。

如果将 U-I 图线向第二象限延伸，这是否又说明了什么物理规律呢？

对于图线上的某一点 B 来说（如图 8－32 所示），它的坐标为（I_B，U_B），其中 $U_B>\varepsilon$，$I_B<0$。这种情况相当于（如图 8－33 所示）利用电源（ε′，r′）给电池（ε，r）充电。从图 8—32 可见：

①加在电池（ε，r）两端的电压 U_B 越高，流过电池（ε，r）的电流就越大。

②电池的输入功率为：

$$P_B=I_BU_B \qquad (14)$$

其大小可由矩形 BU_B0I_B 的面积的大小 $S_{Bu_B0I_B}$ 来表示。其中（如图 8－34 所示）

$$S_{B'\varepsilon0I_B}=I_B\varepsilon \qquad (15)$$

即为转化为电池（ε，r）化学能的功率，而

$$S_{BU_B\varepsilon B}{}' = I_B(U_B - \varepsilon) \qquad (16)$$

即为电池内阻 r 所消耗的功率。

四　解决一些难度较大的实验的测量方法

对于大多数中学物理实验，都可以用图像法以解决一些实验方法中的难点，或替代实验数据的处理方法。特别是一些难度较大的实验，常可以用图像法来化难为易。电容器电容的测量

要测量电容器的电容，可以用容抗法。但这要学了交流电的内容后才能用。如何在学生学习了电容的概念和了解了电容器充、放电过程的基础上，来测量电容器的电容呢？从电容的计算公式：

$$C = \frac{Q}{U} \qquad (1)$$

来看，U 是容易测定的，关键在于如何测量电量 Q。按初中物理的知识，Q 可以这样求：

$$Q = I \cdot \Delta t \qquad (2)$$

I 为 Δt 时间内电路中的电流。

对于电容器上积累的电量，我们也可通过其放电（或充电）电流的大小和放电（或充电）时间的长短来求得。但是，我们知道，电容器在放电时，放电电流在逐渐变小，而且不是恒定不变（如图 8－35 所示）。因此，我们不能简单地用（2）式来计算。

于是，我们可以按图 8－36 接好电路。接通开关 S，电压表和电流表达到稳定状态后就表明充电完毕。记下这时两电表的读数，这就是以后放电时的起始电压 U_0 和起始电流 I_0。

然后，打开开关 S，即可认为电容器放电过程开始。每隔若干秒钟记下电流表的读数，直至放电电流减小到实际上无法测出（读数为零）为止。

得到一系列的对应数据 t_i 和 I_i 后，在坐标纸上作出 t-I 图像，曲线下的面积可由数方格数而近似得到。由此得到 Q 后，即可由公式

$$C = \frac{Q}{U_0}$$

求得电容器的电容。

由上述可见，用电容器放电测电容这个实验，如不用图像法，是难以进行的。