学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

高級中学課本 物理 一年級（试用本）

BOOK

内部资料 非卖品

序　言

自然科学的形成

远古时代，人类慑于自然的力量，对雷电、风暴、地震、日食、月食、彗星等自然现象，怀着畏惧和崇敬的心情，以为雷电是上天惩罚恶人的神火，出现彗星预示着战祸、饥荒等灾难的来临。这种神话和迷信的产生，反映了当时人们对自然的无知。

但是人们在长期的生存斗争中，逐步积累了对自然现象的点滴认识，经过许多代人认真地观察、记录、研究和校正，整理概括出一些线索，终于发现了某些现象之间的因果关系和规律，根据这些规律再去推断其他的现象。这样，人们对各种自然现象的认识，就逐渐深入和丰富起来，发展形成系统的认识。这些建立在实践和事实基础上的对自然现象及其规律的系统认识，就形成了自然科学。

人们掌握了科学知识，在与自然的斗争中便获得了主动，推进了物质文明和精神文明的建设。从此，对风暴、地震等自然现象，不仅能够解释，而且在一定范围内还可以作出预报和防范，将它们造成的损害减小到最低限度。

物理学和人类文明

物理学(physics)是自然科学中的一个基础学科，它研究物质运动最一般的规律和物质的基本结构，它已成为现代科学技术的重要基础。物理学的发展经历了三次重大的突破。17—18 世纪，牛顿力学的建立和热力学的发展，导致了蒸汽机的发明，机械工业和交通运输有了突破性的进展，引起了第一次工业革命；19 世纪，从法拉第发现电磁感应现象到麦克斯韦电磁理论的诞生，推动了电机、电器和电信设备的设计与制造，引起了工业电气化，人类社会由蒸汽时代进入了电气时代；20 世纪以来，相对论和量子力学的创立，极大地拓宽了人们认识物质基本结构和基本性质的视野，并深入到研究自然界一切相互作用的统一性。

人类社会正进入以微电子、新材料、新能源为主要内容的新技术革命时期。这三次突破，在人类文明发展进程中起着里程碑的作用，近 20 年来，物理学的新发展，对微电子技术的开发、新材料的研制和新能源的利用进一步起着重要的指导作用；各种新型监测系统和精密测量手段的日益完善，有可能使人们对宏观世界和微观世界认识的深度和广度，达到更为深入的层次，更接近事物本来的面貌(图 0-2)。由此而产生的新思想、新观念，又必将对科学技术、工农业生产和社会文明的进一步发展产生巨大的影响。

(a)1990 年 4 月 24 日，美国“发现号”航天飞机携带“哈(b)“哈勃”太空望远镜发回的一张土星照片。由于不受“哈勃”太空望远镜，进入高度约为 595 千米的低地球轨地球大气的干扰，该照片比从地面拍摄的清晰近 10 道，开始了探索宇宙奥秘的新征途。“哈勃”太空望远倍。图中的内、外光环是由无数平均直径不到 1 米的镜可以探测到暗至 29 等①的宇宙天体；而在地面上小物体组成的。由于浓密的大气层的笼罩，最好的天文望远镜也只能观察到 23 等的星体。1993 年 12 月经修复后的“哈勃”望远镜观察范围可达 140 亿光年。

■

怎样学好高中物理学

高中阶段学习物理学的目的，不仅是为了认识自然界的规律，更重要的还在于将这些知识运用于实际，改善周围的环境和生活条件，更好地为我国四化建设服务。学好物理知识必须提高运用知识解释现象、解决实际问题的能力，并为今后学习打好必要的基础。与初中物理学相比较，高中物理学有以下一些特点：

1．扩大了知识面，丰富了知识内容，对思维能力有较高的要求；

2．较多地通过实验定量研究物理定律；

3．较多地用数学公式和图象描述物理规律；

4．有较高的数学计算要求。

因此，学习高中物理课程时，要注意以下几方面：

主动学习，认真阅读课本。要理解为什么需要和怎样正确建立有关的物理概念；要重视理解物理定律的意义和适用范围；要知道所学知识和技能在生活和生产中的实际应用。

实验是学习物理的基础。在实验中要重视培养观察能力和动手能力。对每个实验要弄清楚研究的是什么问题，为什么要研究这个问题，用什么方法来研究。要学会按照合理的步骤正确使用仪器进行操作，记录数据，并对实验结果进行分析和讨论，得出结论，以提高实验能力和思维能力。做练习是学好物理的重要环节，要在复习课本内容的基础上独立完成各类练习。在习题演算中，一旦发现做错，应分析发生错误的原因，认真订正。对课文中的思考题，虽不是书面作业，但也要积极思考，认真讨论。本书课文中的“问题探讨”专栏，是以师生对话的形式，帮助同学们理解概念和提高思维能力的，希望同学们能有所领会，受到启发。课文中安排在“花纹框”里的内容以及章末的“阅读材料”，是属于扩大知识面的内容；节次标有“*”号的是选学内容，有兴趣的同学可以阅读和选学。此外，还可以留意阅读书刊杂志上有关物理知识及科技新成就的科普文章，热心参加科普讲座和参观等课外活动，关心周围发生的物理现象，并试着用学过的

知识进行解释，以提高自学能力和理论联系实际的能力。

为了帮助同学们自己评价学习效果，本书在每章的最后，都具体提出了这一章有关知识、技能和情意领域的学习要求，并提供相应的复习题。物理是一门有趣的课程，入门并不难，相信你一定会根据高中物理的特点和要求，逐步掌握有效的学习方法，努力学好物理的。

1．固体和液体
Solids and Liquids

1．天然水晶
2．二硫化亚铁(黄铁矿)多晶体
3．击球时网球和球拍的形变
4．溅起的液滴

20 世纪 20 年代，半导体材料的研制导致了晶体管的发明，由此推动了电子工业的革命，促进了电子计算机的不断革新。50 年代以来，对各种新合金、新型化学合成材料的研究，保证了航天、航宇技术的不断发展，开创了人类探索宇宙空间的新时代。90 年代初，我国科研人员试制成功了陶瓷发动机，这表明新材料的研究又进入了一个新阶段。各种新材料的研制成功是新技术发展的重要标志，而应用这些新材料，又必须对它们的物理特性进行研究。这一章我们将学习固体、液体的一些基本性质，并了解这些性质在生产和生活中的一些实际应用。

一、晶体和非晶体

固体包括晶体(crystal)和非晶体两大类。晶体和非晶体在外形上和物理性质上都有很大的区别。

常见的固体中，如天然金刚石(图 1－1)、硫酸铜、云母、明矾、石膏等都是晶体。晶体具有天然规则的几何外形，如石英、方解石都呈天然规则的多面体外形(图 1－2)，这是由于组成晶体的分子在空间按一定规律排列的结果。而玻璃、松香、蜂蜡、沥青、木材等都是非晶体，它们的分子在空间不按一定规律排列，所以它们没有天然的有规则的外形。

我们再观察下面的实验，从物理性质上比较晶体和非晶体。取一片很薄的云母片和一片薄玻璃片，在它们的一个表面上均匀地涂一薄层蜡。把一根长金属丝的一端放在酒精灯火焰上烧红，然后分别与云母片、玻璃片上不涂蜡的一面接触[图 1－3(a)]。由于热传导，云母片和玻璃片上的蜡层开始熔化，过一会儿可以发现，云母片上蜡层的熔化部分是一个椭圆[图 1－3(b)]，而玻璃片上蜡层的熔化部分却是一个图 1—3 圆[图 1－3(c)]。这表明云母各个方向上的导热性不同，即各向异性；而玻璃各个方向上的导热性相同，即各向同性。实验证明晶体除导热性外，导电性、折光性、机械强度等其他物理性质也是各向异性的，而非晶体则表现为各向同性。

晶体的各向异性在生产和科学技术中有很多应用，例如有的晶体可作为传递声振动的元件，只要测定声波在这种晶体内部各个方向上的传播速

度，然后沿传声速度最大的方向切割，就能使晶体沿这个方向最有效地传递声振动。单晶体是科学技术上的重要原材料，各种晶体管就是用单晶硅、单晶锗制造的。有一种超声波发生器的超声元件，也是用单晶硅制作的。

此外，晶体具有一定的熔点，而非晶体没有一定的熔点，这也是晶体和非晶体在物理性质上的不同。

单晶体和多晶体

通常认为单晶体是以组成晶体的原子或原子团为单位，沿着空间的前后、左右、上下三个方向整整齐齐地堆垛成的固体。单晶体可以在自然条件下形成，例如天然水晶(本章导图 1)、岩盐、方解石等，课本彩图 1 的砷化镓单晶是在人为条件下拉制出来的，它们都具有各向异性的特征。

多晶体是由许多取向不同的单晶体颗粒组成的固体。所以，多晶体在整体上就不显示各向异性，也没有天然的规则的几何外形。从本章导图 2 可以清楚地看到黄铁矿的多晶体结构。各种金属材料都是多晶体。多晶体不显示各向异性，但与非晶体的各向同性，本质上是不同的。

思考

1．雪花(图 1—4)是晶体还是非晶体？

2．闻名全国的哈尔滨冰雕制作是在冬季进行的。把松花江上的冰层锯开，取得冰块，雕凿成各种亭台楼阁、灯具、花卉、虫鸟，并堆砌成景，人们置身其间仿佛进入透剔晶莹的神话世界。这些用冰雕成的作品是晶体还是非晶体？

3．把玻璃琢磨成有规则的外形(图 1－5)，这种玻璃“钻石”是晶体吗？

*二、固体的弹性和范性

在修筑铁路、公路，建造厂房、桥梁，制造各种交通工具、生产设备时，需要使用各种不同的材料，它们有的用来承受压力，有的用来承受拉力。任何固体材料受力时都会发生形状的变化，铁轨、钢梁可以承受很大的力，而人们几乎觉察不到它们受力时发生的形状变化；体操运动员在双杠、高低杠上做动作时，却可以看到受力时杠子明显发生了弯曲。停止用力后，有的材料能完全恢复原来形状，有的材料就不能；有的材料能承受很大的力，有的材料即使受到较小的力也会被破坏。这些现象在工农业生产和日常生活中都具有重要的意义，因此有必要研究固体材料的力学性质。固体的弹性和范性是固体最重要的力学性质。

弹性和弹性形变

物体受力发生形变是力的作用效果之一。在有些情况下，物体受力发

生的形变并不明显，我们可以用实验方法把不易觉察的微小形变显示出来(图 1－6)。例如在烧瓶中盛满染有颜色的水，用带细玻璃管的橡皮塞塞紧烧瓶，使染色水在管内上升一段高度［图 1－6(a)］。当用手指紧压瓶底时，玻璃管内的水位升高；手放松时，管内水柱高度又恢复到原来位置。再如，在水平桌面上竖立两块平面镜 M_1 和 M_2，它们的反射面是平行的。用一细束平行光照射在 M_1 上，调节入射角，使从 M_1 上反射的光线能照射到 M_2 上，由 M_2 再次反射到墙上形成一个光斑 P。用力压一下桌面，桌面发生微小弯曲，M_1、M_2 两块镜面不再平行，光线在 M_1 和 M_2 上的入射角和反射角都发生改变，可以看到墙上光斑向下移动。不压桌面时，光斑又回到原来位置［图 1—6(b)］。

以上两个实验表明，烧瓶和桌面受到力的作用时都发生了形变，当力停止作用后，它们又都能恢复原来的形状。

停止用力后，能完全消失的形变，叫做**弹性形变**。固体的这种能恢复它原来形状的性质，叫做**弹性**。

上述实验中的烧瓶和桌面都具有弹性，观察到的形变都是弹性形变。本章导图 3 球拍击球时，球和球拍都发生了形变，它们都具有弹性，它们的形变也都是弹性形变。常见的弹性形变有拉伸、压缩、切变、弯曲和扭转等几种。

固体材料发生弯曲时，在靠近凸面的物质层发生拉伸形变，在靠近凹面的物质层发生压缩形变，可以推想在材料的中间，一定存在既不发生拉伸形变，又不发生压缩形变的物质层，叫做中性面。中性面物质层不承担力，离中性面越远的物质层，形变越大，承担的力也就越大[图 1－7(a)]。在工程技术上，常把抗弯曲形变的构件设计成空心的，如住宅的楼板等。这样，既节省了原材料，又减轻了构件的自重。工字钢、槽钢和直角钢[图 1－7(b)]就是根据这个道理设计制造的。

■

固体在不同的受力情况下，发生的形变有些是很复杂的。课本彩图 2 是用光学方法显示的、悬挂重物后模型吊钩内部受力的情况，从彩色条纹的不均匀分布可以知道，吊钩内各部分发生弹性形变的程度是不同的，受力也是不均匀的。

思考

1．跳水运动员起跳时对跳板施加的力，将使跳板产生什么形变(图 1－8)？

2．将一张纸平放在玻璃杯口上[图 1－9(a)]，在纸上放一枚象棋子，纸就坍落下去。但如果把这张纸折叠成图 1－9(b)所示的形状，这时即使在纸上放几枚象棋子，纸也不会坍落。你能解释它的原因吗？

弹性形变的几种形式

名　称	产生条件	特　　点	形变的图示	实　　例
拉伸	固体受到两个在同一直线上方向相反的拉力	长度增大，截面积变小		牵引钢索的形变
压缩	固体受到两个在同一直线上方向相反的压力	长度缩短，截面积变大		建筑物支柱的形变
切变	固体受到两个方向相反、互相平行和靠近的拉力或压力	组成固体的物质层之间发生相对移动		铆钉的形变
弯曲	杆状固体两端固定，中间受重直于杆的力	是一种复合形变。靠近凸面的物质层发生拉伸形变，靠近凹面的物质发生压缩形变		钢轨、桥面的形变
扭转	杆状固体一端固定，另一端沿垂直于杆的方向受到两个方向相反、互相平行的力	组成固体的物质层之间发生相对转动		拧螺丝的螺丝刀

范性和范性形变

在许多实际工作中，人们并不是只需要利用固体的弹性和弹性形变，还常常需要将金属材料加工成各种形状的金属制品，如把铁丝弯成衣架，把铁片冲压成各种器皿等。事实上，不论固体材料发生哪种弹性形变，形变的大小都跟所作用的力的大小以及材料的性质有关。作用的力越大，形变也越大。但是当形变超过了某个限度，即使外力停止作用，固体也不能完全恢复它原来的形状，有一部分形变将被永久地保留下来。

停止用力后，能被保留下来的永久形变，叫做**范性形变**。固体的这种能保留永久形变的性质叫做**范性**。

范性和弹性都是固体材料的特性，范性形变和弹性形变在生活和生产，在工业技术上都有重要意义。在一些情况下，人们需要利用材料的弹性，例如，铁路上敷设的钢轨，当列车经过时，钢轨发生了弯曲，列车经过以后，钢轨的弯曲形变会完全消失；吊车在吊运货物时，钢索被拉长，卸下货物后，钢索的伸长形变也会完全消失。在另一些情况下，人们需要利用材料的范性，例如工业生产中的锻压和轧制钢材(图 1－10)，用模具把钢板冲压成型(课本彩图 3 的轿车车身)，铆合连接构件的铆钉等。

思考

1．举出日常生活和生产中，利用材料的范性形变的例子。

2．指针式压强计内部有一根弯成弧形的一端封闭的扁形金属管(图 1－11)，当管内气体压强变化时，弯管的弯曲程度就发生改变。当管内气压增大时，弯管就会伸张开一些；当气压减小时，弯管便又收拢些。通过齿条、齿轮和指针就能把弯管的这些微小形变显示出来，从经过校正的刻度盘上就能读出气压的数据。这是利用金属弯管的弹性形变还是范性形变？

练习一

1．自行车车架为什么都用钢管而不用实心圆钢制作？

2．指出下列物体的形变是弹性形变还是范性形变？

(1)机械钟表内上紧的发条；(2)起重时吊车的吊臂；

(3)缠绕在熔丝盒接线柱上的熔丝；(4)碰瘪的铝锅。

三、液体表面的收缩趋势

池塘中的水跟盛放在敞口容器里的任何液体一样，都有一个跟空气接触的自由表面。液体静止时它的自由表面都是水平的。但是即将从滴管口滴下的液滴，洒落在荷叶上的水珠，它们的自由表面却不是平面，而是一个曲面。

当液滴下落和向上溅起时(本章导图 4)，或者液体处在宇宙飞船的失重[①]状态下(图 1－12)，液体的自由表面几乎成为球面。课本彩图 4 是一幅高速摄影照片，显示了一滴下落的牛奶在平滑的大理石表面溅起时，形成许多球形的小乳滴，像一顶“皇冠”。从几何学的知识知道，物体体积一定时，以球形的表面积为最小。以上事实表明了**液体表面有收缩到尽可能小的趋势。**

为了进一步观察液体表面的收缩趋势，我们再来做下面的实验。如图 1－13(a)所示，金属丝框架的一条边是可以上下滑动的，将框架放在皂液中浸一下，竖直地从皂液中取出时，在框架间就形成一层皂液薄膜。这时可以看到，由于液膜表面的收缩，框架的可动边就向上运动，直到接近框架的顶端[图 1－13(b)]。图 1－14 和图 1－15 的实验现象同样也说明了液体表面的收缩趋势。

思考

1．图 1－14 的实验中，当棉线一侧的皂液膜被刺破后，为什么棉线会向另一侧绷紧？2．如图 1－16 所示，一支洗净的毛笔浸在水中时，笔毛是

[①] 星等是区分天体亮度强弱的等级。人们把肉眼能看见的恒星分为六等，星越亮，星等的数字越小。最亮的星叫“1 等星”，肉眼勉强可以看见的星叫“6 等星”；1 等星的亮度等于 6 等星的 100 倍。亮度大于 1 等星的可为 0 等，甚至于负几等。如天狼星的星等是－1.4 等，太阳是－26.7 等。

松开的；当它被提出水面后，笔毛就聚在一起。这是什么原因？

3.你知道狩猎用的霰弹是怎样制作的吗？熔化的液态铅通过细孔从一定高度下落到水中，一滴一滴的液态铅进入水中很快凝固，就成为一粒粒球状的霰弹。霰弹是液态铅在空气中下落时形成球状的，还是在水中凝固过程中形成球状的？

四、浸润现象和不浸润现象　毛细现象

下雨时，雨水会淋湿衣服，这是因为雨水能附着在衣服上。如果穿上一件新雨衣，雨滴就沿着雨衣滚落，不能使它沾湿，表明雨水不能附着在表面涂有防水胶的雨衣上。

液体能附着在固体表面的现象，叫做浸润；液体不能附着在固体表面的现象，叫做不浸润。

将水盛放在洁净的玻璃烧杯内，与玻璃杯壁接触处的水面会出现向上弯曲的形状(图 1－17)，使水和玻璃的接触面有所扩展。把杯中的水倒去，杯的内壁和底部还会附着一薄层水。这说明水能浸润玻璃这种固体。将水盛放在洁净的蜡纸杯内，与蜡纸杯壁接触处的水面会出现向下弯曲的形状(图 1－18)，使水和蜡纸的接触面有所收缩。将杯中的水倒去，蜡纸杯内可以不留一滴水。这说明水不能浸润蜡纸这种固体。

同一种液体能浸润某种固体，而不能浸润另一种固体的现象是很普遍的。譬如水银能浸润表面清洁的铜、锌等金属，但是它却不能浸润玻璃。

浸润现象和不浸润现象在自然界和人们日常生活中是常见的。例如鸭子能在水中游泳、钻入水底觅食而不会让水沾湿羽毛，这是因为这类游禽尾部有一种腺体，能分泌油脂。它们在休息时，用喙把油脂涂抹在全身羽毛上，由于水不能浸润油脂，羽毛就不会被水沾湿。人们采用表面经过特殊涂层处理的织物制成衣帽，使水不能浸润，就能起到防雨作用。而医院里使用的脱脂纱布和棉花球，水就很容易浸润它们。

思考

1．汽车驾驶室的挡风玻璃前面都安装着雨刷。能否应用本节所学知识设想一项革新，取消雨刷而又不影响雨天行车时驾驶员的视线。

2．图 1—19 所示的两个玻璃试管中盛有不同的液体，哪一个试管中的液体对玻璃是不浸润的？

3．使用玻璃量筒测量水、酒精等液体的体积时，为什么应以液面最低处为准来读数(图 1－20)？

毛细现象

课本彩图 6 表示钢笔尖接触滤纸，墨水在纸上化开的现象。水、酒精、油等液体为什么会沿着纸内的细纤维或纤维之间的隙缝移动呢？现在让我们把几根内径不同的细玻璃管插在盛水的槽缸中，可以观察到，管内的水

面比管外的水面高，玻璃管内径越细，管内、外水面高度差越大(图 1－21)。如果把蜡纸制成的细管插在水中，管内的水面就比管外的水面低，管子越细，管内、外水面的高度差也越大(图 1－22)。

像这种浸润液体在细管里升高一段高度和不浸润液体在细管里降低一段高度的现象，叫做毛细现象。能发生毛细现象的管子叫做毛细管。

毛细现象在隙缝中也能发生，自然界和日常生活中是常见的。滤纸和脱脂纱布很容易吸水，这是因为纸张和纱布的纤维间形成了许多细小的隙缝，发生毛细现象，水能沿着这些隙缝上升。由于土壤隙缝中的毛细现象，地下水就能上升到达地表，被植物的根系所吸收。

思考

1．平时人们使用的毛巾、手帕等物品，要求它们的毛细现象显著还是不显著？

2．砌墙时，为什么在墙基处先要垫放一层油毡纸(这是用沥青涂制成的一种垫衬料)？

3．在棉花、玉米等农作物生长期间，必须经常锄松作物根部附近的泥土，这样做是为了加快还是减慢土壤中水分的蒸发，为什么？

练习二

1．夏天，人们穿了单薄的衣服，如果突然淋上一阵大雨，衣服湿透后就会贴紧在身上，这是什么原因？

2．课本彩图 5 是清晨蜘蛛网丝上的露滴，它们是什么形状的？这表明了什么？你是否还见过其他类似的现象？

3．用钢笔在涂蜡的纸上写字，写得出吗？为什么？

4．化验白血球时，只需少量的血。医务人员在你的手指上用针尖扎一下，挤出一小滴血后，用一根内径很细的玻璃管接触这滴血，为什么血液就会自动地进入玻璃管达几厘米的高度？

*五、液晶

人们在日常生活中广泛使用的电子计算器、电子手表、测温仪等，常采用数字显示的方式。这种反应快、耗电省的元件是利用某些有机物晶体特有的性质制成的。

液晶

晶体具有各向异性的特点，给一般晶体不断加热，到达熔点就开始熔化，熔为液态后具有流动性，晶体原有的各种特点也就随着消失，成为各向同性的液体。

人们发现，某些有机物晶体(如胆甾[1]醇酯)在熔化时，并不是从固体直接变成各向同性的液体，而是出现一个过渡阶段：当把晶体加热到达熔点 T_1 时，它就熔化成粘稠状并稍微呈浑浊的液体，再继续加热到温度为 T_2 时，它才变成透明液体，所以温度 T_2 又叫做清亮点。实验结果表明，各种不同有机物晶体的熔点 T_1 和清亮点 T_2 是不同的。

对温度处在 T_1 到 T_2 间的不同的液态晶体进行试验，结果表明，它们在各个方向呈现出的光学性质和电学性质是不相同的。这种既具有像一般液体那样的流动性和连续性，又具有像晶体那样各向异性的特点的流体，叫做液晶。

液晶的应用

根据液晶对温度变化和电压变化的灵敏反应，可以把它用作各种显示元件。

液晶对射到它表面的光线，通常是有选择、地吸收掉白光中的某些成分，所以看到的反射光是有颜色的。同一种液晶材料，表血反射出的光的颜色，是随环境温度的变化而发生变化的。当温度升高时，反射出的光由红逐渐变紫；温度降低时，反射出的光由紫逐渐变红(图 1—23)。液晶的这种性质，可以用来探测温度。例如在医学上可用来诊断肿瘤，在皮肤表面涂上液晶，由于肿瘤部分的温度与周围正常组织的温度不一样，液晶就会显示出不同的颜色。又如，还可以把它用作标示化学试剂安全温度的试剂标签。

还有一种液晶，如果对它加上电压，就会改变它的浑浊程度，从而改变了它对光线的反射与折射的能力。利用液晶的这种性质，人们制成了各种显示元件，并组成显示屏，既可以显示数字，也可以显示文字，如电子数字式手表、电子计算器等。近年来制成的液晶电视，与目前使用的电视机相比较，突出的优点是工作电压低，电能消耗少。液晶电视机可以做成薄型，整机体积小，图象清晰，色彩柔和(图 1—24)，液晶电视屏不会射出其他射线，对人体健康无损害。现在液晶电视机已经问世，液晶显示屏已逐渐地用于微电脑中(图 1—25)。

■

阅读材料　液晶的发展与应用

液晶发展简介

1888 年，奥地利植物学家莱尼茨尔在做加热胆甾醇苯甲酸酯结晶的实验中，发现在 145.5℃时，结晶熔化成浑浊粘稠的液体，继续加热到 178.5℃时，就形成了透明的液体。第二年，德国物理学家莱曼又发现，上述 145.5℃～178.5℃之间的粘稠浑浊液体还具有光学各向异性的特点，于是莱曼把这种具有光学各向异性、又具有流动性的液体称为液晶。莱尼茨尔和莱曼

---

[1] 甾读作 zāi。

都曾经观察和注意到，把胆甾醇苯甲酸酯或胆甾醇醋酸酯的熔化液逐渐冷却至凝固点之前时，会出现许多独特的鲜艳色彩。

■

■

在以后的几十年里，许多科学家对液晶进行了一系列的理论研究和进一步的实验探索，但在液晶的实用方面还没有取得突破性的进展。近 10 多年来，工业、技术的迅速发展，大大促进了液晶的研究，在液晶光学、液晶分子物理学、生物液晶等领域都取得了进展，尤其是室温液晶的研究，更促进了液晶的广泛应用。

电子计算器、电子手表的数字显示原理

在两面装有透明电极的夹层式盒内，盛满某种液晶(图 1－26)。控制加在透明电极上的电压，可以改变从液晶表面反射光线的强弱(图 1－27)，也可以改变透过液晶的折射光线的强弱。

电子计算器和电子手表的显示屏上，每一个数字都镶嵌七个上述夹层式液晶盒，每一个液晶盒作为一个笔划，由这七个笔划组成一个“ 8 ”字[图 1－28(a)]，并与相应的控制电路连接。在不加控制电压的情况下，七个液晶盒反射光线的情况与屏上其他部分完全一样。如果第 1、2、4、6、7 这五个液晶盒上加了控制电压，它们反射光的本领就改变了，它们吸收所有入射光线，几乎不产生反射光线，这样在第 1、2、4、6、7 笔划处，与周围能反射光线的区域比较起来，就呈黑色，屏上的“ 8 ” 字由于缺少了第 3、第 5 两个笔划，就显示出数字 “ 5 ” [图 1－28(b)]。根据同样的道理，就可以显示从 0～9 的任意数字。还可以做成显示文字、标点、各种符号的显示屏，以满足不同的需要。

还有一种液晶显示屏，是通过控制折射光线的强度来显示的，它的基本原理和工作过程与上述类似。

本章学习要求

1．知道晶体的主要特征。知道非晶体。
2．知道液体表面有收缩趋势。
3．知道浸润现象和不浸润现象。
4．知道毛细现象。

复习题

1．晶体有哪些主要特征？非晶体和晶体有哪些主要区别？

2．已知汽油能浸润石蜡，而水不能浸润石蜡，现将一段石蜡分别浸在水、石蜡油、汽油三种液体里，观察图 1－29 所示的液体和石蜡接触处的

液面形状，判断哪一个图中的液体是汽油，哪一个图中的液体是水？

3．为了使医用药棉容易吸水，必须经过脱脂处理，为什么？

4．你观察过金鱼缸里的水草吗？水草上面附着的气泡都是球形的，这是什么道理？

2．气体　Gases

1．工人使用风镐清理地基
2．带有压缩空气罐的潜水员
3．潜艇起浮
4．织布车间的空调进风口

地球周围被一层稠密的大气包围着，人类和其他生物就生活在大气的海洋中。大气中含有 78%的氮气，21%的氧气，还有少量的惰性气体、二氧化碳和其他包括水蒸气在内的各种气体。其中氧气是人类赖以生存的重要气体，但也有一些气体对人类是有害的。

各种气体有不同的化学性质，但在可以压缩和受热膨胀等方面却具有基本相同的物理性质。研究和掌握气体的这些性质，就能使气体为人类服务。例如利用压缩空气来启闭车门、开挖隧道、使潜艇上浮(本章导图 3)；把天然气、煤气、石油气等各种气体燃料压缩后，可以方便地贮存和运输；热机的气缸中作为工作物质的气体可以膨胀做功等等。同时，人们注意到由于工业的发展，特别近 10 年来，每年排放的二氧化碳多达 50 多亿吨，大气中二氧化碳含量便急剧增加，加剧了温室效应，结果使平均气温升高，这将影响乃至破坏原有的生态平衡，加快地表水分蒸发，扩大干旱地区，影响农业生产和人们的正常生活。

气体和液体有许多相似的性质，如它们都没有一定的形状，都具有流动性，所以气体和液体通称为流体(fluid)。气体和液体一样，都会对跟它接触的物体表面产生压强。气体和液体也还有许多不同的性质。例如，一定质量的液体放在不同的容器中，它的形状虽然是随着容器而改变的，但体积是一定的(图 2—1)。而一定质量的气体，它既没有一定的形状，也没有一定的体积，不论容器的容积有多大，它都能充满整个容器。气体的体积总是等于盛放它的容器的容积，所以一定质量的气体放在不同容积的容器内，气体的密度是不同的(图 2－2)。

■

气体和液体在性质上的另一个区别，表现在它们的可压缩性上。液体几乎是不可压缩的，而气体是很容易被压缩的。

一、气体的状态和状态参量

为了便于研究气体的热学性质，我们总是把盛放在密闭容器中的一定质量的气体作为研究对象，这样，这些气体就有了一定的体积。因为容器中的气体分子是大量的，它们向各个方向运动的机会是均等的，各部分气

体分子热运动的剧烈程度相同，所以容器中一定质量气体各部分的温度都相同，压强也都相等，并且总是跟外加于该气体的压强相平衡。此时，对这一定质量的气体来说，它是处于某个一定的平衡状态之中，有着一定的体积、温度和压强。如果体积、温度或压强发生变化，它就会从这个平衡状态变化到另一个新的平衡状态。所以我们用体积、温度、压强这三个物理量来描述气体的状态，并且把它们称作气体状态参量。也就是说，对于一定质量的气体，如果体积、温度、压强这三个量被确定了，那么这一定质量气体的状态也就是确定的。

二、气体压强的测量

气体压强等于接触面(如器壁)单位面积上受到的气体压力，单位是帕斯卡，简称帕，符号是 Pa。1 帕=1 牛/米^2。

气体的压强是怎样测量的呢？

1．用水银压强计测量

我们周围的大气总有一个确定的压强值，所以我们常可采用与大气压强相比较的方法，来测量容器中的气体压强。图 2－3 所示的水银压强计就是这样的一种装置。

■

测量时，可将水银压强计竖直放置，并将容器和它的 U 形管的一臂相连通。如果水银压强计两臂内水银面高度相等，表明容器中的气体压强 p 等于大气压强 p_0[图 2—3(a)]，即

$$p=p_0。$$

如果水银压强计两臂内水银面的高度差为 h，与容器连通的一个臂内水银面高度较低，表明容器内的气体压强 p 大于大气压强 p_0[图 2－3(b)]，即

$$p=p_0+\rho gh，$$

式中 ρ 为水银密度，g=9.8 牛/千克。

如果水银压强计两臂内水银面的高度差为 h，与容器连通的一个臂内水银面较高，表明容器内的气体压强 p 小于大气压强 p_0[图 2－3(C)]，即

$$p=p_0-\rho gh。$$

2．用指针式金属压强计测量

盛放在贮气筒里的压缩空气和盛放在钢瓶里的氧气或氢气的压强，通常用上一章中图 1－11 所示的指针式金属压强计直接显示。

[例题]

图 2－3(b)中，如果水银压强计两臂内水银面的高度差为 1 厘米。已知大气压强为 1.0×10^3 帕，水银密度为 13.6×10^3 千克/米^3。求容器内的气体压强，它比大气压强大多少？

解　已知大气压强 $p_0=1.0\times10^5$ 帕，水银压强计两臂内水银面的高度差 h=1 厘米=10^{-2} 米，水银密度 $\rho=13.6\times10^3$ 千克/米^3。

容器中气体压强

$p=p_0+\rho gh=1.0\times10^5$ 帕$+13.6\times10^3\times9.8\times10^{-2}$ 帕=101.333 千帕。

$p-p_0$=101.333 千帕-100 千帕=1.333 千帕。

它比大气压强大。上述例题告诉我们，1 厘米高的水银柱产生的压强等于 1.333 千帕。

气体压强产生的原因

气体的压强是由于组成气体的大量分子向各个方向运动，撞击器壁而产生的。关于这一点，可用一个类比实验来加以模拟。把磅秤的托盘翻过来放置，将若干小钢珠(或黄豆)倒在托盘上，小钢珠与托盘撞击后都反弹开去。由于许多小钢珠的不断撞击，托盘就受到一个持续的压力，磅秤的指针会发生一定角度的偏转(图 2－4)。这只是模拟，气体分子并不像小钢珠那样，由于受重力作用而只沿着一个方向运动。盛放气体的容器内，大量分子不停地向各个方向运动撞击器壁，使器壁各部分单位面积都受到大小相同的持续压力的作用。

练习三

1．一端封闭、内径均匀的玻璃管内有一段长为 l 的水银，将一定质量的气体封闭在管内，设大气压强为 p_0，试写出图 2－5 所示几种情况下管内气体压强的表达式。

■

2．如果图 2—3 所示的 U 形管中所盛液体是水，用橡皮管将 U 形管的左臂接在实验室煤气管道上。打开开关后，测得 U 形管右臂内的水面比左臂内水面高 6 厘米，求管道煤气的压强。已知大气压强为 1.0×10^5 帕。

3．如图 2—6 所示，一端封闭的玻璃管内盛有一段水银，堵住管口，将玻璃管竖直向下倒插入水银槽内。平衡后，测得管内水银柱的高度 h 为 50 厘米,则管内水银柱上方的气体压强为多大？设大气压强 p_0为 1.0×10^5 帕，水银密度 ρ 为 13.6×10^3 千克／米^3。

■

三、气体的压强跟温度的关系

在日常生活中，我们常会遇到这样一些情况：夏天给旧的自行车车胎打气，不宜打得很足，不然，在太阳下骑行，车胎容易爆裂；卡车在运输汽水等饮料时，由于太阳曝晒，一些质地较差的汽水瓶往往会爆裂。这些

现象都表明气体压强的大小跟温度的高低有关。

我们可以用实验的方法来研究一定质量的气体，在体积不变时，它的压强跟温度的关系。

查理定律

通过实验探索，我们初步得出一定质量气体在体积不变时，它的压强随着温度的升高而增大的结论。从实验数据描绘出的 p—t 图象，基本上是一条倾斜的直线(图 2—7)，但是这样还没有反映出压强和温度间确切的关系。

最早定量研究气体压强跟温度的关系的是法国物理学家查理(1746—1823)。我们为了精确测量一定质量气体在体积不变时，不同温度下的压强，采用了图 2—8 所示的实验装置。容器 A 中有一定质量的空气，空气的温度可由温度计读出，空气的压强可由跟容器 A 连在一起的水银压强计读出。但温度升高后，容器 A 中的空气会膨胀，由于压强计两臂间是用橡皮管相连的，它的右臂可以上下移动。移上时，受热膨胀后的空气就能被压缩到原来的体积。

控制变量法

自然界发生的各种现象，往往是错综复杂的。决定某一个现象的产生和变化的因素常常也很多。为了弄清事物变化的原因和规律，必须设法把其中的一个或几个因素用人为的方法控制起来，使它保持不变，然后来比较、研究其他两个变量之间的关系，这是一种研究问题的科学方法。

例如物体吸收热量温度会升高，温度升高多少是由多个因素决定的，跟吸收的热量、物体的质量以及组成物体的物质性质有关。在研究时，可以先使一些因素保持不变，如在物质相同、质量相同的情况下，观察物体温度升高跟所吸收热量的关系；接着再研究同种物质，不同质量的物体吸收相等热量时，温度升高跟质量的关系等等，从而得出物体温度升高跟所吸收的热量、物体的质量和组成物体的物质性质的关系。控制变量的科学方法在物理学的研究中是经常使用的。

这个实验是按以下步骤进行的：

先把容器 A 浸没在冰水混和物中，这时容器 A 中的空气温度为 0°C，调节压强计右臂的位置，使两臂内水银面位于同一高度，这时容器 A 中的空气压强就等于大气压强，记下压强计左臂内水银面的位置 B，这就是 0°C时容器 A 内空气体积 V_0 的一个标记[图 2—8(a)]。

然后将烧杯中的冰水混和物倒去，换成热水，经搅拌器搅拌后，读取热水温度，即为容器 A 中空气的温度。容器 A 中的空气受热后压强增大，体积也变大，这时压强计两臂内的水银面的高度差并不表示气体体积不变时的压强增加量，必须提起压强计的可动臂(右臂)，使左臂内水银面回到

位置 B，增大容器 A 内空气的压强，以保持原来的空气体积 V_0，这时，压强计两臂内的水银面的高度差将变大，读出这一高度差 h，如图 2－8(b)所示，就可根据 $p=p_0+\rho gh$，算出这一温度下容器 A 中空气的压强。

实验时每一次改变热水温度后，都必须重新调节压强计可动臂的高度，使容器 A 中的空气体积保持不变，并应记录每一次改变温度后，容器中空气的温度值和相应的压强值。

查理用各种气体进行实验，结果表明，**一定质量的各种气体在体积不变时，温度升高(或降低)1℃，压强的增加量(或减小量)等于它在0℃时压强的$\frac{1}{273}$**这个实验结论叫做查理定律。①**热力学温标**

根据查理定律可知，一定质量的气体在体积不变时，它的温度从 0℃降低到 -1℃，气体压强将减小0℃时压强的$\frac{1}{273}$。若把这个结论进行合理外推，便可得出当温度降低到-273℃时，气体压强将减小到零的推论(图 2－9)。

英国物理学家、数学家开尔文(1824—1907)认为，既然-273℃时气体的压强为零，就意味着这时气体分子的运动已停顿，这是绝对的零度，因此—273℃被称为绝对零度。1848 年，开尔文提出了建立以-273℃为零点的温标，叫做开氏温标，现称做热力学温标。用热力学温标表示的温度，叫做**热力学温度**。热力学温度用 T 表示，它的单位是开尔文，简称为开，符号是 K。就每一开和每一度的大小来说，热力学温度和摄氏温度是相等的。热力学温度 T 和摄氏温度 t 之间的换算关系是

$$T=t+273，t=T-273。$$

■

我们从图 2－9 的 p—t 图象可以看出，如果把直角坐标系的横坐标由摄氏温度 t 变为热力学温度 T，将坐标轴的原点取在热力学温度的零开(即-273℃)处。这样，气体压强 p 和热力学温度 T 之间就有了正比关系(图 2－10)。于是，**查理定律**的表述就可以简化为：

一定质量的气体在体积不变时，它的压强跟热力学温度成正比。

若气体压强用 p 表示，热力学温度用 T 表示，查理定律可用以下公式表示

$$\frac{p_1}{p_2}=\frac{T_1}{T_2}$$

绝对零度

绝对零度是热力学理论所断言的自然界中的最低极限温度。上面查理定律的表达式可以写成$\frac{p_1}{p_2}$，其比值是一常数，当T、p为零时这一比值就

没有意义了。实际情况也是这样，任何气体在到达绝对零度以前都已液化了，甚至已经变成了固体，查理定律已不再适用。虽然如此，绝对零度仍具有物理意义，它是低温的极限，能够趋近它，但是不能达到。

[例题 1]

室温为 20°C时，把一只空瓶盖紧，当时的大气压强为 1.0×10^5 帕。把这只瓶移到炉灶旁，当瓶内空气温度升高到 40°C时，它的压强是多大？

解　把瓶子盖紧时，瓶内空气压强 $p_1=p_0=1.0\times10^5$ 帕，温度 $T_1=(20+273)$开。移到炉灶旁，温度 $T_2=(40+273)$开，瓶内空气的压强发生了变化，但它的质量和体积都保持不变。

根据查理定律　$\frac{p_1}{p_2}=\frac{T_1}{T_2}$，

瓶内空气压强

$$p_2=\frac{p_1T_2}{T_1}=\frac{1.0\times10^5\times(40+273)}{20+273}\text{帕}=\frac{313}{293}\times10^5\text{帕}$$

$=1.07\times10^5$ 帕。

[例题 2]

钢瓶内贮有一定质量的氧气，在温度为 20°C时，瓶内氧气压强为 6.0×10^6 帕。如钢瓶的耐压值为 14×10^6 帕，则存放这瓶氧气的环境温度不得高于几度？解由于钢瓶的容积不变，当环境温度升高时，瓶内氧气的压强会增大，钢瓶的耐压值也就是瓶内氧气允许达到的压强最大值。

根据查理定律 $\frac{p_1}{p_2}=\frac{T_1}{T_2}$，已知$T_1=(20+273)$开，$p_1=6.0\times10^6$帕，$p_2=14\times10^6$ 帕，所以

$$T_2=\frac{p_2T_1}{p_1}=\frac{14\times10^6\times(20+273)}{6.0\times10^6}\text{开}\approx684\text{开},$$

即环境温度不得超过 $t_2=T_2-273=(684-273)$°C=411°C。

所以在常温下使用或存放这瓶氧气是安全的，但不可把它放在十分靠近锅炉等温度很高的地方。工厂或医院发生火灾时，消防人员十分注意火区中是否存放氧气瓶。如果有，则首先要控制住这些地方的火势，迅速将氧气瓶转移到安全的地方。不然，温度过高引起氧气瓶爆炸，会造成更大的破坏。

思考

1．上海地区 1990 年 7～8 月份的平均气温比 1989 年相同月份的平均气温高出 4.8°C，怎样用热力学温度来表示？

■

2．采用密封式罐装、使用助推剂喷雾的杀虫药水，说明书上写明“本品切勿放置在温度高于 50 摄氏度的地方”。因此，即使把用完了的药水罐随手搁在暖气片上(图 2－11)，也是不允许的。这是什么道理？

3．在炉灶上放一块铁板，烧热后，将一些带壳的干稻谷放在铁板上。

过一会儿只听到稻谷“噼”“啪”作响，同时有一些就变成了爆米花(图 2－12)。试说明原因。

练习四

1．在固定容积的容器里有一定质量的氧气，当温度从 30°C上升到 60°C时，有的同学说，容器里的氧气压强将会增大到原来压强的 2 倍。这样的考虑对吗？如果要使它的压强增大到原来压强的 2 倍，则容器里的氧气温度必须从 30°C升高到几度？

2．盛在钢瓶中的氢气，在 0°C时，测得其压强为 910 千帕。当温度升高到 27°C时，压强将变为多大？

3．盛在钢瓶中的氧气，在 17°C时，测得其压强为 9.0 兆帕。把它搬到环境温度为 37°C的高温车间内，钢瓶内氧气的压强变为 9.3 兆帕。钢瓶中的氧气是否有泄漏？为什么？

4．在大气压强为 1.0×10^5 帕、温度为 30°C时，把一只空瓶用橡皮塞塞住，然后把这只瓶子放在-18°C的冰箱冷冻室内，过一会儿取出瓶子。如果要计算橡皮塞所受压力的大小，还必须知道什么条件？

5．白炽灯泡内充有氮和氩的混合气体，要使灯泡内的混合气体在 100°C时压强不超过 1.0×10^5 帕，那么在室温 20°C制作灯泡时，所充混合气体的压强至多只能多大？

四、气体的体积跟温度的关系

在初中我们已经学习过物体的热膨胀，并且知道固体、液体和气体在相同情况下，以气体的热膨胀最为明显。固体和液体热膨胀程度跟它们原来的体积、温度的变化以及物质的性质有关，而气体的热膨胀具有不同于固体、液体热膨胀的特点。

1787 年，法国物理学家查理首先从大量实验中得出压强不变时，一定质量的气体的热膨胀跟温度的升高成正比例的结果。1802 年，法国物理学家盖·吕萨克对气体的热膨胀进行了定量研究，他在温度为 0°C～100°C的范围内，精确测定了空气、氧气、氢气、氮气、乙醚蒸汽等各种气体的热膨胀，得出了在相同情况下，所有气体的膨胀量几乎都相等的结果。

这个实验可利用图 2－13 的装置来进行。一根一端开口、粗细均匀的细玻璃管，用一小段水银把气体封闭在管内，然后把细玻璃管水平地放在冰水混合物中，设法调节管内封闭端气体的量，使管内气体柱在 0°C时的长度恰等于 273 毫米。然后在容器中通入热蒸汽加热，直到容器中的水达到沸腾，即可测得在 100°C时管内气体柱长度为 373 毫米。由于管内一定质量的气体在温度升高、体积膨胀的过程中，气体压强始终等于大气压强，

所以这一实验结果可表述为：

一定质量的气体在压强不变时，温度升高 1°C，体积的增加量等于它在0°C时体积的$\frac{1}{273}$。这个结论叫做盖·吕萨克定律。

由盖·吕萨克定律可以推知，在压强不变时，一定质量气体的温度从0°C降低到—1°C，气体体积将减小0°C时体积的$\frac{1}{273}$，如果温度降低到-273°C时，气体体积将减小到零。若引入热力学温度，盖·吕萨克定律的表述就可简化为：

一定质量的气体在压强不变时，它的体积跟热力学温度成正比。

若气体体积用 V 表示，热力学温度用 T 表示，盖·吕萨克定律可用以下公式表示

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{T_1}{T_2}$$

一定质量气体在压强不变时，它的体积跟热力学温度的关系可用 V-T 图象(图 2－14)表示，它是一条通过坐标轴原点的倾斜直线。

思考

如图 2－15 所示，平底烧瓶的橡皮瓶塞内有一根直角弯管，弯管的水平部分 A 处有一小段水银，把烧瓶内的空气和外界隔开。用手捂住瓶壁时，水平管内的一小段水银将从 A 处向 B 处移动，在这过程中烧瓶内空气的膨胀是不是等压膨胀？为什么？

如果瓶塞上的细玻璃管是竖直的，里面也有一小段水银，烧瓶中的空气受热膨胀时是不是等压膨胀？为什么？

练习五

1．一定质量的气体在 17°C时的体积为 250 厘米^3。在压强不变的情况下，当温度升高到 34°C时，它的体积多大？

■

2．如图 2—16 所示，气缸中有一可自由移动、且与器壁无摩擦的活塞。活塞面积为 100 厘米^2，活塞左侧气缸的容积为 2 升，盛有温度为 27°C的氧气。当温度升高到 77°C时，活塞向右移动的距离多大？

五、气体的压强跟体积的关系

我们知道气体分子间的平均距离很大，所以一定质量气体的体积很容易改变。作为动力使用的压缩空气就是把一定质量的空气的体积压缩得很小，使它具有很大的压强，通常可达 6×10^5～8×10^5 帕(相当于大气压强的 6～8 倍)。本章导图 1 中，建筑工人清理地基使用的风镐，就是利用压

缩空气作为动力的。钢笔吸墨水是利用钢笔里的橡皮管恢复原状时，它里面存留的空气体积变大，压强随着变小，墨水就被吸入橡皮管内。

日常生活中还会见到如图 2—17 所示的一些现象，好像空气是具有“弹性”的。其实这都表明气体的压强跟体积有关。

玻意耳定律

注意到气体压强随体积变化而变化的事实，并首先进行定量研究的是英国科学家玻意耳(1627—1691)。

1662 年，玻意耳用水银把空气封闭在很长的 J 形玻璃管的短臂内进行实验。设法调节封在短臂内的空气，使管子竖直放置时，J 形管两臂内的水银面在同一高度上[图 2—18(a)]。这时，封闭在管内的空气压强等于当时的大气压强。由于玻璃管内径均匀，管内空气体积便可由空气柱的长度来表示。

玻意耳采用在 J 形管长臂内注入更多水银的方法来增大短臂内空气的压强，他发现当 J 形管长臂内的水银面高于短臂内的水银面时，短臂内的空气柱长度变短了，这表明空气被压缩时，空气体积减小的同时，压强在增大。他又注意到用湿布揩拭短臂或晚间照明的烛焰靠近短臂时，短臂内空气柱的体积都会发生变化。这就提醒了玻意耳，在整个实验过程中，空气柱的温度必须保持不变，只有这样，才能找出只由于压强变化所引起的空气体积变化的规律。

因此，玻意耳设法使实验在温度保持不变的条件下进行。他发现当短臂内的空气柱体积被压缩一半时，长臂内的水银面比短臂内的水银面高出 760 毫米(760 毫米水银柱产生的压强约等于大气压强)。这就是说，当短臂内的空气的压强增大到等于大气压强的 2 倍时，空气的体积减小为原来的 1/2[图 2—18(b)]。

■

图 2－19 是根据玻意耳实验的原始数据描绘的压强-体积图象(p-V 图象)。图中以直角坐标系的纵轴表示 J 形管短臂内空气压强 p(其大小等于外加于这部分空气的压强)，单位用水银柱高度 cmHg[①]来表示；横轴表示空气体积 V，用空气柱长度的厘米数表示(因管内空气柱粗细均匀，所以可用空气柱的长度来表示空气柱的体积)，单位用 cm。由图象可以看出这是一段等轴双曲线，它表明

一定质量气体在温度不变时，它的压强跟体积成反比。这一实验结论叫做玻意耳定律。

若气体压强用 p 表示，体积用 V 表示，玻意耳定律可用以下公式表示

$$p_1V_1=p_2V_2,$$

---

① 按国务院 1984 年关于实行法定计量单位的通知，压强的单位 mmHg、cmHg 已经废除，应一律用帕做单位，1cmHg=1333 帕。

或　　$pV=C$(常数)。

运用玻意耳定律解决实际问题时，应注意这样几点：

1．认清被研究的对象是哪部分气体，这部分气体的质量必须是一定的；

2．它只能在温度不变的条件下适用；

3．要分清气体状态变化前、后的压强和体积；

4．气体状态变化前、后，压强和体积必须分别用同一单位。

等温过程的获得

在研究一定质量的气体的压强和体积的关系时，必须控制温度保持不变，这样的过程叫做等温过程。例如将被研究的气体放在大量冰水混和物中被压缩、体积减小时，外界对这部分气体做功，气体的温度将升高，这就不是一个等温过程。但是，如果压缩过程很缓慢，则这部分气体可以及时向周围的冰水混和物放热，使 0°C的冰逐步熔化一部分，而气体温度始终保持在 0°C。相反，当气体体积增大、气体对外做功时，温度将降低，这也不是一个等温过程。但是，如果膨胀过程很缓慢，则这时气体也可以从周围冰水混和物中及时吸收热量，使部分 0°C的水逐渐凝固成冰，而气体温度始终保持在 0°C。所以为了让气体来得及跟周围物质进行热交换，以使它的温度保持不变，等温过程必须进行得十分缓慢。

在其他温度下(不一定是 0°C)做实验，要使气体经历一个等温过程，首先必须使环境温度保持不变。

[例题 1]

一个体积为 V 的沼气泡自池塘底浮起，若水深为 3 米，沼气泡从池底上升到水面时，它的体积将变为原来的多少倍(图 2－20)？(设水底和水面温度相同，大气压强为 1.0×10^5 帕。)

解　沼气泡在池底时，气泡内的气体压强等于大气压强和池水产生的压强之和，即 $p_1=p_0+\rho gh$，设这时气泡内气体体积为 $V_1=V$。当气泡上升到水面时，气泡内气体压强 $p_2=P_0$，体积为 V_2。根据玻意耳定律 $p_1V_1=p_2V_2$，得

$$V_2=\frac{\rho_1V_1}{p_2}=\frac{(p_0+\rho gh)}{\rho_0}=\frac{(1.0\times10^5+1.0\times10^3\times9.8\times3)}{1.0\times10_3}V=1.29V,$$

即气泡上升到水面时，体积扩大为原来体积的 1.29 倍。

[例题 2]

一端封闭的、足够长的均匀直玻璃管内有一段长 3 厘米的水银，当玻

璃管水平放置时，封闭在管内的空气柱长 5 厘米[图 2－21(a)]。如果小心地将这根玻璃管竖立起来，并使开口的一端向下[图 2－21(b)]，这时管内空气柱的长度是多少？(设温度保持不变，大气的压强为 1.0×10^5 帕，水银的密度为 13.6×10^3 千克/米^3。)

解　玻璃管水平放置时，管内空气柱的压强等于大气压强，即 $p_1=p_0$，因玻璃管内径均匀，设空气柱截面积为 a 米^2，则空气柱体积 $V_1=l_1a$。当玻璃管开口的一端向下竖直放置时，管内空气压强将减小为 p_2，$p_2=p_0-\rho gh$。根据玻意耳定律 $p_1V_1=p_2V_2$，得

$$V2=\frac{p_1V_1}{p_2}=\frac{\rho_0\cdot l_1a}{p_0-\rho gh}$$

$$=\frac{1.0\times10^5\times5\times10^{-2}a}{1.0\times10^5-13.6\times10^3\times9.8\times3\times10^{-2}}=\text{米}^3$$

$$=0.052a\text{米}^3$$

管内空气柱长度

$$l_2=\frac{V_2}{a}=\frac{0.052a}{a}\text{米}=0.052\text{米}=5.2\text{厘米。}$$

思考

1．请你解释图 2－17 所示的空气具有“弹性”的现象。

2．罐装牛奶是密封的，如果只在罐子顶部开一个小孔，牛奶很难从小孔倒出(图 2－22)，这是什么原因？

S(学生)：将一根两端开口的玻璃管竖直插入水中，用手指紧紧按住露出水面一端的管口，然后将玻璃管向上提起几厘米，这时管中的水面为什么会比管外水面高一些，而又比玻璃管向上提起的高度小？应当怎样来分析这类问题呢？

T(教师)：首先，管中的液面不可能一点也不上升，否则管内、外液面持平，被封闭在管内的空气柱压强不变，而体积却增大了，这是不可能的 3 其次，管中的液面上升的高度也不可能跟玻璃管上提的高度相等，否则，空气柱的体积不变，而压强却小于原来的大气压强了，这同样也是不符合玻意耳定律的。只有管内水面比管外水面高一些，又比玻璃管向上提起的高度小一些，管中空气体积增大、压强减小才符合玻意耳定律。由此可见，分析这类体积变化问题的同时，还要分析气体压强的变化。

练习六

1．如图 2—23 所示，带有活塞的容器内有一定质量的气体，已知气体压强为 1.0×10^5 帕，体积为 2 升。如果在外力作用下，将活塞向右拉动，使容器内的气体体积增大到 4 升，则容器内气体的压强将变为多大？如果不计活塞与器壁间的摩擦，活塞的截面积为 100 厘米^2，为了使活塞平衡，

这时需用多大的拉力？(设温度保持不变，大气压强为 1.0×10^5 帕。)

2．如果上题中的已知条件是：原来气体的压强为 1.0×10^5 帕，

密度为 1.29 千克／米 ^{3}。在外力作用下，十分缓慢地将活塞向左推动，当容器里气体的压强达到 5×10^5 帕时，容器里气体的密度将是多大？

3．这里介绍一种简单的测定大气压强的实验方法：在一端封闭的均匀直玻璃管中，用一段水银封住一定量的空气，当玻璃管开口端向上竖直放置时[图 2—24(a)]，测得水银柱高度为 h，空气柱长度为 l_1。小心地把玻璃管放成水平，测得空气柱长度为 l_2[图 2—24(b)]。设温度保持不变，水银密度为 ρ，根据上面的数据，试写出大气压强 p_0。的表达式。

如果仍用这根装有一段水银柱的玻璃管，将开口端向下竖直放置，是否也能测出大气压强？

4．如图 2－25 所示，一端开口、一端封闭的均匀 U 形管内盛有水银，左臂内封有一定质量的空气，当 U 形管竖直放置时，两臂内的水银面在同一高度；现从开口的一端再灌入一些水银，使两臂内水银面的高度差为 2 厘米，左臂内的空气被压缩 1 厘米，求左臂内原来的空气柱长。(设温度不变，大气压强为 1.0×10^5 帕。)

5．将一根长 1 米、一端封闭的均匀玻璃管开口的一端竖直地向下插入水中，当把玻璃管的一半长度插入水中时，进入玻璃管中的水柱高度 h 为多大(图 2－26)？(设温度保持不变，大气压强为 1.0×10^5 帕。)

*六、理想气体的状态方程

前面我们已经学习了用控制变量的方法，研究一定质量的气体在体积不变时(等体积过程)，它的压强跟温度的关系，压强不变时(等压过程)，它的体积跟温度的关系，以及在温度不变时(等温过程)，它的压强跟体积的关系，并且分别得出查理定律、盖·吕萨克定律和玻意耳定律。但在实际情况中，经常会遇到气体的温度、体积和压强这三个量中，有一个量发生变化时，会引起其他两个量同时发生变化的复杂情况。例如四冲程柴油机压缩冲程开始后，进气阀和排气阀就都关闭，这时活塞把已经吸入气缸的一定质量的空气压缩，气缸内空气体积迅速减小的同时，它的温度和压强都急剧地增大，到压缩冲程末，当气缸内空气体积减小为原来体积的 $\frac{1}{20}$ 时，温度可升高到 700℃，压强可高达 4×10^6 帕，这时向气缸内喷入雾状燃油，燃油立即燃烧。再如图 2－27(a)所示的竖直放置的 U 形管中，封闭端内有一定质量的气体，当气体温度升高时，它的体积膨胀了，压强也一定相应增大[图 2－27(b)]。

怎样研究一定质量气体的温度、体积和压强三个量同时发生变化的情况呢？它们在发生变化的过程中，是否也具有某种规律呢？

理想气体

气体的三个实验定律是研究上述情况的基础，但它们都是在温度不太低、压强不太大(相对于室温和通常的大气压强)的情况下得出的。如果在温度很强很大的情况下，实验结果将会出现很大偏离，而且在温度非常低、压强非常大时，真实气体可能已经变成液态甚至变成固态了。为了便于研究问题，我们可以设想一种气体模型，这种气体在任何温度和压强下，都将严格遵循上述研究气体热学性质的实验定律，这种气体叫做理想气体。

物理模型

物理学是研究物质运动最一般的规律和物质的基本结构的科学。在实际情况中，影响物质运动变化的因素往往是复杂的。为了简化问题，有利于所研究问题的逐步展开和顺利解决，在物理学研究中常常忽略一些次要因素，而只考虑起决定作用的主要因素，因此，就需建立物理模型。

例如把物质分子看成一个个不连续的弹性小球，在物质三态中有着不同的空间分布与结构，这就是物质结构的分子模型。

为便于研究真实气体的性质，建立了理想气体模型，并假设它有如下性质：

1．分子之间除碰撞外，不存在分子作用力。

2．分子只有质量而无体积，理想气体可以无限压缩。

这些假设使在研究真实气体时能抓住气体的主要性质与特征，忽略在低温、高压下跟气体实验定律之间出现的偏离，从而使研究的问题得以简化。

建立物理模型是一种科学方法，在今后学习中经常用到。

理想气体的状态方程

如图 2—28(a)所示，在一个带有活塞的竖直放置的容器里，盛有一定质量的理想气体，它的温度为 T，体积为 V_1，压强为 p_1，这是它的一个平衡状态，设为状态 1。

如果要使它变化到另一个平衡状态 2，这时的温度为 $T_2(T_2>T_1)$，体积为 $V_2(V_2<V_1)$，压强为 $p_2(p_2>p_1)$[图 2-28(c)]。设想这一定质量的气体是先后经过两个过程来实现这一状态变化的。假定它先经过一个等体积过程，到达某一个中间状态 C，这时的温度 $T_C=T_2$，体积保持不变 $V_C=V_1$，压强为 p_C[图 2－28(b)]。根据查理定律，可得出在这过程中压强跟温度的关系是

$$\frac{P_1}{P_c}=\frac{T_1}{T_2}$$

然后使气体再经过一个等温过程到达状态 2，这时温度仍为 T_2，体积为 V_2，压强为 p_2[图 2－28(C)]。根据玻意耳定律，可得出这过程中压强跟体积的关系是

$p_cV_1=p_2V_2$。 (2)

从(1)式得$P_C=\frac{p_1T_2}{T_1}=$代入（2）式，整理后得

$$\frac{p_1v_1}{T_1}=\frac{p_2V_2}{T_2}$$

这个方程叫做理想气体状态方程。表明一定质量的理想气体的压强和体积的乘积，除以它的热力学温度得到的商，在状态变化过程中是保持不变的。即

$$\frac{pV}{T}=C\text{（常数）},$$

式中 C 跟气体的质量和性质有关。理想气体状态方程反映了一定质量理想气体的温度、体积和压强这三个状态量间的关系，对于真实气体来说，在温度不太低、压强不太大的情况下也是适用的。

理想气体的状态方程实际上包含了前几节所学过的气体实验定律。例如温度不变时($T_1=T_2$)，理想气体状态方程就是玻意耳定律的表达形式；体积不变时($V_1=V_2$)，理想气体状态方程就是查理定律的表达形式；压强不变时($p_2=p_2$)，理想气体状态方程就是盖·吕萨克定律的表达形式。

在应用理想气体状态方程解决实际问题时，要注意气体的质量必须是一定的，气体先后所处的两个状态的压强和体积应分别取相同的单位，而温度则必须用热力学温度表示。

[例题]

如图 2－29 所示，两个容积相等的容器 A 和 B，用一细管相连，关闭阀门 S，将容器 B 抽成真空。容器 A 中有一定质量的气体，压强为 1.0×10^5 帕，温度为 27°C。打开阀门 S，一部分气体将从容器 A 进入容器 B。如果两个容器中的气体温度都降低到 10°C，这时容器 A 内的气体压强是多大？

解　容器 A 中一定质量气体初始状态的体积设为 V_1，温度 $T_1=(273+27)$ 开，压强 $p_1=1.0\times10^5$ 帕。阀门 S 打开后，气体体积增大为 $V_2=2V_1$，温度降低为 $T_2=(273+10)$开。达到平衡后，容器 A 内的气体压强与容器 B 中的气体压强是相等的，设为 p_2。

根据理想气体状态方程

$$\frac{p_1V_1}{T_1}=\frac{p_2V_2}{T_2}$$

得 $$p_2=\frac{p1V1T2}{V2T1}=\frac{1.0\times10_5\times V_1\times(273+10)}{2V_1\times(273+27)}\text{帕}$$

$$=\frac{283}{600}\times10^5\text{帕}=0.47\times10^5\text{帕。}$$

即容器 A 内的气体压强为 0.47×10^5 帕。

可见，容器中气体压强比原来减小一半还多。这是因为气体体积增大

到原来 2 倍的同时，气体的温度也降低的缘故。

S：一定质量的理想气体在状态变化时，是否可能温度升高体积反而减小？如果可能的话，跟盖·吕萨克定律是否相矛盾？

T：一定质量的理想气体在状态变化时，温度升高，只要压强同时增大，体积减小是有可能的。如内燃机在压缩冲程中，气缸内气体的情况就是这样。这跟盖·吕萨克定律并不矛盾，因为盖·吕萨克定律是在气体压强不变的条件下(即等压过程中)才适用，而你假定的状态变化是 p、V、T 三个量都在发生变化的。

■

练习七

1．一个沼气泡从池塘底升起到达水面。若已知池水深 5 米，池底温度为 17℃，水面温度为 27℃，大气压强为 1.0×10^5 帕。这一沼气泡自池底升到水面时体积增大为原来的几倍？

2．某一内燃机吸入气缸的燃料混和气的压强为 1.0×10^5 帕，

温度为 47℃。在压缩冲程末，气缸内混和气的压强达到 1.2×10^6 帕，压缩前、后混和气的体积之比是 6：1，压缩后气缸内混和气的温度升高到多少摄氏度？

3．如图 2－30 所示，气缸总容积为 20 升，内有一个面积为 0.04 米^2 的绝热活塞，把气缸分隔成两部分。开始时，活塞左、右两侧空气的温度、压强、体积都相等，活塞在气缸的正中央恰保持平衡。现使气缸内活塞左侧空气温度升高到 47℃，活塞右侧空气温度降低到 0℃，试求活塞最终平衡时的位置。

4．某一定质量的理想气体在状态 1 时的温度为 T_1，体积为 V_1，压强为 p_1。如果先让它经过一个等温压缩过程，到达某一中间状态 C，使压强增大为 p_2，体积减小为 V_c；再经过一个等压膨胀过程，到达状态 2，使它的温度升高为 T_2，体积增大为 V_2。试利用有关的气体实验定律推导出理想气体的状态方程。

*七、饱和气和未饱和气空气的湿度

上海及江南地区每年的 5 月～6 月间，常常会遇到这样的现象，洗好的衣服晾出去一整天也干不了，人们就说因为这是梅雨季节，气候潮湿。平时粮食、棉花仓库都必须十分注意防潮，不然谷物、棉花就会霉变；图书馆、博物馆的陈列室内要安装吸湿设备，在藏有名画、孤本等文物珍品的玻璃柜里也要放置干燥剂，不然展品将会损坏。一些工业产品、精密仪表也必须保持干燥。这些情况表明，空气干湿程度的大小对生产和生活都有密切的关系，那么空气的干湿程度又跟哪些因素有关呢？

饱和气和未饱和气

生活经验告诉我们，液体盛放在敞口容器中，很容易蒸发掉。要保存液体，必须把它盛放在密闭容器中。这是因为液体分子始终在不停地运动，其中速度较大的分子很容易冲出液体表面层进入空间；由于容器是敞口的，已经冲出液面的分子中，只有极少数的分子会跟器壁碰撞或因分子间相互碰撞而重新回到液体中[图 2－31(a)]。在相同时间里，逸出液面的分子数大于重新回到液体的分子数，即液体的蒸发量大于气体的液化量，因此时间长了，敞口容器中的液体会全部蒸发掉。

如果液体盛放在密闭容器中，情况就不同了。蒸发形成的气体分子不可能跑到容器之外的空间去［图 2－31(b)］，随着液体的不断蒸发，液面上方气的密度不断增大，由于碰撞而回到液体中的气体分子数也逐渐增加，如果在相同时间里，回到液体中的分子数等于逸出液面的分子数，液面上方气的密度就不再增大，达到饱和状态；液体的量也不再减小，液体和气体之间达到了**动态平衡**。处于动态平衡下的气叫做**饱和气**。

未达到饱和状态的气，叫做**未饱和气**。通常盛有液体的敞口容器内，液面上方的气是未饱和气。未饱和气具有和一般气体相同的性质。

实验表明，饱和气具有跟一般气体不同的性质：在体积一定时，由于温度升高，一方面分子运动加剧，饱和气压强将随温度升高而增大；另一方面液体蒸发加快，饱和气密度也将随温度升高而增大，所以饱和气压强将随温度升高而增大得更快。反之，当温度降低时，饱和气密度将随温度降低而减小，饱和气压强也将随温度降低而减小得更快。在温度一定时，同种液体的饱和气密度是一定值，当体积增大时，有更多的液体将蒸发成气，当体积减小时，有更多的气分子将回到液体中，而饱和气压强将不随其体积的变化而变化。总之，不论是温度变化还是体积变化，都会使饱和气的质量发生相应的变化，因此，对于饱和气，气体实验定律是不适用的。

空气的湿度

人们常说我国南方比北方潮湿，沿海地区比内陆地区潮湿，潮湿的含义究竟是什么呢？

我们知道空气的主要成分是氮气和氧气，水气只占极小的比例。在局部范围内，如沼泽地带、森林、沿海地区，空气中的水气比例会比山区、沙漠高些，但总的来说，水气在空气中所占比例还是很小的。空气的干湿程度可以用空气中所含的水气密度来表示。由于直接测量空气中的水气密度比较困难，而水气的压强是随其密度的增大而增大的，通常都用空气中水气的压强来表示空气的湿度。空气中所含水气的压强叫做空气的**绝对湿度**，它的值通常只有几千帕。然而人们的潮湿感觉并不是由空气的绝对湿度来决定的，而主要是跟空气中所含水气离饱和状态的远近有关。人们将某一温度时，空气的绝对湿度跟同一温度下饱和水气压的百分比，叫做空气的**相对湿度**。如果某一温度时的绝对湿度用 p 表示，同一温度下的饱和

水气压用 p_s 表示，则空气的相对湿度 B 可用下式表示：

$$B = \frac{p}{p_s} \times 100\%$$

当水气离饱和状态远时，相对湿度就小，人们就觉得干燥；当水气离饱和状态近时，相对湿度就大，人们就觉得潮湿。

[例题]

白天气温为 20°C时，测得空气所含水气的压强是 1.384 千帕。已知 20°C时的饱和水气压为 2.308 千帕，求当时空气的相对湿度。如果夜晚气温降低到 17°C，空气的绝对湿度不变，已知 17°C时的饱和水气压为 1.912 千帕，这时的相对湿度为多大？

解 白天的相对湿度 $B = \frac{p}{p_s} \times 100\%$

$$= \frac{1384}{2308} \times 100\% = 60.0\%$$

夜晚的相对湿度 $B' = \frac{p_1}{p'_s} \times 100\%$

$$= \frac{1384}{1912} \times 100\% = 72.4\%$$

通常人们所说的湿度大或湿度小都是指相对湿度。比较适宜的湿度是 60～70%。湿度过大或过小都会使人感到不适。譬如，冬天的公共浴室内的湿度接近 100%，天花板上会往下滴水，人们会感到闷得透不过气来。北方的冬季湿度很小，人们的皮肤会开裂。空气的湿度跟温度有关，空气中含有同样比例的水气，在温度较高时，水气离开饱和状态较远；而在温度较低时，水气可能已经达到饱和。例如白天气温较高，空气中所含水气未达到饱和，到了夜间，气温降低，水气就已达到饱和，于是接近地面的空气中的水气，就以尘埃等小颗粒为凝结中心形成许多小水滴悬浮在空中，空气便变得不透明，这就是雾；如果水气凝结成水滴，附着在地面物体的表面，这就是露。

湿度对工农业生产影响很大，例如水稻在抽穗扬花期间，最适宜的湿度是 70～80%，湿度太大会使花粉飞扬不开，湿度太小又会使花粉很快干枯，水稻雌蕊不易受精，影响水稻产量。纺织厂在生产棉纱和布匹时，对空气湿度的要求很严格，如前纺车间要求湿度控制在 65%左右，细纱车间要求湿度控制在 55%左右，而布机车间则要求湿度为 68%，不然就会影响坯布的质量。各车间所需的湿度是通过调节水雾量和空气的比例，由空调室的送风系统将调节好湿度的空气送入各车间来实现的(见本章导图 4，车间顶部的送风口)。

测定某处的空气湿度，可以用多种仪器，这里介绍一种叫做毛发湿度计的仪器。我们知道，经过脱脂处理后的头发，长度会随湿度变化而改变，毛发湿度计就是根据这一特点制作的。湿度大时，头发(图 2－32 中的 C)

长度会增长；湿度小时，头发长度会缩短。指针(图 2－32 中的 S)能把头发长度的微小变化显示出来，从刻度表上可直接读出空气的湿度。

思考

1．怎样理解盛放在密闭容器中的液体不再减少的现象？

2．夏天夜晚，人们在室外乘凉，夜深以后，用手摸自己的头发或者坐椅，会有一种阴湿的感觉，这是什么原因？

3．冬天从室外走进温暖的室内，戴眼镜的人立即会发现眼镜片变得模糊起来，你有这样的体验吗？这是什么原因？

4．上海等大城市郊县农村中采用大型塑料暖棚(图 2－33)培育蔬菜，即使在冬季也能为城市居民供应各种蔬菜，这种暖棚除了能透入阳光和保温外，还有什么重要作用？

■

八、分子运动论内能

我们已经学习过固体、液体和气体的基本性质，现在要进一步通过学习分子运动论，讨论热现象的本质。并学习物体内能的概念，从能量的观点认识热现象。

分子运动论

分子运动论是人们在对大量实验事实观察的基础上提出的对物质结构的一种基本假设。其要点是：**物体是由大量分子组成的，分子永不停息地做无规则运动，分子之间存在着相互作用的引力和斥力。**下面我们着重介绍分子运动论的实验基础。

物体是由大量分子组成的。

我们知道，物体是由大量分子组成的，1 摩尔(mol)的任何物质含有的分子数相同，这叫做阿伏伽德罗常数。它的值 $N_A=6.02\times10^{23}$/摩尔。

分子是很小的。物理学中有各种不同的方法来测定分子的大小，一种粗略地测定分子大小的方法是油膜法。把一小滴体积为 V 的油滴，滴在静止的水面上，油在水面上会尽可能散开，形成单分子薄膜。测出油膜的表面积 S，就可算出单分子油膜的厚度 d=V/S。如果把分子看成球形，并认为分子紧密排列在一起，这油膜的厚度就等于油分子的直径。测定结果表明，油分子直径的数量级是 10^{-10} 米。

要注意的是：把分子看作球形，是一种简化的模型。实际上分子的内部结构很复杂，我们一般只要知道分子大小的数量级就可以了。

分子永不停息地做无规则运动

1827 年，英国植物学家布朗在显微镜下观察到水中的花粉微粒和其他悬浮着的小颗粒在不停地做无规则运动。以后，人们又发现在温度均匀和没有外力作用时，在显微镜下都能观察到悬浮在液体和气体中的小颗粒的

无规则运动。人们把这种小颗粒的无规则运动叫做布朗运动。我们把少量烟墨墨汁用水稀释后，取一小滴放在显微镜下观察(图 2－34)，就可看到小碳粒的布朗运动，而且碳粒越小，运动越明显；温度越高，运动越明显。图 2－35 所示的是在显微镜下观察到的做布朗运动的三颗微粒的运动情况。这个图是根据每隔 30 秒记录的微粒所在位置，用直线把这些位置依次连接起来形成的三条折线。从这些折线可以看出小颗粒的运动是无规则的。

布朗运动产生的原因是什么呢？图 2－36 描绘了一个小颗粒受到周围液体分子撞击的情景，每个液体分子撞击小颗粒时都给小颗粒一个作用力，由于颗粒体积很小，在某一瞬间和它相撞的分子数也比较少，如果从某一方向撞击的分子数多于其他方向撞击的分子数，小颗粒受到的作用力就不平衡，这个瞬时合力使小颗粒的运动状态发生变化。下一瞬间，在另外方向上的作用力大一些，那么小颗粒的运动状态又发生变化，这样就引起了小颗粒的无规则运动。做布朗运动的小颗粒虽然不是分子，但它的无规则运动正是液体分子做无规则运动的反映。

■

如果颗粒较大，虽然它也受到周围液体分子的撞击，但由于同时跟它撞击的分子较多，来自各个方向的撞击作用可以认为是相互平衡的，所以较大的颗粒的布朗运动极不明显，难以观察。

从温度越高小颗粒的运动越激烈的实验事实，表明分子的无规则运动是跟温度有关的，温度越高，分子运动越激烈，所以分子的无规则运动也叫热运动。

S：从图 2－35 来看，我认为在较短的时间内颗粒的运动还是有规则的，因为至少在 30 秒内，颗粒的运动轨迹是直线。

T：图 2－35 所画的并不是颗粒实际运动的轨迹，而是记录了颗粒每隔 30 秒所在位置的变化，若干段短直线只是这一系列位置变化的连线。如果时间间隔取得再短一些，那么每一小段直线将被另外一些不规则的折线所代替。这些折线也不是颗粒的运动轨迹，所以说颗粒在任何时间内的运动是无规则的。

分子间的相互作用力

组成物体的分子之间存在着相互作用力，把物体拉长或压缩都要用力，这表明拉长物体时，分子之间相互作用力表现为引力；压缩物体时，分子之间的相互作用力表现为斥力。

分子间的相互作用力是分子引力和斥力的合力，它是一种短程力，只有在分子间距离很近时才显现出来。例如把两块表面平整的铅块靠放在一起，它们之间不显现分子力的作用；当把它们紧密地贴在一起时，这两块铅块可以承受很大的拉力而不会分离，如图 2－37 所示。理论研究指出，分子力跟分子间的距离有关，当分子间的距离增大时，分子间的引力和斥

力都随着距离的增大而减小；当分子间的距离 $r=r_0$ 时，引力和斥力平衡，合力为零，这是平衡位置，r_0 约为 10^{-10} 米；当 $r<r_0$ 时，斥力的增大大于引力的增大，分子间相互作用力表现为斥力，并且随着 r 的减小，斥力迅速增大；当 $r>r_0$ 时，斥力的减小大于引力的减小，相互作用力表现为引力；当 $r>10r_0$ 时，可以认为分子间的相互作用力为零。

■

从以上介绍的分子运动论的基本要点可以知道，分子不停地做无规则运动，分子之间又存在相互作用力。分子力的作用使分子聚集在一起，分子的无规则运动使它们分散开来。由大量分子组成的物体在不同条件下可以固、液、气三种不同状态存在，正是由这两种相反因素决定的。对于固体来说，分子间的作用力比较强，绝大多数分子被束缚在平衡位置附近做微小的振动，所以固体有一定的形状。随着温度升高，分子的无规则运动加剧，到一定时候，分子力不能把分子束缚在固定的平衡位置附近，于是出现了流动性，表现为液体状态，但分子还不能分散远离，所以液体也具有一定的体积。当温度再升高，分子的无规则运动更加剧，到一定程度，分子分散远离，分子力的作用很微弱，分子可以到处自由运动，物体就处于气体状态，所以气体没有一定的体积。

内能

组成物体的大量分子总是在不停地作无规则运动，运动着的分子具有动能。由于分子运动是无规则的，物体内各个分子的动能并不相同，难以一一测出。因此在研究分子热现象时，人们关心的是物体内所有分子的动能的平均值，这个平均值叫做分子热运动的平均动能，简称分子的动能。

理论研究指出：任何物体在同一温度下，分子的平均动能都相同。温度升高，物体内分子的热运动加剧，分子的动能也增大；温度降低，分子的动能减小。因此从分子运动论的观点看，**温度是物体分子热运动的平均动能的标志**。分子热运动的平均动能跟物体的温度有关。

分子间由于存在相互作用而具有由分子间的相对位置决定的势能，叫做分子势能。

分子势能是随着分子之间的距离的变化而变化的。当分子力表现为引力时，分子势能随着分子间距离的增大而增大，或随着分子间距离的减小而减小；当分子力表现为斥力时，分子势能随着分子间距离的增大而减小，或随着分子间距离的减小而增大。

物体的体积发生变化时，分子间的距离要发生变化，因此分子势能也随着发生变化。可见分子势能跟物体的体积都有关。

物体内所有分子的动能和分子势能的总和，叫做物体的内能。物体都是由不停地做无规则运动并且相互作用着的分子组成的，因此任何物体都具有内能。由于分子热运动的平均动能跟温度有关，分子势能跟体积有关，所以物体的内能跟它的温度和体积都有关。

要指出的是，实际需要了解的是物体经过某一变化过程后，它的内能是增加还是减小，改变了多少。

物体内能的改变

对铁块加热，铁块吸热后温度升高，体积增大，内能增大；用锯条锯铁块时，外力克服摩擦力做功，锯条和铁块的温度也会升高，内能增大。一块冰可以通过加热，用热传递的方式使其内能增加而熔化；也可以通过摩擦做功的方式，增加它的内能，使它熔化。

在一个厚壁玻璃筒里放一小块硝化棉(或一小块浸过乙醚的棉花)，迅速压下活塞，筒内的硝化棉就会燃烧(图 2－38)。这个实验表明，外力对筒里的空气做功，机械能[①]转化为内能；空气的内能增大，温度升高，当温度升高达到硝化棉的着火点时，硝化棉就燃烧起来。

大量事例表明，物体内能的改变可以通过做功和热传递这两种不同的方式来实现。

做功使物体内能发生改变时，内能的变化可用做功的数值来量度。外界对物体做多少功，物体的内能就增加多少；物体对外界做多少功，物体的内能就减少多少。

热传递使物体内能发生变化时，内能的变化是用热量来量度的。外界对物体传递了多少热量，或者说物体吸收了多少热量，物体的内能就增加多少；物体传递给外界多少热量，或者说物体放出了多少热量，物体的内能就减少多少。所以，热量是热传递过程中物体内能改变的量度。

正因为做功和热传递在改变物体的内能上是等效的，所以功、热量和能量用同一单位量度是自然和合理的。在我国法定单位制中，热量的单位是焦耳。

要指出的是：虽然做功和热传递在改变物体内能上是等效的，但它们之间有着本质的区别。做功使物体的内能改变，是其他形式的能转化为内能，例如克服摩擦做机械功时，是机械能转化为内能；热传递使物体内能改变，是物体间内能的转移，例如把炽热的铁块投入水中，就是铁块的一部分内能转移到水里，使水的温度升高，内能增大，而能量形式没有发生变化。

思考

1．图 2－38 的实验中，将活塞迅速压下，硝化棉燃烧，活塞猛烈向上弹起，怎样从气体内能的改变来解释这一现象？

2．一个物体吸收热量，物体的内能是否一定增加？为什么？

3．一个物体对外界做了一定的功，物体的内能是否一定减少？为什么？

练习八

---

① 机械功和机械能将在第 6 章中学习。

1．关于布朗运动，下列说法中正确的是　　(　　)

(A)布朗运动就是分子运动；

(B)布朗运动也叫做热运动；

(C)布朗运动是液体分子无规则运动的反映；

(D)布朗运动是组成小颗粒的分子无规则运动的反映。

2．当物体被拉伸时，关于分子间的作用力的说法中正确的是　　(　　)

(A)引力和斥力都增大，表现为引力；

(B)引力和斥力都减小，表现为引力；

(C)引力增大，斥力减小，表现为引力；

(D)引力减小，斥力增大，表现为引力。

3．用油膜法测分子直径的实验中，将1厘米^{3}的油酸($C_{17}H_{33}COOH$)溶于酒精，制成200厘米^{3}的油酸酒精溶液，已知1厘米^{3}溶液有20滴。现取1滴溶液滴到水面上，随着酒精溶于水，油酸在水面上形成一单分子薄层。测出这一薄层的面积为0.5米^2，试估测油酸分子的直径为多大？

4．指出下面例子中各是通过什么方式来改变物体内能的？

(1)物体在阳光照射下温度升高。

(2)反复弯折一根铁丝，弯折的部位温度升高。

(3)用打气筒打气，筒壁变热。

阅读材料　等离子体

地球上的物质在不同的温度、压强条件下，能以固态、液态和气态三种聚集态存在。对于同一种物质来说，只要升高温度，最终都会变成气态，但气态是最终状态吗？如果对气态物质继续加热将会怎样呢？这时物质还会出现第四种聚集态(状态)，叫做等离子态。物质呈等离子态时称等离子体(plasma)。等离子体是由大量的自由电子和离子组成的，并且在整体上表现为近似电中性的电离气体。

怎样使物质处于等离子态呢？我们知道在一定条件下，物质的各态之间可以互相转化，不同的聚集态，对应的粒子(原子、分子和离子)排列的有序程度也不同，因此实现物质各态之间的转化，实际上是改变物质有序程度的过程。固体的有序程度最高，加热固态，供给它足够多的能量时，固体将转化成有序程度较低的液体或直接转化成气体。同样，只要向液体提供能量，液体就能不断转化为气体。如果继续对气体加热，只要使每个粒子中电子的动能增大到足以挣脱原子核的束缚时，电子便成为自由电子，原子则因失去电子而变成带正电的离子，这个过程叫做电离。当气体中有足够多的原子被电离后，这种气体已经不是原来的气体了，而转化成为新的物态——等离子态。等离子体的有序程度最差，电子可以脱离原子而完全自由运动，就像气体中分子的运动一样。

一般说来，组成等离子体的基本成份是电子、离子和中性原子。在一次电离的情况下，电子数和离子数是相等的，而在多次电离的情况下，电子数可以大于离子数，但就整体来说，等离子体在宏观上仍保持电中性。通常情况下，气体是不导电的；如果有 0.1%的气体被电离，这种气体已具有了等离子体性质，它能导电；若有 1%的气体被电离，这时等离子体便成了理想的导电体。等离子体在宏观上呈电中性，又是气体，所以气体实验定律对它也是适用的。等离子体在性质上与普通气体的重要区别在于等离子体的粒子除热运动外，还将受到电场、磁场的影响和支配。

在地球上，人们熟悉的是物质的固态、液态和气态，而对物质的等离子态比较陌生。这是因为地球表面温度较低，不具备产生等离子体的条件。但在某些特定条件下，甚至在我们的周围，就存在着等离子体。

例如夜晚商店里、大厦顶上各种霓虹灯广告发出的鲜艳光彩，就是来自氖(Ne)或氩(Ar)的等离子体，这里的等离子体不是由高温产生的，这种等离子体并没有使原子的全部电子都变成自由电子，这种等离子体是不完全的。日光灯、高压汞灯中的等离子体也属于这一类。雷电、球形闪电和氢弹爆炸时都存在着等离子体。

现在已经知道，在宇宙中约有 99.9%以上的物质处于等离子态。在恒星内部，电离由高温产生，例如太阳就是一个炽热的等离子体大火球，太阳内部温度高达 2×10^7K，在这样的高温下，组成太阳的物质几乎全处于等离子态，所有原子都失去了它的全部电子。地球大气上层被太阳辐射形成的电离层，也是由等离子体组成的。太阳色球层大爆发时，会发射出强大的等离子体云，这是由质子和电子组成的等离子体流，当它到达地球时会干扰地球电离层，中断无线电短波通信。在遥远的星云和星际物质中，电离是由恒星发出的紫外辐射引起的。可见，等离子体是宇宙中物质存在的普遍形式。

等离子体的研究对于人们了解自然、利用自然为人类造福有着广阔的前景。

本章学习要求

1．知道气体的状态和状态参量。

2．理解气体压强的测量和计算。

3．学会研究一定质量的气体在体积不变时，压强跟温度关系的实验中的有关技能。学会根据实验数据描绘出 p-t 图象。

4．理解热力学温标。知道绝对零度。

5．理解查理定律。知道 p-T 图象。

6．理解盖·吕萨克定律。知道 V-T 图象。

7．理解玻意耳定律。知道 p-V 图象。

8．学会测出在等温条件下，一定质量气体的压强和相应的体积值，

$p-\frac{1}{V}$图象，验证玻意耳定律。

9．知道分子运动论的基本要点。

10．理解布朗运动。

11．知道分子的动能和分子势能。

12．知道物体的内能。

13．理解改变物体内能的两种方式。

复习题

1．选择题(以下各题都只有一个正确答案)

(1)一定质量气体的状态参量是指 [ ]

(A)气体的质量、温度、体积和压强；

(B)气体的种类、温度、体积和压强；

(C)气体的温度、体积和压强；

(D)气体的温度和压强。

(2)图2－39中水平放置的玻璃管和几个竖直放置的U形管内都有一段水银，封闭着一定质量的气体，已知图(a)中的水银柱长度和图(b)、(c)、(d)中U形管两臂内水银柱高度差均为h，这几个管中气体压强最小的是 [ ]

■

(A)图(a)； (B)图(b)； (C)图(c)； (D)图(d)。

(3)如图2－40所示，锥形瓶的瓶口紧塞着一个橡皮塞，中间插一直角玻璃管，玻璃管的水平部分有一段液体将瓶内的空气与外界隔开。当瓶内的空气温度有微小变化时，水平玻璃管内的液体位置也将发生变化。如果把标尺上的刻度经过校正转换为温度读数，就可以制成一个能测量微小温度变化的温度计。在温度变化时，瓶内一定质量的空气经历的过程是 [ ]

(A)等体积过程； (B)等温过程；

(C)等压过程； (D)体积、温度、压强都发生变化的过程。

(4)你见过土法爆炒米花所用的设备吗？这是一个装有手把的铁制容器，生米倒入后将盖旋紧，然后一边加热一边转动容器，同时观察容器上压强计的示数变化。压强到达一定数值时，便可打开容器。就在打开容器的瞬间，米花爆成了。在加热过程中，容器中的空气 [ ]

(A)密度和压强都增大； (B)密度不变，压强增大；

(C)密度减小，压强增大； (D)密度不变，压强减小。

(5)如图2－41所示，在做托里拆利实验测定大气压强时，由于操作不慎，在管内水银柱的上方漏入少量空气，这时管内水银柱高度为h。在保

持温度不变的条件下,如果把玻璃管稍微向上提起一些(管口不离开槽内水银面)，则管内水银柱的高度变为 h′，h′与 h 的关系是　　[　　]

(A)h′＞h；　　(B)h′=h；

(C)h′＜h；　　(D)以上答案均有可能，要视漏入空气多少而定。

■

(6)如图 2－42 所示，A、B 两点分别表示一定质量的气体的两个状态，在状态 A 和状态 B 时，气体体积 V_A 和 V_B 的大小关系是　　[　　]

(A)$V_A > V_B$；　　(B)$V_A < V_B$；

(C)$V_A = V_B$；　　(D)无法比较。

(7)一定质量的气体，经历一个膨胀过程，这过程可以用 p－V 图象上的直线 ABC 来表示(图 2－43)。在 A、B、C 三个状态时气体的温度分别为 T_A、T_B 和 T_C，它们之间的关系是　　[　　]

(A)$T_A > T_B > T_C$；　　(B)$T_A = T_B = T_C$；

(C)$T_A = T_C > T_B$；　　(D)$T_A = T_C < T_B$。

(8)以下的无规则运动中属于布朗运动的是　　[　　]

(A)下雪天，雪花纷飞；

(B)一束阳光射入屋内，看到尘埃飞舞；

(C)汽车驰过，路上扬起尘土；

(D)用显微镜观察到悬浮在液体或气体中的固体微粒的运动。

(9)在下述实验事实中，表明分子之间存在相互作用力的是

(A)扩散现象；

(B)液体很难被压缩；

(C)酒精与水混合后总体积减小；

(D)布朗运动。

(10)将水倒入玻璃杯内，如果水和玻璃杯间没有发生热传递，这是因为它们具有　　[　　]

(A)相同的温度；　　(B)相同的内能；

(C)相同的热量；　　(D)相同的质量。

(11)0℃时 1 千克的冰和 1 千克的水气，它们的()

(A)分子数相同，分子平均动能相同；

(B)分子数相同，内能相同；

(C)分子数不同，分子平均动能相同；

(D)分子数不同，内能相同。

2．如图 2－44 所示，一端封闭的玻璃管内盛有水银。当管口竖直向下放置时，管内水银柱断裂成长度分别为 h_1、h_2 的两段而保持平衡。设大气压强为 p_0，水银密度为 ρ，试写出：　　[　　]

(1)管中两段水银柱间的气体压强 p_2 的表达式；

(2)管中长度为 h_1 的水银柱上方气体压强 P_2 的表达式。

3．一个坚实的金属密封容器里有一定质量的空气，当温度为 20°C时，用压强计测出容器内空气压强为 1.0×10^5 帕。现将这个容器放入某一待测炉温的炉灶中，从压强计读得容器内空气压强为 3.6×10^5 帕，求炉灶的温度。

4．潜水钟（一种沉放到水下，研究水底情况的装置，也可作为检修大桥桥墩及其他建筑设施的水下部分的潜水设备）高 2 米，开口端竖直向下沉到 10 米深的水底(图 2－45)，水进入钟内多深？(设温度保持不变，大气压强为 1.0×10^5 帕。)

■

5．如图 2－46 所示，内径均匀、一端封闭的 U 形管内，有一定质量的空气，现将这个 U 形管竖直地浸没在温度为 27°C的水中，达到平衡时，管内空气柱长度为 40 厘米，两管内水银面高度差 h 为 16 厘米。如果把烧杯中的水换成热水，平衡时，U 形管封闭端内的水银面比原来下降 2 厘米，试求热水的温度。(设大气压强为 1.0×10^5 帕)

6．如图 2-47 所示，水平放置的气缸内封有一定质量的气体，温度为 27°C，右端与大气相连通，活塞与气缸壁间的摩擦不计。将活塞向左推动，使气缸内气体体积减小一半，温度变为 177°C时，气缸内气体压强为多大？(设大气压强为 1.0×10^5 帕)

■

7．两个大小相同的容器内盛有同种气体，用一水平细管相连，管中有一段水银把两个容器中的气体隔开(图 2－48)。当左侧容器内气体温度保持在 0°C，右侧容器内气体温度保持在 20°C时，这段水银恰好停在水平细管的中央。当两容器内的气体温度同时升高 10°C时，管中的水银将向哪边移动？为什么？

直线运动

Linear Motion

1．圆环在平面上滑动(频闪照片)

2．棒球从斜面上滚下(频闪照片)

3．加速起飞的飞机

自然界是物质组成的，并处在不停的运动中。自然界物质运动形式是多种多样的，各种运动都有其不同的规律，其中最简单的运动形式是物体相对于参照物的位置变化，这种运动叫做机械运动。现代交通运输的调度与管理、工厂自动化生产线的控制与调整、航天飞机的发射、空间站的对接等都必须应用机械运动的规律,经过电脑系统精确计算后才能实现。1990年4月7日，我国四川省的西昌卫星发射场，成功地利用长征3号火箭发射了亚洲一号通信卫星。只有掌握了火箭的运动规律，精确计算出各级火箭的点火时间，才能使火箭在预定的时刻到达预定的位置，火箭实际的飞行轨道和预定的设计轨道才能很好吻合。因此，学习掌握机械运动的规律是发展现代科学技术的需要，也是工农业生产以及日常生活的需要。

人们常见的机械运动，不论是沿着直线还是曲线，不论是快还是慢，也不论快慢是否变化，都必定涉及物体在某段时间里的位置变化。所以，时间和位置变化的量度，就成为研究一切机械运动时首先要遇到的问题。

一、时间和时刻

说明某一事件时常常要用到时间和时刻这两个概念，譬如上午8时开始上第一节课，到8时45分下课，这里“8时”和“8时45分”指的是上课和下课的时刻，这两个时刻之间相隔的45分，就是上第一节课所经历的时间。研究机械运动，也要知道被研究的对象在某一时刻所在的位置，经过一段时间以后，它会到达什么位置。所以，在描述某一运动的发生、变化直到终止的过程里，也要用到时间和时刻这两个概念。例如某次航班的民航客机,于12时25分从上海虹桥国际机场起飞,经过1时50分的飞行，于14时15分抵达北京国际机场。12时25分和14时15分分别是飞机开始飞行和终止飞行的时刻,这两个时刻的间隔1时50分就是飞机飞行所经历的时间。

用时间轴(t轴)可以表示不同的时刻和经过的时间。时间轴上开始计时的时刻可以任意确定，这对描述某个过程经历的时间是无关的。图3－1是将前面所说的飞机起飞时刻 t_1 和终止飞行的时刻 t_2 标在同一时间轴上，可以看出 t_1=12时25分，t_2=14时15分，其间相隔的时间 t=1时50分是飞机的飞行时间。

■

时间的测量

我国法定计量单位规定时间的单位是秒、分、时、天。实验室中常用停表(秒表)、停钟来测量不太长的时间，机械秒表可以精确到 0.1 秒，用数字显示的电子秒表可以精确到 0.01 秒。要比较精确地研究物体的运动情况，就需要测量很短的时间间隔，实验室中常用打点计时器和频闪照相来计时。

打点计时器

你可曾注意到这类现象吗？装运冰块的卡车由于冰的熔化，在行驶过程中不断有水滴落到路面上(图 3－2)。如果卡车行驶得快，路面上每两个水迹间的距离就比较大；卡车行驶得慢，水迹间的距离就比较小。如果知道卡车每秒钟滴下的水滴数，就可以把这辆滴水的卡车当作一种计时装置。

■

打点计时器是利用电磁作用，使振动片以一定频率振动的计时装置，它的构造如图 3－3 所示。

用导线把打点计时器上的接线柱接通低压交流电源后，在通电线圈和永磁铁的共同作用下，磁铁间的铁片就振动起来，因为交流电频率是 50 赫，所以铁片每秒振动 50 次。这样，固定在铁片一端的小针也以相同频率上下振动。在一辆实验小车后面固定一条纸带，将纸带穿过打点计时器的限位框，并衬在圆形复写纸的下面。当小车拉着纸带运动时，小针将在纸带上打下一系列的点子，这些点记录了运动过程中小车在各不同时刻的位置。数出纸带上记录的点子数，就可以知道小车移动一段距离所用的时间，该段距离相当于从纸带上第一点到最后一点这段纸带的长度，这就是打点计时器的计时作用。

研究纸带上点子的分布情况，还可以知道在这段时间里小车的运动情况。图 3－4 所示的一段纸带记录了一辆实验小车在某段时间内的运动情况。纸带上每打两个点经历的时间都等于 1/50 秒=0.02 秒。从纸带的移动方向可以看出，每相邻两个点间的距离逐渐变大，这表明小车运动得越来越快，是做变速运动。用刻度尺量出纸带上第一点和最后一点之间的距离，再数出该两点间总共有多少个时间间隔，就可以计算出小车在这段时间里运动的平均速度。

■

频闪照相

除了用打点计时器外，还可以用频闪照相的方法来记录较短的时间，并通过分析频闪照片来研究这段短时间内物体的运动情况。图 3－5(a)所示是一种采用频闪光源照相的方法，使运动物体的像先后多次成在同一张照相底片的不同位置上。譬如当一个小球从斜面滚下的过程中，固定着的照相机的快门始终是开启的(使用 T 门)，由于整个背景是黑的，只有当频

闪灯发光照亮运动小球的瞬间，底片上才会留下这一时刻小球经过某一位置时的像。这样，在同一张底片上的多次曝光，摄得的照片就系列地显示出运动小球每隔相等时间的位置，如图 3－5

■

(b)所示。照片上小球的每两个位置间的时间间隔等于光源频闪频率的倒数。如果频闪灯 1 秒内闪光 30 次，则照片上小球的每两个位置间的时间间隔就等于 1/30 秒。本章导图 1 和 2 是两幅频闪照片，分别记录圆环在平面上滑动和棒球从斜面上滚下的运动。可以看出，圆环运动的快慢是不变的；棒球运动的快慢是变化的。在刚滚下时，棒球运动得慢，到达斜面底端时，运动得快。

思考

1．人们在考虑预订哪一车次的火车票时，关心的是时刻还是时间？还是都得关心？2．我国著名田径运动员王军霞在 1993 年所创造的女子万米世界纪录是 29 分 31.78 秒，这个数据是时间还是时刻？

3．人们问：“现在几点了？”又问：“下半场足球还剩下几分钟？”这里分别问的是时刻还是时间？

二、路程和位移

人们常见的机械运动是形式多样的，有的简单、有的复杂。但是概括起来只有平动和转动两种最基本的形式。自动扶梯的上、下楼层；抽屉在桌子中被推进拉出以及内燃机气缸里活塞的运动都是平动；而电风扇叶片、钟表里齿轮以及砂轮、电锯片等工作时的运动都是转动。在很多情况下，物体是同时平动和转动的，例如螺栓在螺母中拧入、拧出的运动，汽车行驶时车轮的运动等等。很明显，平动是机械运动中最简单的一种运动形式，也是我们首先要研究的运动形式。

质点

物体在运动中，各部分的运动情况并不一定完全相同，但在某些条件下，我们可以把整个物体看作是一个有质量的点，这种用来代替物体的、有质量的点叫做质点。物体作平动时，物体各部分的运动是相同的，所以研究物体平动的性质和规律时，就可以把它当作一个质点。如我们研究列车从甲站到乙站的运动时，如果我们从整个列车的平动来看，各节车厢的运动情况是一样的，因而可以把整个列车看作质点来考察，而不必去考虑各节车厢、各个部分的情况。这样，就可以把研究列车的运动简化成研究质点的运动。

质点是由实际物体抽象出来的物理模型。把研究对象看做质点，是一

种考虑主要因素忽略次要因素的科学方法。但能否把物体看成质点是跟研究问题的性质、目的有关。譬如研究人造卫星绕地球运动时，可以把卫星看成质点；但在研究卫星本身的自转等运动时，就不能把卫星看成质点。建立了质点的模型，就可以简化所研究的问题。这一章和以后几章的学习中，我们就只研究质点的运动。

路程和位移

世界各国的登山运动员在攀登珠穆朗玛峰的征途中，可以从尼泊尔王国境内的南坡攀登，也可从我国境内沿北坡攀登。从山麓下同一个大本营到达海拔高度 8848 米的顶峰的直线距离是一定的,但每一批登山运动员即使从同一个大本营出发，到达顶峰所经过的实际路径却可以大不相同(图 3－6)。从上海到北京，可以选择不同的交通路线，可以坐火车、汽车，也可以先乘坐轮船再换坐火车，或者直接乘坐飞机，这些公路、铁路及海上、空中航线的长度都不相等，但上海离开北京的距离却是个定值。

■

用曲线连接质点在运动中每一时刻的位置,就是它的运动轨迹(课本彩图 7)，为了区别运动轨迹的长度和发生的位置变化，把质点运动所经过的轨迹长度叫做路程(path)；把质点的位置变化叫做位移(displacement)。图 3－7 中曲线 1、2 表示两批登山运动员从大本营出发到达顶峰所经过的不同路程；而带有箭号的直线 3 则表示登山运动员的位移。他们所走的路程可以不相等，但位移是相同的。

标量和矢量

路程是一个只有大小没有方向的物理量。物理学中还有许多物理量，如质量、密度、温度、功等都是只有大小没有方向的量，这类物理量叫做标量。

位移是一个既有大小又有方向的物理量。因为位移除了表明质点位置改变的程度外，还表明它位置改变的先后顺序或指向。位移的方向规定为从起始位置指向终止位置。例如图 3－7 中登山运动员的位移 s 应是从大本营指向顶峰的一段有向线段。又如从上海站发出的列车，经过 1460 千米路程的正常运行抵达北京站，在这一运动中列车的位移小于 1460 千米，应等于从上海到北京的直线距离，位移方向应由上海指向北京。图 3－8 中的有向线段 s 表示列车从上海到北京这一运动的位移。

■

物体沿着直线运动，若运动方向不变，路程和位移的大小是相等的。

物理学中还有许多物理量，如力、速度等都是既有大小又有方向的量，这类物理量叫做矢量。

思考

1．从全国交通图上可以看出，从上海到大连有铁路、公路、海上航线和空中航线等多种交通路线，哪条路线最接近上海到大连的位移？

2．作为市内交通工具的出租车“Taxi”，又叫做计程车，驾驶员是按位移还是按路程的多少来收费的？

3．杂技演员骑着马沿圆形表演场的边缘奔跑，如果以表演场的入口处作为出发点，那么马匹在奔跑一圈的过程中，位移的最大值和最小值分别等于多少？

练习九

1．火车站服务处都有《旅客列车时刻表》出售，它为什么不叫做《时间表》？学校每学期都向学生公布《作息时间表》，它是不是也可以叫做《作息时刻表》？

2．一辆卡车的发动机水套有漏水现象，每分钟约漏出 120 滴水，卡车驶过后，观察留在路上的水迹，在 140 个水迹的距离内，卡车要行驶多长时间？

3．北京工人体育场的田径场跑道周长是 400 米，在进行 100 米短跑比赛时是选用跑道的直道部分，运动员跑完全程的路程是多大？位移是多大？某运动员沿跑道的里圈跑两周，他跑的路程是多大？位移是多大？

4．某学生从操场的最南端向北走了 40 米，然后再向东走 30 米，他发生的位移是多大？方向如何？试按同一比例在方位坐标上(图 3－9)把这一位移表示出来。

■

三、运动快慢的描述

匀速直线运动变速直线运动

机械运动按运动轨迹来划分，有曲线运动和直线运动两大类。在直线运动中，运动的快慢，有的是不均匀的，有的是均匀的。例如城市道路上行驶的车辆，它的快慢通常是不均匀的。当车辆驶上平直的高速公路时，在一段距离内，车辆运动的快慢可以是均匀的。也就是说，在相等的时间里，车辆的位移都相等。

在相等的时间里，物体的位移都相等的直线运动，叫做匀速直线运动。匀速直线运动是一种最简单的机械运动。在相等的时间里，物体的位移不相等的直线运动则是**变速直线运动**。

速度

物体不论做匀速直线运动，还是做变速直线运动，不同物体运动的快慢程度往往是不同的。研究物体运动的快慢对交通运输，工农业生产和人们的日常生活都是很必要的。例如工厂流水线的传送带要按一定的快慢运行，才能保证各段工序的完成；铁路运输中控制列车运行的快慢，对在规

定的时间能否走完预定的路程，具有十分重要的意义，列车的调度必须考虑列车运行的快慢，以保证行驶安全，提高铁路的运输效能。

日常生活中，我们说骑自行车比走路快，汽车比自行车快，飞机比汽车更快，根据是什么？比较物体运动快慢的根据是物体移动相同距离所用时间的多少，所用时间越少就越快；或者是物体在相等时间内所移动距离的长短，移动距离越长就越快。但是物体的运动并不都是在相同时间内或相等距离里进行的，所以必须建立速度(velocity)的概念。

速度等于物体的位移跟发生这段位移所用时间的比。

如果位移用 s 表示，时间用 t 表示，速度用 v 表示，就可以写成以下公式：

$$v = \frac{s}{t}$$

这一定义对于匀速直线运动和变速直线运动同样是适用的。所不同的是，在变速直线运动中由这一公式算出的是物体在某段位移中或某段时间里的平均速度。

速度是矢量

物体所作的机械运动有不同的方向。在研究和描述物体的运动时，只知道它的快慢是不够的，还必须了解运动的方向。天文学家能够准确预言 1994 年 7 月将发生苏梅克—列维 9 号彗星的碎片跟木星相撞的事件，是对彗星运行轨道和彗星运动的快慢和方向都作了周密观测和精确计算的结果。通常我们所说的物体运动的方向，就是指速度的方向。速度不但有大小，还有方向，因此速度是矢量。

为了描述和计算的方便，通常规定速度的正方向跟位移的正方向相同。以民航班机的运动为例，如果以上海为始发站，北京为终点站，位移矢量是由上海指向北京，所以从上海飞往北京的班机速度取正方向，从北京飞回上海的班机速度取负方向；又如对于向上抛出的小球的运动来说，常以向上的位移为正方向，所以上升过程中小球的速度取正方向，小球回落时的速度取负方向。

今后，在讨论分析物体的运动时，如果说已知某物体的运动速度，就是指它的速度大小和方向都是确定的。速度的大小通常又叫做速率(speed)，速率是标量。

匀速直线运动是速度大小和方向都不变的运动。

思考

1．你对速度的概念比初中有哪些进一步的理解？

2．机床操作中的“高速切削”、交通运输中的“高速列车”、“高速公路”，这里所说的“高速”指的是速度还是速率？

瞬时速度

足球运动员劲射时，可使足球的速度超过 100 千米/时(图 3－10)，这个数字说明了什么？事实上足球不可能在 1 小时内飞出 100 千米远的距

离，这仅表示足球在离开运动员脚的瞬间的运动快慢。

运动物体在某一时刻的速度，或经过某一位置时的速度，叫做瞬时速度。瞬时速度是矢量。建立了瞬时速度的概念，就能确切地描述做变速运动的物体在任一时刻或经过任一位置时的运动快慢和运动方向。

■

通常，人们往往把物体在包括某一时刻在内的极短时间里的平均速度，看成是物体在这一时刻的瞬时速度。时间取得越短，求出的平均速度就越接近于这一时刻的瞬时速度。

汽车驾驶台上的速度计是用来指示汽车行驶时瞬时速度大小的一种仪表(图 3－11)。汽车在交叉路口等候绿灯信号时的瞬时速度等于零。当绿灯亮起，驾驶员立即发动汽车，经过 2 秒钟速度达到 14.4 千米/时。这是指汽车运动了 2 秒钟，在 2 秒末这一时刻的瞬时速度的大小是 14.4 千米/时(合 4 米/秒)，但并不表示在过去的 2 秒内汽车已经行驶了 8 米，也不表示在以后的 1 秒钟内汽车的位移一定等于 4 米。

思考

1．手枪子弹从枪口飞出时速度可以达到 500 米/秒，这是指的什么速度？

2．运动员竖直向上托起一个排球，排球上升时速度逐渐减小，排球回落时速度逐渐增大，这都是指什么速度？在整个过程中，这个排球的速度有没有等于零的时刻？

3．对一个做匀速直线运动的物体来说，它的速度跟它在某段时间里的平均速度以及任一时刻的瞬时速度有怎样的关系？

练习十

1.杭州在上海西南约 201 千米处,直达列车于 23 时 15 分自上海开出，于次日 2 时 45 分抵达杭州，假定火车做直线运动，它的平均速度是多大？

2．两根路灯杆 A、B 相距 40 米，一辆汽车用 3.2 秒时间驶过这两根路灯杆(图 3－12)，根据这些数据可以计算出汽车在这段位移中的____速度=____米/秒。

如果灯杆 A 的近旁相距 0.14 米处有一块路牌，汽车驶过路牌和灯杆 A 间的这一小段距离只用了0.01秒，在这段时间里的平均速度$\bar{v}$ = 米 / 秒。可以认为汽车驶过灯杆时的____速度=米/秒。

3．用飞机进行航空测量，飞机离地高度保持 500 米，巡航速率为 540 千米/时，飞机上的测量仪器可在 120°的视角范围内测量(图 3－13)，飞机每小时测量的覆盖面积是多大？

■

匀速直线运动的速度图象

用打点计时器记录某个物体的运动时，如果纸带上每两个点间的距离是相等的，表明物体是做匀速直线运动。如果以每打 5 个点的时间为一个时间单位，即 t=5×0.02 秒=0.1 秒，然后在纸带上从某个点开始每隔 5 个点进行编号，记作 0，1，2，3，……(图 3－14)，把纸带从 0，1，2，3，

各点处剪开，并将各段纸带的起点沿一条作为基准的直线依次并排贴在一起(图 3－15)。可以看出 1，2，3，　　各点的连线是一条与基准线平行的直线。这表明物体在每个 0.1 秒时间内的位移是相等的，如果测得这段位移 s=2 厘米，那么这个做匀速直线运动的物体的速度

$v = \frac{t}{s} = \frac{s}{t} = \frac{2 \times 10^{-2}}{0.1}$ 秒 $= 0.2$ 米 / 秒。

■

如果以速度为纵轴、时间为横轴建立一个直角坐标，把这一匀速直线运动的速度跟时间的关系用速度-时间图象(v-t 图象，简称速度图象)来表示，它应是一条平行于时间轴的直线，这表明匀速直线运动的速度不随时间变化(图 3－16)。如果把两个速度不相等的匀速直线运动速度的图象，按同一标度描绘在一个直角坐标系中，就可形象地比较这两个匀速直线运动速度的大小(图 3－17)。

■

匀速直线运动的位移图象

从匀速直线运动的速度公式$v = \frac{s}{t}$，可以得到$s = vt$，这就是匀速直线运动的位移公式。式中速度 v 是常量，所以匀速直线运动的位移 s 跟时间 t 成正比，位移是时间的一次函数。这一函数关系用图象来表示，就是匀速直线运动的位移-时间图象(s－t 图象，简称位移图象)。

根据上述纸带记录的运动,可列出时间 t 与它对应的位移 s 的数据表：

t(s)	0	01.	0.2	0.3	0.4	0.5
s(1×10^{-2}m)	0	2.0	4.0	6.0	8.0	1.0

从实验数据，用描点法可以画出这一匀速直线运动的位移图象(图 3－18)。由图象可以看出这是一条通过坐标轴原点的倾斜直线，表明了每隔相等时间△t 位移的增加量△s 是相等的。这正反映了匀速直线运动的位移 s 随时间 t 发生均匀变化的特点(图 3－19)。

如果把两个速度不相等的匀速直线运动的位移图象，按同一标度画在同一个直角坐标系中，可以看出这两条倾斜直线的斜率是不等的，表明这两个运动在相等时间里的位移是不相等的，即$\frac{s_2}{t} > \frac{s_1}{t}$，也就是$v_2 > v_1$。

所以匀速直线运动的位移图线的斜率$\frac{\triangle s}{\triangle t}$可以表示速度的大小，位移图线的

斜率越大，表示速度越大(图 3－20)。

■

匀速直线运动的位移大小还可以在匀速直线运动的速度图象上反映出来。图 3－21 中，v－t 图线与时间轴之间有一个矩形，这一矩形的一条边在数值上等于速度 v 的大小，另一条边在数值上等于时间 t，这一矩形的面积等于矩形两条边的乘积 v×t，所以，一个匀速直线运动在时间 t 内位移的大小，可以用它的速度图线与时间轴之间包围的面积来表示。

图象的意义

物理规律常用文字叙述，物理规律所揭示的物理量间的定量关系常用数学公式表达，这就使规律变得简单明了，便于进一步探讨各个变量间的关系；而用函数图象来表达规律所反映的变量关系时，则更能使这种关系得到形象直观的显示。因此，文字叙述、数学公式、函数图象是表述物理规律的几种基本手段，综合起来运用，人们便能更全面、确切、清晰地理解规律。

四、匀变速直线运动加速度

常见的直线运动中，有许多是变速运动。例如，列车从某个站驶出，列车的瞬时速度逐渐变大，做加速运动；列车行驶一段路程后准备停靠另一个站时，列车的速度就得逐渐变小，做减速运动。又如飞机起飞过程(本章导图 3)也是变速运动。原先飞机停在起飞跑道上，速度等于零，接到起飞命令后，驾驶员立即起动飞机，由于跑道的长度是有限的，而飞机脱离跑道升空时又必须达到某个规定的较大速度，这就要求驾驶员在不太长的距离内，使飞机的速度很快增大。因此，在变速运动中还存在着速度变化快慢的问题，对于列车从车站驶出的运动来说，速度变化是比较慢的，而飞机起飞时，速度变化则要求很快。有些变速运动速度变化的快慢也是随时改变的。在各种变速运动中，速度变化最简单的是匀变速直线运动。

匀变速直线运动

喷水滑梯(图 3－22)是一项新型健身活动，由于滑梯表面有一层自上而下流动着的水，人们从滑梯滑下时，摩擦阻力很小，下滑速度越来越大，是一种变速直线运动。现在我们通过实验来研究这种变速直线运动。

■

把一辆实验小车放在斜面顶端，由静止释放，让小车沿斜面向下运动，利用打点计时器记录小车的运动情况(图 3－23)。小车到达斜面底端后，取下纸带，然后对纸带上记录的点子进行处理，以纸带开始运动的点为起点，记作 0，以后每隔 5 个点作为一个记数点，按顺序编为 1，2，3，4，

5(图 3－24 所示是某次实验中所得的纸带)。然后把纸带从 0，1，2，3 各记数点处剪开，并将各段纸带的下端沿一条基准线依次排列贴在一起(图 3－25)。可以看出小车在连续相等时间里的位移逐渐增大。

■

用刻度尺量得各段纸带的长度为 s，根据各段时间间隔 t(0.1 秒)，就能

算出小车在各段连续相等时间里的平均速度$\bar{v}$。实验数据和计算结果如表一所示。

表一

各相等时间内纸带和长度 s	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5
(× 10^{-2}m)	0.75	2.10	3.45	4.85	6.25
时间间隔 t 为 0.1 秒内的平均速度 $\bar{v}$（× 10^{-2}m/s）	7.5	21.0	34.5	48.5	62.5

从上表可以进一步看出小车在连续相等时间里的位移差基本上是相等的，平均约为 1.35 厘米。在各段连续相等时间里的平均速度是逐渐增大的，它们的差也是基本相等的。

现在我们进一步分析记数点 4—5 的这段纸带的数据，量出这段纸带中每两点之间的距离，根据时间间隔为 0.02 秒，计算在这五段连续相等的时间里的平均速度。测量和计算结果如表二所示。

表二

每两点之间的距离 s（× 10^{-2}m）	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35
时间间隔 t 为 0.02 秒的平均速度 $\bar{v}$（× 10^{-2}m/s）	57.5	60.0	62.5	65.0	67.5

计算结果表明，在这五段连续相等时间里的平均速度也是逐渐增大的，并且每个 0.02 秒内的平均速度的增加量相等，而第 1 个和第 2 个 0.02 秒内的平均速度都小于记数点 4—5 的这段时间里的平均速度，第 4 个和第 5 个 0.02 秒内的平均速度又都大于记数点 4—5 的这段时间里的平均速度。这就给我们一个重要的启示：时间间隔取得越小，计算出的平均速度就越能反映做变速直线运动物体的实际运动速度。

如果取一直角坐标，以横轴表示时间，纵轴表示速度，将表一中的时间和相应的平均速度描绘出来，就得到如图 3－26 所示的 v－t 图象。将表二中的时间和相应的平均速度描绘出来，就得到如图 3－27 所示的图象。

■

■

同样，依次将前面各单位时间内记录位移的各段纸带也作如上的处理，并将图 3－26 和图 3－27 加以比较，可以想象只要这些相等的时间间隔取得足够小，计算得出的一系列平均速度，就能看成是小车在各个时刻

的瞬时速度，就可以用来绘出小车运动的速度图象，如图 3－28 所示。可以看出这是一条通过坐标轴原点的倾斜直线。这表明由静止开始运动的小车的瞬时速度 v 跟时间 t 成正比。也就是说每隔相等时间△t，瞬时速度的增加量△v 是相等的。这表明了小车的瞬时速度随时间均匀变化的特点。

在相等时间内，速度变化量相等的直线运动，叫做匀变速直线运动。

■

因此，不论物体是否从静止开始运动，也不论物体是加速还是减速，只要符合上述规律，物体就是做匀变速直线运动。实际生活中常见的许多变速直线运动并不完全符合上述规律，它们中有的是很接近匀变速直线运动。列车从车站开出、飞机在起飞跑道上开始滑行、人们从喷水滑梯上滑下的运动等等，都可以把它们看成是匀变速直线运动。

加速度

小轿车起动后，驾驶员踩下油门踏板(图 3－29)，轿车速度就会很快增大起来，而一辆公共汽车起动后，速度虽然也会增大起来，但是要用较长的时间。一颗子弹在枪膛里未被击发时速度等于零，一经击发，可以在极短时间内以数百米每秒的速度飞离枪口，而一架超音速喷气客机从开始起飞到达与子弹同样大小的速度，就要经过比较长的时间。上述事例表明在不同的变速直线运动中，速度变化的快慢是不同的。要比较物体运动速度变化的快慢程度，就需要比较在相同的时间内，物体速度变化的大小。

在匀变速直线运动中，物体的速度变化跟发生这一速度变化所用时间的比，叫做匀变速直线运动的加速度。

建立了加速度(acceleration)概念，就可以用加速度来描述物体速度变化的快慢，譬如上例中的小轿车的加速度比公共汽车的加速度大；子弹在枪筒里运动的加速度远大于超音速客机在起飞过程中的加速度。

如果用 v_0 表示开始时刻物体运动的速度(初速度)，用 v_1 表示经过一段时间 t 后物体运动的速度(末速度)，则在时间 t 内物体的速度变化为 v_1-v_0，于是加速度 a 可用如下的定义式表示：

$$a=\frac{v_t-v_0}{t}$$

加速度单位是由速度单位和时间单位来确定的。速度单位是米/秒，时间单位是秒，则加速度的单位是米/秒^2，读做“米每二次方秒”，符号是 m/s^2。加速度不但有大小，而且有方向，加速度是矢量。

问题探讨

S：速度和加速度都是描述物体运动状态的量，它们有什么区别呢？T：速度和加速度是两个完全不同的概念。速度是描述物体运动快慢的物理量；加速度是描述物体速度变化快慢的物理量。

在不同的匀速直线运动中，速度可以有不同的数值，但加速度都等于零。在匀变速直线运动中，加速度是不变的，而速度是时刻变化着的。

[例题 1]

列车从车站由静止开始行驶，经 1 分钟速度达到 12 米/秒，若把列车的运动看成是匀变速直线运动，列车的加速度是多大？

解　已知列车的初速度 v_0=0，末速度 v_1=12 米/秒，经过时间 t=1 分=60 秒。

列车加速度$a = \frac{v_t - v_0}{t} = \frac{12-0}{60}$米/秒^2 = 0.2米/秒^2。

[例题 2]

以 30 米/秒的速度行驶的列车，司机发现前方路段给出低速行驶的信号，于是采取制动措施，在 10 秒钟内使列车的速度减小到 10 米/秒，若把制动过程中列车的运动看成是匀变速直线运动，试求列车运动的加速度。

解　已知列车的初速度 v_0=30 米/秒，末速度 v_t=10 米/秒，经过时间 t=10 秒。

列车加速度　$a = \frac{v_1 - v_0}{t} = \frac{10-30}{10}$米/秒^2 = −2米/秒^2

由以上两个例题可以知道匀变速直线运动有两种情况，一种是速度逐渐增大的匀加速直线运动，末速度大于初速度，v_t-v_0＞0，速度的变化量是正值，匀加速直线运动中的加速度是正值，表示加速度方向与物体运动的方向相同。另一种是速度逐渐减小的匀减速直线运动，末速度小于初速度，v_t-v_0＜0，速度的变化量是负值，匀减速直线运动中的加速度是负值，表示加速度方向与物体运动的方向相反。

做匀变速直线运动的物体，不论它的速度随着时间均匀增大，还是均匀减小，它的加速度的大小和方向都不随时间变化。

思考

1．发射“亚洲一号”卫星的“长征 3 号”(CZ－3)运载火箭，刚开始点火升空时的加速度可达 14 米/秒^2，所以火箭开始升空时的速度就很大，这一说法对吗？为什么？

2．新设计的高速列车的最高时速可达 354 千米/时，它的加速度一定很大，这一说法对吗？为什么？

问题探讨

S：做匀变速直线运动的物体，加速度大，速度一定大吗？

T：做匀变速直线运动的物体，加速度是不变的，而速度 v_t 的大小，除决定于加速度 a 外，还决定于时间变量 t 以及物体是否具有初速度 v_0；而且，匀变速直线运动还包括匀加速和匀减速两种情况。所以，加速度大，说明这时速度变化快，并不说明物体速度一定很大；加速度小，说明这时速度变化慢，也并不说明物体速度一定很小，要根据运动的具体情况才能确定速度的大小。

练习十一

1．用加速度概念可以描述 [ ]

(A)物体运动的快慢； (B)物体增加的速度；

(C)物体速度变化的大小； (D)物体速度变化的快慢。

2．关于加速度概念的理解与应用，以下说法中正确的是 [ ]

(A)加速度越大，物体的运动速度也越大；

(B)加速度很小，物体的运动速度不可能大；

(C)加速度等于零的运动是匀速直线运动；

(D)存在加速度的运动，速度总是增大的。

3．跳伞运动员在 1200 米高空从悬停在空中的直升飞机上跳下，在延迟开伞的 2 秒末，速度达到 19.6 米/秒。试求在这 2 秒内运动员下落运动中的加速度(运动员离开机舱的初速度看作零)。 [ ]

4．原来以 90 千米/时的速度行驶的列车，紧急制动后经 1 分钟列车完全停止运动，试求列车在制动过程中的加速度。

五、匀变速直线运动的速度和位移

匀变速直线运动的速度

从车站开出的列车在一段时间内的运动可以看成是匀变速直线运动，如果知道在 5 秒钟里列车速度由 2 米/秒增大到 3 米/秒，在这 5 秒钟内速度的增加情况如下表所列：

t(s)	0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
v^1(m/s)	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0

根据这些数据可以描绘出在这 5 秒内列车运动的速度图象，如图 3－30 所示。可以看出它是一条不通过坐标轴原点的倾斜直线，表明了匀变速直线运动的瞬时速度是时间的一次函数。从图象可以求出列车运动时任何时刻的速度。

■

我们也可以根据匀变速直线运动的加速度定义式$a=\frac{v_1-v_0}{t}$，推导得出做匀变速直线运动的物体在 t 秒末的瞬时速度公式

$$v_1=v_0+at$$

公式中加速度 a 和初速度 v_0 都是不变的量，表明 t 秒末的瞬时速度 v_t 是时间 t 的一次函数。

从速度公式还可以看出，做匀变速直线运动的物体在 t 秒末的速度等

于初速度 v_0 与 at 两部分的和，因为 v_0 是不变的，所以引起速度变化的是含有时间变量 t 的 at 部分，也就是说速度的变化 $\triangle v=v_t-v_0=at$，这在速度图线上也能明显地看出(图 3－31)。从图线还能看出，图线在 v 轴上的截距就等于初速度 v_0，而图线的斜率 $\frac{\triangle v}{\triangle t}$ 就表示加速度。

[例题]

原以 5 米/秒的速度匀速行驶的汽车，以 2 米/秒^2 的加速度加速行驶 5 秒钟，则速度变为多大？速度变化多大？

解　根据匀变速直线运动的速度公式，汽车加速行驶 5 秒末的瞬时速度

$$v_t=v_0+at=5\text{ 米/秒}+2\times5\text{ 米/秒}=15\text{ 米/秒。}$$

速度变化　　$\triangle v=v_t-v_0=at=2\times5\text{ 米/秒}=10\text{ 米/秒。}$

思考

1.怎样用公式表示初速度等于零的匀变速直线运动的瞬时速度随时间而变化的规律？

2．以某一速度行驶的列车准备靠站，速度逐渐均匀变小直到停止运动，在这段时间里的速度-时间图象应是怎样的？

3．若把两个初速度等于零、加速度不等的匀变速直线运动的速度-时间图线，按同一标度画在同一个直角坐标系中，其中加速度较大的一条 v-t 图线比较靠近 v 轴，还是比较靠近 t 轴？

练习十二

1．长征 2 号火箭点火后开始升空，3 秒末的速度达到 38 米/秒，试求火箭 3 秒内的加速度。

2．以 10 米/秒行驶的汽车，制动时的加速度是-4 米/秒^2，需要经过几秒钟汽车才能停下？

3.速度是 72 千米/时的列车，以 0.4 米/秒^2 的加速度加速行驶了 12.5 秒，这时的速度将达到多少千米/时？

4．滑雪运动员以某一速度滑下雪坡，已知下滑时的加速度为 2 米/秒^2，下滑 6 秒钟到达坡底时的速度达到 15 米/秒，试求这位运动员在开始下滑时的初速度。

5．你能区别以下几个速度图象(图 3－32)所描述的分别是什么运动吗？

■

匀变速直线运动的位移

匀速直线运动的速度图线与时间轴间包围的面积，在数值上等于物体的位移。这个结论同样适用于匀变速直线运动。

图 3－33 所示的是某个匀变速直线运动的速度图象，在图线以下用阴影表示的一块梯形面积，在数值上应等于做匀变速直线运动的物体在 t 秒内的位移，即

$$s=\frac{1}{2}(v_0+v_1)t=\frac{1}{2}(v_0+v_0+at)t$$

$$=v_0t+\frac{1}{2}at^2。$$

■

于是得出做匀变速直线运动的物体，在 t 秒内的位移公式

$$s=v_0t+\frac{1}{2}at^2。$$

公式表明做匀变速直线运动的物体的位移是时间的二次函数。

[例题 1]

原来以 10 米/秒的速度行驶的列车，经 25 秒钟速度均匀增大到 20 米/秒。求在这段时间里列车的位移。

解　根据题意可先求出列车运动的加速度

$$a=\frac{v_t-v_0}{t}=\frac{20-10}{25}\text{米}/\text{秒}^2=0.4\text{米}/\text{秒}^2。$$

于是列车在这段时间里的位移

$$s=v_0t+\frac{1}{2}at^2=10\times25\text{米}+\frac{1}{2}\times0.4\times(25)^2\text{米}=375\text{米}。$$

[例题 2]

以 5 米/秒的速度行驶的自行车，驶至交叉路口离停车线约 3～4 米远处忽见红灯信号，骑车人赶紧刹车制动，经 2 秒钟车才停下。如果自行车刹车后的运动可看成匀减速直线运动，这个骑车人是否会超越停车线？

解　自行车的加速度

$$a=\frac{v_t-v_0}{t}=\frac{(0-5\text{米})/\text{秒}}{2\text{秒}}=-2.5\text{米}/\text{秒}^2。$$

在这段时间里自行车继续向前运动的距离为

$$s=v_0t+\frac{1}{2}at^2=5\times2\text{米}+\frac{1}{2}\times(-2.5)\times(2)^2\text{米}=10\text{米}-5\text{米}=5\text{米}$$

可见这位骑车人虽已刹车，但车停下时已经超越了停车线，这是违反交通规则的。所以任何车辆在驶近交叉路口时，必须控制车速不要太大，不然是不安全的。

我们已经知道做变速直线运动的物体在时间 t 里的位移 s 可以用平均速度$\bar{v}$计算，即$s=\bar{v}t$，而$s=\frac{1}{2}(v_0+v_t)t$，

于是，　$\bar{v}t=\frac{1}{2}(v_0+v_1)$

$$\bar{v}=\frac{v_0+v_t}{2}。$$

可见，匀变速直线运动中的平均速度等于初速度和末速度之和的一半。

思考

1．能否利用平均速度的概念来求解例题 1？试试看。

2.初速度等于零的匀变速直线运动的位移公式应是怎样的？你能把它写出来吗？

练习十三

1．民航客机沿起飞跑道开始滑行，以 4 米/秒^{2}的加速度滑行 40 秒后脱离跑道升空，试求客机在跑道上滑行的距离。

2．以 25 米/秒的速度行驶的列车，紧急制动后，经 10 秒钟停下。试求在制动过程中列车的位移。

3．在平直道路上行驶的速度为 20 米/秒的汽车，以-5 米/秒^{2}的加速度制动，试求 5 秒内汽车的位移。

■

4.根据初速度等于零的匀变速直线运动的位移 s 跟时间 t 的平方成正比，试证明在各连续相等的时间里的位移(图 3－34)的比 s_{I}：s_{II}：s_{III}：……=1：3：5：……。

5．地铁列车从车站开出做匀加速直线运动，2 秒内的位移是 2.4 米，求 6 秒内的位移。

匀变速直线运动的速度和位移的关系

列车自车站驶出，做匀变速直线运动，随着位移的增大，它的速度也逐渐增大起来。那么，匀变速直线运动速度和位移有怎样的关系呢？让我们从匀变速直线运动的速度公式和位移公式中，消去时间变量 t 来进行研究。

根据匀变速直线运动的速度公式 $vt=v_0+at$，得

$$t=\frac{v_t-v_0}{a}$$

代入匀变速直线运动的位移公式

$$s=v_0t+\frac{1}{2}at^2=v_0(\frac{v_t-v_0}{a})+\frac{1}{2}a(\frac{v_x-v_0}{a})^2=\frac{v_t^2-v_0^2}{2a}$$

整理后，得

$$v_t^2-v_0^2=2as。$$

这是一个有用的推论，它表示了做匀变速直线运动的物体的速度跟位移之间的关系。

[例题 1]

赛车起动后做匀变速直线运动，行驶了 30 米，速度达到 90 千米/时，

试求赛车的加速度。

解　已知赛车的初速度 v_0=0，末速度 v_t=90 千米/时=25 米/秒，位移 s=30 米。

根据　$v_t^2 - v_0^2 = 2as$，

赛车的加速度　$a = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s}$ 米/秒^2 = 10.4米/秒^2。

[例题 2]

汽车以 8 米/秒的速度行驶，因前方道路交通阻塞进行刹车，如果刹车时产生的加速度为-4 米/秒^2，刹车后汽车还能前进几米？

解 (1)根据匀变速直线运动的加速度 $a = \frac{v_t - v_0}{a} =$，已知 $v_0 = 8$米/秒，a=-4 米/秒^2，当汽车停止运动时 v_t=0。

经过的时间　$t = \frac{v_t - v_0}{a} = \frac{0 - 8米}{-4米/秒^2} = 2$秒，

于是，$s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 = 8 \times 2米 + \frac{1}{2}(-4) \times (2)^2 米 = 16米 - 8米 = 8米$。

汽车刹车后还能前进 8 米。

解(2) 根据 $v_t^2 - \frac{1}{2}at^2 = 2at^2$，已知 $v_0 = 8$米/秒，$v_t = 0$，$a = -4$米/秒^2。

刹车后汽车还能前进的距离

$$s = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - (8)^2}{2 \times (-4)} 米 = 8米$$

以上两种解法相比较，显然解(2)比较简捷。

在解直线运动的问题时，首先必须弄清题目所描述和研究的过程是什么性质的运动，明确题目要求解决的是什么问题，哪些量已经给出，哪些量可以间接知道。然后要在理解公式的物理意义和使用范围的基础上运用有关公式进行计算，切忌死套公式。解题时还应注意正确使用物理量的单位。

练习十四

1．已知一辆实验小车从斜面顶端自静止开始下滑，下滑时的加速度为 2 米/秒^2，斜面长为 1.2 米，试求小车滑行到斜面底端时的速度。

2．一辆客车以 1.5 米/秒^{2}的加速度加速行驶 12 米，它的速度达到 36 千米/时，试求客车加速前的速度。

3．公安部门规定上海市区交通繁忙路段，机动车辆的速度限制在 25 千米/时，并要求驾驶员必须保持大于 5 米的车距。如果考虑到汽车制动时的加速度可达-6 米/秒^2，试从匀变速直线运动规律分析制订这些规定的依据。

4．游客从喷水滑梯顶端由静止滑下，冲入池中时的速度可达 4 米/秒，已知滑梯长 16 米，求游客从滑梯滑下时的加速度和在滑梯上滑行的时间。

六、自由落体运动

跳伞运动员离开直升飞机后，在延迟开伞的十几秒里是竖直下落的；手里拿着的物体一松手就会竖直落向地面；用绳子挂在墙上的镜框，绳子断了，镜框就会竖直掉落下来。在地面附近的任何物体，脱离支持物后就会竖直落向地面，这种运动是一种常见的直线运动。

关于落体快慢的争论

当人们看到一个苹果比一片叶子下落得快时，似乎可以自然地得出“物体越重，下落越快”的结论(图 3－35)。早在公元前 4 世纪希腊哲学家亚里士多德就曾断言：“物体的重量[1]决定它们下落的快慢”。在以后的 2000 多年时间里，人们对这一论断一直深信不疑。

■

17 世纪意大利物理学家伽利略(1564—1642)向这一“天经地义”的论断提出了挑战，在他的名著《两种新科学的对话》中，伽利略首先巧妙地揭露了亚里士多德论断的自相矛盾之处，并推断重物不会比轻物下落得更快些，他把物体下落快慢不同的原因，正确地归于空气阻力影响程度的不同。

现在我们用实验来研究，取两张大小相

同的纸，将其中一张纸揉成团，另一张提着它的一端让它下垂着，在同样高处同时放手，观察它们是否同时落到地面？接着，再做一次实验，将另一张纸平放在手掌上，和纸团在同样高处同时释放，看它们是否同时落到地面？结果都是否定的，而且第二次实验中平放的纸下落更慢。

我们继续做实验，在同样高处同时释放揉成团的半张纸和平放的整张纸，观察结果表明还是纸团先落到地面。这表明物体在空气中下落的快慢，不但跟它们所受重力的大小有关，而且还跟它们受到的空气阻力的大小有关。纸张平着下落时受到的空气阻力，远大于纸团下落时受到的空气阻力。

我们日常见到的落体运动，是在物体既受到重力又受到空气阻力的情况下发生的。在科学研究中，懂得忽略什么跟懂得考虑什么是同样重要的。为使问题简化，伽利略假定不存在空气阻力，把物体只在重力作用下由静止下落的运动，叫做自由落体运动。

事实上，自由落体运动只有在真空条件下才能发生，但在处理实际问题时，如果下落物体所受的空气阻力比它所受重力小得多，空气阻力便可忽略不计，例如石块从不太高处由静止下落的运动，就可以看成是自由落体运动。伽利略推断：轻重不同的物体从同一高度处自由下落，它们应同时落地，就是说不同物体作自由落体运动时，它们的运动情况是相同的。

---

[1] 这里所说的重量是指物体所受重力的大小。

我们可以用实验来验证伽利略的推断。在抽成真空的玻璃管中，一片羽毛和一片金属的下落情况是完全相同的(图 3－36)。打开开关后，空气进入玻璃管，羽毛的下落就明显慢于金属片。月球表面没有空气，宇航员登月时在月球表面进行了许多各种各样的科学实验(课本彩图 8)，其中就包括把铁锤和羽毛在同一高度同时释放的实验，结果它们同时落到月面。

■

伽利略对落体运动性质的研究

自由落体运动显然是一种加速直线运动。伽利略并没有像当时的哲学家那样，首先去争论使物体加速的原因，他抛弃了研究自然现象时首先寻找原因的古老方式，他认为还没有正确得出这种加速运动的规律，就去追究加速的原因为时尚早。伽利略分以下三步研究落体运动：

一、提出假设

伽利略认为落体运动是一种最简单的变速运动，并假设落体的速度随着时间均匀增大，即经过相等的时间△t，落体速度的增加量△v 相等，落体的加速度$a=\frac{\triangle v}{\triangle t}$是一个常量，他把这种运动叫做匀变速运动。也就是说伽利略假设落体运动是一种匀变速运动。

二、数学推理

在伽利略的年代，要测定很短的时间和瞬时速度，在技术上是不可能做到的，因此无法直接用实验方法验证落体的加速度是常量。于是伽利略用数学方法推导出物体从静止开始下落所经过的距离 s 跟时间 t 的关系。

设落体在 t 秒内下落的距离为 s，在这段时间里落体运动的平均速度$\bar{v}=\frac{t}{s}$。根据数学知识，任何一个均匀变化的量，它的平均值等于初值和终值的中间值，也就是初值与终值之和的一半，即$\bar{v}=\frac{v_0+v_1}{2}$。对落体来说，$v_0=0$，所以平均速度$\bar{v}=\frac{v_t}{2}$，它的加速度$a=\frac{v_t-v_0}{t}=\frac{v_t}{t}$，于是$v_t=at$，代入$s=\bar{v}t$，得

$$s=vt=\frac{vt}{2}\cdot t=\frac{at}{2}\cdot t=\frac{1}{2}at^2。$$

因此，只要验证落体的$s\propto t^2$(即比值$\frac{s}{t^2}=\frac{a}{2}$是个常量)，便可证实所提出的假设。

三、斜面实验

由于在实验室中，一般落体的下落时间太短，要用实验证实自由落体的 $s\propto t^2$，在当时仍难以做到。于是伽利略改用间接验证的方法。他在阻力很小的斜面上做了上百次实验，因为小球在斜面上运动的加速度要比它竖直下落时的加速度小得多，所以时间就容易测量。

实验结果表明，从同一倾角的光滑斜面上的不同位置滚下的小球，它经过的距离s跟所用的时间t的平方的比是不变的，即$s_1/t_1^2=s_2/t_2^2=s_3/t_3^2$（图 3－37)，从而证明了小球沿斜面的运动是匀变速直线运动。他又换用质量不同的小球重复实验，发现 s/t^2 的比值仍不变，这表明不同小球沿同一倾角的光滑斜面做匀变速直线运动的情况是相同的。

■

随后，他把斜面的倾角增大，重复上面的实验，发现不同质量小球的 s/t^2 的比值仍都相同，但这一比值比斜面倾角较小时的大，这说明不同质量的小球仍以相同加速度做一样的匀变速直线运动，但加速度已随斜面倾角的增大而变大。

伽利略不断增大斜面倾角取得相同的实验结论，并把它合理外推，设想斜面倾角增大到 90°(图 3－38)时，不同质量的小球就都将竖直下落，只受重力作用，做自由落体运动，它们应该都做匀加速直线运动，它们的加速度是相同的，有一定的值。

伽利略对自由落体的研究，不但证明了自由落体运动是一种匀变速直线运动，也开创了研究自然规律的科学方法，这就是提出假设、数学推理和实验验证。伽利略是物理学发展中开辟道路的先驱者。

自由落体的加速度

今天距离伽利略时代已有 3 个世纪，当时无法用实验直接验证的结论，现在已完全可以用实验来证实，并精确地测出了自由落体加速度的值。因为做自由落体运动的物体只受重力作用，所以自由落体加速度也叫做重力加速度，用 g 表示。重力加速度的方向是竖直向下的。

理论研究和实验证明，地球表面各处的重力加速度 g 的大小不一样，它和该处的纬度和高度等有关，一般说来纬度越大，g 值越大，高度越大，g 值越小，而和物体本身质量的大小无关。在一般计算中，常把 g 值看成是已知量，取作 9.8 米/秒 ^{2}。

某些城市的重力加速度(m/s^2)

城　市	纬　度	g 值	附　注
新加坡	北纬 1°17′	9.781	
广　州	北纬 23°06′	9.788	
上　海	北纬 31°12′	9.794	
东　京	北纬 35°42′	9.798	海拔 18m
华盛顿	北纬 38°53′	9.801	
北　京	北纬 39°56′	9.801	
巴　黎	北纬 48°50′	9.809	海拔 61m
伦　敦	北纬 51°31′	9.812	海拔 30m
柏　林	北纬 52°31′	9.813	海拔 30m
莫斯科	北纬 55°45′	9.816	海拔 139m

思考

下面这条社会新闻，报导了一位青年工人接住一个从四楼窗口跌出的男孩的动人事迹。如果这个男孩直接从四楼窗口坠下，未碰到三楼的两根电线，而青工在接触男孩之前，男孩已下落 10 米，这位青工跳下自行车冲到窗下需 1.2 秒，若他能接住孩子，则至多允许有多长的反应时间？

六岁小男孩跌出四楼窗口
青工朱云华千钧一发及时接住

本报讯　日前，上钢五厂二炼钢分厂青工朱云华在千钧一发之际，勇救坠楼六龄童，被传为美谈。

3 月 19 日下午 1 点 30 分，小朱骑自行车途经桃园新村 15 号时，突闻四楼朝西窗口传出呼叫“爸爸”、“爸爸”，小朱抬头一看，大惊失色，只见一个小男孩从四楼的窗户口坠落到三楼的两根 220 伏电线上，小朱毫不犹豫地跳下自行车，冲上前用双手去接，瞬间，男孩在电线上弹了几下又一直朝楼底坠落，在小朱的双手碰触缓冲下落到地面。小男孩脸色苍白，双眼直翻已经没有了声息。

小朱抱起男孩拦车，直驶吴淞中心医院。经医生急救，男孩恢复了神智。小男孩双目失明的父亲在邻居搀扶下赶到了。他拉着小朱的手说：“谢谢你，如果孩子活不成，我们全家都无法活了。你救了我们全家。”

小朱淡淡地说：“没什么，应该的。”随即掏出 100 元钱：“这钱你先付医药费，我去上中班。”

练习十五

1．试分析图 3－39 所示的小球自由下落时的频闪照片，已知频闪周期为 0.04 秒，直尺上的刻度单位是厘米。

(1)证明自由落体运动是匀变速运动；

(2)求出重力加速度的平均值(提示：用匀变速直线运动规律$\triangle s=at^2$进行计算)。

2．自由落体运动是初速度等于零、加速度为 g 的匀变速直线运动，试写出自由落体下落距离 h 和下落速度 v_t 的计算公式。

3．上海东方明珠电视塔包括天线在内总高度为 468 米，如果有一物体从天线的最高处自由落下，求这个物体落到地面的时间。

4．有一重物从 16 层高的大楼顶端自由下落，经过最后 7 层的时间是 0.8 秒，求大楼的高度。

阅读材料　伽利略对落体运动的思考与研究

伽利略(Galileo Galilei，1564—1642)是意大利物理学家、天文学家、数学家，近代实验科学的创始人(图 3－40)。他建立在科学的方法论基础之上的一系列科学活动，使他在物理学和天文学领域的许多方面有了一系列重大的发现、发明和创造。

1604 年，他在比萨大学任教时，从理论上论证了落体运动的规律。伽利略对亚里士多德(Aristotle 古希腊哲学家、学者，B.C.384—322)认为重物比轻物下落要快的传统说法提出了疑问，伽利略在 1638 年出版的《关于力学以及地上运动的两个新学科中的对话和数学证明》巨著中指出：

按照亚里士多德的观点，如果把两个自然速率不同的物体连在一起，那么落得快的物体被落得慢的物体拖着而减速，慢的物体会被快的物体拉着而加速。但是，如果这是对的，那么我们取一块大石头，假定它的下落速率为 8；再取一块小石头，下落速率为 4，将它们拴在一起，整个系统的下落速率应该小于 8；但是，两块石头拴在一起，下落速率应该比那块速率是 8 的石头还要大。这样，从重物比轻物下落得快的假设却推出了重物比轻物下落得更慢的自相矛盾的结论。

伽利略用简单明了的科学推理，巧妙地揭示了亚里士多德关于落体运动学说的矛盾，他还做了大量的实验研究落体运动的规律。伽利略认识到，在当时的技术条件下，不可能精确测定落体运动的加速度。他设法用小球在斜面上的运动来代替自由落体，将时间“放大”。他指出：如果自由落体的加速度是常量，那么一个小球在光滑的斜面上滚下，它的加速度虽然小一些，但也应该是常量。伽利略在《力学对话》中指出：

“用一块木料制成长约 12 库比特[①]，宽半库比特，厚三指的板条，在它的上面刻一条比一指略宽的槽，将这个槽做得很直，打磨得很光滑，在槽上裱一层羊皮纸(也要尽可能光滑)，取一个坚硬、光滑并且很圆的铜球，放在槽中滚动。将这个木槽的一端抬高 1～2 库比特，使槽倾斜。就像我要讲的那样把球放在槽顶让它沿着槽滚下，记录下降的时间。实验要重复几次，以便使测得的时间准确到两次测定的结果相差不超过一次脉搏的十分之一。进行这样的操作，肯定了我们的观察是可靠的以后，将球滚下的距离改为槽长的四分之一，测定滚下的时间，我们发现它准确地等于前者的一半。下一步，我们用另一些距离进行试验，把全长所用的时间与全长的二分之一、三分之二、四分之三，或者其他任何分数所用的时间相比较。像这样的实验，我们重复了整整 100 次，结果总是经过的距离与时间的平方成比例，并且在各种不同坡度下进行实验，结果也都如此……。”

在这样的实验基础上，伽利略得出推论，当斜面倾角增大到 90°，小球做自由落体运动时，仍然是做匀加速运动。这一推论后来得到了实验证实。

[①] 库比特是一种古代的长度单位，1 库比特等于 0.4572 米。

本章学习要求

1．知道时间和时刻的区别。

2．知道打点计时器的功用，会从打点计时器的纸带和频闪照片计算研究对象运动的时间。

3．知道质点。

4．理解位移和路程的区别。知道矢量和标量。

5．理解匀速直线运动。

6．理解速度的概念。知道速度和速率的区别。

7．理解平均速度的概念。

8．知道瞬时速度。

9．知道匀速直线运动的速度图象和位移图象。

10．理解匀变速直线运动。

11．理解匀变速直线运动的加速度的概念。

12．知道匀变速直线运动的速度图象。

13．掌握匀变速直线运动的规律。

14．学会用打点计时器测定匀变速直线运动的加速度。

15．知道伽利略对落体运动的研究方法。

16．理解自由落体运动是初速度等于零的匀变速直线运动。

17．知道重力加速度及其方向。记住重力加速度的值。

复习题

1．列车从车站驶出做匀变速直线运动，在 10 秒内的位移为 15 米，求列车在第 1 秒内和第 10 秒的位移大小。

2．一辆自行车以 5 米/秒的初速度，驶入一段下坡道，加速度是 0.4 米/秒^2，坡道长 30 米，试求自行车到达坡底时的速度和经过这段坡道所用的时间。

3．摩托艇通过拉索拉着滑水运动员在水上滑行(图 3－41)，摩托艇的速度为 12 米/秒。如果运动员突然松手放开拉索后还能向前运动 4.5 米，试求运动员在这一匀减速运动中的加速度以及运动的时间。

4．在图 3－42 中，哪一个速度图象最能描述上题中运动员的运动？

5．如图 3－43 所示，一辆实验小车由静止开始，从

■

长度为 1.5 米的斜面顶端滑下，2 秒末到达斜面底端。接着以到达斜面底端时的速度为初速，在一个水平的粗糙桌面上运动 3 秒钟停下。如果把小车在斜面上和水平桌面上的运动都看成是匀变速直线运动，试求

(1)小车在斜面上和水平桌面上运动时的加速度；

(2)小车在水平桌面上的运动距离。

6．进行测量工作的直升飞机，悬停在离地面 80 米的高处，放下一个标记，这个标记的下落可看成是自由落体运动。这个标记在最后 1 秒钟里，下降了多少高度？(本题计算中，g 取 10 米/秒^2)

7．宇航员在月球表面做落体实验，从离月球表面 1.5 米高处由静止释放一小球，测得下落时间为 1.36 秒，试求月球表面的自由落体加速度。

8．居住在高层住宅底楼的居民，看到窗外有一个衣架贴近窗框落下。已知窗框的长为 1.8 米，估计衣架经过整个窗框的时间为 0.1 秒。若把衣架的下落看成是自由落体运动,那么这个衣架是从几楼掉下的？(设每层楼高 3 米，g 取 9.8 米/秒^2)

9.图 3－44 所示的是利用打点计时器记录的一个重锤自由下落时的一段纸带，已知纸带上左端的第一个点是开始运动的点，每两个点间的时间间隔 T=0.02 秒，试在纸带上选择并标出记数点，用毫米刻度尺量出有关数据，且填写在你自己设计的表格中，要求：

(1)判断重锤的下落运动是否是匀变速直线运动；

(2)测出重锤下落运动中的加速度。

■

4．力的合成和分解　力的平衡

1．塔吊
2．隋代赵州桥
3．技巧运动
4．盘山公路

从几十万年前原始人敲击石块制作狩猎工具，到几千年前古埃及金字塔的建造和我国万里长城的修筑，表明人们在长期的生产劳动中对力有了越来越多的认识，由此设计制造出了各种省力机械，利用人力和畜力创造出了建筑史上的奇迹。

■

随着生产的发展，科学技术的进步，人们对自然界中大到天体、小到基本粒子之间的各种不同性质的力的认识越来越深刻；在现代建筑、交通运输等各项科学技术发展中，在工农业生产和社会生活中，对力的各种作用效果的研究与应用越来越广泛；力学知识已成为研究其他自然学科以及物理学各分支学科的重要基础。

一、力

力的概念

人们关于力的知识是从使物体改变形状和改变运动状态开始的。击碎或挪动一块石头，折断或挥动一根树枝都需要用力，而这种用力又必定跟人们的亲身感受——肌肉的收缩相联系，用力的大小可以用肌肉收缩的紧张程度来反映，然而这毕竟是一种直观的、感性的认识。经过长期的实践和观察思考，人们终于把这种感性认识上升为理性认识，把凡是能跟人们自身用力起到相同效果的一切作用都称之为力，从而形成了力的概念：**力是物体对物体的作用**。后来人们又把对力的这种认识由近及远、由表及里，从解释地面上物体的运动，扩展到解释天体运动和组成物质的微粒间的吸引和排斥以及碰撞等所有的领域，从而认识到力是不能脱离物质而存在的，有了施力物体和受力物体才有力的存在。

推土机推土时，泥土因受力的作用而碎裂；塔吊起吊建筑材料时，建筑材料因受力的作用而运动起来，可见力有使物体发生形状变化和运动状态变化的作用效果。我们通常可以通过观察力的作用效果来确定力的存在。

力的图示

生活经验告诉我们，从不同方向，对物体的不同部位，施加不同大小的作用力，引起物体运动状态改变的效果是不同的。例如，一辆已经用尽汽油的汽车停在路边，驾驶员要推它去加油站加油(图 4—3)。在推车过程

中，就不仅会遇到要用多大的力才能推动的问题，还会遇到力该向什么方向作用，以及作用在哪里的问题，因为这些因素都会影响这个力的作用效果。所以一个确定的力必须有大小，有方向，还有作用点。

■

力是矢量，力可以用一根带箭头的线段来表示：用这一线段的长度表示力的大小，在线段的一端画一个箭头表示力的方向，而线段的另一端则表示力的作用点。这种表示力的方法叫做**力的图示**。

如果图 4—3 中那位驾驶员所用推力的大小是 480 牛，方向水平向右，怎样用力的图示法来表示这个力呢？

我们必须首先选择一个适当的长度作为力的大小的标度，例如可以用 1 厘米长的线段来表示 100 牛的力(画在图的上侧)，那么，480 牛的力就应该是一段 4.8 厘米长的线段，因为这个力的方向明确为水平向右，所以画一段 4.8 厘米长、水平的线段，然后在这线段的右端加上箭头，表示这是一个水平向右的作用力，再在线段的左端画一个点，表示力的作用点(图 4—4)。

在作力的图示时，必须表明这样三方面：(1)力的大小；(2)力的方向；(3)力的作用点。

[例题]

起重机用 F＝500 牛的力吊住一个木箱[图 4—5(a)]，试用力的图示法表示这个力。

解　选择 1 厘米长的线段表示 100 牛的力，因吊住木箱的力方向竖直向上，所以可在木箱上边取一点 0，从 0 点画一段竖直向上的线段，线段长度等于 5 厘米；然后在线段的上端画一向上的箭头，在 0 处加一个点以表示力的作用点，如■图 4—5(b)所示。

力学中几种常见的力

在初中，我们已学习过许多不同名称的力，例如，由于地球吸引作用而使物体受到的重力，物体浸在液体中受到的浮力，物体在滑动中受到的摩擦力，电荷间和磁极间的引力和斥力，还有推力、压力、拉力等等，应当怎样归纳这些力呢？在力学研究的范围里，从力的性质来区分，常见的有重力、弹力和摩擦力三种。而拉力、推力、压力和浮力等都只是从它们的作用效果来命名的。

思考

足球守门员接住球后，一脚把球踢到对方的半场，足球在空中运动时主要受到什么力的作用？这个力的施力体是什么？

练习十六

1．你能用手托住砝码时的感受，来说明砝码放在桌面上时，砝码对桌

面是有力的作用的吗？命名这个力，指出它的方向。

2．小孩用 50 牛的力，沿着跟水平面成 30°角的方向拉着一辆小车向东前进，试用图示法表示这个力。

3．一根带箭头的线段是怎样表明力的大小、方向和作用点的？试作简明扼要的说明。

二、重力

在高处作业的人员或者悬挂在高处的物体，都受到重力作用，一旦失去支持，就立即会坠落下来，在下落过程中，速度不断增大，落到地面，就会造成事故，这是应该防范避免的。

重力是由于地球的吸引而使物体受到的力。重力使人类能生活于地球表面，但也把人类束缚于地球，一切物体只有克服了重力的作用才能飞离地球，人们经过了几个世纪的奋斗，直到今天才完全实现这个梦想。

重力的大小

物体所受重力的大小跟物体本身质量的大小是成正比的，物体的质量越大，所受的重力也越大。1 千克质量的物体，所受的重力是 9.8 牛；m 千克质量的物体，所受的重力是 m×9.8 牛，我们可以根据物体的质量，推算出它所受重力的大小。

把物体放在支承面上，重力能使物体对支承面产生压力，物体对静止的水平支承面产生的压力 N，大小等于物体所受重力 G 的大小。重力也能使物体对悬住它的绳子产生拉力，静止时物体对悬绳的拉力 F，大小也等于物体所受重力 G 的大小，用测力计可以测出物体所受重力的大小就是根据这个事实。

重力的方向

物体所受的重力是有一定方向的，重力的方向是竖直向下的，所以悬挂重物的绳子，静止时总是竖直下垂的，剪断绳子让重物自由落向地面，物体也总是竖直下落的。重垂线能确定竖直方向就是依据物体所受重力的方向。

重心

物体所受重力的作用点在物体的重心上。图 4—6 表示手指在重心处能支持住刻度尺，使它保持水平平衡。这时支持力的作用线通过刻度尺的重心，刻度尺所受重力跟支持力在同一直线上，它们大小相等，方向相反。■

[例题]

立方体塑料块正在水中下沉[图 4—7(a)]，用力的图示法画出它所受到的重力和浮力，已知重力 G＝4.5 牛，浮力 F＝2.2 牛。

解　选择 1 厘米长的线段表示 1 牛的力，因为重力方向竖直向下，重

力的作用点在重心上，立方体塑料块的重心在几何中心 C 上，所以在 C 点画一竖直向下的线段，线段长度等于 4.5 厘米，在线段下端画一向下的箭头，表示重力 G。在立方体塑料块竖直下沉的过程中，可以认为浮力跟重力作用在立方体塑料块的同一点上，浮力方向竖直向上，因此再从重心 C 画一竖直向上的线段，线段的长度等于 2.2 厘米，在线段上端画一向上的箭头，表示浮力 F，如图 4—7(b)所示。

■

质量均匀分布的物体，重心位置只跟物体的形状有关，有规则形状的均匀物体的重心在物体形状的几何中心上，例如均匀细棒和均匀圆柱体的重心在轴线的中点上，均匀球体的重心在球心上(图 4—8)等等。不均匀物体的重心，不但跟物体的形状有关，还跟物体质量的分布有关，例如载重车辆的重心就会随载货的多少和堆垛的方式以及货物的分布的不同而不同。形状不规则或者质量不均匀的薄板状物体的重心可以用悬挂法(图 4—9)来确定。方法是：先后两次用细绳将被测薄板挂住，沿细绳画下的两根线的交点即为薄板的重心。

思考

用悬挂法测薄板重心时，为什么至少要悬挂两次，每次都要延长悬线作出直线？你能说明两根直线的交点就是重心所在的道理吗？

练习十七

1．用力的图示法表示质量是 500 千克的钢锭所受的重力，想一想用多少牛的力作为标度比较适合？

2．用手提住一只木箱，木箱所受重力是 300 牛，木箱这时还受到什么力的作用？用力的图示法表示木箱所受的力。(提示：木箱处于平衡状态)

3．找一片形状不规则的硬纸板，用书中所讲的悬挂法求出它的重心。(提示：硬纸板不要过大，可以直接描画在作业本上)

三、弹力

弹力是人类很早就发现和利用的一种力。在远古时代，人们就已经知道利用弯曲树枝产生的弹力来进行渔猎活动，后来又制作了利用弹力的弓和弩。但是对弹力的系统研究要到 17 世纪中叶以后，现在弹性力学已经发展成一门独立的学科，有关弹力的知识已被广泛应用于建筑工程设计、交通运输和各种机械制造中。生产和生活中广泛应用着弹簧的弹力，如图 4—10 所示的火车车厢的避震弹簧，就是利用弹簧形变时产生的弹力，达到避震效果的。

弹力　弹力的产生

跳水运动员在做起跳动作时，必须用力蹬踏跳板，才能获得足够大的弹力跳起。那么，弹力究竟是怎样产生的呢？我们可以通过一个简单的实验来进行观察和分析。把弹簧的一端固定，用手指勾住弹簧的另一端向上拉[图 4—11(a)]，这时感到被拉伸的弹簧要收缩，手指受到向下“拉”的作用；用手掌向下压弹簧[图 4—11(b)]时，感到发生压缩形变的弹簧要挺伸，手掌受到向上“压”的作用。这表明发生弹性形变的弹簧，由于要恢复原状，对使它发生形变跟它直接接触的手指和手掌会产生力的作用。这种力就是弹力。跳水运动员正是因为用力蹬踏跳板，跳板发生弯曲形变的同时，由于它要恢复原状，运动员就受到跳板对他的弹力作用，所以他才能弹跳起来。

我们再来分析一个例子。一本书由于受到重力作用，如果没有别的物体支持它，就会向下坠落。如果把这本书放在塑料海绵块上，就可以明显看到，由于重力作用，书本紧压在塑料海绵块上，塑料海绵块就发生形变，产生的弹力作用在书本上，对书本起了支持的作用，不使书本下落[图 4—12(a)]。同样道理，书本受到弹力作用，在接触面上也会发生形变而产生作用于塑料海绵块的弹力，这就是书本对塑料海绵块的压力[图 4—12(b)]。可见，从性质上看，拉力、压力、支持力都属于弹力。

大量事实表明，不仅形变的弹簧会产生弹力，一切发生弹性形变的物体，由于要恢复原状，对跟它直接接触并使它发生形变的物体都会产生弹力，弹力的作用点就在这个直接接触的、使它发生了弹性形变的物体的接触点或接触面上。

弹力的方向

从上面例子的分析中可以知道，发生弹性形变的物体是要恢复原状才产生弹力的，所以弹力总是指向使物体恢复原状的方向。具体地说，手拉弹簧使它伸长，那么手受到的弹力是指向弹簧收缩的方向；绳子下挂一重物，重物使绳子发生拉伸形变，绳子对重物作用的拉力也总是沿着绳子指向绳子的收缩方向［图 4—13(a)］。火车车厢停放在钢轨上，钢轨发生向下弯曲的形变，钢轨要向上恢复原状，车轮就受到向上的弹力作用。支持面对物体作用的弹力方向总是垂直于支持面并指向物体的，钢轨对车轮的弹力是垂直于钢轨面、指向车轮轴心的[图 4—13(b)]。

弹力的大小

图 4—14 显示了撑杆跳运动员在跳高过程中的一系列动作。从图中可以明显看出，开始时杆子弯曲程度很大，后来杆子逐渐变直，在撑杆形变逐渐变小的过程中，杆子对人作用的弹力也由大变小。利用橡筋做动力的模型飞机，当橡筋绕得很紧，即橡筋发生的形变很大时，弹力很大，螺旋桨的转速也很快。随着橡筋逐渐松弛，弹力也就变小，螺旋桨转速也就变慢。

一般说来，弹力的大小跟组成物体的材料性质和物体发生弹性形变的

程度有关。同一物体弹性形变越大，产生的弹力也就越大。弹簧测力计就是根据这一原理制作的。

除了在工程技术和生产中大量利用弹簧、承重钢梁、牵引钢索等物体发生弹性形变产生弹力的例子外，在体育运动和生活中也广泛地利用着形变产生的弹力。例如，射箭就是利用弓和弦形变后产生的弹力；杂技中的绷床表演是利用绷床弹簧形变后产生的弹力(图 4—15)；甚至我们现在所穿的旅游鞋和运动鞋，也都是利用塑料海绵等材料形变后产生的弹力，来减小行走时因蹬地而受到的冲击作用。

弹簧的弹力与形变的关系

把一根不计质量、原长为 l_0 的弹簧一端固定，在它下面挂一钩码，弹簧就发生伸长形变，当达到平衡时伸长量为$\triangle l_1$，这时钩码受到的弹力 F_1 的大小等于钩码所受的重力 G，即 $F_1=G$；如果在弹簧下面挂两个相同的钩码，达到平衡时弹簧的伸长量增为$\triangle l_2$，这时钩码受到弹力的大小 $F_2=2G=2F_1$，可以发现$\triangle l_2=2\triangle l_1$；当在弹簧下面挂三个相同钩码时，弹簧的伸长量增至$\triangle l_3$，钩码所受弹力的大小 $F_3=3G=3F_1$，也可以发现$\triangle l_3=3\triangle l_1$。

实验表明，在弹性限度以内，弹簧的弹力跟弹簧的伸长量成正比，即

$$\frac{F_1}{\triangle l_1}=\frac{F_2}{\triangle l_2}=\frac{F_3}{\triangle l_3}=\cdots\cdots k\text{（常数）}$$

式中比例常数 k 叫做弹簧的劲度系数(旧称倔强系数)。k 值的大小与弹簧的粗细、长度以及材料性质有关。

这一结论同样适用于弹簧发生压缩形变的情况。

思考

1．物体放在水平桌面上，对桌面的压力大小等于它所受的重力，能不能说物体对桌面的压力就是它所受的重力？

■

2．一只皮球放在光滑的 V 形槽内(图 4—17)，它受到了哪些弹力的作用？并指出弹力的方向。

练习十八

1．放在斜面上的物体受到 5 牛的支持力，请你说出：(1)这是属于什么性质的力？(2)它的施力物体是什么？(3)施力物体为什么产生了这个力？并作出这个力的图示。

2．如图 4—18 所示，用两根细链，把一只日光灯悬挂在天花板上，这只日光灯受到几个力的作用？作出这些力的示意图，指出它们的施力物体，说出其中哪些力属于弹力。

3．图 4—19 是表示运动员在助跳板的作用下，跃起作跳马表演的情景。试说出助跳板是怎样给予运动员以弹力作用的，并指出弹力的方向。

4．图 4—20 是两块放在水平光滑桌面上的正方体木块，它们的一个面靠在一起时，B 块受到 A 块的弹力吗？为什么？当用力把 A 块推向 B 块时，B 块受到 A 块的弹力作用吗？为什么？

四、摩擦力

夏日的夜晚，时常可以见到流星划破夜空，这是一些小行星或彗星的碎片，当它们偏离自己的轨道，被地球吸引进入稠密的大气层时，与空气剧烈摩擦而燃烧发光的现象。行驶的车辆刹车后为什么能制动，稻谷、柴禾为什么能堆放起来，这些都是跟摩擦有关的现象。

人们对摩擦现象进行科学研究，开始于 15 世纪文艺复兴时期，意大利学者、画家达·芬奇(1452—1519)，是最早对固体摩擦作实验研究的人。摩擦是日常生活和生产技术中普遍存在的现象，所以关于摩擦的深入研究至今仍然是科学家们感兴趣的研究课题。

静摩擦力

生活中常需要移动一些物体，如打扫卫生时，需要将桌椅移开。移动时因为桌椅和地面间存在摩擦，所以不是对它施加任意大小的力都能移动的。如果桌椅上放了许多物件，要移动它就得用更大的力。现在我们通过实验来研究物体开始运动前摩擦的一些特点。

如图 4—21 所示，在一张桌面上放置一块木块。用弹簧秤通过细绳向右拉它，当弹簧秤上读数不大时，木块不发生运动。这是因为当木块跟桌面有相对运动趋势时，它们的接触面间就产生了**阻碍物体相对运动趋势的摩擦力**，这种摩擦力叫做**静摩擦力**。可以想象，这时木块受到的静摩擦力的大小跟木块所受拉力的大小相等，方向向左，静摩擦力与拉力相平衡，所以木块仍保持静止。如果改向左方拉动木块，在拉力不大时，木块同样保持静止，这时拉力同样被静摩擦力所平衡，木块受到的静摩擦力方向向右。可见，静摩擦力的方向总是跟物体相对运动的趋势相反。

如果逐渐增大对木块的拉力，可以看到弹簧秤上的示数逐渐增大，但木块依然保持静止，说明静摩擦力是随拉力的增大而变大的。但当拉力增大到某一数值时，木块开始运动了，这表明静摩擦力有一个最大值，叫做**最大静摩擦力**。

静摩擦力在生产技术中起着非常重要的作用，许多紧固零件，如木螺丝、螺栓和螺母等，都是依靠静摩擦力来紧固器具或机件，起止动作用；静摩擦力在传动装置中也起着一定的作用，如摩擦传动。

思考

1．冬天下雪时，在倾斜的屋顶上为什么能积上厚厚的一层雪而不会滑

下？建筑工地上的黄沙、石子等建筑材料为什么能堆成一座座小山(图 4—22)而不坍落？

2．用手握住一个烧杯时，烧杯所受的重力是被什么力所平衡的？

3．爬绳的孩子用手紧握绳索，用脚夹住绳，他们是依靠什么力在绳上保持平衡的？

静摩擦力和最大静摩擦力

静摩擦力只出现在两个物体的接触面间有相对运动趋势时。一张桌子放在粗糙的水平地板上，桌子与地板没有相对运动趋势时，静摩擦力等于零。当试图用力推动桌子时，桌子跟地板间有相对运动趋势时，静摩擦力便出现了，在桌子开始运动之前，静摩擦力的大小和方向随着作用在桌上的推力而发生变化，它始终与推力相平衡。但这张桌子跟地板间的静摩擦力的最大值却与推力大小无关。

实验表明，物体接触面间的最大静摩擦力跟接触面间的压力有关，增大压力，最大静摩擦力也将增大；它还跟接触面的物质性质有关，接触面间越粗糙，最大静摩擦力也越大。

日常生活和生产技术中，常用增大压力和改变接触面的粗糙程度的方法来达到增大摩擦的目的，这正是利用了最大静摩擦力的上述性质。

滑动摩擦力

在前面的实验中，木块开始滑动后，仍然需要一个拉力，木块才能在桌面上保持匀速滑动，撤去这个拉力，木块就会渐渐停止下来。这表明：当一个物体在另一个物体表面上滑动时，在物体的接触面间，也有阻碍物体相对运动的摩擦力，这种摩擦力叫**滑动摩擦力**。滑动摩擦力的方向总是跟物体的相对运动方向相反。

动摩擦因数

在实际工作中发现，同一物体在不同的支持面上滑动时，摩擦力的大小是不同的。例如，在有硬塑料贴面的桌上做实验时，移动仪表器材很容易，不需用多大的推力；在木板面的桌上做实验时，移动仪表器材就要用较大的推力。可见滑动摩擦力的大小跟接触面的性质有关。现在我们就利用前面用过的实验装置(图 4—21)来定量地研究这一关系。我们在不改变接触面性质的情况下，往木块上加放砝码，增大接触面间的压力，测定接触面间的滑动摩擦力。根据实验结果，可得出如下结论：

滑动摩擦力的大小跟作用在接触面上的压力成正比。用 f 表示滑动摩擦力，用 N 表示压力，则可写成以下公式：

$$\frac{f}{N} = \mu，f = \mu N。$$

改变跟木块接触的支持面的材料重复实验，可以发现滑动摩擦力仍跟

压力成正比，但它们的比例常数不同。上式中的比例常数μ[①]，叫做动摩擦因数。它的大小是由相互接触的两个物体的材料性质和接触面的情况(如粗糙程度等)所决定的。动摩擦因数是两个力的比值，所以没有单位。

下表列出了通常情况下，几种材料间的滑动摩擦系数。

几种材料间的动摩擦因数

材　料	动摩擦因数μ
铜-冰	0.02
木-冰	0.03
聚四氟乙烯（塑料王）-钢	0.10
钢-钢	0.17
皮革-期待铁	0.28
木-木	0.30
玻璃-玻璃	0.40
钢-硬地	0.20 ～ 0.40
橡胶轮胎-路面（湿）	0.52
橡胶轮胎-路面（干）	0.71

［例题］　在钢铁工厂的铸件车间里，钢板上放着质量是500千克的钢块，要用多大的水平推力，才能使它在钢板上匀速滑移？

解　已知钢块所受重力G=500千克×9.8牛/千克=4900牛，钢块对钢板的压力N=G，水平推力F=f。在这里我们可以把作平动的钢块看成质点，这样就能把钢块所受到的四个力画成作用在同一个点上，如图4—23所示。查表得知钢与钢间的动摩擦因数μ=0.17，F=f=μN=0.17×4900牛=833牛，所以要用833牛的水平推力，钢块才能在钢板上匀速滑移。

在相同压力下，动摩擦因数越大，滑动摩擦力就越大。所以了解接触面间动摩擦因数的大小，对我们日常生活和生产都是非常有意义的。例如，知道钢、冰之间，木、冰之间的动摩擦因数很小，我们就可以用钢和硬木来制作滑雪板和雪橇；知道橡胶轮胎和路面之间的动摩擦因数较大，就懂得了自行车、汽车都用橡胶制造轮胎的道理；知道了橡胶轮胎对干、湿路面的动摩擦因数不同，也就能理解雨天行车要特别小心谨慎的道理了。在实际工作中，有时需要增大物体接触面间的摩擦。例如，在橡胶轮胎上设计各种防滑花纹。但是在另一些情况下，又需要减小摩擦。例如，为了减少机械零部件的磨损，要对一些机械设备的接触面作不同程度的研磨，在接触面间添加润滑剂。

思考

---

① μ希腊字母，汉语拼音读法是miu。

1．一块铁块放在水平木板面上，把木板的一端慢慢抬起，铁块便由静止转变为从木板上滑下，在这过程中铁块分别受到哪些力的阻碍作用？

2．自行车制动时，是依靠钢圈和刹车橡皮间的什么摩擦力？遇到雨天，自行车常会刹不住，这是什么原因？

练习十九

1．用 12 牛的水平推力，使物体在水平木板面上滑动，若已知物体所受重力为 50 牛，木板与物体间的动摩擦因数是 0.2。求物体受到的滑动摩擦力，并把这个物体受到的各个力用图示法表示出来。

2．用 20 牛的水平推力，可以使一块质量是 3.5 千克的砖在水平地面上匀速滑动，试求砖块和地面间的动摩擦因数。

3．登山运动员在攀登时，脚必须紧压峭壁(课本彩图 9)，这样才能得到足够大的_____力。

4．汽车发动机的动力是通过离合器传递给变速箱的。当离合器压板与摩擦片分离时(图 4—24)，动力不能传递到变速箱。当离合器压板与摩擦片紧密接触时，动力就能传递给变速箱，汽车便能运动起来，这种情况下，动力的传递是依靠 [　　]

(A)皮带传动；　　(B)齿轮传动；

(C)轴传动；　　(D)摩擦传动。

5．用 8 牛的水平推力，没有能使放在水平桌面上的物体滑动，这时物体受到多大的静摩擦力？如果推力增大到 14 牛，物体就开始滑动了，那么物体所受静摩擦力的最大值是多少牛？

物体在液体和气体中运动时受到的阻力

物体在液体和气体中运动时，由于流体有一定的粘滞性，运动物体就会受到液体和气体的阻力，这种阻力叫做介质阻力。决定介质阻力大小的因素，要比动摩擦力复杂得多。物体的外形、正截面积的大小和运动的速度以及介质的性质都能影响介质阻力的大小。远洋货轮船首的水下部分要做成球鼻状，高速列车、轿车、喷气飞机的外形都要设计成流线型，这都是为了减小水和空气的介质阻力。

在运动速度不大的情况下，空气对运动物体的阻力是不大的，在解题时通常可以忽略不计，即使物体以较大速度运动时，空气的阻力也还是比液体和固体表面的阻力小。水翼船高速行驶时，船体绝大部分脱离水面，就是为了减小水对船体的阻力，从而可以提高速度和节省燃料。

五、物体受力情况分析

人们要了解和研究周围物体的形状和运动状态的变化，就必须分析物体的受力情况。数十以至百余层的高楼为什么能矗立不倒？几千米长的大桥为什么能跨江而过？高山为什么会滑坡形成泥石流？这些问题虽然复杂，但是只要掌握了怎样正确分析物体受力情况，也就不难迎刃而解的。现在我们就来讨论两个最简单的事例。

在水平面上的物体

一个放在水平桌面上的物体，例如课桌上的书本、餐桌上的碗、筷，它们的受力情况是最简单的。它们只受到两个力的作用。一个是重力 G，方向竖直向下。另一个是桌面对它们的支持力 N，方向竖直向上。由于书本和碗筷静止在桌面上，所以 G 和 N 是一对平衡力，它们沿着同一直线，大小相等，方向相反(图 4—25)。

如果水平桌面是粗糙的，物体是一个正在滑动的木块，那么情况就要复杂些。木块除了跟上述书本和茶杯一样，在竖直方向上受到重力 G 和支持力 N 的作用之外，由于它和桌面间有相对滑动，木块在水平方向上，还要受到滑动摩擦力 f 的作用，f 的方向与木块滑动方向相反(图 4—26)。由于滑动，木块实际上还会受到空气阻力，方向也跟木块滑动方向相反。但因为木块的截面积不大，滑动速度又小，所以分析时，通常空气阻力是可忽略的。可是，在分析快速行驶的车辆时，空气阻力往往就不可忽略，而经常合并于摩擦力，统称为阻力。

如果上述木块是用水平的绳拉着滑行的，那么木块在前进方向上还要受到绳子拉力 F 的作用，这样，木块就一共受到四个力的作用(图 4—27)。

在斜面上的物体

如果把木块放在一个不光滑的斜面上，可能有两种情况。第一种情况是木块从斜面上滑下。这时木块跟在水平桌面上滑动一样，也受到重力 G、支持力 N 和滑动摩擦力 f 的作用。但支持力 N 的方向不再竖直向上，而是垂直于斜面并指向被支持的木块；滑动摩擦力 f 的方向则平行于斜面向上，如图 4—28(a)所示。

第二种情况是木块静止在斜面上。这时木块有下滑的趋势，所以它除了受到重力 G 和支持力 N 的作用之外，还受到静摩擦力 f 的作用，方向也是平行于斜面向上的［图 4—28(b)］。

从上面例子中，我们可以把分析物体受力情况的步骤归纳成以下几点：

(1)明确要分析哪个物体的受力情况，即要明确研究对象；

(2)分析周围有哪些物体对它施加力的作用；

(3)确定这些力的作用点和方向。

思考

你能分析一下悬挂在细绳下端的物体，再被另一根系住它的绳子沿水

平方向拉向一旁时的受力情况吗？

练习二十

1．雨滴下落速度较大，空气阻力不能忽略不计。无风时雨滴竖直下落，它受到几个力的作用？如果受到水平方向的风力而斜向下落，这时它受到几个力的作用？试作出这两种情况下雨滴受力的示意图。

2.物体以一定的速度沿着光滑斜面上滑时受到几个力的作用？如果斜面不是光滑的，物体的受力情况又怎样？分别画出物体受力的示意图。

3．用水平方向的细绳拉着木块在水平面上滑动，已知木块所受重力是15牛，绳的拉力是10牛，滑动摩擦系数是0.3。试分析木块受到了哪些力的作用，并用力的图示法作出木块的受力图。

六、力的合成

在日常生活、交通运输和工农业生产中，作用在物体上的力往往不止一个。例如，教室里用两根细链悬挂一盏日光灯；造船厂在安装大型远洋货轮的尾部或驾驶舱时，常常需要用两台大吊车同时吊装等。下面我们就来研究物体受到几个力共同作用时的情形。

力的合成

在黄浦江上，有时会看到用几条拖轮牵引驳船的情形。1990年12月2日上海报载：一架长78.2米、宽24.6米、高3.5米、重1080吨的苏州河闸桥的中跨钢梁，在8艘拖轮的拖带下，由黄浦江顺利地穿越外白渡桥进入苏州河(图4—29)。这是由于中跨钢梁既大又重，一条拖轮的牵引力太小，所以采用多条拖轮来牵引。但就一般情况来说，我们自然很容易想到，是不是可以用一条牵引力足够大的拖轮来代替，这样也就不会影响航道上其他船只的通行了。显然，在这里用一条拖轮牵引时，它的作用效果应该跟原来用多条拖轮牵引时的效果等同。如果这一设想能够实现，那么就可以把这一条拖轮的牵引力叫做那几条拖轮的牵引力的合力，而原来那几条拖轮的牵引力就叫做分力。因此合力和几个分力的作用是等效的，它们是可以相互替代的。

求几个已知力的合力，叫做力的合成。

共同作用在一个物体上的力，它们的大小和方向可以不同，它们的作用点，可以在物体的同一点上，也可以不在同一点上。我们把作用在物体的同一点上，或者力的作用线可以相交在同一点上的力，叫做共点力。

图4—30(a)中，悬挂电灯的电线与水平拉绳的结点0处受到三个力的作用：F'_1、F'_2和F'_3，这三个力是共点力。在图4—30(b)中，用两台起重机吊着的化工厂的分馏塔受到F''_1、F'_2和F'_3三个力的作用，这

三个力的作用点虽然不在同一点上，但是三个力的作用线都相交在 O'点，所以它们也是共点力。

力的平行四边形定则

共点力的合力和分力在大小和方向上有怎样的关系呢？我们用图 4—31(a)所示的实验装置来研究。把一根橡皮绳的 A 端固定在贴有白纸的竖直板上，B 端与两根细绳相连，两根细绳的另一端分别跨过两个定滑轮后再挂上钩码，两个滑轮可以在竖直板上的弧形槽内移动并可固定下来。实验时，在两根细绳末端挂上不同数目的钩码，调节滑轮 C 和 D 的位置，使橡皮绳 B 端沿竖直方向伸长到 B'点，把滑轮固定下来，在纸上沿细绳画出它们的方向，记下它们所挂的钩码数。取去两根细绳，改用一根细绳挂上适量的钩码，使橡皮绳的 B 端仍沿着竖直方向伸长到 B'点，发生相同的形变，记下这时细绳上所挂的钩码数。

在白纸上标出 O 点，表示橡皮绳 B 端所在位置 B'(力的作用点)，选定一个钩码所受重力的大小为标度，沿原来两根细绳的方向作出线段 OP、OQ，则 OP、OQ 分别表示原来两根细绳的拉力(即分力)F_1、F_2，再沿竖直方向作出线段 OR，表示后来用一根细绳时的拉力(即合力)F，然后依次用虚线连接 PR 和 QR[图 4—31(b)]，可以看出 OPRQ 是一个平行四边形。

■

可见，两个互成角度的共点力的合力，可以用表示分力 F_1、F_2 的线段 OP、OQ 为邻边，作出的平行四边形的对角线来表示，对角线的方向正好跟合力的方向相同，对角线所表示的力的大小，正好等于合力 F 的大小。

我们可以重做一次实验：使橡皮绳 B 端在两个力作用下沿斜向伸长到 B'点[图 4—32(a)]，然后改用一根细绳跨过滑轮 E，挂上钩码，钩码产生的拉力使橡皮绳 B 端也沿斜向伸长到 B'点，记下实验中得到的数据，也可以用表示力 F_1、F_2 和 F 的线段作出一个平行四边形[图 4—32(b)]，从而得到跟前面实验相同的结果。大量实验证明：无论怎样改变共点力 F_1、F_2 的大小和它们之间的夹角，同样可以得到上述的结果。

互成角度的两个共点力的合力，可以用表示这两个力的有向线段作邻边画成的平行四边形的对角线表示。这就是力的平行四边形定则。

不但是力，所有矢量(如位移、速度和加速度等)的合成也都遵循平行四边形定则。平行四边形定则也是矢量加减运算的定则。

如果我们在做实验时，保持两根细绳上所挂的钩码数不变，而改变滑轮位置，使两根细绳间的夹角变小，我们就会发现橡皮绳将伸得更长，说明两根细绳拉力的合力增大[图 4—33(a)]。相反，如果增大两绳间的夹角，橡皮绳的伸长量就会减小，说明两根细绳拉力的合力减小[图 4—33(b)]。这就表明在分力 F_1 和 F_2 的大小不变时，它们的合力 F 的大小跟两个分力之间的夹角 θ 的大小有关：夹角减小，合力变大；夹角增大，合力

变小。

■

当两个分力在同一直线上，方向相同，即它们的夹角θ＝0°时，合力的大小等于两个分力大小之和，合力的方向和两个分力方向相同[图4—34(a)]。当两个分力在同一直线上，方向相反，即它们的夹角θ=180°时，合力的大小等于两个分力大小之差，合力的方向和分力中数值大的那个分力的方向相同[图4—34(b)]；如果这两个分力的大小F_1=F_2，那么合力F=0。

当两个分力F_1和F_2之间的夹角θ=90°，那么用表示分力F_1和F_2的有向线段所作出的平行四边形就成为一个矩形(图4—35)，合力F的大小和方向，可以用以下的式子来计算和表示：

$$F2 = F_1^2 + F_2^2, \qquad \mathrm{tg}\,\alpha = \frac{F_2}{F_1}。$$

有两条拖轮牵引一艘驳船，它们的牵引力分别是F_1=3000牛，F_2=2000牛，牵绳之间的夹角θ=40°。假如只用一条拖轮来牵引，而产生的效果跟原来的相同，试用作图法求出这条拖轮的牵引力F的大小和方向。

解这一条拖轮的牵引力，实际上就是原来两条拖轮牵引力的合力。选定1厘米长的线段代表1000牛，以O点为作用点，以2厘米长的线段OB和3厘米长的线段OA分别表示拉力F_2和F_1，并使它们的夹角θ＝40°。以F_1和F_2为相邻的两个边作平行四边形,然后从O点作平行四边形的对角线OC，OC即为代表合力F的有向线段(图4—36)。量得对角线OC的长为4.7厘米，用量角器量得F与F_1的夹角为16°。所以，F_1和F_2的合力F，也就是这一条拖轮的牵引力，它的大小等于4700牛，方向与拉力F_1所成夹角等于16°。

[例题2]

用绳悬住的重物，所受重力是40牛。现在用30牛的拉力，沿水平方向把它拉开[图4—37(a)]，求重物所受重力和拉力的合力。

■

解　按题意运用平行四边形定则作出力F、G和它们的合力R的示意图，如图4—37(b)。可以看出表示F、G和R的线段分别是直角三角形的两条直角边和斜边。根据勾股弦定理和三角函数关系，得合力

$$R = \sqrt{F^2 + G^2} = \sqrt{30^2 + 40^2}\,牛 = 50牛，$$

$$\mathrm{tg}\,\theta = \frac{F}{G} = \frac{30牛}{40牛} = 0.75，\theta = 36.9°。$$

即合力是50牛，与竖直方向成36.9°夹角。

两个以上共点力的合成，可以用逐步合成的方法，先用平行四边形定则求出其中任意两个力的合力，再以这个合力跟第三个力求合力，依次类推，直到把所有的力都合成完，最后求得的合力就是这些力的合力。

思考

1．两人合提一个水桶，每人所用的力一定比一个人独自提水桶用的力小吗？为什么？2．两个大小相等的共点力，在它们之间的夹角由 0°变到 180°的过程中，合力的最大值和最小值相差多大？

等效替代的方法

等效替代是研究物理学常用的方法。在初中学习电学知识时，已经知道电阻串联时的总电阻大于任一个串联电阻的阻值，等于各串联电阻之和。因此，在进行电路计算时，可以把串联电路中各部分的总电阻看成是一个电阻，而其阻值就等于各串联电阻的阻值之和，这样便可简化电路。这就是一种等效替代的方法。电阻并联时总电阻将小于任一分路的电阻，总电阻的倒数等于各分路电阻的倒数和。在电路中如有若干电阻并联(如家庭电路中各家用电器的连接)，也可看成电路中只有一个电阻，这个电阻的倒数就等于各分路电阻的倒数和。这也是一种等效替代。

在物体受到多个力作用时，只需求出物体所受的合力，然后研究物体在这个合力作用下运动状态可能发生的变化，这同样可以简化问题。等效替代的方法在今后的学习中还会多次用到。

练习二十一

1．两个共点力大小都等于 9 牛，互成 120°角，用作图法求它们的合力，比较一下合力跟分力的大小，并看看这个合力的方向跟两个分力方向间的夹角有什么关系？

2．把一只圆柱形锅炉放在两个砖砌的支墩上(图 4－38)，已知两个支墩对锅炉的支持力分别作用于它们跟锅炉的接触处，力的作用线都指向锅炉截面的圆心，并且相互垂直，它们的大小各是 2000 牛，试求这两个支持力的合力。

3．为了防止支架倾倒，在它的两侧对称地用钢丝绳拉紧，并且固定在地面上。如果钢丝绳与竖直方向的夹角为 30°(图 4－39)，它们的拉力 F_1 和 F_2 的大小都等于 300 牛，试求它们的合力。

■

4．两个小孩分别用 12 牛向东的力和 5 牛向南的力，去拉一块放在水平桌面上的木块，两力都平行于桌面，这时木块所受合力多大？方向如何？

5．4 牛和 8 牛的两个力，沿同一水平面作用于一个物体，它们的合力能够等于 3 牛、4 牛、10 牛、12 牛、15 牛吗？为什么？

七、力的分解

架设在上海恒丰北路上跨越铁路的斜拉桥(图 4－40)，是我国第一座预应力混凝土独塔单索面斜拉桥，全长 614 米，矗立的桥塔两侧各有 30 根钢索拉住桥面，形成竖琴式结构。每侧钢索在空间的排布都是平行、等距的，它们分担着桥面的自重以及通过车辆和行人时的负载，实质上，这是一种支架结构。我们只要留意观察，还会看到一些建筑物上也有类似结构，如北京国家奥林匹克体育中心的顶棚，采用双柱式支架结构，每侧用 8 根平行钢索拉住(图 4－41)。最简单的这类支架结构就像马路上的路灯支架(图 4－42)，它是由固定在立柱上的拉杆和撑杆所组成的。由于路灯受到重力的作用，它对支架端点有向下的拉力，支架承受了这个拉力，悬住了路灯。为了研究上述斜拉桥和顶棚上的拉索是怎样起到分担力的作用的，路灯支架为什么要采取这样的结构，支架的拉杆和撑杆在悬住路灯时，分别受到什么方向的力的作用等等问题，就必须学习有关力的分解的知识。

■

力的分解

把一个已知力分成几个分力叫做力的分解。最简单的情况，是在已知力的作用点上，把这个力分解成两个共点力。

把一个力分解成两个共点力是共点力合成的逆运算，也遵循平行四边形定则。就是说，如果把已知力 F 作为某个平行四边形的对角线，那么这个平行四边形的两个邻边就表示两个分力 F_1 和 F_2［图 4－43(a)］。

但是，如果没有其他条件，同一对角线，可以作出无数个不同的平行四边形，那么一个已知力 F 就可以被分解成无数对大小、方向不同的分力［图 4－43(b)］。因此，一个已知力究竟应该怎样分解，就必须附带一定的条件，这些条件是根据力的实际作用效果来决定的。现在我们就通过对几个典型例子的分析来进行研究。

斜面上物体所受重力的分解

骑自行车下桥时，不必用力蹬踏，自行车会自动从桥顶驶下，而且桥坡越陡，向下冲得就越快(图 4－44)。这是什么原因？是不是重力在起作用呢？我们可以用下面的实验来进行研究。

■

把一块中间开槽的光滑木板，平放在水平桌面上，把一辆实验小车放在木板上，由于小车受到的重力被木板的支持力(弹力)所平衡，小车将保持静止不动。如果把木板的一端抬高，成为斜面，小车就会沿着斜面下滑，同时紧压着斜面，显然这时重力不能被木板的支持力所平衡。这时如果用一个弹簧秤从斜面顶端，通过细绳拉住小车，再把一个圆盘测力计固定在木板下面，从木板的槽孔中支住小车(图 4－45)，我们就会清楚地看到弹簧秤和圆盘测力计上都显示出读数，它们分别表明放在斜面上的物体所受

重力的两个作用效果，即一方面使物体沿斜面下滑，另一方面又使物体紧压在斜面上，对斜面产生压力。因此，根据实际作用效果，重力 G 应该按照平行于斜面方向和垂直于斜面方向分解成两个分力。图 4－46 就是物体所受重力分解成这两个方向分力的示意图，其中 F_1 是物体所受重力平行于斜面方向的分力，它的作用是使物体沿斜面下滑。F_2 是物体所受重力垂直于斜面方向的分力，它的作用是使物体紧压斜面，对斜面产生压力。实验证实了 F_1 和 F_2 的合力也就是重力 G。

如果已知斜面的倾角 θ，就可以求出分力 F_1 和 F_2 的大小。即

$$F_1=G\sin\theta，F_2=G\cos\theta。$$

从这两个计算式中可以看出，F_1、F_2 的大小跟斜面的倾角 θ 有关，斜面的倾角 θ 越大，F_1 越大，F 越小。如果改变图 4－45 所示实验装置中斜面的倾角，就可以从弹簧秤和圆盘测力计上分别读出 F_1 和 F_2 的大小，根据读数的变化来加以验证。

桥坡也是一个斜面，车辆上桥时，重力的分力 F_1 会阻碍车辆前进；车辆下桥时，分力 F_1 会使车辆运动加快。为了减小车辆上坡时所需的牵引力，为了下坡时行车的安全，在设计桥梁时，引桥都做得很长，或者采用螺旋形的引桥，以减小桥的坡度，使倾角 θ 变小，F_1 不致过大。例如上海南浦大桥浦西引桥采用双螺旋结构，引桥的最大坡度不超过 4%。盘山公路(本章导图 4)都修筑得曲曲折折也是这个道理。

塔吊吊臂端点所受拉力的分解

塔吊(本章导图 1)在吊住货物时，货物通过悬绳使吊臂端点受到竖直向下的拉力 F，F 的大小等于货物所受重力 G［图 4－47(a)］。拉力 F 对塔吊上的钢索和水平吊臂将产生怎样的作用呢？

■

如果用细绳代替钢索，用轻质木杆代替吊臂，制作一个支架模型，并在绳间和杆间分别接入圆盘测力计，把它们固定在铁架台上。然后在支架端点挂一重物，从两个圆盘测力计的指针偏转方向就可以看出，细绳受到拉力作用，而轻质木杆则受到压力作用［图 4－47(b)］。这就形象地表明：塔吊吊住货物，吊臂端点受到向下拉力 F 作用时，它的钢索就受到沿 NO 方向的拉力 F_1，吊臂就受到沿 OM 方向的压力 F_2。F_1 和 F_2 是吊臂端点受到力 F 作用时产生的，因此 F_1 和 F_2 是 F 的两个分力。

这两个分力的大小可以按平行四边形定则，用作图法来确定。

如果图 4－47 中吊住的货物重 2000 牛，钢索 NO 与竖直方向的夹角 θ =60°。用 1 厘米长的线段为标度，表示 1000 牛。先沿竖直方向作出拉力 F，然后根据平行四边形定则完成平行四边形 OACB［图 4－47(c)］，使∠AOC=60°，这时线段 OA 和 OB 就分别表示分力 F_1 和 F_2，根据标度，即可量得 F_1=4000 牛，F_2=3450 牛。

因为∠NMO 是直角，△AOC∽△ONM，所以也可以用 $F_1=F/\cos\theta$，$F_2=F\mathrm{tg}$

θ，计算出 F_1 和 F_2 的大小。

从上述两个例子的分析中可以知道：在力的分解时，首先要从实际出发，研究这个力有哪些作用效果，然后找出具体条件，并根据条件进行分解，才能得到正确解答。

力的合成和分解在工程技术方面有着重要的现实意义，例如桥梁的建筑。从我国古代的拱桥(本章导图 2)到现代的斜拉桥，都是利用了力的合成和分解原理，把桥面所受的力，分担到桥墩和塔柱上去的。

力的分解必须满足的条件

为了使分力有确定的解，力的分解需满足一定的条件，通常有下列几种情况：

1．已知合力和两个分力的方向，则可确定两个分力的大小；

2．已知合力和一个分力的大小和方向，则可确定另一个分力的大小和方向；

3．已知合力和一个分力的大小和另一个分力的方向，则可确定一个分力的方向和另一个分力的大小(可能有两解)；

4．已知合力和两个分力的大小，则可确定两个分力的方向。

思考

1．一根细线可以挂住一个大砝码，如果把这个砝码挂在这根细线的中央［图 4－48(a)］，拉开细线两端［图 4－48(b)］，当两段细线之间的夹角 θ 增大到一定程度时，细线拉断了，这是什么原因？

■

2．甲、乙两位同学体重相同，在单杠上做引体向上的动作时，甲两臂张开成 10°角，乙两臂张开成 30°角，哪位同学手臂的拉力大些？

3．有经验的司机为了把陷在泥坑里的汽车拉出来，常用一根结实的绳子，把它的两端分别拴住汽车和绕住树桩，然后一面在绳子的中央用力拉绳子(图 4－49)，一面不断收紧绕在树桩上的绳子，并在轮子下面填进石块或木板，这样就可以用较小的力逐步把汽车拉出泥坑。你能说出其中的道理吗？

练习二十二

1．根据力的平行四边形定则，把一个已知力分解成两个分力，每个分力都跟原来的力成 60°角，这两个分力的大小跟原来的力有什么关系？

2．用绳索和轻质撑竿吊起所受重力为 750 牛的箱子，在绳索 AB 水平、轻质撑竿 AC 跟竖直方向成 60°角时(图 4－50),绳索 AB 和撑竿 AC 各承受多大的力？方向怎样？

■

3．装有小轮的箱子所受重力为 150 牛，放在光滑的水平地面上。人们用大小为 50 牛、跟水平方向成 30°角的力去推它或者拉它［图 4－51(a)、(b)］，求在这两种情况下，该力在水平方向上，使箱子前进的分力和在竖直方向上的分力跟重力的合力。

4．图 4—52 是一种压榨机的示意图，OA 是推杆，OB 和 OC 是挺杆，O、B、C 处都以铰链相接，D 为压块，E 为有孔容器。当以水平力 F 作用于推杆时，OC 挺杆就会有力作用于压块 D，使它紧压容器 E 中的物体。如果 F=20 牛，∠BOC=150°，试用作图法求沿挺杆 OC 的作用力 Fc 的大小。

■

5．圆柱体所受重力为 100 牛，放在光滑的竖直平面和斜面之间。如果已知斜面的倾角 θ=30°(图 4－53)，试求重力沿垂直于两个接触面方向上的分力。

八、共点力作用下物体的平衡

物体处于静止或者做匀速直线运动的状态叫做平衡状态。要使物体在力的作用下处于平衡状态，作用在物体上的力就必须满足一定的条件，这个条件叫做平衡条件。

懂得物体的平衡条件，对生活和生产都是非常必要的。从一张课桌椅的安放，到一枚火箭在发射台上的安置，都离不开使它们达到平衡的要求。杂技演员和体操运动员在走钢丝和表演技巧运动(本章导图 3)时，首要的一点就是必须保持他们自身的平衡。

我们在初中已经学习过二力平衡条件，就是当物体受到两个共点力作用时，只有这两个力沿同一直线、大小相等、方向相反，物体才能保持平衡。矗立在地面上的建筑物，同时受到重力 G 和地面弹力 N 的作用［图 4－54(a)］。被起重机钢索吊住的集装箱，同时受到重力 G 和拉力 F 的作用［图 4－54(b)］。这些物体都处于平衡状态，所以它们所受的这两个力必然是大小相等，方向相反，并在同一直线上的。如果从力的合成角度来看，很明显，这两个力的合力等于零，这就是在两个共点力作用下物体的平衡条件。

■

现在，我们再进一步研究，在三个共点力作用下物体的平衡条件。

将研究力的合成时所用的装有滑轮的竖直板倒过来放置(图 4－55)，用三根细绳系住一个轻质小圆环 O，将其中两根细绳跨过定滑轮，然后在三根细绳的另一端分别挂上适当数量的钩码，并调节两个滑轮的位置，使圆环 O 受到三个力的作用而保持平衡状态［图 4－55(a)］。根据所挂钩码的数量，记下三根细绳作用在圆环 O 上的拉力 F_A、F_C 和 F_C 的大小，并量出

三根细绳间的夹角θ_1、θ_2和θ_3，作出F_A、F_B和F_C的图示［图4－55(b)］，求出F_A和F_C的合力F。可以看出，F和F_B是在同一直线上、大小相等、方向相反的两个力，所以它们的合力等于零，也就是F_A、F_B和F_C这三个共点力的合力等于零。可见，三个共点力作用下物体的平衡条件是这三个力的合力等于零。

实验同样可以证明，在三个以上共点力作用下物体的平衡条件也是这些力的合力等于零。这样，我们就可以得出结论：**在共点力作用下物体的平衡条件是合力等于零。**

做匀速直线运动的物体也是处于平衡状态的。所以在共点力作用下，做匀速直线运动的物体，所受共点力的合力也应该等于零。例如起重机钢索吊住的集装箱，被匀速竖直向上提起，在不考虑空气阻力的条件下，钢索拉力F和重力G的合力等于零；如果考虑空气阻力，拉力、重力和阻力这三个力的合力也等于零。再如沿平直公路匀速行驶的汽车，受到发动机牵引力F、摩擦阻力f、重力G和路面弹力N的共同作用(图4－56)，这四个力的合力一定也等于零。在竖直方向上，重力和弹力大小相等，方向相反；在水平方向上，牵引力和阻力大小相等，方向相反，即G=N；F=f。

■

掌握共点力的平衡条件，在工程技术中有着极为重要的意义。原先平衡的物体，如果受力情况有变化，平衡条件就会受到干扰，物体的平衡就可能遭到破坏，从而造成事故。

我们可以利用铁架台制作一个简单的支架模型进行观察。如图4－57所示，OA是一段绳索，OB是一根水平放置的木杆，它的B端顶在铁架台的直杆上，另一端有一块轻质小方木M。小方木的上、下分别与绳索和挂钩码的悬绳相连接。当在悬绳下挂上钩码时，小方木M就紧压在木杆上。现在把小方木作为研究对象，可以看出，它受三个共点力作用而保持平衡(小方木自身所受重力可忽略不计)：一是悬挂钩码的悬绳的向下拉力F_1；二是绳索沿OA方向的拉力F；三是木杆对它的支撑力(弹力)F_3，方向沿着木杆，由B指向O，它们的合力为零(图4－58)。这时，如果将木杆取走(撤去力F_3)，或将绳索剪断(取消力F_2)，小方木就都不能再在原来位置保持平衡。

［例题1］

受到400牛重力的钢球悬挂在由轻质撑杆和绳索组成的支架上，如图4－59(a)所示。已知θ_1=45°，θ_2=75°，试用作图法求撑杆和绳索的支撑力和拉力。

解　撑杆、绳索和悬绳连接的O点受到三个力作用而保持平衡，这三个力分别是：悬挂钢球的悬绳产生的向下拉力F_1、绳索的拉力F_2和撑杆的支撑力F_3。在这三个力中，F_2和F_3的合力R应该跟F_1大小相等，方向相反。因此根据题意将R分解后即可求得F_2和F_3的大小。

取 1 厘米长的线段为标度，表示 200 牛，在竖直方向上作线段 BO=2 厘米，表示力 R=400 牛，完成平行四边形 ABCO，使∠AOB=θ_1=45°，∠BOC=θ_2=75°［图 4-59(b)］。用标度量度 OC，得 F_2=330 牛；量度 OA，得 F_3=450 牛。所以绳索的拉力是 330 牛，撑杆的支撑力是 450 牛。

■

［例题 2］

用弹簧秤沿着光滑斜面的方向将一块所受重力为 5 牛的木块匀速向上拉，这时弹簧秤上的读数是 1.4 牛，求斜面对木块的弹力的大小。

解　木块受到的重力 G 和弹簧秤的拉力 F 以及斜面的弹力 N，都可看成作用在木块的重心上。已知木块保持匀速直线运动，所以 G、F 和 N 是三个共点的平衡力。因此，弹力 N 应该跟 G 和 F 的合力 R 大小相等、方向相反。从图 4-60 的力图上可以看出，在表示 F、G 和 R 的线段 OA、OB 和 OC 所组成的平行四边形中，△OBC 是直角三角形，所以

$$OC^2=OB■-BC_2,$$

即 $$R=\sqrt{G^2-F^2}=\sqrt{5^2-1.4^2\text{牛}}=4.8\text{牛},$$

$$N=R=4.8\text{牛},$$

斜面对木块的弹力的大小是 4.8 牛。

S：在解题时，力的合成、分解和平衡，不就是同一回事情吗？

T：它们不是一回事。力的合成、分解是一种方法；平衡是一种状态，平衡有一定的条件。但是，在几个共点力平衡的情况下，其中任一个力一定跟另几个力的合力大小相等、方向相反，因而在解决平衡问题时，也可以用力的合成或力的分解作为方法去取得结论。

思考

1．风筝在重力、风力和绳子的拉力共同作用下保持平衡。已知绳子与水平方向成 30°夹角斜向下方，绳子对风筝的拉力是 20 牛。如果绳子突然断了，你知道这时的重力和风力的合力多大？方向怎样？

2．静止在斜面上的物体，是在重力跟哪几个力的共同作用下，保持平衡状态的？如果知道斜面的倾角 θ，你能利用力的分解和力的平衡，求出这几个力的大小跟重力之间的关系吗？

练习二十三

1．将一个受 10 牛重力作用的砝码放在水平桌面上，用 4 牛竖直向上的力提住，这时桌面对它的支持力是多少牛？用 3 牛的推力，沿与水平夹 60°角斜向下的方向去推一块放在水平桌面上的木块，木块没有被推动。已知木块所受重力是 10 牛，木块受到桌面的支持力和静摩擦力各是多少牛？

2．起重机将重物匀速吊起时，吊钩受到向上的牵引力 F_1，它通过两

根斜向的钢索悬住重物，两根钢索间的夹角为 60°，钢索对吊钩的拉力 F_2 和 F_3 大小相等(图 4－61)。如果已知 $F_1 = 2.0\times10^4$ 牛，求每根钢索对吊钩的拉力。

■

3．一个骑自行车的人，驶上倾角为 15°的斜坡，人和车共受重力 700 牛，同时受到 20 牛平行于斜坡向下的阻力，那么，这辆自行车匀速上坡时，沿斜坡方向向上的动力需多大？

4．沿光滑的墙壁，用轻质网兜在 O 点挂着一只足球，足球所受重力是 G，绳子与墙壁间的夹角是 θ，球与墙壁的接触点为 B(图 4-62)，求绳子对网兜的拉力和墙壁对球的弹力。

阅读材料　上海南浦大桥

为了开发浦东，加强和方便浦江两岸的经济文化和人民生活的联系，建造了上海南浦大桥(图 4－63)。坐落在市区的南浦大桥由主桥、主引桥和分引桥组成。主桥是一跨过黄浦江的双塔双索面斜拉桥，全长 846 米，采用钢梁与钢筋混凝土板相结合的叠合梁结构，中孔跨径为 423 米，利用桥塔伸出的高强度斜拉钢索作为主梁的支承，用它代替中间桥墩。在当今世界同类桥梁中，南浦大桥的跨度仅次于西班牙的罗那桥和加拿大的安娜西斯斜拉桥，堪称世界第三大斜拉桥。

在黄浦江的东、西两岸，各设有一座宽 7 米、厚 5 米、高 150 米的折线式“H”型钢筋混凝土结构的桥塔，塔座基础选用直径 900 毫米、深达 50 余米的钢管桩群桩基础。每座桥塔两侧各以 22 对钢索连结主梁，索面成扇形布置。主桥高 50 米，通航净高 46 米，可通航 5 万吨级的巨轮。主桥桥面宽度为 30.35 米，它包括 6 个机动车道和两个 2 米宽的观光人行道。

■

南浦大桥东西两侧设置的引桥全长为 7500 米，采用预应力钢筋混凝土梁体和钢筋混凝土的墩台结构。浦西侧引桥长 3754 米，采用复曲线并呈螺旋形，主引桥的圆环直径为 220 米，绕行一圈半后，上下分两环分岔衔接中山南路和陆家浜路。衔接陆家浜路的分引桥为双向四车道，衔接中山南路的分引桥为双向八车道。浦东侧引桥长 3746 米，主引桥沿着桥位向东跨过浦东南路直通杨高路，以后，将继续向东延伸至规划中的东海之滨第三国际机场。分引桥则集中于主桥北侧，采用两个复曲线长圆环，绕行半圈后，与浦东南路上下行车道相接。

南浦大桥以优美的造型、独特的风格、刚劲挺拔的雄姿，呈现在人们的面前，它已成为上海一个重要的游览观光的景点，它的斜拉钢索，大跨主梁“H”型桥塔和螺旋形、低坡度引桥都充分体现了我国桥梁工程力学方面的重大成就(课本彩图 10)。

本章学习要求

1．理解力的概念。
2．会用图示法表示力。
3．理解重力。
4．理解弹力产生的条件和弹力的方向。
5．知道静摩擦力和最大静摩擦力。
6．理解滑动摩擦力，理解动摩擦因数。
7．知道物体受力情况的分析。
8．知道共点力。
9．理解合力和力的合成。
10．会用力的平行四边形定则求合力。
11．理解分力和力的分解。
12．会用力的平行四边形定则求分力。
13．理解共点力作用下物体的平衡条件。

复习题

1．要使所受重力为 5000 牛的木材在雪地上作匀速滑动，必须用 175 牛、沿水平方向的力去拖它，求木材与雪地间的动摩擦因数。

2．放在斜面上的物体，在斜面倾角 θ 有所增大时，如果物体仍能保持静止不下滑，下面几种说法中正确的是 [ ]

(A)由于重力沿斜面方向的分力 F_1 增大时，物体受到的静摩擦力也增大；

(B)由于重力使物体紧压斜面的分力 F_2 增大，物体受到的静摩擦力就增大；

(C)由于重力和静摩擦力都没有变化的缘故。

3．用作图法把一个 20 牛的力分解成两个 40 牛的分力，求这两个分力间的夹角。

4．在一直线上的 5 牛、10 牛、14 牛三个力，在什么情况下它们的合力最大？什么情况下它们的合力最小？最大值和最小值各等于多大？

5．如图 4-64 所示，用一端固定在天花板上的细绳 AC 将原来竖直悬挂电灯的线拉开，使线与竖直方向偏离 30°角。如果灯所受重力为 5 牛，细绳 AC 上的拉力是 2.5 牛，试用作图法求出电线 BC 段所受拉力的大小和细绳 AC 的方向。

6．如图 4-65 所示，支架的轻质横梁 BC 是水平的，拉杆 AB 跟横梁成 45°角，在支架的端点 B 处挂上所受重力为 800 牛的物体，横梁和拉杆各受到多大的作用力？它们的方向怎样？用计算法求解。

■

7．有人说：倾角为θ的光滑斜面，放上物体时，物体受到的合力总是等于 Gsinθ。你认为对吗？试分别用力的分解和合成来证明。

8．滑雪运动员所受重力为 700 牛，他沿着山坡滑下。山坡的倾角是 30°，滑雪板和雪坡之间的动摩擦因数是 0.04，求滑雪运动员所受到的合力。

9．一块长 0.4 米，宽 0.2 米的薄木板，它的左下角 E 用光滑铰链连接在竖直墙上，左上角 A 用一段铁丝沿水平方向拉住(图 4-66)。薄木板所受的重力为 10 牛，作用在它的重心 C 上，求铁丝和铰链对木板的拉力和支持力的大小和方向。(提示：薄木板所受的铁丝拉力、铰链支持力和重力的作用线通过同一点。)

10．跳伞空降的人，由于受到水平方向的风力而沿着和竖直方向成 30°角的方向匀速下降，如果人和伞共受重力为 700 牛，求他降落时所受的空气阻力。

牛顿定律

Newton'sLaws

1．牛顿

2．滑雪运动员利用惯性腾越

3．前进中的划艇

4．歼击机着陆

第 11 届亚运会在北京举行，盛大的开幕式上，仰望天空，可以看到一批扮成仙女的运动员，驾驭着红色降落伞，撒着彩花，从空中沿着曲折的路线徐徐下降，一架直升飞机在体育场的上空盘旋，一艘标有第 11 届亚运会标记的飞艇静静地漂浮在空中，情景十分动人(图 5-1)。其实我们只要注意观察，任何时候都会发现周围的许多物体是处在各种不同运动状态之中的。日月星辰总是按各自的规律不停地运行；停在停车场的汽车是静止的，马路上的汽车却在不断地变换着速度来往穿梭行驶，大楼的观光电梯、自动扶梯则以不变的速度升降着。人们不禁要问为什么物体会做这样或那样的运动呢？关于怎样维持物体运动在历史上是曾经有过不同解释的。

历史上对维持物体运动的不同解释

古希腊哲学家亚里士多德把宇宙中的运动分为两类。一类运动是“ 自然运动 ”，如地面上的重物体下落和轻物体上升，以及天体的运转，这类运动不需要任何外力的作用。而另一类是“ 非自然运动 ”，如物体被举高、被推动、被迫离开它们的自然位置。亚里士多德及其学派从直接经验出发，认为这时必须有力作用在物体上，物体才能离开自然位置做非自然运动。因此为了维持物体的非自然运动，必须有力持续地作用在物体上；没有力的作用，运动的物体就要停下来。

在亚里士多德以后的 2000 多年里,对物体运动状态变化规律的研究一直没有多大的进展。直到 17 世纪，意大利的著名物理学家伽利略才揭示了运动现象的本质，指出了亚里士多德的观点的错误。伽利略抛弃了自然运动和非自然运动的观点，并且推断出：一旦物体具有某一速度，只要没有加速或减速的原因，这个速度就将保持不变。这就是说，**做匀速直线运动是物体固有的属性，并不需要力来维持。**

这是对运动的两种截然不同的解释。

伽利略的理想实验

伽利略是怎样得出上述结论的呢？他并没有脱离日常经验，而是在经验的基础上分析推理得出的。

伽利略把系在悬绳一端的摆球，拉开后从静止释放，他观察到摆球沿着一条圆弧摆动，一直升到接近于开始时的高度［图 5-2(a)］。如果用一枚钉子改变摆球的运动路线，可以看到，摆球仍然能升高到接近于开始时

那样高度的水平面［图 5-2(b)］。基于这样的事实，他提出了下面这个著名的理想实验。

■

如图 5-3(a)所示，把两个斜面对接起来。让静止的小球沿一个斜面滚下来，以后又滚上另一个斜面。假设没有任何摩擦阻力，小球将上升到原来静止时的高度。伽利略推论说，如果减小第二个斜面的倾角［图 5-3(b)］，小球在这个斜面上，也将像摆球改变了运动路线一样，仍要到达原来的高度，这样它就会通过更长的距离。如果继续减小第二个斜面的倾角，小球在第二个斜面上通过的距离还会继续增大。当把第二个斜面改变成水平面时，小球将不能到达原来的高度，但却会沿着水平面，以恒定的速度一直运动下去［图 5-3(c)］。小球这时在运动方向上并没有受到力的作用。这就表明力不是维持物体运动的原因。

思考

1．亚里士多德认为重物体下落和轻物体上升时，物体都不需任何外力的，你认为是这样的吗？这时物体是不是没有受到力的作用？

2．运动着的小球在水平玻璃板面上滚得很远，滑动着的冰块在结了冰的河面上滑得也很远，你能从这些日常生活经验中，认识到伽利略对运动所作的解释吗？说说你的推理。

伽利略在科研方法中的贡献

伽利略在研究自由落体运动时，利用斜面做实验，论证了当斜面倾角增大到 90°，作自由落体的小球仍做匀加速运动，而且一切落体的加速度都相等。

伽利略在研究力不是维持物体运动的原因时，在实验基础上论证了当斜面倾角减小到 0°，小球就能以恒定的速度一直运动下去。

以上的理想实验，都是从可靠的事实出发，抓住主要因素，忽略次要因素，通过抽象思维，把实验结果合理外推到实验条件无法达到的范围，从而得出结论，更深刻地反映自然规律。伽利略所创建的这种通过理想实验探求自然规律的方法不仅成了科学研究中的一种重要方法，而且它所包含的观察、假说、推论、验证、修正等一系列研究过程，也成了今天科研工作中的一种重要形式。伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，它标志着物理学的真正开端。

一、牛顿第一定律

英国科学家牛顿(Isaac Newton，1642—1727)在伽利略等人论断的基础上，根据自己的研究，系统地总结了力学的知识，在 1687 年发表的名著

《自然哲学的数学原理》中提出了三条运动定律。这三条运动定律后来被人们总括起来称为牛顿运动定律，构成了经典力学的基础。

牛顿第一定律

任何物体都保持静止状态或匀速直线运动状态，直到外力[1]迫使它改变这种状态为止。这就是牛顿第一定律。

物体保持原来的静止状态或匀速直线运动状态的性质叫做惯性(inertia)。牛顿第一定律指出了惯性是物体自身固有的属性，物体保持运动和静止一样，是依靠物体自身的惯性，并不需要外力来维持的。恰恰相反，物体要改变运动状态，才需要外力的作用。所以牛顿第一定律又叫做惯性定律。物体在任何情况下都具有惯性，惯性现象极为广泛地显现在我们的生活中。汽车突然开动或者加速时，乘客身体就会后仰，所以轿车坐椅上都置备了头枕，防止司机和乘客头部受震。在汽车突然制动时，乘客身体就会前倾，为了防止突然前倾造成伤害，在高速行驶的轿车里，乘客必须系好安全带。前进中的汽车或火车，因为惯性不容易立即停住，即使紧急刹车也要前进一段距离才能停住，所以交通规则对不同路段车辆的行驶速度都有明确规定，而且行驶中还要求保持足够的车距以确保安全。物体的惯性也常被利用在生活和生产中。例如，滑雪运动员利用惯性临空飞越冰坡(本章导图 2)；射出的箭和枪弹都是利用它们的惯性，才能射向靶子；汽车进站时，司机常先关闭油门，使发动机停止工作，让汽车依靠惯性，趟行一段距离以节省燃料。

任何物体都必定受到周围物体作用，不受外力作用的物体是不存在的，所以牛顿第一定律所描述的是一种理想化的状态。我们通常所看到的匀速直线运动状态和静止状态，都是物体在相互平衡的力作用下所呈现的状态，因为这时物体所受到的外力的合力为零。牛顿第一定律所描述的物体不受外力作用的理想化状态无论什么时候都不能够实现，但它使我们对实际的运动问题有了深刻的理解。

思考

1．射出一支箭，从箭刚要离开弓弦到它坠落地面的过程中，弹力和重力分别起什么作用？箭依靠什么在空中飞行？

2．有人说：“只有运动的物体才有惯性，静止的物体不具有惯性。”你认为这种说法对吗？为什么？

练习二十四

1．足球运动员带球前进，遇到对方运动员铲球阻拦时，常会被绊倒，这是什么原因？运动员被绊倒时总是倒向什么方向？

---

[1] 外力是指周围物体对被研究对象施加的力。

2．在列车车厢的地板上，放着一只底部装有轮子的行李箱，如果行李箱相对于车厢向前运动或者向后运动，表明这时列车的运动发生了怎样的变化？

3．在匀速行驶的车厢内，竖直向上抛出一个小球，它将回落在什么地方？

4．一块质量是 0.2 千克的木块，当它在倾角是 30°的斜面上保持静止或匀速下滑时，它分别受到的静摩擦力和滑动摩擦力相等吗？

二、牛顿第二定律

物体运动状态的改变

从牛顿第一定律知道，物体不受外力作用时，它的运动状态不变，即物体运动的速度的大小和方向都保持不变。那么，力是怎样使物体运动状态发生改变的呢？

列车出站时，由静止开始运动，并且速度不断增大，这是由于受到机车牵引力的作用。列车进站时，速度不断减小，最后停下来，这是由于受到制动阻力的作用。射出的炮弹，运动速度的方向不断发生变化，炮弹做曲线运动，这是由于炮弹受到重力的作用。总之，物体运动的速度的大小或方向发生变化时，都是由于受到了力的作用。**力是使物体运动状态发生改变的原因，而物体运动状态发生改变时，物体就有了加速度。所以说，力是使物体产生加速度的原因。**

S：力使物体的运动状态发生改变，是不是力的作用使物体失去了惯性？

T：不！应当想一想，为什么要在外力的迫使下，物体的速度才会改变？为什么物体做变速运动时，一刻也离不开外力的作用，外力一旦停止对它的作用，物体便又立即做匀速直线运动呢？这不正是由于物体总是顽固地要保持自己的运动状态不变吗？所以无论在哪一种情况下，物体都不会失去它的固有属性——惯性。

加速度和力的关系

一辆静止的汽车，发动后，可在十几秒钟的时间里达到 20 米/秒的速度，而一辆赛车则要求在起动后几秒钟内，速度就增大到 60 米/秒或者更大，对这两种不同的汽车应该分别装备什么样的发动机？发动机应该分别提供给它们多大的牵引力呢？长征系列运载火箭发射时，推力高达 10 牛，它将使火箭产生多大的加速度呢？既然力是使物体产生加速度的原因，那么，对相同质量的物体来说，加速度和力之间是否存在着一定的数量关系呢？

现在让我们通过实验来进行研究。取两辆相同质量的小车分别放在上、下两块带有定滑轮的光滑水平板上，小车的前端各系上细绳，细绳的

另一端跨过定滑轮各挂一个小盘，盘中分别放上不同数值的砝码，使两辆小车在不同的拉力作用下做匀加速运动。在两辆小车的后端也分别系上细绳，用一个夹子夹住这两根细绳以同时控制两辆小车，使它们同时开始运动和同时停止运动(图 5-4)。

小车所受水平拉力 F 的大小可以认为等于砝码和小盘所受总重力的大小[①]。利用这一实验装置可以测出这两辆质量相同的小车，在大小不等的恒定的拉力 F 作用下，在相同时间里发生的位移。多次实验结果表明：质量相等的两辆小车在相同时间内发生的位移 s，跟小车所受的拉力F成正比。由运动学公式$s=\frac{1}{2}at^2$，又可知道在相同时间里物体的位移 s 是跟它们的加速度 a 成正比的。因此我们可以得到结论：在物体质量相同的情况下，物体的加速度跟作用在物体上的外力成正比。即

$$\frac{a_1}{a_2}=\frac{F_1}{F_2}，\qquad 或\ \alpha\propto F。$$

这一规律给人们以启示，要使物体得到很大的加速度，就必须提供很大的作用力，所以竞赛用的汽车都要求所装备的发动机，能提供比一般汽车更大的牵引力。巨型喷气客机，起飞后要求在短时间内达到 800 千米/时～900 千米/时的巡航速率，所用发动机的推力就必须达到几十万牛，甚至近百万牛。

加速度和质量的关系

经验告诉我们，驾驶员开车时，在相同的牵引力作用下，空车加速得快，满载的车辆加速得慢，这就表明加速度还和质量有关系。在外力作用下物体产生的加速度大小和它本身的质量有怎样的关系呢？下面我们再通过实验来进行研究。利用图 5-4 的实验装置，在两辆小车所挂的小盘中放入相同的砝码，使它们所受拉力相同，而在其中一辆小车上加放砝码，使它们的质量不同。重做前面的实验，量得它们在相同时间里发生的位移。经过多次实验，可以得出如下的结论：在相同外力作用的情况下，物体的加速度跟物体的质量成反比。即

$$\frac{a_1}{a_2}=\frac{m_2}{m_1}，或\ a\propto\frac{1}{m}$$

这一规律使我们看到力是使物体运动状态发生改变的原因，而物体质量的大小，反映了物体运动状态改变的难易程度。所以为了使物体产生一定的加速度，对物体施加作用力的时候，还必须同时考虑物体的质量。

牛顿第二定律及其公式

---

① 在砝码盘和盘中砝码的总质量远小于小车质量的情况下，砝码盘通过细绳对小车的拉力可以近似地看作等于砝码盘和盘中砝码所受的总重力。

我们从实验中，已经得出不同大小的力作用于质量相同的物体时，加速度和力的关系；以及相同的力作用于不同质量的物体时，加速度和质量的关系。现在把这些研究结果综合起来，就可以得出加速度跟力或质量两者之间的关系：

物体的加速度跟所受作用力成正比，跟物体的质量成反比，这就是牛顿第二定律。写成公式就是

$$\alpha \propto \frac{F}{m}$$

或 $F \propto ma$。

上式也可以改写成等式 $F=kma$，式中 k 是比例常数。

国际单位制(SI)所规定的力的单位牛顿就是用这个公式定义的：使质量是 1 千克的物体产生 1 米/秒^{2}加速度的力是 1 牛。所以，

1 牛=1 千克·米/秒^2。

可见，如果加速度用米/秒^{2}做单位，质量用千克做单位，力用牛顿做单位，则前面公式中的比例常数 k=1，公式就可以简化成

$F=ma$。

运用牛顿第二定律的公式计算问题时，应该分别用牛顿、千克和米/秒^{2}作为力、质量和加速度的单位。并且要知道公式中 F 和 a 都是矢量，而且加速度 a 的方向和产生加速度的力 F 的方向总是相同的。

对牛顿第二定律的进一步认识

“力是使物体产生加速度的原因”这句话定性地反映了加速度和力的关系。而牛顿第二定律则定量地揭示了加速度跟力和质量的关系。物体的加速度由作用力所决定，同时又受到物体质量的制约。在这些问题的研究中，我们还可以从以下几方面更深刻地认识加速度跟力的关系：

1．独立性：作用在物体上的一个确定的力必定产生一个确定的加速度，不会因为物体同时受到其他作用力而有所影响——力的独立作用原理。

2．矢量性：加速度的方向始终跟产生这个加速度的力的方向一致。

3．瞬时性：加速度的大小和方向任何时刻都取决于力的大小和方向。物体在恒力作用下，产生恒定的加速度，做匀变速运动；力发生变化，加速度随即发生变化，物体就做变加速运动。

以上所讨论的是物体受到一个力作用时，产生加速度的情况。事实证明，物体同时受到几个力作用时，物体的加速度由这几个力的合力所决定，合力产生的加速度仍可用牛顿第二定律描述。这样，牛顿第二定律就可以推广为：

物体的加速度跟物体所受外力的合力成正比，跟物体的质量成反比；加速度的方向跟合外力的方向相同。写成公式就是

$$F_{合}=ma$$

从牛顿第二定律公式我们还可以看到：(1)当作用在物体上的合外力 $F_{合}=0$ 时，物体的加速度 a=0，这时物体就处于平衡状态，即保持静止或者作匀速直线运动；(2)当合外力 F 恒定不变时，物体的加速度 a 也恒定不变；(3)如果合外力 F 随时间变化，那么物体的加速度 a 也随时间作相应变化。

把牛顿第一、第二定律的内容联系起来研究，我们就不但对物体保持静止或匀速直线运动以及作变速运动的原因可以有全面的认识，而且对惯性和力这两个概念也可以有更为深刻的理解。

思考

1．你能理解日常所说的“船大调头难”的道理吗？

2．下面四种说法，哪些是对的，哪些是不对的，为什么？

(1)物体受到的合外力越大，物体的加速度越大；

(2)物体受到的合外力越大，物体的速度越大；

(3)物体受到的合外力越大，物体速度的变化越大；

(4)物体受到的合外力越大，物体速度的变化越快。

3．小汽车以恒定的牵引力加速行驶的过程中，如果遇到的阻力越来越大，在阻力还没有大于牵引力的情况下，小汽车的速度会不会减小，以致停车？

4．本章导图 4 中，歼击机着陆后，为什么要张开尾部的阻力伞？

练习二十五

1．质量为 14 吨的客车，起动时最大加速度为 1.6 米/秒^2，求客车发动机的最大牵引力。

2．长征系列运载火箭 CZ—2E(捆绑式大推力火箭)的质量为 4.64×10^2 吨，火箭发动机产生的推力为 6×10^6 牛，那么它能产生多大的加速度？

3．一个铁块在 16 牛的力作用下产生的加速度是 2 米/秒^2，这个铁块的质量是多大？要使它产生 3 米/秒^2 的加速度，需要对它施加多大的力？

4．10 牛的力使一个物体得到 2 米/秒^2 的加速度，这个物体的质量是多大？从这道习题的解答过程中，你是不是可以得出“物体质量跟它所受的外力成正比”的结论呢？为什么？

5．一个物体的质量是 2 千克，若同时受到一个向东的力 $F_1=10$ 牛，一个向西的力 $F_2=6$ 牛的作用，问它的加速度是多大？方向怎样？如果向西的力方向改为向南，这时它的加速度是多大？方向怎样？

质量和重力

当你去粮店买米时，首先关心的是要买多少千克的米，也就是关心米的质量数。买米后，准备把米袋扛上肩时，你关心的是这袋米能背起来吗？

也就是关心这袋米所受的重力你是否能够承担。这表明物体的质量和它所受的重力是两个有着不同含义的概念。

质量(mass)表示物体所含物质的多少。质量是没有方向的，是标量。在研究加速度和力的关系的实验中，我们看到：在相同的力作用下，质量小的实验小车，加速度大，它起动得快，加速得快；质量大的实验小车，加速度小，它起动得慢，加速得慢。这说明质量不同的物体，运动状态改变的难易程度是不同的。

在外力迫使物体改变运动状态时，物体运动状态改变的难易程度，是随惯性的大小而不同的。由此可见，质量大的物体惯性大，运动状态较难改变；质量小的物体惯性小，运动状态容易改变，质量是物体惯性大小的量度。就行驶中的车辆来说，满载的车辆远比空载的车辆难于加速和制动，这就是质量大，惯性大，运动状态难以改变的实例。

S：质量是物体所含物质的多少，质量又是物体惯性大小的量度，这两者有什么联系吗？

T：质量的这两种不同定义是有联系的。在初中我们是从质量是物体所包含的物质的多少来引入的。物体所包含的物质越多，它的运动状态越不容易改变，也就是它的惯性越大。反之，物体所包含的物质越少，它的惯性越小。所以质量也是物体惯性大小的量度。

重力(gravity)是由地球对物体的吸引而产生的。重力是使物体产生重力加速度的原因。物体所受的重力和物体的质量虽有本质的不同，但却有密切的关系。如果用 G 表示物体所受的重力，用 m 表示物体的质量，当物体自由下落时，产生的重力加速度等于 g，根据牛顿第二定律就可得到

$$G=mg。$$

上式表明了物体所受重力 G 和它的质量 m 之间的关系。

重力和质量的关系在伽利略时代还没有被人们认识。1671 年，法国人里希尔从巴黎到法属圭亚那的卡宴去作天文观察，发现他那个在巴黎走时准确的摆钟变慢了。他只好缩短摆长来校正，但是回到巴黎，他发现钟又变快了。思想敏捷的荷兰科学家惠更斯听到之后，立即领悟了其中的原因——在巴黎和在卡宴摆所受的重力不一样，但是惠更斯没有公开发表他的见解。后来人们才认识到，在地球上不同纬度的地方，物体所受到的重力是不一样的，而质量则是不变的。

现在我们必须指出的是：同一物体在地球上不同纬度或高度的地方，所受重力的差别是很小的(最多也只差千分之几)，因此在一般情况下，可以不考虑这样的差别，而认为质量是 1 千克的物体在地球上任何地方所受重力都是 9.8 牛。这跟在一般情况下，可以不考虑重力加速度 g 在地球上不同地方的差别，而总取 $g=9.8$ 米/秒^{2}也是一致的。在学习初中物理时，我们把 g 看成是一个常数，它表示质量是 1 千克的物体所受重力是 9.8 牛，实际上就是根据这个道理。

由于在地球上同一个地方，不同物体的重力加速度 g 是相同的，根据 $g=\frac{G}{m}$，如果在同一地方，两个物体的质量分别是m_1和m_2，它们所受重力分别是 G_1 和 G_2，则可以得到如下的关系式

$$\frac{G_1}{G_2}=\frac{m_1}{m_2}$$

这就是说，在地球上同一地点，如果两个物体所受重力相等，它们的质量也必定相等。一般天平就是利用平衡时砝码和被测物体所受重力相等的条件，根据砝码的质量数来称量物体的质量的。如果把天平移到另一地点，虽然砝码和被测物体所受重力都发生了改变，但它们仍然相等，天平仍保持平衡，所以用天平可以在地球上任何地方测出物体的质量。

思考

据说历史上有个荷兰商人，把货物从荷兰的一个港口运到靠近赤道的非洲某一港口时，发现货物仍然包装完好，但却缺斤少两了。你能解释其中的道理吗？他是不是用天平称量的？

*力学单位制

一般说来，物理量的计量单位是可以任意选定的，选择时要考虑使用方便，尽可能符合近代物理观念，并能制成物质原型或利用复制设施来稳定、可靠地显示所选定的单位。另外，由于各物理量间存在着相互联系，可以通过一些确定的单位导出另一些单位来量度另一些物理量，例如长度的单位已确定是米，时间单位已确定是秒，速度就可用米/秒来量度，加速度就可用米/秒^{2}来量度。

根据上述原则制定出基本物理量的单位叫做**基本单位**，如长度单位和时间单位。由基本单位根据物理公式推导出的单位叫做**导出单位**，如速度单位和加速度单位。基本单位和导出单位组成了**单位制**。

1971 年第 14 届国际计量大会通过了国际单位制(SI)采用 7 个基本单位，其中力学单位：米、千克、秒分别是长度、质量、时间这三个基本物理量的单位。这三个基本单位选定后，若干导出单位也就被确定，组成国际单位制的力学单位制。我国法定计量单位是以国际单位制为基础制定的，其他导出单位，如速度($V=\frac{t}{s}$)的单位是米 / 秒，加速度($a=\frac{v_t-v_0}{t}$)的单位是米/秒^2，力(F=ma)的单位是千克 · 米/秒^2，也就是牛。

在进行物理计算时，要注意所有的已知量都必须使用同一种单位制的单位来表示。这样，应用物理公式计算的结果也就是用这个单位制中的单位来表示的。例如，若已知某物体的质量为若干吨，经过几分钟后，速度由零增大到若干千米/时，要求加速度或力时，就必须把质量的单位换算成以千克表示，时间单位换算成以秒表示，速度单位换算成以米/秒表示。这样，计算出的加速度的单位就是米/秒^2，力的单位就是牛。

练习二十六

1．下面对质量和重力的叙述中哪些是正确的？

(1)质量和重力是用不同单位表示的同一个物理量；

(2)物体所受重力正比于它的质量；

(3)物体的质量随着它在各地所受重力的不同而改变；

(4)质量是物体本身的属性，重力是由于地球对物体的吸引而引起的。

2．做验证牛顿第二定律实验时，所用砝码和砝码盘的总质量是 215 克，它们所受的总重力是多少牛？

3．武装伞兵连同装备的总质量是 85 千克，降落伞张开后达到匀速下降，问这时空气对他的阻力是多大？

4．月球表面的引力加速度约是地球表面重力加速度的 1/6，连同装备在内，总质量为 180 千克的宇航员在月球表面受到的月球引力为多大？

牛顿第二定律的应用

牛顿第二定律指出了力和物体运动状态变化之间的联系，并进一步阐明了物体做变速运动时，加速度跟所受合外力和物体质量之间的数量关系，这样，就为人们解决有关力和运动的问题提供了依据。牛顿第二定律不但适用于地球表面附近常见的一般物体的运动，还适用于航天、航宇等比较复杂的机械运动。例如，1966 年 9 月 12 日在地球高空，就完成了一次以牛顿第二定律为基础、富有戏剧性的实验。在这个实验中，由一个“双子星号”宇宙飞船去推一下正在轨道上运行的火箭组，使它加速，再根据这个加速度用牛顿第二定律公式计算出这个火箭组的质量，取得了误差在 5%以内的正确答案。这就证明，应用牛顿第二定律确实可以解决许多有关力和运动的问题。经过归纳，解决这类问题通常可以分为两种基本类型：

1．知道了物体的受力情况，用牛顿第二定律求出物体的加速度，结合物体运动的初始条件，应用运动学公式，可确定物体在任一时刻的位置、速度和运动的轨迹。

2．知道物体的运动情况，求出物体的加速度，应用牛顿第二定律判断物体的受力情况，并确定受力的大小与方向。

概括起来，可以这样表示：

■

这两种类型的应用都体现了人类认识客观世界、进行科学研究的重要途径。第一种类型，运用已知的力学规律，做出正确的预测，是物理学在工程技术应用中进行分析和设计的基本方法。发射人造地球卫星，使它进入预定轨道；制造加速器，使基本粒子获得预期的速度等等，都是运用这种类型来解决的。第二种类型，根据观察到的现象，结合已知的自然规律去探求未知的物理规律。牛顿从研究天体运动发现万有引力定律，就是属于这种类型的应用。

[例题 1]

总质量是 2.75×10^3 千克的卡车，在水平公路上行驶，遇到突发事故而紧急刹车，车轮在公路上留下了 16.2 米的滑动“拖印”后停住。如果把卡车刹车后的运动看成是匀变速直线运动，你能从滑动痕迹推算出卡车在紧急刹车前一瞬间的车速吗？

解　这个问题是根据已知的受力情况来推算物体的运动情况。卡车刹车后，在竖直方向受到重力 G 和路面的弹力 N 的作用，两力互相平衡；水平方向只受阻力 f 的作用，根据牛顿第二定律 f=ma，就能求出加速度 a。由于卡车末速度为零，加速度 a 大小不变且与运动方向相反，又知道卡车滑行16.2米是做匀减速运动，利用运动学公式$v_1^2-v_0^2=2as$，就可以求出卡车在紧急刹车前瞬间的速度。

已知 $m=2.75\times10^3$ 千克，s=16.2 米，

$N=G=mg=2.75\times10^3\times9.8$ 牛$=2.70\times10^4$ 牛，

查表得知干路面和橡胶轮胎间的动摩擦因数 $\mu=0.71$。

$f=\mu N=0.71\times2.70\times10^4$ 牛$=1.92\times10^4$ 牛，

$$\alpha=\frac{f}{m}=\frac{1.92\times10^4}{2.75\times10^3}=\text{米}/\text{秒}^2=6.98\text{米}/\text{秒}^2。$$

因为末速度 $v_t=0$，所以开始刹车时卡车的速度是

$$v_0=\sqrt{2as}=\sqrt{2\times6.98\times16.2}\text{米}/\text{秒}=15.0\text{米}/\text{秒}。$$

[例题 2]

雪橇和孩子的总质量是 60 千克，从静止开始沿雪坡匀加速滑下，10 秒内滑下了 65 米，雪坡的倾角是 10°，求滑下时雪橇受到的阻力。

解　这个题目是根据已知的运动情况来求解物体的受力情况。雪橇和孩子沿雪坡下滑是做初速为零的匀加速运动，加速度a可以由$s=\frac{1}{2}at^2$公式求得。这个加速度是雪橇和孩子所受的合外力 $F_{合}$引起的，根据牛顿第二定律公式 $F_{合}=ma$，可以求得 $F_{合}$。雪橇和孩子共受到三个力：重力 G，雪坡的弹力 N 和阻力 f(图 5-5)。在垂直于雪坡方向上，弹力 N 和重力的分力 F_2 是平衡的，所以合外力 $F_{合}$就是重力平行于雪坡的分力 F_1 和阻力 f 的合力，即 $F_{合}=F_1-f$，其中 $F_1=mg\sin\theta$。

已知$m=60$千克，$s=65$米，$t=10$秒，$\theta=10°$。从$s=\frac{1}{2}at^2$可以得到

$$a=\frac{2s}{t^2}=\frac{2\times65}{10^2}\text{米}/\text{秒}^2=1.3\text{米}/\text{秒}^2。$$

$$F_1-f=ma$$

$$mg\sin\theta-f=ma,$$

所以雪橇滑下时受到的阻力

$f=mg\sin\theta-ma=60\times9.8\times\sin10°$ 牛-60×1.3 牛$=24.1$ 牛。

思考

一个物体在两个平衡的力作用下处于静止状态，现在把其中一个力逐渐减小到零，这个物体的加速度和速度的大小将怎样变化？如果再逐渐恢复这个力，这个物体的加速度和速度的大小又将怎样变化？当这两个力恢复平衡时，物体将处于什么运动状态？

练习二十七

1．质量是 0.096 千克的子弹，穿过木块前的速度是 820 米/秒，穿过木块后速度减为 722 米/秒，若通过木块的时间是 2×10^{-5} 秒，求木块对子弹的平均阻力。

2．起重机的钢索至多可以承担 1.75×10^{5} 牛的拉力，在起重一个所受重力为 1.47×10^{5} 牛的物体时，如果要它在 0.4 秒内从静止得到 1.2 米/秒的上升速度，钢索会不会断裂？

3．由斜面滑下的 A、B 两物体以相同的速度，同时滑到一个粗糙水平面上。若物体 A 的质量大于物体 B 的质量，A、B 两物体与粗糙水平面间的动摩擦因数相等。试比较 A、B 两物体所受到的摩擦力的大小以及它们在平面上能够滑行的距离。

4．质量为 10 千克的物体，沿倾角为 30°的斜面由静止开始匀加速下滑，物体和斜面间的动摩擦因数为 0.25，在 2 秒内物体从斜面顶端滑到底端，问这斜面有多长？

5．质量是 12.5 吨的电车在水平道路上作匀变速直线运动，10 秒内速度从 5.0 米/秒增大到 6.2 米/秒，它所受的阻力是 2.5×10^{3} 牛，求电动机所产生的牵引力。

6．用 2 牛的水平恒力拉质量为 0.8 千克的木块，沿水平桌面由静止开始做匀变速直线运动。如果木块在 5 秒内移动的距离是 2.5 米，求木块运动的加速度以及木块和桌面间的动摩擦因数。

7．一个质量为 80 千克的人站在电梯里，电梯以 1 米/秒^{2}的加速度加速上升时，电梯的地板对人的支持力多大？如果电梯以 1 米/秒^{2}的加速度加速下降，支持力又是多大？

8．一个初速为零的电子在真空管里，从阴极沿直线匀加速运动到阳极，到达阳极时速度为 6.0×10^{6} 米/秒，其间经过 1.0 厘米的距离。已知电子质量为 9.1×10^{-31} 千克，电子在运动过程中受到的作用力多大？它是电子所受重力的多少倍？

牛顿定律的局限性

自 17 世纪以来，牛顿定律在广阔的科技领域中解决了许多实际问题，充分证明了它的正确性。以牛顿定律为基础的经典力学体系，不断得到发展，取得了巨大的成就，成了许多工程技术的重要基础。牛顿定律被人们视为经典力学的精髓。

但是随着物理学的发展，特别是 19 世纪末和 20 世纪初以来对电磁理论的研究，和随之而来的对微观高速粒子的研究，把人们带进了一个崭新的科学领域。人们开始发现，牛顿运动定律在这些新的科学领域中，常常显得无能为力。如高速运动电子的质量会随速度增大而变大的事实，牛顿定律就不能作出切合实际的解释。20 世纪初，著名物理学家爱因斯坦(Albert Einstein，1879—1955)提出了狭义相对论，从根本上改变了我们通常对时间和空间的认识，阐述了长度和时间跟速度的密切关系，以及物体质量随物体运动速度增大而变大等牛顿运动定律所不能解释的问题。相对论力学不但在微观、高速的情况下，取代了经典力学，而且还在宏观、低速的情况下包容了经典力学。

物理学的发展向人们揭示了一个真理：任何理论总不是一成不变的，即使相对论也是在发展的；任何理论也不是包罗万象的，不存在经典理论是错误的而近代理论是正确的这样的问题。重要的是我们应该知道，一种理论所能描述的物理现象与有关规律的适用范围，总是有限度的。经典力学是在研究宏观物体的低速运动的基础上总结出来的规律，它不能用来处理微观粒子高速运动的问题，这就是牛顿定律的适用范围和局限性。

三、牛顿第三定律

一个短跑运动员在非常短暂的时间里，从静止达到他的起跑速度，如果知道他的质量、加速度，用公式 F=ma 可以求出作用于他的力。但是，这个力是从何而来的呢？是运动员对自身的作用？还是别的物体对他的作用？别的物体又为什么会对他作用呢？

作用力和反作用力

在前一章学习弹力时，我们就已经作过分析：用手指拉长弹簧时，手指会感受到弹簧的拉力；用手压缩弹簧时，手掌会感受到弹簧的压力。所以，手指和弹簧、手掌和弹簧之间的作用都是相互的。如果有两个同学分别站在两辆平板小车上，当其中一人用手推另一人时，两人都同样受到力的作用且同时向相反方向运动[图 5-6(a)]；带上异种电荷的两通草小球，会相互吸引，而使悬挂小球的两根细线都发生倾斜[图 5-6(b)]；固定在小车上的磁棒，由于同名磁极间的相互排斥，两辆小车就向相反方向运动[图 5-6(c)]。

观察和实验表明，两个物体之间的作用总是相互的，这个物体对那个物体有力作用时，那个物体也一定同时对这个物体有方向相反的力的作用。**所以力是物体间的相互作用。**自然界不存在只受到别的物体对它的作用力，而不同时对别的物体施加力的物体，当然也不存在只对别的物体施加力，而不同时受别的物体作用力的物体。地球对存在于它周围的物体有吸引的作用，存在于它周围的物体同时对地球也有吸引的作用。

■

两个物体间相互作用的一对力，叫做作用力和反作用力。我们可以把其中任意一个力叫做作用力，那么另一个力就是反作用力。

牛顿第三定律

为了研究作用力和反作用力的关系，可以按照图 5-7 做一个简单的实验：

把两只弹簧秤 A 和 B 的挂钩勾在一起，让弹簧秤 B 的另一端固定在墙上，再用手拉弹簧秤 A 的另一端，这时可以看到，无论怎样改变手的拉力，两只弹簧秤上的读数总是相等的。弹簧秤 B 的读数表示弹簧秤 A 对它的作用力的大小，弹簧秤 A 的读数表示弹簧秤 B 对它的作用力的大小。手一松开，两只弹簧秤上的指针都同时回到零点。

大量实验表明：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，作用在同一条直线上。这就是牛顿第三定律。

■

牛顿第三定律进一步阐明了：力是物体间的相互作用，有作用力必有反作用力，它们是同种性质的力，它们是同时存在和同时消失的。运动员起跑时，只是在用脚蹬起跑器施加作用力的同时，才受到起跑器对他的反作用力(图 5-8)，这个反作用力使运动员获得加速度，改变了运动状态。运动员如果不对外界施加作用力，他就不可能受到反作用力，也就不可能改变运动状态。

物体间的作用力和反作用力是分别作用在两个不同物体上的力，它们对两个物体产生的作用效果是不能抵消的。二力平衡时，两个力的大小相等，方向相反，沿着同一直线，但它们是作用在一个物体上的，它们的作用效果必定相互抵消。所以在分析物体的受力情况时，不要把物体间相互作用的力跟一个物体受到的平衡的力混淆起来。

我们以接线盒中引出的电线悬挂住电灯为例来进行分析[图 5-9(a)]，就可发现有地球对灯的重力 G 和灯对地球的引力 G'，电线对灯的拉力 F 和灯对电线的拉力 F'，电线对接线盒的拉力 Q 和接线盒对电线的拉力 Q'这样三对作用力和反作用力。根据牛顿第三定律，它们每一对力都大小相等，方向相反，作用在不同的两个物体上。因为灯和电线都保持静止不动，所以 G 和 F、F'和 Q'也都是大小相等，方向相反的，但是它们都是作用在同一个物体上的平衡力。

S：从绳子上挂一个重物来看，作用力(我认为是重力)与反作用力(显然是绳子向上的拉力——弹力)不一定是同一种性质的力吧！

T：应该搞清楚的是：重力是物体受到的，是地球作用的力；绳子受到物体向下的拉力，不是重力，是弹力；物体受到绳子向上的拉力，也是弹力。所以，作用力与反作用力一定是同一性质的力。

牛顿第三定律所揭示的自然规律，广泛应用于生活和生产中。本章导

图 3 中，运动员用桨向后推水，水就给桨反作用力，使划艇前进。现代航空、航天、航宇技术所应用的喷气发动机和火箭，也是利用喷出燃气时，燃气对发动机、火箭的反作用而得到巨大推力的。

思考

下面三种说法中，哪种说法是正确的？为什么？

(1)走路时，只有地对脚的反作用力大于脚对地的蹬力时，人才能前进。(2)地球的质量约是 6.4×10^{24} 千克，地球对质量是 1 千克的石块作用的重力比这石块对地球作用的引力大得多，所以空中的石块会落向地球，而地球却不会朝石块方向运动。

(3)用鸡蛋打石头，石头没有损坏而鸡蛋破了，这不能说是因为鸡蛋对石头的作用力小，石头对鸡蛋的反作用力大。

练习二十八

1．有人说："施力物体同时也一定是受力物体。"这句话正确吗？请举例说明。

2．一台计算器放在水平桌面上，它受几个力的作用？这些力是平衡力吗？这几个力的反作用力分别作用在哪里？由此能说明计算器对桌面的压力的大小等于它所受到的重力的大小吗？

3．用手把一块木块压在竖直的、不光滑的墙面上，木块与墙面间有哪些作用力和反作用力？木块受到哪几对平衡力？

4．一个弹簧秤的两端，分别由两个同学用力向相反方向拉着。弹簧秤静止时读数为 5 牛,这两个同学都认为自己用力为 2.5 牛,你认为正确吗？为什么？

5．使质量是 250 克的木块在水平桌面上滑动时，木块和桌面分别受到多大的摩擦力？如果在木块上增加一个 50 克的砝码,它们分别又是多大？(木块与木板间的滑动摩擦系数是 0.30)

6．质量是 60 千克的乘客站在以 0.5 米/秒^2 的加速度加速上升的电梯中，这时他对电梯地板的压力多大？

阅读材料　动量和冲量

牛顿在他的名著《自然哲学的数学原理》中是这样表述他提出的第二运动定律的：一物体的动量的变化率与作用在该物体的合力成正比，且沿着合力的方向。他所提出的动量概念是由法国科学家笛卡儿最早提出的，它是指运动物体的质量和速度的乘积。牛顿认为 mv 这一乘积可以表示物体运动的量，叫做动量。动量可以用来衡量物体运动效应的大小。因此根据牛顿自己的表述，牛顿第二定律的公式可以写成：$F=\frac{mv^2-mv}{t}$，这里 $mv'-mv$是物体动量的变化。由于$a=\frac{v'-v}{t}$，即可得到$F=ma$，这就是

我们现在所用的牛顿第二定律的表达式。

如果我们把前述公式改写成 Ft=mv'-mv，那么我们可以看到物体动量的变化跟力和作用时间的乘积 Ft 相等。人们把 Ft 定义为力的冲量，用它表示力的作用效果的时间积累。而上式则表示力的冲量等于物体动量的变化。这个结论叫做动量定理。这是力学理论中一个非常重要的发现。

我国“长征”系列运载火箭简介

我国自行研制的大型运载火箭系列，由“长征”1 号(CZ-1)、“长征”2 号(CZ-2)和“长征”3 号(CZ-3)运载火箭组成。“长征”1 号是三级火箭，第 1、2 级使用液体燃料，第 3 级使用固体燃料。1970 年 4 月 24 日，“长征”1 号火箭把我国第一颗人造地球卫星“东方红”1 号送入轨道。“长征”2 号是两级火箭，使用液体推进剂。1974 年开始使用。“长征”2 号已多次成功地发射了可回收的返回型遥感卫星。“长征”3 号是三级火箭。第 1、2 级使用四氧化二氮、偏二甲肼推进剂，第 3 级使用液氧、液氢推进剂。1984 年 4 月 8 日，“长征”3 号已经成功地发射了我国第一颗按地球静止轨道运行的试验通信卫星。

有关“长征”系列运载火箭的特性参见下表：

火箭型号	CZ-ID	CZ-2C	CZ-2E	CZ-3	CZ-3A
长度（m）	28	35	51	43.85	52.3
升空时质量(kg)	8.0×10^4	1.91×10^5	4.64×10^5	2.02×1.70^5	2.40×10^5
升空时推力(kN)	1.12×10^3	2.84×10^3	6.00×10^3	2.84×10^3	3.00×10^3
有效载荷(kg)（至地球低轨道上）	700～750（1991 年）	2500（1992 年）	8800（1990 年）	—	—
有效载荷(kg)（至地球同步转换轨道上）	—	—	—	1400（1996 年）	2500（1992 年）

为了适应我国航天事业的发展和为国际空间技术服务的需要，1988 年 12 月到 1990 年 7 月我国航天科学工作者和工程技术人员，在 11 次成功地发射“长征”2 号运载火箭的基础上，研制成“长征”2 号捆绑式大推力运载火箭(CZ-2E)。它是在第一级火箭箭体的下端对称地“捆绑”着 4 个直径为 2.25 米、高 15 米的助推火箭(图 5-10)。CZ-2E 可将一定的有效载荷送入地球低轨道。如果加上近地点火箭，可将轻卫星送入地球同步转移轨道；如果采用氢氧燃料的最后一级配合，可将重卫星送入地球同步转移轨道。CZ-2E 是我国当时运载能力最大的火箭。

CZ-2E 火箭发射前，挺立在特制的大型航天发射主体的近旁。主体包

括活动勤务塔和固定发射塔两部分。南北方向运行自如的活动勤务塔，高 97 米，自重 4000 余吨；固定发射塔，高 74 米，自重 1050 吨，运载火箭和人造卫星在这里完成发射前的综合测试和燃料加注等勤务保障。1990 年 7 月 16 日北京夏令时间 9 时 40 分，我国新研制的“长征”2 号捆绑式大推力运载火箭，在西昌卫星发射中心发射，将模拟卫星和搭载的巴基斯坦小型科学卫星送入了预定轨道。大推力火箭发射成功，标志着我国航天事业的新发展。

本章学习要求

1．知道伽利略的理想实验及其科学推理方法的意义。
2．理解牛顿第一定律。理解惯性。
3．知道力是物体产生加速度的原因。
4．掌握牛顿第二定律。
5．理解质量是物体惯性大小的量度。
6．知道牛顿定律的适用范围和局限性。
7．理解牛顿第三定律。

复习题

1．F_A、F_B 和 F_C 三个共点力，作用在一个质量为 2 千克的物体上，物体保持平衡。如果撤去 F_A，物体就会产生 2 米/秒^2 的加速度。你知道力 F_A 的大小和方向吗？

2．用弹簧秤拉着一个铁块在水平桌面上做匀速直线运动，弹簧秤的读数是 0.40 牛；增大拉力，弹簧秤的读数是 1.8 牛时，测得铁块做匀加速直线运动的加速度是 0.70 米/秒^2。求铁块的质量和它与桌面间的滑动摩擦系数。

3．做验证牛顿第二定律的实验时，所用砝码和砝码盘的总质量是 215 克，如果它们以 1.5 米/秒^2 的加速度加速下降，悬绳上的拉力将是多大？跟砝码和砝码盘所受总重力相差多大？

4．用一根质量可以忽略不计的弹簧，将质量分别为 m_1 和 m_2 的两个木块连接起来，放在光滑的水平桌面上，拉伸弹簧然后释放，求放手后两个木块的加速度 a_1 和 a_2 之比。

5．在课本中所讲到的测定火箭组质量的空间实验中，“双子星号”宇宙飞船和火箭组接触后，飞船尾部的喷气发动机开动，所产生的推力等于 895 牛。发动机开动了 7.0 秒，测得飞船和火箭组的速度改变了 0.91 米/秒，求它们的总质量 M_0。如果已知飞船的质量为 M_1=3400 千克，求火箭组的质量 M_1。

6．火箭的质量为 $4.5\times10_3$ 千克，如果它的发动机能产生 8.75×10^5 牛的推力，并且持续 25 秒，在不考虑火箭质量变化的条件下，火箭可以得到多大的加速度？它的最大速度是多少？

7．质量是 1500 千克的汽车，发动机的牵引力是 3000 牛，开上一段坡路时，每前进 10 米升高 2 米，摩擦阻力是 900 牛，坡路一共长 282 米，汽车用了 20 秒才走完，求汽车上坡前和到达坡顶的速度。

8．质子(氢原子核)的质量是 1.67×10^{-27} 千克，在进入静电加速器中被加速时，初速度是 7.6×10^{-7} 米/秒，经过 2.3×10^6 秒后，速度达到 1.3×10^6 米/秒。如果质子在加速区内做匀变速直线运动，它受到的力多大？

9．起重机的钢索放下一个质量为 1.5×10^5 千克的钢件时，如果要使钢件从静止开始运动，在 0.4 秒内达到 1.2 米/秒的下降速度，这时钢索受到的拉力是多大？

10．气球的总质量是 M 千克时，它以 a 米/秒 ^{2} 的加速度匀加速上升，试证明气球的总质量增加 $\frac{2a}{g-a}M$ 千克后，它就能以 a 米 / 秒 ^{2} 的加速度下降。

6．功和能
Work and Energy

1．风力发电
2．黄果树瀑布
3．射箭运动
4．柴油打桩机

自然界中存在着各种不同形式的物质运动：机械运动，热运动，电磁运动以及原子和原子核内部的运动等。各种运动形式在一定的条件下都能直接或间接地相互转化。远古时代人们在生活实践中发现了摩擦生热的现象，传说的燧人氏发明钻木取火(图 6-1)，就是机械运动转化为热运动的一个例子。

18 世纪以来，随着蒸汽机、内燃机、发电机和电动机的相继问世，人类实现了使各种不同形式运动相互转化，并应用于生产技术领域，促进了人类文明的发展。18 世纪中叶，科学家们为了对运动形式的转化作出量度，提出了能量(energy)的概念，简称为能。并且对每种形式的运动陆续提出了跟它们相对应的能的概念，例如机械能，内能，电磁能，核能等等。运动形式的转化在数量上可用能量的转化来描述，而发现和研究各种能量相互之间转化的条件，以及其转化中的数量关系也就成了物理学研究的重要内容。这一章我们将学习与机械运动有关的机械能及其转化的规律。

一、功

机械运动是人类历史上最先被利用的运动形式之一。原始时期人们就知道投石击兽，进行狩猎。进入农耕时期后，人们就挥锄破土、拉犁耕地进行种植。随着人类文明的进展，机械运动在人们生活和生产中的应用也更加广泛。人们发明创造各种机械，利用它们做功，进一步实现对机械运动的应用。所以，我们在学习机械能之前，先学习机械功(work)。

功的概念

在初中，我们已经学习过功的初步概念。一个物体受到力的作用，并在力的方向上发生了位移，我们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。

人推物体使物体沿水平方向运动，物体在推力的方向上发生一段位移，推力对物体就做了功[图 6-2(a)]。如果物体被墙挡住，人推物体，物体没有发生位移，推力便没有做功[图 6-2(b)]。在推动物体的过程中，物体还受到重力和支持力的作用，这两个力都没有对物体做功，因为物体在竖直方向上没有发生位移。

做功的多少是由力的大小和在力的方向上位移的大小所决定的。功等

于力 F 和沿力的方向上的位移 s 的乘积，即

$$W=Fs。$$

我国法定计量单位规定功的单位是焦耳，简称焦，符号是 J。1 牛的力使物体在力的方向上发生 1 米位移，力对物体所做的功等于 1 焦。

功是一个标量。

思考

在物体从光滑斜面滑下的过程中，你认为什么力对物体做功，什么力对物体不做功？为什么？

功的一般公式

在现实生活中，物体运动的方向并不总是跟力的方向完全一致的。如图 6-3 所示，人们用跟水平方向成α角的力 F 去推或拉一只箱子沿水平道路前进时，这个推力或拉力做不做功呢？如果做功，怎样来计算做功的大小呢？

可以把力 F 分解成两个分力：跟位移方向一致的分力 F_1 和跟位移方向垂直的分力 F_2(图 6-3)。设箱子在水平道路上发生的位移是 s，那么力 F_1 所做的功等于 F_1s；力 F_2 的方向跟位移 s 的方向垂直，在 F_2 的方向上箱子没有发生位移，所以 F_2 不做功。因此力 F 对箱子所做的功就等于它的一个分力 F_1 所做的功，即 $W=F_1s$，因为

$F_1=Fcosa$，

所以　$W=Fscos\alpha$。

这就是说，力对物体所做的功，等于力的大小、位移的大小、力和位移方向夹角的余弦三者的乘积。

上式是计算功的一般公式。当α＜90°时，W 是正值，力对物体做正功；α=90°时， W=0，力对物体不做功；α＞90°时，W 是负值，力对物体做负功。例如，列车在行驶中受到阻力的作用，阻力的方向和列车位移的方向相反，阻力对列车就做负功。火箭竖直上升时，推力对火箭做正功，而火箭所受重力跟火箭位移的方向相反，重力对火箭做负功。人提着箱子走上楼梯时，人提箱子的力对箱子做正功，重力对箱子做负功(图 6-4)。

当一个力对物体做正功时，这个力就是动力，我们就说这个力的施力体“对物体做功”。例如机车牵引列车前进时，我们就说机车对列车做功。当一个力对物体做负功时，这个力总是阻碍物体运动的，成为物体运动的阻力，我们也可说成“物体克服阻力做功”，这时只取功的绝对值来表示它的大小。例如阻力对前进中的列车做负功，也可说成列车克服阻力做功；重力对上升的火箭做负功，也可说成火箭克服重力做功。

人类在几千年前已经懂得利用机械做功。我国是世界上最早发展机械的国家之一，我们的祖先创造了桔槔(图 6-5)、水车(课本彩图 13 和图 6-6)等机械，用来做功。随着社会生产力的发展，人们从用人力和畜力作为动力，发展到用水力和风力等作为动力对机械做功(课本彩图 11 和本章导

图 1)，以利用机械克服阻力或重力做功。

思考

1．用 15 牛的水平拉力跟用 15 牛的斜向拉力，使物体在光滑水平面上都移动 0.5 米的距离，这两个拉力所做的功是否相同？

2．用平行于斜坡的拉力把一段木材拉上斜坡时，哪些力对木材做了功？木材克服哪些力做了功？

练习二十九

1．用起重机把重物从地面匀速提升到 10 米高的地方，重物的质量是 200 千克，钢索的拉力对重物做了多少功？

2．水压机用 2×10^6 的压力，使烤红的铁块压缩 6 毫米，水压机的压力对铁块做了多少功？

3．自动扶梯把质量是 60 千克的乘客送到 5 米高的楼上，自动扶梯的支持力对乘客做了多少功？

4．把一块长 3 米的木板搁在高 1.5 米的卡车车厢边上，用平行于木板方向的拉力，把质量是 100 千克的木箱拉上卡车(图 6-7)，木箱克服重力做了多少功？

5．用大小是 400 牛、方向跟水平面成 30°角的力，拉车在水平面上行走 50 米，拉力做了多少功？如果车子是匀速前进的，在这过程中，车子克服阻力做了多少功？

二、功率

我们知道各种机器做功的快慢是不同的。用拖拉机犁田时，东方红-75 型拖拉机要比手扶拖拉机做功快得多。其他机械也是这样，工厂中大型钻床钻孔时做功远比牙科医生补牙时用的钻机做功快得多。为了合理地选用机械，就需要了解它们做功的快慢。在物理学上用功率(power)来表示做功的快慢。

功跟完成这些功所用时间的比值叫做功率，如果用 W 表示功，t 表示完成这些功所用的时间，P 表示功率，那么功率可用下列公式表示：

$$P=\frac{W}{t}$$

我国法定计量单位规定功率的单位是瓦特，简称瓦，符号是 W；1 瓦=1 焦/秒，技术上还常用千瓦(kw)做功率的单位，

1 千瓦=1000 瓦。

在作用力 F 的方向和位移 s 的方向相同的情况下，W=Fs，把它代入上面的功率公式中，可以得到

$$P=\frac{Fs}{t}$$

已知速度$v=\frac{s}{t}$，所以功率也可以用力和速度来表示，即

$$P=Fv。$$

这就是说，功率等于力和物体运动速度的乘积。我们在登山时，慢走和快跑，用的力是一样的，但是快跑比慢走的速度大，因此跑上山克服重力做功的功率要比走上山的功率大得多。

从公式 P=Fv 可以看出，汽车、火车等交通工具，在它们的发动机以一定的功率做功时，它们的牵引力和速度是成反比的。汽车上坡时，需要较大的牵引力，司机必须减小汽车的速度。

在公式 P=Fv，如果 v 是平均速度，那么 P 就是平均功率；如果 v 是瞬时速度，那么 P 就是瞬时功率。

[例题]

卡车在水平公路上行驶，发动机的牵引力是 2×10^3 牛，它在 1 小时内行驶了 54 千米，求它在这段时间里的平均功率。如果卡车发动机的额定功率是 66 千瓦，它以最大速度匀速行驶时受到的阻力是 3×10^3 牛，求这辆卡车的最大速度。

解　卡车行驶时牵引力 $F=2\times10^3$ 牛，t=1 小时=3.6×10^3 秒，s=54 千米=5.4×10^4 米，根据功率公式

$$P=\frac{W}{t}=\frac{Fs}{T}$$

可以求得卡车在这段时间里的平均功率

$$P=\frac{2\times10^3\times5.4\times10^4}{3600}\text{瓦}$$

$$=3\times10^4\text{瓦}=30\text{千瓦。}$$

卡车以最大速度匀速行驶时，牵引力和阻力相等，即 $F=f=3\times10^3$ 牛，发动机的额定功率 P=66 千瓦=6.6×10^4 瓦，根据功率公式 P=Fv，可以求得卡车的最大速度

$$v=\frac{P}{F}=\frac{6.6\times10^4}{3\times10^3}\text{米/秒}$$

$$=22\text{米/秒。}$$

思考

下列三种说法是否正确，如果不正确应怎样纠正？

(1)机器做的功越大，它的功率越大；

(2)机器做功越快，它的功率越大；

(3)机器做功的时间越短，它的功率越大。

机器的功率

人们利用机器做功时，要注意机器的功率，有的机器的功率较大，有的机器的功率较小。人们在使用机器做功的过程中，机器的功率是可以改变的。通常在负载恒定的情况下，机器的功率是恒定的。在负载发生变化的情况下，机器的功率也总是变化的。例如机器或交通工具在启动或停车时，它们的功率就是逐渐增大或减小的。

当机器以不变的功率做功时，它的平均功率和瞬时功率是相等的，这时它所提供的动力和运行速度的大小是成反比的，即需要提供的动力大，速度就小；需要提供的动力小，速度就大。当机器以变化的功率做功时，它的平均功率和瞬时功率一般是不相同的，它所提供的动力和运行速度的大小也不再保持反比关系。当驾驶员开大油门，使汽车加速驶上桥坡时，发动机的功率是不断增大的，这时汽车的牵引力和速度都在增大。

为了保证机器能长时间正常工作，在设计机器时，规定了各种机器所能承受的最大负荷,即规定了机器正常工作时允许达到的最大功率(也称额定功率)。利用机器做功时，不应超越它的额定功率，否则，机器就会很快损坏。当机器以额定功率做功时，它所能提供的动力和运行速度也是成反比关系的。

一些发动机的额定功率

国产 50 型摩托车 1.6 千瓦～1.8 千瓦
国产手扶拖拉机(不同型号)2.2 千瓦～8.8 千瓦
国产轮式或履带式拖拉机(不同型号)14.7 千瓦～55 千瓦
一般载重汽车 55 千瓦～88 千瓦
国产小轿车 66 千瓦～162 千瓦
国产大轿车 70 千瓦～118 千瓦
强力内燃机车 4410 千瓦
万吨级远洋轮发动机 7350 千瓦
大型喷气式航空发动机 1.10×10^5 千瓦
液体燃料火箭短时功率 7.35×10^9 千瓦

练习三十

1．如果用一台抽水机，每秒钟能把 30 千克的水压到 25 米高的楼顶水箱中去，这台抽水机的输出功率应该多大？半小时里它能做多少功？

2．质量是 60 千克的撑竿跳运动员，从起跳开始，在 0.4 秒里离开地面，越过了 5 米高的横竿，他的平均功率多大？

3．一台起重机的额定功率是 10 千瓦，用它匀速提升 2.7×10^3 千克的钢梁时，钢梁上升的最大速度多大？

4．拖拉机的额定输出功率是 30 千瓦，它的 3 档速度分别是 10 米/秒、12.5 米/秒和 15 米/秒。那么，拖拉机在采用这 3 档速度时的最大牵引力各是多少？

三、动能

动能

我们在初中已经学过一个物体能够做功，它就具有能的知识。一切运动着的物体，例如射出的子弹、下落的重锤、流动的河水等都能够做功，它们都具有能。这种物体由于运动而具有的能，叫做动能(kinetic energy)。

具有动能的物体能够做功，我们可以用运动物体克服阻力做功的多少来量度物体动能的大小。例如一颗飞行着的子弹是具有动能的，射入砂袋后要克服阻力做功，最后静止在砂袋里(图 6-8)。显然，它的动能在克服阻力做功过程中，转化为其他形式的能了。因此我们可以认为子弹克服阻力做了多少功，它的动能就转化了多少。设子弹的质量是 m，进入砂袋时的速度是 v，在砂袋中运动时受到的阻力是 f，它在砂袋中做匀减速运动前进 s 米后停止下来。根据牛顿第二定律可以得到 f=ma；根据运动学公式 v $v^2=2as$，可以得到$s=\frac{v^2}{2a}$，将f和s的表达式代入$W=fs$中，就得到子弹克服阻力所做的功

■

由上式可以看出，子弹克服阻力所做的功是跟$\frac{1}{2}mv^2$等量的，所以物理学上就用$\frac{1}{2}mv^2$来量度物体的动能。如果动能用符号E_k表示，那么

$$E_k=\frac{1}{2}mv^2。$$

也就是说，物体的动能等于它的质量跟它的速度平方的乘积的一半。

■

我们还可以用如图 6-9 所示的实验来理解动能的概念。将一个光滑的斜槽和一个平板相接，在平板上放一木块。一个木球从斜槽上滑下，撞上木块时，可以看到木球在斜槽上滑下时的位置越高，它的速度就越大，木块将被撞得越远。

再用两个质量不同的木球分别从同一高处滑下，它们撞上木块时的速度是相同的，但是可以看到质量大的木球把木块撞得较远。这两个实验表明了木球的质量越大，速度越大，木球的动能越大，它具有的做功本领越

大。

动能只有大小，没有方向，是一个标量。它的单位是焦耳。

利用物体的动能做功的实例是很多的 如利用下落的重锤打桩(本章导图 4)，用流动的水推动水轮机(图 6-10)，用摆动质量很大的铁铊来捣毁待拆除的建筑物(图 6-11)，用加快助跑来提高跳远的成绩，以及交通车辆靠站前的趟车等。自然界中海浪(见课本彩图 12)和飓风具有的动能，则又会摧毁海堤和建筑物，给我们带来灾害。

■

动能概念的建立

能是一个比较抽象的概念，只能通过有关的物理现象来确定它的存在。17 世纪末叶，科学家就开始探求怎样量度机械运动。1686 年，著名的德国数学家莱布尼兹提出用 mv^2 来量度机械运动，并取名“活力”。1807 年，英国物理学家托马斯·杨指出运动的功效是力的作用效果，但不能和力本身混淆在一起，他提出了“能”的概念，但是在相当长的时期内没有被人们接受。1829年，法国物理学家科里奥利首次用 $\frac{1}{2}mv^2$ 代替了一直使用的 mv^2，并且提出了“功”(Fs)的概念。直到 19 世纪中叶，随着能量概念的广泛应用，英国科学家开尔文才把 $\frac{1}{2}mv^2$ 定义为动能。可见，建立一个正确的科学概念，且为人们所接受，往往需要经历很长的过程。

*做功跟物体动能变化的关系

前面我们已经讲过子弹克服阻力做功跟它的动能发生变化的简单关系。现在我们进一步讨论，力对物体做功跟物体动能变化的一般关系。

■

设一个质量为 m 的物体，初速度是 v^0，在恒力 F 的作用下，发生水平位移 s，速度变为 v_t(图 6-12)。

在这个过程中，恒力 F 所做的功 W，用牛顿第二定律 F=ma 和运动学公式 $v_t^2 - v_0^2 = 2as$ 来表述，就可得到

$$W = Fs = ma(\frac{v_t^2 - v_0^2}{2a}) = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2。$$

上式表明力对物体做功，物体的动能就增大，增大的动能等于力对物体所做的功。例如不计阻力，以恒定的牵引力使汽车在水平公路上加速前进时，汽车增加的动能就等于牵引力对汽车所做的功。反之，运动物体克服阻力做功，物体的动能就减少，减少的动能等于物体克服阻力所做的功。

[例题]

用一个大小为 3 牛的力，沿水平方向，作用在质量为 2 千克的物体上，使它由静止开始，在无摩擦的水平面上移动 3 米，这时物体的动能多大？

它的速度多大？

解　力 F=3 牛，物体的质量 m=2 千克，初速 v_0=0，移动距离 s=3 米。由于$v_0=0$，物体的初动能$\frac{1}{2}mv_0^2=0$，根据功和动能变化的关系式可得物体的末动能　$\frac{1}{2}mv_t^2=W=Fs=3\times3$焦$=9$焦，

它的末速度　$v_t=\sqrt{\frac{2\times9}{2}}$米/秒

=3 米/秒。

这道习题也可用牛顿第二定律和运动学公式来解，同学们可以试做一下，看看哪种方法比较方便。

思考

1．一个物体分别在什么运动状态时，它的动能为零、保持不变和不断增大？

2．物体以大小不变的速率沿着圆周运动时，动能有变化吗？

3．估算下列事例中，人或物的动能大小。

(1)以 7 米/秒速度短跑的同学；

(2)从 2 米高处落到地面时的苹果。

*4．物体的速度从 v_0 增加到 $2v_0$ 和从 $2v_0$ 增加到 $3v_0$ 的两个过程中，力对它做的功相等吗？

练习三十一

1．我国第一颗人造地球卫星的质量是 173 千克，在速度为 7.2 千米/秒时，它的动能多大？

2．质子质量是电子质量的 1840 倍，当电子以 8.0×10^6 米/秒的速度运动时，质子必须以多大的速度运动，它们的动能才能相等？

3．质量是 0.5 千克的静止木块，以 2 米/秒^2 的加速度从斜面上滑下，经过 1.5 秒后，它的动能多大？

*4．用 2 牛的水平推力作用在质量是 0.1 千克的玩具小车上，使它在光滑的桌面上，从静止开始，沿直线前进 1.6 米，它的末速度多大？

*5．质量是 10 克的子弹，以 500 米/秒的速度，水平射入一块 2 厘米厚的木板后，以 300 米/秒的速度穿出木板，它在穿过木板的过程中，受到的平均阻力多大？

四、重力势能　弹性势能

重力势能

屋檐边上一块摇摇欲坠的瓦片，常使行人惊心；房屋年久失修，人们也常常害怕有朝一日会坍塌，造成事故和伤亡。这些居于高处的砖瓦、颓垣，为什么会有潜在的危险呢？

我们在前一节已经知道力对物体做功，物体的动能会增加，但有时物体的动能也可以不增加。例如竖直向上匀速托起一本书(图 6-13)的过程中，虽然书本的动能保持不变，但你还是要用力，也还是做了功。这时托力对它做功的效果是什么呢？

对于这个问题，德国数学家莱布尼兹找到了答案，他认为地球上的物体有一种跟距离地面高度有关的能量，当被托起的书本跟地面的距离增大时，它具有的这种跟高度有关的能量也增大了。他的这一想法是正确的。人们把物体由于被举高而具有的能定义为重力势能。被举到高处的重锤，拦河筑坝提高水位后，储存在高处的水(课本彩图 11)以及前面所说的屋檐上的瓦片，颓垣上的砖块等等，都具有重力势能。举高的重锤下落时，可以用来打桩(本章导图 4)、锻铁；高处的水流下时，可以用来推动水轮机，带动发电机发电，被人们称为水力发电。所以重力势能和动能一样，在生产技术领域中也被我们广泛地用来做功；而高处的砖瓦落下时，自然界发生山体滑坡、泥石流等时，所做破坏性的功会给人们带来灾害。重力势能的大小决定于哪些因素呢？我们可以观察下面的实验：将一层橡皮泥放在水平桌面上，然后让不同质量的钢球从同一高度自由落下，可以看到，质量越大的钢球撞击橡皮泥时，泥层上留下的凹痕越深；让同一质量的钢球从不同高度自由落下，可以看到，落下时位置越高的钢球在橡皮泥上留下的凹痕越深(图 6-14)。凹痕越深表示钢球克服阻力做的功越多，钢球原来的重力势能越大。这个实验清楚地表明：被举高的钢球所具有的重力势能的大小是由钢球的质量和所处的高度来决定的。

我们还可以作进一步的分析，物体被匀速举高的过程中，必须受一个跟物体所受重力 $G=mg$ 大小相等、方向相反的外力，如果物体从地面被举高的距离是 h，那么这个外力对物体所做的功 $W=mgh$。它就等于物体因举高而具有的重力势能，用 E_p 表示，即

$$E_p=mgh。$$

■

这就是说，物体的重力势能等于物体所受的重力和它的高度的乘积。物体的质量越大，所处的位置越高，它的重力势能就越大，这样的结论完全符合实验的结果。

重力势能也是一个标量，它的单位是焦耳。

重力势能的相对性

重力势能是由物体和地球间的相对位置所决定的能。物体高度越大，重力势能就越大。然而，高度 h 是相对的，我们说珠穆朗玛峰的高度是海拔 8848 米，这是相对于海平面说的；我们说某山上有座塔高 25 米，这是相对于塔的基面说的。我们说物体具有的重力势能 $E_p=mgh$，也是相对于某一个水平面说的。这个水平面叫做参考平面，我们把它的高度定为 h=0。在这个参考平面上的物体，它们的重力势能 $E_p=0$。因此选用不同的参考平面，物体的重力势能就有不同的数值，所以重力势能的值是相对的。但是这并不影响我们研究有关重力势能的问题，因为我们研究的总是重力势能的差值，不论我们选用怎样一个参考平面，重力势能的差值都是相同的，在解决实际问题时，我们要选择一个最合适的参考平面，例如研究物体在斜面上不同位置的重力势能时，就经常把参考平面设在斜面的底面上，而一般情况下，我们又常常以地面为参考平面。

*重力做功跟物体重力势能变化的关系

现在我们再来讨论一下物体高度变化时，重力对物体做功跟重力势能变化的关系。如果物体的高度由 h_1 降低到 h_2(图 6-15)，重力势能就减小了 $mgh_1-mgh_2=mg(h_1-h_2)$。在这个过程中，重力对物体做了功，重力做的功 $W_G=mg(h_1-h_2)$。所以，重力对物体做功，物体的重力势能就会减小，减小的重力势能就等于重力对物体所做的功。

■

如果物体的高度由 h_1 升高到 h_2(图 6-16)，重力势能就增大了 $mgh_2-mgh_1=mg(h_2-h_1)$。在这个过程中，物体要克服重力做功，物体克服重力所做的功 $W_G=mg(h_2-h_1)$。所以，物体克服重力做功，物体的重力势能就会增大，增大的重力势能等于物体克服重力所做的功。

重力做功的特点

从重力做功跟物体重力势能变化的关系式中，我们可以看出重力对物体做功有一个特点，即重力对物体所做的功，只跟物体位置的高度变化有关，而跟物体运动的实际路径无关。对于重力做功的这一特点，我们是这样来分析的：当物体在重力作用下，通过任何路径时，物体的位移是可以分解成竖直方向上和水平方向上两个分位移的。由于重力是在竖直方向上的，所以重力所做的功跟水平分位移无关，而只决定于重力的大小和竖直分位移的大小，也就是说只决定于重力的大小和物体位置的高度变化。例如从斜面顶端沿斜面下滑到底端的物体，它运动所经过的实际路径是斜面的长，但在它下滑过程中，重力所做的功却决定于斜面的高。物体从斜面底端滑到顶端时，物体克服重力所做的功也是同样的。再如，由曲面顶端沿曲面下滑到底端的物体，它运动所经过的实际路径是曲线，但在它下滑过程中，重力对它所做的功，也只跟曲面的高度有关。重力做功的这一特

点，并不是任何力做功都有的，摩擦力做功就没有这个特点。

弹性势能

把压缩的弹簧用细线扎住放在一块平板的光滑凹槽中，在弹簧的前端放上一个小球(图 6-17)，用火烧断细线，弹簧在恢复原状的过程中，弹力对小球做功，把小球弹出。所以不但升高的物体具有势能，发生弹性形变的物体，它的内部各部分之间的相对位置发生变化时，也会具有势能，这种势能叫做弹性势能。大量事实表明，任何发生弹性形变的物体，如拉开的弓(本章导图 3)，吹胀的气球，正在击球的球拍，卷紧的时钟发条，撑杆跳高运动员起跳后的撑杆等，都具有弹性势能，因为它们在恢复原状时，都能对其他物体做功。

重力势能和弹性势能都属于势能(potential energy)，另外还有其他形式的各种势能，例如电势能、分子势能等。对此，我们将在有关知识的学习中逐步了解它们。

思考

1．体积相同的铅球和铝球，要使它们的重力势能相等，应该把哪一个球放得高些？

*2．一个小球从不同倾角的几个光滑斜面的同一高处滚下(图 6-18)，重力对小球所做的功是不是相等？

练习三十二

1．猎人的质量是 70 千克，登上 25 米高的小丘追捕猎物时，他的重力势能是多少？

■

*2．质量是 2.5 千克的钢球，自由下落 1 秒钟，它的重力势能减少了多少？你能知道它这时的重力势能是多大吗？

*3．打桩锤的质量是 500 千克，打桩时锤从 6 米高处下落 1.5 米。这过程中锤的重力势能发生了多大的变化？下落后它的重力势能多大？

五、机械能守恒定律

机械能

我们已经学习了动能、重力势能和弹性势能，如果我们仔细观察周围的事物，可以发现有许多物体在作机械运动时，既具有动能又具有势能。例如高空飞行的飞机，它具有一定的动能，又具有一定的重力势能。我们把动能和势能统称为机械能。

深入一步研究，我们还能发现动能和势能是可以相互转化的，例如下落的瀑布(本章导图 2)就是势能转化为动能，在转化时还存在着一定的数

量关系。

动能和重力势能的相互转化

我们首先通过图 6-19 的实验来观察物体动能和重力势能的相互转化。如图所示，把一个钢球拴在细线的一端，把线的另一端悬挂起来，让它可以自由摆动，然后把钢球从平衡位置 O 拉到 B，放手后可以看到钢球从 B 经过 O 摆到 C，再由 C 经过 O 回到 B，来回摆动。显然在 B 点和 C 点时，钢球的速度为零，动能等于零，只具有重力势能。钢球经过 O 点时，只具有动能，重力势能等于零(把 O 点所在的水平面作为 h=0 的参考平面)。也就是说，钢球经过 O 点时的动能是由它在 B 点时的重力势能转化来的，钢球到达 C 点时的重力势能又是由它在 O 点时的动能转化来的。这样，由于钢球的来回摆动，它的重力势能和动能也就不停地相互转化着。

在建筑工地上，我们可以看到这样的事例：气锤在升高的过程中，克服重力做功，速度越来越小，动能不断减小，但重力势能不断增大，显然这时它的动能转化为重力势能。从高处回落的气锤情况恰好相反，在下落的过程中，重力对它作功，重力势能不断减小，但速度越来越大，动能不断增大，显然这时它的重力势能转化为动能。分析这个事例，我们不难看出动能和重力势能的相互转化，是通过重力做功来实现的。下面我们再进一步来研究这个转化过程中的数量关系。

机械能守恒定律

我们先以只受重力作用的自由落体为例来进行研究(图 6-20)。假设物体的质量是 m，它从高度是 h 的地方下落到地面，以地面为重力势能等于零的参考平面，则它在 h 高度处的重力势能 $E_{p1}=mgh$，动能 $E_{k1}=0$。当它到达地面时，重力势能$E_{p2}=0$，动能$E_{k2}=\frac{1}{2}mv^2$。根据自由落体运动$v=gt$，$h=\frac{1}{2}gt^2$，可得$v2=2gh,\frac{1}{2}mv^2=mgh$。

可见，物体在高度为 h 处的机械能 $E_1=E_{p1}+E_{k1}$ 跟物体自由下落到地面时的机械能 $E_2=E_{p2}+E_{k2}$ 是相等的。

即　$E_1=E_2$。

进一步研究还可以发现，前述自由落体在下落途中，从高度为 h_1 处下落到高度为 h_2 处，速度由 v_1 增大到 v_2 的过程中(图 6-21)，物体重力势能的变化为$mg(h_1-h_2)$，物体动能的变化为 $\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$，根据自由落体运动

$$v_1^2-2g(h-h_1),$$
$$v_2^2=2g(h-h_2),$$
$$v_2^2-v_1^2=2g(h_1-h_2),$$

可得　$$mg(h_1-h_2)=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2。$$

■

这就表明，物体自由下落过程中，在任意两个位置间的动能变化量和重力势能变化量总是相等的。

此式经整理也可写成

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

即　$E_1=E_2$。

■

研究和分析都证明，在只有重力作功的情况下，物体的重力势能和动能相互转化的过程中，重力势能和动能的总和是不变的。这个结论叫做机械能守恒定律。

这个结论不仅对只受重力作用的自由落体是正确的，对任何运动物体，在只有重力做功的情况下，也总是正确的。例如物体沿光滑斜面运动就属于这种情况。

[例题 1]

一辆冰橇从离地 10 米高处，沿弯曲起伏的滑道向下滑行。如果不计阻力，求冰橇滑到地面时的速度。

解　冰橇在下滑过程中只受重力和滑道的弹力作用，而滑道的弹力跟冰橇的运动方向总是垂直的，它不对冰橇做功，因此只有重力对冰橇做功，冰橇的动能和重力势能的总和是守恒的。

设冰橇的质量是 m，它开始下滑时的重力势能 $E_{p1}=mgh$，动能 $E_{k1}=0$。到达地面时的速度是v，重力势能$E_{p2}=0$，动能$E_{k2}=\frac{1}{2}mv^2$。根据机械能守恒

$$\frac{1}{2}mv^2=mgh,$$

$$v=\sqrt{2gh}=\sqrt{2\times 9.8\times 10\text{米}}/\text{秒}=14\text{米}/\text{秒}。$$

冰橇到达地面时的速度是 14 米/秒。

由于冰橇是沿着弯曲起伏的滑道下滑的，它经过的路径情况复杂，所受的合外力也变化不定，所以不便应用牛顿第二定律解题。而用动能和重力势能相互转化中机械能守恒的规律求解时，只要考虑运动的初始状态和终了状态，无须讨论整个过程中的细节。这样，就可以简捷地解决问题。

[例题 2]

以 14 米/秒速度竖直向上抛出一个石子，假设不计空气阻力，那么石子上升 6 米距离时，它有多大的速度？石子可以上升多大距离？解石子被上抛后，因不计空气阻力，只克服重力做功，它的动能转化为重力势能，而动能和重力势能的总和保持不变。

由于 v_1=14 米/秒，h_1=0，h_2=6 米，g=9.8 米/秒^2，根据

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

即得 $v_2 = \sqrt{v_1^2 - 2gh_2} = \sqrt{14^2 - 2\times 9.8\times 6}$米/秒 $= 8.9$米/秒

石子上升到 6 米时，它的速度为 8.9 米/秒。

当石子上升到最大距离 h_2 时，它的速度 v_2 为零。已知 v_1=14 米/秒，h_1=0。根据

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

得 $h_2 = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{(14)^2}{2\times 9.8}$米 $= 10$米。

石子能上升到 10 米处。

S：重力势能是由物体所处位置的高度决定的。具有重力势能的物体可以是静止在高处，并不作机械运动。所以我觉得重力势能和动能不一样，把它们统称为机械能，用来量度机械运动似乎是不合理的。

T：我们把物体匀速举高要做功，但是物体的动能没有增加。放手让这个举高的物体下落，它的速度就越来越大，动能不断增大。因此我们可以理解为在举高物体的过程中，外力对物体做功，物体增加的机械能不以动能的形式出现，而以重力势能的形式被贮存了。所以在让这个物体自由下落时，由于重力做功，被贮存的机械能不断被释放出来，转化为动能的增加。所以把重力势能和动能统称为机械能来量度机械运动是很合理的。

■

思考

伽利略在他的理想实验中，认为在没有摩擦阻力的情况下，小球从一个斜面的一定高度处滑下，必然能在另一个相接的斜面上滑到同样的高度，不因这个斜面的倾角变化而改变。你能根据动能和重力势能相互转化中总和守恒的规律来解释吗？

功是能量转化的量度

通过前面的学习，我们知道动能和重力势能在重力做功的过程中可以相互转化。重力做多少功，动能和重力势能就转化多少，所以重力做的功就是动能和重力势能转化的量度。在这种情况下动能和势能的总和，即机械能是保持不变的，是守恒的。但是我们经常也遇到物体机械能不守恒的事例。例如，电梯匀速上升时，电梯的动能不变，重力势能越来越大，也就是机械能不断增大。电梯的机械能增大是由于电动机转动时钢索拉力对它做了功。钢索的拉力对电梯做了多少功，就有多少电能转化成机械能。

关闭发动机后的汽车，在平直路面上趟行一段距离后停止。该过程中，它的重力势能不变，动能不断减小，也就是机械能不断减小。汽车的机械能减小是由于它克服阻力做了功。汽车克服阻力做了多少功，就有多少机械能转化为内能。可见，重力以外的力对物体做功时，物体的机械能就发

生变化，机械能将跟其他形式的能发生转化。因此，不同形式的能可以通过做功相互转化，而能量转化的多少也是由做功的多少来量度的。所以，功是能量转化的量度。

功和能是不同的物理量

功是能量转化的量度，功和能有相同的量度单位，但是功和能却是两个不同的物理量。物体具有什么形式的能，具有多少这种形式的能，是由物体的运动状态决定的，所以能是描述物体运动状态的量；物体从一种能量状态转变成另一种能量状态，则必须通过做功的过程来完成，所以功是描述能量转化过程的量。状态量和过程量是不同的。由于能量既不能凭空产生，也不会无影无踪地消失，我们需要知道的只是它的转化情况。功是能量转化的量度，指出了我们可以采取以过程量来量度状态量的变化，但并非把两者等同起来。

能量守恒定律

每一种形式的能都跟物质的某一种运动形式相对应，一个物体可以同时具有两种不同形式的能，例如飞行着的子弹，它既有内能，又有机械能，它的内能决定于温度和体积，而它的机械能决定于速度和高度。如果这颗子弹由于克服空气阻力做功，动能减小，温度升高，这样机械能的一部分就转化为子弹的内能。我们已经知道动能和势能是可以相互转化的，现在又知道内能和机械能也可以相互转化，而且其他形式的能都可以跟机械能或内能相互转化，总之，能的相互转化就表明了物质运动形式的转化。

■

在 19 世纪,许多科学家进一步关注能的转化过程中总能量是否改变的问题。德国物理学家、生理学家亥姆霍兹，在 1845 年发表论文，从医学角度提出了能量守恒定律。1847 年，他又发表论文，在物理学领域里广泛地讨论能量守恒问题。英国物理学家焦耳，前后花了 20 多年时间，系统地测量了可以转化为一定热量的各种形式的能量，1850 年焦耳完成了一篇总结性论文，明确指出：自然界的能量是不能消灭的，那里消耗了机械能，总能得到与它相当的热量。焦耳在实验中还发现，做一定量的电功，即消耗一定的电能来使物体温度升高时，也总是得到等量的内能。这表示在电能和内能互相转化时，总的能量也是守恒的。大量的实验事实证明，任何形式的能转化为别种形式的能时，总的能量都是守恒的。

因此，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，或者从一个物体转移到别的物体。这就是能量守恒定律。

能量守恒定律被称为 19 世纪自然科学三大发现之一,是人们认识自然和改造自然的有力武器。从物理、化学、生物到天文、地质以及各种工程

技术，这一定律都发挥了重要作用，取得了重大的成就。下面我们简单介绍一个近代物理学研究中的例子——中微子的发现。在本世纪30年代初，人们发现在某些原子核反应中能量似乎并不守恒，一部分能量消失了。当时一些人就认为这些实验事实表明能量并不是普遍守恒的，但是另一些人认为在这里能量也是守恒的。奥地利物理学家泡利(1900—1958)在1933年提出，可能存在着一种当时并不知道的极其微小的粒子，所谓消失了的能量，就是被它们带走的。后来意大利物理学家费米(1901—1954)把这种粒子叫做中微子，并且发展了有关中微子的理论，认为它是一种不带电的、质量极其微小的粒子。以后人们一方面继续从理论上研究这种假设的中微子，一方面想办法用实验来探测中微子的存在。直到1956年，在人们已经拥有核反应堆后，才在实验中证实中微子是确实存在的。这样，能量守恒定律就又一次被证实并直接导致了中微子的发现。

■

思考

1．图6-23所示的是意大利著名画家和科学家达·芬

奇(1452—1519)设计的装置。机器各臂上的金属泡里注有一部分水银，达·芬奇设想水银的移动会带动齿轮机构，使轮子转动，且带动传动装置不断对外工作。试从能量守恒定律分析，是不是有可能？

练习三十三

1．在下列事例中的运动物体，如果不计空气阻力，哪些运动物体的动能和重力势能的总和是守恒的，哪些是不守恒的？为什么？

(1)空中飞行的铅球；

(2)杯中从水面下沉的小球；

(3)被匀速拉上光滑斜面的小车；

(4)沿光滑曲面下滑的木块(图6-24)。

2．把用细绳悬挂着的摆球从平衡位置B拉到A(图6-25)，A、B之间的高度相差4厘米。放开手，摆球就在A、C之间来回摆动。如果把一支铅笔沿垂直于摆动平面的方向放在B_1的位置上，摆球将上升到多大高度(不计空气阻力)？

■

3．蒸汽打桩机的重锤质量是250千克，它被提升10米后自由下落打击桩面。它打击桩面时具有多大的动能？速度多大？

4．滑雪运动员从20米高的山坡上滑下，如果阻力忽略不计，滑到山坡高度的一半处时，他的速度多大？

5．在地面点火引爆的爆竹，可以飞升到相当于7层楼的高度，如果测得7楼高度离地面22.5米，不计空气阻力，爆竹是以多大速度离开地面的？

它上升到 10 米时的速度多大？

阅读材料　机械能转化和守恒定律

动能、重力势能和弹性势能统称为机械能。我们知道，在只有重力做功的情况下，物体的动能和重力势能相互转化的过程中，它们的动能和重力势能的总和保持不变。那么动能和弹性势能之间是否也能发生相互转化并且总和保持不变呢？

实验告诉我们：一个放置在光滑水平桌面上的轻质弹簧，一端固定，一端与小球相连。如果将小球从原来位置拉开一定距离，弹簧就具有一定的弹性势能[图 6-26(a)]。放开小球，弹簧收缩，小球在弹簧的弹性力作用下运动起来，弹簧不断收缩，小球不断加速，表明弹性力做功使弹簧的弹性势能不断减小，小球的动能不断增大，直到弹簧恢复原状。这时弹性势能全部转化为小球的动能，小球的速度达到最大值。然后弹簧不断被压缩，小球的速度不断减小，表明弹性力做负功使弹簧的弹性势能不断增大，小球的动能不断减小，直到弹簧被压缩到跟当初拉开小球的距离相同的位置。这时小球的动能全部转化为弹簧的弹性势能[图 6-26(b)]。这就是说，在只有弹性力做功的情况下，小球的动能和弹簧的弹性势能也会相互转化；在转化过程中，它们的动能和弹性势能的总和也是保持不变的，即机械能也是守恒的。

■

综合上述，可以得出这样的结论：

在只有重力或弹性力做功的情况下，物体系统内部的动能和势能在相互转化的过程中，机械能的总和保持不变。这个结论叫做机械能转化和守恒定律，简称机械能守恒定律，它是力学中具有普遍意义的重要定律之一。

机械的分类和机械效率

利用机械能做功或实现机械能和其他形式能相互转换的器具、装备都叫做机械，机械大致可以分为三类。第一类机械是把已有的机械能或非机械能转换成便于利用的机械能，例如风力机(本章导图 1)、水轮机、汽轮机(图 6-27)、内燃机、电动机等，称为动力机械。第二类机械是把机械能转化成非机械能，例如发电机等，称为能量转换机械。第三类机械是利用人力、畜力或动力机械所提供的机械能来做功，以改变施力的大小、方向或运动的快慢，满足各种工作的需要，例如车床(图 6-28)、纺纱机、织布机以及各种交通工具等，称为工作机械。

■

工作机械做功时，动力机械提供的动力对它们做功的功率，称为工作机械的输入功率。工作机械对外界做功的功率，称为工作机械的输出功率。由于工作机械要克服机件运动时的摩擦阻力或者本身所受的重力，它们的输出功率总是小于输入功率。输出功率所占输入功率的百分比称为机械效率。显然，任何实际机械的机械效率都不可能达到 100%，但是它的值的大

小却是工作机械性能优劣的一种衡量标准。

本章学习要求

1．理解功的概念，知道功是能量转化的量度。
2．理解功率的概念。
3．理解动能的概念。
4．理解重力势能的概念，知道弹性势能。
5．理解机械能的概念。
6．理解机械能的转化和守恒定律。
7．知道能量守恒定律及其重要意义。

复习题

1．球员用 100 牛的力踢球，球滚出的距离为 50 米，根据 W=Fs 得出球员踢球做的功是 5 千焦，你认为这个答案对吗？为什么？

2．一个孩子用 80 牛的力想把放在地面上重 100 牛的钢材提起来，但始终未能使钢材离开地面。在试提的过程中，孩子做了多少功？

3．在下列情况中，哪些力对物体做功？物体克服哪些力做功？哪些力不做功？

(1)关闭电动机后，在平直轨道上行驶着的地铁列车；

(2)正在匀速上坡的汽车；

(3)物体沿粗糙斜面加速下滑；

(4)空投物资匀速降落。

4．高 10 米的瀑布每秒钟下落 50 吨的水，如果全部用来冲击水轮机带动发电机发电，估计水轮机和发电机能把流水的机械能的 60%转变成电能，那么发电机的输出功率有多大？

5．输出功率为 4.2 千瓦的车床，在切削某种钢材时的速度是 7.5 米/秒，问车刀克服的阻力有多大？

6．把用细绳悬挂着的摆球拉到水平位置 A(图 6-29)，然后放手，如果细绳的长度 l=50 厘米，求：

(1)摆球经过最低点 B 时的速度；

(2)摆球往回摆动经过比 A 点低 10 厘米高处时的速度(不计空气阻力)。

7．站在 10 米高的楼上，以 10 米/秒速度抛出一个小球，小球落到地面时的速度多大？不计空气阻力，解题时为什么不必知道小球的质量和小球抛出时速度的方向？

8.质量是 0.4 千克的小球,以 2 米/秒的速度滚落到一个光滑的小坑(图

6-30)内，坑深 1 米，它的另一端高 1.3 米，小球能滚上另一端吗？

■

7．周期运动
PeriodicMotion

1．1976 年 3 月出现的大彗星
2．海浪的周期运动
3．荡船
4．离心试验器

一、周期运动

自然界中有许多现象是不断重复出现的，如昼夜交替、月亮圆缺、彗星回归、海浪起伏(本章导图 1、2)等。生活和生产劳动中，也常会看到许多过程是重复出现的，如游乐场里的秋千、荡船(本章导图 3)的来回运动，木工锯木时锯子有节奏的往复动作，自动装配线上机械手的操作，各类机床工作时它的转动和移动部件的重复动作等。这些现象有的比较简单，有的比较复杂，但它们都表现出周而复始这一共同的特点。凡是运动中的物体，在运动状态，包括位置、速度、加速度等发生变化的过程中，从任一时刻开始，每经过一定时间，就回复到开始时刻的运动状态，这种性质的运动，叫做周期运动。

周期

各种周期运动中，物体从任一运动状态开始发生变化到第一次回复到这一运动状态，所经过的时间叫做周期(period)。周期用符号 T 表示，单位是秒。一般说来，各种周期运动的周期是不同的，甚至差别非常大。如哈雷彗星的回归周期约是 76 年，地球绕太阳运动一周的时间是 365 天 5 小时 48 分 46 秒，钟表店里的大挂钟的摆锤摆动一次的时间是 2 秒，新型的原子钟所用的铯-133 的振荡周期只有 1.09×10^{-10} 秒。

掌握了周期运动的周期，对于预见事物的发展变化有着重要的现实意义。例如港口满载的轮船总要选择涨潮时启航，掌握了潮汐的周期，就可以确定轮船启航的时刻。又如发射空间探测卫星，掌握了它的运行周期，就可设计、计算卫星返回地面的时刻和地点。

有许多事物的发展变化也存在着一定的周期性，如太阳表面大量黑子群的出现将影响地球上空的电离层，干扰无线电短波通信，甚至使航行中的飞机、轮船迷失方向，造成事故。掌握了太阳表面大量黑子群出现的周期(约 11 年～13 年)，就能及时作出预报，减小损失。

下面我们将分别研究几种典型的周期运动以及它们的规律。思考

1．四冲程内燃机(图 7-1)工作时，有哪些部件做周期运动？2．钟表上的分针和秒针的周期的比是多少？

■

二、匀速圆周运动

日常生活中可以见到许多转动的物体，如洗衣机的叶轮、电扇的叶片等，这些转动体上的每一个点(如图 7-2 所示电扇叶片上的 P、Q 点)的运动轨迹都是圆，这些点都在做圆周运动，它们经过一定时间，运动一周后又都回到原来位置，所以是一种周期运动。

■

质点沿着圆周运动，如果在相等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。

正常运转的洗衣机的叶轮和电扇叶片上的每一个点的运动，都是匀速圆周运动。地球沿着一个接近于圆的轨道绕太阳运动，也可以看成是匀速圆周运动。

思考

图 7-3 所示的是掷链球运动，在运动员拉紧链条转动身体的过程中，链球的运动能否看成是匀速圆周运动？为什么？

线速度

质点做匀速圆周运动时，它的速度方向是怎样的呢？我们可以先观察一个简单的现象。用硬纸剪成半径约 2 厘米的圆片，把一根火柴穿过圆心，做成一个小陀螺。在圆片的边缘滴几滴墨水，小陀螺下面衬一张白纸。转动陀螺，附着圆片边缘做圆周运动的墨水滴就飞溅开去，在白纸上留下痕迹(图 7－4)。从这些痕迹可以看出，做圆周运动的墨水滴的速度方向，是沿着圆周上各点的切线方向。

■

实验表明，质点做圆周运动时速度的方向在时刻改变，它在某一点(或某一时刻)的速度方向，就是圆周的这一点的切线方向。

做匀速圆周运动的质点沿圆弧运动的快慢常常是不同的。例如地球绕太阳运动时的速度大小为 2.98×10^4 米/秒；使用螺旋桨发动机的飞机飞行时，桨叶尖端的速度大小接近声速(340 米/秒)；而一般电钟的秒针尖端沿圆弧移动的速度大小仅为 0.01 米/秒左右。在匀速圆周运动中，人们用线速度来描述质点沿圆弧做匀速圆周运动的快慢程度。

线速度等于做匀速圆周运动的质点经过的圆弧长度跟所用的时间的比值。如图 7－5 所示，当质点 P 沿半径为 r 的圆弧，从 A 点运动到 B 点，经过弧长△s，所用时间为△t，那么这一质点做匀速圆周运动的线速度的大小

$$v=\frac{\triangle s}{\triangle t}。$$

做匀速圆周运动的质点的线速度大小是不变的，但线速度的方向是时刻改变的。

■

线速度跟周期的关系

质点沿半径为 r 的圆做匀速圆周运动时，如果已知线

速度为 v，运动一周所用的时间(周期)为 T，那么，可以得出线速度跟周期的关系

$$v=\frac{2\pi r}{T}。$$

S：把自行车的后轮架空，转动轮子时，可以清楚地看到靠近车轮转动轴处的钢丝弯头做圆周运动，却看不清钢圈上气门芯子的圆周运动，为什么？

T：当轮子转动一周时，钢丝弯头和气门芯子也都转动了一周，即它们做圆周运动的周期T是相同的。根据关系式$v=\frac{2\pi r}{T}$可知，当T一定时，线速度 v 跟半径 r 成正比。气门芯子做圆周运动的半径远大于钢丝弯头做圆周运动的半径，气门芯子的线速度就远大于钢丝弯头的线速度，所以你就看不清气门芯子的运动了。

■

角速度

质点做圆周运动的快慢也可以用角速度来描述。在图 7－5 中，质点 P 在△t 时间里从 A 点运动到 B 点经过弧长△s 时，半径 OA 也转过一个角度△Ψ(即图中∠AOB)。我们把半径转过的角△φ跟所用时间△t的比值叫做圆周运动的角速度。角速度的符号是ω，写成公式就是

$$\omega=\frac{\triangle\varphi}{\triangle t}。$$

角速度的单位由角度单位和时间单位组成，在我国法定计量单位中，规定角度的单位是弧度，时间的单位是秒，角速度的单位就是弧度/秒，读作弧度每秒，符号是 rad/s。

在质点做匀速圆周运动的一个周期 T 内，半径 r 转过的角度为 2π，所以角速度跟周期的关系是

$$\omega=\frac{2\pi}{T}。$$

线速度跟角速度的关系

比较线速度$V=\frac{2\pi r}{T}$和角速度$\omega=\frac{2\pi}{T}$两式，就可以得出线速度跟角速度的关系

$$v=\omega r。$$

思考

1．在什么条件下线速度 v 跟半径 r 成正比，在什么条件下角速度ω跟半径 r 成反比。你能分别举例说明吗？

2．一般唱机的电动机转轴每分钟转数是不变的。放唱片时，拾音器(唱头)放在唱片的边缘部分(图 7—6)，随着唱片的转动，拾音器逐渐向唱片的中心靠近。唱片上不同半径处，在相等弧长上记录的相同频率的声振动的次数相等吗？

■

练习三十四

1．在半径为 15 米的杂技场中进行马术表演时，马沿圆形场地边缘奔跑，把马的运动看成匀速圆周运动，已知线速度是 8 米/秒，那么，马奔跑一周需多少时间？

2．把月球绕地球的运动看成是匀速圆周运动，已知月球与地球相距 3.844×10^5 千米，月球绕地球运动一周需时 27.9 天，试计算月球绕地球运行的线速度大小。

3．砂轮机上的砂轮，半径是 10 厘米，当它以每秒 18 转的转速匀速转动时，砂轮边缘质点做圆周运动的角速度多大？线速度多大？离圆心 5 厘米处的质点的角速度多大？线速度多大？

4．自行车的“牙盘”和“飞”用链条相连(图 7—7)，当把后轮架空，均匀摇动踏脚板时，“牙盘”和“飞”边缘的齿都可看成做匀速圆周运动。如果已知某种型号自行车的“牙盘”和“飞”的半径之比为 2.4∶1，那么，“牙盘”和“飞”的周期之比是多大？角速度之比是多大？

■

三、向心力向心加速度

我们知道，物体不受任何外力作用时，它将保持静止或者做匀速直线运动状态。那么，做匀速圆周运动的物体受力情况是怎样的呢？

现在我们通过一个实例来分析。用线操纵航空模型(图 7－8)飞行时，运动员必须站在场地的中央，用手拉紧钢丝，同时自己缓慢转动，使模型沿水平面做匀速圆周运动。这时，航空模型所受重力始终被机翼产生的升力所平衡，发动机产生的牵引力跟空气阻力相平衡，而航空模型能沿着圆周运动，是依靠钢丝对它施加的拉力。一旦运动员脱手或钢丝断裂，航空模型就不再做圆周运动，它将沿着运动员脱手时模型经过的圆弧上那一点的切线方向飞去。

我们再来观察一个现象：斜面上滚下的一个小球，具有一定的速度，它沿着光滑的水平桌面做匀速直线运动(图 7－9)。当它接触到一块固定着的光滑圆弧形挡板 P 时，挡板对小球的弹力将时刻迫使小球改变运动方向，使它沿着圆弧运动。当小球离开挡板，由于它不再受到挡板的弹力作用，小球所受合力为零，它将沿着挡板末端处圆弧的切线方向做匀速直线运动。

以上例子以及其他大量事实表明，做匀速圆周运动的物体必须受到一个方向时刻改变、总是指向圆心的力的作用，这个力叫做向心力。

向心力的大小

生活经验告诉我们，在沿平直的公路匀速行驶的汽车里，坐在靠近车厢侧壁处的人，不会感到车厢壁的挤压作用。但假如汽车突然左转弯时，靠近车厢右侧壁处的人就会感到车厢壁的挤压作用。这表明当汽车转弯时，人跟着汽车做圆周运动，必须受到向心力的作用。汽车速度越大，转弯半径越小，这种挤压作用就越明显，人受到的向心力就越大。

我们可以用图 7－10 所示的实验装置来研究向心力的大小跟哪些因素有关。装有固定滑槽的光滑圆板中央有一转轴，通过皮带传动，圆板能在水平面内转动，滑槽中的小球能沿槽滑动，小球上系一细绳通过空心转轴与固定着的圆盘测力计相连。当圆板转动时，小球将沿槽向外滑动，细绳便被拉紧，细绳对小球产生的拉力，就是小球做圆周运动所需的向心力。当圆板静止时，测力计读数为零。当圆板匀速转动时，小球将以某一半径、某一线速度做匀速圆周运动，这时小球所需向心力的大小可由测力计读出。若换以质量较大的小球做实验，在相同半径(为保持半径相同，可调节测力计与圆板间的距离)、相同线速度的情况下，可以看出测力计读数将增大。精确的实验表明：向心力 F 跟质量 m 成正比，即 $F \propto m$。

■

如果使圆板转动变快，在保持小球质量不变、半径不变的情况下，可看出小球的线速度增大，测力计读数将增大很多。精确的实验表明：向心力 F 跟线速度 v 的平方成正比，即

$$F \propto v^2。$$

实验还可证明，在质量和线速度都不变的情况下，小球所需的向心力 F 跟半径 r 成反比，即

$$F \propto \frac{1}{r}$$

综合以上结果，可以得出向心力

$$F = k\frac{mv^2}{r}。$$

式中比例常数 k 的取值与式中其他各量所用单位有关。在我国法定计量单位中，质量 m 的单位是千克，半径 r 的单位是米，速度 v 的单位是米/秒，力 F 的单位是牛，则 k=1，于是向心力公式可写成

$$F = \frac{mv^2}{r}。$$

如果把线速度 $v=\omega r$ 代入上式，则可得到向心力跟角速度和半径的关系式

$F=m\omega^2 r$。

向心加速度

做圆周运动的物体必须受到向心力的作用，根据牛顿第二定律可以知道，力必定会产生加速度。向心力产生的加速度叫做向心加速度。

把向心力的公式代入牛顿第二定律公式，可以得到计算向心加速度的公式

$$\alpha = \frac{v^2}{r},$$

或

$$\alpha = \omega^2 r$$

向心加速度的方向跟向心力相同，总是跟速度 v 的方向垂直、沿着半径指向圆心的。

怎样理解匀速圆周运动中向心加速度的意义呢？在变速直线运动中，加速度描述了速度大小变化的快慢；在匀速圆周运动中，线速度的大小不变，但方向时刻在改变，所以向心加速度是描述线速度方向变化快慢的。我们可通过以下实例的分析来理解。若一辆汽车以相同大小的速度驶入不同半径的弯道，弯道半径越小，速度方向改变越快，向心加速度就越大；弯道半径越大，速度方向改变越慢，向心加速度就越小；而当半径接近于无限大，即汽车接近于做直线运动时，它的速度方向几乎不再改变，向心加速度也就接近于零。

由此可见，匀速圆周运动中存在着向心加速度，所以匀速圆周运动是变加速运动。

S：匀速圆周运动中的向心加速度的大小既然不变，那么，匀速圆周运动是否也属于一种匀变速运动？

T：不属于匀变速运动。因为匀变速运动的特点是加速度的大小和方向都不随时间而变化，而匀速圆周运动中的向心加速度，它的大小虽不变，但方向时刻在改变，总是指向圆心，所以向心加速度是不断变化的，因此匀速圆周运动是一种变加速运动。

■

思考

由公式$F = \frac{mv^2}{r}$，可知向心力F跟半径r成反比；由关系式$F = m\omega^2 r$，可知向心力 F 跟半径 r 成正比，这两者是否有矛盾呢？

匀速圆周运动实例分析

做匀速圆周运动的物体所受的向心力可以是一个力，也可以是几个力的合力。下面我们分析几个例子。

1．高速船模试验

高速船模试验是在实验水槽中进行的。水槽中央有一立柱，柱上套一圆环，用一根长绳，一端系在圆环上，另一端拴住船模。开动船模，让它绕柱作匀速圆周运动(图 7－11)，这时船模受到的向心力是由什么力提供的呢？为了解决这个问题，我们先分析船模的受力情况。船模共受到五个

力的作用：在竖直方向上受到向下的重力 G 和向上的浮力 Q 的作用，它们是一对平衡力；在水平方向上，受到沿切线方向、与运动方向相同的动力 F 和与运动方向相反的阻力 f，它们也是一对平衡力；还受到始终指向圆心的绳子拉力 T，这个力(也就是五个力的合力)就是使船模做匀速圆周运动的向心力(图 7－12)。

■

2．圆锥摆

在一段细绳的下端拴一小球，绳的上端固定，将拴住小球的细绳从竖直方向拉开一个角度 θ，然后沿垂直于细绳与竖直方向所决定的平面的方向，轻轻推一下小球，使它在水平面内做匀速圆周运动[图 7－13(a)]。这时小球所需的向心力是由什么力提供的呢？

小球受到重力 G 和绳子拉力 T 的作用，这两个力的合力 F 就是使小球做匀速圆周运动的向心力，这个力始终是沿着水平方向指向圆心的[图 7－13(b)]。实验测定，在绳长和 θ 角一定的情况下，小球每运动一周的时间是相等的。由于小球在运动一周的过程中，细绳在空间划出一个圆锥形，所以把这一等时性装置叫做圆锥摆。

S：为什么不能说圆锥摆中的小球受到重力、绳子拉力和向心力三个力的作用？

T：圆锥摆中的小球实际上只受到重力 G(地球对它的作用)和拉力 T(绳子对它的作用)两个力的作用，除这两力外，没有其他物体对小球作用。向心力仅是这两个力的合力，它是以效果命名的，它使小球产生向心加速度，而不是小球受到的另一种力，因此不能说圆锥摆中的小球受到三个力的作用。

■

3．火车转弯

在平直轨道上行驶的火车进入弯道时必须保持一定的速度。为此，常在弯道处设有速度标志。这是为什么呢？

■

仔细观察一下火车的车轮就可发现，车轮内侧有一凸出的轮缘(图 7－14)，这样，装在车轴两侧的车轮就可以卡在固定轨距的两条钢轨间。当火车在平直路段上行驶时，钢轨只受到车轮施加的向下压力，车轮也只受到钢轨施加的向上弹力。当火车驶入弯道时，由于惯性，火车通过车轮将从侧向挤压外侧的钢轨，固定在轨枕上的钢轨受到侧向挤压力的同时对车轮施加的反作用力，将迫使火车产生向心加速度做圆周运动。这就是说，火车做圆周运动所需的向心力是由钢轨对车轮的侧向压力提供的。由于火车质量很大，运动速度也较大，转弯时车轮轮缘与外轨间的相互挤压力很大，钢轨和车轮都很容易受到损坏。

为了解决这个问题，工程技术人员把铁路弯道处的路基截面设计成倾

斜的，使弯道处的外轨比内轨高(见课本彩图 14)。这样，当火车驶入弯道时，钢轨对车厢的弹力 N 和车厢所受重力 G 不在一直线上(图 7－15)，它们的合力 F 就能提供作为火车做圆周运动时所需的向心力。

火车在弯道上行驶时的速度决定于弯道的曲率半径和轨道平面与水平面间的夹角。火车若以某一速度驶过弯道，则钢轨将不受侧向压力；若速度过大，由于路基截面倾斜所能提供的合力还不能满足火车所需的向心力，弯道处的外轨仍会受到侧向压力；若速度过小，由于路基截面倾斜提供的合力大于火车所需的向心力，弯道处的内轨将受到侧向压力。所以火车进入弯道时应以规定的速度行驶。

思考

1．把一串钥匙通过细链提在手中，甩动钥匙可以使它在竖直平面里做圆周运动[图 7－16(a)]，也可以使它在水平面里做圆周运动[图 7－16(b)]。在这两种情况下，钥匙做圆周运动的圆心位置是相同的吗？

2．图 7－17 所示的赛车场，在弯道处的跑道为什么设计成倾斜的？

■

练习三十五

1．物体做匀速圆周运动时，以下说法中正确的是　　[　　]

(A)必须受到恒力作用；

(B)所受合力必须等于零；

(C)必须受到大小变化的向心力作用；

(D)必须受到大小不变的向心力作用。

2.在竖直放置的光滑玻璃漏斗中有一小球沿内壁在某一水平面内作匀速圆周运动(图 7—18)，这时小球受到的力　　[　　]

(A)重力和弹力；　　(B)重力和向心力；

(C)弹力和向心力；　　(D)重力、弹力和向心力。

3．一般自行车车轮的直径约为 0.7 米。当自行车以 5 米/秒的速度匀速运动时，车轮边缘的质点相对于车轮的轴是做匀速圆周运动。试求车轮边缘质点的向心加速度。若小轮自行车以相同速度匀速运动时，车轮边缘质点的向心加速度是大些还是小些？

4．在某传动装置中(图 7－19 是该传动装置的局部示意图)有 A、B 两轮，它们以皮带相连。若 A、B 两轮的半径比为 3∶1，则该两轮边缘质点的向心加速度的比多大？

5．图 7－20 所示的光滑水平面中央有一圆孔，一根细线穿过圆孔，它的两端分别跟质量为 m 的小球和质量为 M 的钩码相连。为了使小球在水平面上能做保持半径为 r 的匀速圆周运动，试写出它的线速度的表达式。在运动过程中，如果小球的线速度减小了，将会发生什么现象？

6．质量为 6×10^3 千克的汽车，以 10 米/秒的速度驶过半径为 80 米的圆环形回车道，这时汽车的向心加速度多大？所需的向心力多大？

■

■

7．甲、乙两球都做匀速圆周运动。甲球的质量是乙球的 3 倍，甲球在半径为 25 厘米的圆周上运动，乙球在半径为 16 厘米的圆周上运动。乙球的线速度是甲球的 2 倍。试求两球所受向心力之比。

*四、离心现象

在生活中我们常会见到这样一些现象：舞蹈演员在表演旋转动作时，裙子会张开(图 7－21)；在雨中若把伞柄转动一下，伞面上的雨水将会很快地沿伞面运动，到达边缘后雨水将沿切线方向飞出；满载黄砂或石子的卡车，在急转弯时，部分黄砂或石子会被甩出。这些现象都表明做圆周运动的物体，必须受到足够大的向心力作用，如果提供的向心力不足或者突然失去向心力，物体就不能再沿着原来的圆周运动而逐渐远离圆心，这种现象叫做**离心现象**。

离心现象在生产技术和科学研究中有很多应用。家用洗衣机中的脱水器就是利用离心现象的一种机械装置，又称离心干燥器，它由一个多孔金属圆筒组成(图 7－22)。洗好的湿衣物放在脱水器里，当它高速转动，水滴跟衣物间的相互作用力不足以提供水滴做圆周运动所需的向心力时，水滴就离开衣物，穿过圆筒壁上的小孔飞到筒外，于是筒内衣物就比较干燥了。

■

用过的体温计必须把细管内的水银用力甩回到测温泡内，才能够再次使用，这一操作顺序可利用离心器械来完成。在医院里，护士将测过体温的体温计排齐，使测温泡都朝下装入小袋内，挂在离心机上(图 7－23)。当离心机高速转动时，体温计细管内的水银由于得不到足够的向心力，就会远离圆心进入测温泡内。这样，就可代替人工操作，以减轻劳动强度。

本章导图 4 是训练飞行员用的一种离心试验器。当试验器转动时，被训练人员根据测试要求，在试验舱内可取坐、卧等不同姿势，以测试离心作用对飞行员产生的影响，如大脑缺血等。平时，离心试验器常用来训练、提高飞行员和宇航员的适应能力。

离心作用有时会造成危害，需要设法防止。在公路弯道处和交叉路口，车辆行驶不允许超过规定的速度，以免由于离心现象造成覆车事故。又如高速转动的砂轮、飞轮，都不得超过允许的最大转速，如果转速过高，砂轮、飞轮内部分子间的相互作用力不足以提供所需要的向心力时，离心作用会使它们破裂，以致酿成事故。

思考

1．棉花糖是由一个简单的装置(图 7－24)制作的。中间是一个筒壁有许多细孔的金属圆筒，在筒里加白砂糖，加热后白砂糖熔化成糖液，当筒高速转动时，筒外就出现许多纤细的糖丝，形成了棉花糖，请说明原因。

2．有的高层建筑顶部设有旋转餐厅(图 7－25)，这种旋厅约 1 小时转动一周，观光客人即使坐着不动也可以从各个方位俯瞰城市风光。观光客人在旋厅里为什么不感觉到有离心现象？

■

3．有一种大型游戏器械，它是一个圆筒形的大容器，游客进入容器后靠筒壁坐着(图 7－26)。当圆筒开始转动，转速逐渐增大，游客会感到自己被紧紧地压在筒壁上不能动弹。当转速增大到一定程度时，突然地板与坐椅一起向下坍落，游客们大吃一惊，但他们都惊奇地发现自己是安全的。请回答这时人们做圆周运动所需的向心力是由什么力提供的？人们自身所受重力又是被什么力所平衡？

■

五、行星的运动

远古时代的人们，就已注意到日月星辰等天体的运动具有周期性。“日出而作，日落而息”就是根据太阳和地球间的相对运动而使人们自然形成的生活节奏。但究竟是“天动”还是“地动”，在历史上曾经有过长期的争论。

公元 2 世纪，古希腊天文学家托勒玫(约 90—168)综合了许多天文学家的观测资料，提出了地心说，认为不动的地球是宇宙的中心。这种观点是基于从地球上观察天体位置的变化，以为所有天体都围绕地球转动，这与当时教会认为“地球是上帝的宝座”的观点相吻合。“天动”的观点一直持续了 1000 多年。到了 16 世纪，随着航海事业的发展，各种观测手段的日益完善，积累资料的日益丰富，人们逐渐发现地心说与实际观测的结果有越来越大的矛盾。波兰天文学家哥白尼(1473—1543)于 1543 年发表了《天体运行论》，提出与地心说完全相对立的日心说，认为地球和其他行星都是环绕太阳运行的，太阳是宇宙的中心，并明确指出人们观察到的太阳东升西落是由于地球自转所引起的。《天体运行论》以大量的观测事实为根据，以严密的数学运算来论证日心说的观点，并准确预言月食和当时已知的行星的位置，使自然科学摆脱了神学的束缚。

行星的运动

宇宙太空有无数运动着的天体，它们形成了不同层次的天体系统。月球绕地球公转构成了地月系；地球和其他绕太阳公转的行星、彗星等构成了太阳系；约有 2000 多亿个像太阳系那样的恒星系构成了银河系；银河系

以外、类似银河系的星系叫做河外星系(图 7－27)。银河系和观察到的 10 亿多个河外星系构成了总星系。在这众多的天体系统中，跟人类的生活和生产关系最为密切的是太阳系和地月系。人们很早就对行星的运动和月球的运动进行了观察研究。由于行星绕太阳的运动和月球绕地球的运动是周期运动，人们才有可能一代接一代地对它们的运动进行无数次的重复观察。

17 世纪初，德国天文学家开普勒(1571—1630)在哥白尼日心说的基础上，根据丹麦天文学家第谷(1546—1601)留下的大量天体观测资料，先后用了 17 年时间,对当时已经发现的 6 个行星绕日运动的轨道和规律进行反复计算和观测，指出各个行星绕日运动的轨道是一系列大小不同的椭圆轨道，太阳是在这些椭圆的一个焦点上(图 7－28)。各个行星的绕日运动都是周期运动，离太阳最近的水星的绕日运动周期最小，约是地球的 1/4；离太阳最远的土星的绕日运动周期最大，约是地球的 29 倍。

■

开普勒得出的行星运动规律，不仅适用于行星绕太阳的运动，同样也适用于卫星绕行星的运动。

思考

我国于 1970 年 4 月 24 日发射第一颗人造地球卫星,它的近地点是 439 千米，远地点是 2384 千米。这些数据表示，这颗人造地球卫星的轨道是什么形状？地球位于这一轨道的什么位置？

万有引力定律

天文观测表明，金星、地球等行星的绕日运动都是沿着各自的近似于圆的轨道进行，可以看成是作匀速圆周运动，它必定受到指向太阳的向心力作用，这一向心力只能是太阳对行星的引力。牛顿经过严密论证后确认，使物体加速落向地面的力和太阳使行星保持在它们轨道上运动的力是同一性质的力，宇宙中任何有质量的物体之间都存在着相互吸引的力，牛顿把这种力叫做万有引力。

研究表明，两个物体间的引力大小，跟物体的质量的乘积成正比，跟它们间的距离的平方成反比。这就是万有引力定律。

万有引力定律可用下式表示

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

式中 F 表示万有引力，m_1、m_2 表示两个物体的质量，r 表示两物体间的距离，比例常数 G 叫做万有引力恒量。

我国法定计量单位中，力 F 的单位是牛，距离 r 的单位是米，质量 m 的单位是千克,由实验测定的万有引力恒量 $G=6.67\times10^{-11}$ 牛·米^2/千克^2。它表示两个质量各为 1 千克的物体相距 1 米时，它们之间的万有引力等于 6.67×10^{-11} 牛。

万有引力定律的发现，是 17 世纪自然科学最伟大的成果之一，这一定

律把地面附近物体下落运动的受力规律与天体运动的受力规律统一起来，它第一次揭示了存在于自然界中的一种基本的相互作用——引力的规律，这对以后物理学和天文学的发展有着深远的影响。

思考

1．既然一切物体间都存在万有引力，那么，教室里的桌椅等物品为什么都没有被吸引在一起？

2.如果地球突然失去太阳的引力作用将会怎样？如果地球失去绕日运动的速度，结果又将怎样？

3．甲物体的质量是乙物体质量的 4 倍，所以甲物体对乙物体的引力应是乙物体对甲物体引力的 4 倍，这样的说法正确吗？为什么？

4．当两物体间的距离增大为原来的 4 倍时，两物体间的万有引力将减小为原来的 1/4，这样的说法正确吗？为什么？

*卡文迪许实验

牛顿发现了万有引力定律，能很好地解释天体的运动，但当时由于受到实验仪器精确程度的限制，在实验室中无法检验万有引力定律和测出万有引力恒量 G 的数值。直到 1798 年，即在牛顿发现万有引力定律 100 多年后，英国科学家卡文迪许(1731—1810)利用扭秤这一巧妙的实验装置，才解决了这一个难题。

图 7－29 是卡文迪许设计的扭秤装置示意图。在一根轻杆的两端分别固定两个质量相等的小铅球，用一根细石英丝挂住轻杆，使轻杆保持水平，石英丝上装有一块小平面镜，它能把经过狭缝射来的一细束光，反射到刻度标尺上的某一个位置。两个质量相等的大铅球固定地放在如图中所示的位置，它们跟小铅球的距离相等。由于万有引力的作用，两个小球便向大球靠近，两个小球的运动使石英丝发生扭转，石英丝的扭转角度可以从平面镜的反射光束在刻度尺上移动的距离求出。根据扭转角度，可以推算出大、小球间万有引力 F 的大小。已知大、小铅球的质量 m_1、m_2 和测出两球间的距离 r，便可计算出万有引力恒量 G 的数值。

■

卡文迪许实验证实了万有引力定律的正确性，测出了万有引力恒量。他当时测定的结果跟现代公认的 G 值很接近。

人造地球卫星

我们已经知道，由于地球引力的存在，抛出的物体总要落回地面。生活经验又告诉人们，抛出物的速度大些，它就可以飞行一段较长的距离才落回地面。那么，是否有可能使物体具有足够大的速度而再也不会落回地面呢？牛顿在他的著作中有一幅原理图(图 7－30)回答了这个问题。牛顿认为如果从山顶上水平抛出一个物体，速度较小时，物体将落在山脚下附近的 A 处；若抛出速度逐渐增大，则物体的落地点依次为 B、C、D 等处；如果速度大到使它永远不会落回地面，那么，这个物体将环绕地球表面做

圆周运动，成为一个人造地球卫星。

计算人造卫星的速度需要运用万有引力定律和向心力公式。卫星环绕地球做圆周运动所需的向心力就是地球对它的引力。假设卫星的质量为 m，速度为 v，运动半径(差不多等于地球的半径)为 R，地球的质量为 M，于是

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

得到 $$v=\sqrt{\frac{GM}{R}}。$$

上式表明，v 的大小决定于地球的质量和半径，而跟卫星质量大小无关。人们把这个速度叫做第一宇宙速度，又称环绕速度。将地球质量 $M=5.98\times10^{24}$ 千克，地球半径 $R=6.4\times10^{6}$ 米，万有引力恒量 $G=6.67\times10^{-11}$ 牛·米^2/千克^2 代入上式，可计算出第一宇宙速度 $v_1=7.9\times10^{3}$ 米/秒。但在牛顿的时代，无法使物体获得如此大的速度，直到本世纪火箭发动机的发明和多级火箭技术的发展，才有可能实现人类这一理想。

1957 年 10 月，前苏联率先发射人造地球卫星获得成功。1970 年 4 月，我国成功地发射了“东方红”人造地球卫星。20 多年来，我国已先后发射了 30 多颗用于各种不同用途的人造地球卫星(图 7－31)。

目前世界上已有十几个国家先后发射了各种人造地球卫星，地球外层空间的人造天体(包括人造卫星和空间站)总数已达数千个。人造地球卫星上装备各种不同的科学仪器，就可达到科学探测、微波通信、军事侦察、资源调查、气象预报、环境监测、控制污染、估计农作物收成、发现病虫害灾情等目的。采用发射到地球赤道上空同步轨道上互成 120°角的三颗同步卫星(又称通信卫星)(图 7－32)，就可以实现全球的电视转播。同步卫星环绕地球运动一周的时间和地球自转的周期相等，也就是说它在赤道上方跟地面保持相对静止，犹如悬在空中一样(课本彩图 15)。理论计算表明，同步卫星离地面的高度为 3.58×10^{7} 米，约为地球半径的 6 倍。同步卫星在轨道上的运行速度是个定值，大约为 3.1×10^{3} 米/秒。

*航天技术的发展

自从 1883 年，俄国齐奥尔科夫斯基发表了使用火箭发射太空船的构想以来，一个多世纪过去了。近几十年来，世界各国对太空开发的理论研究和实践有了突飞猛进的发展。

航天活动的主要目的是探索、开发和利用太空以及地球以外的天体。航天包括环绕地球的运行，飞往月球或其他行星的航行。1961 年 4 月，前苏联成功地发射了“东方一号”载人太空飞船，由加加林驾驶的飞船环绕地球一周后，顺利返回地面，实现了世界上第一次太空飞船的载人飞行。美国从 1967 年起，开始执行宏伟的“阿波罗”计划，经历了多次失败，多名宇航员为此献出了生命，终于在 1969 年 7 月 16 日成功地发射了“阿波罗 11 号”，它穿越 3.844×10^{8} 米遥远的太空，于 7 月 21 日到达月球表面。

美国宇航员阿姆斯特朗作为人类的代表第一次踏上了月球(图 7－33)，宣告了人类的活动不再局限于地球。

20 年来，我国的航天事业也有了迅速发展。继 1970 年我国发射第一颗人造卫星后，从 1975 年起，我国就掌握了使卫星返回地面的回收技术。1981 年 9 月，我国成功地用一枚运载火箭将 3 颗空间物理探测卫星送入轨道。1982 年 10 月，我国成功地试验了从水下潜射火箭，这对巩固国防具有重要意义。1984 年 4 月 8 日，我国成功地发射了一颗同步定点试验通信卫星，这样，我国就成为少数几个能独立发射同步卫星的国家之一。1986 年 2 月 1 日又发射成功一颗实用广播通信卫星。目前，我国的运载火箭和卫星技术已从探索试验阶段发展到实用阶段，且已跨入世界先进行列。1995 年 4 月北京空间技术实验中心的奠基，预示着我国宇航员培训的开始。

■

第二宇宙速度和第三宇宙速度

理论计算表明，如果人造地球卫星进入轨道时的水平速度大于 7.9×10^3 米/秒而小于 11.2×10^3 米/秒，它绕地球运动的轨道就不是圆而是椭圆(图 7－34)。当卫星的速度等于或大于 11.2×10^3 米/秒时，卫星就能挣脱地球引力的束缚，成为绕太阳运动的人造行星。前苏联在 1959 年 1 月发射的准备探测月球背面情况的人造卫星“月球 1 号”，它沿着一个很扁的椭圆轨道运行，轨道的远地点在月球背后。但因速度大于 11.2×10^3 米/秒，它就成了一颗绕太阳运行的人造行星，再也不会接近地球。11.2×10^3 米/秒这个速度叫做**第二宇宙速度**，也叫做脱离速度。

达到第二宇宙速度的物体脱离地球后还受到太阳引力的束缚。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 16.7×10^3 米/秒。这个速度叫做**第三宇宙速度**，也叫做逃逸速度。

上述的第一、第二和第三宇宙速度的数值都是对地球而言的，其他行星包括行星的卫星也都有它们各自的宇宙速度。以月球为例，因为它的质量和半径都比地球小，所以在月球表面发射人造月球卫星只需要较小的速度，登月舱的上升级从月球表面返回指令舱时，所消耗的能量比脱离地球表面时小得多(图 7－35)。

练习三十六

1．质量不同的两个物体，它们受到的地球引力的大小是 [　　]

(A)一定相等；

(B)一定不相等；

(C)质量大的物体受到的地球引力大；

(D)条件不够，无法判断。

2．两个质量均为 3.2 千克的铅球，放在操场上相距 2 米，试求它们之间的万有引力。3．在地面受重力为 1.058×10^3 牛的实验装备，用火箭送上离地面 2.6×10^6 米高度时，这些装备受到的地球引力将变为多大？

4．贴近地球表面运行的人造地球卫星的周期多大？已知地球半径为 6.4×10^3 千米。

5．月球质量约是地球质量的 1/81，月球半径约是地球半径的 1/3.7，地球的第一宇宙速度是 7.9×10^3 米/秒。从月球表面发射人造月球卫星至少需要多大的速度？

阅读材料　太空探测的新时代

从本世纪 60 年代开始，前苏联、美国先后发射了各类空间站和行星探测器，执行长期的科学考察任务(课本彩图 17)。进入 80 年代后，1981 年美国研制的一种可以重返大气层、多次使用的航天飞机试飞成功(课本彩图 16)。航天飞机除了能进行科学考察外，还可在空间发射和回收卫星(图 7—36)。

1989 年 5 月 5 日，美国“麦哲伦号”金星探测器由美国“阿特兰蒂斯号”航天飞机进入太空后 6 小时发射。这一探测器于 1990 年 8 月 10 日到达金星上空，进入绕金星运行的椭圆轨道，成为周期是 3.15 小时的金星的一颗人造卫星。它将拍摄到的金星表面图象发回地球。“麦哲伦号”探测器的考察揭示了金星的起源和演化过程，从而有助于研究和了解地球的起源和演化。今后行星际探测将进一步扩展到其他行星，还将研究恒星、类星体和宇宙的起源。

目前世界各国航天技术的发展，围绕着以下两方面进行。在无人航天器方面，进一步发展人造地球卫星和各类空间探测器。在载人航天器方面，首先建立大型永久性载人空间站，由专用实验室、宇航员生活舱、数据处理系统等几部分组成，可供宇航员长期居住；其次是大力开发航天飞机，然后开发月球基地，并将月球作为探测其他星球的前哨基地。

近几年来，美国宇航局为了激发青少年探索宇宙奥秘的兴趣和了解航天知识，利用航天飞机货舱(图 7－37)中的多余空间，鼓励各国青少年提出在失重条件下各类小型的单项设计研究，进行搭机试验。这一倡议有利于发展青少年的想象力和创造力，有利于普及航天知识，得到世界各国科研和教育部门的赞赏，引起了包括我国在内的广大青少年的极大兴趣。他们提出了成千上万的设计方案，其中在失重状态下，蜘蛛是否还能结网、烛焰会是什么形状、鱼类在水中游动时是否还能保持平衡等题目，都已进行了搭机试验。

六、振动

机械振动

一阵微风吹过，池塘里的浮萍会上下浮动，树木的枝条也会左右摇摆。仔细观察蜜蜂、蜻蜓等昆虫在飞行时，它们的翅会很快地上下抖动。孩子们荡秋千时的来回运动，人们走路时，两只手臂会自然地、有节奏地前后摆动，这些常见的运动都有一个共同的特点，即物体(或物体的一部分)在某一中心位置两侧做往复运动，这种运动叫做机械振动，简称振动(vibration)。振动是自然界中和日常生活中常见的另一种周期运动。

简谐振动

有一种玩具狗(图 7－38)，它的头部和尾部用较软的弹簧跟身体相连。如果轻拍一下玩具狗，它便不停地摇头晃尾起来，这是弹簧引起的振动。

如果在上端固定的软弹簧下挂一个小球，将小球向下拉开一段距离后放手，小球便会上下往复运动(图 7－39)，这也是弹簧引起的振动。

■

现在我们来研究上述物体产生振动的原因。为了简化问题，便于分析，可以用如图 7－40 的装置。把有孔的小球跟弹簧连接在一起，穿在一根光滑水平杆上，并把弹簧的左端固定，弹簧的质量比小球小得多，可以忽略，这样就组成一个弹簧振子。拉动一下小球，小球便在水平杆上振动起来。

当弹簧既不拉伸也不被压缩时，小球静止在杆上的 O 点位置，这时小球所受合力等于零。O 点就是弹簧振子的平衡位置[图 7－40(a)]。

如果把小球从平衡位置 O 向右拉到 B 点，这时弹簧被拉伸。放开后，小球所受合力等于弹簧的弹力[图 7－40(b)]，小球在这一指向平衡位置的弹力作用下，向左做加速运动。在振子向平衡位置 O 运动的过程中，弹簧的形变逐渐变小，弹力也逐渐变小，加速度也逐渐变小，但小球的速度增大。当小球经过平衡位置 O 时，弹簧的形变消失，弹力减小到零，加速度等于零，这时小球具有最大的速度。

由于惯性，小球不会停留在平衡位置，它将继续向左运动。但这时由于弹簧被压缩，对小球将作用一个方向指向平衡位置 O 的弹力，小球将做减速运动；随着小球继续向左运动，弹簧的压缩形变越来越大，作用于小球的弹力也越来越大，小球速度不断减小，当速度减小到零时，小球将到达平衡位置左侧的 C 点，这时，弹簧的压缩形变最大，小球受到指向平衡位置的弹力也最大[图 7－40(c)]。

接着，小球将在指向平衡位置的弹力作用下，向右做加速运动。跟前面所讲的情况相类似，小球并不停止在它的平衡位置上，而要越过这个位置，再次回到 B 点。这就完成了一次全振动。以后小球就重复上述过程，在 B、C 间往复运动。

由上述分析可知，弹簧振子在振动过程中，当偏离平衡位置时，总是

受到一个跟位移方向相反、能使振子返回平衡位置的力，这个力叫做回复力。弹簧振子的回复力就是弹簧的弹力。由于弹簧发生弹性形变时，弹力跟形变量成正比，对弹簧振子来说，也就是回复力 F 跟振子的位移 x 成正比，而回复力总是指向平衡位置，所以回复力的方向始终与位移的方向相反，它们之间的关系可用下式表示：

$$F=-kx,$$

式中比例常数 k 是跟振动系统有关的一个量。负号表示回复力 F 的方向始终跟位移 x 的方向相反。

物体在受到大小跟位移成正比，而方向相反的回复力作用下的振动，叫做简谐振动。

■

简谐振动是一种最简单、最基本的机械振动。敲击音叉后，两个股叉上的质点的振动，浮标漂浮在水面时的上、下浮动，都可以看成是做简谐振动。弹奏竖琴、钢琴、吉他(图 7－41)等弹拨乐器时，琴弦的振动是比较复杂的振动，但可以看成是许多简谐振动的组合。

■

S：小球在两个相连接的、对称的光滑斜面上来回运动(图 7－42)，这种运动是否可看成简谐振动？

T：小球的这种运动不是简谐振动，而只是做机械振动。简谐振动是指物体受到跟位移成正比、并且总是指向平衡位置的力的作用下的振动，即 $F=-kx$，回复力 F 是一个变力。而小球在斜面上运动时受到的合力 $F=mg\sin\theta$ 是一个指向 O 点、大小不变的力，而不是跟位移成正比的力，所以不是简谐振动。

思考

1．有一种滑板运动为青年所喜爱，滑板上装有 4 个轮子，踩着滑板可以在半个开口向上的圆柱形滑道或碗形滑道的内壁来回滑行(图 7－43)，这种滑板运动可以看作振动吗？中心位置在哪里？

■

2．图 7－40 中的弹簧振子从 B 点开始运动，经 B→O→C→O→B，完成一次全振动。在振动过程中，如果从振子经过 O 点时开始计算，经 O→C→O→B→O，这算不算完成一次全振动？

振动的振幅、周期和频率

用一根橡皮绳穿过一只乒乓球，将橡皮绳拉成水平后，把橡皮绳的两端固定在两个铁架台上(图 7－44)。将乒乓球沿垂直于橡皮绳方向拉开一小段距离，放开后，乒乓球就以原来的平衡位置 O 为中心，在 B、C 点间振动。这时 OB、OC 间的距离都较小，乒乓球只发生轻微的振动。若开始时使乒乓球离开平衡位置的距离较远，则振动时 OB 和 OC 间的距离都较大，乒乓球发生比较强烈的振动。

振动物体离开平衡位置的最大距离，叫做振动的振幅(amplitude)。振幅等于位移的最大值，它表示振动的强弱。图 7－44 中距离 OB 或 OC 就是乒乓球振动的振幅。图 7－40 中距离 OB 或 OC 就是弹簧振子的振幅。

■

若将上述实验中的两个铁架台间的距离拉大些，使橡皮绳绷得更紧，再拨动乒乓球，可以发现乒乓球的振动变快了。物理学中用周期或频率来表示振动的快慢。

振动的周期是指振动物体完成一次全振动的时间。

单位时间内完成的全振动的次数，叫做振动的频率(frequency)。频率用 f 表示，我国法定计量单位规定频率的单位是赫兹，符号是 Hz，简称赫。每秒钟完成 1 次全振动的频率是 1 赫。

周期 T 和频率 f 有互成倒数的关系，即

$$T=\frac{1}{f}，\quad 或 \quad f=\frac{1}{T}。$$

振动越快的物体，周期越短，频率越大；振动越慢的物体，周期越长，频率越小。如蜜蜂翅的振动频率为 440 赫，周期为 2.3×10^{-3} 秒；苍蝇翅的振动频率为 200 赫，周期为 0.5×10^{-2} 秒。

实验结果表明，振动物体的振动周期或频率是由振动物体本身的性质所决定的，跟振幅的大小无关，所以物体在自由状态下的振动周期或频率，分别叫做固有周期或固有频率。图 7－44 的实验中，如果测得这个装置振动 30 次的时间是 12 秒，它的固有周期就等于 0.4 秒，固有频率就等于 2.5 赫。固有周期和固有频率是物体的本身属性，跟物体是否振动无关。如一面锣、一根绷紧的弦、一座桥梁、一栋建筑物都具有它们各自的固有周期和固有频率。

振动图象

做简谐振动的物体，它的位移的大小和方向是随时间不断变化的。我们可以用实验方法来形象地显示这种变化。

如图 7－45 所示，把钢锯条的一端固定在铁架台上，另一端缚一支蘸有墨水的毛笔，拨动锯条时，毛笔的振动可看成简谐振动，调节毛笔的位置使笔尖刚能接触到放在它下面的一张纸片。如果在毛笔振动的同时，沿着垂直于笔尖振动方向匀速拉动纸片，在纸片上就描出一条曲线，从曲线可以看出笔尖的位移随时间呈周期性的变化。

反映做简谐振动的质点的位移跟时间关系的图象，叫做振动图象。

理论研究指出，简谐振动的振动图象是一条正弦(或余弦)曲线。如果取一直角坐标系，以横轴表示时间 t，以纵轴表示位移 x，就可描绘出一个给定的简谐振动的振动图象(图 7－46)。由图象可以知道振动的周期 T 和振幅 A 的大小，还可以知道质点在任意时刻的位移。

■

匀速圆周运动和简谐振动的关系

匀速圆周运动和简谐振动都是周期运动，它们之间有什么关系呢？我们可以利用图 7－47 所示的装置进行研究。

水平转台匀速转动时，转台的手柄 H 做匀速圆周运动。若用一束平行光，沿着转台的转动平面照射，可以看到手柄 H 在转台后面墙上的投影沿着一条水平线来回运动。当 H 运动一周，它的投影恰完成一次全振动，H 做匀速圆周运动的周期和它的投影振动的周期相等，H 做圆周运动的半径等于它的投影振动的振幅。可以证明，一个做匀速圆周运动的质点，它的投影是简谐振动。

内燃机中活塞沿直线的往复运动，可以通过连杆、曲轴装置转变为飞轮的转动，这类转变运动形式的装置在各种机械中有着广泛的应用。但要注意，这种改变机械运动形式的装置并不反映匀速圆周运动和简谐振动的关系。

■

练习三十七

1．弹簧振子在振动过程中，经什么位置时速度最大？经什么位置时速度为零？经什么位置时加速度最大？经什么位置时加速度为零？

2．图 7－40 中的弹簧振子振动时各量的变化情况，在下面表格中已完成了一部分，试填写剩余的空格。

振子的运动	位移的大小变化	回复力的大小变化	加速度的大小变化	速度的大小变化
B → O	变小			
O → C		变大		
C → O			变小	
O → B				变小

■

3．从图 7－48 所示的振动图象中，在 t=0.25 秒，t=0.5 秒，t=0.75 秒时，质点的位移分别等于多大？质点完成一次全振动需时多少？

七、单摆

游乐场里的秋千、浪木、荡船(本章导图 3)等游戏器械都是周期性摆动的器械，这类摆动都是振动。传说伽利略在比萨大教堂里观察了吊灯的轻微摆动，他以自己的脉搏计时，发现吊灯在连续的摆动中，每一次摆动的时间是相等的(摆的等时性)。在以后的实验中，伽利略进一步证实了他

的观察结果，并向医院建议可用摆这样的装置来测量病人的心律。

单摆

我们把秋千、吊灯等摆动物体简化成一个理想模型。在一根细线下端拴一小球，细线质量远小于小球质量，小球半径比起细线长度也可忽略不计，这样的一个理想模型，叫做单摆。图 7－49 就是单摆及其振动的示意图。

■

现在来分析使单摆振动的回复力。将质量为 m 的摆球，从它的平衡位置 O 拉开一小段距离到 B 点，这时悬线和竖直方向的夹角设为α。放开后，摆球在重力的一个分力 F＝mgsinα的作用下，将沿着一段圆弧 BC 在竖直平面里向平衡位置 O 运动。在摆角α很小(不超过 5°)时，摆球的位移 x 和圆弧长 OB 很接近，设摆长为 l，则

$$\sin\alpha \approx \frac{x}{l}$$

于是回复力

$$F = mg\sin\alpha \approx mg\frac{x}{l}。$$

因此在摆角α很小时，回复力 F 的方向可看作和位移 x 在同一直线上。对于一个给定的单摆，质量 m 和摆长 l 都是不变的，重力加速度 g 也是常数，于是 $\frac{mg}{l}$ 可用一个常数k来表示，且因为回复力的方向始终跟位移方向相反，所以回复力 F 跟位移 x 的关系可用下式表示：

$$F=-kx。$$

可见，在摆角很小的情况下，摆球受到的回复力跟摆球对平衡位置的位移大小成正比，方向总是跟位移相反。所以这时单摆的振动是简谐振动。

单摆振动的周期

单摆振动的周期与哪些因素有关呢？我们可用实验的方法来研究。

用细线穿过有孔的金属小球，把细线另一端固定悬挂起来做成一个单摆。单摆的摆长(悬点到摆球中心的距离)约为 1 米，将摆球从平衡位置拉开一段小于 8 厘米的距离，使摆角小于 5°。放开后，测出单摆完成 30 次(或 50 次)全振动所用的时间，然后算出单摆每振动一次所用的时间。这样，就可以得到单摆振动的周期。

分别改变振幅的大小、摆球的质量和所用材料以及摆长，重复进行实验，其结果表明：

在摆角小于 5°的情况下，

1．单摆振动的周期与振幅大小无关；

2．单摆振动的周期与摆球质量大小及所用材料无关；

3．单摆振动的周期跟摆长有关。若将摆长从 1 米先后减小为 0.64 米、

0.25米，则周期分别减小到原来周期的$\frac{4}{5}$和$\frac{1}{2}$。

荷兰物理学家惠更斯(1629—1695)研究了单摆的振动规律，发现单摆的振动周期跟摆长的平方根成正比，跟重力加速度的平方根成反比。并确定了如下的单摆振动的周期公式：

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

式中T是单摆的振动周期，l是单摆的摆长，g是重力加速度。

由于单摆的摆长和振动周期很容易测定，所以利用单摆可以方便地测定各地的重力加速度。

利用摆的等时性可以制成摆钟用以计时。实际的钟摆和荡船等都不是单摆，不能简单地应用单摆的周期公式来计算它们的振动周期，但它们的周期却还是随着摆杆长度的增大而变大的。

思考

在上海校准的、带有摆锤的一台挂钟，把它拿到北京使用，这台挂钟的走时变快了还是变慢了？应该怎样改变它的摆长，才能使钟走时准确？

S：在测定单摆振动周期时，为什么先要测出几十次全振动的时间，然后再计算它的振动周期？直接测量记录一次全振动的时间不是能节省时间吗？

T：所以要测几十次，主要是为了减小计时误差对测量结果的影响。

使用停表测时间的误差出现在开始计时和终止计时按下停表柄头的时刻，过早或过迟按表是难以避免的。如果只测量记录一次全振动的时间，这一误差对测量结果的影响就比较大。如果测量记录30次全振动的时间，计时误差就分散在30次全振动的时间中，对测量结果的影响就要小得多。

■

练习三十八

1．把单摆的摆长从0.8米减小到0.2米时，它的振动周期将变为原来的 [ ]

A．2倍　　B．4倍；

C．$\frac{1}{2}$　　D．$\frac{1}{4}$。

2．通常把振动周期是2秒的单摆叫做秒摆。地球表面秒摆的摆长约为0.994米。已知月球表面的重力加速度约是地球表面重力加速度的1/6，若在月球表面制作一个秒摆，它的摆长约为多大？

3．建筑工地上的塔吊吊装构件时，发现吊钩吊住的构件有缓慢的摆动。如果估得构件摆动的周期，能否粗略地估测拉住吊钩的钢索长度？

八、振动中的能量转化共振

振动中的能量转化

弹簧振子和单摆，在振动过程中，速度的大小时刻在变化，由于弹簧振子和摆球都具有一定的质量，它们的动能也就时刻变化。那么，它们的能量是怎样转化的呢？我们以弹簧振子的振动为例进行分析。

把振子从平衡位置 0 拉开一段距离的过程中(图 7－50)，由于外力克服弹力做功，弹簧振子的弹性势能增大。放开后，振子从最大位移处向平衡位置运动的过程中，由于弹力做功，弹性势能逐渐减小，转化为振子的动能。当振子到达平衡位置时，弹性势能减小为零，振子动能变得最大。振子从平衡位置向另一侧的最大位移处运动的过程中，振子克服弹力做功，弹性势能不断增大，振子动能不断减小。当振子到达另一侧最大位移处时，动能减小到零，弹性势能最大。接着，振子重又向平衡位置运动，弹性势能又逐渐转化为动能。

■

思考

单摆在振动过程中，能量是如何转化的？

固有振动　受迫振动

任何物体都具有一定的固有频率(或固有周期)，物体以它的固有频率作振动，叫做**固有振动**。在日常生活和生产中还可见到一类振动，例如人们坐在发动机正在工作的车、船中，会感到座位由于机器运转引起的振动；建筑工人使用风镐时，身体可产生明显振动。这类振动是在周期性外力作用下发生的，它们的共同特点是，物体振动的频率跟周期性外力的频率总是相等的。

物体在周期性外力作用下的振动，叫做**受迫振动**。若把这种周期性的外力叫做策动力，那么，**就可以说物体做受迫振动的频率等于策动力的频率，而跟物体的固有频率无关。**

■

我们可用以下实验来说明。用橡皮槌敲击一下音叉，音叉就产生振动，发出一定音调的声音。如把这个振动着的音叉的柄紧压在桌面上，就可听到同一音调、响度明显增大的声音。这是由于音叉振动对桌面产生策动力，桌面就做受迫振动而发声(图 7－51)。听到的桌面发声和音叉发声的音调相同，说明受迫振动的频率等于策动力的频率。如换另一频率的音叉再做实验，桌面就以这另一频率做受迫振动而发声。各种弦乐器，如提琴、胡琴等就是通过“桥”和音柱(图 7－52)，把弦的振动传给音箱，使音箱(包括内部空气)做受迫振动而发声。

阻尼振动和无阻尼振动

由于摩擦和介质阻力的存在，弹簧振子和单摆在振动过程中，不断克服外界阻力做功而消耗能量，振幅就会逐渐减小，经过一段时间，振幅减小到零，振动完全停止。

振幅随时间逐渐减小的振动，叫做**阻尼振动**。阻尼振动是一种减幅振动[图 7－53(a)]。阻尼振动在生活中和自然界中都是常见的。物体作阻尼振动时，振幅减小的快慢程度跟振动体周围的介质性质有关。若介质阻力很大，振动很快减弱。如单摆在空气中可以振动较长时间，若放入水中，就会很快停止振动。

如果在振动过程中，适时地给振动系统补充一定的能量，以弥补克服阻力做功所消耗的能量。这样，就可以使振动的振幅不再减小，这种等幅振动也可以看作是无阻尼振动[图 7－53(b)]。

■

*共振

如图 7－54 所示，将一块薄木片的一端用桌夹固定在桌边，在木片的另一端固定一个带有偏心装置的玩具电动机，用手拨动木片，可以观察到木片连同电动机，以它自身的固有频率作振动。

玩具电动机连接电源后，由于偏心作用，电动机转动时对木片有周期性的外力作用，木片做受迫振动。若电动机转速很大，产生的策动力频率远大于木片连同电动机这一装置的固有频率时，可以看到木片做受迫振动的振幅很小。利用滑动变阻器改变电动机两端电压，使电动机转速连续可调。这样，当电动机转速逐渐变小，策动力频率逐渐接近这一装置的固有频率时，可以看到木片的振幅逐渐增大。而当策动力频率等于这一装置的固有频率时，木片的振幅变得很大。继续减小电动机转速，当策动力频率小于这一装置的固有频率时，可以看到木片的振幅又变小了。图 7－55 的曲线表示物体做受迫振动时的振幅跟策动力频率的关系。

物体做受迫振动时，当策动力频率跟物体的固有频率接近时，物体的振幅急剧增大；当策动力频率跟物体的固有频率相等时，物体的振幅达到最大，这种现象叫做共振(resonance)。共振现象是受迫振动的特例。

*共振在技术上的意义

共振现象有很多应用。例如，音叉共鸣箱就是一个典型例子。把某一频率的音叉插在一定长度的一端开口的共鸣箱上，当敲击音叉使它振动时，箱内的空气柱就能产生共振，发出较响的声音，叫做共鸣。共鸣是一种声共振现象。

■

图 7－54 图 7－55 共振曲线

如果把两个相同频率的音叉及其共鸣箱，如图 7－56 所示放置。敲击其中一个音叉，过了几秒钟，用手握住该音叉的股叉，不使它振动，这时

可以听到另一个音叉发出的轻微的声音。这是因为第一个音叉振动时产生的声音频率，和第二个音叉及其共鸣箱中空气柱的固有频率相同，第二个共鸣箱内空气柱和音叉产生共振而发声。

共振筛(图 7－57)是一种利用共振原理的机械，把筛子用 4 根弹簧支承起来，就成为共振筛。共振筛的筛架上安装一个偏心轮，偏心轮上另装有皮带轮，与动力相连。皮带轮带动偏心轮转动时，筛子就受到一个周期性的策动力作用而做受迫振动。调整偏心轮的转速，使策动力的频率接近共振筛的固有频率，筛子就发生共振，达到较大的振幅，提高了筛除杂物的效率。

■

课本彩图 18 是我国古代鱼洗的复制品。鱼洗是一个带耳环的铜盆，盆底有浮雕的鱼，在盆内注入适量的水，用手同时摩擦铜盆的两个耳环，只要摩擦引起的策动力频率和铜盆(连同水)的固有频率接近时，铜盆就发生共振，盆内的水飞溅出来，盆底浮雕的鱼也好像活了起来要跃出水面一般。鱼洗是我国古代劳动人民智慧的结晶。

在有些情况下，共振现象会造成严重后果，必须设法防止。例如，规定部队经过桥梁时一律要改用便步行走，这样，才不会对整座桥梁形成周期性外力，以免桥梁发生共振。本世纪 60 年代，美国某空军基地附近，一架军用喷气飞机低空掠过一批相同结构的民房时，由于喷气发动机产生的脉冲气流形成的策动力频率，接近这种建筑物的固有频率，致使数十幢民房发生共振而倒坍，以后有关部门就规定喷气飞机不得在有建筑物的地方超低空飞行。轮船航行时，会受到周期性的海浪冲击而左右摇摆。如果海浪冲击力的频率跟轮船摇摆的固有频率相同，就会发生共振，造成轮船倾覆事故。若改变轮船的航向和速率，就能使海浪冲击力的频率远离轮船的固有频率。冲床等机器在工作时会产生周期性的策动力，为了避免损坏机器本身和安装这类机器的厂房，在设计机器、建筑厂房时，应使它们的固有频率尽可能远离机器运转产生的策动力频率。

人在生活和生产中会接触到各种振动源。由科学测试知道人体各部位有不同的固有频率，如眼球的固有频率最大约为 60 赫，颅骨的固有频率最大约为 200 赫等 ;把人作为一个整体来看,水平方向的固有频率约为 3 赫～6 赫，竖直方向的固有频率约为 4 赫～8 赫。因此，跟振动源十分接近的操作人员，如拖拉机驾驶员，风镐、风铲、电锯、铆钉机等操作工，要保证这些振动源的策动频率远离人体有关部位的固有频率。为了保障工人的安全与健康，医疗保健部门作出了有关规定，如规定用手操作的各类振动机械的频率必须大于 20 赫。

总之，在需要利用共振的时候，应使策动力频率接近或等于振动物体的固有频率。在需要防止共振产生的危害时，要设法使策动力频率远离振动物体的固有频率。

思考

1．缝纫机工作时，缝针上、下振动，这是缝针的固有振动还是受迫振动？*

2．登山运动员在雪线以上攀登时，不准大声呼喊，也不准鸣枪，因为那样做，可能会引起雪崩，这是什么道理？

*3．跳水运动员在跳板跳水训练时，用脚蹬踏跳板的频率应远离跳板的固有频率，还是应接近跳板的固有频率？

本章学习要求

1．知道周期运动的特点。知道周期。

2．理解匀速圆周运动。理解匀速圆周运动的周期。

3．理解匀速圆周运动的线速度。理解线速度和周期的关系。

4．理解匀速圆周运动的角速度。理解线速度和角速度的关系。

5．理解线速度、角速度和周期之间的关系。

6．理解向心力。理解向心加速度。

7．理解万有引力定律。

8．知道人造地球卫星。

9．知道第一宇宙速度。

10．知道机械振动。

11．知道简谐振动的产生条件和特征。

12．知道振动的振幅。理解振动的周期和频率以及它们之间的关系。

13．知道振动图象。

14．知道单摆作简谐振动的条件。理解单摆振动的规律和单摆周期公式。15．会利用单摆测重力加速度。

16．知道振动过程中能量的转化。

17．知道固有振动。知道受迫振动。

复习题

1．单选题：

(1)在图 7—58 所示的摩擦传动装置中，主动轮 A 的半径是 r_2，从动轮B的半径是r_2，主动轮的轮缘压紧在离从动轮轴心O的距离为$\frac{2}{3}$处。已知 A、B 两轮的半径比 r_1：r_2=1：3，则 A、B 两轮轮子边缘质点的向心加速度之比是 [ ]

(A)3：1；　　(B)1：3；

(C)2：3；　　(D)4：3。

(2)某种压路机，前面的导向轮半径较小，后面驱动轮半径较大(图 7－59)。正常行驶时，它的前、后轮边缘质点 A 和 B 相对于前、后轮的轴做匀速圆周运动。如果前、后轮的半径之比为 2：3，则 A、B 质点的线速度 v

的大小和周期 T 的大小关系是 [ ]

A．$\frac{V_A}{V_B}=\frac{2}{3}$：$\frac{T_A}{T_B}=1$；　　B．$\frac{V_A}{V_B}=\frac{3}{2}$：$\frac{T_A}{T_B}=\frac{2}{3}$；

C．$\frac{V_A}{V_B}=1$：$\frac{T_A}{T_B}=\frac{2}{3}$；　　D．$\frac{V_A}{V_B}=1$；$\frac{T_A}{T_B}=\frac{3}{2}$。

■

(3)一座在海平面上校准的摆钟，移到高原地区使用时不准了，要使它走时准确，可能采取的调节方法是 [ ]

(A)增长摆长；　　(B)缩短摆长；

(C)增大摆锤质量；　　(D)减小摆锤质量。

(4)在同一地点有甲、乙两个单摆。当甲摆振动 120 次时，乙摆恰好振动了 80 次。则甲、乙两摆的摆长之比是 [ ]

(A)3∶2；　　(B)2∶3；

(C)9∶4；　　(D)4∶9。

2．一根长 0.5 米的细线，能够承受的最大拉力是 10 牛。现把这根细线的一端固定，另一端拴一个质量为 200 克的小球，使它在光滑的水平桌面上做匀速圆周运动，那么小球的线速度最大不能超过多少？

3．混凝土搅拌车上的料斗在不停地匀速转动，如果每转一圈需 80 秒，料斗直径最大处为 2 米，则其中混凝土拌料的最大向心加速度多大？

4．观看宇航员在月球表面从事科学考察活动的电视录像时，在一组镜头中看到宇航员手中拿着一个带有长柄的土壤收集器，跟他的身高相比较，估计这一器具的长度约为 1 米(图 7－60)。当他收集满了土壤，提起长柄收集器时，收集器发生了轻微晃动，从电视画面上估计晃动的周期约为 5 秒。根据这些估计数据，并且粗略地把长柄土壤收集器的晃动当作单摆振动处理，你能否估算出月球表面重力加速度的大小？

5．世界各国发射的人造地球卫星的运行周期都大于 90 分，能否发射一个沿圆轨道运行、周期只有 1 时的人造地球卫星？已知第一宇宙速度为 7.9×10^3 米/秒。

6．月球质量为 7.35×10^{22} 千克，半径为 1738 千米。试计算从月球表面发射的人造地球卫星的最小周期。

7．一个单摆，当它的摆长增加到 0.8 米时，它的周期增大为原来的 4/3 倍，试求单摆原来的摆长和周期。

8．在摆长为 l 的单摆悬点以下 l/2 的地方，固定一个钉子 P(图 7－61)。当单摆自左向右振动到平衡位置时，由于钉子的阻碍，它在另一侧的摆动情况将发生改变。如果单摆在另一侧的振动仍可看成简谐振动，试求这一单摆的振动周期。

■