

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

高级中学物理课本（第三册）选修



力 学

在必修课中，我们学习了如何描述直线运动，并且初步学会了如何运用牛顿运动定律解决有关直线运动的力学问题。

在选修课中，我们要在这个基础上扩展和加深，进一步研究直线运动的力学问题。

水平抛出一个物体，这个物体将沿曲线落向地面。怎样描述曲线运动？怎样运用牛顿运动定律解决曲线运动的问题？解决曲线运动问题的基本方法又是什么呢？

在万有引力的作用下，地球和行星绕太阳公转，月球和人造地球卫星绕地球运转，它们的运动都近似地可以看做圆周运动。牛顿运动定律能处理地面上的各种运动，能不能处理上述天体的运动？地面上的物体与天体，它们的运动服从相同的力学规律吗？

这些都是我们在选修课中要学习的内容。

在必修课中，我们学习了动量的概念。这个概念有什么重要意义？两个运动的物体相碰，碰撞后它们将怎样运动？查德威克怎样发现并证实了原子核内存在中子？这些问题都用到动量概念和动量守恒定律。这也是选修课中要学习的重要内容。

能量是物理学中的重要概念，在必修课中，我们学习了各种形式的能量，如机械能、内能、电能、核能等等，学习了机械能守恒定律和普遍的能的转化和守恒定律。机械能在什么条件下才保持守恒？能量守恒定律有什么重要意义？用能量守恒定律处理物理学问题有什么方便之处？这又是选修课中要学习的重要内容。

通过选修课的学习，你将对力学的基本知识得到进一步理解，并逐步学会运用牛顿运动定律处理力学问题的方法。能量守恒定律和动量守恒定律是自然界中两个普遍适用的定律，运用守恒的观点为解决力学问题以至广泛的物理学问题开辟了新的途径，你在选修课的学习中将要熟悉和学会如何利用守恒定律来处理具体问题。

第一章 牛顿运动定律

这一章我们在复习必修课所讲内容的基础上，运用牛顿运动定律进一步研究直线运动的力学问题。在必修课中，我们运用牛顿运动定律研究了物体在水平面上的运动，分析了自由落体的竖直运动，那么怎样来处理物体在斜面上的运动？在必修课中我们分析了单个物体的运动，那么几个物体连结在一起的运动，例如若干节车厢连成的列车在机车牵引下的运动，又应该怎样分析？我们常常听到的超重和失重是怎么回事？你在地球上能体验超重或失重状态吗？物体对水平面的压力是否总等于物体所受的重力？这些都是本章要分析和研究的问题。

处理这些问题与必修课中处理物体在水平面上的运动，基本思路是相同的，不过问题的情况稍为复杂些罢了。通过分析这些问题，你将进一步体会和学习卓越的科学家们分析、处理事物的有效的思路和方法。这对你今后的学习和工作都将是十分有用的。

一、 矢量同一直线上的矢量运算

运用牛顿运动定律解决直线运动的力学问题，需要处理同一直线上的矢量。这一节我们要讲述同一直线上矢量的运算，以便为今后的学习作准备。我们先复习一下什么是矢量和标量，以及矢量运算的法则。

矢量和标量 在物理学中，我们可以把物理量分为两类：矢量、标量。矢量既有大小，又有方向，而且它们的运算服从平行四边形定则。力、位移、速度、加速度、动量、电场强度等等都是矢量。标量只有大小，没有方向。长度、质量、时间、温度、功、能量等等都是标量。

认识到矢量和标量的不同，这在人类的认识上是一大进步。有了矢量的概念以及矢量运算法则，人们就可以方便地处理一些只用标量概念所不能处理的问题。

两个同类的标量，只要单位相同，它们的数值就可以用代数加法来运算。比如一个质量是 8 千克，另一个质量是 4 千克。总质量就是 12 千克。矢量则不能这样运算。一个物体受到两个力，一个是 10 牛，一个是 4 牛，这两个力共同作用产生的效果不仅决定于它们的大小，而且决定于它们的方向。

我们在必修课中学过的力的合成和分解就充分说明了这一点。力的合成要按平行四边形定则来进行(图 1 - 1)。力的分解是力的合成的逆运算，也要按平行四边形定则来进行。

平行四边形定则不仅适用于力的合成，对于别的矢量(如速度矢量、电场强度矢量等等)同样适用，是矢量合成(即矢量加法)运算的普遍法则。

同一直线上的矢量的运算 如果被运算的矢量的方向在同一直线上，那么，我们就可以用带有正负号的量值把矢量的大小和方向都表示出来。为此，我们沿着矢量所在的直线选定一个正方向(图 1 - 2)，规定凡是方向跟正方向相同的矢量都取正值，凡是方向跟正方向相反的矢量都取负值，例如图中 $F_1 = 5$ 牛， $F_2 = -5$ 牛， $F_3 = 7$ 牛， $F_4 = -5$ 牛。这里，根据量值的正负号就可以知道力的方向；而力的大小等于它们的绝对值，分别是 5 牛，5 牛，7 牛，5 牛。

既然同一直线上的矢量可以用带正负号的量值来表示，它们的运算就可以简化为代数运算。

如果两个矢量大小相等而且方向相同，如图 1 - 2 中的 F_2 和 F_4 ，我们就说这两个矢量相等，写成代数式就是

$$F_2 = F_4. \quad (1)$$

如果两个矢量大小相等而方向相反，如图 1 - 2 中的 F_1 和 F_2 ，那么，它们只是符号相反，写成代数式就是

$$F_1 = -F_2. \quad (2)$$

如图 1 - 3 所示，设有两个力 F_1 和 F_2 作用在一个物上，我们可以利用加法运算求出合力 F ：

$$F = 10 \text{ 牛} + (-6 \text{ 牛})$$

即平行四边形法则，现根据全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词》改为平行四边形定则。

$$= 4 \text{ 牛. (3)}$$

这表示合力的大小是 4 牛，结果是正值，表示合力的方向与选定的正方向相同。

位移 s 、速度 v 、加速度 a 都是矢量。在必修课中我们学过匀变速直线运动的公式：

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

$$v = v_0 + a t.$$

在直线运动中，式中的 s 、 v 、 v_0 、 a 都在同一直线上。因而，这两个公式处理的是一条直线上的矢量。通常为了方便，选择初速度 v_0 的方向作为正方向；在 $v_0 = 0$ 时，选择运动方向作为正方向。在这样的选择下，对匀加速运动来说， a 的方向与 v_0 的方向相同，或者与运动方向相同， a 取正值；对匀减速运动来说， a 的方向与 v_0 的方向相反， a 取负值。它们的运算就化为代数运算。算出的 s 或 v 是正值，表示 s 或 v 的方向与选定的正方向相同；算出的 s 或 v 是负值，表示 s 或 v 的方向与选定的正方向相反。

需要强调指出的是：只有同一直线上的矢量，它们的运算才可以像上述那样简化成代数运算。这是平行四边形定则在这种特殊情况下的运用。不在同一直线上的矢量，它们的运算不能这样简单地化成代数运算。

还要注意：这里用带有正负号的量值既表示出矢量的大小，又表示出矢量的方向；如果专指矢量的大小，就要取绝对值，即矢量的大小总是正值。

练习一

(1) 对于同一条对角线，如果没有其他限制，可以做出无数个平行四边形，即同一个力可以分解为无数对分力。如果知道了两个分力的方向，或者知道了一个分力的大小和方向，能不能把一个力分解为两个确定的分力？试作图来说明。

(2) 一个物体做匀减速运动。加速度的大小等于 6 米 / 秒²，初速度 v_0 的大小为 12 米 / 秒，方向向东。用公式 $v = v_0 + a t$ 求 1.0 秒末的速度 v ，取 v_0 的方向为正方向，试写出下列各量值： $v_0 =$ ___ 米 / 秒， $a =$ ___ 米 / 秒²，求得的 $v =$ ___ 米 / 秒。 v 的方向是___。

(3) 一个做匀减速直线运动的汽车，初速度 v_0 的大小为 18 米 / 秒，方向向北。经 3.0 秒前进了 36 米，现在，用公式 $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ 求加速度 a 。取 v_0 的方向为正方向，试写出下列各量值： $v_0 =$ ___ 米 / 秒， $s =$ ___ 米，求得的 $a =$ ___ 米 / 秒²。 a 的方向是___。

(4) 如图 1 - 4 所示，一个质量为 5 千克的物体受到两个力 F_1 和 F_2 的作用。 F_1 的大小为 10 牛顿， F_2 的大小为 5 牛顿。我们用牛顿第二定律求加速度 a 。取 F_1 的方向为正方向，试写出下列各量值： $F_1 =$ ___ 牛， $F_2 =$ ___ 牛。牛顿第二定律的公式应写为：___，求得的 $a =$ ___ 米 / 秒²， a 的方向是___。

(5) 在上题中, 设该物体初速度 v_0 的大小为 2 米 / 秒, 方向与 F_2 的方向相同。用公式 $v = v_0 + at$ 求 1 秒末该物体的速度 v 。取 v_0 的方向为正方向, 试写出下列各量值: $v_0 =$ __米 / 秒, $a =$ __米 / 秒², 求得的 $v =$ __米 / 秒, v 的方向是__。

二、牛顿运动定律

下面几节，我们主要用来复习必修课中学过的有关牛顿运动定律和力的知识。同学们可以先回忆一下必修课中学过的有关内容，看看你还记得多少。然后再阅读课本，并与你自己的回忆对照一下。你会发现，有些内容是原来课本上没有的。用这种方法来学习，比你直接阅读课本，印象要深刻得多，你不妨试试看。

力学所要解决的中心课题是确定力和运动的关系。远在两千多年以前，人们已经提出了这个问题，直到伽利略和牛顿的时代，才给出了正确的答案。力是维持运动即维持物体的速度的原因，还是改变物体运动状态即改变物体速度的原因？

这是争论的焦点。伽利略利用斜面的理想实验，把经验事实和抽象思维结合起来，正确解决了上述中心课题。牛顿在伽利略等人的基础上，系统地总结了力学知识，提出了三条运动定律，建立起辉煌的牛顿力学。

牛顿第一定律 一切物体总保持原来的匀速直线运动状态或静止状态，直到有外力迫使它改变这种状态为止。牛顿第一定律告诉我们，一切物体都有保持原来的匀速直线运动状态或静止状态不变的性质，这种性质叫做惯性。牛顿第一定律又叫做惯性定律。

牛顿第一定律告诉我们，物体如果没有受到外力，它的速度的大小和方向都保持不变，即运动状态保持不变。可见，如果物体的运动状态发生改变，即有了加速度，那一定是受到外力作用的结果。力是使物体产生加速度的原因。

牛顿第二定律 物体的加速度 a 跟物体所受的合外力 F 成正比，跟物体的质量 m 成反比，加速度的方向跟合外力的方向相同。写成公式是

$$F = ma。$$

这里 F 指的是物体受到的所有外力的合力。

牛顿第二定律告诉我们，只有受到外力的作用，物体才具有加速度。在恒定的外力持续不断地作用下，物体具有持续不断的恒定加速度。外力随着时间而改变，加速度也随着时间而改变。在某一时刻，外力停止作用，加速度随即消失，物体由于具有惯性，就将保持该时刻的运动状态不再改变。

牛顿第二定律告诉我们，在相同外力的作用下，质量大的物体得到的加速度小，它的运动状态难改变，惯性大；质量小的物体得到的加速度大，它的运动状态容易改变，惯性小。因此，质量是物体惯性大小的量度。

牛顿第三定律 两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等，方向相反，作用在一条直线上。

力是物体与物体之间的相互作用。甲物体对乙物体有作用力，乙物体必对甲物体有反作用力。把力分成作用力和反作用力，并不是绝对的，我们可以把相互作用中的任一个力叫做作用力，另一个就叫做反作用力。并不是先有作用力，然后才有反作用力。作用力和反作用力同时出现，同时消失，分别作用在相互作用的两个物体上。

地球吸引地面上的物体，物体也同时吸引地球，在地球与物体之间存在着作用力和反作用力。两个电荷之间的相互吸引或相互排斥的库仑力，是作用力和反作用力。两个磁极之间相互吸引或相互排斥的磁力，也是作

用力和反作用力。

力学有两个分科：运动学和动力学。只研究物体怎样运动而不涉及运动和力的关系的学科，叫做运动学。研究运动和力的关系的学科，叫做动力学。牛顿的三条运动定律总称为牛顿运动定律，是整个动力学的基础。运动学能够描述物体怎样运动，但不能说明物体为什么做这种运动，有了动力学的知识。我们就可以知道物体为什么做这种运动，从而能够创造条件来控制物体的运动，使物体的运动符合人们的要求。因此，牛顿运动定律在实际中有极为广泛的应用，是解决力学问题的基础。

三、力

力学中经常遇到的力有重力、弹力、摩擦力。在力学中分析物体所受的力，离不开这三种力。电学中要遇到电磁力，如带电物体在电场中受到的电场力，通电导线在磁场中受到的磁场力等。

重力 由于万有引力的作用，地球上一切物体都要受到地球的吸引，这种因地球吸引而使物体受到的力，叫做重力。重力的方向总是竖直向下的（图 1 - 5）。我们可以认为物体各部分受到的重力作用都集中到一点，这一点叫做重心。有规则形状的均匀物体，它的重心就在几何中心上。

重力是使物体产生重力加速度 g 的原因。在地球上不同的地方， g 的数值略有不同，通常取 9.8 米/秒^2 。

弹力 发生形变的物体，由于要恢复原状，对跟它接触的物体会产生力的作用，这种力叫做弹力。

把一个物体放在支持面上（图 1 - 6），物体由于受到地球的吸引，而对支持面产生压力 N 。物体对支持面的压力 N ，支持面对物体的支持力 N' ，都是弹力。压力和支持力分别是因物体和支持面发生压缩形变而产生的。压力和支持力的方向都垂直于支持面，压力 N 指向支持面，支持力 N' 指向被支持的物体。 N 和 N' 是一对作用力和反作用力。

把一个物体挂在绳子上（图 1 - 7），物体由于受到地球的吸引而对绳产生拉力。物体对绳的拉力 F ，绳对物体的拉力 F' ，也都是弹力。拉力 F 和拉力 F' ，分别是因物体和绳发生拉伸形变而产生的。这两个力的方向都是在拉紧的绳的方向上，拉力 F 指向拉伸绳的方向， F' 指向绳收缩的方向，它们是一对作用力和反作用力。

摩擦力 与弹力一样，摩擦力也发生在两个互相接触的物体之间。当一个物体在另一个物体表面上做相对滑动时，要受到另一个物体阻碍相对滑动的力，这种力叫做滑动摩擦力。滑动摩擦力的方向总跟接触面相切，并且跟物体的相对滑动的方向相反。滑动摩擦力的大小 f 跟压力 N 的大小成正比，即

$$f = \mu N,$$

其中 μ 是滑动摩擦系数。 μ 只跟接触面的状况有关，相互摩擦的两个物体的材料不同，接触面的粗糙程度不同， μ 的数值也不同。

当一个物体在另一个物体的表面上静止但有相对运动趋势时，要受到另一个物体阻碍发生相对运动的力，这种力叫做静摩擦力。静摩擦力的方向总是跟接触面相切，并且跟相对运动趋势的方向相反。所谓相对运动趋势的方向，就是设想如果不存在静摩擦力时，物体要发生的相对运动的方向。

两物体之间的静摩擦力，大小不是固定不变的，但在一定的压力下存在一个最大值 f_m ，叫做最大静摩擦力。实际存在的静摩擦力 f 的大小，根据具体情况的不同，取值范围在零和最大静摩擦力之间，即 $0 < f \leq f_m$ 。

自然界的四种相互作用

在力学中经常遇到的有重力、弹力和摩擦力，在热学中要遇到分子力，在电学中要遇到电磁力。重力、弹力、摩擦力、分子力、电磁力等，可认为它们是属于不同性质的力。其实，这种认识只是反映了人们对力的认识的一个阶段。随着科学的发展，人们对力的探索已经从宏观物体进入到原子、分子的微观领域，因而对力的认识也进一步深化了。现代科学研究告诉我们，通常见到的重力、弹力、摩擦力、分子力、电磁力等都可以归结为两种基本的相互作用，即万有引力和电磁力。

我们从必修课中已经得知，万有引力是由于物体具有质量而在物体之间产生的一种相互作用。这种力普遍存在于宇宙万物之间。在宇宙天体之间，在宏观物体之间，在原子、分子等粒子之间，都存在着这种相互作用。两个通常的物体之间的万有引力极其微小，我们很难察觉它，可以不予考虑。但是对于质量很大的天体系统，万有引力就起着决定性的作用。在天体中质量还算很小的地球对其它物体的万有引力已经具有巨大影响，重力就是地面附近的物体由于受到地球的万有引力而产生的。

电磁力是存在于电荷之间的一种相互作用。静止电荷之间有电力，运动电荷之间除了电力外还有磁力。电力和磁力是有联系的，常常总称为电磁力。分子力、弹力、摩擦力都可以归结为电磁力。

我们知道，原子是由带正电的原子核和绕核旋转的带负电的电子组成的。分子是由原子组成的。原子核和电子之间，原子和原子之间，分子和分子之间，虽然也存在万有引力，但比起电磁力来要小得多，可以不予考虑，起决定作用的是电磁力。这就是说，原子或分子本身能够形成，是由于电磁力的作用。而原子或分子之间的电磁力就构成了我们通常所说的分子力。

当我们使物体发生形变的时候，物体中原子或分子之间的距离发生改变，原子或分子之间的电磁力要反抗物体发生形变，这就形成了我们通常所说的弹力。从原子或分子之间的电磁力来完满地解释摩擦力很为复杂，至今还没有一种很好的理论，但是大家公认摩擦力说到底也还是电磁力的一种表现。

我们看到，从宇宙天体到微小的原子，这中间只有两种基本的相互作用：万有引力和电磁力。现代科学研究已深入到原子核内部，深入到研究质子、中子等基本粒子的相互作用。人们在这个领域又发现了另外两种基本的相互作用，分别叫做强相互作用和弱相互作用。这两种相互作用这里不再介绍了。

现在，人类认识到在自然界中存在四种基本的相互作用：万有引力，电磁力，强相互作用，弱相互作用。小到比原子还小的粒子，大到宇宙天体，其间表现出很不相同的多种多样的相互作用，都可以用少数几种基本的相互作用来说明，这是物理学的巨大胜利。然而人类的认识是没有止境的。今天认为基本的相互作用有四种，明天会不会统一成更少的几种甚至一种相互作用呢？大物理学家、相对论的创立者爱因斯坦（1879~1955），晚年致力于这方面的工作，力图把万有引力和电磁力统一起来。他的努力虽然并未取得成功，但是他的思想却对物理学界有很大影响。现在有不少物理学家致力于这方面的研究，力图把四种相互作用统一起来，并且取得

了进展，电磁相互作用和弱相互作用已经得到统一。这是物理学的前沿。物理学好像一座正在施工中的大厦，它已经建筑得很壮观了，但还没有竣工，更壮观的还在后面。现在的青年学生，将来就可能成为修建这座大厦的建筑师。

四、物体受力分析

在运用牛顿定律分析问题时，经常要分析物体受力情况，正确分析物体的受力情况和运动状态是解决力学问题的关键。

在分析被研究对象的受力情况时，要把它从周围物体中隔离出来，分析周围有哪些物体对它施加力的作用，各是什么性质的力，力的大小、方向怎样，并将它们一一画在受力图上。这种分析的方法叫做隔离法。分析时，要注意不要漏掉一些确实存在的力，也不要凭空想象出并不存在的力。对于所分析出的每一个力，都应能找到施力物体。

【例题 1】在光滑的水平面上，有一辆小车 A（图 1 - 8 甲），上面放着物体 B，用水平向右的力 F 推小车，A、B 相对静止一同向右运动。讨论一下这时 A 和 B 之间的相互作用力。

解：A 和 B 之间有相互作用的弹力，物体 B 对小车 A 的压力 N 和小车 A 对物体 B 的支持力 N' 是一对作用力和反作用力（图 1 - 8 乙）。

在力 F 的作用下，小车产生加速度，而 A、B 仍保持相对静止，说明 B 也有与 A 相同的向右的加速度。根据牛顿第二定律，B 也必定受有向右的合外力。而 B 受到的重力和支持力在竖直方向，并且相互平衡。因而，使 B 产生加速度的力只能是 A 对 B 的静摩擦力 f'，方向向右。

为什么小车 A 对 B 有向右的静摩擦力呢？我们可以设想，如果 A 和 B 之间没有静摩擦力，小车 A 在力 F 作用下向右做加速运动，而物体 B 由于惯性却保持静止或匀速直线运动，它将相对于 A 向左运动。可见，B 相对于 A 静止时有向左运动的趋势，它要受到与相对运动趋势方向相反的静摩擦力，即受到方向向右的静摩擦力 f'。这时，小车 A 相对于物体 B 有向右运动的趋势，A 受到方向向左的静摩擦力 f（图 1 - 8 丙）。f 和 f' 是一对作用力和反作用力。

【例题 2】一个物体质量为 m，沿倾角为 θ 的光滑斜面加速下滑，求此物体受到的合力。

分析：沿光滑斜面下滑的物体受到两个力的作用：重力 mg 和斜面的支持力 N（图 1 - 9）。物体沿斜面的方向加速运动，从牛顿第二定律知道，合力的方向应沿斜面的方向。这时，我们可以先把重力沿互相垂直的两个方向（平行于斜面和垂直于斜面的方向）进行分解，然后再求出合力。

解：将 mg 分解为相互垂直的两个力：

平行于斜面的分力： $F_1 = mg \sin \theta$ ，

垂直于斜面的分力： $F_2 = mg \cos \theta$ 。

在垂直于斜面的方向上，运动状态没有改变，因此，在垂直于斜面方向上的两个力 N 和 $mg \cos \theta$ 彼此平衡，即 $N = mg \cos \theta$ 。

由此，可以得出：重力 mg 和支持力 N 的合力为 $mg \sin \theta$ ，方向沿斜面向下。

这里，我们先把力沿彼此垂直的两个方向分解，然后求出合力，这种方法有时很方便，今后我们还会用到。

物体的受力情况实际上往往是很复杂的。为了使问题简化，可以略去某些次要因素。例如物体在光滑平面上运动时，可以略去滑动摩擦力。物体的横截面积较小而且运动速度不大时，可以不考虑空气阻力。根据所提

问题的情况，略去某些次要因素，这在物理学上是一种常用的研究方法，应该逐渐熟悉它，掌握它。分析物体受力情况，同学们做过一些练习，有了一定经验以后，就能够根据具体情况自己判断哪些次要因素可以忽略不计了。

练习二

(1) 一个物体放在水平面上，它受到几个力的作用？各是什么性质的力？施力物体各是什么？它们的反作用力分别作用在什么物体上？

(2) 物体以某一初速度沿着光滑斜面滑上去的时候，受到几个力的作用？如果物体和斜面之间有滑动摩擦，受力情况又怎样？分别画出物体的受力图。

(3) 用垂直于墙面的力把物体紧压在墙上保持不动（图 1 - 10），这时，物体受到几个力的作用？

(4) 本节例题 1 中的小车 A 和物体 B 如果相对静止以速度 v 一起向右匀速运动，它们之间的相互作用是怎样的？如果后来小车 A 受到向左的推力 F 而减速运动，并且 A、B 仍保持相对静止，它们之间的相互作用又是怎样的？

(5) 图 1 - 11 是一架天平的示意图，用外力 F 推游码 P 向右匀速运动时，游码受到哪几个力作用？天平横梁受游码对它的什么力的作用？

五、牛顿运动定律的应用（一）

关于力和运动的关系，有两类基本问题需要处理，一类是已知物体的受力情况，要求确定物体的运动情况；另一类是已知物体的运动情况，要求确定物体的受力情况。请同学们回忆一下必修课中对这两类问题的分析思路，这一节和下一节我们将按照这种基本思路分析一些问题。

【例题 1】一个滑雪的人以 1 米 / 秒的初速度沿山坡滑下，山坡的倾角是 30° ，滑雪板和雪地的滑动摩擦系数是 0.04，求 5.0 秒内滑下的路程。

分析：这是一个已知受力情况求运动情况的问题。

研究对象显然是滑雪的人，我们把滑雪的人从周围物体中隔离出来，分析他受到哪些力。滑雪的人受到三个力（图 1—12）：重力 G ，山坡的支持力 N ，滑动摩擦力 f 。把重力 $G = mg$ 沿着平行于山坡方向和垂直于山坡方向分解成两个力 F_1 和 F_2 。滑雪人在垂直于山坡方向没有加速度，力 N 和 F_2 相互平衡。滑雪人受到的合外力就是平行于山坡方向的力 F_1 和 f 的合力，滑雪的人在这个合外力的作用下沿山坡向下做匀变速运动。

用公式 $F_{\text{合}} = ma$ 求出 a ，再用公式 $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ 即可求出位移 s ，即滑下的路程。

解：滑雪人受力如图 1 - 12 所示。把重力分解：

在平行于山坡的方向： $F_1 = mg \sin \theta$ ，

在垂直于山坡的方向： $F_2 = mg \cos \theta$ 。

N 和 F_2 相互平衡，所以滑动摩擦力的大小：

$$f = \mu N = \mu mg \cos \theta。$$

取与山坡平行而向下的方向作为正方向，根据牛顿第二定律 $F_{\text{合}} = F_1 - f = ma$ 得

$$a = \frac{F_1 - f}{m} \\ = \frac{mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta}{m}$$

$$= g (\sin \theta - \mu \cos \theta)。$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$= v_0 t + \frac{1}{2} (\sin \theta - \mu \cos \theta)$$

$$= 1.0 \times 5.0 \text{米} + \frac{1}{2} \times 9.8 \times 5.0^2 \times \left(\frac{1}{2} - 0.04 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \text{米}$$

$$= 5 \text{米} + 57 \text{米}$$

$$= 62 \text{米}。$$

【例题 2】在汽车中的悬线上挂一个小球。实验表明，当汽车做匀变速运动时，悬线将不在竖直方向，而与竖直方向成某一固定角度（图 1—13）。已知小球的质量是 30 克，汽车的加速度为 5.0 米 / 秒²，求悬线对

小球的拉力。

分析：这个问题要求我们以小球为研究对象。小球随着汽车一起做匀变速运动，小球与汽车有共同的加速度 a 。这是一个已知运动情况求力的问题。

小球的受力情况是：受重力 G 和绳的拉力 T 的作用（图 1-14）。小球除了受到这两个力以外，周围再也没有别的物体对小球施加什么力了。小球的加速度 a 正是由于 G 和 T 这两个力的合力 F 引起的，根据牛顿第二定律知道，这个合力的大小 $F = ma$ ，合力的方向与小球加速度的方向相同。已知合力 F ，又知道一个分力 G ，利用平行四边形定则不难求出另一个分力 T 。

解：小球受力情况如图 1 - 14 所示。

已知小球的质量 m 和加速度 a ，根据牛顿第二定律，可知小球所受外力的合力 $F = ma$ ，而重力 $G = mg$ 。根据平行四边形定则即可求出 T ：

$$T^2 = F^2 + G^2 = (ma)^2 + (mg)^2$$

$$T = m\sqrt{a^2 + g^2}$$

$$= 0.030 \times \sqrt{5.0^2 + 9.8^2} \text{ 牛}$$

$$= 0.33 \text{ 牛。}$$

拉力 T 的方向可以用悬线与竖直方向的角度表示出来，角 θ 可以用

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{ma}{mg} = \frac{a}{g} \text{ 求出，请同学们自己算出这个角度。}$$

根据牛顿定律从物体的受力情况确定运动情况，在实际中有重要作用。例如，指挥宇宙飞船飞行的科学工作者，他们知道飞船的受力情况，也知道飞船的初速度和初位置，因而，他们能够确定飞船在任意时刻的位置和速度。他们解决问题的思路跟我们这里讲的是一样的，只是计算相当复杂，要用电子计算机进行。

在一些实际问题中，也常常需要根据牛顿运动定律从物体的运动情况来确定力。例如，知道了列车的运动情况，根据牛顿运动定律就可以确定机车对列车的牵引力。又如，根据天文观测知道了月球的运动情况。就可以知道地球对月球的引力的情况，牛顿当初就探讨过这个问题，并进而发现了万有引力定律。

在动力学问题中，如果知道物体的受力情况和加速度，也可以测出物体的质量。这就是说，质量可以用动力学的方法来测定，本章习题中的第 10 题，就是用动力学的方法测定质量的一个有趣的题目，希望同学们好好研究一下那个题目。

练习三

(1) 一个质量是 10 克的物体沿着光滑的斜面从静止开始滑下（不计摩擦），开始滑下时的竖直高度是 10 厘米，斜面的倾角是 30° ，这个物体滑到斜面末端时的速度是多大？

另一个质量是 20 克的物体也沿着光滑的斜面从静止开始滑下，开始滑下时的竖直高度相同，斜面的倾角是 45° ，这个物体滑到斜面末端时的速度是多大？

写出速度 v 的表达式，并说明物体滑到斜面末端时的速度 v 只跟开始滑下时竖直高度 h 、重力加速度 g 有关，跟物体的质量 m 、斜面的倾角 无关。

(2) 质量是 10 千克的物体沿着长 5 米、高 2.5 米的斜面由静止开始下滑，物体和斜面间的滑动摩擦系数为 0.3。这个物体下滑的加速度是多大？从斜面顶端滑到底端需要多长时间？

(3) 一个物体在两个彼此平衡的力作用下处于静止状态。现在把其中某一个力逐渐减小到零，而保持另一个力不变，这个物体的加速度和速度的绝对值怎样变化？如果再逐渐把这个力恢复，这个物体的加速度和速度的绝对值又将怎样变化？

(4) 质量是 2.75 吨的载重汽车，在 2900 牛的牵引力作用下开上一个山坡，沿山坡每前进 1 米升高 0.05 米。卡车由静止开始前进 100 米时速度达到 36 千米 / 小时。求卡车在前进中所受的摩擦阻力。

六、牛顿运动定律的应用（二）

在实际问题中，还常常碰到几个物体连在一起，在外力作用下的运动，称为连接体的运动。若干节车厢连成的列车在机车牵引下的运动，就是连接体的运动。

【例题 1】 一辆汽车拉着一辆拖车在平直道路上行驶，汽车的牵引力是 $F = 8970$ 牛顿。汽车和拖车的质量分别是 $m_1 = 5000$ 千克和 $m_2 = 2500$ 千克，所受的阻力分别是 $f_1 = 980$ 牛顿和 $f_2 = 490$ 牛顿，求它们的加速度和汽车与拖车之间的拉力。

分析：汽车和拖车一起前进，因此它们有相同的加速度 a 。为了求出这个加速度，可以把汽车和拖车看成一个整体来分析。这个整体所受重力和支持力平衡，可不予考虑。这个整体可以认为受到三个力的作用：牵引力 F ，阻力 f_1 和 f_2 （图 1 - 15 甲）。根据牛顿第二定律，就可以求出汽车和拖车整体的加速度。

为了求出汽车和拖车之间的拉力，则需要把汽车和拖车隔离开来，分别研究它们的受力情况，再根据牛顿定律求出拉力。

解：先将汽车和拖车看成整体。它们的受力情况如图 1 - 15 甲所示。取汽车前进的方向为正方向。根据牛顿第二定律得

$$F - f_1 - f_2 = (m_1 + m_2) a。$$

由此得

$$\begin{aligned} a &= \frac{F - f_1 - f_2}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{8970 - 980 - 490}{5000 + 2500} \text{米/秒}^2 \\ &= 1.0 \text{米/秒}^2 \end{aligned}$$

再将汽车和拖车隔离开来分析。汽车受牵引力 F ，阻力 f_1 和拖车对它的拉力 T （图 1—15 乙）。拖车受汽车对它的拉力 T' 和阻力 f_2 （图 1 - 15 丙）。

根据牛顿第二定律分别对汽车和拖车列出方程

$$\text{汽车 } F - T - f_1 = m_1 a； \quad (1)$$

$$\text{拖车 } T' - f_2 = m_2 a。$$

T 和 T' 是一对作用力和反作用力，大小相等，则对拖车可以写成

$$T - f_2 = m_2 a。 \quad (2)$$

把 a 的数值代入（1）式或者（2）式，都可以求出 T 。代入（2）式求 T 比较简便些，现将 a 代入（2）式，得

$$\begin{aligned} T &= f_2 + m_2 a \\ &= 490 \text{ 牛} + 2500 \times 1.0 \text{ 牛} \\ &= 2990 \text{ 牛。} \end{aligned}$$

把（1）式和（2）式联立求解，也可以分别解出 T 和 a 。同学们可以自己解一解。

从这个例题我们可以知道，在连接体的问题中，如果不要知道各个运动物体之间的相互作用力，并且它们具有大小和方向都相同的加速度，

就可以将它们看成一个整体进行分析；如果需要知道各个运动物体之间的相互作用力，就需要把各个物体从连接体的整体中隔离出来，单独考虑它们各自的受力情况和运动情况，并分别应用牛顿第二定律及适当的运动学公式列出方程，求出未知量。

自从人造地球卫星和宇宙飞船发射成功以来，人们经常谈到超重和失重，究竟什么是超重和失重呢？我们先看一个例子：

【例题 2】升降机以 0.5 米/秒^1 的加速度匀加速上升，站在升降机里的人质量是 60 千克 ，人对升降机地板的压力是多大？如果照图 1 - 16 那样，人站在升降机里的弹簧体重计上，体重计示数是多少？

分析：人和升降机以共同的加速度上升，因而人的加速度是已知的，题中又给出了人的质量，为了能够应用牛顿第二定律，应该把人隔离开来单独研究。

人在升降机中受到两个力：重力 G 和地板的支持力 N 。升降机地板对人的支持力和人对升降机地板的压力是一对作用力和反作用力，根据牛顿第三定律，只要求出前者就可以知道后者。

解：人在 G 和 N 的合力作用下，以 0.5 米/秒^2 的加速度竖直向上运动。取竖直向上的方向为正方向，根据牛顿第二定律得

$$N - G = ma.$$

由此可得

$$\begin{aligned} N &= G + ma \\ &= m(g + a) \\ &= 60(9.8 + 0.5) \text{ 牛} \\ &= 618 \text{ 牛。} \end{aligned}$$

根据牛顿第三定律，人对地板的压力的方向也是 618 牛 。方向与地板对人的支持力的方向相反，即竖直向下。

体重计的示数，表示的是体重计受到的压力。所以，体重计的示数就是 618 牛 。

可见，升降机加速上升的时候，人对升降机地板的压力比人实际受到的重力要大。物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）大于物体所受的重力的情况称为超重现象。

升降机加速下降的时候，人对升降机地板的压力比人受到的重力小。物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）小于物体所受的重力的情况称为失重现象。这一点，同学们可以自己分析一下。

当升降机带着人和体重计一起以重力加速度 g 加速下降时，体重计的示数则为零，就好像人完全失去体重一样。物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）等于零的这种状态，叫做完全失重状态。

应当指出，物体处于超重或失重状态时，地球作用于物体的重力始终存在，大小也没有发生变化，只是物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）发生了变化，看起来好像物重有所增大或减小。

失重和开发宇宙

人造地球卫星、航天飞机进入轨道后，其中的人和物将处于失重状态。人造地球卫星、航天飞机等航天器进入轨道后，可以认为是绕地球做圆周运动。做圆周运动的物体，速度的方向是时刻改变的，因而具有加速度。在本书第三章，我们将会学到，这个加速度是指向地球中心的，它的大小等于卫星所在高度处重力加速度的大小。这跟在以重力加速度下降的升降机中发生的情况类似，这时航天器中的人和物都处于完全失重状态。

你能够想象出在完全失重的条件下会发生什么现象吗？你设想地球上一旦重力消失，会发生什么现象，在人造卫星中就会发生什么现象。物体将飘在空中。液滴绝对呈球形。气泡在液体中将不上浮。宇航员站着睡觉和躺着睡觉一样舒服，走路务必小心，稍有不慎，将会“上不着天，下不着地”（图 1 - 17）。食物要做成块状或牙膏似的糊状，以免食物的碎渣“漂浮”在空中进入宇航员的眼睛、鼻孔……。你还可以继续发挥你的想象力，举出更多的现象来。

你还可以再想一想，人类能够利用失重的条件做些什么吗？下面举几个事例，将会帮助你思考。这里所举的事例，虽然还没有完全实现，但科学家们正在努力探索，也许不久的将来就会实现。

在失重条件下，融化了的金属的液滴由于表面张力的作用，形状绝对呈球形，冷却后可以成为理想的滚珠。而在地面上，用现代技术制成的滚珠，并不绝对呈球状，这是造成轴承磨损的重要原因之一。

玻璃纤维（一种很细的玻璃丝，直径为几十个微米）是现代光纤通信的主要部件。在地面上，不可能制造很长的玻璃纤维，因为没等到液态的玻璃丝凝固，由于它受到重力，将被拉成小段。而在太空的轨道上，将可以制造出几百米长的玻璃纤维。

在太空的轨道上，可以制成一种新的泡沫材料——泡沫金属。在失重条件下，在液态的金属中通以气体，气泡将不“上浮”，也不“下沉”，均匀地分布在液态金属中，凝固后就成为泡沫金属。这样可以制成轻得像软木塞似的泡沫钢，用它做机翼，又轻又结实。

同样的道理，在失重条件下，混合物可以均匀地混合，由此可以制成地面上不能得到的特种合金。

电子工业、化学工业、核工业等部门，对高纯度材料的需要不断增加，其纯度要求为“6个9”至“8个9”，即99.9999%~99,999999%。在地面上，冶炼金属需在容器内进行，总会有一些容器的微量元素掺入到被冶炼的金属中。而在太空中的“悬浮冶炼”，是在失重条件下进行的，不需要用容器，消除了容器对材料的污染，可获得纯度极高的产品。

在电子技术中所用的晶体，在地面上生长时，由于受重力的影响，晶体的大小受到限制，而且要受到容器的污染。在失重条件下，晶体的生长是均匀的，生长出来的晶体也要大得多。在不久的将来，如能在太空建立起工厂，生产出砷化镓的纯晶体，那么，它要比现有的硅晶体优越得多，将会引起电子技术的重大突破。

在太空失重的条件下，会生产出地面上难以生产的一系列产品。建立空间工厂，已经不再是幻想。科学家们要在太空中做各种实验，青年学生也可以提出自己的太空试验设想。展开你想象的翅膀，为宇宙开发贡献一

分力量吧！

观察失重现象

找一个用过的易拉罐、金属罐头盒或塑料瓶，在靠近底部的侧面打一个洞，用手指按住洞，在里面装上水。移开手指，水就从洞中射出来。这是为什么？如果放开手，让罐子自由落下，在下落过程中，水将不再从洞中射出。实际做一做，观察所发生的现象。怎样解释这一现象？

练习四

(1) 在光滑的水平面上有两个彼此接触的物体 A 和 B，它们的质量分别是 $m_A = 40$ 千克， $m_B = 60$ 千克，一个水平向左的力 $F = 20$ 牛顿作用在物体 B 上，(如图 1—18 所示)。求它们的加速度和 A、B 之间的相互作用力。如果改用 20 牛顿水平向右的力推 A，那么，它们的加速度是多大？A、B 之间的相互作用力又是多大？

(2) 用水平推力 $F = 60$ 牛在水平直路上推一辆质量为 $M = 40$ 千克的平板车，车上放一质量为 $m = 20$ 千克的木箱，前进中车子受到的阻力为 $T = 12$ 牛。木箱在车上没有滑动，求木箱受到的静摩擦力。

(3) 某钢绳所能承受的最大拉力是 4.0×10^4 牛，如果用这条钢绳使 3.5 吨的货物匀加速上升，在 0.50 秒内发生的速度改变不能超过多大？(g 取 10 米/秒²)

(4) 弹簧秤的秤钩上挂一个 14 千克的物体，在下列各种情况下，弹簧秤的读数是多大？

以 0.28 米/秒² 的加速度竖直加速上升；

以 0.10 米/秒² 的加速度竖直减速上升；

以 0.10 米/秒² 的加速度竖直加速下降；

以 0.28 米/秒² 的加速度竖直减速下降。

*七、牛顿运动定律的适用范围

自从十七世纪以来，以牛顿定律为基础的经典力学不断发展，取得了巨大的成就。从研究最简单的质点做直线运动的力学，到研究由若干质点组成的所谓质点系做各种复杂运动的力学，从研究不变形的物体即所谓刚体的力学，到研究可变形的连续介质的力学，如流体力学和弹性力学，都属于经典力学的范围。

经典力学在科学研究和生产技术中有广泛的应用。经典力学和天文学相结合，建立了天体力学。经典力学和工程实际相结合，建立了各种应用力学，如水力学、材料力学、结构力学等等。从行星的运动到地面上各种物体的运动；从大气的流动到地壳的变动；从设计各种机械到拦河筑坝、修建桥梁和高楼大厦；从人力车、马车的运动到汽车、火车、飞机等现代交通工具的运动；从抛出石块到发射导弹、人造卫星和航天飞机——所有这些都服从经典力学的规律。经典力学在这样广阔领域内用来解决实际问题时得到的结果与实际情况相符合，证明了牛顿定律的正确性。

但是，牛顿定律和一切物理定律一样，只具有相对的真理性。这就是说，牛顿定律也有它的适用范围。

随着物理学的发展，特别是十九世纪以来电磁理论的发展，不断发现新的事实，如高速运动的电子的质量随着速度的增大而增大。这些事实，用经典力学无法加以说明，经典力学的理论与实验事实之间发生了矛盾。在这种情况下，在二十世纪初，著名的物理学家爱因斯坦（1879~1955）提出了狭义相对论，成为现代物理的开端。狭义相对论从根本上改变了我们通常对空间和时间的看法，提出了一种新的时空观。

从经典力学看来，物体的长度和时间间隔跟物体运动的速度没有关系，相对论却指明了它们跟速度的密切关系。相对论还指出，物体的质量不是固定不变的，它随着物体运动速度的增大而增大。设 m_0 为物体静止时的质量，那么，物体以速度 v 运动时，它的质量 m 可以根据相对论力学的公式计算出来。计算表明，当物体的运动速度 v 接近于光速 c 时，运动物体的质量 m 远大于它的静止质量 m_0 。例如 $v = 0.8c$ 时， $m = 1.7m_0$ ； $v = 0.95c$ 时， $m = 3.1m_0$ 。这时，经典力学就不再适用了。当物体的运动速度 v 远小于光速 c 时，虽然运动物体的质量 m 比它的静止质量 m_0 要大，但相差甚微，可以不予考虑，而认为运动物体的质量没有改变，经典力学仍旧适用。

实际上，太阳系里的一切宏观物体，如行星、卫星、人造飞船、地球上的各种交通工具以及我们通常研究的物体，它们的速度都远小于光速，都显示不出质量随速度而改变的现象。例如，地球的公转速度 $v = 3 \times 10^4$ 米/秒，以这个速度运动的物体，它的质量的改变大约只为静止质量的十万万分之五，这样微小的变化实际上是无法观测出来的。这就是说，对于太阳系里一切宏观物体的运动来说，经典力学已经足够准确了。

总之，处理低速运动问题时，经典力学是完全适用的；处理高速运动问题时，必须用相对论力学。经典力学是相对论力学在低速时良好的近似。

经典力学是在研究宏观物体的基础上总结出来的规律。随着生产和科学技术的发展，十九世纪末和二十世纪初以来，人们对物质世界的研究深入到原子内部，发现电子、质子、中子等微观粒子，不仅具有粒子性，而

且具有波动性，它们的运动规律一般不能用牛顿运动定律来说明。二十世纪初，人们建立了量子力学。用来描述微观粒子的规律性。

经典力学只适用于解决物体的低速运动问题，不能用来处理高速运动问题；经典力学只适用于宏观物体，一般不适用于微观粒子。这就是牛顿定律的适用范围。

学习的过程也是积累知识和提高能力的过程。积累，不是机械的堆砌，而是要使知识系统化。学得的知识越系统，就越便于掌握它们，越有利于深化和提高。我们在学习过程的不同阶段，要注意及时总结，归纳提高。既要巩固和深化知识，又要学到方法，提高能力。

本章小结

这一章我们复习了牛顿运动定律和力学中常见的三种力，并且着重学习了如何运用牛顿运动定律解决动力学问题。

动力学问题有两类：一类是已知物体的受力情况，要求确定物体的运动情况；一类是已知物体的运动情况，要求确定物体的受力情况。

在应用牛顿运动定律解决动力学问题时，首先要明确被研究的对象，然后分析被研究对象的受力情况和运动情况，在此基础上应用牛顿运动定律和适当的运动学公式列出方程，求得未知量。这里，正确分析物体受力情况和运动情况是解决问题的关键。

(1) 牛顿的三条运动定律，它们的内容是什么？它们告诉我们什么？它们有什么重要意义？它们的适用范围是什么？

(2) 解决动力学问题的基本思路和步骤是怎样的？你自己总结一下。

(3) 力学中常见的是哪几种力，它们各有什么特点？在分析物体受力情况时，要注意什么问题？你常出现什么错误，有什么心得？你自己总结一下。

(4) 在解连接体的问题时，在什么情况下，可以把它们看作一个整体进行分析？在什么情况下，需要用隔离法把连接体中的各个物体隔离出来，单独对它们进行分析？

(5) 如果物体所受的绳的拉力或支持物的支持力是未知的，那么，就本章学习中遇到的情况，你要根据什么规律来确定未知的拉力或支持力？

(6) 物体对水平面的压力（或水平面对物体的支持力）是否总等于物体所受的重力？在什么条件下二者相等？

(7) 悬绳对物体的拉力是否总等于物体所受的重力？在什么条件下二者相等？

(8) 什么叫超重、失重和完全失重？物体处于超重和失重状态时，地球对物体的重力是否仍存在，大小是否发生变化？

(9) 静摩擦力 f 的大小因问题情况不同，取值范围是 $0 < f \leq f_m$ 。就本章学习中遇到的情况，你要根据什么规律来确定静摩擦力的大小？

习题

(1) 你能立即说出你对地球的引力大约是多大吗？你是怎样得出的？

(2) 一辆原来静正的马车，马用力拉它。有人说马无论怎样也拉不动

车，因为马拉车，车也拉马。这两个力总是大小相等，方向相反，彼此平衡的。车仍应停在原地不动。这个说法的错误在哪里？

(3) 假如在某一时刻，地球突然停止自转，根据你学过的力学知识，你设想一下会发生什么情况？

(4) 质量为 10 千克的物体，沿倾角为 30° 的斜面由静止匀加速下滑，物体和斜面间的滑动摩擦系数为 0.25。在 2.0 秒内物体从斜面顶端下滑到底端。物体的加速度是多大？斜面有多长？(g 取 10 米/秒^2)

(5) 一个木箱沿着一个粗糙斜面匀加速下滑，初速度是零，经 5.0 秒的时间滑下的路程是 10 米，斜面的倾角是 30° ，求木箱和粗糙斜面间的滑动摩擦系数。(g 取 10 米/秒^2)

(6) A、B 两个物体用细绳连接在一起，用竖直向上的力 F 将它们提起(图 1-19)。细绳能承受的最大拉力为 100 牛，两个物体的质量分别为 $m_A = 4 \text{ 千克}$ ， $m_B = 8 \text{ 千克}$ ，要使绳子在提起物体时不被拉断，拉力 F 应在多大范围内？(取 $g = 10 \text{ 米/秒}^2$)

(7) 汽车刹车后，停止转动的轮胎在地面上发生滑动，汽车在滑动摩擦力的作用下停止前进。一辆汽车以 50 千米/时的速度在水平公路上行驶，发现前面 30 米处有意外情况，于是司机紧急刹车，这会不会发生事故？

计算时需考虑到，司机从发现情况到肌肉动作操纵制动器，要有一个短的时间——反应时间。设反应时间为 0.6 秒，轮胎与路面的滑动摩擦系数 $\mu = 0.7$ ，g 取 10 米/秒^2 。

(8) 如图 1-20 在粗糙的水平面上放一三角形木块 a，若物体 b 在 a 的斜面上匀速下滑，则

- A. a 保持静止，而且没有相对于水平面运动的趋势。
- B. a 保持静止，但有相对于水平面向右运动的趋势。
- C. a 保持静止，但有相对于水平面向左运动的趋势。
- D. a 因未给出所需数据，无法对 a 是否运动或有无运动趋势作出判断。

(1990 年全国普通高等学校招生统一考试物理试题)

(9) 有两个物体，质量为 m_1 和 m_2 ， m_1 原来静止， m_2 以速度 v_0 向右运动(图 1-21)。它们同时开始受到大小相等、方向与 v_0 相同的恒力 F 的作用，它们能不能在某一时刻达到相同的速度？分 $m_1 < m_2$ ， $m_1 = m_2$ ， $m_1 > m_2$ 三种情况来讨论。

(10) 1966 年曾在地球的上空完成了以牛顿第二定律为基础的测定质量的实验。实验时，用双子星号宇宙飞船 m_1 去接触正在轨道上运行的火箭组 m_2 ，接触以后，开动飞船尾部的推进器，使飞船和火箭组共同加速(图 1-22)。推进器的平均推力 F 等于 895 牛，推进器开动 7.0 秒钟，测出飞船和火箭组的速度改变是 0.91 米/秒。已知双子星号宇宙飞船的质量 $m_1 = 3400 \text{ 千克}$ 。求火箭组的质量 m_2 是多大。

解：推进器的推力使宇宙飞船和火箭组产生的加速度

$$a = \frac{0.91 \text{ 米/秒}}{7.0 \text{ 秒}} = 0.13 \text{ 米/秒}^2$$

根据牛顿第二定律得

$$F = ma = (m_1 + m_2) a,$$

所以

$$m_2 = \frac{F}{a} - m_1 = \frac{895}{0.13} \text{ 千克} - 3400 \text{ 千克} = 3500 \text{ 千克}。$$

实际上，火箭组的质量已经被独立地测出。实验的目的是要发展一种技术，找出轨道中另一个国家的人造卫星的未知质量。事先已测出火箭组的质量为 3660 千克，因而实验误差在 5% 以内——正好在预期的误差范围之内。

第二章 物体在重力作用下的运动

我们生活在地球上，经常遇到物体在重力作用下的运动，自由落体运动是物体在重力作用下最简单的运动。把物体以某一初速度沿竖直方向向上抛出去，物体先上升，然后下落，整个运动与自由落体不同，但轨迹仍是直线。把物体水平或者斜向上方抛出去，物体运动的轨迹是一条抛物线。同是在重力作用下运动，情况不同，有时做直线运动，有时做曲线运动。

物体在什么条件下做直线运动，在什么条件下做曲线运动？怎样描述和研究曲线运动？怎样研究竖直向上抛出的物体的运动？又怎样研究水平或斜向上方抛出的物体的运动？这些就是本章所要讲述的内容。

一、自由落体运动

这一节我们复习关于自由落体运动的知识。

物体只在重力作用下，从静止开始下落的运动，叫做自由落体运动。在有空气的空间里，当落下的高度比较小，下落的速度不是很大时，空气阻力比重力小得多，可以忽略不计，物体的下落就可以看作是自由落体运动。本章研究物体在重力作用下的运动，如不特别指明，都不计空气阻力。

实验表明，自由落体运动是初速度为零的匀加速运动。实验还表明，不同的自由落体，它们的运动情况是相同的，跟自由落体的质量没有关系。这就是说，在同一地点，一切物体在自由落体运动中的加速度都相同，这个加速度叫做自由落体加速度。这个加速度是重力引起的，也叫重力加速度。

根据牛顿第二定律，我们可以知道重力 G 跟质量 m 、重力加速度 g 的关系：

$$G = mg。$$

根据匀变速直线运动的一般公式，我们可以写出自由落体运动的速度公式和位移公式

$$v = gt ,$$
$$s = \frac{1}{2}gt^2。$$

从这两个公式我们可以知道自由落体在任一时刻的速度和位置，因而它们确定了自由落体的运动规律。

把物体以一定的初速度 v_0 沿着竖直方向向下抛出（竖直下抛运动），物体的运动规律是怎样的呢？跟自由落体的情况相同，物体也是在重力作用下运动的，它的加速度仍是重力加速度 g ；所不同的是，这时物体的运动具有初速度 v_0 ，并且， v_0 的方向与 g 的方向相同。物体做初速度不为零的匀加速直线运动。根据匀变速直线运动的一般公式，可以写出它的速度和位移公式，请你自己将它们写出来：

$$v = \underline{\hspace{2cm}} ,$$
$$s = \underline{\hspace{2cm}}。$$

实际上，无论是自由落体运动，竖直下抛运动，还是我们后面将要学到的竖直上抛运动，它们的运动规律都是牛顿运动定律和匀变速直线运动

的一般公式的具体应用。牛顿运动定律同样适用于曲线运动，后面将要学到的平抛和斜抛运动，我们可以把它们分解为两个直线运动，同样要用到匀变速直线运动的一般公式。

滴水法测重力加速度

利用水滴下落可以测出重力加速度。调节水龙头，让水一滴一滴地流出。在水龙头正下方放一个盘子，使水滴落到盘子上。要把盘子垫起来，以便能清晰地听到水滴碰到盘子的响声。

细心地调整阀门，使第一个水滴碰到盘子的瞬间，第二个水滴正好从阀门处开始下落。你一边听水滴碰盘子的响声，一边注视着阀门处的水滴，就很容易做到这一点。这样调整好之后，水滴从阀门落到盘子经过的时间，就正好等于相继滴下的两个水滴之间的时间间隔。

数出在半分钟或一分钟内滴下的水滴的数目，或者测出下落 50 ~ 100 个水滴经过的时间，就可以算出水滴下落的时间 t 。用米尺量出水滴下落的距离 s 。将 t 、 s 值代入公式 $s = \frac{1}{2}gt^2$ 中，就可以计算出重力加速度 g 。

二、竖直上抛运动

将物体以某一初速度沿着竖直方向向上抛出去，物体所做的运动叫做竖直上抛运动。竖直上抛的物体和自由落体一样，都是只在重力作用下运动的，因而，它们的加速度都是重力加速度，只是自由落体的初速度为零，而竖直上抛物体有竖直向上的初速度。

竖直上抛的物体在上升过程中，运动方向与加速度方向相反，速度越来越小，物体做匀减速运动。当速度减小到零的时候，物体上升到最大高度。然后由这个高度下落，做自由落体运动，运动方向与加速度方向相同，速度越来越大。因此，竖直上抛运动的问题可以分两步进行计算，上升过程用初速度不为零的匀变速运动公式来计算，下落过程用初速度为零的匀变速运动公式来计算，这两个过程的加速度都是重力加速度 g 。

【例题】 竖直上抛物体的初速度是 42 米/秒，物体上升的最大高度是多少？上升到最大高度用多长时间？由最大高度落回原地的速度是多大？用了多长时间？

分析：这个题目可以分上升和下落两个过程来解。

在上升过程中，物体做匀减速运动。取 v_0 的方向为正方向。加速度是重力加速度，方向竖直向下，所以取负值，即 $a = -g = -9.8$ 米/秒²。题目给了初速度 v_0 ，而物体上升到最大高度时 $v_t = 0$ ，因此，利用公式 $v_t^2 - v_0^2 = 2as$ 求出 s ，就得到最大高度；上升到最大高度所用的时间 t_1 ，可以利用公式 $v_t = v_0 + at$ 求出。

在下落过程中，物体做初速度为零的匀加速运动。取运动方向即竖直向下的方向为正方向，加速度是重力加速度，取正值，即 $a = g = 9.8$ 米/秒²。落回原地的位移值已由上升过程求出，落回原地时的速度 v ，可以利用公式 $v_t^2 = 2as$ 求出；落回原地所需的时间 t_2 ，可以利用公式 $v_t = at$ 求出。

解：（1）上升过程： $v_0 = 42$ 米/秒， $v_t = 0$ ， $a = -g = -9.8$ 米/秒²。

根据 $v_t^2 - v_0^2 = 2as$ 得到

$$s = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{(42 \text{米/秒})^2}{2 \times 9.8 \text{米/秒}^2} = 90 \text{米}。$$

根据 $v_t = v_0 + at$ ，当 $t = t_1$ 时 $v_t = 0$ ，由此得到

$$t_1 = \frac{v_0}{g} = \frac{42 \text{米/秒}}{9.8 \text{米/秒}^2} = 4.3 \text{秒}。$$

（2）下落过程： $s = 90$ 米， $a = g = 9.8$ 米/秒²。

根据 $v_t^2 = 2as$ 得到

$$v_t = \sqrt{2gs} = \sqrt{2 \times 9.8 \text{米/秒}^2 \times 90 \text{米}} = 42 \text{米/秒}。$$

根据 $v_t = at$ 得到

$$t_2 = \frac{v_t}{g} = \frac{42 \text{米/秒}}{9.8 \text{米/秒}^2} = 4.3 \text{秒}。$$

比较 t_1 和 t_2 可知，物体上升到最大高度所用的时间跟物体从这个高度

落回原地所用的时间相等；比较 v 和 v_0 可以看出，物体落回原地的速度跟抛出的初速度大小相等，但方向相反（图 2 - 1）。

请同学们思考这样一个问题。取物体上升过程中通过的某一点，那么物体由这一点上升到最大高度所用的时间，跟物体由最大高度落到这一点所用的时间，二者是否相等？物体上升时通过这一点的速度，跟下落时通过这一点的速度，二者的大小是否相等？实际计算一下。

练习一

(1) 竖直向上射出的箭，初速度是 35 米/秒，上升的最大高度是多大？从射出到落回原地一共用多长时间？落回原地的速度是多大？

(2) 用一只停表可以简便地测出玩具手枪子弹射出的速度。让子弹从枪口竖直向上射出，用停表测出子弹从射出枪口到落回原地经过的时间，即可求出子弹射出的速度。你实际做一下，并求出结果来。

(3) 竖直向上抛出的物体，初速度是 30 米/秒，经过 2.0 秒、3.0 秒、4.0 秒，物体的位移分别是多大？通过的路程分别是多长？各秒末的速度分别是多大？

(4) 以 42 米/秒的初速度竖直向上抛出一个球，球的质量为 0.5 千克，设运动过程中受到一个恒定的阻力，大小为 1 牛，它上升的最大高度是多大？上升到最大高度用多长时间？由最大高度落回原地时的速度是多大？用了多长时间？把算出的结果和课文中的例题比较一下。

三、曲线运动 运动的合成

如果不是将物体竖直向上抛出，而是水平抛出（图 2-2），物体将沿曲线运动。在必修课中我们学过，曲线运动中物体速度的方向是时刻改变的，它在某一点（或某一时刻）的瞬时速度方向，就是通过这一点的曲线的切线的方向。曲线运动中速度的方向时刻在改变，所以曲线运动是变速运动。

物体做曲线运动的条件 物体在什么条件下做直线运动，在什么条件下做曲线运动呢？

当运动物体所受的合外力为零时，加速度为零，物体做匀速直线运动。如果合外力不为零，它的方向又与物体速度的方向在同一直线上，物体就做变速直线运动：合外力与速度方向相同时，加速度与速度方向也相同，物体做加速运动；合外力与速度方向相反时，加速度与速度方向也相反，物体做减速运动。无论是哪一种情况，物体速度的方向都不改变。要改变物体速度的方向，使它做曲线运动，就需要合外力的方向与物体速度的方向不在同一直线上。让我们来观察下面的实验。

一个在水平桌面上做直线运动的钢珠，如果从侧向给它一个拉力，它的速度方向就会改变。不断对钢珠施加侧向的拉力，例如在钢珠运动的路线旁边放一根条形磁铁，钢珠就不断偏离原来的速度方向，做曲线运动了（图 2-3）。

可见，当运动物体所受合外力的方向跟它的速度方向不在同一直线上时，物体就做曲线运动。

我们知道，运动物体的加速度方向跟它所受合外力的方向相同。所以，做曲线运动的物体，它的加速度的方向跟它的速度方向也不在同一直线上。

运动的合成和分解 作为研究曲线运动的准备，我们讨论一下运动的合成和分解。

轮船渡河的运动可以看作是由两个运动组成的。假如河水不流动，而轮船在静水中沿 AB 方向行驶，那么经过一段时间轮船将从 A 点运动到 B 点（图 2-4）。假如轮船没有开动，而河水流动，那么轮船被河水冲向下游，经过相同一段时间，轮船将从 A 点运动到 A' 点。现在轮船在流动的河水中行驶，它同时参与上述两个运动，经过这段时间将从 A 点运动到 B' 点。轮船从 A 点到 B' 点的运动，就是上述两个分运动的合运动。

已知分运动的情况，可以知道合运动的情况。已知分运动在某段时间内发生的位移，应用平行四边形定则就可以求出合运动在这段时间内的位移；已知分运动在某一时刻的速度和加速度，应用平行四边形定则就可以求出合运动在那一时刻的速度和加速度。例如，知道了轮船在静水中的速度 v_1 的大小和方向，以及河水流动的速度 v_2 的大小和方向，就可以求出轮船合运动的速度 v （图 2-5）。已知分运动求合运动，叫做运动的合成。

反过来，已知合运动的情况，也可以求出分运动的情况。已知合运动求分运动，叫做运动的分解。例如，飞机以 300 千米/小时的速度斜向上飞行，方向与水平面成 30° 角。飞机斜向上飞行的运动可以看作是它在水平方向和竖直方向两个分运动的合运动，如图 2-6 把合运动的速度 v 分解成

也就是即时速度，现根据全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词》改为瞬时速度。

水平方向和竖直方向的分速度 v_x 和 v_y ，它们就是这两个分运动的速度。

$$v_x = v \cos 30^\circ = 260 \text{ 千米/小时,}$$

$$v_y = v \sin 30^\circ = 150 \text{ 千米/小时.}$$

在图 2-4 轮船渡河的例子中，由于轮船在 AB 方向是匀速行驶的，河水在 AA' 方向是匀速流动的，轮船的两个分运动的速度矢量都是恒定的，轮船的合运动的速度矢量也是恒定的，所以合运动是匀速直线运动。但一般来说，两个直线运动的合运动，并不一定都是直线运动。在轮船渡河的例子中，如果轮船在 AB 方向是加速行驶的，河水在 AA' 方向的流动是匀速的，那么轮船的合运动就不是直线运动，而是曲线运动了（图 2-7）

一些常见的曲线运动往往可以分解为两个方向上的直线运动，分别研究这两个方向上的受力情况和运动情况，就可以知道曲线运动的规律。这是研究曲线运动的基本方法。下面我们将用这种方法来研究曲线运动。

作为特例，当两个分运动在同一直线上的时候，如果两个分运动的方向相同，合位移的大小等于两个分位移的大小之和，方向跟分位移方向相同；如果两个分运动的方向相反，合位移的大小等于两个分位移的大小之差，方向跟数值大的那个分位移的方向相同。速度、加速度的情况与上述位移的情况是相同的。

一个初速度为 v_0 的匀加速直线运动，可以看作是在同一直线上的两个直线运动的合运动：一个是速度为 v_0 的匀速直线运动，另一个是初速度为零的匀加速直线运动。合运动的位移 s 是这两个分运动的位移 $s_1 = v_0 t$ 和 $s_2 = \frac{1}{2} at^2$ 之和，即 $s = s_1 + s_2 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ 。合运动的速度 v 是这两个分运动的速度 $v_1 = v_0$ 和 $v_2 = at$ 之和，即 $v = v_1 + v_2 = v_0 + at$ 。

竖直上抛运动，则可以看作是一个初速度为 v_0 的竖直向上的匀速直线运动和自由落体运动的合运动。

练习二

(1) 在由西向东行驶的炮艇上发炮，射击南岸或北岸上的目标。要击中目标，射击方向应该直接对准目标，还是应该偏东一些或偏西一些？

(2) 炮筒与水平方向成 60° 角，炮弹从炮口射出时的速度是 800 米/秒。这个速度在竖直方向和水平方向的分速度各是多大？

(3) 降落伞在下落一定时间以后的运动是匀速的。没风的时候某跳伞员着地的速度是 5.0 米/秒。现在有正东风，风速大小是 4.0 米/秒，跳伞员将以多大的速度着地？这个速度的方向怎样？

(4) 小汽艇在静水中的航行速度是 12 千米/时，当它在流速是 2 千米/时的河水中向着垂直于河岸的方向航行时，合速度的大小和方向怎样？

四、平抛物体的运动

平抛物体的运动 将物体用一定的初速度沿水平方向抛出，物体受到跟它的速度方向不在同一直线上的重力作用而做曲线运动。这样的曲线运动叫做平抛运动。打一下桌上的小球，使它以一定的水平速度离开桌面，观察小球离开桌面后的运动，我们就可以看到平抛运动的轨迹(图 2 - 8)。

平抛运动可以分解为水平方向和竖直方向上的两个分运动。在水平方向(也就是在初速度方向)上物体不受力，物体由于惯性而做匀速直线运动，速度等于平抛物体的初速度。在竖直方向上，物体受到重力的作用，并且初速度为零，物体做自由落体运动。情况是不是这样呢？我们来看下面的实验。

如图 2 - 9 所示，用小锤打击弹性金属片，A 球就向水平方向飞出，做平抛运动。同时 B 球也被松开，做自由落体运动。实验表明，越用力打击金属片，A 球的水平速度也越大，它在落地前飞出的水平距离就越远。但是，无论 A 球的初速度大小如何，它总是与 B 球同时落地。这说明平抛运动在竖直方向上是自由落体运动，水平方向速度的大小并不影响平抛物体在竖直方向的运动。

我们还可以用闪光照相的方法更精细地研究平抛运动。彩图 5 是一幅平抛物体与自由落体对比的闪光照片。可以看出，尽管两个球在水平方向上的运动不同，但它们在竖直方向上的运动是相同的，即经过相等的时间，落到相同的高度。仔细测量平抛出去的球在相等时间里前进的水平距离，可以证明平抛运动的水平分运动是匀速的。

这样，我们就可以把比较复杂的平抛运动分解成两个简单的直线运动，使问题的研究大大简化。

平抛运动的公式 既然平抛运动可以分解为水平方向的匀速直线运动和竖直向下的自由落体运动，我们就可以分别算出平抛物体在任一时刻 t 的位置坐标 x 和 y 。取水平方向为 x 轴，正方向与初速度 v_0 的方向相同；取竖直方向为 y 轴，正方向向下；取抛出点为坐标原点。加速度方向与 y 轴正方向相同，所以是正值，即 $a = g$ 。物体在任何时刻 t 的位置坐标可以由下面的公式求出：

$$\begin{aligned}x &= v_0 t, \\y &= \frac{1}{2} g t^2.\end{aligned}$$

根据这两个公式求出任一时刻物体的位置，用平滑曲线把这些位置连起来，就得到平抛运动的轨迹，这个轨迹是一条抛物线。

【例题】飞机在高出地面 0.81 千米的高度。以 2.5×10^2 千米/时的速度水平飞行。为了使飞机上投下的炸弹落在指定的轰炸目标上，应该在离轰炸目标的水平距离多远的地方投弹？

分析：从水平飞行的飞机上落下的炸弹做平抛运动(图 2 - 10)。在炸弹开始下落到击中目标这段时间 t 内，炸弹在竖直方向的位移是

$y = \frac{1}{2} g t^2$ ，在水平方向的位移是 $x = v_0 t$ ，这个位移就是炸弹开始下落的地方到轰炸目标的水平距离。已知 $v_0 = 2.5 \times 10^2$ 千米/时 = 0.069 千

米/秒， $y = 0.81$ 千米，从公式 $y = \frac{1}{2}gt^2$ 和 $x = v_0t$ 消去 t ，解出 x ，即可得到所求的结果。

解：从 $y = \frac{1}{2}gt^2$ 可以得到

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}},$$

把它代入 $x = v_0t$ 中，得到

$$\begin{aligned}x &= v_0 \sqrt{\frac{2y}{g}} \\ &= 0.069 \times \sqrt{\frac{2 \times 0.81}{0.0098}} \text{千米} \\ &= 0.90 \text{千米}.\end{aligned}$$

即应该在离轰炸目标的水平距离是 0.90 千米的地方投弹。

用尺测量玩具手枪子弹射出的速度

根据你学过的平抛运动的知识，用尺可以简便地测出玩具手枪子弹射出的速度。

让子弹从高度为 h 的地方水平射出，用卷尺量出子弹落地处到射出处的水平距离 l 和高度 h 。如果子弹射出的速度是 v_0 ，那么，

$$h = \frac{1}{2}gt^2,$$

$$l = v_0t.$$

由上面二式消去 t ，得到子弹射出的速度：

$$v_0 = l\sqrt{\frac{g}{2h}}.$$

实际做一做。

练习三

(1) 两位同学各画了一幅图，图中都用箭头标明了平抛物体在它的运动轨迹上 A、B、C 三点的加速度方向，如图 2 - 11 所示，你认为哪幅图画得正确？为什么？

(2) 从同一高度以不同的速度同时水平抛出两个质量不同的石子，下面的说法哪个对？

- A. 速度大的先着地。
- B. 质量大的先着地。
- C. 两个物体同时着地。
- D. 题中未给出具体数据，因而无法判断。

(3) 对于平抛运动下面说法哪个正确？

A. 从同一高度，以不同的速率同时抛出两个物体，它们一定同时着地，但抛出的水平距离一定不同。

B. 从不同高度，以相同的速率同时抛出两个物体，它们一定不能同时

着地，抛出的水平距离也一定不同。C. 从不同高度，以不同的速率同时抛出两个物体，它们一定不能同时着地，抛出的水平距离也一定不同。（4）从 1.6 米高的地方用玩具手枪水平射出一颗子弹，初速度是 35 米/秒，求这颗子弹飞行的水平距离。

（5）在图 2 - 12 中，树枝上的一只松鼠看到一个猎人正在用枪口对准它。为了逃脱即将来临的厄运，它想让自己落到地面上逃走。但是就在它刚掉离树枝的瞬间子弹恰好射出枪口，而松鼠在掉落过程中被击中。为什么松鼠没能逃脱厄运？

（6）在桌面上放一个小球，给小球一个水平的冲击力，使小球沿桌面滚动，并从桌面边缘水平抛出。要想测得水平抛出时的速度，应该取得什么数据？实际做一下，并求出小球抛出时的速度。

* 五、斜抛物体的运动

斜抛物体的轨迹向斜上方抛出的物体，受到跟它的速度方向不在同一直线上的重力作用而做曲线运动，这种运动叫做斜抛运动。投出的标枪和手榴弹，大炮发射的炮弹，它们的运动都是斜抛运动。做斜抛运动的物体，先是沿着曲线上升，升到最高点后，又沿着曲线下降。图 2 - 13 中的曲线 OAB 就是斜抛物体的运动轨迹，这个轨迹也是一条抛物线。

斜抛运动可以分解成这样两个方向上的分运动：一个沿着初速度的方向，在这个方向上物体不受力，由于惯性而做匀速直线运动，速度等于斜抛物体的初速度 v_0 ；另一个是竖直方向，在这个方向上物体受重力作用，做自由落体运动。（图 2 - 14）。但是，这样来分解不便于计算，因而通常还是在水平和竖直两个方向上分解（图 2 - 15），以便于利用直角坐标系进行计算。我们把初速度 v_0 分解为水平方向上的分速度 $v_x = v_0 \cos \theta$ 和竖直方向上的分速度 $v_y = v_0 \sin \theta$ ，在水平方向上，物体不受力，做匀速直线运动，速度等于 v_x ；在竖直方向上做竖直上抛运动，初速度等于 v_y 。把图 2 - 16 的闪光照片里斜抛小球的位置跟左边和下边的两幅对照图比较，就可以看出斜抛运动是上述两个分运动的合运动。

射程与射高 在斜抛运动中，从物体被抛出的地点到落地点的水平距离 X （图 2 - 13），叫做射程，物体到达的最大高度 Y 叫做射高。斜抛物体的射程与射高跟哪些因素有关呢？

用图 2 - 17 所示的装置来做实验，可以看到，在喷水嘴方向不变（即抛射角不变）时，随着容器中水面的降低，喷出的水流速度减小，它的射程也减小，射高也随着降低。

如果在喷水过程中保持容器内水面的高度不变，喷出的水流速度也就不变。改变喷水嘴的方向，可以看到，在抛射角小的时候，射程随着抛射角的增大而增大，当抛射角达到 45° 时，射程最大；继续增大抛射角，射程反而减小。但是，水流的射高一直是随着抛射角的增大而增大的（图 2 - 18）。

上面的讨论中我们没有考虑空气的阻力。实际上，抛体运动总要受到空气阻力的影响。在初速度比较小时，空气阻力可以不计，但是在初速度很大时（例如射出的炮弹），空气阻力的影响是很明显的。图 2-19 中的虚线是在理想的没有空气的空间中炮弹飞行的轨迹；实线是以相同的初速度和抛射角射出的炮弹在空气中飞行的轨迹，这种曲线叫做弹道曲线。可以看出，弹道曲线跟抛物线实际上有很大差别。用 20° 角射出的初速度是 600 米/秒的炮弹，假如没有空气阻力，射程可以达到 24 千米，由于空气阻力的影响，实际射程只有 7 千米，射高也减小了。

本章小结

本章研究了物体在重力作用下的各种运动：自由落体运动，抛体运动（竖直上抛、竖直下抛、平抛、斜抛）。平抛和斜抛是曲线运动，研究曲线运动的基本方法是运动的合成和分解。

（1）一个物体受到力的作用，在什么条件下做直线运动，在什么条件

下做曲线运动？

(2) 只受到重力作用的物体，可以做自由落体运动，也可以做各种抛体运动。物体做上述各种不同的运动，是由什么条件造成的？你能对此做个比较和总结吗？

(3) 只知道物体的受力情况，是不是就能完全得知物体的运动情况？也就是说，能知道物体在任一时刻的位置和速度，从而也知道物体运动的轨迹。如果说不能，那还需要知道什么条件？

(4) 竖直上抛运动和竖直下抛运动，可以看作是同一直线上的哪两个运动的合运动？

已知竖直上抛物体的初速度，怎样计算物体上升的最大高度，以及上升到最大高度所用的时间？怎样计算由最大高度落回原地时的速度，以及落回原地所用的时间？

(5) 平抛运动可以看成是哪两个运动的合运动？它的运动轨迹是什么曲线？怎样确定平抛运动在某一时刻的位置和速度？

(6) 水平抛出的物体，它在空中飞行的时间是由什么决定的，跟抛出时的初速度有没有关系？它飞行的水平距离是由什么决定的，跟抛出时的高度有没有关系，是怎样的关系？

* (7) 斜抛运动可以看作是哪两个运动的合运动？它的轨迹是什么曲线？初速度的大小一定时，在什么情况下，射程最大？

*(8) 平抛运动和竖直上抛运动是否可以看作是斜抛运动的特殊情况？

(9) 把你学过的各种运动（不止限于抛体运动）系统地总结一下。比如按不同的标准分一分类，讨论一下产生这些运动的条件，想一想处理这些运动的方法和思路等等。经过你自己的思考，独立地进行总结，对你的学习将会有很大帮助。

习题

(1) 将两个质量不同的物体同时竖直向上抛出，则下列说法中正确的是：

- A. 质量大的物体先着地。
- B. 质量小的物体先着地。
- C. 同时着地。
- D. 条件不足，无法判断。

(2) 已知竖直上抛物体的初速度为 v_0 ，则物体上升到 $\frac{H}{2}$ 高度（ H 为上升的最大高度）所用时间的表达式是什么？

(3) 橡皮球从 8.1 米的高处下落，着地以后竖直向上跳起。它上跳的初速度等于着地时速度的 $\frac{2}{3}$ 。球能跳起多高？从开始降落到第二次着地，共用多长时间？（不计球与地面碰撞的时间）

(4) 汽艇在静水中的速度是 10 千米/时，渡河时向着垂直于河岸的方向匀速行驶。现在河水的流速是 3 千米/时，河宽 500 米，汽艇驶到对岸需要多长时间？汽艇在河水中实际行驶的距离是多大？如果河水的流速是 2 千米/时，或 4 千米/时，汽艇驶到对岸需要的时间又分别是多长？

(5) 在 490 米的高空，以 240 米/秒的速度水平飞行的轰炸机，追击一鱼雷艇，该艇正以 25 米/秒的速度与飞机同方向行驶。试问，飞机应在鱼雷艇后面多远处投下炸弹，才能击中该艇？

(6) 以初速度 v_0 水平抛出一个物体，经过时间 t ，速度的大小为 v_t ，经过时间 $2t$ ，速度大小的表达式正确的是：

A. $v_0 + 2gt$ 。

B. $v_t + gt$ 。

C. $\sqrt{v_0^2 + 2(gt)^2}$ 。

D. $\sqrt{v_0^2 + 3(gt)^2}$ 。

(7) 有一个在水平面上做匀速运动的小车，小车里的人拿着一个小球，放开手，小球下落。在车里的人看来，小球做什么运动？在车外停在路边的人看来，小球做什么运动？

(8) 一架飞机水平地匀速飞行。从飞机上每隔 1 秒钟释放一个铁球，先后共释放 4 个。如果不计空气阻力，则 4 个球

A. 在空中任何时刻总是排成抛物线；它们的落地点是等间距的。

B. 在空中任何时刻总是排成抛物线；它们的落地点是不等间距的。

C. 在空中任何时刻总在飞机正下方排成竖直的直线；它们的落地点是等间距的。

D. 在空中任何时刻总在飞机正下方排成竖直的直线；它们的落地点是不等间距的。

(1989 年全国普通高等学校招生统一考试物理试题)

(9) 在水平路上骑摩托车的人，遇到一个壕沟(图 2-20)，摩托车的速度至少要多大，才能越过这个壕沟？(g 取 10 米/秒²)

(10) 跳台滑雪是勇敢者的运动。它是利用山势特别建造的跳台所进行的。运动员着专用滑雪板，不带雪仗在助滑路上取得高速后起跳，在空中飞行一段距离而后着陆。这项运动极为壮观。设一位运动员由 a 点沿水平方向跃起，到 b 点着陆(图 2-21)。测得 ab 间距离 $l = 40$ 米，山坡倾角 $\theta = 30^\circ$ 。试计算运动员起跳的速度和他在空中飞行的时间。(不计空气阻力，g 取 10 米/秒²)

第三章 匀速圆周运动 万有引力定律

在必修课中，我们学习了如何描述匀速圆周运动的快慢。

圆周运动是曲线运动，速度方向是时刻改变的，那么，匀速圆周运动的加速度的大小和方向又是怎样的呢？这个加速度是怎样得到的，受力情况又是怎样的呢？物体在什么样的条件下做匀速圆周运动？知道做匀速圆周运动的物体的运动情况，能不能应用牛顿运动定律确定它的受力情况？反过来又怎样？

这一章我们将和同学们一起来研究这些问题。

万有引力的概念我们并不陌生，但是万有引力定律是怎样发现的？它的具体内容是什么？它有怎样的重大意义？人造地球卫星为什么不会掉下来？通信卫星是怎么回事？这些你都知道吗？人造地球卫星绕地球的运转，月球绕地球的运转，地球和其他行星绕太阳的运转，都可以近似地看作圆周运动，把万有引力定律和匀速圆周运动的知识结合起来，可以确定人造地球卫星和天体运动的规律，你将会看到地面上物体运动的规律与天体运动的规律原来是统一的，都服从牛顿运动定律和万有引力定律。学习这一章的知识，你要好好体会这一点。

一、匀速圆周运动

同学们都熟悉圆周运动，它是一种比较常见的曲线运动。

在圆周运动中，最简单的是匀速圆周运动，研究这种简单的圆周运动是研究一般的圆周运动的基础。我们已经知道，做圆周运动的物体，如果在相等的时间里通过的圆弧长度相等，这种运动就叫做匀速圆周运动。例如，工作着的砂轮上某一点的运动、洗衣机脱水筒上某一点的运动等都是比较常见的匀速圆周运动。

我们已经学过，描述匀速圆周运动快慢的物理量有线速度、角速度和周期。下面我们先复习这几个物理量，然后找出这些量之间的关系。

线速度 匀速圆周运动的快慢，可以用线速度来描述。根据匀速圆周运动的定义，物体运动的时间 t 增大几倍，它通过的弧长 s 也增大几倍，对某一确定的匀速圆周运动来说， s 与 t 的比值不变。这个比值越大，表示单位时间内通过的弧长越长，运动得越快。这个比值称为匀速圆周运动的线速度的大小，用符号 v 表示。所以有

$$v = \frac{s}{t}。$$

线速度是相对于角速度而命名的，其实它就是物体做圆周运动的瞬时速度。因此线速度是矢量，不仅有大小，而且有方向。在匀速圆周运动中，物体在各个时刻的线速度的大小都相同，并由上式来确定。而线速度的方向是时刻改变的，在圆周上某一时刻的线速度的方向就在圆周该点的切线方向上（图 3 - 1）。

对某一确定的匀速圆周运动来说，虽然我速度的方向不断变化，但是线速度的大小保持不变。所以匀速圆周运动又可以说成是线速度大小不变的圆周运动。

角速度 角速度同样可以描述匀速圆周运动的快慢。观察连接运动物体和圆心的半径可以看出，物体在圆周上运动得越快，这个半径在同样的时间内转过的角度就越大。所以匀速圆周运动的快慢也可以用半径转过的角度（图 3 - 2）跟所用时间 t 的比值

$$\omega = \frac{\phi}{t}$$

来表示。比值 称为匀速圆周运动的角速度。

我们知道，圆心角 与弧长， s 成正比，所以匀速圆周运动中 与 t 的比值 是恒定不变的。匀速圆周运动也可以说成是角速度不变的圆周运动。

角速度的单位由角度和时间的单位决定。在国际单位制中，角速度的单位是弧度/秒，国际符号是 rad/s。

周期 做匀速圆周运动的物体运动一周所用的时间叫做周期。周期常用符号 T 表示。匀速圆周运动的周期恒定不变。

匀速圆周运动的快慢也可以用周期来描述，周期长说明物体转动得慢，周期短说明物体转动得快。

实际中，人们也常常用转数来描述做匀速圆周运动物体的快慢。所谓转数是指做匀速圆周运动的物体每分钟转过的圈数，常用符号 n 来表示。转数的单位为转/分。

线速度、角速度和周期都可以用来描述匀速圆周运动的快慢。它们之间必然有一定的关系，那么这种关系是怎样的呢？

如果物体沿半径是 r 的圆周做匀速圆周运动，那么一个周期 T 内转过的弧长为 $2\pi r$ ，转过的角度为 2π ，则线速度和角速度分别为

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

由 (1) 式和 (2) 式可得

$$v = r\omega \quad (3)$$

由以上三式可以看出描述匀速圆周运动快慢的三个物理量之间的关系。(3) 式表示，在匀速圆周运动中，线速度的大小等于角速度的大小与半径的乘积。当半径一定时，线速度与角速度成正比；当角速度一定时，线速度与半径成正比。

练习一

(1) 对于做匀速圆周运动的物体，下面哪些说法是正确的？哪些说法是错误的？为什么？

- A. 线速度不变。 B. 角速度不变。
C. 周期不变。 D. 转数不变。

(2) 月球绕地球公转的轨迹接近于圆形，它的轨道半径是 3.84×10^5 千米，公转周期是 2.36×10^6 秒。月球绕地球公转的速度是多少千米/秒？

(3) 地球自转的角速度是多大？

(4) 走时准确的大钟和小钟，它们的分针的周期、角速度都一样吗？线速度的大小呢？

(5) 电唱机转盘的转数有 $16\frac{2}{3}$ 、 $33\frac{1}{3}$ 、45 和 78 四档。求每一档的周期和角速度。

二、向心力 向心加速度

向心力 我们在上一章中已经学过，物体做曲线运动时，必然受到一个与它的运动速度方向不在同一条直线上的合外力的作用。匀速圆周运动是一种曲线运动，物体做匀速圆周运动时，必定也受一个与它的速度方向不在同一条直线上的合外力的作用。那么，这个合外力是怎样的呢？

我们先来看看合外力的方向。如图 3 - 3 所示，在光滑水平桌面的 O 点固定一根钉子，把绳的一端套在钉子上，另一端系一个小球，使小球在光滑的桌面上做匀速圆周运动。小球做匀速圆周运动后，将钉子拔掉。可以看到，小球沿着圆周的切线飞出，不再做匀速圆周运动（图 3—4）。

可见，小球之所以能绕着 O 点做匀速圆周运动，是因为细绳对小球始终有一个拉力，这个拉力的方向虽然不断变化，但总是沿着绳指向圆心，所以叫做向心力。这样我们就清楚了，做匀速圆周运动的物体，始终受到一个向心力的作用。

既然做匀速圆周运动的物体所受的向心力指向圆心，而物体运动的方向沿切线方向，所以向心力的方向总是与物体运动的方向垂直。也就是说，物体在运动方向上不受力，在这个方向上没有加速度，速度大小不会改变。向心力的作用只是改变速度的方向。

向心力的方向我们已经清楚了，那么向心力的大小与哪些因素有关呢？具体的关系又是什么呢？下面让我们一起来做一个定性的实验。

如图 3 - 5 所示。用手握住系有小球的细绳，转动绳子使小球在光滑的水平桌面做圆周运动。小球做圆周运动时，可以感觉到绳对手有一定的拉力这个拉力的大小等于小球做圆周运动的向心力。先保持小球的质量 m 和小球转动的半径 r 不变，增大小球转动的角速度 ω ，可以感觉到绳对手的拉力增大了；保持 m 、 r 不变，增大 ω ，也可以感觉到绳对手的拉力增大了；保持 ω 、 r 不变，增大 m ，同样可以感觉到绳对手的拉力增大了；这表明，做匀速圆周运动的物体所需要的向心力的大小跟物体的质量 m 、圆周半径 r 和运动的角速度 ω 都有关系。

可以证明，匀速圆周运动所需的向心力大小为

$$F = m r \omega^2,$$

式中力的单位用牛，质量的单位用千克，长度的单位用米，角速度的单位用弧度/秒。

在许多情况下，例如已知火车拐弯时的速率，求火车所受的向心力，需要知道线速度的大小与向心力的关系。这个关系可以用线速度与角速度的关系求出来。由 $v = r\omega$ 得 $\omega = \frac{v}{r}$ ，代入上面的向心力公式，得

$$F = m \frac{v^2}{r}。$$

这个公式在研究各种实际问题时有广泛的应用。

向心加速度根据牛顿第二定律 $F=ma$ ，做圆周运动的物体，在向心力 F 的作用下，必然要产生一个向心加速度 a ，它的方向与向心力的方向相同，

它的大小为 $\frac{F}{m}$ ，即

$$a = r\omega^2,$$

或

$$a = \frac{v^2}{r}。$$

如果线速度的单位是米/秒，角速度的单位是弧度/秒，圆周半径的单位是米，那么向心加速度的单位就是米/秒²。

向心力和向心加速度的公式虽然是从匀速圆周运动得出的，但是也适用于一般的圆周运动。一般的圆周运动，速度的大小有变化，向心力和向心加速度的大小也随着变化，利用公式求质点在圆周的某一点时的向心力和向心加速度的大小，必须用该点的瞬时速度值。

研究向心力的大小跟什么因素有关

两个同学合作，找来一段尼龙绳和几个大小不等的橡皮塞，一个圆珠笔杆，一个测力计。在尼龙绳的末端拴一个橡皮塞，绳的另一端穿过圆珠笔杆拴在测力计上，测力计的下端固定。握住笔杆抡动橡皮塞，使它在水平面上做匀速圆周运动（图 3 - 6）。这时，尼龙绳的拉力是使橡皮塞做圆周运动的向心力（重力的方向几乎跟绳的拉力方向垂直，可以略去不计）这个向心力的大小可以从测力计上读出。

使橡皮塞的角速度 增大或减小，看看向心力是变大，还是变小？

改变橡皮塞做圆周运动的半径 r （增大或减小），尽量使橡皮塞的角速度保持不变（周期 T 不变），看看向心力怎样变化？

换个橡皮塞，即改变橡皮塞的质量 m ，使 m 增大或减小，而保持圆周运动的半径 r 和角速度 不变，看看向心力怎样变化？

练习二

（1）一个 3.0 千克的物体在半径为 2.0 米的圆周上以 4.0 米/秒的速度运动，所需向心力多大？向心加速度多大？

（2）地球绕太阳公转的运动可以近似地看做匀速圆周运动，地球距太阳的 1.5×10^8 千米，地球公转时的向心加速度为多大？

（3）图 3 - 7 所示的皮带传动装置中，主动轮的半径 r_1 大于从动轮的半径 r_2 。轮缘上的 A 点和 B 点的向心加速度哪一个大？为什么？A 点和 r_1 的中点 C 的向心加速度哪一个大？为什么？

（4）从 $a = r\omega^2$ 看， a 跟 r 成正比，从 $a = \frac{v^2}{r}$ 看， a 跟 r 成反比。如果有人问你：“向心加速度的大小跟半径成正比还是成反比？”应该怎样回答？

（5）线的一端拴一个重物，手执线的另一端使重物做匀速圆周运动，当转数相同时，线长易断还是线短易断？为什么？

（6）如图 3 - 8 所示，被一细绳系住的小球质量为 50 克，小球在水平面内做匀速圆周运动，半径 $r=0.2$ 米，小球转数为 120 转/分。求小球受到的向心力的大小，并回答这一向心力是由什么力提供的。

三、关于向心力的几个实例

研究与圆周运动有关的问题时，需要分析运动物体的受力情况，弄清楚使物体做圆周运动的向心力，才能抓住解决问题的关键。必须注意的是：在做这种分析时，有的同学往往认为，做匀速圆周运动的物体除了受到另外物体的作用外，还要受到一个向心力的作用。这是不对的。向心力是按效果命名的力，任何一个力或几个力的合力，只要它的作用效果是使物体产生向心加速度，它就是物体所受的向心力。下面我们来分析两个具体例子。

火车转弯 在平直轨道上匀速行驶的火车，所受的合外力等于零。在火车转弯时，又是什么力成为使火车产生向心加速度的向心力呢？原来，火车的车轮上有凸出的轮缘（图 3 - 9），在转弯处，如果内外轨一样高，外侧车轮的轮缘挤压外轨，使外轨发生弹性形变，产生弹性形变的外轨对轮缘的作用力，就是使火车转弯的向心力（图 3 - 10）。靠这种办法得到向心力，由于火车的质量很大，轮缘与外轨间的相互作用力很大，铁轨很容易受到损坏。

如果在转弯处使外轨略高于内轨，火车驶过转弯处时，铁轨对火车的支持力 N ，方向不再是竖直的，而是斜向弯道的内侧，它与重力 G 的合力 F 指向圆心，成为使火车转弯的力，这就减轻了轮缘与外轨的挤压。在修筑铁路时，要根据转弯处轨道的半径和规定的行驶速度，适当选择内外轨的高度差，以便使转弯时所需的向心力完全由合力 F 来提供（图 3-11），这样，外轨就不受轮缘的挤压了。

杂技节目“水流星” 许多同学都看过杂技演员表演的“水流星”。一根细绳系着盛水的杯子，演员抡起绳子，杯子就做圆周运动。不管演员怎样抡，水都不从杯里洒出。甚至杯子在竖直面内运动到最高点时，已经杯口朝下，水也不会从杯里洒出来。演员的精采表演，每每博得观众的热烈掌声。其实，这个节目并不需要什么特别的诀窍，只要能使杯子以足够的速度做圆周运动，“水流星”表演就一定会成功。

盛水的杯子如果是静止的，把它倾倒过来，水就会在重力作用下洒落到地上。那么，为什么当杯子以足够大的速度运动到最高点时，水不会下流呢？现在，我们就来讨论这个问题。

做圆周运动的物体总需要有向心力。如图 3 - 12 所示，当杯子以速度 v 转过圆周的最高点时，杯中的水所受的向心力的方向是向下的；向心力的大小是 $F = m \frac{v^2}{r}$ ，式中的 m 是水的质量， r 是圆周运动的半径。这个向心力的来源是什么呢？

当杯子在圆周最高点的速度 v 满足 $m \frac{v^2}{r} = mg$ 这个关系时，即 $v = \sqrt{gr}$ 时，有 $F = G$ 。这时，水做圆周运动的向心力完全是由它所受的重力 G 提供的。

但是，杯子在圆周最高点的速度 v ，一般说来是相当大的。当 $m \frac{v^2}{r} > mg$ ，即 $v > \sqrt{gr}$ 时，有 $F > G$ ，重力 G 就不足以提供水做圆周运动

所需的向心力了。这时杯中的水有远离圆心的趋势，向上压紧杯底，对杯底施加一个向上的压力，根据牛顿第三定律，杯底对水施加一个向下的压力。向心力的不足部分，就由这个向下的压力 N 来补足，水做圆周运动所需的向心力 F 是重力 G 和向下压力 N 的合力，即

$$F = G + N = m \frac{v^2}{r}。$$

由此可以求出杯底对水施加的向下的压力 N 的大小：

$$N = m \frac{v^2}{r} = mg。$$

由上式看出， v 越大，杯底对水施加的向下的压力 N 也越大。而水对杯底施加的向上的压力 N' ，它的大小与 N 相等，所以 v 越大，水对杯底的压力 N' 也越大。

从上述讨论中还可以知道， $v = \sqrt{gr}$ 是杯子在圆周最高点速度的最小值。设想杯子在圆周最高点的速度 $v < \sqrt{gr}$ ，则有 $\frac{mv^2}{r} < mg$ ，即重力大于水做圆周运动所需的向心力，杯里的水就洒下来了。因此，表演“水流星”节目的演员，只要保持杯子在圆周最高点的线速度不小于 $v = \sqrt{gr}$ ，他的表演总是会成功的。

练习三

(1) 图 3-3 中，在光滑水平桌面上做匀速圆周运动的小球受几个力的作用？有人说它受 4 个力：重力、支持力、绳的拉力和向心力。这种分析对吗？为什么？

(2) 如果表演“水流星”节目时，杯子沿半径是 0.80 米的圆周运动，杯子运动到圆周最高点时所需的最小速度是多大？若以这样的速度做匀速圆周运动，你估算一下这个“水流星”的转数为多少。

(3) 飞机做俯冲运动时，在最低点附近做半径是 180 米的圆周运动(图 3-13)。如果飞行员的体重(质量)是 70 千克，飞机经过最低点 P 时的速度是 360 千米/小时，求这时飞行员对座位的压力。

提示：飞行员和飞机一起做圆周运动时受到两个力：重力和座位对他的支持力。

(4) 现在有一种叫做“魔盘”的娱乐设施(图 3-14)。“魔盘”转动很慢时，盘上的人都可以随盘一起转动而不至于被甩开。当盘的转速逐渐增大时，盘上的人便逐渐向边缘滑去，离转轴中心越远的人这种滑动的趋势越厉害。设“魔盘”转数为 6.0 转/分，一个体重为 30 千克的小孩坐在距轴心 1.0 米处(盘半径大于 1 米)随盘一起转动(没有滑动)，求小孩受到的向心力，并回答这个向心力是由什么力提供的。

* 四、离心现象及其应用

离心运动 做圆周运动的物体，由于本身的惯性，总是有沿着圆周切线飞去的倾向，其所以没有飞去，是因为受了向心力作用的缘故。从某种意义上说，向心力的作用，是不断地把物体从圆周运动的切线（这是它不受向心力时将会运动的路线）拉到圆周上来，使它同圆心的距离保持不变。一旦作为向心力的合外力突然消失，例如图 3 - 4 中的细绳突然断了，物体就沿切线飞去，离圆心越来越远。

除了合外力突然消失这种情况外，在合外力不足以提供物体做圆周运动所需的向心力（ $F=mr^2$ ）时，物体也会逐渐远离圆心。这是因为，在这种情况下，合外力虽然把物体拉离开切线，但还不能把它拉到圆周上来的缘故，所以物体就如图 3 - 15 所示那样，沿着切线和圆周之间的某条曲线运动，离圆心越来越远。

做匀速圆周运动的物体，在合外力突然消失或者不足以提供圆周运动所需的向心力的情况下，做逐渐远离圆心的运动，这种运动叫做离心运动。

离心机械 利用离心运动的机械叫做离心机械。离心机械的种类很多，我们只介绍两种最常见的离心机械：离心干燥器和离心转速计。

离心干燥器是用来甩掉附着在物体上的水分的装置，在纺织厂里普遍利用它来使棉纱、毛线或纺织品干燥。

离心干燥器的主要部分是一个圆筒状金属网笼（图 3 - 16），湿的物体就放在网笼里面。当网笼转动得相当快时，水滴跟物体的附着力小于水滴做圆周运动需要的向心力，水滴就离开物体，穿过网孔，飞到网笼外面。洗衣机里的脱水筒（图 3 - 17），也是利用这个道理，把洗过的湿衣服甩干的。

离心转速计是用来测量机器转速的一种仪器，它的构造如图 3 - 18 所示。在转速计的转轴 OO' 上的 E 处安装着一根轻的金属棒，棒的两端有两个重球 m_1 和 m_2 ，金属棒可以绕 E 点转动。弹簧 L_1 和 L_2 用来把金属棒拉向转轴。滑套 K 可以沿转轴上下移动。把转速计的转轴 OO' 跟机器的转轴连接在一起，当机器的轴转动时， OO' 随着转动，重球 m_1 和 m_2 跟着做圆周运动，所受的向心力是由弹簧的拉力提供的。轴转动得越快，重球做圆周运动的半径就越大。滑套 K 在轴上就上升得越高，同时带动指针向右偏转，从刻度盘上就可以读出机器的转速。

一些有害的离心运动 离心运动有时会造成危害，需要设法防止。汽车转弯的地方不允许超过规定的速度，以免由于离心运动造成交通事故。高速转动的砂轮、飞轮，都不得超过允许的最大转速，如果转速过高，砂轮、飞轮内部的相互作用力小于需要的向心力，离心运动会使它们破裂，甚至酿成事故。飞机俯冲拉起或者翻筋斗时，由于离心运动会造成飞行员大脑贫血，四肢沉重，这种现象叫做过荷。过荷太大时，飞行员会暂时失明，甚至晕厥，飞行员可以通过加强训练来提高自己的抗荷能力。图 3 - 19 是离心试验器的原理图，它用来研究过荷对人体的影响，测验人的抗荷能力。

五、万有引力定律

万有引力定律 在必修课中我们学习了万有引力的初步知识，知道不但地球对它周围的物体有吸引作用，任何两个物体之间也都存在这种吸引作用。由于物体具有质量而在物体之间产生的这种吸引作用普遍存在于宇宙万物之间，称作万有引力。在必修课中，我们对这部分知识的了解只是定性的，下面我们比较详细地学习万有引力的具体内容和一些应用。

16、17 世纪有许多科学家从事天体运动的研究并且涌现出了一批杰出的科学家，开普勒就是其中的一个。17 世纪初，开普勒发表了行星运动三定律，使人们对行星运动的情况了解得更清楚、更确切，不仅知道地球和其他行星都在近似圆形的轨道上绕太阳旋转，而且知道这种旋转遵循怎样的规律。但是，对行星为什么会围绕太阳旋转，人们并不十分清楚。为了说明这一问题，许多科学家提出了不同的看法。有些科学家猜想，行星围绕太阳旋转是由于太阳对行星有吸引的作用，至于这种吸引作用遵循什么样的规律就不得而知了。彻底解决这一问题的人是伟大的物理学家牛顿。

牛顿对行星运动的研究是从研究月球的轨道运动开始的。据说牛顿坐在苹果树下，忽然看到苹果落地而受到启发，他沉思于引力的巨大威力，想到地球吸引苹果下落的引力，是否一直可以延续到月球，也就是说，使月球围绕地球运动的向心力，跟地球作用于地面物体的重力，可能都是来自地球的引力。

牛顿经过计算得知，月球围绕地球运动的向心加速度是地面上重力加速度的 $1/3600$ 。月球的加速度这么小，可以用引力的大小随距离发生变化来解释：距离增大，引力减小，致使月球的加速度减小。设想月球在地面附近，它的加速度也应该是 9.8 米/秒^2 。而月球和地球之间的距离是地球半径的 60 倍，这表明引力是随距离平方成反比而减小的。

牛顿认为行星围绕太阳旋转是因为行星受到太阳的引力，这种引力的性质跟地球对月球的引力的性质应该相仿。他根据开普勒得到的关于行星运动的规律以及他自己的力学成就，经过推导得出：太阳对行星的引力确实是跟它们之间的距离平方成反比的。

牛顿的研究表明，地球对地面上物体的引力，行星对卫星的引力，太阳对行星的引力，都遵循同样的与距离平方成反比的规律，是同一种性质的力。这种力是由于物体具有质量而产生的，力的大小跟相互吸引的两物体的质量都成正比。牛顿进一步考虑到，宇宙中任何两个物体之间也都应该存在这种吸引的作用。于是他把自己的研究成果做了合理的推广，于 1687 年正式发表了万有引力定律：

宇宙间的一切物体都是互相吸引的。两个物体间的引力大小，跟它们的质量的乘积成正比，跟它们的距离的平方成反比。

如果用 m_1 和 m_2 表示两个物体的质量，用 r 表示它们的距离，那么，万有引力定律可以用下面的公式来表示： F

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}。$$

式中质量的单位用千克，距离的单位用米，力的单位用牛； $G=6.67 \times 10^{-11} \text{ 牛} \cdot \text{米}^2/\text{千克}^2$ ，叫做引力常量，它在数值上等于两个质量都是 1 千

克的物体相距 1 米时的相互作用力。

万有引力定律中两个物体的距离，对于相距很远可以看作是质点的物体，就是指两个质点间的距离，对于均匀的球体，就是指两个球心间的距离。

万有引力定律的发现，是 17 世纪自然科学最伟大的成果。它把地面上物体运动的规律与天体运动的规律统一起来，对以后物理学和天文学的发展有着深远的影响。它第一次揭示了自然界中一种基本的相互作用的规律，在人类认识自然的历史上树立了一个里程碑。

万有引力定律的发现，在文化发展史上也有重要的意义。在牛顿时代以前，人们认为天体的运动隐藏着不可认识的规律。牛顿的出色工作，使人们建立了信心：人们有能力理解天地间的各种事物，支配着宇宙的自然规律是能够认识的。这种信心，解放了人们的思想，在科学文化的发展上起着积极的推动作用。

引力常量的测定 牛顿虽然发现了万有引力定律，却没有给出引力常量的数值。要用实验方法确定引力常量的大小，也是不容易的。因为一般物体间的相互吸引力是非常小的。例如两个质量都是 1 千克的铅球，球心相距 0.1 米时的相互吸引力还不到 10^{-8} 牛，比铅球所受重力的十亿分之一还要小。像这样小的力很难精确测定。

1798 年，即在牛顿发现万有引力定律一百多年以后，英国的卡文迪许（1731 ~ 1810），巧妙地利用扭秤装置，第一次在实验室里比较准确地测出了引力常量的数值。

卡文迪许扭秤的主要部分是一个轻而坚固的 T 形架，倒挂在一根石英丝的下端。T 形架水平部分的两端，各装一个质量是 m 的小球，T 形架的竖直部分装一面小平面镜 M ，能把射来的光线反射到一根刻度尺上（图 3-20）。实验时，把两个质量是 m' 的大球放在图 3-20 所示的位置，它们跟小球的距离相等。由于 m 受到 m' 的吸引，使 T 形架受到扭转力矩而转动，同时石英丝发生扭转，产生相反的扭转力矩，阻碍 T 形架转动，当这两个扭转力矩产生的效果相抵消时，T 形架停下来不动。这时，石英丝扭转的角度可以从小镜 M 的反射光在刻度尺上移动的距离求出，再根据预先求出的石英丝扭转力矩跟扭转角度的关系，可以算出这时的扭转力矩，进而求得 m 与 m' 的引力 F ，确定引力常量的数值。

卡文迪许经过多次实验，测出了万有引力常量，测定的结果跟现代数值是很接近的。

练习四

(1) “我们说苹果落到地球上，而不说地球向上碰到苹果，原因在于地球的质量比苹果大得多，它对苹果的引力比苹果对它的引力大得多”。这种说法你同意不同意？说明你的理由。

(2) 两艘轮船，质量分别是 5.0×10^4 吨和 1.0×10^5 吨，相距 10 千米，求它们之间的引力。将这个力与它们所受的重力相比较，看看相差多少倍。

(3) 利用练习一第 (2) 题的数据，求出月球绕地球公转的向心加速度，已知月球的质量是 7.35×10^{22} 千克，求月球公转的向心力。

(4) 已知地球的质量是 5.98×10^{24} 千克，利用万有引力定律求出地球

和月球间的引力大小。计算时不足的数据可从上题用过的数据中找到。把得出的结果与上题的结果相比较，能说明什么问题？

六、万有引力定律在天文学上的应用

两个通常物体之间的万有引力非常微小，我们察觉不到它，可不予考虑。但是在天体系统中，由于天体的质量很大，万有引力就起着决定性的作用。因此，万有引力定律在天文学中有重要应用，对天文学的发展起了很大的推动作用。下面举两个例子来说明。

太阳和行星的质量 应用万有引力定律，可以计算太阳和行星的质量。行星围绕太阳的运动，可以近似地看作匀速圆周运动。设 M 是太阳的质量， m 是它的某颗行星的质量， r 是行星的轨道半径， T 是行星绕太阳公转的周期。这个行星做圆周运动的向心力是

$$m r \omega^2 = \frac{4\pi^2 m}{T^2}。$$

这个向心力是由太阳对行星的万有引力提供的，所以

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}。$$

由此可以求出太阳的质量是

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}。$$

如果能观测到 r 和 T ，就可以算出 M 的大校例如，地球绕太阳公转的轨道半径是 1.49×10^{11} 米，公转周期是 3.16×10^7 秒，所以太阳的质量是

$$\begin{aligned} M &= \frac{4 \times 3.14^2 \times (1.49 \times 10^{11})^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (3.16 \times 10^7)^2} \text{ 千克} \\ &= 1.96 \times 10^{30} \text{ 千克。} \end{aligned}$$

同样，根据月球绕地球运行的轨道半径和周期，可以算出地球的质量是 5.98×10^{24} 千克。其他行星的质量，也可以用这种方法计算出来。

海王星的发现 海王星的发现，是应用万有引力定律取得重大成就的一个例子。

在 18 世纪，人们已经知道太阳系有七颗行星，但是 1781 年发现的第七颗行星——天王星的运行轨道，总是偏离根据万有引力定律计算出来的轨道。当时就有人推测，在天王星轨道外面可能还有一颗未发现的行星，它同天王星之间的引力作用，引起了天王星轨道的偏离。英国的亚当斯和法国的勒维列都利用万有引力定律各自独立地计算出这颗新行星的轨道。1846 年 9 月 23 日晚，德国的加勒在勒维列指示他去观察的位置附近发现了这颗新行星。后来，天文学家就把这个太阳系的第八颗行星叫做海王星。

应用同样的方法，在 1930 年 3 月 14 日，发现了太阳系的第九颗行星——冥王星。

*七、地球上物体所受重力的变化

地球对物体的引力，是万有引力的一种表现，如果用 M 表示地球的质量，用 R 表示地球的半径，用 m 表示物体的质量，根据万有引力定律，物体在地球表面上受到的地球引力 $F = G \frac{Mm}{R^2}$ 物体所受的重力正是由这种引力产生的。

但是物体所受的重力并不等于地球对物体的引力，这是因为地球在不停地自转，地球上的一切物体都随着地球自转而绕地轴做匀速圆周运动，这就需要向心力。这个向心力的方向是垂直指向地轴的，它的大小是 $f = m \omega^2 r$ ，式中的 r 是物体距地轴的距离， ω 是地球自转的角速度。这个向心力来自哪里？只能来自地球对物体的引力 F ，它是引力 F 的一个分力（图 3-21）。引力 F 的另一个分力才是物体所受的重力 mg 。

明白了这一点，我们就容易懂得，为什么同一个物体在地球上不同纬度的地方所受的重力不同。

在不同纬度的地方，物体做匀速圆周运动的角速度 ω 相同，而圆周的半径 r 不同，这个半径在赤道处最大，在两极最小（等于零）。由 $f = m \omega^2 r$ 可以知道，同一个物体随着地球自转所需的向心力，在不同纬度的地方是不同的，它随着纬度的增加而减小：在赤道最大，在两极最小（等于零）。

除此之外，还应该考虑到地球并不是一个理想的球体，而是一个不大规则的椭球，它的极半径是 6357 千米，赤道半径是 6378 千米。由于极半径比赤道半径小一些，根据引力与距离平方成反比的定律，物体所受的引力在赤道上最小，随着纬度的增加而增大，在两极达到最大。

从上面的讨论可以看出，物体在赤道上所受的引力最小，需要的向心力最大；随着纬度的增加，物体受的引力增大，需要的向心力减小；在两极引力最大，需要的向心力减小到零。所以地面上同一个物体所受的重力，从赤道到两极是逐渐增大的。

我们知道，物体所受的重力等于 mg 。所以物体所受的重力从赤道到两极逐渐增大表示重力加速度 g 从赤道到两极逐渐增大。

同样，根据万有引力定律知道，在同一纬度，物体所受的重力和重力加速度 g 的数值，还随着离地面高度的增加而减小。

不过在地面附近 g 的数值和物体所受的重力随纬度和离地面高度的不同而改变的量是很小的。重力加速度 g 的数值，在赤道上约为 9.78 米/秒^2 ，在两极约为 9.83 米/秒^2 。把赤道上的物体移到两极，增加的重力大约只有原来重力的千分之五。把地面上的物体升高 1 千米，减小的重力不超过原来重力的万分之三。所以在一般的粗略计算中， g 和物体所受的重力的变化可以忽略不计。

此外，物体所受的重力还受到地质结构的影响。例如，在埋藏着密度较大的矿石的地区，物体受到的重力就要比周围地区稍大一些，也就是说，这一地区重力加速度要比周围地区稍大一些。重力加速度的这种变化虽然很小，却是可以测出来的。根据这种重力异常现象，可以探测地下的矿床，这种探矿方法叫做重力探矿，是一种很重要的探矿方法。

八、宇宙速度人造地球卫星

地球对周围的物体都有吸引作用，因而抛出的物体要落回地面。但是，抛出的初速度大一些，物体就会飞得远一些。牛顿曾设想过，从高山上用不同的水平速度抛出物体，速度一次比一次大，落地点也一次比一次离山脚更远。如果没有空气阻力，当速度足够大时，物体就永远不会落到地面上来，它将围绕地球旋转，成为一颗人造地球卫星。图 3 - 22 就是牛顿在他的著作中绘的一幅原理图。

宇宙速度 既然物体的发射速度足够大时，物体才能环绕地球运转，成为一颗人造地球卫星，那么，这个速度至少需要多大呢？为此，我们需要知道在地面附近沿着圆轨道运转的人造卫星的运行速度。发射速度比这个速度小，物体将要落回地面。

人造卫星做匀速圆周运动所需要的向心力就是地球对它的引力。设人造卫星的质量是 m ，在高空沿圆轨道运转，轨道半径(与地心的距离)为 r ，运行速度为 v 。地球质量为 M ，则有

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} ,$$

由此得到

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} .$$

在地面附近运转的卫星，可以认为 r 近似等于地球半径 $r_{地}$ ，地球对卫星的引力近似等于卫星在地面附近受的重力 mg 。由 $mg = m \frac{v^2}{r_{地}}$ 可得

$$v = \sqrt{gr_{地}} .$$

把 $g=9.8 \times 10^{-3}$ 千米/秒² 和 $r_{地}=6.4 \times 10^3$ 千米代入上

式，得到 $v=7.9$ 千米/秒。这就是人造地球卫星在地面附近环绕地球做匀速圆周运动必须具有的速度，叫做第一宇宙速度，也叫环绕速度。

如果发射速度大于 7.9 千米/秒，人造地球卫星将在高空沿着圆轨道或椭圆轨道运行(图 3 - 23)。但是，发射速度也不能过大。当发射速度等于或大于 11.2 千米/秒的时候，物体就可以挣脱地球引力的束缚，成为绕太阳运动的人造行星或飞到其他行星上去。所以 11.2 千米/秒这个速度叫做第二宇宙速度，也叫脱离速度。

达到第二宇宙速度的物体还受着太阳引力的束缚。要想使物体挣脱太阳引力的束缚，飞到太阳系以外的宇宙空间去，必须使它的速度等于或大于 16.7 千米/秒，这个速度叫做第三宇宙速度，也叫逃逸速度。

人造卫星的应用人造卫星有着广泛的应用。在科学研究、无线电通讯、电视转播、军事侦察、资源调查、气象预报、估计粮食产量、发现农作物病虫害等方面，都可以应用人造卫星。应用人造卫星有什么好处呢？从下面几个例子里可以多少了解一些。

进行社会主义建设，首先要把资源的情况摸清楚，这就要进行资源调查。靠人工进行资源调查，速度慢、效率低。如果用资源卫星，一天绕地球十几圈，用来普查森林，很快就能查完，而且可以监视各种变化，及时

设法处理。在卫星上安装勘察矿产资源的遥感设备，还可以勘察地下的铁、钴、镍、铜、石油等多种矿藏。电视通讯是关系到千家万户的事情，但是靠中继站转播，每隔 50 千米就要建设一个中继站，要耗费大量人力物力。如果用与地球自转周期相同的同步通讯卫星转播，像我们这样幅员广阔的国家，只要有一颗卫星，就连边远地区也都可以收看到首都或者其他城市的电视节目了。

航天技术的发展目前，世界上航天技术有了很大发展，已经能发射围绕地球运行的空间站，把装有复杂、精密仪器设备的现代化实验室，送到宇宙空间中去，进行各种在地面上不能进行的物理、化学、生物、医学实验，还可以把航天器送往其他行星，发回科学情报。1981 年，又制成了航天飞机，它除了进行各种科学考察外，还可以在空间发射和收回卫星，并能返回地面，多次重复使用。

我国自 1956 年建立了专门的航天研究机构到现在，航天事业有了迅速的发展。1964 年 6 月，自行研制的运载火箭腾空而起。1970 年 4 月 24 日，我国第一颗人造地球卫星一次发射成功。随后又发射了科学实验卫星、资源勘测卫星、通讯卫星、气象卫星等不同类型的人造地球卫星(见彩图 1)。掌握了使卫星返回地面的回收技术、用一枚火箭把多颗卫星送入轨道的“一箭多星”等世界尖端技术。

航天时代正在到来。在这个新时代里，不畏险阻，勇攀科学高峰的青年们是可以大有作为的。

我国的卫星技术及应用概况

自 1957 年 10 月 4 日苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星后，人类开始了探索太空世界的新时代。我国于 1970 年 4 月 24 日成功地发射了第一颗人造地球卫星，是继苏联、美国之后，掌握卫星技术的少数几个国家之一。我国自行研制和发射的卫星已应用在科研、教育、通信、气象、国防等各个领域，我国的卫星技术已接近和达到世界先进水平。

我国发射的卫星可以分为以下几种类型（1）科学实验卫星；（2）返回式遥感卫星；（3）通信卫星；（4）气象卫星。下面主要介绍一下后 3 种卫星。

一、返回式遥感卫星

按预定要求在空间完成任务，需要返回地面带回遥感资

料的卫星。返回式卫星技术要比一般的卫星技术复杂，它除了要掌握一般卫星入轨并正常工作所必须的技术外，还必须掌握卫星返回技术，使卫星安全返回地面。这就需要（1）在卫星返回前，把卫星从轨道运转姿态调整为返回姿态；（2）保证卫星脱离原来的运行轨道，进入预定返回轨道的动力和制动力；（3）防止返回大气层的卫星被摩擦产生的热烧坏，保证返回舱内仪器的正常工作（如拍摄的照片不能因温度过高而毁坏等）。另外还有着陆时要保证回收舱不损坏、落地位置准确等问题。

我国于 1975 年 11 月 26 日成功地发射了第一颗返回式卫星，3 天后取得预定遥感资料，按预定时间顺利返回祖国大地。截止到 1991 年 10 月，我国已发射了 12 颗返回式遥感卫星，并全部按预定计划成功回收，这在世界航天史上是罕见的。我国的返回式卫星带回了大量信息，在祖国现代化建设中起了很大的作用。例如在地质调查方面，根据卫星照片对塔里木盆地北部石油地质进行分析，发现了新的成油构造信息；在北京找到了 7 个成矿预测区；在内蒙找到了铬矿和铁矿。

二、通信卫星

用来通信的卫星。相当于在太空中的微波中继站，通过它转发或反射无线电信号。

通信卫星的轨道一般都采用“地球静止轨道”，也称“地球同步轨道”。即卫星转动的周期与地球自转的周期相同，相对于地球静止。在卫星轨道中，有两类比较特殊的轨道。一类是轨道在地球赤道平面内，这种轨道称为“赤道轨道”。另一类是轨道与赤道平面垂直，通过地球两极，这种轨道称为“极地轨道”（如图 3-24）。赤道轨道上的卫星能观察到地球的范围——覆盖区域——有限；而极地轨道由于地球的自转，则可以覆盖整个地球。地球静止轨道属于赤道轨道中的一种。同步卫星距地面高，覆盖区域大。一颗同步通信卫星覆盖区域约为地球表面的 1/3，如果在同步轨道上等间隔地放 3 颗通信卫星，就能实现全球通信。

同步通信卫星技术比较复杂，星上除了要有一整套性能可靠的接收、转发、放大等无线电通信设备外，主要的技术难度在于：在使卫星从椭圆轨道经变轨后进入静止轨道的过程中要经过复杂的姿态、转速、变轨等控制，进入轨道后也必须时刻保持它的姿态控制精度，以满足多方面的要求。

1984 年 4 月 8 日我国发射了第一颗实验通信卫星，4 月 16 日卫星成功地定点于东经 125 度赤道上空。卫星在试验阶段即投入了应用，取得良好

效果。截止到 1991 年 10 月，我国共发射了 5 颗静止轨道通信卫星，全部工作正常。通信卫星为我国的广播、电视、卫星电话等通信事业做出了重大贡献。

三、气象卫星

进行气象观测的卫星，它是卫星气象观测系统的空间部分。

气象卫星的轨道一般有两种，一种是“太阳同步轨道”（近极地圆形轨道），另一种是“地球静止轨道”。前者覆盖区域大，但是一天只能对同一地区进行两次观测；后者覆盖区域小，但是能对同一地区进行连续观测。这两种气象卫星互为补充。

气象卫星除了要有一套高精度的可见光、红外线、微波等照拍设备和将拍摄后的信息及时发送回地面的设备外，它与其他卫星的主要区别在于（1）保证卫星运转轨道接近圆形，以保证拍摄的云图照片具有相同的条件；（2）必须具有很高的姿态稳度，以保证图片的质量。

我国于 1988 年和 1990 年成功地发射了 2 颗“风云一号”气象卫星。卫星采用太阳同步轨道，星上装有两台可见光谱和红外谱段的扫描辐射计。“风云一号”气象卫星拍摄的云图照片具有很高的分辨率，对气象预报、环境和灾害监测有重要作用。例如在 1991 年我国抗洪救灾中，它提供的信息对了解灾情、分洪决策等起了积极的作用。

我国是一个发展中国家，经济实力远不如发达国家，但是我国广大科技工作者在党的正确领导下，发扬社会主义制度下团结协作的优势，短时间内使我国的卫星事业得到了迅速发展。现在已具有发射近地轨道、太阳同步轨道和地球静止轨道卫星的能力；在卫星姿态、轨道、温度和返回控制等方面已处于世界先进水平。

航天事业的发展有着广阔的前景，有志于在这一领域大展宏图的同学们请奋发学习、努力攀登吧！

练习五

（1）在轨道上运转的人造地球卫星，周期为 5.6×10^3 秒，轨道半径为 6.8×10^3 千米，试估算地球的质量。

（2）海王星的质量是地球的 17 倍，它的半径是地球半径的 4 倍。环绕海王星表面飞行的宇宙飞船，速度有多大？

（3）有人根据公式 $v=r$ 说：人造地球卫星的轨道半径增大到 2 倍，卫星的速度也应增大到 2 倍。但是实际上卫星的轨道半径增大时卫星的速度是减小的。是公式 $v=r$ 错了，还是公式用错了？

（4）一位同学根据向心力公式 $F = m \frac{v^2}{r}$ 说，如果人造卫星的质量不变，当轨道半径增大到 2 倍时，人造卫星需要的向心力减小为原来的 $\frac{1}{2}$ 。

另一位同学根据卫星的向心力是地球的引力，由公式 $F = G \frac{Mm}{r^2}$ 推断，当

增大到 2 倍时，人造卫星需要的向心力减小为原来的 $\frac{1}{4}$ 。哪位同学的说法对？说错了的同学错在哪里？是他引用的公式本身错了，还是他把公式

用错了？

(5) 一质量为 m 的地球同步卫星，其轨道半径为多大？运行速度有多大？质量不同的同步卫星，轨道半径相同吗？运行速度相同吗？

本章小结

这一章我们学习了匀速圆周运动和万有引力定律的知识。在天体运动中，做圆周运动的向心力就是天体间的万有引力。请你根据下面所列各项将这一章所学的知识小结一下。

(1) 什么叫匀速圆周运动？描述匀速圆周运动快慢的量都有哪些？它们的含义各是什么？它们之间有什么关系？

(2) 做匀速圆周运动的物体为什么需要一个向心力？向心力的作用是什么？对做匀速圆周运动的物体做受力分析时，有的同学认为这个物体除了受到其他物体对它的作用力外，还受到一个向心力的作用。这种看法对不对？为什么？在做这种受力分析时，应该注意什么？你常出现哪些问题？

(3) 向心力和向心加速度各有两个不同的公式，它们各在什么条件下使用方便？一位同学说，向心加速度与 v 成正比；另一位同学说，向心加速度与 r 成反比。这两种说法相互矛盾。他们的说法确切吗？怎样理解上述的矛盾？

* (4) 什么叫离心运动？举出几个实例来。

(5) 什么是万有引力定律？卡文迪许是怎样测出万有引力常量的？万有引力定律的发现有什么重要意义？

(6) 平时我们并未感到周围的同学或物体对自己有吸引的作用，对这一问题你是怎么理解的？

(7) 求太阳或行星的质量、行星运动的速度等问题所依据的原理是什么？关键是列出什么等式？

(8) 你能算出第一宇宙速度吗？什么是第二、第三宇宙速度？

习题

(1) 如图 3-25 所示，质量为 800 千克的小汽车驶过一半径为 50 米的圆形拱桥，当它到达桥顶时，速度为 5 米/秒。求此时车对桥的压力。求出压力后，与它在水平公路上行驶时做一比较，看看在什么样的路面上行驶，车对路面的压力大。

(2) 30 厘米长的绳的下端拴着一个小球，小球受到一个水平冲力的作用，在竖直面内做圆周运动。如果小球通过圆周的最高点时绳刚好没有发生形变，小球在圆周最高点的速度有多大？

(3) 已知赤道半径是 6.4×10^3 千米，求赤道上的物体由于地球自转产生的向心加速度。

(4) 月球表面上的物体，会受到月球的吸引。已知月球的半径是 1.7×10^3 千米，月球的质量是 7.4×10^{22} 千克，求物体在月球上受的月球引力跟它在地面上受的地球引力的比。

(5) 太阳质量约为月球质量的 2.7×10^7 倍，太阳离地球的距离为月球

离地球的距离的 3.9×10^2 倍。试比较太阳和月球对地球的引力。

(6) 应用万有引力定律和向心力的公式证明：对于所有在圆周轨道上运行的地球卫星（包括月球和人造卫星）， T^2/R^3 是一个常量，其中 T 是卫星的周期， R 是轨道半径。

对行星来说， T^2/R^3 也是一个常量，其中 T 是行星的周期， R 是行星的轨道半径。这就是课文中提到的开普勒关于行星运动的一条定律。牛顿就是根据这条定律和向心力公式，证明太阳对行星的引力是跟它们之间的距离平方成反比的。你能不能重复一下牛顿的证明？

(7) 要想发射一颗 80 分钟绕地球一周的卫星，为什么是不可能的？试说明它的理由。

提示：卫星的轨道半径应该大于地球半径。

(8) 行星的平均密度是 ρ ，靠近行星表面的卫星运转周期是 T ，试证明： T^2 是一个常量，即对任何行星都相同。

(9) 一艘宇宙飞船进入靠近某行星表面的圆形轨道，宇航员能不能仅用一只表通过测定时间来测定该行星的平均密度？说明理由。

第四章 动量和动量守恒

垒球场上，击球员挥动球棒，将迎面飞来的垒球击了出去。从原则上说，应用牛顿运动定律可以解决这类问题。但是，球棒击球的力是随时间而变化的，而且变化的规律比较难以确定，因此，直接应用牛顿运动定律就发生了困难。一个质子以某一速度撞入一个铝原子核中被俘获，成为硅原子核。你能确定硅原子核的速度吗？这个问题无法用牛顿运动定律解决，因为牛顿运动定律一般不适用于微观粒子。何况，质子同铝原子核相互作用的具体情况还没有了解得十分清楚。

物理学家在研究碰撞和冲击一类问题时，引入了动量的概念。这个概念，我们在必修课中已经学过，牛顿当初就是用这个概念表达他的定律的。后来，人们在牛顿运动定律的基础上确定了与动量有关的规律，发现了动量守恒定律，并且逐渐认识到动量守恒定律是自然界中一条普遍的规律，比牛顿定律的适用范围更广。于是，上面提到的那类问题，也就能够解决了。动量的概念及有关的规律，在实际中有广泛的应用。这一章，我们就来学习这方面的知识。

一、动量定理

动量 在日常生活中我们有这样的经验，同一辆汽车，行驶速度越大，造成的撞车事故越严重。两辆不同的汽车，比如大卡车和小汽车，行驶速度相同，大卡车造成的撞车事故比小汽车造成的撞车事故严重。可见，当我们考虑运动物体的作用效果时，既要考虑物体的运动速度，也要考虑物体的质量。

物理学里把运动物体的质量和速度的乘积叫做动量。动量通常用字母 p 表示，即

$$P = mv。$$

在国际单位制中， m 的单位是千克， v 的单位是米/秒，所以动量 p 的单位是千克·米/秒。

动量是矢量，它的方向跟速度的方向相同。

动量是物理学中一个重要的物理量。对它的重要性，同学们学过后面的动量守恒定律，可以有初步的了解，随着学习的物理知识不断增多，认识会逐步加深。

动量定理 一辆以某一速度行驶的汽车，具有一定的动量。关闭发动机后，要使汽车停下来，也就是使它的动量变为零，可以有不同的办法。用急刹车的办法，汽车受的阻力大，在短时间内就可以停下来。用滑行的办法，汽车受的阻力小，要滑行较长的时间才能停下来。可见，物体动量的变化，跟它所受作用力的大小、作用时间的长短有关。现在我们来定量地研究这种关系。

设一个质量为 m 的物体，初速度为 v ，受到合外力 F 的作用，产生加速度 $a = F/m$ ，经过时间 t ，速度变为 v' 。那么，物体的动量也由 $p = mv$ 变为 $p' = mv'$ 。物体动量的变化为

$$p' - p = mv' - mv。$$

而

$$\begin{aligned} mv' &= m(v + at) \\ &= m\left(v + \frac{F}{m}t\right) \\ &= mv + Ft。 \end{aligned}$$

由此我们就得到 $Ft = p' - p$ 。

上式告诉我们，要使物体的动量发生相同的变化，可以用较大的力作用较短的时间，也可以用较小的力作用较长的时间。只要力和力的作用时间的乘积 Ft 相同，动量变化就相同。在物理学中，力和力的作用时间的乘积 Ft ，叫做力的冲量。冲量也是矢量，它的方向由力的方向决定。如果在作用时间内力的方向不变，冲量的方向就是力的方向。冲量的单位是牛·秒。由于 $1 \text{ 牛} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}^2$ ，所以 $1 \text{ 牛} \cdot \text{秒} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}$ ，即冲量和动量的单位实际相同。

上式表示：物体所受合外力的冲量等于它的动量的变化。这个结论叫做动量定理。

上面我们设力是恒定的，推导出动量定理。其实，动量定理不仅适用于恒定的力，而且也适用于随时间而变化的力。对于变力，动量定理中的

力 F 应当理解为变力在作用时间内的平均值。正因为动量定理适用于变力，而在实际中遇到的又常常是变力，所以动量定理具有广泛的应用。用铁锤钉钉子，铁锤受到钉子的冲量作用，在很短的时间内动量变为零。由动量定理，我们可以知道，铁锤受到很大的作用力，同时钉子受到的反作用力也很大，于是钉子被钉进木板（或墙）。铁锤的质量越大，打到钉子上时的速度越大，即铁锤的动量越大，钉子受到的力就越大。用冲床冲压钢板，冲头受到钢板给它的冲量作用，冲头的动量在短时间内变为零，钢板受到很大的作用力，于是钢板被冲断。在上述例子中，作用时间很短，得到很大的作用力，而被人们所利用。

相反，有时需要延长作用时间，以减小力的作用。在轮渡的码头上装有橡皮轮胎，轮船停靠码头时靠到橡皮轮胎处，轮胎发生形变，作为缓冲装置，延长了作用时间，可以减小轮船停靠时所受的力。火车车厢两端也有缓冲装置，以减小车厢之间相互作用的力。在日常生活中也有这种事例。我们接迎面飞来的篮球时，两臂要向前伸出迎球，手接触到球以后，两臂随球后引至胸前把球接住，以延长篮球与手的接触时间，减小篮球对手的作用力（图 4-1）。

你还能再举出一些应用动量定理的例子吗？请你对周围的事物多注意观察和思考，你一定会有新的收获。

【例题】 一个质量是 0.18 千克的垒球，以水平速度 $v = 25$ 米 / 秒飞向球棒（图 4-2）。被球棒打击后，垒球反向水平飞回，飞回时的速度大小是 45 米 / 秒。求垒球动量的变化。假设垒球与球棒的作用时间是 0.010 秒，试计算球棒击球的平均作用力。

分析： 根据题中所给的数据，我们不难求出垒球动量的变化。知道了垒球动量的变化，根据动量定理，可以求出垒球受到球棒打击的平均作用力。

解： 取垒球原来的飞行速度 v 的方向为正方向，则 $v = 25$ 米 / 秒，垒球飞回时的速度 $v' = -45$ 米 / 秒，负号表示 v' 与 v 方向相反。

$$\begin{aligned} \text{垒球的动量变化} \quad & p' - p \\ & = mv' - mv \\ & = m(v' - v)。 \end{aligned}$$

将 $m = 0.18$ 千克， $v' = -45$ 米 / 秒， $v = 25$ 米 / 秒，代入上式得

$$\begin{aligned} p' - p &= 0.18(-45 - 25) \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒} \\ &= -12.6 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}。 \end{aligned}$$

负号表示垒球的动量变化与垒球的初动量方向相反。

根据动量定理 $Ft = P' - P$ 可得球棒击球的平均作用力

$$\begin{aligned} F &= \frac{p' - p}{t} \\ &= \frac{-12.6}{0.010} \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}^2 \\ &= -120.6 \times 10^2 \text{ 牛}。 \end{aligned}$$

负号表示球棒击球的平均作用力的方向与垒球原来的飞行速度方向相反。

细线断与不断

一条细线悬挂着一个重物。把重物拿到一定的高度，然后突然释放，重物可以把细线拉断。如果在细线上端拴一段皮筋，再从同样的高度释放重物，细线就不会被拉断了（图 4-3）。做做看，想想这是什么道理。根据同样的道理起重机的吊钩上都装有缓冲弹簧。

练习一

(1) 钉钉子时为什么要用铁锤而不用橡皮锤，而铺地砖时又要用橡皮锤？

(2) 一个男孩把一个质量为 0.40 千克的静止的足球踢了出去，踢出的速度是 30 米 / 秒，他给足球的冲量是多大？

(3) 使质量为 4.0×10^3 千克的汽车，从 20 千米 / 小时的速度达到 40 千米 / 小时的速度，需要多大的冲量？

(4) 一个质量是 0.05 千克的网球，以水平速度 $v = 20$ 米 / 秒飞向球拍。被球拍打击后，网球反向水平飞回，飞回时的速度大小也是 20 米 / 秒。设网球被打击前的动量为 p ，被打击后的动量为 p' ，取网球被打击后飞回的速度方向为正方向，那么，关于网球的动量变化，下列计算式中正确的是：

A. $p' - p = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒} - (-1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}) = 2 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}$ 。

B. $p - p' = -1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒} - 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒} = -2 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}$ 。

C. $p' - p = -1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒} - 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒} = -2 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}$ 。

D. $p - p' = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒} - 1$

(5) 如图 4-4 所示，用 0.50 千克的铁锤把钉子钉进木头里去，打击时铁锤的速度 $v = 4.0$ 米 / 秒。如果打击后铁锤的速度变为零，打击的作用时间是 0.010 秒，那么，

不计铁锤受的重力，铁锤对钉子的作用力是多大？

考虑铁锤受的重力，铁锤对钉子的作用力又是多大？

根据计算结果分析，在计算铁锤对钉子的作用力时，对本题所给的情况来说，是否可以不计铁锤受的重力。

二、动量守恒定律

动量定理研究了一个物体受力作用一段时间后，物体的动量怎样变化。物体相互作用时，情况又怎样呢？有两位同学，原来静止在滑冰场上（图 4-5），不论谁推谁一下，两个人就会向相反的方向滑去，他们的动量都发生了变化。两个人本来都没有动量，现在都有了动量，他们的动量变化服从什么规律呢？现在我们就来探讨这个规律。

图 4-6 表示出了在水平桌面上匀速运动的两个球，它们的质量分别是 m_1 和 m_2 ，沿着同一直线向相同的方向运动，运动的速度分别是 v_1 、 v_2 ，而且 $v_2 > v_1$ ，它们的总动量（两个物体的动量的矢量和） $p = p_1 + p_2 = m_1v_1 + m_2v_2$ 。经过一定时间后，第二球将追上第一个球，发生碰撞，碰撞后的速度分别是 v_1' 、 v_2' ，此时它们的总动量 $p' = p_1' + p_2' = m_1v_1' + m_2v_2'$ 。这两个球碰撞后的总动量 p' 与碰撞前的总动量 p 是什么关系呢？

设碰撞过程中第一个球和第二个球受到的平均作用力分别是 F_1 和 F_2 ，力的作用时间是 t 。根据动量定理，第一个球受到的冲量 $F_1t = m_1v_1' - m_1v_1$ ，第二个球受到的冲量 $F_2t = m_2v_2' - m_2v_2$ 。根据牛顿第三定律， F_1 和 F_2 大小相等，方向相反。所以， $F_1t = -F_2t$ ，即

$$m_1v_1' - m_1v_1 = -(m_2v_2' - m_2v_2)。$$

整理后得到 $m_1v_1 - m_2v_2 = m_1v_1' - m_2v_2'$ ，

或者 $p_1 + p_2 = p_1' + p_2'$ ，

就是 $p = p'$ 。

两个球除了碰撞时的相互作用力，它们还受到外力的作用，即受到重力和支持力的作用，但它们彼此平衡，两个球所受的外力之和为零。物体不受外力，或者它们所受的外力之和为零，是我们得出上式的前提条件。

由此得出结论：相互作用的物体，如果不受外力作用，或它们所受的外力之和为零，它们的总动量保持不变。这个结论叫做动量守恒定律。

动量守恒定律不只适用于两个物体间的相互作用，也适用于更多物体间的相互作用。

动量守恒定律是自然界普遍适用的基本规律之一，它比牛顿定律的适用范围要广泛得多。实验证明，牛顿定律只适用于解决物体的低速运动问题，动量守恒定律不但能解决低速问题，而且能用来处理接近于光速的运动问题；牛顿定律适用于行星、卫星、交通工具以及其他宏观物体的相互作用，动量守恒定律不但适用于宏观物体，而且适用于电子、中子、质子等微观粒子的相互作用。小到微观粒子，大到天体系统，无论相互作用的是什么力，即使对相互作用力的情况还了解得不大清楚，动量守恒定律都是适用的。

动量守恒定律的发现

动量守恒定律，是最早发现的一条守恒定律，它渊源于十六、十七世纪西欧的哲学家们对宇宙运动的哲学思考。

观察周围运动着的物体，我们看到它们中的大多数终归会停下来。跳动的皮球，飞行的子弹，走动的时钟，运转的机器，它们都会停下来。看来宇宙间运动的总量似乎在减少。整个宇宙是不是也像一架机器那样，总有一天会停下来呢？但是，千百年来对天体运动的观测，并没有发现宇宙运动有减少的迹象。生活在十六、十七世纪的许多哲学家认为，宇宙间运动的总量是不会减少的，只要能找到一个合适的物理量来量度运动，就会看到运动的总量是守恒的。那么，这个合适的物理量到底是什么呢？

法国哲学家兼数学家、物理学家笛卡儿（1596~1650）提出，质量和速率的乘积是一个合适的物理量。可是后来，荷兰数学家、物理学家惠更斯（1632~1723）在研究碰撞问题时发现：按照笛卡儿给运动的量下的定义，两个物体运动的总量，在碰撞前后，不一定守恒。

牛顿（1643~1727）在总结这些人工作的基础上，把笛卡儿的定义作了重要的修改，即不用质量和速率的乘积，而用质量和速度的乘积，这样就找到了量度运动的合适的物理量。牛顿把它叫做“运动量”，就是我们现在说的动量。

到目前为止，在自然界任何物体间的相互作用中（只要它们所受的外力之和为零），还没有发现违反动量守恒定律的现象。动量守恒定律是自然界中最重要、最普遍的客观规律之一。

练习二

（1）甲、乙两名同学静止在光滑的冰面上，突然甲推了乙一下，结果两人各向相反的方向滑去。甲推乙前，他们的总动量为零，推乙后，他们各自都有了动量，总动量还等于零吗？为什么？

（2）两个磁性很强的磁铁，各放在一辆小车上，小车能在水平桌面上无摩擦地运动，磁铁的同性磁极相对。推动小车一下，使它们相互接近，两个小车没有碰上就分开了。两辆小车相互作用前后，它们的总动量守恒吗？为什么？

（3）在光滑的水平桌面上有一辆小平板车，一个木块贴着平板车的上表面，以水平速度 v 射到平板车上，最后平板车和木块以共同的速度 v' 运动（图 4-7）。木块射入平板车前后，平板车和木块的总动量守恒吗？为什么？如果平板车不是放在光滑的水平桌面上，而是放在粗糙的水平桌面上，木块射入平板车前后，平板车和木块的总动量还守恒吗？为什么？

（4）在光滑的水平桌面上有两个小球 A 和 B，它们的质量分别是 $m_A = 2.0$ 千克， $m_B = 4.0$ 千克。

如果小球 A 和 B 沿同一直线向相同的方向运动（图 4-8 甲），运动速度的大小分别是 $v_A = 4.0$ 米/秒， $v_B = 2.0$ 米/秒，它们碰撞前的总动量是多大？方向如何？

如果小球 A 和 B 沿同一直线相向运动（图 4-8 乙），运动速度的大

小还是 $v_A = 4.0$ 米 / 秒, $v_B = 2.0$ 米 / 秒, 它们碰撞前的总动量又是多大? 方向如何?

假设无法知道小球 A 和 B 碰撞后的速度大小和方向, 你能确定它们碰撞后总动量的大小和方向吗? 说明你的根据。

三、动量守恒定律的应用（一）

动量守恒定律的重要应用之一是用来研究碰撞现象。提到“碰撞”，我们往往会联想到交通事故，人被车撞了，两辆汽车相撞，等等。物理学里研究的碰撞，范围要广得多，不仅包括普通大小的物体，像汽车与汽车、球与球之间的碰撞，还包括分子与分子、原子与原子以及质子、中子等微观粒子之间的碰撞。

碰撞现象的特点不只是物体间的相互作用突然发生，持续时间很短，更重要的是在相撞物体相互作用的时间内，物体间的相互作用力很大，外力的作用通常远小于物体之间的相互作用，可以忽略，而认为碰撞过程中动量守恒。所以，我们可以用动量守恒定律来研究碰撞现象。

下面我们以小球为例研究两个碰撞的例子，但是，都只限于碰撞前后物体的动量在同一条直线上的情形，这种碰撞叫做正碰。如果碰撞前后物体的动量不在一条直线上，这种碰撞叫做斜碰。动量守恒定律也适用于斜碰，由于斜碰的情况要复杂些，本书就不涉及了。

【例题 1】 一个质量是 m 的钢球以水平速度 v 运动（图 4-9），碰到一个静止的质量是 M 的橡皮泥球后，陷入橡皮泥球中。求碰撞后它们的共同速度 v' 。

碰撞前，小球的动量是 mv ，橡皮泥球的动量是零，它们的总动量是 mv 。碰撞后，小球和橡皮泥球共同运动，它们的总动量是 $(m+M)v'$ 。根据动量守恒定律可得

$$mv = (M+m)v'$$

所以
$$v' = \frac{m}{M+m}v。$$

由于 $\frac{m}{M+m} > 0$ ，所以 v' 的方向跟 v 的方向相同。

一辆货车碰到另一辆静止的货车并且挂在一起，一个中子（或质子）撞入一个原子核被原子核俘获，都属于上面分析的这种情形。在这种情形下， m 、 v 、 M 、 v' 四个量中知道了任何三个，都可以求出第四个。

【例题 2】 甲、乙两球相撞，已经测出它们相撞前的速度 $v_{甲}$ 、 $v_{乙}$ 和相撞后的速度 $v'_{甲}$ 、 $v'_{乙}$ 。求两球的质量之比。

设甲、乙两球的质量分别为 $m_{甲}$ 和 $m_{乙}$ ，那么，它们碰撞前的总动量是 $m_{甲}v_{甲} + m_{乙}v_{乙}$ ，碰撞后的总动量是 $m_{甲}v'_{甲} + m_{乙}v'_{乙}$ 根据动量守恒定律可得

$$m_{甲}v_{甲} + m_{乙}v_{乙} = m_{甲}v'_{甲} + m_{乙}v'_{乙}$$

所以

$$\frac{m_{甲}}{m_{乙}} = \frac{v'_{乙} - v_{乙}}{v_{甲} - v'_{甲}}。$$

这给我们提供了一种比较或测量质量的方法。如果相撞的是两个微观粒子，测出它们碰撞前后的速度，我们就可以求出它们的质量之比。如果其中一个粒子的质量是已知的，还可以求出另一个粒子的质量。

(1) 滑冰场上，一名质量是 40 千克的同学静止在光滑的冰面上，另一名质量是 60 千克的同学，以 4.0 米 / 秒的速度向他滑来，两人撞上后共同运动。求他们撞后共同运动的速度。

(2) 一个质子以 1.0×10^7 米 / 秒的速度撞入一个静止的铝原子核后被俘获，铝原子核变为硅原子核。已知铝原子核的质量是质子的 27 倍，硅原子核的质量是质子的 28 倍，写出核反应方程，并求硅原子核的速度。

(3) 甲、乙两物体沿同一直线相向运动，甲物体速度的大小是 6.0 米 / 秒，乙物体速度的大小是 2.0 米 / 秒。碰撞后，甲、乙两物体都沿各自原方向的反方向运动，速度的大小都是 4.0 米 / 秒。求甲、乙两物体的质量之比。

四、动量守恒定律的应用（二）

动量守恒定律不仅应用于碰撞现象的研究，它在生产、生活和科学实验中有广泛的应用。它可以解决许多直接应用牛顿定律难以解决或者不可能解决的问题。这一节我们再研究两个例子，但也只限于物体相互作用前后的动量都在同一条直线上的情形。

【例题 1】一门旧式大炮，炮身的质量是 1.0×10^3 千克，水平发射一枚质量是 2.5 千克的炮弹，如果炮弹从炮筒飞出的速度是 6.0×10^2 米 / 秒，求炮身后退的速度。

分析：发射炮弹的过程，可看作是炮弹和炮身相互作用的过程。炮弹和炮身是我们的研究对象。在发射炮弹的过程中，炮弹和炮身受到的重力和支持力互相平衡，它们所受的外力之和为零，满足动量守恒定律的适用条件。

解：发射炮弹前，炮身和炮弹都是静止的，它们的总动量为零。设炮弹从炮筒飞出的速度为 v ，炮身后退的速度为 v' 。根据动量守恒定律可得

$$mv + Mv' = 0。$$

所以

$$v' = - \frac{m}{M} v。$$

取炮弹从炮筒飞出的速度 v 的方向为正方向，代入题目所给的数据得

$$\begin{aligned} v' &= - \frac{2.5}{1.0 \times 10^3} \times 6.0 \times 10^2 \text{ 米 / 秒} \\ &= - 1.5 \text{ 米 / 秒。} \end{aligned}$$

负号表示 v' 的方向同 v 的方向相反，即炮身的速度方向是向后的，大小是 1.5 米 / 秒。

【例题 2】假设一枚质量为 m 的导弹，运动到空中某点时速度的大小为 v ，方向如图 4 - 10 所示，就在该点，导弹突然炸成两块，质量为 m_1 的一块以速度 v_1 沿 v 的反方向飞去，求另一块运动的速度 v_2 。

分析：爆炸前，可认为导弹是由质量为 m_1 和 $(m - m_1)$ 的两块弹片组成的。导弹爆炸的过程，可看作是这两块弹片相互作用的过程。这两块弹片是我们的研究对象。它们在爆炸的过程中都受到重力作用，所受的外力之和不为零。但是，两块弹片间的爆炸力，远大于它们受到的重力，重力对它们动量的变化影响很小，可以忽略不计。所以，可以认为两块弹片所受的外力之和为零，满足动量守恒定律的适用条件。

解：两块弹片在炸开前的总动量是 mv 。根据动量守恒定律可得

$$mv = mv_1 v_1 + (m - m_1) v_2。$$

所以

$$v_2 = \frac{mv - m_1 v_1}{m - m_1}。$$

取导弹爆炸前的速度 v 的方向为正方向， v 为正值，而 v_1 与 v 的方向相反， v_1 为负值，从上式得知 v_2 应为正值，这表示质量为 $(m - m_1)$ 的那块弹片沿与 v 相同的方向飞去。

对于第三节和第四节讨论的碰撞、爆炸等问题，由于物体在碰撞、爆炸过程中的相互作用力是随时间变化的，直接应用牛顿定律解决，既复杂又困难。但是应用动量守恒定律，我们只要知道物体相互作用前后的动量，不必考虑相互作用过程的细节，这就使问题的解决过程大大简化了。这也正是应用动量守恒定律解决问题的优点所在。

由第三节和第四节讨论的例题可以看出，应用动量守恒定律解决实际问题时，首先要明确所要研究的对象，即相互作用着的两个（或多个）物体，然后要判断当它们发生相互作用时，是否满足动量守恒定律的适用条件。只有满足动量守恒定律的适用条件，才能应用它列方程来求解未知量。在求解中往往要选定一个正方向。对于已知的速度，如果它的方向同选定的正方向相同（或相反），则取正（或负）值。对于未知的速度，如果求出它是正（或负）值，则表示该速度的方向同选定的正方向相（或相反）。

练习四

(1) 如图 4 - 11 所示，在水平桌面上有两辆小车 A 和 B，质量分别是 0.50 千克和 0.20 千克。这两辆小车分别靠在一根被压缩的轻弹簧的两端，烧断细线后，这两辆小车在弹力作用下分开，小车 A 以 0.80 米 / 秒的速度向左运动，小车 B 的速度是多大？方向如何？

(2) 一名质量是 80 千克的宇航员，到宇宙飞船外面去做实验。他相对于宇宙飞船是静止的。实验结束后，他把背着的一只质量是 10 千克的空氧气筒，以相对于宇宙飞船为 2.0 米 / 秒的速度扔掉。求宇航员由此得到的速度。

(3) 一辆质量是 60 千克的小车，以 2.0 米 / 秒的速度在水平的轨道上运动。原在车上的一个质量是 40 千克的男孩，以相对于地面为 3.0 米 / 秒的水平速度从小车的后面跳下。男孩跳下车后，小车的速度是多大？

五、反冲运动及其应用

发射炮弹的时候，炮弹向前飞去，根据动量守恒定律，我们知道，炮身是要向后退的。炮身的这种后退运动叫做反冲运动。对于大炮射击来说，反冲运动是不利的，为了使大炮回到原来的位置和重新瞄准要花不少时间。现代的大炮都安装了使大炮在发射后自动迅速复位的装置。此外，人们还发明了无后坐力炮，这种炮在发射时，火药气体从炮身后面的特殊开口喷出，炮身可以稳定不动。

当然，反冲运动并不是在任何情况下都是不利的，在科学技术中，反冲运动也有许多重要应用。

反击式水轮机就是反冲运动的一项重要应用。反击式水轮机是大型水力发电站用得最多的一类水轮机，它是靠水流的反冲作用旋转的。照图 4-12 那样，在漏斗上接一段橡皮管，橡皮管下端安一个弯曲的玻璃管。在漏斗中装水，当水从玻璃弯管流出时，水流的反冲作用就使玻璃弯管向水流的反方向发生反冲运动。如果照图 4-13 那样，把几个弯管装在可以旋转的盛水容器上，当水从这些弯管流出时，容器就旋转，这实际上是个反击式水轮机的转轮模型。实际水轮机的转轮形状与这个模型完全不同，但旋转的道理是一样的。图 4—14 是一种反击式水轮机的转轮。我国在 80 年代生产的这种水轮机，功率最大的达 32 万千瓦，转轮直径为 6.0 米，质量为 150 吨。

喷气式飞机和火箭也是反冲运动的重要应用。它们都是靠喷出气流的反冲作用获得巨大速度的。现代的喷气式飞机，靠连续不断地向后喷出气体，飞行速度能超过 2000 米/秒。

我国早在宋代就发明了火箭（图 4-15），它的构造同节日里玩的“起花”相似，是在箭上扎一个火药筒，火药筒前端是封闭的。当火药点燃生成的气体以很大速度向后喷出时，火箭就向前做反冲运动。到了明代，我国还制成了原始的二级火箭（图 4—16），龙体内的第二级火箭是在火箭已经飞到空中以后才点燃的。

现代的火箭，原理同古代的相同，但构造复杂得多。现代火箭主要用来发射探测仪器、常规弹头或核弹头、人造地球卫星或宇宙飞船，即作为运载工具。由于用途不同，火箭的大小和复杂程度相差很大。小的如步兵用的反坦克导弹的火箭，连同弹头总共不过十几千克，长度只有一米左右。大的如把宇宙飞船送到月球去的火箭，共有三级，总高度超过 100 米，发射时包括燃料的质量达 3000 吨。

火箭技术与科学技术和国防现代化都有很大关系，是现代的一门重要的尖端技术。我国自 1970 年 4 月 24 日发射第一颗人造地球卫星以来，火箭技术不断取得新的成就：1981 年 9 月 20 日，我国成功地用一枚运载火箭发射了三颗卫星，成为世界上掌握一箭多星发射技术的少数几个国家之一；1990 年 4 月 7 日，我国自行研制的“长征三号”运载火箭首次为国外用户成功地发射了美国制造的“亚洲一号”卫星，标志着我国火箭技术不仅进入成熟和实用阶段，而且也开始步入国际市场；1990 年 7 月 16 日，我国又将自己研制的大推力运载火箭——“长征二号”捆绑式运载火箭（彩图 2）发射试验成功，表明我国已经具有了发射重型卫星的能力。我国的火箭技术经过几十年的发展，已经跨入世界先进行列，但是我们还要进一

步提高火箭技术。我们相信，在同学们中，一定会有人在这一重要领域中为祖国作出卓越贡献。

漫谈火箭

火箭起源于中国，是我国古代劳动人民的重大发明之一。现代的火箭，原理同古代的相同，只是构造复杂得多。现代火箭主要由壳体和燃料两大——部分组成，壳体是圆筒形的，前端是封闭的尖端，后端有尾喷管。燃料燃烧时产生的高温高压气体以很大的速度从尾部向后喷出，火箭就向前飞去。

火箭向前飞行所能达到的最大速度，也就是燃料烧尽时火箭获得的最终速度，它跟什么因素有关系呢？根据动量守恒定律，理论上的计算表明，最终速度主要取决于两个条件，一个是喷气速度，一个是质量比，即火箭开始飞行时的质量与燃料烧尽时的质量之比。喷气速度越大，质量比越大，火箭的最终速度也越大。为了提高喷气速度，需要使用高质量的燃料，目前常用的液体燃料是液氢，用液氧做氧化剂。质量比与火箭的结构和材料有关系，现代火箭能达到的质量比不超过 10。在现代技术条件下，一级火箭的最终速度还达不到发射人造卫星所需要的速度（你还记得这个速度至少应当是多大吗？）。要发射卫星，现在都用多级火箭。

多级火箭是由单级火箭组成的(图 4 - 17)。发射时先点燃第一级火箭，它的燃料用完以后空壳就自动脱离，以后又是下一级火箭开始工作。多级火箭在工作中及时把对后面航行没有用的空壳抛掉，使火箭的总质量减少，因此能够达到很高的速度，可以用来发射人造卫星、宇宙飞船或洲际导弹等。当然，火箭的级数也不是越多越好，因为级数越多，火箭的构造也越复杂，工作的可靠性也就越差。目前，多级火箭一般都是三级的。

我国的“长征”号系列运载火箭（包括“长征一号”、“长征二号”、“长征三号”和“长征四号”等），在不到 30 年的发展时间里，已经跨入世界先进行列，不但可以满足发射各种不同用途、不同重量卫星的需要，而且质量好，可靠性高。到目前为止，“长征”号系列火箭已成功地进行了 28 次发射，把 32 颗国内外卫星送入预定轨道。

自从 1926 年第一枚液体燃料的现代火箭试飞成功以来，利用液体燃料或固体燃料的化学能作能源的火箭一直占有重要的地位。目前，科学家们也在研制用电能或太阳能作能源的电火箭、太阳能火箭等。但是，无论哪一种火箭，都将向可靠性高、经济性好和多次使用的方向发展。

自制小火箭

找来一块长、宽均约 7 厘米的薄铝箔（可以是包装香烟或巧克力的铝箔，但不宜用铝箔和白纸粘成的复合纸），抹平后借助铅笔卷起，一边卷一边涂胶水，最后卷成管形，粘好接缝处。抽出一段铅笔，将铝箔管空的一端捏细一段（约长 1.5 厘米），达到牢固密封的程度，作为箭头。用小刀刮下 6~8 根火柴头部的药粉，从铝箔管中抽出铅笔，将药粉慢慢倒入铝箔管中。将拉直的回形针（或缝被针、大头针等）插进铝箔管开口的尾部，压紧铝箔后将针拔出，使之成为喷管（约长 1.5 厘米）。这样，一个简易的小火箭模型就做成了。

找来两段细铁丝，弯成两个“门”形框架，并把它们固定在泡沫塑料或木板上。把火箭模型放到支架上（图 4 - 18），同时擦燃二三根火柴（或在一段铁丝的一端缠上棉花，在棉花上倒入少许的食用油或灯油，点燃棉

花)，加热箭身前中部内装药粉的部位。当药粉被点燃时，模型内的气体急剧膨胀，随着燃烧的烟雾从喷管快速喷出，火箭模型便迅速向前飞去。你做做看。

本章小结

这一章我们学习了动量定理和动量守恒定律。动量守恒定律是自然界普遍适用的基本规律之一，有广泛的应用。

(1) 什么叫动量？动量是矢量，还是标量？通过这一章的学习，你对动量概念的重要性有什么认识？

(2) 什么叫冲量？冲量是矢量，还是标量？在恒力的情况下，冲量的方向是什么？

(3) 动量定理的内容是什么？在处理力学问题时，什么情况下，应用动量定理比直接应用牛顿定律方便？举出几个应用动量定理的事例。

(4) 动量守恒定律的内容是什么？它在什么条件下成立？举出一些应用动量守恒定律解决实际问题的事例。

(5) 应用动量守恒定律解决问题有什么优点？根据你做过的题目，谈谈你的体会。

(6) 牛顿定律的适用范围是什么？为什么说动量守恒定律比牛顿定律有更大的普遍性？

(7) 什么叫反冲运动？举两个应用反冲运动的实例。

(8) 应用动量守恒定律解决问题的一般步骤是什么？有哪些值得注意的地方？你自己总结一下。

习题

(1) 两个质量相同的物体，如果它们的动量相等，它们的动能一定相等吗？如果它们的动能相等，它们的动量一定相等吗？

(2) 10 千克的物体以 10 米 / 秒的速度作直线运动，在受到一个恒力作用 4.0 秒后，反向运动，速度的大小变为 2.0 米 / 秒。物体受到的冲量是多大？方向如何？物体受到的恒力是多大？方向如何？

(3) 在地面上以 8.0 米 / 秒的初速度竖直上抛一个石子，石子的质量是 0.20 千克。那么，

经过 0.40 秒，石子动量的变化是多大？石子的末动量是多大？方向如何？

经过 1.0 秒，石子动量的变化是多大？石子的末动量是多大？方向如何？(g 取 10 米 / 秒²)

(4) 据报道，1991 年 5 月的一天，北京的一位 4 岁小男孩从 15 层的高楼上坠下，被地上的一位叔叔接住，幸免于难。请你估算一下小男孩受到的合外力的冲量是多大。假设小男孩和他的救命恩人之间的相互作用时间是 0.50 秒，小男孩受到的平均冲击力是多大？假想小男孩直接落到了地面上，在 0.010 秒内他的速度变为零，他受到的平均冲击力又是多大？

提示：通常情况下，4 岁孩子的质量是 14 ~ 16 千克，每一层楼房的高度是 2.7 ~ 3.0 米。g 取 10 米 / 秒²。

(5) 在光滑的水平面上有一辆平板车，一个人站在这辆平板车上，用一个大锤敲打车的左端（图 4 - 19）。在锤的连续敲打下，这辆平板车能持续地向右驶去吗？说明你回答的理由。

(6) 插页图 9 是放在光滑的水平导轨上的两个挨在一起的滑块。两个滑块静止，在它们之间有一个用线栓住的弹性金属片。烧断线以后，两个滑块就向相反方向运动。插页图 10 是用闪光照相记录下来的滑块在运动中各个时刻的位置。试利用这两幅图，验证这两个滑块相互作用前后，它们的总动量守恒。

(7) 一个中子以 2.0×10^7 米 / 秒的速度撞到一个静止的原子核上。已知中子以 1.7×10^7 米 / 秒的速度被反弹回来，那个原子核以 3.1×10^6 米 / 秒的速度向前运动。求原子核的质量数。

(8) 一个质量 $M = 0.20$ 千克的小球放在高度 $h = 5.0$ 米的直杆顶端（图 4 - 20）。一颗质量 $m = 0.010$ 千克的子弹以 $v_0 = 5.0 \times 10^2$ 米 / 秒的速度沿水平方向击中小球，并穿过球心，小球落地处离杆的距离 $s = 20$ 米。求子弹落地处离杆的距离。（ g 取 10 米 / 秒²）

(9) 甲、乙两个小孩各乘一辆冰车在水平冰面上游戏。甲和他的冰车的质量共为 $M = 30$ 千克，乙和他的冰车的质量也是 30 千克。游戏时，甲推着一个质量为 $m = 15$ 千克的箱子，和他一起以大小为 $v_0 = 2.0$ 米 / 秒的速度滑行，乙以同样大小的速度迎面滑来（图 4 - 21）。为了避免相撞，甲突然将箱子沿冰面推给乙，箱子滑到乙处时乙迅速把它抓住。若不计冰面的摩擦力，求甲至少要以多大的速度（相对于地面）将箱子推出，才能避免与乙相撞。（1986 年全国普通高等学校招生统一考试物理试题）

提示：要想甲和乙刚好能避免相碰，则要求甲推出箱子后的速度与乙抓住箱子后的速度相等。

* (10) 一只质量是 100 千克的小船，载着两名游泳的人，他们的质量分别为 40 千克和 60 千克。最初小船浮在水中不动。后来这两名游泳者分别从船头和船尾同时跳入水中，而且他们离开船时的速度都在水平方向上，大小都是 3.0 米 / 秒。求他们离开船后小船的速度。

第五章 能量和能量守恒

大型游乐场上，一辆翻滚过山车由轨道顶端被释放，设它在蜿蜒上下的轨道上无摩擦地运动到底端。这时，它的速度有多大？车子由轨道顶端运动到底端的整个过程中，重力做了多少功？直接应用牛顿运动定律和功的概念，虽然可以解决这个问题，但计算起来很麻烦。有了能量的概念，知道重力做功与重力势能变化的关系，知道重力势能与动能之间的转化，解决这个问题就变得容易了。

在物理学中，引入一个新的重要概念，可以使人们对客观世界有新的认识，并开辟一条解决问题的新途径。能量概念的引入正是这样。能这个概念是人们在研究机械做功时开始发展起来的，现在，能的转化和守恒定律已经被无数事实证实它是自然界普遍适用的基本规律，它把自然界千变万化的事物和广泛的科学技术领域联系起来。利用它，人类得以更深入地认识自然，并解决广泛的理论问题和实际问题。

这一章，我们在必修课的基础上进一步学习有关能量的知识。我们要进一步认识能量的概念和相关的重要规律，逐步学会用能量的观点解释现象、思考问题和解决问题。这对我们学好物理和掌握科学方法是十分重要的。

一、功和能

这一节，我们主要用来复习在必修课中学过的有关功、功率、能、功和能的关系等知识，同学们在阅读课文之前，还可以和前面一样，先回忆必修课学过的有关内容，再与课文对照。

功 一个物体受到力的作用，并在力的方向上发生一段位移，物理学中就说这个力对物体做了功。力和物体在力的方向上发生的位移，是做功的两个不可缺少的因素。

设物体在力的作用下发生一段位移，力的大小为 F ，位移的大小为 s ，力 F 的方向与位移 s 的方向之间的夹角为 α （图 5 - 1）。那么，按照功的定义，力 F 对这个物体所做的功为 $W = Fscos\alpha$ 。

上式中，当 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 时， $cos\alpha = 0$ ， $W = 0$ 。这表示力的方向与位移的方向垂直，物体在力的方向没有发生位移，力不做功（图 5 - 2）。

当 $\alpha < \frac{\pi}{2}$ 时， $cos\alpha > 0$ ， $W > 0$ ，这表示力对物体做正功（图 5 - 3）。

当 $\frac{\pi}{2} < \alpha$ 时， $cos\alpha < 0$ ， $W < 0$ ，这表示力对物体做负功（图 5 - 4）。

一个力对物体做了负功，往往说成物体克服这个力做了功（取绝对值）。这两种说法，在意义上是完全等同的。比如，上抛物体向上运动时，重力做了 -6 焦的功，往往就说物体克服重力做了 6 焦的功。

当物体在 n 个力的共同作用下发生一段位移时，这 n 个力所做的总功等于各个力分别对物体所做的功的代数和。例如，图 5 - 5 所示，在水平面上运图 5 - 5 外力所做的总功等于各动的物体受四个力的作用 拉个力所做的功的代数和。力 F ，滑动摩擦力 f 、重力 G 、支持力 N （ G 和 N 在图中未画出）。重力和支持力不做功，因而，外力所做的总功 W 等于拉力 F 和滑动摩擦力 f 所做的功的代数和： $W = Fscos\alpha - fs$ 。

功 W 跟完成这些功所用时间 t 的比值，叫做功率。功率用来表示做功的快慢。功率的公式是

$$P = \frac{W}{t}。$$

功率也可以用力 and 速度来表示，在力的方向与位移方向相同时， $W = Fs$ ， $P = \frac{Fs}{t} = FV$ 。

能 人类对能这个概念的认识是随着物理学的发展逐步扩大和加深的。粗浅地说，如果一个物体能够对外界做功，我们就说物体具有能量。能量有各种不同的形式，如机械能（动能和势能）、内能、电能、核能、化学能等等。

物体由于运动而具有动能。设一个质量为 m 的物体，以速度 v 运动，那么这个物体具有的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2。$$

物体由于受到重力作用而具有重力势能。一个质量为 m 的物体，被举

到高度为 h 处，具有的重力势能为

$$E_p = mgh。$$

我们知道，高度 h 是相对的。我们说某点的高度 h 为若干，这是相对于某个水平面来说的，这个水平面的高度取做零。与高度 h 一样，重力势能 mgh 也是相对的。我们说物体具有重力势能 mgh ，这是相对于某个水平面来说的，这个水平面的高度取做零，重力势能也是零。这个水平面叫做参考平面。实际问题中取哪个平面作为参考平面，可视研究问题的方便而定。通常，选择地面作为参考平面。

除了重力势能，还有其他形式的势能。物体因发生弹性形变而具有弹性势能。动能、重力势能、弹性势能统称为机械能。电荷在电场中由于受到电力作用而具有电势能。分子之间由于相互作用而具有分子势能。物体的内能是物体的分子势能和分子做无规则运动而具有的分子动能之和。

功和能的关系 做功的过程，就是能量转化的过程。例如，子弹在燃气的推动下从枪膛发射出去，推力对子弹做了多少功，就有多少燃气的内能转化成等量的子弹的动能。这是人类经过长期实践对功和能之间的关系所得到的基本认识。这一章，我们将按照这一基本认识，进一步学习有关功和能的一些知识。

练习一

(1) 图 5-6 表示物体在力 F 作用下在水平面上发生一段位移，试分别计算这三种情况下力 F 对物体所做的功。设在这三种情况下力 F 和位移 s 的大小都相同： $F = 10$ 牛， $s = 1$ 米。角 α 的大小如图注中所示。

(2) 一位同学沿斜面向上推一个质量为 m 的空木箱上的距离为 s ，推力 F 与斜面平行(图 5-7)。木箱受几个力？各力对木箱做功的情况怎样？总功的表达式是怎样的？

(3) 如图 5-8 所示，摆球在水平面上做匀速圆周运动。关于小球所受各力做功的情况，正确的是：

- A. 绳子的拉力 T 对小球做了功。
- B. 重力 G 对小球做了功。
- C. 拉力 T 和重力 G 都没有做功。
- D. 物体所受的合力 F 对物体做了功。

(4) 飞机、轮船所受的空气或水的阻力并不是固定的，它跟飞机、轮船的速度有关。当速度很大时，阻力与速度的平方成正比。试证明：这时要把飞机、轮船的最大速度增大到 2 倍，发动机的额定功率要增大到 8 倍才行。这就是在增大飞机、轮船等交通工具的速度方面，每取得一个新的成就都很不容易的原因。

二、动能定理

一个运动物体，在有外力对它做功时，动能会发生变化。外力对物体做的功跟物体动能的变化之间有什么关系没有呢？

设一个质量为 m 的物体，原来的速度是 v_1 ，动能是 $\frac{1}{2}mv_1^2$ ，在与运动方向相同的恒定外力 F 的作用下，发生一段位移 s ，速度增加到 v_2 ，动能增加到 $\frac{1}{2}mv_2^2$ 。在这一过程中外力 F 对物体所做的功 $W = Fs$ 。根据牛顿第

二定律， $F = ma$ ；根据运动学公式 $v_2^2 - v_1^2 = 2as$ 得到 $s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$ 。所以

$$\begin{aligned}Fs &= ma \times \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} \\ &= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2\end{aligned}$$

或 $W = E_{K2} - E_{K1}$ 。

上面我们设外力方向与运动方向相同，导出了关系式 $E = E_{K2} - E_{K1}$ ，这时外力做正功，动能增加。外力方向与运动方向相反时，上式同样适用，这时外力所做的功是负值，动能的变化也是负值。我们知道，外力对物体做负功，往往说成物体克服这个力做了功。因此，对这种情形，也可以说物体克服阻力所做的功等于动能的减少。例如在水平粗糙平面上运动的小车，在摩擦力的作用下速度减小，这时动能的减少就等于它克服摩擦力所做的功。

上述结论是假定物体只受一个力而推导出来的；如果物体不只受到一个力，而是受到几个力，上述结论仍旧正确。只是外力所做的功是指各个力所做的功的代数和，即外力所做的总功。这样，我们得到结论：外力对物体所做的总功等于物体动能的变化。这个结论叫做动能定理。这里，我们所说的外力，既可以是重力、弹力、摩擦力，也可以是电场力、磁场力或其他的力。

动能定理是力学中一条重要规律，经常用来解决有关的力学问题。下面举一个例题来说明。

【例题】 一架喷气式飞机的质量为 5.0×10^3 千克，起飞过程中受到的推力为 1.8×10^4 牛，受到的阻力是飞机重的 0.020 倍。起飞速度为 60 米/秒，求起飞过程中滑跑的距离。

分析我们从能量的角度分析这个问题。飞机原来是静止的，初动能 $E_{K1} = 0$ 。飞机在水平方向受到的外力是推力 F 和阻力 f ，在外力作用下飞机在跑道上滑跑一段距离 s ，外力对飞机做功，飞机的动能增加，速度最后达到起飞速度 v ，飞机的末动能 $E_{K2} = \frac{1}{2}mv^2$ 。外力所做的总功等于 $Fs - fs$ 。

已知 m 、 v 、 F 、 f ，根据动能定理即可求出 s 。

解：根据动能定理得到

$$Fs - fs = \frac{1}{2}mv^2。$$

已知 $m = 5.0 \times 10^3$ 千克, $v = 60$ 米 / 秒, $F = 1.8 \times 10^4$ 牛, $f = 0.02 \times 5.0 \times 10^3 \times 9.8$ 牛。由此可得

$$\begin{aligned} s &= \frac{mv^2}{2(F-f)} \\ &= \frac{5.0 \times 10^3 \times 60^2}{2(1.8 \times 10^4 - 9.8 \times 10^2)} \text{米} \\ &= 5.3 \times 10^2 \text{米。} \end{aligned}$$

这个例题也可以用牛顿第二定律和运动学公式来解, 请同学们自己做一个。

从例题可以看出, 在利用动能定理来解力学问题的时候, 要明确物体的初动能和末动能, 要分析物体的受力情况, 并据此列出各个力所做的功, 然后才可以利用动能定理来求解。

动能定理对于解决力学问题是很有用的。由于动能定理不涉及物体运动过程中的加速度和时间, 因此应用它来解题往往比较方便。

练习二

(1) 在 x 射线管中, 电子受到 3.2×10^{-21} 牛的力, 前进的距离是 20 厘米, 电子得到多大的动能?

(2) 把一辆汽车的速度从 10 千米 / 小时加快到 20 千米 / 小时, 跟把汽车的速度从 50 千米 / 小时加快到 60 千米 / 小时所需的功相比, 哪种情况下要做较多的功? 想想看, 这是为什么?

(3) 在光滑水平面上的物体受到沿着平面的两个力 F_1 和 F_2 的作用(图 5 - 9)。在下列情况下, 从静止开始移动 2 米时, 物体获得的动能各是多大? $F_1 = 10$ 牛, $F_2 = 0$; $F_1 = 0$, $F_2 = 10$ 牛; $F_1 = F_2 = 5$ 牛。

(4) 质量是 2.0 克的子弹, 以 300 米 / 秒的速度水平射入厚度是 5 厘米的木板(图 5 - 10), 射穿后的速度是 100 米 / 秒。子弹受到的平均阻力是多大?

(5) 电视机显像管的加速电压大约是 25 千伏。电子在电场力作用下, 经过这一加速电压到达荧光屏时动能是多少电子伏? 是多少焦? 电子的速度大小是多大?

三、重力做功与重力势能的变化

把一个物体举高，要克服重力做功，同时，物体的重力势能增加。一个物体从高处下落，重力做功，同时，重力势能减小。可见，重力势能跟重力做功有密切联系。

质量为 m 的物体从高度为 h_2 的 B 点上升到高度为 h_1 的 A 点(图 5 - 11)，重力势能增加了 $E_{p1} - E_{p2} = mgh_1 - mgh_2$ 。在这个过程中，物体克服重力所做的功 $W_G = mg(h_1 - h_2) = E_{p1} - E_{p2}$ 。可见，物体克服重力做功，物体的重力势能就会增加，增加的重力势能等于物体克服重力所做的功。

反过来，如果物体从高度为 h_1 的 A 点降到高度为 h_2 的 B 点，重力势能就减少了 $E_{p1} - E_{p2} = mgh_1 - mgh_2$ 。在这个过程中，重力对物体所做的功 $W_G = mg(h_1 - h_2) = E_{p1} - E_{p2}$ 。可见，重力对物体做功，物体的重力势能就会减少，减少的重力势能等于重力对物体所做的功。

在上面的讨论中，物体是沿着直线路径由起点到达终点的。我们可以证明：重力对物体所做的功只跟起点和终点的位置有关，而跟物体的运动路径无关。只要起点和终点的位置相同，不论物体沿着什么路径，直线也好，曲线也好，重力所做的功都是相同的，而且都等于物体重力势能的变化。

与重力做功相似，电场力对电荷做的功也只跟起点和终点的位置有关，而跟电荷运动的路径无关。

但是，并不是所有的力做功都有这个特点。摩擦力做功就没有这个特点。

*设一个质量为 m 的物体，从高度为 h_1 的 A 点自由下落到高度为 h_2 的 B 点，再水平移到 C 点(图 5 - 12)。物体在水平移动中，重力并不做功。所以，在整个过程中，重力对物体所做的功，就等于物体由 A 点自由下落到 B 点的过程中重力所做的功：

$$W_G = mgh_1 - mgh_2$$

如果让这个物体沿着斜面 AC 滑下，从原来高度为 h_1 的 A 点滑到高度为 h_2 的 C 点，物体沿斜面滑下的距离是 s ，重力所做的功是

$$W_G = mgs \sin \theta \cdot S = mgh_1 - mgh_2.$$

我们看到，物体由起点 A 到终点 C，不论沿着折线 ABC，还是沿着斜面 AC，重力所做的功是相等的，而且都等于物体重力势能的变化。

可以证明，这个物体沿着任一路径 AC 从高度是 h_1 的 A 点运动到高度是 h_2 的 C 点(图 5 - 13)，重力所做的功仍为

$$W_G = mgh_1 - mgh_2.$$

这就是说，重力对物体所做的功只跟起点 A 和终点 C 的位置有关，而跟物体运动的路径无关。只要起点和终点的位置相同，不论物体沿着什么路径运动，重力所做的功都相同，并且都等于物体重力势能的变化。

练习三

(1) 质量是 50 千克的人，沿着长 150 米，倾角为 30° 的坡路走上土

丘时，重力对他所做的功是多少？他克服重力所做的功是多少？他的重力势能增加了多少？

(2) 图 5 - 14 是几个斜面，它们的高度相同，而倾角不同。让质量相同的物体沿斜面由静止从顶端运动到底端。试根据功的公式来计算沿不同斜面重力所做的功，证明这个功跟斜面的倾角无关。如果不计摩擦和空气阻力，物体到达斜面底端的速度是多大？

(3) 一只 100 克的球从 1.8 米的高处落到一个水平板上又弹回到 1.25 米的高度。求在整个过程中重力对球所做的功。球的重力势能变化了多少？

(4) 图 5 - 15 表示一个斜抛物体的运动。物体的质量为 m 。

当物体由抛出位置 1 运动到最高位置 2 时，重力所做的功是多少？物体克服重力所做的功是多少？物体的重力势能增加了多少？

由位置 2 运动到跟位置 1 在同一水平面上的位置 3 时，重力所做的功是多少？物体的重力势能减少了多少？

由位置 1 运动到位置 3 时，重力所做的功是多少？物体的重力势能变化了多少？

如果不计空气阻力，物体在位置 1 的速度 v_1 和在位置 3 的速度 v_3 ，大小是否相同？

四、机械能守恒定律

动能和势能（重力势能和弹性势能）统称为机械能。一种形式的机械能是可以和另一种形式的机械能相互转化的。

物体自由下落或沿光滑斜面下滑的时候，重力对物体做功，物体的重力势能减少。而物体的速度越来越大，说明物体的动能增加了。这时，重力势能转化成动能。

原来具有一定速度的物体，在竖直上升或沿光滑面上升的时候，物体克服重力做功，速度越来越小，物体的动能减少了。同时物体的高度增加，重力势能增加了。这时，动能转化成重力势能。

弹性势能也可以跟动能相互转化。放开一个被压缩的弹簧，它可以把一个跟它接触的小球弹出去。这时弹力做功，弹簧的弹性势能减少，转化为小球的动能。放开被拉开的弓，把箭射出去，这时弓的弹性势能减少，转化为箭的动能。

从这些例子我们看到，机械能的相互转化是通过重力或弹力做功来实现的。重力或弹力做功的过程，也就是机械能从一种形式转化成另一种形式的过程。那么，在这种转化中机械能是否守恒呢？下面我们就重力做功的情形定量地研究这个问题。

我们先用自由落体作例子定量地研究动能和重力势能的转化（图 5 - 16）。设有一个质量为 m 的物体，从高度为 h_1 的起点下落到高度为 h_2 的终点。设物体在起点的速度为 v_1 ，在终点的速度为 v_2 。物体在下落过程中，重力做了功。从动能定理知道，重力所做的功等于物体动能的增加，即

$$W_G = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2。$$

另一方面，从重力做功与重力势能的关系知道，重力所做的功等于重力势能的减少，即

$$W_G = mgh_1 - mgh_2。$$

这样，我们得到

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_1 - mgh_2。$$

这就是说，重力做了多少功，就有多少重力势能转化成等量的动能。把上式移项后得到

$$\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1。$$

上式表示，物体在自由下落中，它的重力势能转化成动能，但在任何时刻，动能和重力势能之和，亦即它的机械能保持不变。

上述结论不仅对自由落体是正确的，可以证明，在只有重力做功的情形下，它总是正确的。所谓只有重力做功，是指：物体只受重力，不受其他的力，如自由落体和各种抛体运动的情形；或者除重力而外还受其他的力，但其他力并不做功，物体沿光滑斜面运动就属于这种情形。

在只有重力做功的情形下，物体的动能和重力势能发生相互转化，但机械能的总量保持不变。这个结论叫做机械能守恒定律，它是力学中一条重要规律，又是更普遍的能的转化和守恒定律的一个特例。

不但动能和重力势能的相互转化中机械能保持不变，在弹性势能和动能的相互转化中，如果只有弹力做功，机械能也是保持不变的。

五、机械能守恒定律的应用

解决某些力学问题，从能量的观点来分析，应用机械能守恒定律来求解，往往带来方便。应用机械能守恒定律来解决力学问题，也要先分析物体的受力情况。在动能和重力势能的相互转化中，如果只有重力做功，其他力不做功，就可以应用机械能守恒定律。

【例题 1】物体从 1 米高、2 米长的光滑斜面顶端开始无摩擦地滑下（图 5 - 17），到达斜面底端时的速度是多大？（空气阻力不计）

分析：斜面是光滑的，没有摩擦，又不计空气阻力，斜面对物体的支持力与物体的运动方向垂直，不对物体做功，因而物体在下滑过程中只有重力做功，机械能是守恒的。题中没有给出物体的质量，但可以设物体的质量为 m 。物体在开始下滑时， $E_{p1} = mgh$ ， $E_{k1} = 0$ ，初状态的机械能 $E_1 = E_{p1} + E_{k1} = mgh$ ；到达斜面底端时物体的速度是 v ， $E_{p2} = 0$ ， $E_{k2} = \frac{1}{2}mv^2$ ，末状态的机械能 $E_2 = E_{p2} + E_{k2} = \frac{1}{2}mv^2$ 。根据机械能守恒定律即可求得 v 。

解：根据机械能守恒定律

$$E_{p2} + E_{k2} = E_{p1} + E_{k1},$$

可得
$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh。$$

所以 $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 1} \text{米/秒} = 4.4 / \text{秒}。$

这个问题，应用牛顿运动定律和运动学公式求解，也可以得到同样的结果。但是应用机械能守恒定律，在解决问题的步骤上要简单得多。

机械能守恒定律，是应用牛顿运动定律推得的。然而在有些情况下，运用牛顿运动定律讨论问题，要涉及变化相当复杂的合外力，这时机械能守恒定律的优点就显示出来了。在上述例子里，如果把斜面换成曲面（图 5 - 18），我们同样可以运用机械能守恒定律简单地求出问题的结果，而直接应用牛顿运动定律，由于物体在曲面上受的合外力是时刻变化的，处理起来就困难得多，往往需要用高等数学来计算。我们来看下面一个例题。

【例题 2】一个摆长是 l 的单摆，最大偏角是 θ ，求单摆在最低位置的速度（图 5 - 19）。

分析：这个问题直接用牛顿第二定律和运动学的知识来处理，就需要用高等数学。现在用机械能守恒定律来处理。

摆锤受到两个力：重力和悬线的拉力。悬线的拉力始终垂直于摆锤的运动方向，不做功，所以单摆的机械能守恒。

选择摆锤在最低点时所在的水平面作参考平面。摆锤在最高点时为初状态，这时摆锤的动能 $E_{k1} = 0$ ，重力势能 $E_{p1} = mgl(1 - \cos \theta)$ ，机械能 $E_1 = mgl(1 - \cos \theta)$ 。摆锤在最低点时为末状态，这时摆锤

的动能 $E_{k2} = \frac{1}{2}mv^2$ ，重力势能 $E_{p2} = 0$ ，机械能 $E_2 = \frac{1}{2}mv^2$ 。根据机械能守恒定律即可求得摆锤在最低位置时的速度。

解：根据机械能守恒定律

$$E_{p1} + E_{k2} = E_{p1} + E_{k1}$$

可得

$$\frac{1}{2}mv^2 = mg(1 - \cos\theta),$$
$$v = \sqrt{2gt(1 - \cos\theta)}$$

由这两个例子可以看出，应用机械能守恒定律，允许我们只讨论运动的初状态和末状态，而不必考虑这两个状态之间过程的细节，可以避免直接应用牛顿定律遇到的困难，也简化了解决问题的步骤。在这一点上，机械能守恒定律跟我们学过的动量守恒定律是相同的。

守恒定律不仅给处理问题带来方便，而且有更深刻的意义。自然界千变万化，但是人们发现有些物理量在一定条件下是守恒的，可以用这些“守恒量”来表示物理世界变化的规律，这就是守恒定律。机械能守恒定律以及我们在上一章学习过的动量守恒定律就是其中的两个。正因为自然界存在着“守恒量”，而且某些守恒定律的适用范围很广泛，所以，在物理学中寻求“守恒量”已经成为物理学研究工作的一个重要方面。

练习四

(1) 在下面列举的各个实例中，除 外都不计空气阻力，哪些机械能是守恒的？说明理由。

跳伞员带着张开的降落伞在空气中匀速下落。

抛出的手榴弹或标枪做斜抛运动。

用细绳拴着一个小球，绳的一端固定，使小球在竖直平面上做圆周运动。

拉着一个物体沿着光滑的斜面匀速上升（图 5-20 甲）。

在光滑水平面上运动的小球，碰到弹簧上，把弹簧压缩后又被弹簧弹回来（图 5—20 乙）。

(2) 有一种地下铁道，站台建得高些，电车进站时要上坡，出站时要下坡（图 5 - 21）。设站台高度 $h = 2$ 米，进站的电车到达 A 点时的速度为 25.2 千米/时，此后随即切断电动机的电源，电车能不能冲到站台上？如果能冲上，在站台上的速度是多大？（不考虑摩擦阻力， g 取 10 米/秒²）

(3) 一个物体从距地面 40 米的高处自由落下，经过几秒钟后，该物体的动能和重力势能相等？（ g 取 10 米/秒²）

(4) 把一块质量是 3.0 千克的石头，从 20 米高的山崖上，以 30° 角、5.0 米/秒的速度朝斜上方抛出（图 5 - 22）。求石头落地时速度的大小。（空气阻力不计）

讨论一下：石头落地时速度的大小与下列哪些量有关系？与哪些量没有关系？为什么？

石块的质量。

石块抛出时的速度大小。

石块抛出时的速度方向（抛射角）。

石块抛出时的高度。

六、能的转化和守恒定律

列车在机车的牵引下匀速上坡，列车的动能没有改变，但重力势能越来越大，机械能不断增加。列车机械能的增加，是因为牵引力对列车做了功，同时，机车的热机消耗了内能。机车牵引力做功的过程，就是内能转化为机械能的过程。

翻滚过山车开动之始，要由钢索将它牵引到轨道顶端，在牵引过程中，钢索的牵引力对它做了功，它的机械能增加。同时，带动钢索的电动机消耗了电能。钢索牵引力做功的过程，就是电能转化为机械能的过程。

子弹射入墙壁里，最后停在墙壁里，子弹的机械能减少。子弹的机械能的减少，是因为子弹克服摩擦力做了功，同时，内能增加，使物体的温度升高。子弹克服摩擦力做功的过程，就是机械能转化成内能的过程。

做功使气体压缩，气体的温度升高时，气体的内能增加。压缩气体时对气体做功的过程，就是机械能转化成内能的过程。而气体膨胀对外界做功的过程，则是内能转化为机械能的过程。

电流通过电烤箱或电饭锅的电阻丝，电阻丝发热。这时，导线中的自由电荷受电场力的作用发生定向移动，电场力对自由电荷做功（电流做功），消耗了电能。电流做功的过程，就是电势能转化成内能的过程。

铅球运动员将铅球用力推出，使铅球的机械能增加。这是因为人对铅球做了功，同时，人消耗了由食物提供的化学能。人做功的过程，就是化学能转化为铅球的机械能的过程。

从以上例子可以知道，做功的过程就是能的转化的过程。而且，做了多少功，就有某种形式的能量转化成等量的其他形式的能。功是能的转化的量度。

自然界以及人类在生产和科研活动中，随时都在进行着能量转化的过程。能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为别的形式，或者由一个物体转移到别的物体，而在这种转化和转移中保持能的总量不变。这就是能的转化和守恒定律。这是人类在长期的实践中总结出的普遍的、基本的规律。

物质有许多不同的运动形式。每种运动形式都有一种对应的能。跟机械运动对应的是机械能，跟热运动对应的是内能，跟其他运动形式对应的还有电能、化学能、原子能等等。能的概念概括了所有不同运动形式中共同的东西。能的不断转化表现了物质的运动不断地由一种形式转化为另一种形式。能的转化和守恒定律就是揭示自然界的这种转化过程的一条普遍规律。

能的转化和守恒定律，是在工业革命直接影响下，经过许多物理学家的长期探索，在 19 世纪确立的。这个定律把广泛的科学和技术领域联系起来。从物理、化学、生物到天文、地质，以及各种工程技术中，都发挥了重大的作用，是人们认识和利用自然的有力武器。

许多科学家在求解未知问题时，常常按这样的习惯顺序进行：他们首先应用有关的守恒定律，如果还有什么没有解决的问题，再去采用有关的具体规律或方法。这为我们提供了一种有效的思维方法。我们也要学着这样来思考问题，这对我们的学习和将来的工作都是会大有好处的。

守恒定律甚至还可用于对有关的力和细节不了解的情况。目前，人类

对核力的认识还很不足，但是，应用能量守恒、动量守恒和另外的守恒定律、科学工作者们照样可以对原子核和基本粒子进行探索和研究。在 20 世纪前半叶，能量守恒定律就直接导致了中微子的发现。

【例题】 有一台直流电动机，在 $U = 220$ 伏的电压下工作，输入电流 $I = 35$ 安。用它匀速提升质量 $m = 1400$ 千克的货物。在 $t = 2$ 秒内将货物提升的高度为 $h = 1$ 米。设电动机输出的能量全部用来提升货物，在这 2 秒内电机导线产生的热量是多少？（ g 取 10 米 / 秒²）

分析：电流通过电动机导线产生的热量 Q ，是由焦耳定律来确定的： $Q = I^2Rt$ 。题中并未给出导线的电阻 R ，因而无法应用焦耳定律求解，但我们可以应用能的转化和守恒定律来求解。

电动机在提升货物的过程中，消耗的电能为 IUt 。所消耗的电能一部分转化为重力势能 mgh （动能没有变化），另一部分因电流通过电机导线做功而转化成内能，即产生热量 Q 。

解：根据能的转化和守恒定律可得

$$IUt = mgh + Q$$

所以

$$Q = IUt - mgh$$

代入数值得 $Q = 220 \times 35 \times 2$ 焦 - $1400 \times 10 \times 1$ 焦
 $= 1400$ 焦耳。

练习五

（1）试说明下列现象中能量转化的情况。其中有的现象，你可能对过程的具体情况不太清楚，但是你起码应能说出：起初是什么形式的能量，最后又转化成什么形式的能量。在水平公路上行驶的汽车，发动机熄火之后，速度越来越小，最后停止。

在阻尼振动中，单摆的振幅越来越小，最后停下来。你用力蹬自行车上一个斜坡。

植物的光合作用。

用太阳能电池做动力的电动汽车在赛车场上奔驰。用柴油机带动发电机发电，供给电动水泵抽水，把水从低处抽到高处。

核电站（铀裂变反应）发电。

核动力潜艇在深海中加速航行。

（2）图 5 - 23 表现了撑杆跳运动的几个阶段：助跑、撑杆起跳、越横杆。试分析撑杆跳运动员在这几个阶段中能量的转化情况。

（3）两个儿童分别从同样高度、不同长度的两个滑梯上滑下，谁滑到底端时的速度大？它们各自的机械能守恒吗？如果不守恒，机械能哪里去了？试就摩擦阻力可以忽略和不能忽略的两种情况进行分析（假定两个儿童与滑梯间的摩擦系数相同）。

（4）在进行世界杯足球赛实况转播时，电视机天线接收到的电磁波信号的能量是很微弱的。但是，当你打开电视机时，你可以看到明亮清晰的画面，听到赛场上的各种喧闹声，电视机工作时各元件又要发热。这时发出的光能、声能、内能等都是由什么能量转化来的？

（5）一台起重机加速提升货物，将 200 千克的货物由地面提升到 10

米高处，钢索对重物的牵引力是 2.5×10^3 牛。

在这一过程中，合力对重物做了多少功（不计空气阻力）？重物的动能增加了多少焦？

在这一过程中，重力做了多少功？是正功还是负功？重力势能改变了多少？是增加还是减少？

在这一过程中，机械能是否守恒？

牵引力（除重力而外的力）做了多少功？机械能改变了多少？是增加还是减少？

（6）在第（5）题中，如果起重机钢索是由电动机带动的，电动机输出的能量有 80% 用来提升重物（做有用功），那么，电动机的输出功率是多少千瓦？提升这个重物要用多长时间？在这一过程中，至少要消耗多少电能？

*七、弹性碰撞

让我们来做图 5 - 24 所示的实验。两个质量相同的钢球分别吊在细绳上，静止时挨在一起。使 A 球偏开一个角度后放开，它回到原来位置时撞上 B 球。可以看到，碰撞后 A 球静止下来，B 球摆到与 A 球原来高度几乎相等的高度。当 B 球摆回来撞上 A 球后，B 球又静止下来，A 球又摆到与原来差不多的高度上。这个过程还将继续下去，两个球交替摆动。

大家想一想，为什么碰撞后一个球会停下来而把它的动量完全传递给另一个球？为什么第一个球不向后弹回或者两个球都以较小的速度向前运动？例如，碰撞前 A 球的速度是 v ，碰撞后它以 $-0.5v$ 的速度弹回，B 球以 $1.5v$ 的速度向前运动，或碰撞后 A 球以 $0.2v$ 的速度、B 球以 $0.8v$ 的速度都向前运动，这两种情况都不违反动量守恒定律。在不违反动量守恒定律的许多种可能的情况中，为什么实际发生的只是我们看到的这一种情况呢？

上述的实验和问题是物理学史上一件著名的事情。1666 年，在成立还不久的英国皇家学会的例会上表演了这个实验并引起了很大的兴趣，随后出现了许多对这一现象的不同的甚至是混乱的解释。到 1668 年，才有三位学者作出了正确的说明，其中对这一问题作出完整分析的是荷兰物理学家惠更斯。惠更斯认为，在这种碰撞中，除了动量守恒以外，还有另一物理量守恒，他指出这个物理量就是当时所说的“活力” mv^2 。后来人们把“活力”改叫动能，并且把它的定义式由 mv^2 改为 $\frac{1}{2}mv^2$ 。

同学们在学过本节的例题之后就可以知道，由于在图 5 - 24 的实验中动量和动能都守恒，我们看到的现象是唯一可能发生的现象。

那么，是不是在所有的碰撞中除了动量守恒外，动能都守恒呢？你们只要回顾一下插页图 9 的实验，比较一下两个滑块在碰撞前后的动能之和，就很容易知道，动能是不守恒的。

所以，并非所有的碰撞动能都守恒。有的碰撞动能守恒，有的碰撞动能不守恒。正如惠更斯指出的那样，只有在碰撞后物体不发生永久形变、不裂成碎块、不粘在一起、不发热以及不发生其他内部变化的情况下，动能才是守恒的。我们把这种动量和动能同时守恒的碰撞叫做弹性碰撞。

大多数的碰撞，动能都不守恒，都要有一部分动能转化成其他形式的能，这样的碰撞叫做非弹性碰撞。在非弹性碰撞中，如果物体在相碰后粘合在一起，这时动能的损失最大，这种碰撞叫做完全非弹性碰撞。

钢球、玻璃球、硬木球等坚硬物体之间的碰撞，其实也并不是完全的弹性碰撞，在碰撞时动能也是有损失的，只是在通常情况下，动能的损失很小，不到百分之三、四，因此我们可以把它们当成弹性碰撞来处理。真正的弹性碰撞，只有在分子、原子以及更小的粒子之间才会遇到。

〔例题〕 钢球 1 的质量为 m_1 ，钢球 2 的质量为 m_2 。球 2 原来静止，球 1 以速度 v_1 向球 2 运动，求发生弹性正碰后两球的速度 v'_1 和 v'_2 。

根据题意，相互作用的两球不受外力作用，所以它们的动量守恒。两球发生正碰，碰撞后两球的运动在同一直线上，我们可以用代数式来进行计算，动量守恒的表示式是

$$m_1 v_1 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad (1)$$

由于是弹性碰撞，所以动能守恒，即

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2 \quad (2)$$

从(1)式可得

$$m_1 (v_1 - v'_1) = m_2 v'^2_2 \quad (3)$$

从(2)式可得

$$\frac{1}{2} m_1 (v_1 - v'_1)(v_1 + v'_1) = \frac{1}{2} m_2 v'^2_2 \quad (4)$$

把(3)式代入(4)式，可得

$$v_1 + v'_1 = v'_2 \quad (5)$$

利用(3)、(5)两式，可以解出

$$v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 ,$$

$$v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 , \quad (6)$$

(6)式就是我们的答案。如果 $m_1 > m_2$ ，算出的 v'_1 和 v'_2 都是正值，表示 v'_1 和 v'_2 都与 v_1 方向相同。如果 $m_1 < m_2$ ，算出的 v'_1 为负值，表示 v'_1 和 v_1 方向相反，钢球 1 在碰撞后将被弹回。

在(6)式中如果令 $m_1 = m_2$ ，可以看到， $v'_1 = 0$ ， $v'_2 = v_1$ 。这就是我们在图 5 - 24 的实验中看到的现象。

*练习六

(1) 两个质量都是 3 千克的球，各以 6 米 / 秒的速率相向运动，发生正碰后每个球都以原来的速率向相反方向运动。它们的碰撞是弹性碰撞吗？为什么？

(2) 一个 1.5 千克的物体原来静止，另一个 0.5 千克的以 0.2 米 / 秒的速度运动的物体与它发生弹性正碰，求碰撞后两个物体的速度。

(3) 甲乙两物体在同一直线上同向运动，甲物体在前，乙物体在后。甲物体质量为 2 千克，速度是 1 米 / 秒；乙物体质量为 4 千克，速度是 3 米 / 秒。乙物体追上甲物体发生正碰后，两物体仍沿着原来的方向运动，而甲物体的速度变为 3 米 / 秒，乙物体的速度变为 2 米 / 秒。这两个物体的碰撞是弹性碰撞吗？为什么？

(4) 在本节课文的(6)式中，如果 $m_2 \gg m_1$ ，就得到 $v'_1 = -v_1$ ， $v'_2 = 0$ 。这组解的物理意义是什么？

中子的发现

自从 1896 年法国物理学家贝克勒尔发现放射现象后，人们认识到原子核仍然具有内部结构，并且是能够变化的。1919 年卢瑟福做了用 α 粒子轰击氮原子核的实验，发现了质子是原子核的组成部分。之后，有人提出原子核可能是由带正电的质子组成的。但这种设想遇到的困难是：除了氢原子外，所有元素的原子核的电荷数并不等于原子核的质量数。例如，氦核的质量数是 4，电荷数是 2；铀 238 的质量数是 238，电荷数是 92。那么原子核里除了质子外还有什么呢？

1920 年，卢瑟福曾预言：可能有一种质量与质子相近的不带电的中性粒子存在，他把它叫做中子。

1930 年发现，用由钋 (Po) 放出的 γ 射线轰击铍 (Be) 时产生一种射线，这种射线的贯穿能力极强，它能够穿透几厘米厚的铅。当时，由被轰击物质产生的各种射线中，唯一能够贯穿铅层的是 γ 射线，所以当时认为这种射线可能是 γ 射线。

1932 年，约里奥·居里 (1900 ~ 1958) 和伊丽芙·居里 (1897 ~ 1956) 夫妇发现，如果用来自铍的这种射线去轰击石蜡 (含有大量氢原子)，竟能从石蜡中打出质子 (图 5 - 25)。但从来也没有发现过 γ 射线具有这样的性质。其实，来自铍的这种射线正是中子流，居里夫妇因为不知道卢瑟福关于中子的预言，而错过了发现中子的机会。后来，居里夫妇回忆说，如果他们当时知道中子的假说，肯定会对他们自己的实验有正确的理解。

居里夫妇的实验对英国物理学家查德威克 (1891 ~ 1974) 有很大启发。他当时正致力于检验卢瑟福关于中子的假说，于是以极大的兴趣研究了这种射线。发现这种射线在磁场中不发生偏转，可见它是中性粒子流。测出这种射线的速度不到光速的十分之一，因此排除了它是 γ 射线的可能。查德威克用这种射线轰击氢原子和氮原子。结果打出了一些氢核 (质子) 和氮核。他测量了被打出的氢核和氮核的速度，并运用能量守恒和动量守恒，推算出这种射线粒子的质量。

被打出的氢核的速度是不同的。查德威克认为速度最大的氢核是由于未知射线中的粒子与它正碰的结果，其他速度较小的是由于斜碰的结果。设 m 是未知粒子的质量， v 是它的速度， m_H 是氢核的质量， v'_H 是被打出的氢核的最大速度。假定它们间的碰撞是弹性碰撞，即碰撞中保持动能守恒和动量守恒，氢核在未被打出前可以认为是静止的，根据弹性碰撞知识，我们知道，

$$v'_H = \frac{2m}{m + m_H} v。$$

对于打出氮核的实验，设 m_N 是氮核的质量， v'_N 是被打出的氮核的最大速度，我们同样可以得到，

$$v'_N = \frac{2m}{m + m_N} v。$$

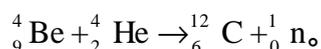
我们知道，氮核的质量 m_N 是氢核质量 m_H 的 14 倍。把上述两式相除以消去未知的 v ，并用 $14m_H$ 来代替 m_N ，可得

$$\frac{v'_H}{v'_N} = \frac{m + 14m_H}{m + m_H}$$

查德威克在实验中测得的氢核的最大速度是 3.3×10^9 厘米/秒，氮核的最大速度是 4.7×10^8 厘米/秒。把测得的数值代入上式进行计算，他得出 $m = 1.15m_H$ 。

查德威克还用别的物质来代替氢和氮重做这个实验，得到的结果都是这种未知粒子的质量差不多等于氢核的质量。这样，查德威克就发现了一种新的与氢核（质子）的质量差不多的粒子。由于这种粒子不带电，所以叫做中子。后来的更精确的实验测出，中子的质量非常接近于质子的质量，只比后者大千分之一多（中子的质量是 1.674920×10^{-24} 克，质子的质量是 1.672614×10^{-24} 克）。

在原子物理学中用 1_0n 表示中子，即中子的质量数是1，电荷数是0。发现中子的核反应方程是



实验证实，从许多原子核里都能打出中子来，可见中子也是原子核的组成部分。

中子的发现是物理学史上的一件大事。中子不带电荷，它与各种物质粒子不发生静电作用，很容易接近甚至打进原子核。中子发现后，不少科学家用中子轰击原子核，进一步揭示了物质的微观结构，对近代物理的发展起了很大的作用。由于发现中子的重大贡献，查德威克获得了1935年诺贝尔物理学奖。

中子的发现运用了能量守恒定律和动量守恒定律，证明了这两个定律的普遍适用性。

中子的发现是科学猜想跟严密的科学实验和理论推证相结合的产物，也是查德威克和与他同代的物理学家们在科学研究中科学思想互相交流、启发，共同探讨的结果。查德威克事后说：“先进的科学知识通常是很多人劳动的成果。”

本章小结

这一章我们在必修课的基础上进一步讨论了功和能的关系，学习了动能定理、机械能守恒定律和能的转化及守恒定律。

(1) 动能定理的内容是什么？在处理力学问题时，什么情况下，应用动能定理比应用牛顿运动定律及运动学公式方便？

(2) 重力势能的改变跟重力做功有什么关系？如果物体只受到重力的作用（各种抛体运动），重力做正功的过程中，能的转化情况是怎样的？重力做负功的过程中，能的转化情况又是怎样的？

(3) 如果除了重力做功，还有其他力对物体做功，这时重力势能跟重力做功的关系是怎样的？例如，一个物体在重力和空气阻力的作用下，竖直加速下落，由A点下落到另一点B，重力对物体做了10焦耳的功，这时重力势能减少多少焦耳？减少的重力势能转化成了什么能量？

(4) 在什么条件下机械能守恒定律（不包括弹性势能，下同）成立？为什么用机械能守恒定律来处理问题有时十分简便？举例说明。

(5) 在中学阶段,你学过哪些形式的能?试举出各种不同形式的能之间转化的实例。

(6) 功是能的转化的量度,应当怎样理解这一论断?试举出几个实例来说明。

(7) 你认为能的转化和守恒定律有什么重要意义?(8) 你是否习惯和善于从能的转化和守恒的观点解释现象、思考和处理问题?总结一下这方面的经验。

习题

(1) 以下说法是否正确?说明理由。

A. 一个物体做匀速运动时,它的机械能一定守恒。B. 一个物体所受合外力的功为零时,它一定保持静止或匀速直线运动状态。

C. 一个物体所受的合外力不等于零时,它的机械能可能守恒。

D. 一个物体所受的合外力为零时,它的机械能一定守恒。

(2) 当重力对物体做正功时,物体的重力势能和动能可能的变化情况,下面哪个说法对?

A. 重力势能一定增加,动能一定减小。

B. 重力势能一定减小,动能一定增加。

C. 重力势能一定减小,动能不一定增加。

D. 重力势能不一定减小,动能一定增加。(3) 一个原来静止的物体,在力 F 的作用下,沿着力的方向移动一段距离 s ,得到速度 v 。如果移动的距离不变,力 F 增大到 n 倍,得到的速度也增大到 n 倍。这话对吗?速度应该增大到多少倍?

(4) 在水平面上有两个质量不同而具有相同动能的物体,它们在阻力作用下最后停下来,设它们所受的阻力相等。这两个物体停止前经过的距离是否相同?停下来所用的时间是否相同?

(5) 一颗子弹以 700 米/秒的速度打穿第一块木板后,速度减低到 500 米/秒。如果让它继续打穿第二块同样的木板,它的速度将变为多大?它能否再打穿第三块同样的木板?

(6) 一个木块,质量为 1.0 千克,用长绳静止地悬在空中,一颗 20 克的子弹以 150 米/秒的速度沿水平方向射进这个木块,并嵌入木块中。计算

子弹原有的动能;

子弹嵌入木块后,木块和子弹的动能;

子弹和木块总共损失的机械能;

木块能上升的最大高度。

提示:子弹击中木块时总动量守恒。

(7) 雪橇在重力作用下,从静止开始,沿一个倾角 5° 的冰坡下滑 100 米,然后又沿相同倾角的冰坡上升,前进了 60 米才停下来。求雪橇与冰面之间的滑动摩擦系数。

(8) 一辆 5 吨的载重汽车开上一个坡路,坡路长 $s=100$ 米,坡顶和坡底的高度差 $h=10$ 米。汽车上坡前的速度是 10 米/秒,上到坡顶时减为 5.0 米/秒。汽车受到的摩擦阻力是车重的 0.05 倍。求汽车的牵引力。取 $g=10$

米 / 秒²。

讨论：在这个题目里，汽车的牵引力做多少功？汽车增加的机械能是多少？其中动能和重力势能各是多少？克服摩擦而转化成的内能是多少？

(9) 以 10 米 / 秒的初速度竖直向上抛出一个质量为 0.5 千克的物体，物体上升的最大高度为 4 米。设阻力的大小恒定，求上升过程中空气阻力对物体做的功和小球落回抛出点的动能。整个过程中有多少机械能转化为内能？

(10) 在地面上做一个简单实验，你可以估算出太阳辐射的功率，即太阳每秒辐射出的能量。这个实验是这样的：

取一个不高的横截面积是 3 分米²的圆筒，筒内装水 0.6 千克。在太阳光垂直照射 2 分钟后，测得水的温度升高了 1 。

已知射到大气顶层的太阳能只有 45% 到达地面，另外 55% 被大气吸收和反射，而未到达地面。你能由此估算出太阳辐射的功率吗？还需要什么数据，你自己去查找。

实验测得的太阳辐射功率为 38.6×10^{25} 焦 / 秒。看看你估算的结果与这个结果在数量级上是否相符。

(11) 彩图 8 是我国第一座自行设计、建造的核电站——秦山核电站的防波堤的照片。在堤前面水中，有一片由类似大铁锚形状的水泥构件堆成的防护区，海水可以通过，但因受到阻碍而减速。堤面不是完全平的，堤面上有许多浅洞和突起，海水冲到堤面时，水在那里回旋流动，又进一步减速。这样可以减弱海水波浪对堤面的冲击力。试问：

海水的速度减小，动能转化成了什么形式的能？

用小球打击墙面的模型作比喻来说明，为什么水的动能减小，可以减弱波浪对堤的冲击力。

电学

电学知识可分为“场”和“路”两方面。“路”是直流电路和交流电路方面的知识；“场”是指电场、磁场、电磁场方面的知识。在必修课中学习了这两方面的知识，在选修课中要进一步学习场的知识。

场这个概念是英国科学家法拉第在 19 世纪引入物理学中的新的、革命性的概念。我们学过电场和磁场，知道电或磁的相互作用是通过电场或磁场实现的。有了电场和磁场的概念，才完满地解释了电磁感应现象，发明了发电机，开辟了电的时代。电场和磁场是相互联系的，组成电磁场。麦克斯韦研究了电磁场，建立了完整的电磁理论，并预言电磁场可以脱离电荷以波动的形式在空间传播，形成电磁波。光也是一种电磁波。场的概念把电磁现象和光现象联系起来，使人们对客观世界有了新的认识。今天，人们对电磁波（包括无线电波）已经不陌生了，广播、电视、无线通讯都是靠电磁波来实现的。

场的概念获得了巨大成功。“在一个现代物理学家看来，电磁场正和他坐的椅子一样地实在”（爱因斯坦，英费尔德：《物理学的进化》）。电磁场是物质的一种形态。

学习以下三章内容，你将进一步获得电场、磁场、电磁感应方面的知识，知道场的重要，知道人们是怎样研究场的。

第六章 电场

在必修课中，我们已经学习了静电场的一些初步知识，知道电荷的周围存在着电场，电场对电荷有力的作用。这一章我们将在必修课的基础上，进一步学习电场的有关知识，加深对电场的了解，增强解决电学问题的能力。

一、电荷的相互作用 电荷守恒

点电荷间的相互作用 我们已经知道，自然界中只存在两种电荷，即正电荷和负电荷；电荷间存在着相互作用，同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引，电荷间的这种作用遵从怎样的规律呢？法国物理学家库仑首先研究了最简单的带电体——点电荷间的相互作用，得出了著名的库仑定律。即，在真空中两个点电荷间的作用力跟它们的电量的乘积成正比，跟它们的距离的平方成反比，作用力的方向在它们的连线上。

点电荷是一种理想化的模型。任何带电体都有一定的形状和大小，但是在许多情况下，带电体间的距离比它们自身的大小大得多，以致带电体的形状和大小对相互作用力的影响可以忽略不计，这样的带电体就可以被看作是点电荷。

如果用 Q_1 、 Q_2 表示两个点电荷的电量，用 r 表示它们间的距离，用 F 表示它们间的作用力，库仑定律则可以写成下面的形式

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2}。$$

式中 K 是静电力常量，其值为 9.0×10^9 牛·米²/库²。

库仑定律给出的虽然只是两个点电荷间相互作用的关系，但是任意一个带电体我们都可将它看成是由许多点电荷组成的。所以，如果我们知道电荷在带电体上的分布，那么带电体间的相互作用力的大小和方向就可以求出。

电荷在其他物质（如空气、油、玻璃等）中的相互作用要比在真空中小。电荷在空气中的相互作用比在真空中的稍小一些，在不要求很精确的情况下，计算空气中点电荷间的相互作用时，一般可按在真空中处理。

把库仑定律与万有引力定律比较，很容易看出二者非常相似，都遵从平方反比规律。人们至今还说不清为什么这两个定律如此相似，但是这种相似性却可以使我们在很多情况下借用我们所熟悉的有关力学知识来理解电学知识。

【例题】比较电子和质子间的静电引力和万有引力。已知电子质量是 0.91×10^{-30} 千克，质子质量是 1.67×10^{-27} 千克。电子和质子的电量都是 1.60×10^{-19} 库。

电子和质子间的静电引力 $F_{电}$ 和万有引力 $F_{引}$ 分别是

$$F_{电} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, F_{引} = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

因此，

$$\frac{F_{\text{电}}}{F_{\text{引}}} = \frac{kQ_1Q_2}{Gm_1m_2}。$$

上式中 m_1 、 m_2 和 Q_1 、 Q_2 已知， $k=9.0 \times 10^9$ 牛·米²/库²， $G=6.67 \times 10^{-11}$ 牛·米²/千克²。把数值代入进行计算，得

$$\begin{aligned} \frac{F_{\text{电}}}{F_{\text{引}}} &= \frac{9.0 \times 10^9 \times 1.60 \times 10^{-19} \times 1.60 \times 10^{-19}}{6.67 \times 10^{-11} \times 1.67 \times 10^{-27} \times 0.91 \times 10^{-30}} \\ &= 2.3 \times 10^{39}。 \end{aligned}$$

从这个例题可以看出，电子和质子间的万有引力比它们的静电引力小得多。正是因为这个缘故，在研究微观带电粒子间的（如原子中电子和原子核间的）相互作用时，经常把万有引力忽略不计。

电荷守恒 我们知道，摩擦可以使物体带电。使物体带电叫做起电。在初中我们就从物质结构的角度分析了摩擦起电的原因。在摩擦起电中，一个物体因失去一些电子而带正电，同时另一个物体因得到这些电子而带等量的负电。摩擦起电并不是创造了电荷，只是电荷从一个物体转移到另一个物体。不仅摩擦起电如此，所有的起电过程，实际上都是使物体中的正负电荷分离的过程。

经过长期的实践人们发现：电荷既不能创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。这就是电荷守恒定律。

电荷守恒定律是自然界中一个非常重要的规律，它不仅在宏观领域中成立，在微观领域中同样成立。例如在核反应中，不仅质量数守恒，而且电荷数守恒，总电荷数保持不变。迄今为止，人们还没有发现任何与电荷守恒定律相违背的事实。

库仑扭秤实验

库仑是用图 6 - 1 所示的扭秤来做实验的。扭秤的主要部分是在一根细金属丝下面悬挂一根玻璃棒，棒的一端有一个金属小球 A，另一端有一个平衡小球 B。在离 A 球某一距离的地方再放一个同样的金属小球 C。如果 A 球和 C 球带同种电荷，它们间的斥力将使玻璃棒转过一个角度。向相反方向扭转旋钮 M，使玻璃棒回到原来的位置并保持静止，这时金属丝扭转弹力的力矩产生的效果跟电荷间斥力的力矩产生的效果相抵消。因此从旋钮 M 转过的角度可以计算出电荷间作用力的大小。

库仑早就猜测电荷之间的作用力跟它们之间的距离的平方成反比。库仑利用扭秤在 A、C 两球电量不变的情况下，测量了两个小球在不同距离下的力，发现这个力确实跟距离的平方成反比，从而证实了自己的猜测。

在库仑做扭秤实验的时候，还不知道怎么来测量电量，电量的单位也还没有确定。库仑用一个简单的办法巧妙地解决了这个困难。他为了改变带电小球的电量，就将这个带电小球跟与它同样的但不带电的金属小球相碰，由于两个小球完全相同，它们带的电量也一定相等，从而使带电小球的电量减小到原来的 $\frac{1}{2}$ （图 6 - 2）。再用同样的方法可以使带电小球的

电量减小到原来的 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$ 等等。库仑用这种方法来改变带电小球的电量，但保持两球之间的距离不变，利用扭秤测量了带电小球之间的作用力，发现作用力跟它们所带电量的乘积成正比。

自制验电器

验电器可以检验物体是否带电。下面我们来做一个简易的验电器。

准备一个曲别针、一块锡箔（香烟锡纸、糖果锡箔均可）、一个玻璃瓶和一块泡沫塑料。

如图 6 - 3 所示。将曲别针弯成图甲的形状；锡箔剪成图乙所示的两片，每片上端穿一小孔；用泡沫塑料按瓶口的大小做一合适的瓶塞；将弯好的曲别针穿过瓶塞并把锡箔片挂在上，如图丙所示；然后将瓶塞塞在瓶口上，如图丁所示。这样就做成一个简易的验电器。

你可以用这一验电器检验一下相互摩擦的物体是否带电，彼此所带的电是同种的还是异种的。

做好的验电器要妥善保存，后面的小实验还要用到。

练习一

(1) 两个相同的金属小球，一个带的电量为 $+4.0 \times 10^{-11}$ 库，另一个带的电量为 -6.0×10^{-11} 库，求

两球相距 50 厘米时的作用力。

把两球接触后，再使它们相距 50 厘米时的作用力（图 6-4）。

(2) 真空中三个同种点电荷固定在同一条直线上（图 6-5），三个点电荷的电量均为 4.0×10^{-12} 库。求 Q_1 所受静电力的大小及方向。

(3) 如图 6 - 6 所示，用两根同样长度的细绳，把两个带同种电荷的

小球悬挂在同一点，两球的质量相等，A 球所带电量大于 B 球所带电量。当两球静止时，下列表示 θ_A 与 θ_B 的关系的答案哪个正确？

A. $\theta_A > \theta_B$ 。 B. $\theta_A = \theta_B$ 。 C. $\theta_A < \theta_B$ 。

(4) 如图 6 - 7 所示，我们知道，只要有电源，闭合电路中每一点（如 A 点）都会有电荷不断地向某一确定的方向流动。这些电荷是电源创造的吗？在相同的时间内，流过 A 点的电荷与流过 B 点的电荷相等吗？与 C 点呢？

二、电场强度 电力线

电场 通过必修课的学习，我们已经知道，电荷的周围存在着电场。电场最基本的性质是对处在其中的电荷有力的作用，电荷间的相互作用就是通过电场来实现的。所以我们有必要研究电场的一些性质。

电场强度 电场有强弱之分。把一带电量为 q 的正电荷放在另一个带电量为 Q 的正电荷产生的电场的不同点（图 6 - 8），电荷 q 受到的电场力一般并不相同。电荷 q 在距 Q 近的 A 点受到的电场力大，表示这点的电场强；在距 Q 远的 B 点受到的电场力小，表示这点的电场弱。当然放在电场中某一固定点的电荷所受电场力的大小，还与电荷的电量 q 有关， q 大则所受电场力 F 也大。实验表明，对于电场中固定的一点（如图 6 - 8 中 A 点），所放电荷受到的电场力 F 的大小与所放电荷的电量 q 成正比，二者的比值 F/q 是一个常量，与所放电荷的电量无关。这个比值反映的是电场自身的属性，即电场的强弱；对电场中的不同点来说，这个比值越大，表示那里的电场越强。

放入电场中某一点的电荷受到的电场力跟它的电量的比值叫做该点的电场强度，简称场强，用符号 E 表示，即

$$E = \frac{F}{q}。 \quad (1)$$

由场强的定义可知，电场强度在数值上等于单位电荷所受的电场力。如果知道了电场中某一点的场强 E ，就可以求出任意电量 q 的电荷在该点所受的电场力 $F=qE$ 。

电场强度是一个矢量，不仅有大小，而且有方向。电场强度的方向为正电荷在该点所受电场力的方向。电场的强弱以及方向都是通过电场强度来描述的。

电场强度的单位是牛/库。电场中的某一点，如果 1 库的电荷在该点受到的电场力是 1 牛，这点的场强就是 1 牛/库。

由电场强度的定义及库仑定律可以得出，在点电荷 Q 形成的电场中，距 Q 为 r 的 P 点场强 E 的大小为

$$E = \frac{kQ}{r^2}。 \quad (2)$$

如果 Q 是正电荷， E 的方向就是沿着 QP 连线并背离 Q ；如果 Q 是负电荷， E 的方向就是沿着 QP 连线并指向 Q （图 6 - 9）。

电场的叠加 如果有几个点电荷同时存在，它们的电场就互相叠加，形成合电场。这时某点的场强，就等于各个点电荷在该点产生的场强的矢量和。例如图 6 - 10 中，P 点的场强 E 就等于 Q_1 在该点产生的场强 E_1 和 Q_2 在该点产生的场强 E_2 的矢量和。

知道了点电荷的场强公式和场强的叠加性，那么原则上任一电荷分布已知的带电体所形成的电场中某一点的场强都可以求出。

电力线 为了形象地表示电场的方向和强弱，人们引入了电力线的概念。所谓电力线是指：在电场中画出的一系列从正电荷出发到负电荷终止的曲线，曲线上任意一点的切线方向都跟该点的场强方向一致。

图 6 - 11 是几种电荷的电力线图。电力线不但能表示出电场中各点的

场强方向，而且能大致表示强弱，电力线密的地方场强大，疏的地方场强小。例如丙图中 A 点的场强就大于 B 点的场强。

从彩图 7 的照片看到，带电人体的头发由于静电斥力而竖起散开，其形状大致显示出电场电力线的形状。

匀强电场 在电场的某一区域里，如果各点的场强的大小和方向都相同，这个区域的电场就叫做匀强电场。匀强电场是最简单的同时也是很重要的电场。

在匀强电场里，既然各点的场强的方向都相同，电力线就一定是互相平行的直线；既然各点的场强的大小都相同，电力线的疏密程度也一定处处相等。因此，匀强电场中的电力线，是分布均匀的互相平行的直线。

两块靠近的大小相等互相正对并且互相平行的金属板，在分别带等量的正电和负电的时候，它们间的电场，除边缘附近外，就是匀强电场（图 6 - 12）。

法拉第和场的概念

相隔一定距离的电荷或磁体间的相互作用是怎样发生的，这个问题在历史上有过长期的争论。十九世纪前期，大部分物理学家认为电荷或磁体间的相互作用是超距作用。所谓超距作用是指这种作用不需要任何介质传递，就能够由一个物体立即作用到另一个物体。

然而法拉第通过实验发现，电作用或磁作用跟电荷之间或磁体之间的介质有关。他在不同的介质中进行同样的实验，其作用效果不同。这引起他对电磁作用本质的深思。法拉第认为，电磁力不可能是超越空间并与空间中介质无关的超距作用。法拉第提出了关于电磁作用的新看法：电荷或磁体在周围空间产生电场或磁场，正是通过场，才把电作用或磁作用传递到别的电荷或磁体。

经典力学是以超距作用为基础的。空间中除了粒子以外什么也没有，没有粒子的地方是一无所有的真空；粒子间的相互作用是超距作用，不需要通过介质传递。法拉第提出的场的模型从基本概念上突破了经典力学的框架，为建立近代物理开创了新的起点。

法拉第凭着敏锐的直觉不仅提出了场的概念，而且描绘出一幅清晰的场的图象。他用电力线或磁力线形象地表示电场和磁场。力线密的地方场就强，力线疏的地方场就弱。力线上每一点的切线方向表示场强的方向。法拉第用这幅图象解释了用经典力学无法解释的现象。例如，1831年他发现了电磁感应现象，他借助于磁力线的概念对这一现象作了如下的阐述：只要通过闭合电路的磁力线数目发生变化，电路里就会产生电流。

法拉第提出的场的概念，当时还处于萌芽状态，他甚至把力线看作机械的、有弹性的细线，就像棉线、丝线一样，但引入场的概念却是牛顿时代以来对物理学的最重要的贡献。后来麦克斯韦用数学方程定量地描述了电磁场，建立了完整的电磁场理论。场的概念取得了很大成功，并逐渐在物理学中取得了主要地位，成为物理学的基本概念之一。

练习二

(1) 如图 6-13 所示，把一电量为 4.0×10^{-9} 库的点电荷 q 放在电荷 Q 的电场中，电荷 q 距电荷 Q 0.3 米。已知点电荷 q 所受电场力为 8.0×10^{-7} 牛，求 q 所在处场强的大小。

(2) 在真空中，有一个点电荷 Q ，它的电量是 -6.6×10^{-9} 库，求离它 10 厘米处某一点的场强的大小。

(3) 如图 6-14 所示， P 点距正的点电荷 $+Q$ 和等量异种负点电荷 $-Q$ 一样远，下列说法中正确的是：

- A. P 点的场强等于点电荷 $+Q$ 在该点产生的场强的二倍，方向指向 $-Q$ ；
- B. P 点的场强为零；
- C. P 点的场强等于点电荷 $-Q$ 在该处产生的场强的二倍，方向指向 $+Q$ ；
- D. 无法判断。

(4) 比较一下课本第 178 和 179 页中表示场强的两个公式(1)和(2)，说说二者有什么不同。

(5) 有人说电力线一定是带电粒子在电场中运动的轨迹。这个说法对

吗？为什么？

三、电场中的导体

静电感应 我们在初中学过，导体的特征是在它的内部有大量的可以自由移动的电荷。对于金属导体来说，这种自由电荷就是自由电子。金属的中性原子的最外层电子跟原子核的联系很弱，在其余原子的作用下脱离了原来的原子而在整块金属中“游荡”，成为自由电子。失去了外层电子的原子变成带正电的离子，在平衡位置附近做热振动。所以，整块金属就是由做热振动的正离子和在它们之间做无规则的热运动的自由电子组成的。

把金属导体放进电场中，导体内部的自由电子受到电场力的作用，除了做无规则热运动，还要向电场的反方向做定向移动（图 6 - 15 甲），结果会使导体的两端分别出现正、负电荷。这种现象叫做静电感应。

由电荷守恒的观点可知，由于静电感应而在导体两端出现的正、负电荷的电量是相等的。自由电子定向移动到一端时，另一端便剩有带电量跟电子相等的正离子。

导体的静电平衡 把导体放进场强为 E_0 的电场中时，由静电感应出现的正、负电荷要产生一个附加电场 E' （图 6 - 15 乙）。在导体内，这个附加电场 E' 跟外电场 E_0 方向相反，叠加的结果削弱了导体内部的电场。但是，只要合场强 E 不等于零，自由电荷就在电场力的作用下继续移动，两端的电荷就要继续增加，使 E' 继续增大，直到合场强 E 等于零为止。这时自由电荷的定向移动停止了（图 6 - 15 丙），我们就说导体处于静电平衡状态。

所以，处于静电平衡状态的导体，内部的场强必定处处为零。

从外部把电荷加给导体，使它带电，所加的电荷由于静电斥力，彼此尽量远离，因而处于静电平衡状态下的带电导体，净电荷只分布在导体的外表面上，导体内部没有净电荷。这个事实可以用下述的法拉第圆筒实验来验证。

如图 6 - 16 所示，取两个验电器 A 和 B，在 B 上装一个几乎封闭的空心金属圆筒 C（叫做法拉第圆筒）。使 B 和 C 带电，B 的箔片张开。用有绝缘柄的金属小球 e 先跟 C 的外部接触，再把 e 移到 A 并跟 A 的金属球接触（图 6 - 16 甲）。经过若干次以后，可以看到 A 的箔片张开，同时 B 的箔片张开的角度减小。这表明 e 把 C 的一部分电荷搬运给了 A。可见法拉第圆筒的表面是带有电荷的。如果让 e 不接触 C 的表面，而是接触 C 的内部，重做上述实验（图 6 - 16 乙），不论重复多少次，A 的箔片都不张开，B 的箔片张开的角度也不减小。这表明 e 并没有把 C 的电荷搬运给 A，可见法拉第圆筒的内部不带电。

*** 静电屏蔽** 静电平衡时导体内部的场强为零这一现象，在技术上用来实现静电屏蔽。

如图 6 - 17 甲所示，使带正电的金属球靠近验电器，由于静电感应，验电器的箔片张开，这表示验电器受到了附近的带电体的影响。如果事先用一个金属网罩把验电器罩住（图 6 - 17 乙），再让带电金属球靠近，验电器的箔片就不张开了。即使用导线把验电器和金属网罩连接上，箔片也不张开。可见，金属网罩（或金属包皮）能把外电场遮住，使内部不受外电场的影响，这就是静电屏蔽。

有的电学仪器和电子设备的外面套有金属罩，通讯电缆的外面包一层铅皮，都是用来防止外界电场的干扰，起屏蔽作用。

验证摩擦起电产生等量异种电荷

准备一个金属容器、一根导线、一大块和一小块泡沫塑料、两把长约30厘米的有机玻璃尺（泡沫塑料条亦可）、一块锦纶布。

将金属容器放在大泡沫塑料块上，容器用导线与自制的验电器相接（图6-18甲）。用橡皮筋把锦纶布和小块泡沫塑料分别套在两把有机玻璃尺上（图6-18乙）。

将锦纶和泡沫塑料在摩擦前分别放入容器中，可以看到验电器的两个箔片并不张开。说明它们在摩擦前均不带电。

用手握住尺的后端使尺上的锦纶和泡沫塑料互相摩擦。摩擦一段时间后将其中的一块放入容器中（不要与器壁接触），可以看到验电器的锡箔片张开一定的角度；将先放入的一块拿出，再将另一块放入容器中，也可以看到同样的现象（图6-19甲），将两块相互摩擦的锦纶和泡沫塑料同时放入容器中（两物体不要接触），可以看到验电器的锡箔片不再张开（图6-19乙）。这个实验说明：摩擦起电产生等量异种电荷。

四、电势差和电势

前几节我们从电荷在电场中受到电场力作用的角度入手，学习了电场强度、电力线等概念。从这节开始，我们将从另一个角度，即电场力做功的角度，继续学习电场的有关知识。

电势差 通过必修课的学习我们已经知道，在电场里，电荷在电场力作用下移动，电场力要做功。对一定量的电荷来说，在电场力作用下从一点移动到另一点时，电场力做功的多少跟这两点间的电势差（电压）有关系，电势差越大，所做的功就越多。如果电荷 q 在电场中从一点移动到另一点，电场力做的功是 W ，那么比值 W/q 就是这两点间的电势差，即

电荷在电场中两点间移动时，电场力所做的功跟电荷电量的比值，叫做这两点间的电势差，也叫电压。电势差通常用符号 U 表示

$$U = \frac{W}{q}。$$

在国际单位制中，电势差的单位是伏特，简称伏，国际符号是 V。1 库仑的正电荷从电场中的一点移动到另一点，如果电场力做了 1 焦耳的功，这两点间的电势差就是 1 伏特。

由上式可以看出，两点间的电势差在数值上等于单位正电荷从一点移动到另一点时，电场力所做的功。

例如在图 6 - 20 所示的电场中，1 库仑的正电荷由 A 点移动到 B 点，电场力做功为 10 焦耳，则 A、B 两点间的电势差 $U_{AB} = 10$ 伏。1 库仑的正电荷由 C 点移动到 B 点，电场力做功为 -5 焦耳（即克服电场力做功 5 焦耳），则 C、B 两点间的电势差应为 $U_{CB} = -5$ 伏。在实际中，有时不需要指出电势差（电压）的正负，这时电势差取绝对值。如上述 A、B 两点间的电势差 $U = 10$ 伏，C、B 两点间的电势差 $U = 5$ 伏。

由电势差 $U = \frac{W}{q}$ 可知，电荷在电场中确定的两点间移动时，电场力做的功 W 等于电量 q 与这两点间的电势差 U 的乘积。即

$$W = qU。$$

利用这个公式时， q 、 U 都取绝对值，算出的功 W 也是绝对值，至于功的正负可以由电荷的正负和移动方向来判断。

【例题】 如图 6 - 21 所示，一带电量为 4.0×10^{-9} 库的正电荷由 A 点移动到 B 点，求电场力所做的功。已知 A、B 两点间的电势差为 5 伏。

解：由公式 $W = qU$ 可知，电荷由 A 点移动到 B 点，电场力做功的大小为

$$W = qU = 4.0 \times 10^{-9} \text{ 库} \times 5 \text{ 伏} = 2 \times 10^{-8} \text{ 焦}。$$

正电荷在电场中受力的方向与电力线的方向相同，而电荷移动的方向与电场力的方向相反，所以此电荷从 A 点移动到 B 点，电场力做的功为 -2×10^{-8} 焦。

电势 电势差跟高度差相似。实际中，人们常常不说高度差，而只说高度。例如说室内吊灯的高度是 2.2 米，这时我们是选定室内地面作标准位置（认为它的高度是零），把灯和地面的高度差作为灯的高度。

与此相似，如果在电场中选一个标准位置，那么电场中某点跟标准位置间的电势差，就叫做该点的电势。被选作标准位置的电势为零。电势的

单位和电势差的单位相同。电势和电势差都是标量。

由电势的概念可知，电场中某点的电势在数值上等于单位正电荷由该点移动到标准位置（零电势点）时，电场力所做的功。

例如在 6 - 22 所示的电场中，取 C 点电势为零，1 库仑的正电荷由 A、B、D 三点移动到 C 点，电场力所做的功分别为 15 焦耳、5 焦耳和 -3 焦耳，这三点的电势就分别为 $U_A = 15$ 伏、 $U_B = 5$ 伏、 $U_D = -3$ 伏。

有了电势的概念，我们也可以从电势差等于电势之差的角度去理解电势差。例如图 6-22 中，A、B 两点间的电势差 $U_{AB} = U_A - U_B = 15$ 伏 - 5 伏 = 10 伏；D、A 两点间的电势差 $U_{DA} = U_D - U_A = -3$ 伏 - 15 伏 = -18 伏。

在图 6 - 22 中，如果取 B 点的电势为零，请同学们算一下各点的电势以及 A 与 B、D 与 A 间的电势差。把计算的结果与上面的结果做一比较，你能得出什么结论？

电场中某点电势的大小与电势零点的选取有关，但是两点间的电势差却与电势零点的选取无关。这就像物体的高度差与零高度位置的选取无关一样（图 6 - 23）。所以实际中，人们更关心的是电势差。

用电力线不但可以表示电场的强弱，还可以表示电势的高低。由图 6 - 22 可以看出，沿着电力线的方向，电势越来越低；逆着电力线的方向，电势越来越高。电力线方向与电势高低的这种关系在任何电场中都成立。

五、等势面

在地图上常用等高线来表示地形的高低，与此相似，在电场中常用等势面来表示电势的高低。

电场中电势相同的各点构成的面叫做等势面，在同一等势面上任何两点间的电势差为零，所以移动电荷时，既不需要电场力做功，也不需要克服电场力做功。

等势面一定跟电力线垂直，即跟场强的方向垂直。假如不是这样，场强就有一个沿着等势面的分量，这样在等势面上移动电荷时电场力就要做功。但这是不可能的，因为等势面上各点电势相等，沿等势面移动电荷时电场力是不做功的。所以，场强一定跟等势面垂直。

沿着电力线的方向电势越来越低，所以电力线不但跟等势面垂直，而且总是由电势高的等势面指向电势低的等势面。

图 6 - 24 是几种常见电场中的等势面示意图（实线表示等势面）。

处于静电平衡状态的导体，内部的场强为零，在任意两点间移动电荷都不需要做功，所以任意两点间的电势差为零，整个导体是个等势体，导体表面是个等势面。

图 6 - 25 给出的是不规则形状的带电导体周围的电力线和等势面的分布情况（实线为等势面，虚线为电力线）。导体的表面是个等势面，离导体表面越近，等势面的形状与导体表面的形状越相似；离导体表面越远，等势面越接近球面。

地球是个大导体，在静电平衡状态的地球以及跟它相连的导体都是等势体。在实际工作中，常常取地球或跟地球相连的导体作为标准位置，认为它们的电势为零。

实际中测量电势比较容易，所以常常用等势面来研究电场。先测绘出等势面的形状和分布，再根据电力线和等势面处处垂直这一特性，绘出电力线的形状和分布，就可以知道整个电场的分布。设计许多电子仪器（如电子显微镜、示波管等）中的电极的形状、大小及相互位置时，都需事先经过实验，测绘出等势面的形状和分布，推知带电电极所产生的电场的分布，以便找出符合实际要求的设计方案。

练习三

(1) 一电量为 $+2.0 \times 10^{-9}$ 库的电荷，在某电场中从 A 点移动到 B 点，电场力做功为 4.0×10^{-7} 焦。单位正电荷从 A 点移动到 B 点，电场力做功为多少？A、B 两点间的电势差为多少？

(2) 在如图 6 - 26 所示的电场中，已知 A、B 两点间的电势差为 10 伏，一电量为 $+4.0 \times 10^{-9}$ 库的电荷从 A 点移动到 B 点，电场力所做的功为多少？正功还是负功？

(3) 在图 6 - 22 中，如果一个 -3.0×10^{-9} 库的电荷从 B 点移动到 D 点，电场力所做的功为多少？是正功还是负功？

(4) 一电场如图 6 - 27 所示，试判断 A、B 两点的场强哪一点强？电势哪一点高？

(5) 电场中两个电势不同的等势面能不能相交？为什么？

(6) 某电场的等势面如图 6 - 28 所示，试粗略地画出电力线的大致分布。

(7) 把一个正电荷从图 6 - 24 乙的一个等势面的 A 点移到另一个等势面的 B 点，跟从 C 点移到 B 点比较，电场力做的功相等吗？

六、匀强电场中电势差跟电场强度的关系

前面我们从电荷在电场中要受到电场力作用的角度研究电场，引入了电场强度 E 这一物理量；接着我们又从电荷在电场中移动时电场力做功的角度研究电场，引入了电势差 U 的概念。这两个不同的物理量之间是有关系的，下面我们以匀强电场为例来研究这个关系。

设图 6-29 中 A、B 间的距离为 d ，电势差为 U ，场强为 E 。把正电荷 q 从 A 移到 B，电场力做的功 W 可以表示为

$$W = Fd = qEd,$$

而

$$W = qU,$$

可见，

$$U = Ed.$$

这就是说，在匀强电场中，沿场强方向的两点间的电势差等于场强和这两点间距离的乘积。

把上式改写成

$$E = \frac{U}{d}.$$

这个等式说明，在匀强电场中，场强在数值上等于沿场强方向每单位距离上的电势差。

由上式可以得到场强的另一个单位：伏特 / 米。由于

$$1 \frac{\text{伏}}{\text{米}} = 1 \frac{\text{焦} / \text{库}}{\text{米}} = 1 \frac{\text{牛} \cdot \text{米}}{\text{米} \cdot \text{库}} = 1 \frac{\text{牛}}{\text{库}},$$

所以场强的两个单位伏 / 米和牛 / 库是相等的。

电势差跟电场强度的关系在实用上很重要。这是因为没有测量电场强度的专门仪器，但是有测量电势差的专门仪器（参看第十节），根据测得的电势差，利用电场强度跟电势差的关系，可以算出电场强度的数值。

【例题】 图 6-30 中，金属圆板 A、B 相距 3 厘米。用电动势 $\mathcal{E} = 60$ 伏的电池组使它们带电后，它们间的匀强电场的场强是多大，方向如何？

分析：A、B 板分别与电池组的正、负极相连，静电平衡后 A、B 板的电势分别与电池组正、负极的电势相同，所以金属板间的电势差就应该等于电池组的电动势。知道 A、B 板间的电势差 U ，就可以用公式 $E = U / d$ 计算出场强 E 。

解：
$$U_{AB} = \mathcal{E} = 60 \text{ 伏},$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{60}{3 \times 10^{-2}} \text{ 伏} / \text{米} = 2 \times 10^3 \text{ 伏} / \text{米}.$$

A 板带正电，B 板带负电，所以场强的方向是由 A 板指向 B 板。

练习四

(1) 在匀强电场中，沿电场强度的方向依次排列着 A、B、C 三点，A、B 间的距离是 4.0 厘米，B、C 间的距离是 6.0 厘米。A 点的电势最高，设电场强度是 1.5×10^4 伏 / 米，试求 A 与 B、B 与 C、A 与 C 间的电势差。

(2) 有两块相距 10 厘米的平行的金属板，两板间的电压为 9000 伏。求两板间的电场强度。若在两板间与两板等距离的一点上有一粒带着 -1.6×10^{-7} 库电量的尘埃，求这粒尘埃受到的电场力。当它移动到带正电的那块金属板时，电场力做了多少功？

(3) 在图 6 - 29 中，若已知 $d = 4.0$ 厘米， $E = 2.0 \times 10^4$ 伏 / 米。求一电子由 A 点移动到 B 点，电场力做的功。

七、电势能

我们知道，地面附近的物体具有重力势能。当物体沿着重力的方向从一点移动到另一点时，重力对物体做正功，物体的重力势能减少，减少的势能转化成物体的动能或者其他形式的能（图 6 - 31 甲）。与此相似，电场中的电荷也具有电势能。当电荷沿着电场力的方向从一点移动到另一点时，电场力对电荷做正功，电荷的电势能减少，减少的电势能转化成其他形式的能（图 6 - 31 乙）；如果电荷逆着电场力的方向移动，电场力就做负功（电荷克服电场力做功），电势能增加，其他形式的能转化成电势能。

乙图表示具有一定速度的带电粒子沿着与电场力方向相反的方向飞入电场，此时电场力做负功，电势能增加，动能减少。减少的动能转化成电势能。丙图表示导线中的自由电子在电场力的作用下沿导线流动，此时电场力做正功，电势能减少，而沿导线流动的自由电子不断与金属离子碰撞，使导线变热，所以减少的电势能转化成了内能。甲图与丁图中能量的相互转化，请同学们自己分析一下。

电场力做功的过程就是电势能与其他形式的能相互转化的过程，所做的功确定了电势能变化的多少。即，电场力做了多少焦耳的正功，就有多少焦耳的电势能转化成其他形式的能；电场力做了多少焦耳的负功，就有多少焦耳其他形式的能转化成电势能。电势能的变化量总等于电场力所做的功。我们知道，电场力做的功 $W = qU$ ，如果电势能的变化量用 ΔE_p 表示，则有

$$\Delta E_p = qU。$$

同第四节计算功一样，利用上式计算时， q 、 U 也都取绝对值，电势能的增减由电荷的正负和移动的方向来判定。

【例题】 如图 6 - 33 所示，长为 L 的绝缘杆一端固定一质量为 m 、电量为 q 的带正电的小球，杆的另一端固定在 O 点，并可以绕 O 点自由转动。整个杆及小球置于一场强为 E 的匀强电场中。将小球由水平位置 A 自由放下，求小球到达竖直位置 B 时的动能。杆的质量忽略不计。

分析：带电小球由 A 到 B 过程中，电场力和重力都做功。所以在考虑小球动能的变化时，要同时考虑电势能和重力势能的变化。

解：小球由 A 到 B 过程中，电场力做正功，电势能减少 $\Delta E_p = qU = qEL$ 。同时重力做正功，重力势能减少 $E_{p0} = mgL$ 。减少的电势能及重力势能均转化成小球的动能，所以小球到达 B 点时的动能

$$E_k = qEL + mgL。$$

练习五

(1) 两个异种电荷间的距离增大了一些，电场力做正功还是负功？电势能是增加还是减少？

如果使两个同种电荷间的距离增大一些呢？

(2) 如图 6 - 34 所示，一电子以某一初速度飞入电场中，试分析能量的转化情况。

(3) 在必修课中我们已学过，能量的单位还可以用电子伏特来表示，简称电子伏，用符号 eV 表示。1 eV 等于 1 个电子在电势差为 1 伏的两点

间移动时，电场力所做的功。试计算 1 电子伏等于多少焦？

(4) 在真空中有一对平行金属板，相距 6.2 厘米，加上 90 伏的电压。两价的氧离子由静止被加速，从一极板到另一极板时，它的动能是多大？

这道题有几种解法？哪种解法比较简单？

八、带电粒子在匀强电场中的运动

带电粒子在电场中要受到电场力的作用，因此要产生加速度，速度的大小和方向都可以发生变化。在现代科学实验和技术设备中，常常根据这个道理，利用电场来改变或控制带电粒子的运动。这种应用大致可以分成两种情况，一是利用电场来使带电粒子加速，一是利用电场来使带电粒子偏转。

带电粒子的加速 如图 6 - 35 所示，在真空中有一对平行金属板，由于接上电池组而带电，在它们之间建立了匀强电场。设在电场力的作用下，有一个电量为 q 的静止的带电粒子，从一个极板移动到另一个极板。设两极间的电压为 U ，根据以前学过的知识可以知道，带电粒子减少的电势能 $\Delta E = qU$ 应该等于粒子获得的动能。如果带电粒子的质量是 m ，到达另一极板时的速度是 v ，就有

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU。$$

利用上面的关系式，如果知道被加速的带电粒子的质量 m 和电量 q ，还知道平行金属板间的电压 U ，就可以计算出带电粒子被加速后的速度

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}。$$

在图 6 - 35 的两个极板上，各有一个小孔，彼此正对。如果在正极板的左侧有一些带电量为 $+q$ 的粒子，其中有一部分能以很小的速度从左孔进入电场被加速，就将以 $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ 的速度从右孔穿出。由于在带电平行板之外没有电场，从右孔穿出的带电粒子，将做匀速直线运动，直到它们碰到别的物体或者进入另一个电场为止。

带电粒子的偏转 如图 6 - 36 所示，在真空中水平放置一对金属板，板间的距离为 d 。接上电池组后，在它们之间就建立了匀强电场，设两板间的电压为 U ，则场强为 $E = \frac{U}{d}$ 。当速度为 v_0 、带电量为 q 的带电粒子沿着水平方向进入这个电场时，由于在竖直方向上受到电场力 qE 的作用，带电粒子在电场中的运动将跟平抛物体的运动相似；在水平方向上做匀速运动，在竖直方向上做初速度为零的匀加速运动。因此，我们可以用运动合成的知识来求电场中带电粒子在任一时刻的速度。下面我们通过一道例题来研究带电粒子的偏转问题。

【例题】 一对长 6.0 厘米、相距 0.20 厘米的平行金属板，加上 2.0 伏的电压，产生一个电场。速度为 3.0×10^7 米 / 秒的电子流，以平行于极板的方向进入电场。求电子离开电场时，偏离原来方向的角度有多大（图 6 - 37）。

分析：由于电子在水平方向做匀速运动，所以通过极板需要的时间 t ，可以由极板的长度 l 和电子进入极板时的速度 v_0 求出：

$$t = \frac{l}{v_0}。 \quad (1)$$

电子在竖直方向做初速度为零的匀加速运动，加速度可由 $\alpha = \frac{F}{m}$ 和

$F = eEe \frac{U}{d}$ 求出：

$$\alpha = \frac{eU}{md} \quad (2)$$

电子离开电场那一时刻在竖直方向的分速度 v_{\perp} ，由 (1) 和 (2) 式可得：

$$v_{\perp} = \frac{eU l}{mdv_0} \quad (3)$$

知道了 v_{\perp} 和 v_0 ，就可以由

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{v_{\perp}}{v_0} \quad (4)$$

求出电子离开电场时偏转的角度 φ 。

解：已知 $l = 6.0 \times 10^{-2}$ 米， $d = 0.20 \times 10^{-2}$ 米， $U = 2.0$ 伏， $e = 1.60 \times 10^{-19}$ 库， $m = 0.91 \times 10^{-30}$ 千克， $v_0 = 3.0 \times 10^7$ 米 / 秒。

$$\begin{aligned} v_{\perp} &= at = \frac{eU}{md} \cdot \frac{l}{v_0} \\ &= \frac{1.60 \times 10^{-19} \times 2.0 \times 6.0 \times 10^{-2}}{0.91 \times 10^{-30} \times 0.20 \times 10^{-2} \times 3.0 \times 10^7} \text{米/秒} \\ &= 3.5 \times 10^5 \text{米/秒。} \end{aligned}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{v_{\perp}}{v_0} = \frac{3.5 \times 10^5}{3.0 \times 10^7} = 0.0117。$$

$$\varphi = 0.67^\circ。$$

练习六

(1) 一个初速度为零的电子，在场强为 4.0×10^3 伏米 / 的匀强电场中被加速。求经过 2.0×10^{-8} 秒后，电子的速度和动能。

(2) 在本节例题中，如果极板的长度、极板间的距离和被偏转的电子流的初速度都不变，电子流的偏转角的大小取决于什么？

(3) 两价离子在 90 伏的电压下从静止加速后，测出它的动量是 1.2×10^{-21} 千克·米 / 秒。这种离子的质量是多大？

(4) 一动能 1000 电子伏的电子，沿着与电场垂直的方向进入匀强偏转电场。已知偏转电极长 6.0 厘米，相距 1 厘米，偏转电压 4.0 伏，求电子离开偏转电场时的偏转角度。

* 九、示波管

示波管是示波器的核心部件。现在，示波器已经成为科学研究、检测和修理各种电子仪器不可缺少的工具。我们在分组实验中将学习它的使用方法。在这一节里先学习示波管的结构和工作原理。

示波管由电子枪、偏转电极和荧光屏组成（图 6 - 38），它的内部是真空。

电子枪是由发射电子的炽热金属丝和加速电极组成的。图 6 - 39 是示波管的电子枪示意图。在炽热的金属丝前面有带孔的金属板。金属丝和金属板之间是加速电子的电场。从炽热金属丝发射出来的电子被加速后从金属板的小孔穿出，沿着直线前进，最后打在荧光屏上，在那里产生一个小的亮斑。

图 6 - 38 中电子枪前面的一对偏转电极 Y 、 Y' 叫做竖直偏转板。在 Y 、 Y' 上加电压，使 Y 板的电势高于 Y' 板，场强方向由 Y 指向 Y' ，电子枪射出的电子流就要向 Y 板偏转，荧光屏上的亮斑将偏到原来位置的上方。如果加速电子的电场不变，即保持从电子枪射出的电子流的速度不变，从上节的例题可以知道，亮斑偏移的大小，跟加在 Y 、 Y' 上的电压的大小成正比。所以示波管可以用来测量电压。

如果在 Y 、 Y' 上所加的电压是变化的，那么荧光屏上的亮斑就会在竖直方向上随着电压的变化而改变位置。当电压是周期性变化的，而且变化又很快的时候，荧光屏上亮斑位置的往返移动也会很快，看起来就成了一条竖直的亮线。这样，就看不出电压是怎样随时间而变化的了。为了在上述情况下也能观察电压是怎样随时间而变化的，要在另一对偏转电极 X 、 X' ——水平偏转板上加一个扫描电压。

我们可以通过下面的比喻来了解扫描电压的作用。当你拿着香火在竖直方向上抖动时，看到的只是一条竖直的亮线。如果在抖动香火的同时还使香火沿着水平方向匀速移动，香火描绘出来的亮线就能显示出它在竖直方向上抖动的情况。在水平偏转板 X 、 X' 上加扫描电压，可以使亮斑从左向右匀速地水平移动，这叫做扫描。当亮斑移到右端以后，又会立即回到左端，开始第二次扫描。如果在 X 、 X' 上加扫描电压的同时，在 Y 、 Y' 上加随时间而变化的电压，我们就可以在荧光屏上看到由亮斑的移动描绘出来的曲线，这条曲线可以显示出偏转板 Y 、 Y' 上的电压随时间而变化的情况。图 6 - 40 表示的是加在竖直偏转板上的交流电压随时间变化的情况。

示波管的突出优点是它的反应很快。电子的质量很小，惯性也就很小，因此，示波管能够灵敏地反映出加在偏转板上的极其迅速而又微小的电压变化，并把它显示在荧光屏上。

十、电容

电容 电容器带电时，它的两极之间要产生电势差。对于任何一个电容器来说，两极间的电势差都随所带电量的增加而增加，并且电量与电势差成正比，它们的比值是个恒量。不同的电容器，这个比值一般是不同的。在两极板间的电势差一定的条件下，这个比值越大的电容器所带的电量越多，因而这个比值表示出电容器容纳电荷的本领。在物理学上称这个比值为电容。

电容器所带的电量与两极间电势差之比叫做电容。如果用 Q 表示电容器所带的电量，用 U 表示它的两极间的电势差，用 C 表示它的电容，那么

$$C = \frac{Q}{U}。$$

由上式可以看出，电容在数值上等于单位电压下，电容器所带的电量。

在国际单位制里，电容的单位是法拉，简称法，国际符号是 F 。一个电容器，如果带 1 库的电量时两极间的电势差是 1 伏，这个电容器的电容就是 1 法。

法这个单位太大，实际上常用较小的单位：微法 (μF) 和皮法 (pF)。它们间的换算关系是：

$$1 \text{ 法} = 10^6 \text{ 微法} = 10^{12} \text{ 皮法}。$$

加在电容器两极上的电压不能超过某一限度。超过这个限度，电介质将被击穿，电容器于是损坏，这个极限电压叫做击穿电压。电容器工作时的电压应低于击穿电压。电容器上一般都标明了电容和额定电压的数值。电容器的额定电压是指电容器长期工作所能承受的电压，它比击穿电压要低。

平行板电容器的电容 现在我们来研究平行板电容器的电容跟哪些因素有关。

如图 6 - 41 所示，让平行板电容器带电后，用静电计 来测量两极板 A、B 间的电势差。不改变 A、B 两极板所带的电量，只改变两极板间的距离，可以看到，距离越大，静电计指出的电势差越大。这表示平行板电容器的电容随两板距离的增大而减小。

如图 6 - 42 所示，不改变两极板所带电量和它们的距离，只改变两极板的正对面积，可以看到，正对面积越小，静电计指出的电势差越大。这表示平行板电容器的电容随两板的正对面积的减小而减小。

如图 6 - 43 所示，保持两极板所带电量、它们的距离、它们的正对面积都不改变，只在极板间插入一块绝缘体——又叫电介质，可以看到，静电计指出的电势差要减小。这表示平行板电容器的电容由于插入电介质而增大。电容器极板间充满某种电介质时电容增大到的倍数就叫做这种电介质的介电常量。下页表中列出了几种电介质的介电常量的值。

理论分析证明，平行板电容器的电容，跟介电常量成正比，跟正对面积成正比，跟极板的距离成反比。这跟上面实验研究的结果是完全一致的。

静电计是在验电器的基础上制成的，用来测量导体间的电势差。使用时把它的金属球跟一个导体连接，把它的金属外壳跟另一个导体连接或同时接地，从指针的偏转角度就可以知道两个导体间的电势差。

电介质	空气	石蜡	陶瓷	玻璃	云母
介电常量	1.0005	2.0 ~ 2.1	6	4 ~ 11	6 ~ 8

一般说来，电容器的电容是由两个导体的大小和形状、两个导体的相对位置以及它们间的电介质决定的。

* 十一、电容器的连接

在实际使用电容器时，有时会遇到电容器的电容不够或耐压能力不够的问题，这就需把几个电容器连接起来使用。电容器的耐压能力是指电容器正常工作时承受电压的能力。一般来讲，电容器的击穿电压高，它的耐压能力也就大。电容器连接的基本方法有串联和并联两种。

电容器的串联 把几个电容器的极首尾相接，连成一串，这就是电容器的串联。图 6-44 是电容分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 的三个电容器的串联。把串联好的电容器接到电动势为 U 的电源上（图 6-45）。如果两端的极板带的电量分别为 $+Q$ 和 $-Q$ ，由于静电感应，中间各极板所带的电量也等于 $+Q$ 或 $-Q$ ，所以串联时每个电容器带的电量都是 Q 。如果各个电容器的电压分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 ，就有

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, U_2 = \frac{Q}{C_2}, U_3 = \frac{Q}{C_3}。$$

由于总电压 U 等于各个电容器上的电压之和，所以，

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

设串联电容器的总电容为 C ，则 $U = \frac{Q}{C}$ ，所以，

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

这就是说，串联电容器的总电容的倒数等于各个电容器的电容的倒数之和。电容器串联之后，相当于增大了两极的距离，因此总电容小于每个电容器的电容。

电容器的并联 把几个电容器的正极连在一起，负极也连在一起，这就是电容器的并联。图 6-46 是电容分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 的三个电容器的并联。

把并联好的电容器接到电动势为 U 的电源上（图 6-47），每个电容器的电压都是 U 。如果各个电容器所带的电量分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 ，那么 $Q_1 = C_1 U$ ， $Q_2 = C_2 U$ ， $Q_3 = C_3 U$ 。由于电容器组贮存的总电量 Q 等于各个电容器所带电量之和，所以，

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3) U。$$

设并联电容器的总电容为 C ，则 $Q = CU$ ，所以，

$$C = C_1 + C_2 + C_3。$$

这就是说，并联电容器的总电容等于各个电容器的电容之和。电容器并联之后，相当于增大了两极的面积，因此总电容大于每个电容器的电容。

可以看出，电容器串联后，电容减小了，但耐压能力提高了，所以要承受较高的电压时，可以把电容器串联起来；电容器并联后，电容增大了，耐压能力没有提高，所以在需要大电容时，可以把电容器并联起来。

本章小结

这一章主要是学习电场的知识，下面提供一个复习线索，供同学们参考，目的是希望你们能把学过的知识联系起来，形成一个知识结构。

一、电荷的相互作用 电场

这部分知识是本章的最基本的知识。

(1) 电荷之间的相互作用是通过电场来发生的。点电荷之间的相互作用服从库仑定律。

(2) 电场可以从力的角度来研究，电场强度就是反映电场的力的性质的物理量。电场强度是矢量。知道了电场强度 E ，就可以知道电荷 q 在电场中所受的力 $F=qE$ 。(3) 电场也可以从功和能角度来研究，电势和电势差就是反映电场的能的性质的物理量。电势和电势差都是标量。知道了电场中两点的电势差 U ，就可以知道在这两点间移动电荷 q 时，电场力所做的功 $W=qU$ 。

电场中某点电势的高低与电势零点的选取有关吗？电势差呢？

(4) 电场力所做的功 W 等于电势能的改变 $\Delta W = W$ 。功是能的转化的量度。电场力做多少功，就有多少电势能与其他形式的能发生转化。试分析电场力做正功和做负功两种情况下，电势能怎样转化。

(5) 在匀强电场中，沿场强方向上两点间的电势差 U 与电场强度 E 的关系是： $U=Ed$ ，其中 d 是这两点间的距离。

(6) 电场可以用电力线和等势面形象地表示出来。你自己总结一下，通过电力线或等势面的分布图可以知道有关电场的什么知识。

二、电场中的导体电容

这部分是把基本知识应用于导体。

(1) 处于静电平衡状态的导体有怎样的特点？请你就学过的几方面加以总结。

(2) 电容器的电容是表示电容器容纳电荷本领的物理量。电容器电容的大小由其本身的因素决定。电容器可以串联或并联起来使用。

三、带电粒子在匀强电场中的运动

这部分是电学和力学知识的综合应用。

带电粒子在匀强电场中的运动主要是加速和偏转两种情况。请你就这两种情况，结合学过的力学、电学的知识总结一下确定带电粒子运动情况的步骤。

习题

(1) 有两个带电小球，电量分别为 $+Q$ 和 $+9Q$ ，在真空中相距 0.4 米。如果引进第三个带电小球，正好使三个小球都处于平衡状态，第三个小球带的是哪种电荷？应放在什么地方？电量是 Q 的几倍。

(2) 真空中有两块水平放置的带电金属板，上板带正电，下板带等量的负电。板间有一个塑料小球悬浮不动。塑料小球受到哪些力的作用？这些力的方向如何？塑料小球带的是正电还是负电？

(3) 有一个电容器，带电量增加 2×10^{-8} 库时，两极间的电势差增加了 200 伏。这个电容器的电容是多少皮法？

(4) 在本章练习一的第 3 题中，如果绳长 40.0 厘米， $m_A=m_B=0.50$ 克， $Q_A=+4.0 \times 10^{-8}$ 库， $a=30^\circ$ 。求两个带电球间静电力的大小和 B 球所带的电

量。

(5) 氢原子中有一个电子绕氢核(质子)做圆周运动。已知电子绕核旋转的平均半径为 5.3×10^{-11} 米, 求电子的动能。

(6) 一对带等量异号电荷的平行金属板相距 1.0 厘米, 在带负电的那块金属板处, 有一个初速度为零的电子, 经过 1.0×10^{-9} 秒到达了带正电的那块金属板。这个电子受到的电场力是多大? 板间的电场强度是多大?

(7) 一金属球 A 放在距一带电量为 -4.5×10^{-10} 库的点电荷 0.3 米处(图 6 - 48)。求金属球 A 达到静电平衡后, 感应电荷在 A 球球心处产生的场强的大小和方向。

(8) 如图 6 - 49 所示, 两块带有等量异种电荷的金属板相距 2 厘米, 其间的电场可以看作是匀强电场。一质量为 1.0×10^{-4} 千克的小微粒所带电量为 $+5.0 \times 10^{-11}$ 库。求此带电微粒从下极板匀速上升到上极板过程中电场力做的功, 以及电场强度。并讨论整个过程中能量的转化情况。(g 取 10 米 / 秒²)

(9) 一个平行板电容器两板相距 2 厘米(图 6 - 50), 两板间的场强是 1.6×10^3 伏 / 米, 点 A 距下板 1.5 厘米, 点 B 距下板 0.5 厘米, 下板接地, 求 A、B 两点的电势各是多少? 图 6 - 50 图 6 - 51

(10) 一带电粒子射入一固定在 O 点的点电荷的电场中, 粒子运动轨迹如图 6 - 51 虚线 abc 所示。图中实线表示电场的等势面。试判断下列说法的正误:

- A. 粒子在 a b c 的整个过程中, 电场力始终做正功。
- B. 此粒子一直受静电斥力的作用。
- C. 粒子在 ab 段受引力作用, 在 bc 段受斥力作用。
- D. 粒子在 a b c 的整个过程中, 电场力做功为零。

(11) 两块平行的金属板 A、B 之间的电压是 80 伏。一个电子以 6.0×10^6 米 / 秒的速度从小孔 C 垂直 A 板进入电场(图 6 - 52), 该电子能打在 B 板上吗? 如果能打在 B 板上, 它到达 B 板时的速度有多大? 如果电源电压变为 120 伏, 情况又会怎样?

第七章 磁 场

前一章我们研究了电场，这一章研究磁场。在必修课中我们学习了一些磁场的知识，这一章我们要在复习的基础上扩展和加深。必修课中我们提到磁感应强度的概念，但没有给出定义，这里我们要研究如何确定这个物理量。必修课中我们知道磁场对电流有作用，这里我们要定量地研究这种作用。电流是由电荷的移动形成的，我们还要定量地研究磁场对运动电荷的作用力。这些知识在生产技术和科学研究中有广泛的应用。通过这一章的学习，你将体会到磁场知识的重要性。

一、磁感应强度

磁场 通过必修课的学习，我们知道，磁体的周围存在着磁场，电流的周围也存在着磁场。磁体的磁场和电流的磁场一样，都是由电荷的运动产生的。磁体与磁体之间、磁体与电流之间、电流和电流之间的相互作用都是通过磁场发生的。磁场有方向性。人们规定，在磁场中的任一点，小磁针静止时北极受力的方向，就是那一点的磁场方向。

磁感应强度 磁场不仅有方向性，而且有强弱的不同。我们知道，磁场的强弱是用磁感应强度来表示的。怎样来确定这个物理量呢？对于电场，我们是从电荷在电场中受到电场力作用的角度，引入了电场强度这个物理量来描述电场强弱的。对于磁场，我们要从电流在磁场中受到磁场力作用的角度，来确定磁感应强度这个物理量。

比起电荷在电场中的受力情况，电流在磁场中的受力情况要复杂些。磁场对电流的作用力，不但跟导线中电流的大小和导线的长短有关系，而且跟导线放在磁场中的方向有关系。在电流大小和导线长短相同的情况下，当导线方向与该处磁场方向一致时，通电导线所受的力最小，等于零。当导线方向与该处磁场方向垂直时，通电导线受的力最大。我们通过电流受到的磁场力的大小来研究磁场的强弱，需要先把导线放在磁场中的方向确定下来。在物理学中，在研究磁场强弱时，总是把通电导线放在与该处磁场方向垂直的方向上。

实验表明：垂直于磁场方向的通电直导线受到的磁场力 F ，跟通过的电流 I 和导线的长度 l 成正比，或者说， F 跟乘积 Il 成正比。这就是说，放在磁场中某处垂直于磁场方向的通电直导线，无论怎样改变电流 I 和导线长度 l ，乘积 Il 增大多少倍， F 也增大多少倍。比值 $\frac{F}{Il}$ 是一个常量，跟乘积 Il 无关。但在磁场不同的地方，这个比值一般并不相同。这个比值越大的地方，表示这段导线受到的磁场力越大，即说明那里的磁场越强。可见，我们可以用这个比值来表示磁场的强弱。

在磁场中垂直于磁场方向的通电直导线，受到的磁场的作用力 F 跟电流 I 和导线长度 l 的乘积 Il 的比值，叫做通电直导线所在处的磁感应强度。如果用 B 表示磁感应强度，那么

$$B = \frac{F}{Il}。$$

磁感应强度 B 的单位由 F 、 I 和 l 的单位决定。在国际单位制中，磁感应强度的单位是特斯拉，简称特，国际符号是 T。1 米长的导线，通过 1 安的电流，受到的磁场力为 1 牛时，磁感应强度就是 1 特。

$$1\text{特} = 1 \frac{\text{牛}}{\text{安} \cdot \text{米}}。$$

由磁感应强度的定义可知，磁场中某处的磁感应强度在数值上等于该处垂直于磁场方向、长 1 米的导线通过 1 安电流时所受的力。

磁感应强度是矢量。磁场中某处磁感应强度的方向就是该处的磁场方向。可见，磁场中某处磁感应强度的大小反映了该处磁场的强弱，磁感应强度的方向指出了该处的磁场方向。

磁力线 所谓磁力线，是在磁场中画出的一些有方向的曲线，曲线上

任一点的切线方向都跟该点的磁场方向相同，也就是跟该点的磁感应强度方向一致。

图 7 - 1 至图 7 - 4 分别表示条形磁铁、蹄形磁铁、直线电流、环形电流、通电螺线管的磁力线分布。直线电流、环形电流和通电螺线管的磁力线方向跟电流方向之间的关系，可以用安培定则来判断。这些我们在必修课中都学过了。

正像用电力线的疏密程度可以形象地表示电场强度的大小一样，用磁力线的疏密程度也可以形象地表示磁感应强度的大小。磁感应强度大的地方，磁力线密，磁感应强度小的地方，磁力线疏。这样，我们根据磁力线的疏密程度，就可以大致地了解磁感应强度的大小。如从图 7 - 2 可以看出，离直导线越近的地方，磁力线越密，说明那里的磁感应强度越大。离直导线越远的地方，磁力线越疏，说明那里的磁感应强度越小。

如果在磁场的某一区域里，磁感应强度的大小和方向处处相同，我们把这个区域的磁场叫做匀强磁场。匀强磁场的磁力线是分布均匀的方向相同的平行直线。匀强磁场是最简单但又很重要的磁场，不但我们在今后的学习中要常用到它，它在电磁仪器和科学实验中也有重要的应用。距离很近的两个异名磁极之间的磁场（图 7 - 5），通电螺线管内部的磁场，除边缘部分外，都可认为是匀强磁场。

磁通量 在必修课我们学过，设匀强磁场中有一个垂直于磁感应强度 B 的平面，面积为 S （图 7—6），穿过这个面的磁通量

$$= BS。$$

磁通量的意义也可以用磁力线形象地说明：磁通量所表示的，就是穿过磁场中某个面的磁力线条数。

如果平面不跟磁场方向垂直，我们可以作出它在垂直于磁场方向上的投影平面，从图 7 - 7 可以看出，穿过这两个面的磁力线条数相等，即磁通量相等。因此，同一个平面，当它跟磁场方向垂直时，穿过它的磁力线条数最多，磁通量最大。当平面跟磁场方向平行时，没有磁力线穿过这个面，即穿过这个面的磁通量为零。

在国际单位制中，磁通量的单位是韦伯，简称韦，国际符号是 Wb 。

$$1 \text{ 韦} = 1 \text{ 特} \times 1 \text{ 米}^2。$$

从 $\phi = BS$ ，可以得出 $B = \frac{\phi}{S}$ ，这表明磁感应强度等于穿过单位面积的磁通量，因此常把磁感应强度叫做**磁通密度**，并且用韦 / 米²作单位。

$$1 \text{ 特} = 1 \frac{\text{韦}}{\text{米}^2} = 1 \frac{\text{牛}}{\text{安} \cdot \text{米}}$$

练习一

(1) 有人根据 $B = \frac{F}{Il}$ 提出：磁场中某处的磁感应强度 B 跟磁场力 F

成正比，跟电流 I 和导线长度 l 的乘积 Il 成反比。这种提法有什么问题？错在哪里？

(2) 长 10 厘米的导线，放入匀强磁场中，它的方向和磁场的方向垂直。如果导线中通过的电流是 3.0 安，它受到的作用力是 1.5×10^{-3} 牛，

磁场的磁感应强度是多少特？

(3) 把一个面积为 $5.0 \times 10^{-2} \text{ 米}^2$ 的单匝矩形线圈，放在磁感应强度为 2.0×10^{-2} 特的匀强磁场中，当线圈平面与磁场方向垂直时，穿过线圈的磁通量是多大？

(4) 面积是 0.50 米^2 的导线环被放入一个匀强磁场中，环面与磁场方向垂直。已知穿过这个导线环的磁通量是 2.0×10^{-2} 韦，求穿过它的磁通密度。

二、磁场对电流的作用

安培力 从前一节知道：磁场中某处的磁感应强度在数值上等于该处垂直于磁场方向、长 1 米的导线通过 1 安电流时所受的力。因此，知道了某处的磁感应强度 B ，就可以求出放在该处与磁场方向垂直的、长 l （米）的、电流是 I （安）的通电导线所受的力 F （牛），即

$$F = IlB。$$

这就是说，垂直于磁场方向的通电直导线，受到的磁场的作用力，等于导线中的电流、导线的长度和磁场的磁感应强度三者的乘积。通常把通电导线在磁场中受到的作用力，叫做安培力。

如果电流方向不跟磁场方向垂直，电流受到的安培力又怎样呢？我们知道，电流方向跟磁场方向垂直时，电流受的力最大。其值可由公式 $F = IlB$ 计算出；电流方向跟磁场方向平行时，电流根本不受力，即所受的力为零。知道了电流在这两图 7 - 8 种特殊情况下所受的力，我们不难求出电流在磁场中任意方向上所受的力。如图 7 - 8 所示，当电流方向与磁场方向间有一个夹角 θ 时，我们可以把磁感应强度矢量 B 分解为两个分量：一个是跟电流方向平行的分量 $B_1 = B\cos\theta$ ，另一个是跟电流方向垂直的分量 $B_2 = B\sin\theta$ 。前者对电流没有作用力，电流受到的力完全是由后者决定的，即 $F = IlB_2$ 。代入 $B_2 = B\sin\theta$ ，我们得到

$$F = IlB\sin\theta。$$

这就是电流方向跟磁场方向成某一角度 θ 时的安培力公式。

安培力的方向 通过必修课的学习，我们已经知道，通电直导线在磁场中受到的安培力的方向跟磁场方向、导线中的电流方向都有关系。实验表明：电流所受安培力的方向既跟磁场方向垂直，又跟电流方向垂直；也就是说，安培力的方向总是垂直于磁力线和通电导线所在的平面。

通电直导线所受安培力的方向和磁场方向、电流方向之间的关系，可以用左手定则来判定（图 7 - 9）。

颤动的灯丝

找来一块蹄形磁铁（可在教学仪器商店买到），把它慢慢接近发光的白炽灯（图 7 - 10），灯丝会颤动起来。做做看，想想这是什么道理。注意：磁铁不能太靠近灯泡，以免灯泡因灯丝颤动幅度太大而损坏。

练习二

（1）图 7 - 11 表示一根放在磁场里的通电直导线，直导线与磁场方向垂直。请指出图中所示的各种情况中导线所受安培力的方向。

（2）一个水平放置的矩形通电线圈能绕 OO' 轴转动。当空间加上如图 7 - 12 甲和乙所示的两种匀强磁场时，线圈都能转动起来吗？

（3）在磁感应强度为 0.50 特的匀强磁场中，有一根与磁场方向垂直的长 30 厘米的通电直导线，当导线中的电流为 2.0 安时，导线所受的安培力是多大？

（4）在赤道上，地磁场可看成是沿南北方向的匀强磁场，磁感应强度

的大小是 0.50×10^{-4} 特。如果赤道上有一根沿东西方向的直导线，长为 20 米，载有从东向西的电流 30 安，地磁场对这根导线的作用力是多大？方向如何？

* 三、电流表的工作原理

电流表是测定电流强弱和方向的电学仪器。实验时经常使用的电流表，是利用磁场对电流的作用制成的，叫做磁电式仪表。这种电流表的构造如图 7 - 13 所示。在一个很强的蹄形磁铁的两极间有一个固定的圆柱形铁心，铁心外面套有一个可以绕轴转动的铝框，铝框上绕有线圈，铝框的转轴上装有两个螺旋弹簧和一个指针。线圈的两端分别接在这两个螺旋弹簧上，被测电流就是经过这两个弹簧流入线圈的。

当电流通过螺旋弹簧而流过线圈的时候，线圈上跟铁柱轴线平行的两边都要受到安培力的作用（图 7 - 14），这两个力大小相等，方向相反，并且不在一条直线上，形成使线圈转动的力矩 M_1 。铝框及指针在 M_1 作用下转动，螺旋弹簧也被扭动，产生一个阻碍线圈转动的力矩 M_2 。 M_2 随线圈转动角度的增大而增大，当 M_2 增大到同 M_1 产生的作用相抵消时，线圈停止转动。

由于磁场对电流的作用力跟电流成正比，因而线圈中的电流越大，磁场对线圈产生的力矩 M_1 也越大，线圈和指针偏转的角度也就越大。因此，根据指针偏转角度的大小，可以知道被测电流的强弱。

当线圈中的电流方向改变时，使线圈转动的力矩方向随着改变，指针的偏转方向也随着改变。所以，根据指针的偏转方向，可以知道被测电流的方向。

磁电式仪表的优点是灵敏度高，可以测出很弱的电流；缺点是绕制线圈的导线很细，允许通过的电流很弱（几十微安到几毫安），如果通过的电流超过允许值，很容易把它烧坏。这一点我们在使用时一定要特别注意。

四、磁场对运动电荷的作用

磁场对电流有力的作用，而电流是由电荷的定向移动形成的。因此，我们自然会想到：这个力可能是作用在运动电荷上的，作用在整个通电导线上的安培力，只不过是作用在运动电荷上的力的宏观表现。

为了检验这种设想，让我们来做一个实验。图 7 - 15 是一个抽成真空的电子射线管，从阴极发射出来的电子束，在阴极和阳极间的高电压作用下，轰击到长条形的荧光屏上激发出荧光，于是可以显示出电子束运动的径迹。实验表明，在没有外磁场时，电子束是沿直线前进的(图 7 - 15 甲)。如果把射线管放在蹄形磁铁的两极间，荧光屏上显示出的电子束运动的径迹发生了弯曲(图 7—15 乙和彩图 4)。这表明，运动电荷确实受到了磁场的作用力，这个力通常叫做洛伦兹力。

运动电荷在磁场中的受力方向也用左手定则来判定。但是应该注意：我们规定正电荷定向移动的方向为电流的方向，如果运动电荷是带负电的粒子，粒子运动的方向与电流的方向相反。

现在我们来确定洛伦兹力的大小。设在一匀强磁场中，垂直于磁场方向放入一段长 l (米) 的通电导线，每米导线中有 n 个自由电荷。每个自由电荷的电量是 q (库)，定向移动的速度是 v (米 / 秒)。因此，截面 A 右侧 vt (米) 长的导线中的自由电荷，在 t 秒内全部通过截面 A (图 7 - 16)。这些自由电荷的电量 $Q = nqvt$ 。根据电流强度的定义，导线中

的电流 $I = \frac{Q}{t}$ ，即

$$I = \frac{nqvt}{t} = nqv。$$

磁场对这段导线的作用力 $F = lIB = nqvIB$ ，其中 nl 是长度为 l (米) 的导线中运动电荷的总数，所以单个运动电荷受到的力 $f = \frac{F}{nl}$ ，即

$$f = qvB。$$

这就是说，当电荷在垂直于磁场的方向上运动时，磁场对运动电荷的作用力，等于电荷的电量 and 速率跟磁感应强度的乘积。在国际单位制中，上式中的各个物理量依次用牛、库、米 / 秒、特作单位。

当通电导线的方向跟磁场方向一致时，导线不受磁场的作用力。可见，电荷的运动方向跟磁场方向一致时，电荷不受磁场的作用力。

五、带电粒子的圆周运动

如果在匀强磁场中有一个运动的带电粒子，它的初速度方向跟磁场方向垂直，在洛伦兹力 $f = qvB$ 的作用下，粒子就会偏离原来的运动方向，那么，粒子的运动径迹将是怎样的呢？

由于粒子的初速度和它受力的方向都在跟磁场方向垂直的平面内，没有任何作用使粒子离开这个平面，所以粒子只能在这个平面内运动。由于洛伦兹力总是跟粒子的运动方向垂直，不对粒子做功，它只改变粒子运动的方向，而不改变粒子的速率。所以粒子运动的速率 v 是恒定的。由于 v 恒定，洛伦兹力的大小就不变（总等于 qvB ）。这样，带电粒子就受到一个大小不变、方向总与粒子运动方向垂直的力。因此带电粒子将做匀速圆周运动（图 7 - 17）。

上述推论可以用实验来验证。实验所用的仪器如图 7 - 18 所示，是一种特制的电子射线管，由电子枪发出的电子射线可以使管内的低压水银蒸气（或氢气）发出辉光，显示出电子的径迹。这样，在暗室中可以清楚地看到，在没有磁场作用时，电子的径迹是直线；在管子外面加上一个匀强磁场（这个磁场不是由磁铁产生的，而是由两个平行的通电环形线圈产生的），电子的径迹就弯曲成圆形。

带电粒子做匀速圆周运动的轨道半径 r 有多大呢？我们已经学过，如果粒子的质量是 m ，运动速率是 v ，粒子做匀速圆周运动所需的向心力 $F = mv^2/r$ 。这个力 F 是由带电粒子所受的洛伦兹力提供的，所以

$$qvB = \frac{mv^2}{r}。$$

由此得出

$$r = \frac{mv}{qB}。$$

上式告诉我们，在匀强磁场中做匀速圆周运动的带电粒子，它的轨道半径跟粒子的运动速率成正比。运动的速率越大，轨道的半径也越大。

由上式我们还可以求出带电粒子做匀速圆周运动的周期。将 $r = \frac{mv}{qB}$

代入周期公式 $T = 2\pi r / v$ 中，得到

$$T = \frac{2\pi m}{qB}。$$

这个式子告诉我们，带电粒子在磁场中做匀速圆周运动的周期跟轨道半径和运动速率无关。我们在下节要讲到的回旋加速器就是依据这个道理制成的。

【例题】 一个初速度为零的质子，经过电压 $U = 1.30 \times 10^3$ 伏的电场加速后，垂直进入磁感应强度 $B = 0.20$ 特的匀强磁场。试求： 质子进入磁场时的速率； 质子在磁场中运动的轨道半径。质子的质量 $m = 1.67 \times 10^{-27}$ 千克，电量 $q = 1.60 \times 10^{-19}$ 库。

分析：初速度为零的质子，在电场中要被加速。它穿出电场时的速率，就是它进入磁场时的速率。知道了质子进入磁场时的速率，我们不难求出质子在磁场中运动的轨道半径。

解：设质子穿出电场时的速率为 v 。因为质子在电场中得到的动能等于电场对它所做的功，即

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU,$$

所以质子进入磁场时的速率

$$\begin{aligned}v &= \sqrt{\frac{2qU}{m}} \\&= \sqrt{\frac{2 \times 1.60 \times 10^{-19} \times 1.30 \times 10^3}{1.67 \times 10^{-27}}} \\&= 5.0 \times 10^5 \text{ 米 / 秒。}\end{aligned}$$

质子在磁场中做匀速圆周运动的轨道半径

$$\begin{aligned}r &= \frac{mv}{qB} \\&= \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 5.0 \times 10^5}{1.60 \times 10^{-19} \times 0.20} \text{ 米} \\&= 2.6 \times 10^{-2} \text{ 米} \\&= 2.6 \text{ 厘米}\end{aligned}$$

练习三

(1) 试判断图 7 - 19 中所示的带电粒子在磁场中所受的洛伦兹力的方向。

(2) 电子的速率 $v = 3.0 \times 10^6$ 米 / 秒，垂直进入 $B = 0.10$ 特的磁场中，它受到的洛伦兹力是多少牛？

(3) 动能是 5.3 兆电子伏的 α 粒子，垂直进入磁感应强度是 1.0 特的匀强磁场中。试确定作用在 α 粒子上的洛伦兹力和 α 粒子的轨道半径。

(4) 有三束粒子，分别是质子 (p)、氦核 (${}^3_1\text{H}$) 和 α 粒子，如果它们以相同的速度沿垂直于磁场方向射入匀强磁场 (图 7 - 20)，那么在下列 4 个图中，哪个图正确地表示出这三束粒子的运动轨迹？(1989 年全国普通高等学校招生统一考试物理试题)

(5) 竖直向上射出的一束粒子中，有带正电的，有带负电的，还有不带电的。要想把它们分开，都有哪些办法？

* 六、回旋加速器

在现代物理学中,为了深入到原子核内部(原子核大小的数量级是 10^{-14} 米),进一步研究物质的微观结构和相互作用规律,以便利用它们为人类造福,人们要用能量很高的带电粒子去轰击各种原子核,观察它们的变化情况。例如,要从原子核中把中子或质子打出来,就得用8兆电子伏的质子。为了探索质子的内部结构,使用了200亿电子伏的电子去轰击质子。怎样才能实验室大量产生这样高能量的带电粒子呢?这就要用一种新的实验设备——加速器。

我们已经学过,利用电场可以使带电粒子加速。早期制成的加速器,就是用高压电源的电势差来加速带电粒子的。英国的两位物理学家就是利用这种加速器把质子加速到具有700千电子伏的能量,在历史上首次用人工加速的粒子实现了核反应。但是,这种类型的加速器受到实际所能达到的电势差的限制,粒子获得的能量并不太高,只能达到几十万到几兆电子伏。1932年美国物理学家劳伦斯发明了回旋加速器,很巧妙地克服了困难。这种回旋加速器不是利用高电压使粒子一次得到巨大的速度,而是用电压较低的高频电源,使粒子每隔一定的时间受到一次加速,经过多次加速后达到巨大的速度。

回旋加速器(彩图6)的工作原理如图7-21所示。放在 A_0 处的粒子源发出一个带正电的粒子,它以某一速率 v_0 垂直进入匀强磁场中,在磁场中做匀速圆周运动。经过半个周期,当它沿着半圆弧 $\overline{A_0A_1}$ 到达 A_1 时,我们在 $A_1A'_1$ 处造成一个向上的电场,使这个带电粒子在 $A_1A'_1$ 处受到一次电场的加速,速率由 v_0 增加到 v_1 。然后粒子以速率 v_1 在磁场中做匀速圆周运动。我们知道,粒子的轨道半径跟它的速率成正比,因而粒子将沿着半径增大的圆周运动。又经过半个周期,当它沿着半圆弧 $\overline{A'_1A'_2}$ 到达 A'_2 时,我们在 A'_2A_2 处造成一个向下的电场,使粒子又一次受到电场的加速,速率增加到 v_2 。如此继续下去,每当粒子运动到 $A_1A'_1$ 、 $A_3A'_3$ 等处时都使它受到一个向上电场的加速,每当粒子运动到 A'_2A_2 、 A'_4A_4 等处时都使它受到一个向下电场的加速,那么,粒子将沿着图示的螺线 $A_0A_1A'_1A'_2A_2\dots\dots$ 回旋下去,速率将一步一步地增大。

我们讲过,带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的周期 $T = 2\pi m / qB$ 跟运动速率和轨道半径无关,对一定的带电粒子和一定的磁感应强度来说,这个周期是恒定的。因此,尽管粒子的速率和半径一次比一次增大,运动周期 T 却始终不变,这样,如果我们在直径 AA 、 $A'A'$ 处造成一个交变电场,使它也以相同的周期 T 往复变化,那就可以保证粒子每经过直径 AA 和 $A'A'$ 时都正好赶上适合的电场方向而被加速。

回旋加速器的核心部分是两个D形的金属扁盒(图7-22)。这两个D形盒就像是沿着直径把一个圆形的金属扁盒切成的两半。两个D形盒之间留一个窄缝,在中心附近放有粒子源。D形盒装在真空容器中,整个装置放在巨大电磁铁的两极之间,磁场方向垂直于D形盒的底面。把两个D形盒分别接在高频电源的两极上,如果高频电源的周期与从粒子图7-22回旋加速器的D形盒源发出的带电粒子在D形盒中的运动周期相同,那么,带

电粒子就可以像图 7-21 所示的那样不断地被加速了。带电粒子在 D 形盒内沿螺旋线轨道逐渐趋于盒的边缘，达到预期的速率后，用特殊装置把它们引出。

回旋加速器的出现，使人类在获得具有较高能量的粒子方面前进了一步。为此，1939 年劳伦斯荣获了诺贝尔物理学奖。但是，在三十年代末期发现，用这种经典的回旋加速器加速质子，最高能量仅能达到 20 兆电子伏，要想进一步提高质子的能量就很困难了。这是因为，在粒子的能量很高的时候，它的运动速度接近于光速，按照狭义相对论，这时粒子的质量将随着速率的增加而增大。因此，粒子在磁场中回旋一周所需的时间要发生变化。交变电场的频率不再跟粒子运动的频率一致，这就破坏了加速器的工作条件，进一步提高粒子的速率就不可能了。

为了把带电粒子加速到更高的能量，以适应高能物理实验的需要，人们设计制造了各种类型的新型加速器，如同步加速器、电子感应加速器、直线加速器、对撞机等等。这些加速器可以把带电粒子加速到几十亿电子伏以上。如目前世界上最大的质子同步加速器，能使质子的能量达到 10000 亿电子伏。我国 1989 年初投入运行的第一台高能粒子加速器——北京正负电子对撞机（彩图 3），能使电子束流的能量达到 $28 + 28$ 亿电子伏。

电子荷质比的测定和电子的发现

运动电荷在磁场中偏转的现象，在人类认识微观世界的历史上起了重要作用。人类认识的第一种亚原子粒子——电子，就是由这种现象发现的。回顾这段历史要从阴极射线说起。

19世纪中叶以后，由于真空技术的进步，对稀薄气体中放电现象的研究有了迅速的发展。1858年发现了阴极射线。用抽气机把有两个电极、长几十厘米的玻璃管中的空气抽出来，在两极间加上高电压，当管内气体的压强降低到1.3帕以下时，在阴极对面的玻璃管壁上就出现黄绿色的荧光。这个荧光是由阴极发出的某种射线引起的，人们把这种射线叫做阴极射线。到19世纪70年代，已经有人提出，阴极射线是由一种带负电的微粒组成的，但是还没有获得决定性的实验证据。英国物理学家汤姆生（1856~1940）为了弄清这个问题，自1894年开始做了一系列阴极射线实验。

汤姆生首先确定阴极射线的电荷。他制作了图7-23所示的阴极射线管，在阴极射线路径的侧面有个电荷接收器（是个有缝的金属筒）。他用磁场使射线偏转，进入接收器，从与接收器相连的静电计测得，接收到的是负电荷。汤姆生又制作了图7-24所示的射线管。当平行板D、E之间有电场时，阴极射线偏转，偏转的方向也表明了射线是由带负电的粒子组成。

当时人们还不知道原子是可分的，只知道离子是带电的粒子，并且测出了一些离子的电荷与质量之比——荷质比。为了弄清阴极射线是什么粒子组成的，汤姆生决定测定它的荷质比。

汤姆生测定荷质比的原理，就是我们前面学过的带电粒子在磁场中偏转的知识：以速度 v 垂直进入匀强磁场的带电粒子，要做匀速圆周运动而偏离原来的运动方向，圆周半径 $r = \frac{mv}{qB}$ 。如果磁感应强度 B 是已知的，

粒子在磁场中偏转的大小就完全由它的速度 v 和 q/m 来决定。汤姆生巧妙地测出了 v ，进而求出了 q/m 。

汤姆生仍用图7-24所示的射线管，在管的右端标上刻度测量荧光斑的偏移。他先使D、E间产生向下的电场 E ，使带负电 e 的粒子流受到向上的电场力 eE 的作用，荧光斑向上偏移。然后再利用通电线圈在电场区加一个垂直纸面向内的磁场 B ，使粒子流受到向下的磁场力 evB 的作用，荧光斑又向回偏移。调节磁场的强弱，当电场力 eE 与磁场力 evB 恰好平衡时

（ $eE = evB$ ），荧光斑回到原来的位置，这时 $v = \frac{E}{B}$ 。

然后，汤姆生去掉电场，让阴极射线只受磁场作用沿圆弧运动，测得圆弧半径 r 。因为 $r = \frac{mv}{eB}$ ， $v = \frac{E}{B}$ 。所以荷质比 $\frac{e}{m} = \frac{E}{rB^2}$ 。根据 E 、 r 、 B 的

值，汤姆生求出了荷质比 $\frac{e}{m} = 2 \times 10^{11}$ 库/千克，比当时已知的氢离子的荷质比约大2000倍。

1897年，汤姆生宣布了他的测定结果。对于阴极射线中带电粒子荷质比 e/m 大于氢离子的原因，他说：“可能是 m 小，也可能是 e 大，或两者兼而有之。”接着，他根据当时已知的阴极射线能穿透铝箔等事实，推断

阴极射线一定比分子、原子小得多。他借用一位前辈物理学家斯东尼曾用过的名词，把这种粒子称为“电子”。

电子的发现，不仅使人类对电现象有了更本质的认识，还打破了原子是不可再分的最小单位的观点。因此汤姆生的实验是物理学发展史上最著名的经典实验之一。

本章小结

本章主要是学习磁场的知识。磁场有强弱和方向。磁场的强弱和方向可以用磁感应强度定量地表示，也可用磁力线形象地表示。磁场的基本性质是对放入其中的电流和运动电荷有力的作用。

(1) 磁感应强度是如何定义的？写出它的定义式。磁感应强度是矢量，它的方向是怎样的？

电场强度的定义式为 $E = \frac{F}{q}$ ，而磁感应强度的定义式为 $B = \frac{F}{Il}$ 。你认为磁感应强度可以定义为 $B = \frac{F}{I}$ 吗？

(2) 磁力线是如何形象地表示磁场的？到目前为止，我们学过条形磁铁、蹄形磁铁、距离很近的两个异名磁极之间、通电长直导线、通电环形导线、通电螺线管等的磁场的磁力线分布。分析这些磁力线的分布情况，你能大致地了解这些磁场的情况吗？

(3) 什么是安培力？在电流方向跟磁场方向垂直的情况下，如何来计算安培力的大小？如果电流方向跟磁场方向不垂直，而成一定的夹角，安培力的表达式是什么？如果电流方向与磁场方向平行，安培力是多大？

(4) 安培力的方向跟磁感应强度的方向、电流的方向有怎样的关系？根据什么来判断安培力的方向？

(5) 什么是洛伦兹力？有位同学说：“无论是静止的带电粒子还是运动的带电粒子，在电场中都要受到电场力。同样，这些粒子在磁场中也要受到磁场力，这个磁场力又叫洛伦兹力。”他说得对吗？为什么？

(6) 当带电粒子的运动方向跟磁场方向垂直时，怎样计算洛伦兹力的大小？洛伦兹力的方向怎样？应用左手定则来判断洛伦兹力的方向时，应该注意什么？

(7) 初速度方向跟磁场方向垂直的带电粒子，它在匀强磁场中将做怎样的运动？为什么？根据它的运动规律，你能推导出带电粒子运动的周期和轨道半径吗？

(8) 你自己总结一下，带电粒子在电场和磁场中的运动都有哪些实际应用。除了课本所讲的，你还能举出其他的例子吗？如果一时举不出，希望你课外多看一些有关书籍和杂志，以扩展眼界，开阔思路。

习题

(1) 一个同学说：“一小段通电导线在某点如果不受安培力作用，则该点的磁感应强度一定为零。”另一个同学说：“一小段通电导线放在磁感应强度为零的位置，它受的安培力一定等于零。”哪个同学说得不对，

为什么？

(2) 在匀强磁场里，有一根长 1.2 米的通电导线，导线中的电流为 5.0 安。当这根通电导线与磁场方向垂直时，所受的安培力为 1.8 牛，求磁场的磁感强度的大小。

(3) 在磁感应强度为 0.8 特的匀强磁场中，放一根与磁场方向垂直的、长度为 0.5 米的通电导线，导线中的电流为 5 安。这根导线在与磁场方向垂直的平面内沿磁场力的方向移动了 0.4 米，求通电导线所受的安培力对导线所做的功。

(4) 有一匀强磁场，磁感应强度的大小为 1.2 特，方向水平地由南指向北。如果有一速度为 5.0×10^5 米/秒的质子沿竖直向下的方向进入磁场，求磁场作用在质子上的力。质子进入磁场后将向哪个方向偏转？

(5) 初速度都是零的质子和 α 粒子，由同一位置经同一电场加速后，垂直进入同一匀强磁场做匀速圆周运动。关于它们的轨道半径之比，下列答案哪个正确？

A. 1:1 B. 1:4 C. $1:\sqrt{2}$ D. $\sqrt{2}:1$ 。

(6) 在磁感应强度为 0.80 特的匀强磁场中，有一质子做半径为 10 厘米的匀速圆周运动。求质子的运动速率和运动周期。

(7) 在图 7-25 所示的平行板器件中，电场 E 和磁场 B 相互垂直。如果电荷 q 具有适当的速度，它将沿着图中所示的虚线穿过两板的空间而不发生偏转。这种器件能把具有上述唯一速度的粒子选择出来，所以叫做速度选择器。试证明这种粒子必须具有的速率为 $v = \frac{E}{B}$ ，才能沿着图示的虚

线路通过。

(8) 质谱仪是一种测定带电粒子质量和分析同位素的重要工具，它的构造原理如图 7-26 所示。离子源 S 产生质量为 m，电量为 q 的正离子，离子产生出来时速度很小，可以看作是静止的。离子产生出来后经过电压 U 加速，进入磁感应强度为 B 的匀强磁场，沿着半圆周运动而达到记录它的照相底片 P 上，测得它在 P 上的位置到入口处 S_1 的距离为 x。试证明这

离子的质量为 $m = \frac{qB^2}{8U} x^2$ 。

(9) 利用学过的知识，请你想办法把下面的带电粒子分开：速度不同的电子；具有相同动能的质子和 α 粒子。

(10) 目前世界上正在研究的一种新型发电机叫磁流体发电机，它可以把气体的内能直接转化为电能。图 7-27 表示出了它的发电原理：将一束等离子体（即高温下电离的气体，含有大量带正电和带负电的微粒，而从整体来说呈中性），喷射入磁场，磁场中有两块金属板 A、B，这时金属板上就会聚集电荷，产生电压。说明金属板上为什么会聚集电荷。在磁极配置如图中所示的情况下，电路中的电流方向如何？

磁流体发电是一项新兴技术，有兴趣的同学可以找来有关的报纸、杂志看看。

第八章 电磁感应

我们在必修课中讲过电磁感应现象产生的条件，知道可以用磁通量的变化表述这个条件。学习了在导体切割磁力线运动时，如何确定感应电动势的大小和感应电流的方向。那么，用其他方法使磁通量发生变化，又如何确定它们呢？有没有确定感应电动势大小的一般规律呢？有没有确定感应电流方向的一般方法呢？

电磁感应现象的规律与能的转化和守恒定律符合吗？也就是说，能的转化和守恒定律适用于电磁感应现象吗？

这就是我们在这一章中要解决的问题。

一、法拉第电磁感应定律

——感应电动势的大小

这一节我们主要复习必修课中讲过的内容，并在复习的基础上对电磁感应的规律做一些补充和加深。

电磁感应现象 图 8 - 1、8 - 2、8 - 3 是显示电磁感应现象的几个典型实验。从这些实验，我们得到下述结论：

不论用什么方法，只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就有感应电流产生。这种现象叫做**电磁感应**。

在必修课中，我们已经学过，在电磁感应现象中，闭合电路中的感应电流是由感应电动势引起的。产生感应电动势的那部分导体就相当于闭合电路中的电源。图 8 - 1 中的导体 AB，图 8 - 2 中的螺线管，图 8 - 3 中的螺线管 B，都相当于电源。当电路断开时，虽有感应电动势存在，却没有感应电流；当电路闭合时，出现感应电流。感应电流的大小由感应电动势的大小和电路的电阻决定，可以由闭合电路欧姆定律算出。

能的转化和守恒定律是一个普遍适用的定律，同样适用于电磁感应现象。当电路闭合时，感应电流做功，消耗了电能。消耗的电能是从其他形式的能转化而来的，在图 8-1 和图 8 - 2 中，外力移动导体 AB 或磁铁时做功，电能是从机械能转化而来的，发电机就是应用这个原理制成的。在图 8 - 3 中，电能通过电磁感应由螺线管 A 转移给螺线管 B，变压器就是应用这个原理制成的。在这种转化和转移中能的总量保持不变。

法拉第电磁感应定律 感应电动势的大小由什么因素决定呢？由图 8 - 1、8 - 2、8 - 3 所示的实验可知，穿过闭合电路的磁通量变化越快，感应电流越大，表明感应电动势越大。磁通量变化的快慢可以由单位时间内磁通量的变化量来表示。单位时间内磁通量的变化量通常叫做磁通量的变化率。

精确的实验表明：电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比。这就是**法拉第电磁感应定律**。

设时刻 t_1 时穿过闭合电路的磁通量为 Φ_1 ，时刻 t_2 时穿过闭合电路的磁通量为 Φ_2 ，那么，在时间 $t = t_2 - t_1$ 内磁通量的变化量为 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$

，磁通量的变化率为 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。根据法拉第电磁感应定律，闭合电路中的

感应电动势为

$$\mathcal{E} = k \frac{\Delta\phi}{\Delta t}。$$

其中 k 为比例常数。在国际单位制中，上式中各量的单位都已确定： \mathcal{E} 的单位是伏特， ϕ 的单位是韦伯， t 的单位是秒。同学们可以自己证明 $1 \text{ 伏} = 1 \text{ 韦} / \text{秒}$ 。所以上式中的 $k = 1$ 。这样，上式可写成

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}。 \quad (1)$$

如果闭合电路是一个 n 匝线圈，而且穿过每匝线圈的磁通量变化率都相同，那么， n 匝线圈可以看作是由 n 个单匝线圈串联而成的，因此整个线圈中的感应电动势就是单匝线圈的 n 倍，即

$$\mathcal{E} = n \frac{\Delta\phi}{\Delta t}。 \quad (2)$$

在实际工作中，为了获得较大的感应电动势，常常采用多匝线圈。

下面，我们根据法拉第电磁感应定律来研究导体做切割磁力线运动时，感应电动势的大小。

如图 8-4 所示，我们把矩形线框 $abcd$ 放在磁感应强度为 B 的匀强磁场里，线框平面跟磁力线垂直。让线框的可动部分 ab 以速度 v 向右运动，设在 t 时间内由原来的位置 ab 移到 a_1b_1 。设 ab 的长度是 l ，这时线框的面积变化量 $S = lv$ ，穿过闭合电路的磁通量的变化量 $\Delta\phi = B S =$

Blv 。代入公式 $\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 中，得到

$$\mathcal{E} = Blv。 \quad (3)$$

这个公式我们在必修课中已经学过，原来它是法拉第电磁感应定律的一种特殊情形。

如果导线的运动方向跟导线本身垂直，但跟磁力线方向有一个夹角（图 8-5），我们可以把速度 v 分解为两个分量：垂直于磁力线的分量 $v_1 = v \sin \theta$ ，平行于磁力线的分量 $v_2 = v \cos \theta$ 。后者不切割磁力线，不产生感应电动势。前者切割磁力线，产生的感应电动势为 $\mathcal{E} = Blv_1$ ，而 $v_1 = v \sin \theta$ ，所以

$$\mathcal{E} = Blv \sin \theta。 \quad (4)$$

在国际单位制中，(3) 和 (4) 两式中的 \mathcal{E} 、 B 、 l 、 v 的单位分别用伏特、特斯拉、米、米 / 秒。同学们可以自己证明，公式等号两边的单位是一致的，即 $1 \text{ 伏} = 1 \text{ 特} \times 1 \text{ 米} \times 1 \text{ 米} / \text{秒}$ 。

练习一

(1) 试举出 3~5 个电磁感应现象的实例。在这些实例中，引起磁通量变化的原因各是什么？

(2) 关于电磁感应的下述说法中，正确的是什么？

- A. 穿过线圈的磁通量越大，感应电动势越大。
- B. 穿过线圈的磁通量为零，感应电动势一定为零。
- C. 穿过线圈的磁通量的变化越大，感应电动势越大。

D. 穿过线圈的磁通量变化越快，感应电动势越大。

(3) 有一 10 匝的线圈放在匀强磁场中，磁场方向垂直于线圈平面，线圈的面积为 10 厘米^2 。当 $t = 0$ 时， $B_1 = 0.2$ 特。经过 0.1 秒后，磁场变为 $B_2 = 0.05$ 特，磁场方向保持不变。求线圈中的感应电动势。

(4) 如图 8 - 6 所示，矩形线圈在匀强磁场中绕 OO' 轴转动时，线圈中是否有感应电动势？为什么？设线圈的边长分别为 l_1 和 l_2 ，转动角速度为 ω ，磁场的磁感应强度为 B 。试证明，在图示的位置时，线圈中的感应电动势为

$$\mathcal{E} = BS\omega ,$$

其中 S 为线圈的面积， $S = l_1 l_2$ 。

(5) 如图 8 - 7 所示，让线圈由位置 1 通过一个匀强磁场的区域运动到位置 2，下述说法中正确的是什么？

A. 线圈进入匀强磁场区域的过程中，线圈中有感应电流，而且进入时的速度越大，感应电流越大。

B. 整个线圈在匀强磁场中匀速运动时，线圈中有感应电流，而且电流是恒定的。

C. 整个线圈在匀强磁场中加速运动时。线圈中有感应电流，而且电流越来越大。

D. 线圈穿出匀强磁场区域的过程中，线圈中有感应电流，而且穿出时的速度越大，感应电流越大。

二、楞次定律

——感应电流的方向

在图 8—1 的实验中，我们可以用右手定则来确定感应电流的方向（图 8—8）。在图 8—3 的实验中，我们就无法用右手定则来确定感应电流的方向了。有没有确定感应电流方向的更普遍的方法呢？既然电磁感应现象是由磁通量的变化引起的，那么，能不能利用磁通量的概念来表达确定感应电流方向的规律呢？

现在，我们利用图 8 - 2 所示的实验来研究这个问题。

通过实验观察，我们可以发现如图 8 - 9 所示的规律，这就是：当磁铁移近或插入线圈时，线圈中感应电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相反（图 8 - 9 甲、丙）；当磁铁离开线圈或从线圈中拔出时，线圈中感应电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相同（图 8 - 9 乙、丁）。

进一步的分析可以看出：当磁铁移近或插入线圈时，穿过线圈的磁通量增加，这时感应电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相反，阻碍磁通量的增加（图 8 - 10 甲）；当磁铁离开线圈或从中拔出时，穿过线圈的磁通量减少，这时感应电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相同，阻碍磁通量的减少（图 8 - 10 乙）。

在其他电磁感应现象中，也有相同的规律。凡是由磁通量的增加引起的感应电流，它所激发的磁场就阻碍原来磁通量的增加；凡是由磁通量的减少引起的感应电流，它所激发的磁场就阻碍原来磁通量的减少。

物理学家楞次（1804 ~ 1865）概括了各种实验结果，在 1834 年得到如下结论：

感应电流具有这样的方向，就是感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这就是楞次定律。

利用楞次定律可以判断各种情况下感应电流的方向。

我们知道，感应电流是由感应电动势引起的。感应电流的方向跟感应电动势的方向是一致的。判断出感应电流的方向，也就判断出感应电动势的方向了。

研究电磁现象

在一个大些的铁钉上，用漆包线绕上两个线圈 A 和 B，将线圈 B 的两端接在一起，并把 CD 段漆包线放在静止的自制指南针的上方（图 8 - 11）。

试判断当用于电池给线圈 A 通电的一瞬间，指南针偏转的方向。做这个实验，看一看你判断的指南针偏转方向与实验是否一致。

三、楞次定律的应用

应用楞次定律判断感应电流的方向，首先要明确原来磁场的方向；其次，要明确穿过闭合电路的磁通量是增加还是减少；然后根据楞次定律确定感应电流的磁场方向；最后利用安培定则来确定感应电流的方向。下面用几个例子来说明怎样应用楞次定律。

【例 1】 现在来确定磁铁的 S 极移近或离开螺线管时感应电流的方向。如图 8 - 12 甲所示，把磁铁的 S 极移近螺线管时，原来的磁场方向向上，穿过螺线管的磁通量增加。从楞次定律知道，感应电流要阻碍磁通量的增加，因此感应电流的磁场方向跟原来的磁场方向相反，即感应电流的磁场方向是向下的。知道了感应电流的磁场方向，利用安培定则就可以确定感应电流的方向。如图 8 - 12 乙所示，当磁铁的 S 极离开螺线管时，原来的磁场方向向上，穿过螺线管的磁通量减少。从楞次定律知道，感应电流要阻碍磁通量的减少，因此感应电流的磁场方向跟原来的磁场方向相同，方向也是向上的。知道了感应电流的磁场方向，利用安培定则就可以确定感应电流的方向。

在图 8 - 12 甲中，螺线管的上端是 S 极，磁铁移近时受到推斥。在图 8 - 12 乙中，螺线管的上端是 N 极，磁铁离开时受到吸引。感应电流总要阻碍磁铁和螺线管的相对运动。在上节图 8 - 9 所示的甲、乙两种情形中，感应电流是否总要阻碍磁铁和螺线管的相对运动呢？请你自己分析一下。

总之，楞次定律告诉我们，从磁通量变化的角度来看。电磁感应所产生的效果总要阻碍磁通量的变化，从导体和磁体的相对运动来看，电磁感应所产生的效果总要阻碍它们的相对运动。

楞次定律是跟能的转化和守恒定律相符的。把磁铁移近螺线管时，磁铁要受到斥力，必须有外力克服这个斥力做功，才能把磁铁移近。让磁铁离开螺线管时，磁铁要受到引力，也必须有外力克服这个引力做功，才能把磁铁移开。外力克服这种电磁的引力或斥力做功的过程，就是外部的其他形式的能转化为感应电流的电能的过程。克服电磁力做了多少功，就有多少其他形式的能转化为等量的电能。

【例 2】 现在来确定图 8 - 3 中感应电流的方向。合上开关给螺线管 A 通电时，或者减小变阻器的电阻，使螺线管 A 中的电流强度增大时，穿过螺线管 B 的磁通量增加（8-13 甲）。设螺线管 A 中的电流沿着顺时针方向流动，因而原来的磁场方向是向下的，如图中所示。从楞次定律知道，感应电流要阻碍磁通量的增加，因此螺线管 B 中感应电流的磁场方向跟 A 的磁场方向相反，即磁力线的方向是向上的。由此可以知道，感应电流在 B 中是沿着反时针方向流动的。打开开关使 A 断电时，或者增大变阻器的电阻时，B 中感应电流是沿着顺时针方向流动的，如图 8 - 13 乙所示。这种情形请同学们自己利用楞次定律来判断。

【例 3】 现在来确定图 8 - 1 中感应电流的方向。在图 8-1 的实验中，当导体 AB 向右运动时，用右手定则判断的结果是：感应电流是由 A 流向 B（图 8 - 8）。现在用楞次定律来判断。导体 AB 向右运动时，穿过闭合电路的磁通量减少。从楞次定律知道，感应电流要阻碍磁通量的减少，因此感应电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相同，即磁力线的方向也是向下的。利用安培定则可以知道，感应电流的方向是由 A 流向 B 的。可见，用

楞次定律判定的感应电流的方向跟用右手定则判定的结果是一致的。右手定则可以看作是楞次定律的特殊情况。

请思考：在什么情况下，用右手定则来确定感应电流的方向比较简便？把你得出的结论和同学们讨论一下。

练习二

(1) 矩形线圈 ABCD 位于通电长直导线附近(图 8 - 14)，线圈跟导线同在一个平面内，且线圈的两个边与导线平行。在这个平面内，线圈远离导线平动时，线圈中有没有感应电流？线圈和导线都不动，当导线中的电流 I 逐渐增大或减小时，线圈中有没有感应电流？如果有，试分析判断上述各种情况下感应电流的方向。

(2) 在图 8 - 15 中 CDEF 是金属框。当导体 AB 向右移动时，试应用楞次定律，确定 ABCD 和 ABFE 两个电路中感应电流的方向。我们能不能用这两个电路中的任意一个来判定导体 AB 中感应电流的方向？

(3) 在图 8 - 16 所示的电路中，把滑动变阻器 R 的滑动片向左移动使电流减弱。试确定这时线圈 A 和 B 中感应电流的方向。

(4) 如图 8 - 17 所示，把一个条形磁铁从闭合螺线管的右端插入，由左端抽出，在整个过程中，螺线管里产生的感应电流的方向是否发生改变？

(5) 图 8 - 18 中的 A 和 B 都是很轻的铝环，环 A 是闭合的，环 B 是断开的。用磁铁的任一极来接近 A 环，会产生什么现象？把磁铁从 A 环移开，会产生什么现象？磁极移近或远离 B 环时，又会产生什么现象？

用所学的知识解释这些现象。

(6) 如图 8 - 19 所示，让铜线圈 A 自由落下，并通过一段有匀强磁场的空间。试定性说明线圈的运动情况。(不考虑空气阻力)

本章小结

这一章讲了关于电磁感应的两个基本定律：法拉第电磁感应定律，楞次定律。前者确定了感应电动势的大小，后者确定了感应电流的方向，也就是感应电动势的方向。还讨论了电磁感应现象中能的转化，指出能量守恒定律同样适用于电磁感应现象。

(1) 关于产生感应电流的条件，有如下论断：不论用什么方法，只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就有感应电流，这里提的是“不论用什么方法”。请列举出你所想到的各种不同的方法。你能不能找到例外，即：穿过闭合电路的磁通量发生变化，但闭合电路中却没有感应电流。试试看。

(2) 法拉第电磁感应定律的内容是：电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比。这里说的是“变化率”，而不是“变化量”。“变化率”和“变化量”有什么区别和联系？回忆一下，速度的变化量指的是什么？速度的变化率又是指的什么？

(3) 课文中由一般公式 $\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 推导出切割磁力线这种特殊情形的公式 $\mathcal{E} = Blv$ 。请你自己独立推导一下。

(4) 楞次定律的内容是：感应电流具有这样的方向，就是感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这里关键的四个字是“阻碍”、“变化”，对它们的含意，请你给予具体的解释，并举个例子分析。

(5) 用楞次定律来判断感应电流的方向，应当按照怎样的步骤进行？结合实例具体总结一下。

(6) 电磁感应现象的规律是否跟能的转化和守恒定律相一致？设想在图 8 - 2 的实验中，感应电流不是阻碍而是推动磁铁相对于螺线管的运动，那会出现什么情况？为什么这个设想情况不会发生？

习题

(1) 如图 8 - 20 所示，导线 AB 和 CD 互相平行。试确定在闭合和断开开关 K 时导线 CD 中感应电流的方向。

(2) 宇航员飞到某一个不熟悉的行星上，他们想用一只灵敏电流表和一个线圈来探测一下行星周围是否有磁场，应当怎样办？

(3) 如图 8 - 21 所示，闭合线框 abcd 在匀强磁场中垂直于磁场方向以一定的速度 v 运动时，穿过线框的磁通量的变化率为零，因而线框中没有感应电流。但此时线框的 ab 边和 cd 边都切割磁力线，似乎又应当有感应电流，二者似乎存在矛盾。你怎样解释这一点？

(4) 图 8 - 22 是高频焊接原理示意图。线圈中通以高频交流电时，待焊接的金属工件中就产生感应电流。由于焊缝处的接触电阻很大，放出的焦耳热很大，致使温度升得很高，将金属熔化，焊接在一起。我国生产的自行车车架就是用这种办法焊接的。

试定性地说明：为什么交流电的频率越高，焊缝处放出的热量越大。

(5) 有一个 1000 匝的线圈，在 0.4 秒内穿过它的磁通量从 0.02 韦增加到 0.09 韦，求线圈中的感应电动势。如果线圈的电阻是 10 欧，把它跟一个电阻为 990 欧的电热器串联组成闭合电路时，通过电热器的电流是多大？

(6) 图 8 - 23 是电磁流量计的示意图。在非磁性材料做成的圆管道外加一匀强磁场区域，当管中的导电液体流过此磁场区域时，测出管壁上的 ab 两点间的电动势 \mathcal{E} 就可以知道管中液体的流量 Q ——单位时间内流过液体的体积（米³/秒）。已知管的直径为 D ，磁感应强度为 B ，试推出 Q 与 \mathcal{E} 的关系表达式。

因为电磁流量计是一根管道，内部没有任何阻碍流体流动的结构，所以可以用来测量高粘度及强腐蚀性流体的流量。它还具有测量范围宽、反应快、易与其他自动控制装置配套等优点。

(7) 如图 8 - 24 所示，矩形线圈在匀强磁场中绕 OO' 轴转动，设线圈转动的角速度为 ω ，边长分别为 l_1 和 l_2 ，磁感应强度为 B ，线圈的电阻为 R 。试证明，当线圈从图甲所示的位置开始转动时，其中的感应电流 I 可用下式表示其中

$$I = I_m \sin \omega t$$

其中

$$I_m = \frac{BS\omega}{R}, \quad S = l_1 l_2。$$

这就是必修课中学过的交流电的电流瞬时值公式。

$$\varepsilon = L \frac{\Delta I}{\Delta t}。$$

其中比例常数叫做线圈的自感系数。

(9) 弹簧上端固定, 下端悬挂一根磁铁。将磁铁抬到某一高度后放开, 磁铁能上下振动较长时间才停下来。如果在磁铁下端放一个固定的闭合线圈使磁铁上下振动时穿过它(图 8-25), 磁铁就会很快地停下来。试用能量观点来解释这个现象, 并说明此现象中能量转化的情况。

这种现象叫做电磁阻尼, 在实际中有很多应用。第七章图 7-13 所示的电流表中, 指针和铝框可以一起转动, 铝框所起的作用就是使指针能很快停下来。电磁阻尼还用于电气机车的电磁制动中。

(10) 如图 8-26 所示, 把一个闭合线圈放在蹄形磁体的两磁极之间, 蹄形磁体和闭合线圈都可以绕 OO' 轴转动。当转动蹄形磁体时, 线圈也跟着转动起来。试用楞次定律解释这个现象。

蹄形磁体转动时, 产生旋转磁场。用三相交流电也可以产生旋转磁场, 线圈同样会发生转动。用途广泛的感应电动机就是利用这个原理制成的。

(11) 如图 8-27 所示, 在平行的金属导轨上放有两根可以自由滑动的导体 ab 和 cd, 它们放在匀强磁场中, 磁场方向如图所示。当导体 ab 向右运动时, 导体 cd 将向哪个方向运动? 如果不要求判定导体 cd 中感应电流的方向, 你能不能直接运用楞次定律判定导体 cd 的运动方向? 如果磁场变成相反的方向, 导体 cd 将向哪个方向运动?

(12) 如图 8-28 所示, 电阻 $R_{ab} = 0.1$ 欧的导体 ab 沿光滑导线框向右做匀速运动, 线框中接有电阻 $R = 0.4$ 欧。线框放在磁感应强度 $B = 0.1$ 特的匀强磁场中, 磁场方向垂直于线框平面。导体 ab 的长度 $l = 0.4$ 米, 运动的速度 $v = 5.0$ 米/秒。线框的电阻不计。

电路 abcd 中相当于电源的部分是____; 电源的正极相当于____。

电源的电动势即产生的感应电动势 $\varepsilon =$ _____ 伏, 电路 abcd 中的电流 $I =$ _____ 安。

导体 ab 所受安培力的大小 $F =$ _____ 牛, 方向是____; 使导体 ab 向右匀速运动所需的外力 $F' =$ _____ 牛。

外力做功的功率 $P' = F'v =$ _____ 瓦。

电源的功率即感应电流的功率 $P = \varepsilon I =$ _____ 瓦。

电源内部消耗的功率 $P_1 =$ _____ 瓦, 电阻 R 上消耗的功率 $P_2 =$ _____ 瓦。

这道题实际上讲的是发电机的原理模型。请你从能量的角度分析一下, 能量是怎样转化的, 转化中是否守恒。

(13) 有一边长为 $L = 0.1$ 米的正方形线框, 质量 $m = 10$ 克, 由高度 $H = 0.2$ 米处自由下落(图 8-29)。其下边 ab 进入匀强磁场区域后, 线圈开始做匀速运动, 直到其上边 cd 刚刚开始穿出匀强磁场为止。此匀强磁场区域宽度也是 L。求线框在穿越匀强磁场过程中发出的焦耳热。g 取 10 米/秒²。

(1989 年全国普通高等学校招生统一考试物理试题)

学生实验

物理学是一门以实验为基础的科学，可以说，离开了科学实验就不会有物理学。实验是研究物理的一种基本方法。在中学物理中，做好实验可以帮助我们理论联系实际，加深对物理概念和规律的理解；学会正确使用仪器进行观测和读数，学会分析实验数据，得出正确结论，从而领会用实验来研究物理问题的基本方法，增强观察物理现象和分析物理问题的能力。所以，我们应该积极、认真地做好实验。在必修课的学习中，我们已经做过不少实验，你一定有许多感受，这里把实验中的主要问题作一归纳。希望你能结合所做的实验认真加以体会，并在以后的实验中不断实践，争取在实验方面有进一步的提高。

一般来讲，实验过程应包括：（1）实验前的准备；（2）实验的操作、观测与记录；（3）数据的分析与处理。

1. 实验前的准备

实验前的准备包括：（1）明确实验目的，弄清实验的原理；（2）了解所用仪器的性能，搞清楚实验时如何操作以及实验步骤；（3）设计好记录数据的表格。

这一步是保证实验得以正确进行和取得较大收获的重要前提。只有实验前对实验的目的、原理、仪器的性能、用法，以及实验的步骤都清楚了，才能在具体操作中自觉地、有目的地把实验做好。反之，如果实验前不做好必要的准备，实验时只是按照别人拟定的实验步骤盲目地操作，观察时不知道把注意力集中到重要的现象上，记录数据时不知道记下这些数据干什么，这种实验即使做了，也不会有多大收益。

2. 实验的操作、观测与记录

做好实验前的准备后，就可以按实验步骤进行操作和观测。

操作中，要按要求正确地使用仪器。

观测要精神集中，要准确，避免观测中出现的错误。在认真观测的同时，要仔细地记录必要的的数据，并注意标明单位。数据要记录在事先设计好的表格中，不要随便乱记。因为，如果原始数据记录得零乱，整理时就容易出现错误。观测和记录要尊重客观事实，绝不能乱凑数据。在实验中要培养实事求是的科学态度。

实验中要手脑并用，争取多动手，努力培养自己的实验技能，爱护仪器，遵守规则。

3. 数据的分析与处理

实验后要对所得到的数据进行分析、处理，作出合理的结论，学会写简要的实验报告。实验报告应该自己独立写出，不要只按照现成的格式填写。

分析和处理实验数据，是一项很重要的实验能力。如果不善于分析、处理实验数据，即使准确地记录了应该记录的数据，也不会得到正确的结论。下面我们通过一个实验来说明数据的分析与处理。

下表给出的是在必修课中做过的用电流表和电压表测电池电动势和内电阻实验时，测得的 6 组实验数据。

	1	2	3	4	5	6
I (安)	0.05	0.11	0.18	0.30	0.40	0.50
U (伏)	2.75	2.50	2.15	1.52	1.12	0.78

处理数据用作图法往往比较方便。在坐标纸上以 I 为横坐标、U 为纵坐标，根据上表的数据画出 U-I 图象（图 1）。

由图可见，U-I 图象为一条直线，即 U 是 I 的一次函数，这由闭合电路欧姆定律 $U = \mathcal{E} - Ir$ ，也可以看出。将图中的直线延长，直线与纵轴的交点表示 $I = 0$ ，即断路的情况，这时的电压 $U = \mathcal{E} = 2.98$ 伏。直线与横轴的交点表示电压 $U = 0$ ，即短路的情况，这时的电流 $I_{\text{短}} = 0.61$ 安。由

此可得出电源的内电阻 $r = \mathcal{E} / I_{\text{短}} = \frac{2.98}{0.61}$ 欧 = 4.75 欧。另外，这条直线斜

率的数值即表示电源的内电阻 r，所以也可以用求斜率的办法求出 r。

从图 1 可以看出，图象中的点并不是都在曲线上。这是因为测量值有一定的误差，所以画图象时不能简单地将各点联起来就行了。绘制曲线时，应该使不在曲线上的点以大体相同的数目分布在曲线的两侧，并且要尽可能地靠近曲线，以减小偶然误差。偏离曲线太远的点，对于初学者来说，往往是由于观测或计算错误造成的，应当舍去。

一、验证牛顿第二定律

这里我们要利用图 2 所示的装置粗略地验证牛顿第二定律。

研究的对象就是图中所示的小车。小车的质量可以用天平测定。如果小车上加放砝码，质量就是小车本身和砝码的总质量。小车前端拴着细绳，细绳跨过定滑轮，下面吊着一个小桶，桶内装砂，砂和小桶的总质量也可以用天平测定。知道了砂和小桶的总质量，可以算出它们受的总重力。这个总重力就等于细绳对小车的牵引力。当小车运动时，用打点计时器把小车的运动情况记录下来。

〔实验目的〕验证牛顿第二定律，即质量一定时，加速度与作用力成正比；作用力一定时，加速度与质量成反比。

〔器材〕打点计时器；纸带及复写纸片；小车；附有定滑轮的长木板；小桶；细绳；砂；低压电源；两根导线；学

表一

小车质量 $M =$ 克，砝码质量 $m =$ 克， $M + m =$ 克， $T =$ 秒

纸带编号	小桶质量 M' (克)	砂质量 m' (克)	作用力 F (牛)	位移 s (米)	位移差 (米)	加速度 (米/秒 ²)	加速度 平均值 (米/秒 ²)

生天平（带有一套砝码）；刻度尺；砝码。

〔实验步骤〕

(1) 用天平测出小车和小桶的质量 M 和 M' ，把数值记录下来，在小车上加放砝码，小桶里放入适量的砂，使小桶和砂的总质量远小于小车和砝码的总质量，把砝码和砂的质量 m 和 m' 记录下来。

(2) 按照图 2 把实验器材安装好，只是不把悬挂小桶用的细绳系在车上，即不给小车加牵引力。

(3) 平衡摩擦力：在长木板的不带定滑轮的一端下面垫一块木板。反复移动木板的位置，直至小车在斜面上运动时可

表二

在这个实验里，我们认为细绳对小车的牵引力等于砂和小桶受的总重力。只有在小车及车上砝码的总质量远大于砂和小桶的总质量，对实验结果不要求特别精确时，才可以认为它们是相等的。

小桶质量 $M' =$ 克, 砂质量 $m' =$ 克, 力 $F = (M' + m')g =$ 牛, $T =$ 秒

纸带 编号	小车质量 M' (克)	砝码质量 m' (克)	位 移 s (米)	位移差 (米)	加速度 (米/秒 ²)	加速度 平均值 (米/秒 ²)
			S_1 S_2 S_3 S_4			
			S_1 S_2 S_3 S_4			
			S_1 S_2 S_3 S_4			

以保持匀速直线运动状态。这时, 小车拖着纸带运动时受到的摩擦阻力恰好与小车所受的重力在斜面方向上的分力平衡。

(4) 把细绳系在小车上并绕过滑轮悬挂小桶。接通电源, 放开小车, 打点计时器在纸带上打下一系列的点。取下纸带。在纸带上标上纸带号码。

(5) 保持小车的质量不变, 改变砂的质量, 即改变对小车的牵引力, 再做几次实验。在实验中一定要使砂和小桶的质量远小于小车和砝码的质量。

(6) 在每条纸带上都选取一段比较理想的部分, 按照必修课实验“测定匀变速直线运动的加速度”那样, 标明记数点, 测量记数点间的距离, 算出每条纸带上加速度的值。

(7) 把各次实验中的数据填入表一内。作用力的大小等于砂和小桶受的重力 $(M' + m')g$ 。用纵坐标表示加速度 a , 横坐标表示作用力, 根据实验结果在坐标平面上画出相应的点, 如果这些点是在一条直线上, 便证明了加速度与作用力成正比。

(8) 保持砂和小桶的质量不变, 在小车上加放砝码, 重复上面的实验。把各次实验的数据填入表二内, 用纵坐标表示加速度 a , 横坐标表示质量的倒数 $1 / (M + m)$, 在坐标平面上根据实验结果画出相应的点。如果这些点是在一条直线上, 就证明了加速度与质量成反比。

二、研究平抛物体的运动

从这个实验开始，我们不再为同学们编写实验目的、器材和实验步骤，也不再为同学们设计表格了。为了能做好实验，在实验前请同学们认真阅读课文，弄清实验原理，参照前面的实验，自己动手写出实验目的、器材和实验步骤，设计好记录实验数据的表格。

在这个实验里，我们要描出平抛物体的运动轨迹，求出平抛物体的初速度。

实验装置如图 3 所示。用图钉把白纸钉在竖直的木板上，在木板的左上角固定着一个斜槽。固定斜槽时，要注意使通过槽末端 O 点的切线是水平的。在纸上把这个 O 点记下来，并且利用重锤线画出通过 O 点的竖直线。

实验前，用硬纸（或铁皮）做一个有孔的卡片（图 4），并把它折成直角。做实验时，先在木板的平面上用手按住卡片，使卡片上有孔的一面保持水平。然后调整卡片的位置，使槽上滚下的小球正好穿过卡片的孔，而不擦碰孔的边缘。然后用铅笔在卡片上的小缺口 A 处点个黑点，这样就在白纸上记下小球穿过孔时的位置，这也就找出了小球平抛轨迹上的一个位置。用同样的方法，我们可以找出小球平抛轨迹上的一系列位置。不过，实验时要特别注意使小球每次从槽上开始滚下的位置都相同。

取下白纸，以 O 点为原点画出竖直向下的 Y 轴和水平向右的 X 轴。用平滑的曲线，把记下的小球通过的位置连接起来，就得出小球做平抛运动的轨迹。

我们知道，平抛物体的运动可以看作是两个分运动的合运动：一个是水平方向的匀速直线运动，速度等于平抛物体的初速度；另一个是竖直方向的自由落体运动。因此，我们可以测出曲线上某一点的坐标，根据重力加速度 g 的数值，利用公式 $y = \frac{1}{2}gt^2$ 求出小球的飞行时间 t ，再利用公式 $x = vt$ 求出小球的水平速度，这就是它的初速度。

在曲线上选取几个不同的点，测出它们的坐标。用上述办法，分别求出小球的初速度，最后算出平均值。

* 三、验证向心力公式

做匀速圆周运动的物体，时刻受到向心力的作用。在这个实验里，我们利用图 5 所示的装置来验证向心力公式。

我们知道，向心力 $F=mr\omega^2$ 。根据实验测出 m 、 r 、 ω ，用这个公式就可以得到做匀速圆周运动的物体所需向心力的大小，再用测力计直接测出向心力的大小，如果二者相等，我们就用实验验证了向心力的公式 $F=mr\omega^2$ 。

实验仪器由竖直的转动轴、横杆、配重、圆柱体、弹簧和半径指示器组成。当轴匀速转动时，固定在轴上的弹簧拉住圆柱体，使它随转轴做匀速圆周运动。圆柱体做匀速圆周运动的向心力就是弹簧对它的拉力。半径指示器的金属片和塑料片中央有一个小缺口，在圆柱体以适当的半径做匀速圆周运动时，我们听不到圆柱体下小凸柱撞击金属片或塑料片的声音，这时圆周运动的半径 r 就是缺口到转轴中心的距离。

实验时先把仪器固定在桌边，然后称出圆柱体的质量。按选定的圆周运动半径 r ，调好指示器缺口中心的位置。再转动螺丝 A 调好圆柱体与转轴间的距离，以保证转动时弹簧能正常伸长，并保持横杆两边平衡。用手指搓动转轴，使圆柱体转动起来。当圆柱体匀速无声地通过指示器缺口时开始计时。测量转动 20 周所用的时间，算出圆周运动的周期 T 。反复测量三次，求出 T 的平均值。再利用 $\omega=2\pi/T$ ，算出 ω 值。将测出的质量、圆周运动的半径以及所得到的角速度 ω 的值代入公式，算出向心力 F 。

调整横杆的方向，使圆柱体静止在指示器上方，用弹簧秤把它钩住并水平向外拉，使圆柱体下凸柱对正指示器缺口，这时弹簧秤的示数就等于圆柱体做圆周运动时仪器上的弹簧对它的拉力，也就等于圆柱体受到的向心力。

把直接测得的弹簧拉力和计算出来的向心力加以比较，看看它们是否相等。

改变圆柱体的质量或改变它做圆周运动的半径，重做上述实验，验证向心力的公式 $F=mr\omega^2$ 是否成立。

四、碰撞中的动量守恒

我们采用图 6 所示的装置，用两个大小相同但质量不相等的小球的碰撞来验证动量守恒定律。让一个质量较大的小球从斜槽上滚下来，跟放在斜槽末端小支柱上的另一个质量较小的小球发生碰撞。设两个小球的质量分别为 m_1 和 m_2 在碰撞前，质量为 m_1 的入射小球的速度是 v_1 ，质量为 m_2 的被碰小球静止在水平面上，两个小球在碰撞前的总动量是 m_1v_1 。碰撞后，入射小球的速度是 v'_1 ，被碰小球的速度是 v'_2 ，碰撞后两个小球的总动量是 $m_1v'_1 + m_2v'_2$ 。如果这两个小球碰撞前后的运动都在一条直线上，根据动量守恒定律，应该有

$$m_1v_1 = m_1v'_1 + m_2v'_2。$$

如果我们测出小球的质量和碰撞前、后的速度，把它们代入上式，就可以验证两个小球发生碰撞前后的动量是否守恒。

小球的质量可以用天平称出。怎样简便地测出两个小球碰撞前后的速度呢？

从槽上滚下的入射小球的运动方向是水平向前的。两个小球发生碰撞后的速度也在同一方向上。小球碰撞前后的速度，可以利用平抛运动的知识求出。

做平抛运动的小球落到地面时，只要下落的高度相同，它们飞行的时间就相同。这样，水平飞出的速度大的，飞行的水平距离就大；水平飞出的速度小的，飞行的水平距离就小。也就是说，小球的水平速度与其飞出的水平距离成正比。如果用小球飞行的时间作时间单位，小球在某一方向上水平飞出的距离在数值上就等于它在这个方向上的水平速度。因此，只要测出小球飞出的水平距离，就可以用它来代表我们要测量的小球速度了。

现在来做实验。先用天平测出两个小球的质量。然后按照图 6 所示的那样，安装好实验装置。将斜槽固定在桌边，使槽的末端点的切线是水平的。被碰小球放在斜槽前边的小支柱上。调节实验装置，使两个小球相碰时处于同一高度，碰撞后的速度方向都在同一条直线上。为了记录小球飞出的水平距离，在地上铺一张白纸，白纸上铺放复写纸，当小球落在复写纸上时，便在白纸上留下了小球落地的痕迹。在白纸上记下重锤线所指的位置 O 。它表示碰撞时入射小球的球心在纸上的垂直投影。

先不放上被碰小球，让入射小球（质量大的）从斜槽上某一高处滚下，重复 10 次。用尽可能小的圆把所有的小球落点圈在里面，圆心 P 就是小球落点的平均位置，把被碰小球放在小支柱上，让入射小球从原来的高度滚下，使它们发生碰撞。重复实验 10 次。用同样的方法标出碰撞后入射小球的落点的平均位置 M 和被碰小球的落点的平均位置 N 。

过 O 、 N 在纸上作一条直线，由于支持被碰小球的小支柱和斜槽末端点的距离是 $2r$ （ r 是小球半径），在直线 ON 上取 $OO' = 2r$ ， O' 点就是碰撞时被碰小球的球心在纸上的垂直投影。因此，线段 $O'N$ 就是被碰小球飞出的水平距离，它在数值上等于被碰小球碰撞后的速度 v'_2 。由于入射小球是在斜槽末端上开始飞出或与被碰小球发生碰撞的，所以线段 OP 是入射小球在没有发生碰撞时飞出的水平距离，它在数值上等于入射小球到达斜槽末端

的水平速度 v_1 ；而线段 OM 是入射小球碰撞后飞出的水平距离，它在数值上等于入射小球碰撞后的速度 v'_1 。O、O'、P、M、N 位置示意图见图 7。

用刻度尺测量线段 OM、OP、O'N 的长度。把两个小球的质量和相应的速度的数值代入前面的式子中去，等式是否成立？

通过实验，你认为两个物体在发生碰撞时，它们的动量是否守恒？

* 五、用冲击摆测弹丸的速度

冲击摆是一个用细线悬挂着的沙箱。弹丸击中沙箱时陷入箱内，使沙箱摆至某一高度（图 8）。利用这种装置可以测出弹丸的速度。

先来讨论这种测弹丸速度的方法。

设弹丸的质量为 m ，速度为 v ，沙箱的质量为 M 。弹丸未射入沙箱前，沙箱静止在平衡位置，弹丸和沙箱的总动量为 mv ；弹丸击中沙箱后，弹丸和沙箱以相同的速度运动，设这个速度为 v' ，它们的总动量为 $(M+m)v'$ 。由动量守恒定律有

$$mv = (M+m)v' \quad (1)$$

弹丸和沙箱一起运动后，线的拉力不做功，只有重力做功，机械能守恒。因此，它们在开始运动时的动能，在到达最高位置时完全转化成重力势能。设沙箱到达的最大高度为 h ，则有

$$\frac{1}{2} (M+m)v'^2 = (M+m)gh, \quad (2)$$

即

$$v' = \sqrt{2gh}。$$

代入 (1) 式后可得

$$v = \frac{M+m}{m} \sqrt{2gh}。 \quad (3)$$

因为弹丸的质量 m 和沙箱的质量 M 比较是很小的，所以，近似地有

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{2gh}。 \quad (4)$$

现在我们用图 9 所示的装置来做实验。这个装置主要由冲击摆和弹簧枪组成。冲击摆的摆锤用四根线绳悬挂着，线绳的长度可以调节。摆锤是中空的，弹丸射入摆锤后，被卡在里面，不能反跳出来。弹簧枪用来发射弹丸。它有三档，能够用三种不同的速度发射弹丸。摆锤摆动时，推动着指针偏转。这个指针可以停留在任一位置上，实验中根据指针停留的位置就可以从刻度盘上读出摆锤摆动的最大角度。设摆锤摆动的最大角度为 θ ，摆长为 l ，那么摆锤上升的最大高度

$$h = l(1 - \cos \theta)。 \quad (5)$$

这个公式，请同学们自己证明。

做实验时，要将实验装置水平放在桌子上，调节四根线绳的长度，使弹丸恰好能射入摆锤内，并使摆锤摆动平稳。让冲击摆在平衡位置静止。扳动弹簧枪的扳机，把弹丸射入摆锤内。摆锤和弹丸一起摆动，并推动着指针偏转。摆锤在推动指针偏转时，要克服摩擦力做功。因此实验时，应使指针先偏转适当的角度，以减少能量的损耗。记下摆锤摆动的最大角度 θ ，测出悬绳的长度，它就是摆长 l ，用公式 (5) 算出最大高度 h 。再用天平分别测出弹丸的质量 m 和摆锤的质量 M ，最后用公式 (4) 求出弹丸的速度。

用同样的方法，求出弹簧枪另外两档发射的弹丸速度。

六、电场中等势线的描绘

在这个实验里，我们要用描迹法画出电场中一个平面上的等势线。

在一块平整的木板上，依次铺放白纸、复写纸、导电纸各一张，导电纸有导电物质的一面要向上。用图钉把白纸、复写纸和导电纸一起固定在木板上。导电纸上平放着跟它接触良好的两个圆柱形电极，电极 A 与电源的正极相连作为正电荷，电极 B 与电源的负极相连作为负电荷。两个电极之间的距离约为 10 厘米，电压约为 6 伏。再从一个灵敏电流表的两个接线柱引出两个探针（图 10）。

先在导电纸上画出两个电极的连线，在连线上选取间距大致相等的五个点作基准点，并用探针把它们的位置复印在白纸上。将两个探针分别拿在左、右手中，用左手中的探针与某一基准点接触，然后在这一基准点的一侧距此基准点约 1 厘米处再选一个点，在此点将右手拿着的探针跟导电纸接触。这时，一般会看到电流表的指针发生偏转。但左右移动探针的位置，可以找到一点，使电流表的指针不发生偏转。电流表的指针不偏转，说明这个点跟基准点的电势相等。用探针把这个点的位置复印在白纸上。照上述方法，在这个基准点的一侧和另一侧，各探测出五个等势点，每个等势点大约相距 1 厘米。用同样的方法，探测出另外四个基准点的等势点。最后，取出白纸，根据五个基准点的等势点画出五条平滑的曲线，它们就是五条等势线。你能不能根据这些等势线在白纸上画出两个异种电荷的电力线？画一画看。

直接描绘静电场中的等势线是相当困难的。由于静电场和电流场遵循的规律相似，这里是用在导电纸上形成的电流场模拟静电场来做实验的。

* 七、练习使用示波器

示波器是一种常用的电子仪器，它的核心部分是一只示波管，利用它能够直接观察电信号随时间而变化的情况，并且可以测量电压和电流，在实际中用途很广。我们现在初步学习一下示波器的使用方法。

示波器的型号很多，使用方法基本相同。下面以 J2459 型示波器（图 11）为例来说明。

我们先来了解示波器面板上各个旋钮和开关的名称和作用。荧光屏右边最上端的旋钮是辉度调节“ \odot ”，用来调整图象的亮度，顺时针旋转时亮度逐渐增大。它下面的旋钮是聚焦调节“ \bullet ”和辅助聚焦“ \bullet ”，这两个旋钮配合着使用，能使电子射线会聚，在荧光屏上产生一个小的亮斑，得到清晰的图象。再下面是电源开关和指示灯，用后盖板上的电源插座接通电源后，把开关扳向“开”的位置，指示灯亮，经过一两分钟的预热，示波器就可以使用了。

荧光屏下边第一行左右两端的旋钮是垂直位移“ \updownarrow ”和水平位移“ \rightarrow ”，分别用来调整图象在竖直方向和水平方向的位置。它们中间的两个旋钮是“Y 增益”和“X 增益”，分别用来调整图象在竖直方向和水平方向的幅度，顺时针旋转时，幅度连续增大。

中间一行左边的大旋钮是“衰减”，它有 1、10、100、1000 四挡，最左边的“1”挡不衰减，其余各挡分别使输入电压衰减为原来的

$\frac{1}{10}$ 、 $\frac{1}{100}$ 、 $\frac{1}{1000}$ ，因此图象在竖直方向的幅度都减小为前一挡的十分之

一；最右边的正弦符号“ \sin ”挡不是衰减，而是由示波器内部自行提供竖直方向的交流试验信号电压，可用来观察正弦波形或检查示波器是否正常工作。右边的大旋钮是“扫描范围”，也有四挡，可以改变加在水平方向的扫描电压的频率范围，左边第一挡是 10~100 赫，向右旋转每升高一挡，扫描频率都增大 10 倍，最右边的是“外 X”挡，使用这一挡时，机内没有加扫描电压，水平方向的电压可以从外部输入。中间的小旋钮是“扫描微调”，用来调整水平方向的扫描频率，顺时针转动时频率连续增加。

底下一行中间的旋钮“Y 输入”、“X 输入”和“地”分别是竖直方向、水平方向和公共接地的输入接线柱。左边的“DC、AC”是竖直方向输入信号的直流、交流选择开关。置于“DC”位置时，所加的信号电压是直接输入的；置于“AC”位置时，所加的信号电压是通过一个电容器输入的，它可以让交流信号通过而隔断直流成分。右边的“同步”也是一个选择开关，置于“+”位置时，扫描由被测信号正半周起同步，置于“-”位置时，扫描由负半周起同步。

现在，我们来练习使用示波器。先把辉度调节旋钮反时针转到底，垂直位移和水平位移旋钮旋转到中间位置，衰减旋钮置于最高挡，扫描范围旋钮置于“外 X”挡。打开电源开关，指示灯亮，经预热后，顺时针旋转辉度调节旋钮，屏上即出现一个亮斑。亮斑的亮度要适中。注意不应使亮斑过亮，特别是当亮斑长时间停留在屏上不动时，应把亮度减弱，以免损伤荧光屏，缩短示波管的使用寿命。旋转聚焦调节和辅助聚焦旋钮，观察亮斑的变化，使亮斑最圆最小。旋转垂直位移旋钮，观察亮斑的上下移动。

旋转水平位移旋钮，观察亮斑的左右移动。

把 X 增益旋钮顺时针转到三分之一处，扫描微调旋钮反时针转到底，扫描范围旋钮置于最低挡。可以看到扫描的情形：亮斑从左向右移动，到右端后又很快回到左端。顺时针旋转扫描微调以增大扫描频率，可以看到亮斑迅速移动成为一条亮线。调整 X 增益，可以看到亮线长度的改变。

现在给竖直方向加一个直流电压。事先把扫描范围旋钮置于“外 X”挡，使亮斑位于屏的中心，把“DC、AC”开关置于“DC”位置。照图 12 连接电路，直流电源用一、二节干电池即可。逐步减小衰减挡，观察亮斑的向上偏移。再调整 Y 增益使亮斑偏移一段适当的距离。调整变阻器改变输入电压，可以看到亮斑的偏移随着改变，电压越高，偏移越大，调换电池的正负极，改变输入电压的方向，可以看到亮斑改为向下偏移。

亮斑偏移的距离跟输入的电压成正比，因而利用示波器能够测量电压。J2459 型示波器的垂直位移已经校准。当衰减旋钮处在“1”的位置，Y 增益旋钮顺时针转到底时，如果输入电压为 50 毫伏，则亮斑恰好偏移 1 格。这样，我们就可以根据亮斑偏移的格数来算出输入的电压值。测量时要注意把 Y 增益旋钮顺时针转到底；衰减旋钮处在 10、100 或 1000 挡时，算出的电压值应乘以相应的倍数。现在来测一节干电池的电压，你测出的数值是多少？

利用示波器还可以测量电流。把一个已知阻值的小电阻串联在待测电流的电路里（或利用原电路中的已知电阻），用示波器测量这个电阻两端的电压，利用欧姆定律就可以算出电路中的电流。这种测量我们就不做了。

实验完了，关机前要注意把辉度调节旋钮反时针方向转到底。使亮度减到最小。

八、研究电磁感应现象

现在用图 13 所示的实验来研究产生电磁感应的条件和怎样判断感应电流的方向。为了实验方便，这里用的线圈 A 带有铁心，线圈 B 是空心的，它的内径略大于线圈 A 的外径。

首先查明电流表指针的偏转方向和线圈中电流方向的关系，然后把蓄电池（或其他低压直流电源）、开关和线圈 A 串联成一个电路，把电流表和线圈 B 串联成另一个电路。

接通电源，给线圈 A 通电。然后，把它插入线圈 B 中，停留一会儿再取出来。同时注意观察，当线圈 A 在插入和取出的过程中以及停止运动时，跟线圈 B 相连的电流表的指针有无偏转，从而确定线圈 B 中有无感应电流，并记下感应电流的方向。

改变线圈 A 中的电流方向，重做上面的实验，观察线圈 B 中有无感应电流，并记下感应电流的方向。

把线圈 A 放在线圈 B 中不动，观察在给线圈 A 通电和断电的瞬间，线圈 B 中有无感应电流，感应电流的方向如何。改变线圈 A 的通电方向，再观察在通电和断电的瞬间，线圈 B 中有无感应电流，感应电流的方向又如何。观察当线圈 A 中的电流保持不变时，线圈 B 中有无感应电流。

分析你的实验结果，回答下列问题。

（1）什么情况下线圈 B 中有感应电流？什么情况下线圈 B 中没有感应电流？产生电磁感应的条件是什么？

（2）线圈 B 内部的磁场增强时，感应电流的磁场方向是什么方向？线圈 B 内部的磁场减弱时，感应电流的磁场方向是什么方向？可以根据什么规律来判断感应电流的方向？

附录 常用的物理常量

万有引力常量	$G = 6.67 \times 10^{-11}$ 牛·米 ² / 千克 ²
静电力常量	$K = 9.0 \times 10^9$ 牛·米 ² / 库 ²
基本电荷	$e = 1.60 \times 10^{-19}$ 库
电子的质量	$m_e = 0.91 \times 10^{-30}$ 千克
质子的质量	$m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ 千克
中子的质量	$m_n = 1.67 \times 10^{-27}$ 千克
粒子的质量	$m_a = 6.64 \times 10^{-27}$ 千克
原子质量单位	$1_u = 1.66 \times 10^{-27}$ 千克
真空中光速	$c = 3.00 \times 10^8$ 米 / 秒
电子的荷质比	$e / m = 1.76 \times 10^{11}$ 库 / 千克
氢原子的半径	$a_0 = 0.53 \times 10^{-10}$ 米
普朗克常量	$h = 6.63 \times 10^{-34}$ 焦·秒

