

毛主席语录

马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。

农村是一个广阔的天地，在那里是可以大有作为的。

《青年自学丛书》编辑说明

伟大领袖和导师毛主席教导我们：“知识青年到农村去，接受贫下中农的再教育，很有必要。”广大知识青年，响应毛主席的号召，奔赴农村，奔赴祖国的边疆，朝气蓬勃地战斗在三大革命运动的第一线，坚定地走工农相结合的道路，对普及大寨县，建设社会主义新农村作出了贡献，一代革命青年正在茁壮成长。

在英明领袖华主席的领导下，我国广大青年，继承毛主席遗志，高举毛主席的伟大旗帜，坚持党在社会主义历史阶段的基本路线，抓纲治国，继续革命，为建设社会主义的现代化强国而奋斗。按照毛主席关于“要关怀青年一代的成长”的教导，为了适应广大上山下乡知识青年自学的需要，特编辑、出版这套《青年自学丛书》。丛书以马列主义、毛泽东思想为指导，内容包括哲学、社会科学、文学、自然科学的一些基本知识。我们希望，这套丛书的出版，能对知识青年的学习起积极作用，有助于他们进一步提高政治觉悟和科学文化水平，在又红又专的道路上阔步前进。

我们对大力支持这套丛书的出版工作的有关单位和作者，表示衷心的感谢，并欢迎广大读者对这套丛书提出批评和建议，以便改进。

上海人民出版社

目 录

引言.....	1
---------	---

第一编 力 学

第一章 力和力的平衡.....	6
-----------------	---

第一节 力	6
-------------	---

第二节 作用力和反作用力定律	10
----------------------	----

第三节 力的种类	13
----------------	----

第四节 力的合成和分解	20
-------------------	----

第五节 平行力的平衡	35
------------------	----

复习题	47
-----------	----

第二章 运动和运动定律.....	49
------------------	----

第一节 运动的绝对性和相对性	49
----------------------	----

第二节 直线运动	53
----------------	----

第三节 匀速圆周运动	66
------------------	----

第四节 物体的平动和转动	73
--------------------	----

第五节 运动定律	77
----------------	----

第六节 向心力	89
---------------	----

复习题	99
-----------	----

第三章 动量和能量	100
-----------------	-----

第一节 动量 动量定理	100
-------------------	-----

第二节 动量守恒定律	106
------------------	-----

第三节 功和功率	113
第四节 动能、动能定理	125
第五节 重力势能	131
第六节 机械能守恒定律 功能定理	136
第七节 机械运动的两种量度	143
复习题	146
第四章 简单机械和机械传动	147
第一节 杠杆	147
第二节 滑轮 轮轴	154
第三节 斜面 螺旋	165
第四节 机械传动	176
复习题	187
第五章 流体的力学性质	189
第一节 流体的压强	189
第二节 流体对压强的传递	201
第三节 浮力	208
第四节 液体流动的基本规律	215
第五节 水力机械	226
复习题	236

第二编 热 学

第六章 基本热现象	238
第一节 温度和温度的测量	238
第二节 热量 热平衡方程	242
第三节 物体的热膨胀	250
第四节 热传递	258
复习题	265
第七章 分子运动论	267

第一节	分子运动论概述	267
第二节	气体的性质	273
第三节	液体的表面现象	278
第四节	固体的性质	282
第五节	物态变化	291
复习题	309
第八章	热和功 热机	310
第一节	热功当量	310
第二节	内能	314
第三节	蒸汽发动机	320
第四节	内燃发动机	329
复习题	340
附录	习题答案	341

引 言

物理学是劳动人民在长期的生产实践中总结出来的一门自然科学。它研究的是自然界中物质的一些最普遍、最基本的运动形式的规律及其在工农业生产和科学实验中的应用。本书向读者介绍常见的自然现象及农业生产实践所涉及到的物理学的一些基本原理和基础知识,根据农村情况,侧重点放在力学、热学、电学等几个方面。

我们周围的世界,是一个物质的世界。我们所接触到的,譬如空气、水、阳光、土地、庄稼、机器是物质;又如太阳、月亮、银河也是物质;就是连肉眼看不见的分子、原子、无线电波等也都是物质。物质的形态尽管千差万别,但它们都不依赖于人的主观意识而独立存在着。客观世界正是由这许多不同形态的物质所组成的。

物质和运动是不可分离的。自然界中“没有任何东西是不动的和不变的”。日月星辰在运动。地球一面自转,一面又绕着太阳公转。耸立在地面上的高山峻岭看起来似乎纹丝“不动”,实际上也随着地球每天要“走”几万里路呢!

物质的运动随处可见,刮风下雨、潮汐涨落、机器运转、江河奔流、煤炭燃烧、氨水分解、庄稼生长、牲畜繁殖等等,

都是常见的例子。运动是物质的存在形式，是物质的固有属性。

物质的运动形式是多样的。诸如物体经常在改变相互之间的位置关系而产生机械运动；组成物体的分子和原子不停地在作热运动；在原子内部，电子也不断绕着原子核旋转，而电子和原子核本身也有复杂的构造和相应的内部运动。除了这一些物理运动形式以外，物质还有化学运动以及更高级、更复杂的生命运动等形式。伟大领袖毛主席指出：“人的认识物质，就是认识物质的运动形式”。我们研究自然科学，就是研究物质的运动形式；各门学科就是以不同的物质运动形式作为自己的研究对象的。物理学所研究的是物质的一些最普遍、最基本的运动形式，也就是物理运动形式，其中包括物体的机械运动、分子热运动、电磁运动以及原子内部的运动等。而化学运动、生命运动等运动形式是化学、生物学等其他学科的研究对象。

物质的这许多运动形式究竟是彼此孤立、互不相干，还是相互联系、相互转化的呢？恩格斯指出：“在每一情况的特定条件下，任何一种运动形式都能够而且不得不直接或间接地转变为其他任何运动形式。”比如，摩擦生热，就是机械运动转化为热运动；水力发电，就是机械运动转化为电磁运动；在相反的过程中，利用蒸汽机和电动机作功，就是把热运动和电磁运动转化为机械运动。可见，物质运动既不能创造，也不能消灭，而只能依据一定的条件从一种形式转化为另一种形式。

世界是由物质组成的，物质是在运动着的，运动是不灭的，而不同形式的运动是可以相互转化的。这些辩证唯物主义的根本原理也就是学习物理基础知识时必须掌握的基本思想。

物质的各种形式的运动都具有一定的规律性。比如，水从高处流到低处，能带动轮机转动；水沸腾了，它的蒸汽会推动活塞做功；电流通过金属丝，金属丝就会烧红发亮，通过磁场中的线圈，线圈就会偏转；等等。人类为了能动地改造世界，就必须掌握这些规律性。伟大领袖毛主席指出：“人们为着要在自然界里得到自由，就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然里得到自由。”我们学习自然科学，学习物理学的一些基本知识，目的正在于了解自然、利用自然、改造自然，把握住自然规律来更好地为社会主义革命和社会主义建设服务。

举个例子来说，干旱水涝是一种自然现象。在旧社会，它给劳动人民带来无穷的苦难。而解放以来，在毛主席的亲切关怀下，广大农村大力兴修水利工程，运用所发现的自然规律，建筑拦河坝、蓄水库，发展机电排灌，以使农业生产不为旱涝所误，做到旱涝保收。农村水电站还把过去经常泛滥成灾的河流“管”起来，用水力来发电、带动农用机械，从而变水害为水利。其中如黄河、淮河、海河的治理已取得巨大成绩，这就是用毛泽东思想武装起来的中国人民掌握了自然规律，能动地改造自然，从自然里得到自由的突出例证。而在这治理水害的工作中，就会碰到物理学和工程技术上的许多问题。可见，在正确路线引导下，认真学习一些物理学的基础知识，掌握一定的科学技术上的本领，确是相当重要的。这也是社会主义革命和社会主义建设所必需的。

在农村这个广阔的天地里，到处都会碰到各种物理方面的问题。如农村常见的拖拉机、抽水机、水轮机以及可以省力的

的杠杆、滑轮、滚珠轴承等是根据力学原理制造的；常用作农业动力的柴油机、汽油机、蒸汽机等是根据热学原理制造的；农村中日益增多的小型水电站、发电机、电动机等则是电学原理的具体应用。毛主席教导我们：“农业的根本出路在于机械化。”目前，全国广大农村正在逐步实现机械化、电气化、水利化和化学化，而物理基础知识与其他科学知识一样，会在农业实现现代化的进程中发挥一定的作用。既然物理学研究的是物质最普遍、最基本的运动形式，那么，其他自然科学和工程技术课程，就必定都需要以物理学作为它们的基础。在农村，学习农业气象、土壤学、农田水利、农业机械、农业电气等等，都需要掌握一定的物理基础知识。

千百万上山下乡知识青年在毛主席革命路线的指引下，立志红在农村、专在农村，为建设社会主义新农村作出自己的最大贡献。为努力成为有社会主义觉悟的有文化的革命接班人，知识青年不但要刻苦学习马列主义、毛泽东思想，虚心接受贫下中农的再教育，而且要认真学习社会主义科学文化知识。怎样来学习呢？很重要的一点，就是要贯彻理论联系实际的原则，因为“实践的观点是辩证唯物论的认识论之第一的和基本的观点。”物理学与其他自然科学一样，都来自于实践，并随着实践的发展而发展。因此，学习物理基础知识，就必须密切联系生产实践。战斗在农村三大革命运动第一线的知识青年，有着一定的生产实践经验，这就为学习物理基础知识和将这些知识应用于实际斗争提供了十分有利的条件。只要我们以辩证唯物主义作为指导思想，坚持“实践第一”的观点，走与工农兵相结合的道路，我们就一定能学好物理基础知识，并用这些知识来很好地为农村三大革命运动服务。“农村是一个广阔的天地，在那里是可以大有作为的。”

第一编 力 学

辩证唯物主义认为,自然界的一切物质都在运动,而物质运动的形式又是多种多样的。毛主席指出:“自然界存在着许多的运动形式,机械运动、发声、发光、发热、电流、化分、化合等等都是。”其中,机械运动是最简单的一种。

什么叫做机械运动呢?物体相对于其他物体的位置变化就叫做机械运动。汽车在公路上奔驰,拖拉机在田间操作,飞机在天空中飞翔;车间里机器在运转,渠道里渠水在流动;等等,都是物体作机械运动的例子。一般说来,机械运动可简称为运动。

力学所研究的就是机械运动的规律。简单地说,就是研究力和运动的关系。力学在工农业生产技术上的应用是十分广泛的。我们在参加农业生产劳动中也经常会遇到力学问题。例如水泵为什么能抽水?在使用各种农具时,怎样才能省力?拖拉机马力的大小说明什么?等等。

本编包括第一章至第五章,主要是介绍有关力学的基础知识以及它们在工农业生产技术上的应用。

第一章 力和力的平衡

毛主席教导我们：“一切真知都是从直接经验发源的。”我们在各种各样的生产劳动中逐渐对力有了感性认识，知道翻地、拉车都要用力。但是为什么有些劳动不需要用多大的力，而另一些劳动却要用很大的力呢？究竟力是什么呢？为什么要用力呢？有什么办法能省些力呢？此外在修坝、盖屋时都有一个牢不牢、稳不稳的问题。为什么有经验的贫下中农能把柴草堆得又高又稳固而不容易倒塌呢？怎样才能牢些、稳些呢？

在这一章里，我们先来分析力的含义和力的性质，并初步介绍几种在力学范围里所研究的力；然后通过力的合成和分解进一步来分析物体的受力情况；最后再来研究物体在力或力矩作用下的平衡条件以及物体平衡的稳定性。

第一节 力

一、力 是 什 么

人们对于力的感性认识最初是从推、拉、扛、提等肌肉的活动中得来的。例如在推动小车时，手臂上的肌肉会感到紧张；用扩胸器锻炼身体时，手臂和胸部的肌肉都会感到紧张。这样我们就说手在用力。同时还可以看到在推力作用下小车

运动加快了,或者小车转弯了,表明小车的运动快慢或运动方向发生了改变;扩胸器弹簧在两边拉力的作用下形状发生了变化,弹簧伸长了。

进一步的实践表明:不仅人能对物体产生力的作用,物体也能对物体产生力的作用。例如在弹簧下挂了重锤,也能使弹簧伸长。从图 1.1 上可以看出重锤对弹簧的拉力和手对弹簧的拉力完全相同,因为它们把弹簧拉伸了相同的长度 x 。

从上面的分析可以看出:
力是一个物体对另一个物体的作用。
力的作用是使物体的运动快慢和运动方向发生改变、或者使物体的形状发生改变的条件。

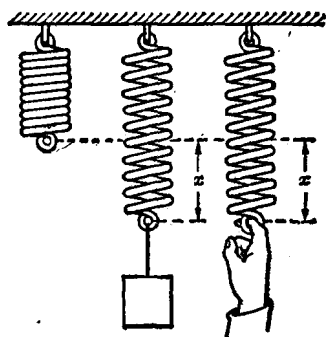


图 1.1 重锤和手对弹簧的拉力完全相同

此外还必须注意到力的作用总是出现在两个物体之间的。例如在图 1.1 中,重锤或手对弹簧的拉力是出现在重锤与弹簧之间,或者手与弹簧之间的。我们把重锤或手叫做加力物体,而把弹簧叫做受力物体。离开了物体,力是不能单独存在的。

二、力 的 大 小

大家都知道,拖拉机的拉力要比耕牛的拉力大得多。那么力的大小是怎样来确定的呢?

从图 1.2 可以看出:弹簧在 1 个重锤的作用下伸长 1 格,在 2 个重锤的作用下伸长 2 格。这表明在一定的范围内,弹簧伸得越长,它所受的拉力也越大。因此我们可以通过力对

物体作用效果的大小来确定它的大小。

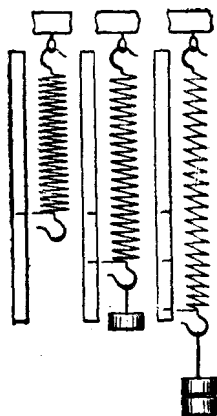


图 1.2 弹簧的伸长和它所受拉力的关系

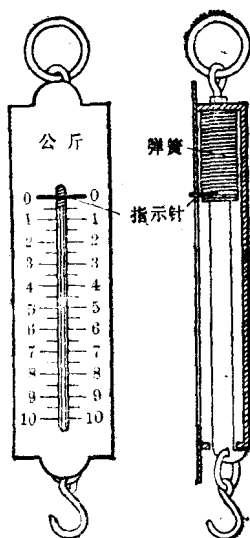
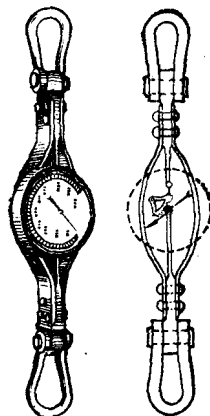


图 1.3 弹簧测力计

弹簧测力计就是根据上述原理制成的。图 1.3 就是它的构造简图。使用时,先把上端固定,再用手拉下端的挂钩,从指针所指的刻度上可以读出这时手的拉力有多大。手放开后,指针就指在零点上。此外,还有一种表盘式的弹簧测力计(图 1.4),把它的两端挂联在拖拉机和拖在后面的农机或拖车之间,在拖拉机开动时就可以测出当时拖拉机所受的牵引阻力。



力的实用单位是吨、公斤(千克) 图 1.4 表盘式弹簧测力计

和克。它们之间的换算关系是：

$$1 \text{ 吨} = 1000 \text{ 公斤} = 1000000 \text{ 克}。$$

三、力的方向

提起重物时，我们不仅要用力，而且还要用力向上提，否则重物就提不起来。把小车用力向前推，小车就前进；用力往后拉，小车就后退。这些例子都表明力不仅有大小，而且还有方向。同样是 1 公斤的力，如果方向不同，它的作用效果也就不同。

在物理学中，把只有大小而与方向无关的量叫做标量，把既有大小又有方向的量叫做矢量。例如大家所熟悉的长度、面积、体积等量都只有大小而与方向无关，因而都是标量。力既有大小又有方向，因而力是矢量。

单位确定之后，标量就可以用一个数表示出来。常用的长度单位是公里（千米）、米、厘米、毫米等，它们之间的换算关系是：

$$1 \text{ 公里} = 1000 \text{ 米}；$$

$$1 \text{ 米} = 10 \text{ 分米} = 100 \text{ 厘米} = 1000 \text{ 毫米}。$$

因此我们可以用几毫米，或几厘米来表示弹簧的伸长。但是在单位确定之后，矢量就不能简单地用一个数表示，还必须标明它的方向。通常是用一根带箭头的线段来表示矢量的。线段的长度表示矢量的大小；箭头所指的方向表示矢量的方向。这种表示法叫做矢量的图示法。例如，为了表示水桶是在多大的力的作用下从井里被提上来的，可以把绳对水桶的拉力图示出来（图 1.5）。图中带箭头的线段 \vec{F} 就表示绳对水桶的拉力 F 。从箭头所指的方向可知拉力 F 的方向是竖直向上的。由于假设线段的单位长度表示 5 公斤，因此从线段 \vec{F} 长

3个单位可知拉力 F 的大小为 15 公斤。

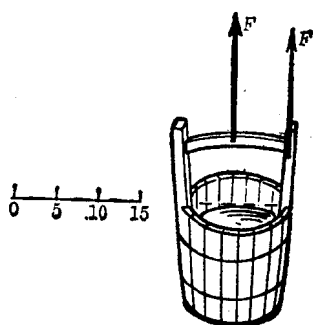


图 1.5 力的图示

除了大小、方向外,力对物体作用的位置也会影响它的作用效果。就拿图 1.5 的例子来说,如果拉力 F 并不作用在水桶把手的中点上,而作用在桶边上,那么在提水时水桶肯定会翻倒。我们把力对物体作用的位置叫做力的作用点。可见,力的作用效果是由力的大小、方向和作用点三个因素决定的。我们把力的大小、方向和作用点叫做力的三要素。在力的图示中,往往把带箭头的线段的起点或终点画在力的作用点上。

第二节 作用力和反作用力定律

一、作用力和反作用力

我们已经知道,力的作用总是出现在两个物体之间的。力是一个物体对另一个物体的作用,或者说力是加力物体对受力物体的作用。但是如果仔细观察力的现象,就会发现情况还不仅如此。

例如我们用拳头敲击木板时,不仅木板受到拳头的敲击,同时拳头也会感到发痛,说明拳头也受到木板的敲击。用手推动小车时,不仅小车受到手的推力而前进,同时手也受到小车对它一个反方向的力的作用,否则手对小车的推力也用不出来。

这些例子都说明力的作用总是成对地出现在两个物体之

间的，力是物体间的相互作用。我们把这一对力叫做作用力和反作用力。在 A 物体加给 B 物体一个作用力的同时， B 物体也必然要加给 A 物体一个反方向的反作用力。

毛主席教导我们：“事物发展过程中的每一种矛盾的两个方面，各以和它对立着的方面为自己存在的前提”。作用力和反作用力正是这样的一对矛盾的两个方面。它们“一面互相对立，一面又互相联结”，任何一方都不能脱离对方而单独存在。

二、作用力和反作用力定律

为了进一步弄清作用力和反作用力的关系，我们来做一个简单的实验。将两只同样类型的弹簧测力计的挂钩联结在一起(图 1.6)，再用双手将它们拉开成一直线。这时就可以看到：不管手的拉力怎样改变，两只测力计上指针的读数总是相等的。双手一放松，两个指针就同时回到零点上。

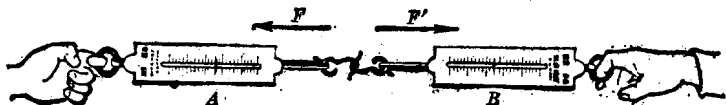


图 1.6 关于作用力和反作用力的实验

这里我们假设测力计 A 对测力计 B 的作用力是 F ，那么测力计 B 对测力计 A 的反作用力就是 F' ，它们的大小都可以在受力的测力计上显示出来。根据上述实验结果来分析：从双手的拉力方向相反可以推知作用力和反作用力的方向总是相反，并且作用在同一直线上；两只测力计上的读数总是相等，表明作用力和反作用力的大小总是相等的；两只测力计上的指针同时回到零点，表明作用力和反作用力总是同时存在

又同时消失的。

总之,对于任何一个作用力,总有一个反作用力。它们同时存在又同时消失;它们大小相等,方向相反,作用在同一条直线上。这一结论叫做作用力和反作用力定律,又叫做牛顿第三运动定律。

实践证明:作用力和反作用力定律是对于一切力学现象都普遍适用的客观规律,是力学的基本定律之一。在生产技术和日常生活中,对反作用力的应用是相当广泛的。例如我们在走路时,总是用脚向后蹬地,给地面一个作用力,而利用地面对脚的一个反作用力,使我们向前进的。在跳高时,也是使劲地向下蹬地,利用地面对人的反作用力,把人推离地面。又如机动船在前进时,也是通过螺旋桨的转动把水用力往后推,而利用水的反作用力,推动机动船前进的。

习题 1.1 “力是一个物体对另一个物体的作用。”“力是物体间的相互作用。”这两种说法是否有矛盾?哪一种说法全面些?

习题 1.2 有人说:“加力物体同时也一定是受力物体。”这句话正确吗?试举例说明。

习题 1.3 在图 1.1 中假设重锤对弹簧的拉力是 1.5 公斤,方向竖直向下。试用图示法把这个拉力表示出来,并把它反作用力也表示出来。(表示力的大小的线段的单位长度可以任意选择。)

习题 1.4 图 1.7 画出了农村中采用撑篙法行船的情形。船工



图 1.7 采用撑篙法行船

用力将篙尖抵住河床,这时双手和竹篙、脚和甲板、篙尖和河床之间都有相互作用力存在。问这些力各产生什么作用效果?试根据劳动、生活中的实践经验来回答。

第三节 力的种类

图 1.8 是正在被起重机吊起的货物。这时货物受到哪些力的作用呢?

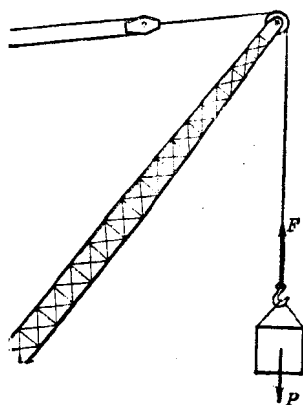


图 1.8 被起重机吊起的货物

一、重 力

货物具有重量。我们在挑担或扛抬重物时,也会感到物体重量的存在。任何物体都具有重量。物体的重量是哪里来的呢?原来在地面上和在地球周围的一切物体,都要受到地球对它们的吸引。一切离开地面不远的物体,如果没有别的物

体支持，都会由于受到地球的吸引而落到地面上来。我们把地球对它周围物体的吸引力叫做重力，重量就是物体所受重力的大小。

虽然不同物体所受重力的大小可以不同，但是重力的方向却总是近似地指向地心的。具体地说，任何物体所受重力的方向总是和地面、海平面垂直的，是和水平方向垂直的，这个方向叫做铅直方向。

建筑工人在砌砖墙时常用下端拴有铅锤的细线——铅直线来检验砌好的砖墙是否歪斜（图 1.9）。一般测量仪器也都利用铅直线来定位。

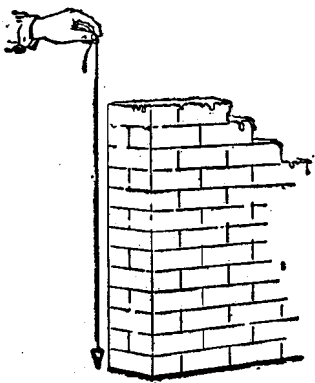


图 1.9 铅直线

任何物体的各个部分实际上都受到地球的重力作用，但从总的效果看来，地球对整个物体的重力就象作用在物体的某一点上一样，这一点叫做物体的重心。物体的重心就是整个物体所受的重力的作用点。

假设货物的重量为 P ，我们就在图 1.8 货物的重心上作一个方向铅直向下的线段来表示货物所受的重力 P 。

重力和其他力一样，也不能单独存在，也具有反作用力。地球在吸引货物的同时，也受到货物对它的一个大小相等、方向相反的吸引力。但由于地球又大又结实，因此不易觉察到它受到货物吸引的影响。科学研究表明：地球表面海水周期性地上涨下落的潮汐现象，就是地球在吸引月球、太阳的同时，受到月球、太阳吸引的结果。

二、弹 力

图 1.8 中的货物在受到重力的同时, 还受到起重机的钢丝绳对它的拉力作用。这个拉力是怎样形成的呢?

钢丝绳在起吊货物时绷得很紧; 取下货物时它又恢复了原状。这表明钢丝绳和弹簧一样, 在货物的作用下也有些伸长, 但不象弹簧那么显著。实际上任何物体在力的作用下, 形状和体积总会发生或多或少的改变, 这叫做形变。如果作用力没有超过一定限度, 在作用力撤除后, 物体就能恢复原状。物体的这种性质叫做弹性。

为什么在作用力撤除后, 物体就能恢复原状呢? 原来在物体受力而发生形变的同时, 在物体内部就产生了一个企图恢复原状的力来进行反抗。这个力就叫做弹力。我们只要用手拉弹簧, 就会感觉到弹簧对手的弹力的存在。所以在使物体发生形变的作用力撤除后, 正是这个弹力使物体恢复了原状。一般说来, 手用的拉力必须大于弹簧的弹力, 才能把弹簧拉长。在一定限度以内, 弹簧被拉得越长, 所产生的弹力也越大。放开手后, 弹簧在恢复原状的过程中, 随着物体形变的减小, 弹力也逐渐减小。等弹簧恢复了原状, 弹力就消失了。因此, 弹力的方向总是沿着使物体恢复原状的方向。

起重机上的钢丝绳 (图 1.8), 在货物的作用下发生了形变, 因而钢丝绳对货物的拉力 F 就是钢丝绳企图恢复原状的弹力, 方向铅直向上。

从上面的分析可知, 被起重机吊起的货物共受到两个力的作用: 力 P 是地球对它的重力; 力 F 是钢丝绳对它的拉力, 也就是钢丝绳的弹力。

一般说来, 物体都具有一定的弹性, 在其他物体的作用下

都会发生形变。因此凡是相互接触或相互联接的物体，它们之间的相互作用力，可以直接称为拉力、推力、支持力、正压力等等，但它们都是由于物体的形变而引起的，都属于弹力的性质。

三、摩 擦 力

对停放在公路上的拖拉机，如果用力不够大，就推不动它。在结冰的河面上滑动的石块，滑不多久就会停下来。这些现象都与物体间的摩擦力有关。

在图 1.10 中， B 是停放在地面上的重物。这时重物除了受到重力 P 外，重物与地面的接触面之间还存在着相互挤压的压力，由于它的方向总是与接触面垂直，因而叫做正压力， N 就是重物所受地面对它的正压力（ N 亦可称为支持力，见图 1.10 a）。

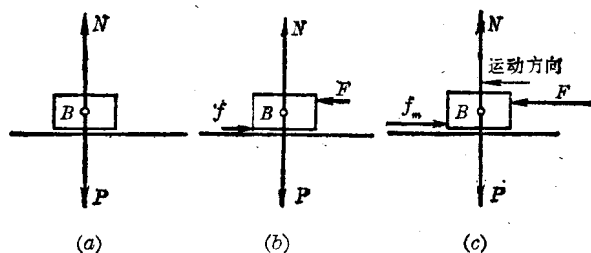


图 1.10 静摩擦现象

当我们用一个不大的推力 F 去推它时，为什么推不动呢？因为物体的表面与地面都粗糙不平，即使看起来相当光滑的平面，在放大镜下仔细观察也是凹凸不平的，所以它们的接触面实际上是由两个粗糙不平的面嵌合起来构成的。如果重物要起动，接触面上互相嵌合的部分就要发生碰撞，对运动产生阻碍作用。因此当重物 B 受到推力 F 而要起动时，在重物与

地面的接触面间就出现了阻碍起动的摩擦力,叫做静摩擦力。在图 1.10b 中, f 就是地面对重物的静摩擦力。静摩擦力的特点就是在一定的限度内始终与重物所受的推力或拉力大小相等、方向相反。因此重物 B 在 F 、 f 这两个大小相等、方向相反的力的作用下,只是产生微小的形变而动不起来。

随着推力 F 的增大,静摩擦力 f 也在增大。然而静摩擦力的增大不是无限制的,当随着推力 F 增大到一定限度时,静摩擦力就不再继续增大。这时如果推力 F 再大一点,就可以克服静摩擦力而使重物 B 运动起来(图 1.10c)。通常把静摩擦力的最大限度叫做最大静摩擦力,用字母 f_m 表示。

重物在开始滑动以后,仍旧要受到地面对它的摩擦阻力,通常把它叫做滑动摩擦力。在图 1.11

中, f 就是地面对重物的滑动摩擦力,它的方向始终和重物的滑动方向相反。在结冰的河面上滑动的石块所以会停下来,就是因为受到冰面对它的滑动摩擦力的原因。我们在磨刀、搓

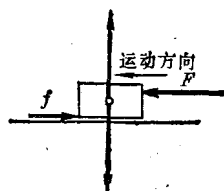


图 1.11 滑动摩擦现象

洗衣服和滑冰时都会感到滑动摩擦力的存在。滑动摩擦的显著特征是局部的发热和材料的磨损。

科学实验表明:在一般情况下,滑动摩擦力与接触面间的正压力成正比,而与接触面的大小几乎没有关系。即

$$f = \mu^* N, \quad (1.1)$$

式中的比例系数 μ 叫做滑动摩擦系数。它的大小除了与接触面材料的性质以及润滑情况有关外,还随着滑动的加快而减小。表 1.1 列出了不同情况下的滑动摩擦系数表。由于 μ 值是随着滑动的快慢而变化的,故在表中只能给出它的数值范

* μ 是希腊字母,读作“miu”(汉语拼音,下同)。

围。在一般情况下可以采用它的平均值。

表 1.1 滑动摩擦系数表

接 触 面 材 料	滑 动 摩 擦 系 数
铸铁(或钢)——铸铁(或钢)	0.10~0.30 (平均 0.12)
铸 铁——皮 革	0.15~0.35 (平均 0.25)
铸 铁(或 钢)——橡 胶	0.10~0.18 (平均 0.15)
铸 铁——青 铜	0.10~0.30 (平均 0.22)
钢 —— 冰	0.01~0.03 (平均 0.02)
机 器 零 件(部 分 润 滑)	0.005~0.01
机 器 零 件(油 浸 润 滑)	0.0015~0.003
橡 胶 轮 胎——水 泥 路 沥 青 路	0.5~0.75
橡 胶 轮 胎——干 的 砂 路	0.6~0.8
橡 胶 轮 胎——干 的 土 路	0.4~0.6

【例题 1.1】 解放牌卡车总重 10 吨，在沥青公路上行驶时突然急刹车，车轮停止转动而开始滑动，问这时车轮所受的滑动摩擦力有多大？

解：由于卡车在平坦的公路上滑动时，接触面间的正压力就相当于卡车的总重，即 $N=10$ 吨 $=10000$ 公斤；查表 1.1 取 $\mu=0.7$ 。根据公式(1.1)可知这时卡车所受的滑动摩擦力

$$f=\mu N=0.7 \times 10000=7000 \text{ 公斤。}$$

我们在推动重物时都有这样的经验，开始需要用较大的推力，一经推动后所需的推力就突然减小。这表明在正压力相同的情况下，重物在滑动时所受的滑动摩擦力要比滑动前所受的最大静摩擦力小些。实际上起动物体所受的最大静摩

擦力也与接触面间的正压力成正比，即

$$f_m = \mu_m N, \quad (1.2)$$

式中 μ_m 叫做最大静摩擦系数，它比同样情况下的滑动摩擦系数 μ 大些，可以采用表 1.1 中 μ 的最大值。

在平地上移动笨重的机器，单靠人力来硬推往往需要克服很大的滑动摩擦力。如果在机器底部垫上几根圆铁棍，然后再来推，让机器跟着铁棍滚过去就省力得多。凡是象车轮、圆球等物在地面上或其他物体上滚动过程中出现的摩擦现象叫做滚动摩擦。实践表明，在正压力相同的情况下，克服滚动摩擦所需的推力要比克服滑动摩擦所需的推力小得多。因此

为了减少摩擦，除了经常使用润滑油（在接触面间加一层油）外，还可以用滚动来代替滑动。例如老式水车、脱粒机、劳动车的转轴在轴承里和轴瓦的摩擦属于滑动摩擦的性质，如果装上弹子盘（滚珠轴承），把滑动变成滚动，摩擦力就可以大大减小，使用起来就省力得多。弹子盘的主要构造包括内外两个钢圈（图 1.12），中间放有许多同样大小的钢球（弹子）。

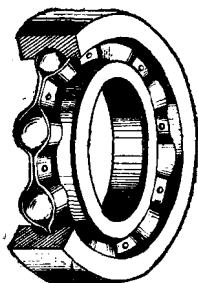


图 1.12 弹子盘
(滚珠轴承)

把它套在转轴上，让外钢圈装牢在支架上固定不动，内钢圈与转轴相连。转轴转动时，钢球就在内外钢圈之间滚动。

“事物都是一分为二的。”摩擦既有有害的一面，也有有利的一面。例如我们在走路时，就是靠地面的静摩擦停顿的，如果摩擦系数过小，比如在冰上行走，就容易打滑。因此把拖拉机轮胎表面制成凹凸不平，在火车铁轨上或结冰的路面上撒些砂子等，都是为了增大摩擦系数，以防止车轮打滑。

总之，地面上以及地面附近的物体都要受到重力作用；相

互接触或相互联接的物体之间存在着弹力作用，如果其中一个物体在运动或者要起动，在它们的接触面间就要产生摩擦力。重力、弹力和摩擦力就是在力学范围里主要讨论的三种力。

习题 1.5 青砖两块，各重 3 公斤，迭放在地面上。讨论上面一块受到几个力？各有多大？方向如何？下面一块呢？

习题 1.6 为什么下雨天在木桥上走路容易滑跤？为什么在桥背上铺些稻柴、荻糠就可以避免滑跤？

习题 1.7 为什么象犁刀、犁铧等农具的工作表面必须经常磨得平滑光洁，在使用过以后必须擦干和刮去泥土，在搁置不用时还要涂上一层机油？农机的转动部分为什么也要经常加油？

习题 1.8 我国东北地区的伐木场中，常用马拉的爬犁（冰橇）运送木材，爬犁的底部是用钢制的。假定用它运送 5 吨木料，问马的拉力需要克服多大的摩擦阻力？

第四节 力的合成和分解

一、在一条直线上的力的合成

我们已经分析过图 1.8 中被起重机吊起的货物的受力情况。它同时受到两个力的作用：重力 P 的作用是使货物向下降；而拉力 F 的作用是把货物往上提。那么这时货物究竟是被往上提还是向下降呢？这就要看两个力哪一个大，或者说要找出这两个力的共同作用。能反映物体所受到的几个力的共同作用的力就叫做这几个力的合力，求几个力的合力的方法就叫做力的合成。

迭放在地面上的三块青砖对地面的压力的合力有多大呢？就等于这三块青砖各自对地面的压力的和。由此可见，沿着同一直线作用在同一物体上的几个力 F_1 、 F_2 、 F_3 ，如果它们的方向都相同，是同向力，那么它们的合力 R 也在这条

直线上,它的大小就等于这几个力的和,即

$$R = F_1 + F_2 + F_3, \quad (1.3)$$

方向也与力 F_1 、 F_2 、 F_3 的方向相同,作用在原来的作用点上。

这个关系还可用力图示法表示出来(图 1.13)。

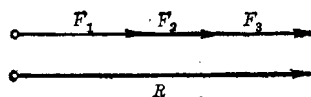
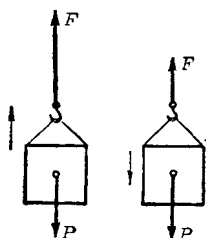


图 1.13 在一条直线上的同向力的合成

对于由起重机吊起的货物说来,它所受的两个力也是沿着同一直线作用的,但是方向相反,它们的合力有几种可能:

- (1) 当货物起吊时,货物被往上提,表明这时拉力 F 大于重力 P , 它们的合力 $R = F - P$, 方向向上(图 1.14a)。



(a) 起吊时 (b) 下放时

图 1.14 由起重机吊起的货物所受的力的合力

- (2) 当货物下放时,货物被向下降,表明这时重力 P 大于拉力 F , 它们的合力 $R = P - F$, 方向向下(图 1.14b)。

由此可知: 沿着同一直线作用在同一物体上的两个力 F_1 、 F_2 (假设 $F_1 > F_2$), 如果方向相反,是反向力,那么它们的合力 R 也在这条直线上,它的大小就等于这两个力的差,即

$$R = F_1 - F_2, \quad (1.4)$$

方向与较大的力 F_1 的方向相同,作用在原来的作用点上。这个关系也可用力图示法表示出来(图 1.15)。

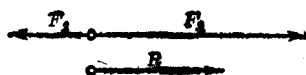


图 1.15 在一条直线上的反向力的合成

如果货物所受的拉力 F 和重力 P 大小恰好相等,它就停

在半空中。这时货物所受的合力 $R=0$ ，我们就说货物处于平衡状态。所谓平衡就是指物体在几个力的作用下保持静止的状态；物体处于平衡状态时，它所受的合力等于零。

必须指出，当作用在物体上的几个力的合力等于零时，虽然这些力使物体运动状态发生改变的作用是相互抵消了，但是它们使物体产生形变的作用依然存在，所以我们不能简单地说这些力是相互抵消了，而只能说这几个力相互平衡。

从上面的分析可知，使物体处于平衡状态的两个力总是大小相等、方向相反，并且作用在同一直线上的。这就是二力平衡的具体条件。

作用力和反作用力虽然也是大小相等、方向相反，也作用在同一直线上，但是它们并不是作用在同一物体上的两个力，所以它们并不能相互平衡。

二、互成角度的力的合成

下雨路滑，一辆拖拉机在倒车时不小心，滑到斜沟里，“爬”不上来了。某知识青年开动脑筋，借来一根钢丝绳。他把绳的一端缚在拖拉机上，另一端紧紧地缚在路旁的大树上



图 1.16

(图 1.16)。然后用力拉钢丝绳的中点,几个人一用力,就把拖拉机拉了上来。为什么用力拉钢丝绳的中点就可以比较省力地把拖拉机拉上来呢?要解决这个问题,先来讨论互成角度的力的合成问题。这里只讨论共点力的合成问题。所谓共点力,就是指作用在物体的同一点的几个力(图 1.17 a),或者即使不作用于一点,但作用线相交于一点的几个力(图 1.17 b)。

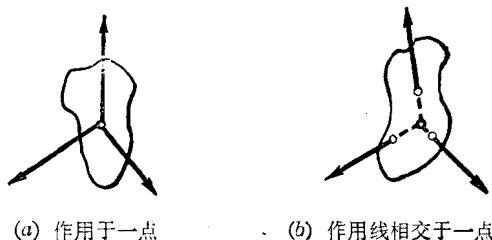


图 1.17 共点力

在图 1.18 中,三根细线的结点 O 同时受到三个互成角度的拉力 F_1 、 F_2 、 P 的作用,其中 P 的大小就相当于重锤的重量,而 F_1 、 F_2 的大小可以分别由细线上的测力计表示出来。

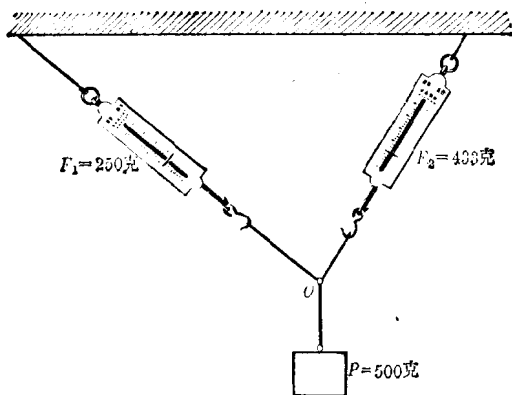


图 1.18 作用在一点上的三个互成角度的力

显然, F_1 、 F_2 、 P 这三个力是共点力。实践表明: 虽然重锤的重量 P 固定不变, 但只要改变细线间夹角的大小, F_1 、 F_2 的大小就会发生变化。这中间究竟存在什么规律性的东西呢?

等细线稳定之后, 根据测力计上的读数, 按力的图示法, 先把作用在 O 点上的三个拉力作出来(图 1.19a)。由于 O 点这时是处于平衡状态, 因此可以断定这三个拉力 F_1 、 F_2 、 P 的合力就等于零。

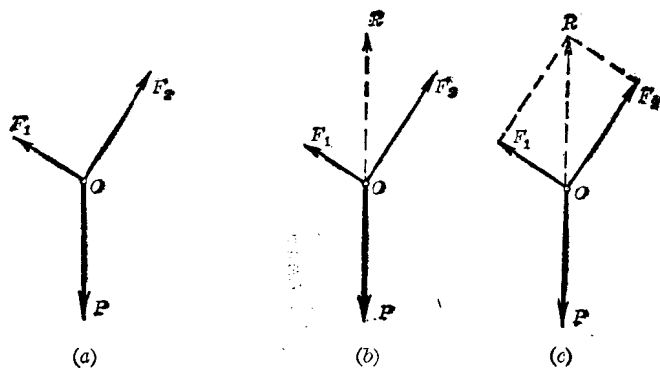


图 1.19 力的平行四边形合成法则

从这三个力的合力等于零就可以推知, 其中 F_1 、 F_2 的合力 R 和拉力 P 大小相等、方向相反, 并且作用在一条直线上, 因为 R 和 P 是相互平衡的(图 1.19b)。把力 F_1 、 F_2 的顶点和它们的合力 R 的顶点用虚线连接起来, 就形成了一个平行四边形(图 1.19c)。这就是说: 如果把作用在同一点上的两个互成角度的力看作是一个平行四边形的两条邻边, 那么它们的合力就是从同一点出发的这个平行四边形的对角线。实践表明, 这个结论对于互成任何角度的任何两个力的合成都是适用的。通常把它叫做力的平行四边形合成法则。利用它就可以用作图法把两个互成角度的力的合力作出来。

[例题 1.2] 设有两个互成角度的力: $F_1=3$ 公斤, $F_2=2$ 公斤。试用作图法分别作出它们在夹角 $\theta^*=0^\circ$ 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 时的合力。

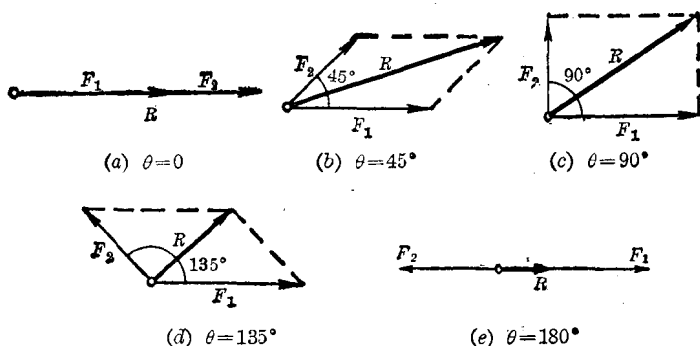


图 1.20

解: 具体作法详见图 1.20。根据图中选用的比例关系可以量出合力的大小。结果如下:

夹 角 θ	0°	45°	90°	135°	180°
合力 R (公斤)	5	4.6	3.6	2.1	1

上面的结果表明, 两个互成角度的力的合力的大小不仅与它们的大小有关, 而且还与它们的夹角有关。夹角越小, 合力越大; 夹角越大, 合力越小。

关于两个以上互成角度的力的合成, 也可以按照力的平行四边形合成法则来进行。假设 F_1 、 F_2 、 F_3 是作用在同一点上的三个互成角度的力 (图 1.21)。要求这三个力的合力, 可以在求得 F_1 、 F_2 的合力 R_1 之后, 再把 R_1 和 F_3 的合力 R 找出来。这个合力 R 就是三个分力 F_1 、 F_2 、 F_3 的合力 (图 1.21a)。

* θ 是希腊字母, 读作 “xi-ta”。

如果还有 F_4, F_5, \dots , 可以依次类推。

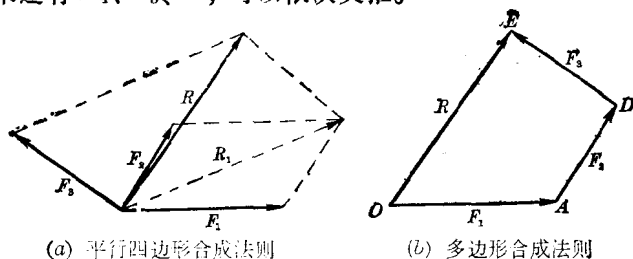
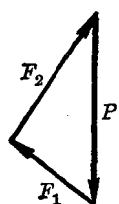


图 1.21 两个以上互成角度的力的合成

根据平行四边形对边平行而且相等的性质, 我们可以把上述方法进行简化。从图 1.21 *b* 中可以看到由作用点 O 出发, 把三个分力头尾相连地作出来, 即作 $OA = F_1$, $AD = F_2$, $DE = F_3$ 。再把作用点 O 和 F_3 的顶点 E 连接起来, 同样可以得出它们的合力 $R = OE$ 。这就是说, 如果把各个力顺次头尾相连地作出来, 那么从起点到最后一个力的顶点的连线就是这些力的合力。这个结论叫做力的多边形合成法则, 这样构成的多边形就叫做力多边形。

如果把图 1.18 中的三个力 F_1, F_2, P 头尾相连地作出来, 就可以得到一个闭合的三角形 (图 1.22)。



这是因为它们相互平衡, 合力等于零的缘故。由此可见, 使物体处于平衡状态的三个力的作用线总是相交于一点的, 把它们头尾相连地作出来必是一个闭合的三角形。这就是三力平衡的具体条件。

图 1.22 三力平衡的具体条件

现在再来分析图 1.16, 问题就很清楚了。当知识青年在用力拉钢丝绳的中点 O 时, O 点共受到三个力的作用而处于平衡状态 (图 1.23 *a*), 其中 F 就是他们几个人所用的力, 而 F_1 就相当于钢丝绳对拖拉机的拉力。根据三力

平衡的具体条件可知,这三个力的大小关系大致可用图 1.23b 的闭合三角形表示出来。由于 O 点是绳的中点,图形对称,因此作出的是等腰三角形,即 $F_1 = F_2$ 。又因钢丝绳原来绷得很紧,在用力拉 O 点时,力 F_1 、 F_2 间的夹角相当大,假设它是 172° ,那么等腰三角形的顶角只有 8° ,这就使 $F_1 \doteq 7.14F^*$ 。如果他们用力 50 公斤,那么钢丝绳对拖拉机的拉力就是 357 公斤,这就是为什么可以省力的原因。但是那棵大树必须十分结实,否则不但拖拉机拉不上来,大树还会受到损伤。

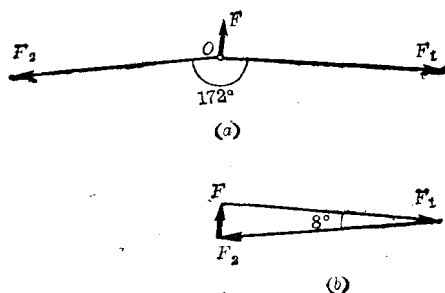


图 1.23

【例题 1.3】电灯离书桌较远。为了工作方便,用一端固定在墙上的细绳将电线拉近书桌(图 1.24 a)。如果电灯重 0.5 公斤,上半段电线与天花板成 30° 角,而细绳是水平的。试用作图法求出上半段电线和水平细绳的拉力各是多大,并用计算方法来检验。

解:从图上可以看出细绳与电线的连接点 O 是在三个力的作用下而处于平衡状态。假设上半段电线的拉力为 F_1 ,水平细绳的拉力为 F_2 ,下半段电线的拉力 F_3 就等于电灯的重

* 因为 $\sin \frac{8^\circ}{2} = \frac{F/2}{F_1}$, 所以 $F_1 = \frac{F/2}{2 \sin 4^\circ} \doteq 7.14F$ 。

量 0.5 公斤, 方向铅直向下。根据三力平衡的具体条件, F_1 、 F_2 、 F_3 头尾相连应该构成一个闭合的三角形, 因此我们可以先按已知条件把这个闭合三角形作出来。具体的作法是: (1) 先按一定比例作出 $AB = F_3 = 0.5$ 公斤; (2) 由于 F_2 方向水平, 过 B 点作水平线; (3) 再过 A 按 F_1 方向作 F_1 的平行线。两直线交于 C 点(图 1.24b)。可见 $\triangle ABC$ 就是要作的闭合三角形, 而 $BC = F_2$, $CA = F_1$ 。于是量出 BC 、 CA 的长度, 按比例可得出 $F_1 = 1$ 公斤, $F_2 = 0.87$ 公斤。

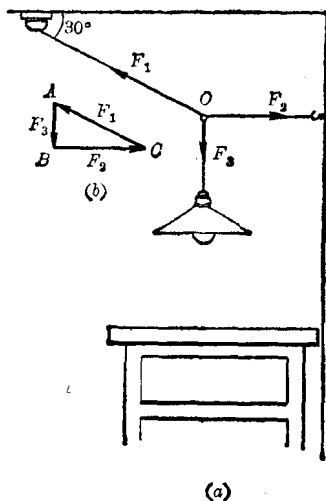


图 1.24

由于 $\triangle ABC$ 是直角三角形, 而 $\angle C = 30^\circ$, 因此可以利用三角函数关系来检验上面的结果。

$$\text{因为 } \sin 30^\circ = \frac{F_3}{F_1} = \frac{1}{2}, \quad \cos 30^\circ = \frac{F_2}{F_1} = 0.866,$$

$$\text{所以 } F_1 = 2 F_3 = 2 \times 0.5 = 1 \text{ 公斤,}$$

$$F_2 = 0.866 F_1 = 0.866 \text{ 公斤.}$$

这表明上述作图法的结果是正确的。

三、力的分解

为什么放在地面上的物体可以保持静止, 而放在斜坡上的物体就会下滑呢? 很明显, 使物体在斜坡上下滑的力是由物体所受的重力所引起的。而在平地上物体所受的重力与地

面对物体的支持力在一条直线上,它们的合力等于零,因此在平地上的物体可以保持静止。

但是对于斜坡上的物体说来,重力方向是铅直向下的,而使它下滑的力的方向却是沿着斜坡向下的,这两个力究竟存在什么关系呢?从图1.25可以看出,根据力的平行四边形合成法则,我们也可以反过来用力 P_x 和 P_y 来代替物体的重力 P ,而把 P_x 、 P_y 叫做物体重力 P 的两个分力。所以正是物体重力 P 的沿着斜坡方向上的分力 P_x 使物体下滑的。象这种把一个力分成两个分力的方法就叫做力的分解。

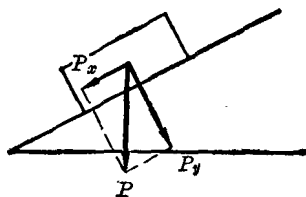


图1.25 斜坡上物体的重力的分解

从上面的例子可以看出,力的分解的过程就是在已知平行四边形的对角线的情况下求作两条邻边的过程。虽然利用同一条对角线,可以作出各式各样的平行四边形,但是在解决实际问题时,必须根据具体条件来决定平行四边形的形状。就拿斜坡上物体重力的分解来说,分力的方向是由斜坡的倾斜程度所决定的。斜坡的坡度确定之后,重力的这个使物体下滑的分力也就确定了。所以同一物体在比较陡的斜坡上就

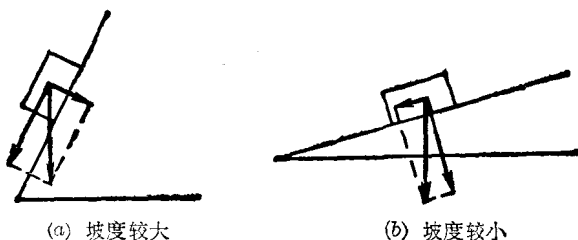


图1.26 斜坡的坡度决定了使物体下滑的分力的大小

下滑得快(图 1.26 a), 说明使物体下滑的这个分力比较大; 在比较平坦的斜坡上就下滑得慢(图 1.26 b), 说明这个分力比较小。

在生产实践中, 把一个已知力沿着两个指定的方向分解成两个分力的情况是常见的。例如在图 1.27 a 中, 要把已知力 $R=AB$ 沿着指定方向 I、II 分解成两个分力。具体的作图法是: 先由 A 点分别作两条与指定方向 I、II 平行的虚线(图 1.27 b), 再由 B 点分别作两条与指定方向 I、II 平行的虚线, 四条虚线交成平行四边形 ACBD (图 1.27 c), 那么 $F_1=AC$ 、 $F_2=AD$ 就是已知力 R 沿着指定方向 I、II 的分力。

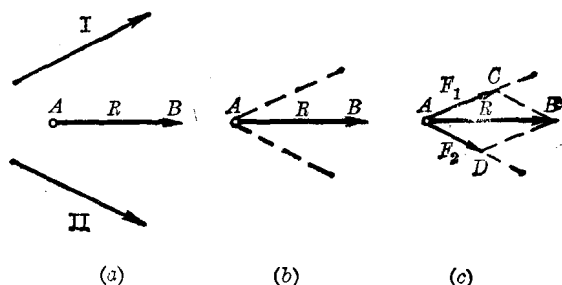


图 1.27 把一个已知力沿着两个指定的方向分解成两个力的具体作图法

如果两个分力是相互垂直的(图 1.28), 那么合力 R 和它的两个分力 F_x 、 F_y 的关系就是直角三角形的斜边和两条直角边的关系。假设合力 R 和分力 F_x 的夹角为 θ , 根据三角函数关系可以列出分力的大小

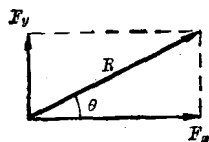


图 1.28 把已知力分解成两个互相垂直的力

$$F_x = R \cos \theta, \quad (1.5a)$$

$$F_y = R \sin \theta. \quad (1.5b)$$

如果两个分力并不垂直，那么它们的大小必须在按作图法作出之后用刻度尺量出来，或者按相似三角形对应边成比例的关系推算出来。

【例题 1.4】 工厂里用的某种墙式起重机，包括三角形的钢架 ABC (图 1.29 a)，它能绕着枢轴 AC 旋转。尺寸已在图上标出。如果在钢架顶部 B 安装的电动滑车重 73 公斤，问吊重为 25 公斤时，横梁 AB 、斜梁 BC 各受到多大的力？（假定钢架所受力的作用线沿着梁的方向。）

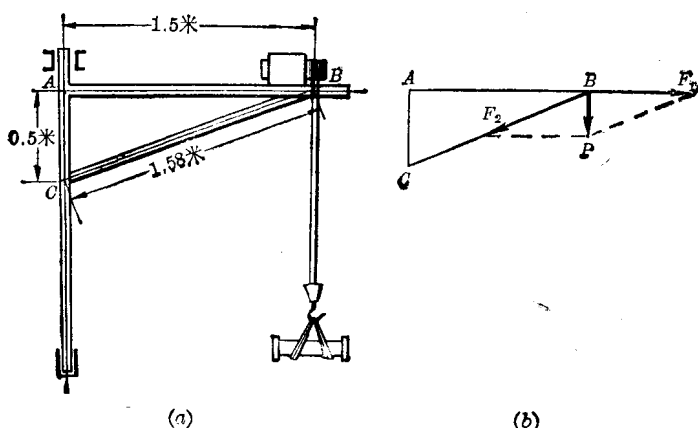


图 1.29 墙式起重机

解：因为横梁和斜梁所受的力就是电动滑车的重力 P （包括吊重）的两个分力，所以把它沿梁的方向分解成两个分力 F_1 、 F_2 ，就可以得出横梁和斜梁受力的大小。

通过作图（图 1.29 b）可知， F_1 就是横梁 AB 所受的拉力， F_2 就是斜梁 BC 所受的压力。从图上还可看出由力 P 、 F_1 、 F_2 构成的三角形与三角形 CBA 是相似三角形，它们的对应边成比例。于是可以列出：

$$\frac{P}{AC} = \frac{F_1}{AB} = \frac{F_2}{BC}。$$

今已知 $AC=0.5$ 米、 $AB=1.5$ 米、 $BC=1.58$ 米，而 $P=73+25=98$ 公斤，所以

$$F_1 = \frac{AB}{AC} P = \frac{1.5}{0.5} \times 98 = 294 \text{ 公斤，}$$

$$F_2 = \frac{BC}{AC} P = \frac{1.58}{0.5} \times 98 \div 309.7 \text{ 公斤。}$$

我们知道，帆船是利用风力的推动行驶的。无论什么风向，甚至在逆风的条件下，帆船也能行驶。这就是帆所起的作用，所谓“看风扯篷”。

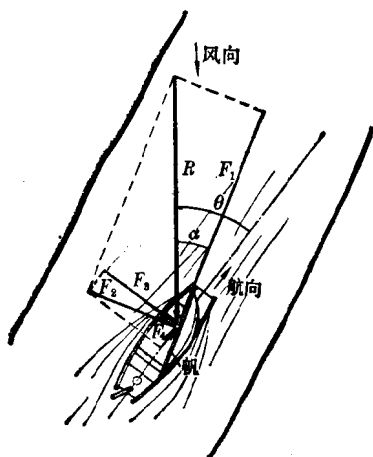


图 1.30 在逆风中行驶的帆船

这也可以用力分解的原理来解释。一般说来，只要不是完全顶风，只要风向与船身的纵轴之间成一较大的 θ 角（如图 1.30 所示），帆船就可以利用逆风的分力的推动而行驶。具体的方法是将帆斜扯，让帆面与风向成一较小的 α^* 角，这样，压在帆面上的总风力 R 分解成两个互相垂直的分力 F_1 、 F_2 。 F_1 与

帆面平行，由于作用在帆面上，对船身前进所产生的阻力并不显著； F_2 与帆面垂直，正压在帆面上。正是这个正压在帆面上的分力 F_2 ，具有推动船身前进的作用。再把力 F_2 分解成两个互相垂直的分力 F_3 、 F_4 ，就可以看出：分力 F_4 就是推动

* α 是希腊字母，读作“a-cr-fa”。

船身前进的推力, 而分力 F_3 与船身垂直, 使船身稍微倾斜。实践与理论都表明: 在 θ 角保持不变的情况下, 取 $\alpha = \frac{\theta}{2}$ 时, 推动船身前进的分力 F_4 最大*。

习题 1.9 图 1.31 中测力计的读数是 0.5 公斤、1 公斤还是零? 为什么?

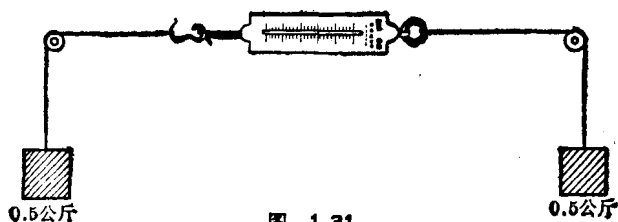


图 1.31

习题 1.10 车间里被吊车吊起的钢管长 1.2 米 (图 1.32)。已知钢管重 200 公斤, 两根钢丝绳各与钢管成 30° 角, 它们对钢管的拉力都等于 200 公斤, 试作出钢管的受力图。

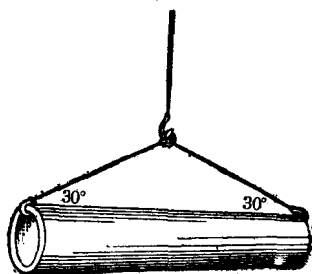


图 1.32

习题 1.11 什么叫做合力? 什么叫做分力? 合力的大小一定比分

* 因为 $F_2 = R \sin \alpha$, 故 $F_4 = F_2 \sin (\theta - \alpha) = R \sin \alpha \sin (\theta - \alpha) = \frac{R}{2} [2 \sin \alpha \sin (\theta - \alpha)] = \frac{R}{2} [\cos (2\alpha - \theta) - \cos \theta]$ 。当 $2\alpha - \theta = 0$, 即 $\alpha = \frac{\theta}{2}$ 时, $\cos (2\alpha - \theta) = 1$, F_4 的值最大, 即 $F_4 = \frac{R}{2} (1 - \cos \theta)$ 。

力大吗？为什么？

习题 1.12 为了防止电线杆的倾倒，在它的两侧对称地用钢丝绳拉紧，并固定在地面上(图 1.33)。如果钢丝绳间的夹角等于 60° ，它们的拉力都等于 30 公斤，试用作图法求出钢丝绳对电线杆的合力。

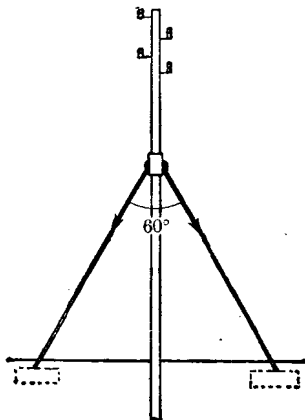


图 1.33

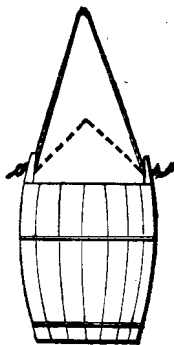


图 1.34

习题 1.13 如果用较细的麻绳结在水桶上来担水，绳子愈短就愈容易断(图 1.34)，为什么？

习题 1.14 重 1 吨的货物在两根钢丝绳的支持下处于平衡状态(图 1.35)。已知两钢丝绳与水平线分别成 30° 、 60° 角。问它们各受到多大的拉力？

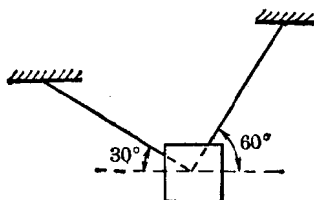


图 1.35

习题 1.15 在拉纤行船时，假设纤绳方向是在水平面内，纤绳与小船前进的方向成 20° 角(图 1.36)。问当纤绳拉力为 5 公斤时，它使船

前进的分力有多大？而使船向岸靠拢的横向分力又有多大？

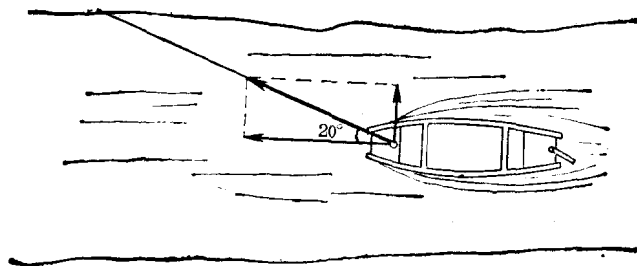


图 1.36

第五节 平行力的平衡

一、力 矩

在用扳手拧螺帽时，我们都有这样的经验：把手握得离螺帽越远，就越省力。例如要拧紧同样的螺帽（图 1.37），把手握在 A 点所用的力就比握在 B 点所用的力小些，而且用力方向要与扳手垂直，稍倾斜些也就费劲些。这就表明，使物体转动的效果不仅与用力的大小有关，而且还与力的作用线离转轴的远近有关。

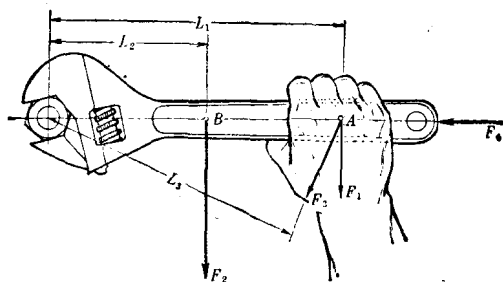


图 1.37 力矩的含义

通常我们把力的作用线和转轴间的垂直距离叫做这个力的力臂；而把力臂和力的乘积叫做这个力对于转轴的力矩。如果用字母 L 表示力臂，用字母 M 表示力矩，那么

$$M = LF \quad (1.6)$$

一个力的力矩越大，它使静止物体转动的效果就越显著。在图 1.37 中，力 F_1 、 F_2 、 F_3 的力臂依次为 L_1 、 L_2 、 L_3 ，因此它们的力矩 $M_1 = L_1 F_1$ 、 $M_2 = L_2 F_2$ 、 $M_3 = L_3 F_3$ 。对于力 F_4 说来，由于它的作用线通过转轴，力臂等于零，因此它的力矩 $M_4 = 0$ ，这说明力 F_4 对螺帽的转动不起作用。

力矩的单位是由力臂的单位和力的单位组成的。力矩的常用单位是厘米·公斤、米·公斤等。

物体的转动有两种转向。例如在拧紧螺帽时，螺帽是按顺时针方向转动；在拧松螺帽时，螺帽是按逆时针方向转动。因此力矩也有两种。为了区别方便，我们规定：使物体按逆时针方向转动的力矩是正力矩；使物体按顺时针方向转动的力矩是负力矩（图 1.38）。

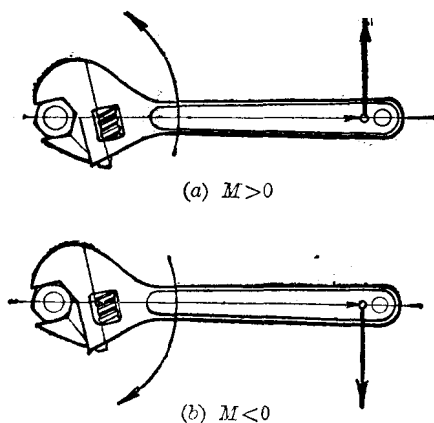


图 1.38 力矩的正负

二、力矩的平衡

取一根有刻度的、重量很轻的直尺，在它的中点 O 钻一小孔，把它套在支架上（图 1.39），这样这根直尺就成了有固定转轴 O 、可以绕 O 轴转动的物体。在原来静止的直尺的两边挂上四串砝码，每一串砝码的重力

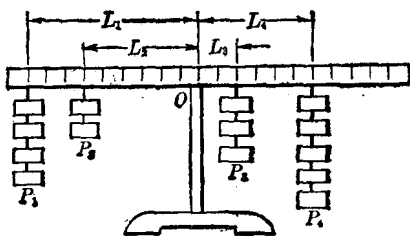


图 1.39 具有固定转轴 O 的直尺

都对直尺有一个力矩作用。从图上可以看出，在 O 点左边的砝码的力矩都是正的；而在 O 点右边的砝码的力矩都是负的。因为 O 点左边砝码的力矩的效果是使直尺按逆时针方向转动；而 O 点右边砝码的力矩的效果是使直尺按顺时针方向转动。

直尺在这四串砝码的作用下，结果是按顺时针方向转动，还是按逆时针方向转动呢？实验结果表明，它是按逆时针方向转动的。这就表明 O 点左边砝码的正力矩的和大于右边砝码的负力矩的和。通常我们把作用在同一物体上的几个力对于某一点的力矩的代数和叫做这些力对于这一点的合力矩。原来静止的物体在几个力同时作用下绕轴转动的效果就要由这些力对转轴的合力矩来决定。例如在图 1.39 中，假设每个砝码重 0.5 公斤，直尺上的刻度单位是厘米，那么作用在直尺上的这些力对转轴 O 的合力矩

$$\begin{aligned} M &= M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \\ &= L_1 P_1 + L_2 P_2 - L_3 P_3 - L_4 P_4 \\ &= 9 \times 2 + 6 \times 1 - 2 \times 1.5 - 6 \times 2.5 \\ &= 6 \text{ 厘米} \cdot \text{公斤}。 \end{aligned}$$

这就是使原来静止的直尺绕转轴 O 按逆时针方向转动的合力矩。

如果这些力对于转轴 O 的合力矩 $M=0$ ，那就表示这些力使直尺绕轴转动的效果相互抵消了，直尺就保持静止而处于平衡状态。可见合力矩等于 0，即

$$M = M_1 + M_2 + \cdots + M_n = 0, \quad (1.7)$$

就是具有固定转轴的物体的平衡条件，这叫做力矩平衡的条件。

[例题 1.5] 图 1.40 是一种轮胎式起重机。当起重货物

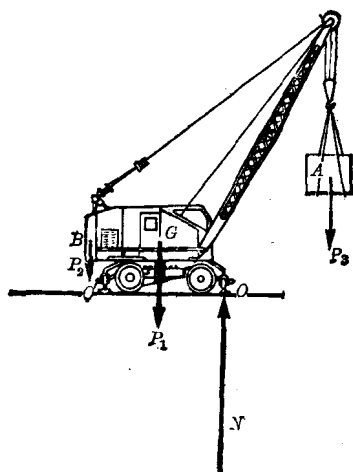


图 1.40 轮胎式起重机

时，为了防止轮胎受力过大而损坏，必须把前支腿 O 、后支腿 O' 都撑在地面上。今假设起重机本身重量 $P_1=22$ 吨，作用在重心 G 上，装在起重机尾部 B 处的压铁重量 $P_2=2$ 吨。问在这种情况下起重机能吊起货物 A 的重量 P_3 最多有多大而不致翻倒？假设 O 轴到 P_1 、 P_2 、 P_3 的垂直距离依次为 2.5 米、5 米和 4 米。

解：可以设想，当起吊的货物过重时，起重机就要绕前支腿 O 转动而翻倒。因此在计算时，可以把前支腿 O 当作固定转轴，利用平衡条件来找出起重机能吊起的最大重量 P_3 。对前支腿 O 有力矩作用的共有三个力：起重机的自重 P_1 、压铁重量 P_2 和货物重量 P_3 。（注意：因 P_3 是最大起重量，所以在

后支腿 O' 处起重机不受力) 它们的力矩分别为

$$M_1 = 2.5 \times 22 = 55 \text{ 米} \cdot \text{吨},$$

$$M_2 = 5 \times 2 = 10 \text{ 米} \cdot \text{吨},$$

$$M_3 = -4 P_3 \text{ 米} \cdot \text{吨}.$$

根据力矩的平衡条件可以列出

$$M = M_1 + M_2 + M_3 = 0,$$

即

$$55 + 10 - 4 P_3 = 0,$$

所以最大起重量

$$P_3 = \frac{65}{4} = 16.25 \text{ 吨}.$$

三、平行力的平衡

现在我们来分析 [例题 1.5] 中起重机在起吊最大重量时的受力情况 (见图 1.40)。这时起重机受到几个力的作用呢? 是不是只受到 P_1 、 P_2 、 P_3 三个力的作用呢? 显然不是。

起重机在受到 P_1 、 P_2 、 P_3 三个力的同时, 必然要通过前支腿 O 对地面有个很大的方向铅直向下的压力 P , 而这个压力 P 就等于 P_1 、 P_2 、 P_3 三力的和, 即 $P = 22 + 2 + 16.25 = 40.25$ 吨。根据作用力和反作用力定律可知, 起重机在前支腿 O 处也同时受到地面对它的一个方向铅直向上的支持力 $N = 40.25$ 吨。因此这时起重机共受到四个力的作用。象这种作用在同一物体的不同点上, 而作用线相互平行的几个力叫做平行力。起重机就是在四个平行力的作用下而处于平衡状态的。

我们已经知道, 在共点力作用下物体的平衡条件是所受各个力的合力等于零。那么在平行力作用下物体的平衡条件又是怎样的呢? 仔细分析图 1.40 的情况可以发现, 这四个平

行力的合力等于零；同时从前面的计算可知它们对于 O 点的合力矩等于零，而实际上这四个平行力对于任何一点的合力矩也都等于零。例如， P_1 、 P_2 、 N 、 P_3 对于 A 点的合力矩

$$\begin{aligned} M_A &= M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \\ &= 6.5 \times 22 + 9 \times 2 - 4 \times 40.25 \\ &= 0. \end{aligned}$$

由此可知：对于在平行力作用下的物体说来，它的平衡条件就是所受各个力的合力等于零，同时这些力对任何转轴的合力矩都等于零。即

$$\begin{cases} R=0, & (1.8a) \end{cases}$$

$$\begin{cases} M=0. & (1.8b) \end{cases}$$

很明显，如果合力不等于零，物体就要沿合力的方向开始移动；如果合力矩对于某一转轴不等于零，物体就要绕这一转轴开始转动。

利用平行力的平衡条件也可以解决某些力学的实际问题。

〔例题 1.6〕 图 1.41 是工厂车间里常用的桥式起重机（行车）的简图。它是由两端用车轮搁置在两段纵向钢轨上的

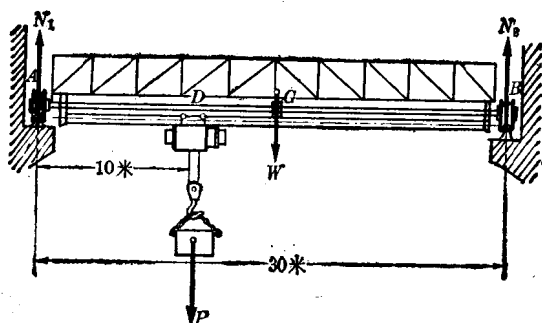


图 1.41 桥式起重机横梁的受力图

横梁和横梁上的电动滑车构成的。假设横梁长 $AB=30$ 米, 重量 $W=2$ 吨, 重心在中点 G 上。电动滑车连同被它吊起的重物共重 $P=5.4$ 吨。问当滑车停在横梁的 D 点上而 $AD=10$ 米时, 两端钢轨对横梁的支持力各有多大?

解: 假设在横梁 A 、 B 处钢轨对横梁的支持力依次为 N_1 、 N_2 , 那么横梁就在 N_1 、 P 、 W 、 N_2 四个平行力作用下而处于平衡状态。根据平衡条件 $R=0$, 可按在一条直线上的力的合成法则列出:

$$R = N_1 + N_2 - P - W = 0,$$

再根据平衡条件 $M=0$, 任取 A 点为转轴, 那么这些力对于 A 轴的合力矩

$$M_A = (0) N_1 - (10) \cdot P - (15) \cdot W + (30) \cdot N_2 = 0。$$

把已知的数值代入可得联立方程如下:

$$\begin{cases} N_1 + N_2 = 5.4 + 2 = 7.4, \\ 30N_2 = 54 + 30 = 84。 \end{cases}$$

解这方程组得

$$N_1 = 4.6 \text{ 吨}, \quad N_2 = 2.8 \text{ 吨}。$$

四、物体重心位置的确定

对于任何一个物体来说, 它的每一部分都受到地心的重力作用, 这些力的方向都是沿着铅直方向指向地面的, 因此它们就构成一组平行力。这一组平行力的合力的大小就是整个物体的重量 P ; 而它

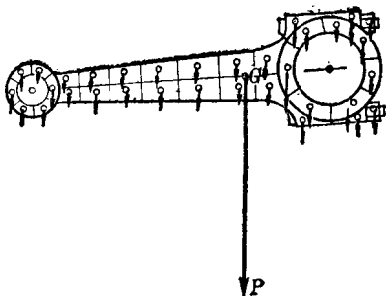


图 1.42 机器零件的重心

们的合力的作用点就是物体的重心 G (图 1.42)。

物体重心位置的确定方法很多, 可以按平行力的平衡条件来确定, 也可以按平行力的合成法则来确定。对于不规则的物体的重心的确定, 计算往往相当繁琐, 不如用实验方法、或者用实验与计算相结合的方法来得方便。

有规则的几何形物体的重心比较容易确定, 例如图 1.43 中所列出的圆球、球壳、圆柱、圆筒的重心位置, 它们的重心都在它们的对称中心或对称线上。

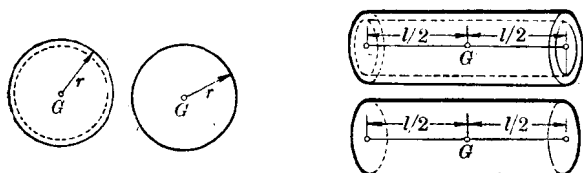


图 1.43 材料比重均匀的、对称的几何形物体的重心

形状细长的例如杠棒的重心, 可以用手按图 1.44 的实验方法找出杠棒平衡时的支点, 那么杠棒的重心就在这个支点的上方。

对于形状不规则的薄板的重心, 也可以通过实验来确定。具体的方法是用细线分别吊在它的两个不同点 A 和 B 上 (图

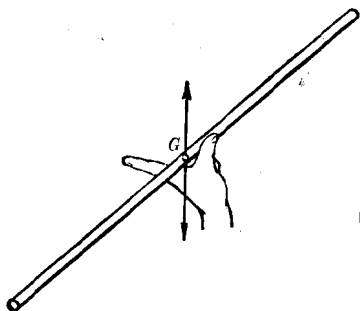


图 1.44 细长物体重心测定法

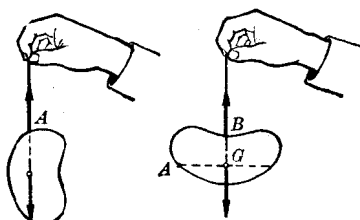


图 1.45 形状不规则的薄板重心测定法

1.45), 每次画出薄板在平衡时细线在薄板上的延长线, 这两条线的交点就是这块薄板的重心。

五、物体平衡的稳定性

我们已经讨论过物体的平衡条件。但是对于在重力和支持力作用下的物体, 例如室内的桌椅、悬挂着重物、工厂车间里的各种机器设备、码头上的起重机等, 不仅都有一个平衡问题, 而且还有一个稳不稳的问题。有的物体容易翻倒; 有的物体即使受到外来的扰动, 失去了平衡, 但还有自动恢复平衡的可能性。这就是平衡的稳定性问题。

下面先来分析一张课桌的平衡的稳定性。假设课桌的重力为 P (图 1.46 a), G 是它的重心。课桌以四条桌腿固定在地面上; 地面通过 A 、 B 、 C 、 D 四点对课桌有四个支持力 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 (图上只画出它的一个侧面)。 $ABCD$ 形成的矩形叫做课桌的支面。课桌就是在 P 、 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 等五个平行力的作用下而处于平衡状态。如果在碰撞或者地面震动的影响下, 课桌发生倾斜而使两条桌腿腾空 (图 1.46b), 这样地面对课桌的全部支持力就要由另外两条桌腿来承担。但是

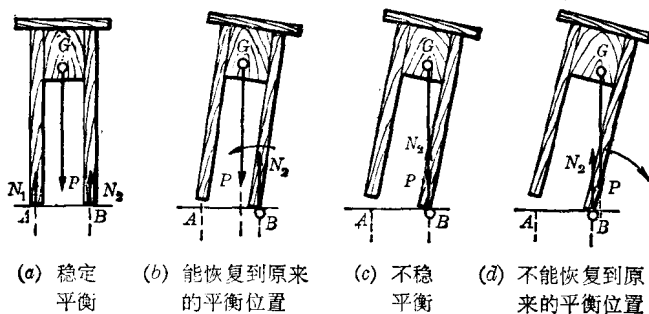


图 1.46 平衡的稳定性

只要倾斜程度不太大,重力 P 的作用线 GP 还落在支面内,那么重力 P 对转轴 BC 产生的力矩作用会促使课桌自动恢复到原来的平衡位置。象这种稍受扰动还能自动恢复到原来位置的平衡叫做稳定平衡。

当课桌倾斜到一定程度,重力作用线 GP 恰好落在课桌的支线 BC 上(图 1.46 c),这时课桌在 P 、 N_2 、 N_3 等三个平行力的作用下,虽然也处于平衡状态,但这时就不是稳定平衡了。因为课桌只要再倾斜一点(图 1.46 d),重力作用线就要越出支线 BC ,那时重力 P 对转轴 BC 产生的力矩作用就要使课桌翻倒。象这种稍一倾斜就不能恢复到原来位置的平衡叫做不稳平衡。

从上面的例子可以看出,当物体的重心在支面上方时,要

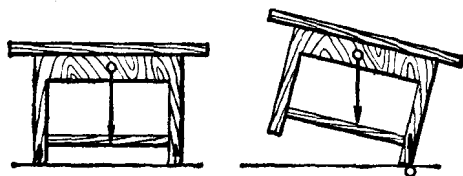


图 1.47 支面越大,平衡的稳定性也越大

使物体保持稳定,重力作用线必须落在支面内;支面越大,平衡的稳定性也越大。例如图

1.47 的方桌,支面较大,它的平衡就有较大的稳定性。因此一般家具、机器、脱粒机、风车的底座都较大,就是为了保证有较大的支面。

除了增大支面,降低物体重心的位置也是提高平衡稳定性的有力措施。例如原来要翻倒的物体(图 1.48 a),如果用比较结实的材料来做底座,降低了重心位置,在倾斜程

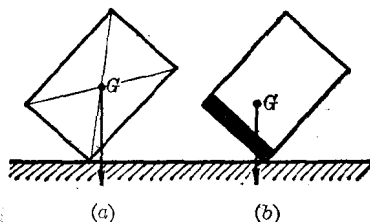
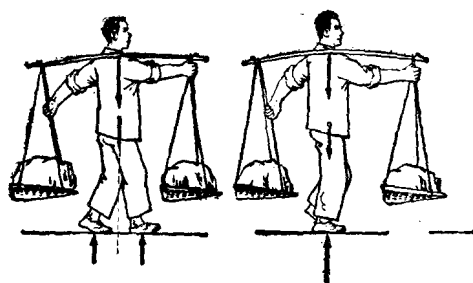


图 1.48 降低物体的重心

度相同的情况下就不会翻倒了(图 1.48 b)。舱底装满货物的木船与空船相比不易倾倒,就是因为重心较低的缘故。

仔细分析起来,我们走路和挑担的过程也是一系列恢复平衡的过程。例如在挑担时,肩部的压力和体重大致是在前后脚跨度之间的铅直线上(图 1.49 a),两脚所受的地面的支持力也大致相等,这样就形成了稳定平衡。当后脚离地,重力作用线移到前脚踵的位置时(图 1.49 b),重力和支持力在一直线上,前脚承担了全部支持力,形成了不稳平衡。直到后脚乘势向前跨去着地之后,又从不稳平衡进入了新的稳定平衡。通常我们都有这样的经验:挑担要小步快走,因为“快走”可以缩短不稳平衡的时间,使脚部受力均匀,而“小步”可以缩短不稳平衡的距离,同时使重心起伏的幅度减小,容易恢复平衡。



(a) 稳定平衡

(b) 不稳平衡

图 1.49 挑担时人体的平衡

习题 1.16 什么叫做力矩?简单地用“一个力的力矩等于……”的讲法在科学性上是否完整?为什么?

习题 1.17 用小螺丝刀无法旋动木板上的木螺丝时,换用粗柄的大螺丝刀就能旋动,这是什么缘故?

习题 1.18 一个原来静止的具有固定转轴的物体,同时受到四个力的作用。两个使它按顺时针方向转动的力是 5 公斤、3 公斤,对转轴

的力臂分别为 50 厘米、25 厘米；两个使它按逆时针方向转动的力是 2 公斤、6 公斤，对转轴的力臂分别为 75 厘米、20 厘米。问这个物体将向什么方向转动？还要增加多大的力矩才能使它平衡？这个力矩是正的还是负的？

习题 1.19 两知识青年用杠棒运送一袋粮食，重 120 公斤。如果不考虑杠棒重量，前后两人肩部用力点与杠棒荷重处的距离分别为 90 厘米和 60 厘米，问两人用力各有多大？

习题 1.20 一永久牌自行车自重 28.5 公斤(图 1.50)，重力作用线与前后两支点的距离分别为 720 毫米和 420 毫米，而座垫中心（即骑车人重心位置）偏在重力作用线后方 180 毫米处。问：(1)如果骑车人体重 60 公斤，求在行驶时地面对前后轮的正压力各有多大？(2)空车时地面对前后轮的正压力又是多大？

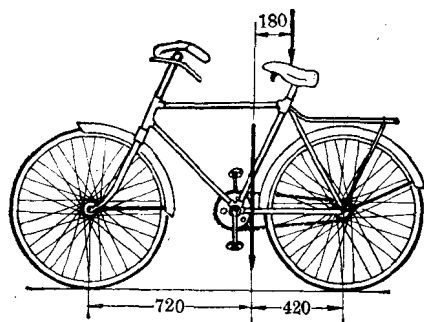


图 1.50

习题 1.21 我们在堆草堆、安装机器设备时，怎样才能提高平衡的稳定性呢？

习题 1.22 用轮胎车运送货物时，假定空车的重力作用线是偏在车轮轴的前面，那么我们在装运货物时，应该设法使满载货物时的重力作用线偏在车轮轴的后面一些才能省力，为什么？

习题 1.23 假设卡车车轮间的跨距为 1.2 米，按照规定，卡车满载时重心超出地面的高度为 1.4 米。如果车身停在斜坡上(图 1.51)，问斜坡的倾角 θ 达到多大时车身将有翻倒的危险？

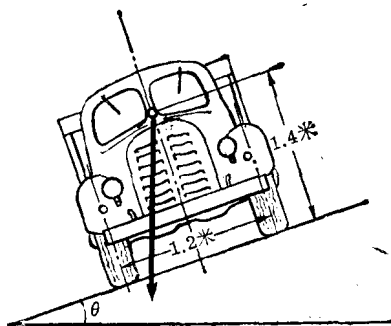


图 1.51

复 习 题

习题 1.24 力是什么？什么是力的三要素？在力的图示中通常是怎样把力的三要素表示出来的？它们对力的作用效果有什么影响？

习题 1.25 什么叫做作用力和反作用力定律？为什么说：“作用力和反作用力不能互相平衡”？在用轮胎车运送农产品时，人手与车把之间、车轮与路面之间都存在着作用力和反作用力。试简单说明这时轮胎车共受到哪几个力的作用，并指出这些力的反作用力。

习题 1.26 在力学范围里所研究的力主要有哪几种？各有什么特点？问在[习题 1.22] 中的轮胎车所受的几个力各属于哪一种？

习题 1.27 什么叫做共点力？什么叫做平行力？总结一下，它们的合成法则和平衡的具体条件，各有什么不同？

习题 1.28 用两根绳子把一支日光灯管悬挂起来，在图 1.52 所示的三种方法中，哪一种方法使绳子所受的拉力最小？



图 1.52

习题 1.29 挑担时, 如果发现前后两头负重不等, 因而扁担开始歪斜时, 可用两手分别握住前后担绳来调节扁担两端的负重力, 使扁担保持平衡。试用力矩的平衡原理来解释。

习题 1.30 图 1.53 是在建筑工地上使用的大型塔式起重机的简图。它的主要尺寸以及配重 P_1 、自重 P_3 的大小和作用点都已注在图上。问: (1) 起重机在空载时和在起重量 $P_2 = 2$ 吨时, 起重机对底部左、右轨道上的压力各有多大? (2) 起重量达到多大时整个起重机有翻倒的危险?

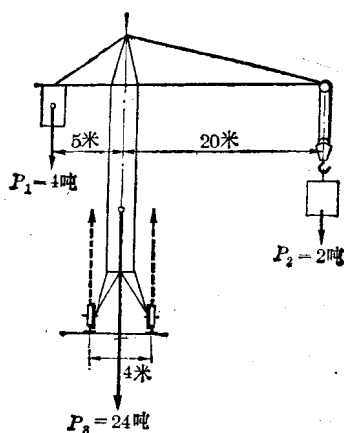


图 1.53 塔式起重机

第二章 运动和运动定律

毛主席教导我们：“对立的统一是有条件的、暂时的、过渡的，因而是相对的，对立的斗争则是绝对的。”物体的平衡就是物体间的作用在一定条件下的矛盾的统一，因而是暂时的，相对的。随着条件的改变，它的平衡就要被打破，就要从暂时的、相对的静止转变为运动。

在这一章里，我们先来分析运动的绝对性和相对性，然后通过对几种直线运动和圆周运动的分析来研究运动所遵循的基本规律。接着再讨论运动和力的关系，即分析物体运动状态发生变化的外部条件和内部根据，有批判地阐述牛顿运动定律。

第一节 运动的绝对性和相对性

一、运动和静止

引言中提到过，自然界的一切物体都在不停地运动。地面上的建筑物、停着的车辆、轮船等似乎是静止不动的，但实际上它们是随着整个地球在围绕太阳不停地旋转。那么太阳是不是静止不动的呢？科学研究表明：宇宙间所有的恒星，包括太阳系在内，都在飞快地运动，所谓“恒星不恒”。所以运动是物质的存在方式，是物质的固有属性。除了运动的物质以外，世界上什么也没有。这就是运动的绝对性。

既然一切物体都在运动，为什么我们会感到地面上的高山、房屋静止不动呢？因为它们是在随地面一起运动，相对于地面的位置没有发生变化，所以从地面上看来，它们是静止不动的。这就好比静坐在船舱里的旅客，大家都随船在大海里平稳地航行，彼此看来似乎静止不动一样。可见绝对静止的物体是不存在的。通常所谓静止物体是相对于地面而言的，是指运动状态和地面完全相同的相对静止的物体。

一个静坐在行驶中的公共汽车上的乘客，在其他乘客看来是静止不动的；在路旁的行人看来是离他而去的；在迎面开来的卡车上的司机看来是向他而来的。很明显，他们的说法不一是他们本身的运动状态不同所造成的。正是由于一切物体都在运动，因此要确定某一物体的运动状态，首先必须选择一个参照物，然后根据这一物体相对于参照物的位置变化情况来确定它的运动状态。如果选择不同的参照物来确定同一物体的运动状态，就可以得出完全不同的结论。这就是运动的相对性。

从上面的分析可以看出：物体的运动既具有绝对性，又具有相对性。运动的绝对性是通过它的相对性表现出来的，即在运动的相对性之中包含着它的绝对性。

二、位移和路程

在参照物确定之后，物体的运动就是它相对于参照物的位置的变化。为了能把这种位置变化的情况定量地反映出来，首先必须找出一种确定物体位置的简便方法。利用坐标系就可以通过一个数字或者一组数字把物体的位置表示出来。

例如要表示在笔直的公路上行驶的卡车在某一时刻的位置，就可以先在路面(参照物)上选定一点 O 作为坐标系的原

点，过 O 点沿着卡车运动的轨道作一直线 xx' 作为坐标系的 x 轴(图 2.1)。根据卡车在这一时刻的所在点 A 在 x 轴上的刻度，叫做 A 点的 x 坐标，就可以把卡车当时的位置表示出来。如图 2.1 中，卡车当时所在点 A 的 x 坐标是 $+5$ ，表示卡车当时的位置是在原点的正方向上，距原点 5 公里(或 5 米)处。沿直线轨道进行的运动叫做直线运动。对于作直线运动的物体说来，可用它所在点的 x 坐标来表示它的位置。

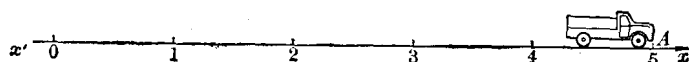


图 2.1 坐标系的 x 轴

如果物体的运动并不局限在一直线上，而是在一平面内进行的，这样的运动叫做平面运动。例如从高处水平抛出的石块的运动就是在铅直平面内进行的平面运动(图 2.2)。要表示石块在某一时刻的位置，就可以先在石块运动所在的铅直平面(参照物)上选定一点 O 作为坐标系的原点，过 O 作两条互相垂直的直线 xx' 和 yy' ，作为坐标系的 x 轴和 y 轴。

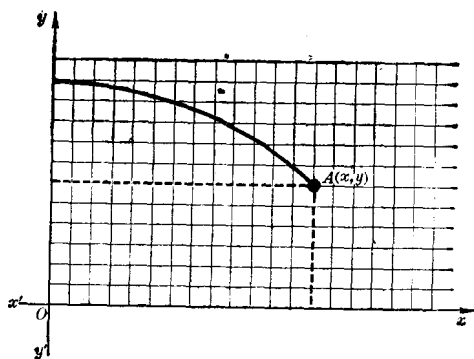


图 2.2 平面直角坐标系

从石块在这一时刻的所在点 A 向 x, y 轴分别引一条垂线。垂线在 x, y 轴上的刻度, 叫做 A 点的 x 坐标和 y 坐标, 写作 $A(x, y)$, 据此就可以把石块当时的位置表示出来。如图 2.2 中, 石块当时所在点 A 的坐标为 $A(13, 6)$, 表示石块当时在 x 轴上方 6 米, 同时在 y 轴右方 13 米处。对于作平面运动的物体说来, 需要有两坐标轴的平面直角坐标系, 用它所在点的 x, y 坐标来表示它的位置。

一列火车从首都北京出发, 经过一段时间到达上海。怎样才能把火车在这段时间里的位置变化表示出来呢? 通常把物体变动前、后位置间的距离叫做物体在这段时间里位移的

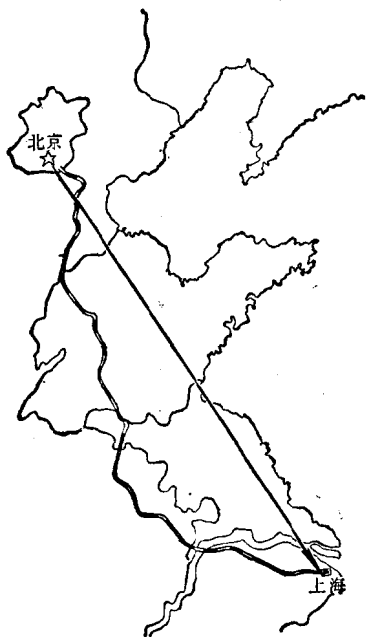


图 2.3 物体位移的图示

大小; 而把物体变动后的位置相对于它原来位置的方向叫做物体在这段时间里位移的方向。位移就是用来反映物体位置变动情况的物理量, 通常用字母 S 表示。它既有大小, 又有方向, 因而是一种矢量, 也可以用带箭头的线段图示出来。图 2.3 中带箭头的线段就表示火车从北京出发到达上海时的位移。虽然火车的实际运动过程是沿着弯曲的铁路线进行的, 但从运动的

总效果看来就和从北京沿直线到达上海一样。路程是物体

在运动过程中所经过的实际路径的长度,通常用字母 s 表示。它只有大小,没有方向,因而是一种标量。一列火车从北京到达上海的路程就等于京沪铁路线的总长度,即 $s=1462$ 公里;而它的位移的大小是北京和上海间的直线距离,即 $S=1050$ 公里。

在直线运动中,如果物体的运动方向没有改变过,那末它的位移的大小总是和它所经过的路程相等。

习题 2.1 静止的物体是在运动吗?为什么?

习题 2.2 用拖拉机到 5 公里外的小镇上去装一车农药。问拖拉机来回一次通过的路程多大?位移多大?

第二节 直线运动

一、匀速直线运动

在公路上正常行驶的卡车、在田间正常操作的拖拉机,它们运动的快慢都很均匀。象这种快慢很均匀的运动究竟有什么特点呢?例如一辆自行车的运动,它每分钟的路程都等于 600 米,每 30 秒钟的路程都等于 300 米,每 10 秒钟的路程都等于 100 米……即在任何相等的时间内的路程都相等,换句话说,它运动的路程总是和它运动的时间成正比的。在这种情况下,我们就会感到它运动的快慢很均匀。因此通常把路程和时间成正比的运动叫做匀速运动,在直线轨道上进行的匀速运动就叫做匀速直线运动。

既然匀速直线运动的路程与时间成正比,那么它们的比值就是一个常量。对于上述自行车的运动说来:

$$\frac{600 \text{ 米}}{60 \text{ 秒}} = \frac{300 \text{ 米}}{30 \text{ 秒}} = \frac{100 \text{ 米}}{10 \text{ 秒}} = 10 \text{ 米/秒(常量)}。$$

这个常量就相当于运动物体在单位时间内所通过的路程，它反映了物体运动的快慢程度。因此通常把路程和相应的时间的比叫做匀速直线运动的速度，用字母 v 表示。如果路程用字母 s 表示，时间用字母 t 表示，那么匀速直线运动的速度

$$v = \frac{s}{t} \quad (2.1)$$

从上式中可以看出，速度的单位是由长度、时间的单位组成的。关于时间的单位，是以 1 平均太阳日*作为标准单位的，简称 1 日。1 日分为 24 时；1 时分为 60 分；1 分分为 60 秒。即

$$1 \text{ 日} = 24 \text{ 时} = 1440 \text{ 分} = 86400 \text{ 秒}。$$

近年来由于科学技术的发展需要，又定出几种比秒更小的时间单位，如毫秒、微秒等。即

$$1 \text{ 秒} = 10^3 \text{ 毫秒} = 10^6 \text{ 微秒} = 10^9 \text{ 毫微秒}。$$

表 2.1 列出了速度的几种常用单位和它们之间的换算关系。例如公里/时与米/秒的换算方法是

$$1 \text{ 公里/时} = \frac{1000}{60 \times 60} \text{ 米/秒} = \frac{5}{18} \text{ 米/秒} \approx 0.278 \text{ 米/秒}。$$

表 2.1 速度的几种常用单位

路 程	时 间	速 度	换 算 关 系
厘 米	秒	厘米/秒	
米	秒	米/秒	=100厘米/秒
公 里	时	公里/时	=0.278米/秒
浬(指海里, 1 海里 = 1.852 公里)	时	浬/时(简称节)	=1.852公里/时 =0.5144米/秒

* 地球自转 1 周的时间，即太阳连续两次通过地球上同一观察点的时间间隔叫做 1 太阳日。由于一年之中，太阳日的长短略有差异，因此取一年中所有太阳日的平均值叫做平均太阳日。

速度不仅有大小，而且有方向。速度的方向就是物体运动的方向。因此速度也是一种矢量，也可以用带箭头的线段来图示。但在直线运动中，物体运动的方向只有两种可能：前进或者后退。因此在直线运动中速度的方向可用正、负号来表示。通常规定以物体出发时的运动方向为正，这时物体的速度是正的。如果物体中途后退，运动方向变为负，这时物体的速度是负的。处于相对静止的物体，速度等于零。

把匀速直线运动的速度公式(2.1)变化一下，即可得到匀速直线运动的路程公式

$$s = vt. \quad (2.2)$$

上式表明，只要掌握了速度，即可把作匀速直线运动的物体在任何时间内的路程计算出来。

〔例题 2.1〕 南京长江大桥上层公路桥全长 4500 米，下层铁路桥全长 6700 米，其中江面上的正桥长 1570 米。若把汽车、火车通过大桥的运动近似地看作匀速直线运动，问：(1) 汽车以 36 公里/时的速度通过公路桥全长需要多少时间？(2) 如果火车用 2 分钟通过江面正桥，那么通过铁路桥全长需要多少时间？

解：(1) 把公式(2.1)化为 $t = \frac{s}{v}$ ，即可用来计算时间，但在代公式时必须注意到单位的一致性。已知路程 $s =$ 公路桥全长 $= 4500$ 米，而汽车速度 $v = 36$ 公里/时 $= 10$ 米/秒，因此汽车通过公路桥全长的时间

$$t = \frac{s}{v} = \frac{4500}{10} = 450 \text{ 秒} = 7 \text{ 分 } 30 \text{ 秒}.$$

(2) 先根据火车通过江面正桥的时间算出火车的速度，即火车速度

$$v_1 = \frac{s_1}{t_1} = \frac{1570}{120} = 13.08 \text{ 米/秒},$$

然后再根据铁路桥全长 $s_2 = 6700$ 米算出火车通过铁路桥全长的时间

$$t_2 = \frac{s_2}{v_1} = \frac{6700}{13.08} = 512 \text{ 秒} = 8 \text{ 分 } 32 \text{ 秒}.$$

二、匀变速直线运动

匀速直线运动是最简单而又特殊的运动。在一般情况下，物体运动的路程并不是始终与相应的时间成正比的。例如汽车在开始启动时，运动是逐渐加快的；火车在即将到站时，运动要逐渐放慢。象这种在相等的时间内路程并不都相等的直线运动叫做变速直线运动。

如果同样按公式 (2.1) 把物体在作变速直线运动中某一段路程和相应的时间的比计算出来，那么这个比值只能反映物体在这一段路程中运动快慢的大致情况。因此通常把变速直线运动的某一段路程和相应的时间的比叫做变速直线运动在这一段路程中的平均速度，用字母 \bar{v} 表示。即

$$\bar{v} = \frac{s}{t}. \quad (2.3)$$

很明显，在变速直线运动中，各段路程的平均速度并不是一个常量。

然而变速直线运动快慢的变化是连续的，有时甚至是一刻不停地变化着。例如出膛的枪弹的运动，即使相隔 1 毫秒，快慢也有变化。在生产技术、科学研究中，有时就需确切地掌握物体在经过某一位置(或在某一时刻)的运动快慢情况。例如要研究锻压成型的高速汽锤的锻打能力，就需要掌握汽锤在被迫下落刚与工件碰撞时的打击速度。因此通常把运动物

体在经过某一点(或在某一时刻)时的运动快慢程度叫做物体在这一点(或在这一时刻)的**即时速度**, 用字母 v 表示。即时速度的方向就是物体在经过这一点时(或在这一时刻)的运动方向。

图 2.4 是一种用来测量枪弹出膛时的即时速度的自动仪器。在测量时, 出膛的枪弹先后击断了有孔板 A 、 B 上的铝

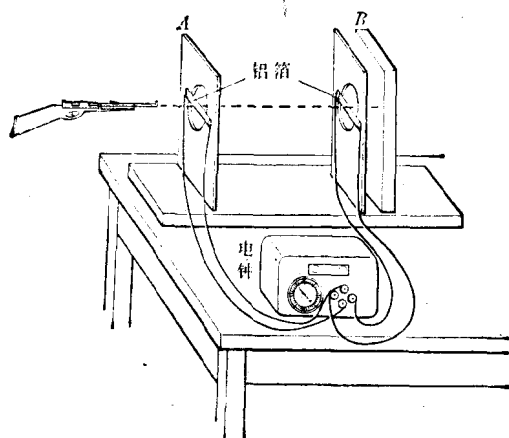


图 2.4 测量枪弹出膛时的即时速度

箔, 这两片铝箔分别连接着电钟的控制线路。当枪弹击断 A 箔时电钟开始走动; 击断 B 箔时电钟立即停止。这样电钟就自动记录了枪弹穿过路程 $s = AB$

所用的时间 t 。虽然 $\frac{s}{t}$ 是枪弹在 AB 这段路程上的平均速度, 但由于 AB 极短, 而且靠近枪口, 因此这段路程上的平均速度与枪弹出膛时的即时速度非常接近, 可

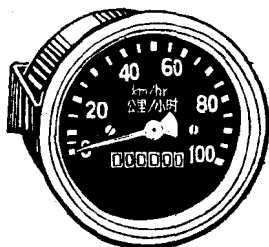


图 2.5 汽车上的速度表

以看作就是枪弹出膛时的即时速度。图 2.5 是汽车上的速度表，表上指针所指的就是汽车当时的即时速度。通常为了叙述方便，即时速度可以简称为物体在某一点(或某一时刻)的速度。

车辆沿着斜坡下滑的运动是越来越快的，这表明它的速度是在不断增大。刹车后汽车的运动是越来越慢的，最后停了下来，这表明它的速度是在不断减小，最后减小到零。这一类变速直线运动，它们的速度变化很均匀，即它们的速度变化总是与相应的时间成正比的，时间越长，速度的变化(指速度的增大或减小)就越大。因此通常把速度的变化与相应的时间成正比的直线运动叫做匀变速直线运动。

既然匀变速直线运动的速度变化与时间成正比，那么它们的比值就是一个常量。即

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} = \text{常量}, \quad (2.4)$$

式中 v_0 是物体原来的速度，叫做初速度，而 v_t 是经过一段时间 t 后的速度，叫做末速度。它们的差 $v_t - v_0$ 就是物体在经过一段时间 t 后的速度变化。因此这个常量 a 就相当于运动物体在单位时间内的速度变化，它反映了匀变速直线运动速度变化的快慢程度，通常把它叫做匀变速直线运动的加速度。

例如汽车和自行车同时从同一地点出发作匀变速直线运动，经过相同的时间，汽车的速度就要比自行车的速度大得多，这就是因为汽车的加速度比自行车的加速度大得多的缘故。

从上式中还可以看出，加速度的单位是由速度的单位和时间的单位组成的。例如加速度为 1 米/秒/秒的汽车是指每运动 1 秒钟，速度就增大 1 米/秒的汽车。为了书写方便，加速度的上述单位通常写作米/秒²，读作每秒每秒米。表 2.2 列

出了加速度的几种常用单位以及它们之间的换算关系。例如

$$1 \text{ 米/分}^2 = \frac{1}{60^2} \text{ 米/秒}^2 = \frac{1}{3600} \text{ 米/秒}^2.$$

表 2.2 加速度的几种常用单位

速 度	时 间	加 速 度	换 算 关 系
厘米/秒	秒	厘米/秒 ²	
米/秒	秒	米/秒 ²	=100 厘米/秒 ²
米/分	分	米/分 ²	= $\frac{1}{3600}$ 米/秒 ²

加速度不仅有大小，而且还有方向，因而它也是一种矢量，也可以用带箭头的线段来图示。但在直线运动中，加速度的方向只有两种可能：(1)与速度方向一致，使物体的速度不断增大；(2)与速度方向相反，使物体的速度不断减小。因此也可用正负号表示。通常规定与速度方向一致的加速度为正加速度；与速度方向相反的加速度为负加速度。加速度等于零的运动是速度不随时间变化的运动，因而就是匀速直线运动。

[例题 2.2] 汽车进站时，在 10 秒内速度由 36 公里/时减小到零。求加速度。

解：已知汽车进站时的初速度

$$v_0 = 36 \text{ 公里/时} = \frac{36 \times 1000}{60 \times 60} \text{ 米/秒} = 10 \text{ 米/秒},$$

而末速度 $v_t = 0$ ，时间 $t = 10$ 秒，因此加速度

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} = \frac{0 - 10}{10} = -1 \text{ 米/秒}^2,$$

负号表示加速度的方向与初速度的方向相反。

把加速度公式(2.4)的等号两边各乘以时间 t 并移项, 就可以得到匀变速直线运动的末速度公式, 即

$$v_t = v_0 + at. \quad (2.5)$$

上式表明, 只要知道了初速度和加速度, 就可以把作匀变速直线运动的物体在经过任何一段时间后的末速度计算出来。

[例题 2.3] 自行车以 2 米/秒的初速度作匀加速直线运动, 如果加速度为 0.1 米/秒², 问半分钟后自行车的末速度有多大?

解: 已知初速度 $v_0 = 2$ 米/秒, 加速度 $a = 0.1$ 米/秒², 当时间 $t = 0.5$ 分 = 30 秒时, 自行车的末速度

$$v_t = v_0 + at = 2 + 0.1 \times 30 = 5 \text{ 米/秒}。$$

如果要问这辆自行车在这半分钟里通过的路程有几米, 显然不能按匀速直线运动的路程公式 $s = vt$ 来计算, 因为自行车在这半分钟里, 速度不是常量, 而是在不断增大。但是如果找出自行车在这段时间内的平均速度 \bar{v} , 那就可以按公式 $s = \bar{v}t$ 来计算。

根据匀变速直线运动的速度变化很均匀的特点, 我们可以简单地把匀变速直线运动的平均速度看作是它的初速度和末速度的算术平均值, 即

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v_t}{2}. \quad (2.6)$$

因此匀变速直线运动的路程

$$s = \bar{v}t = \left(\frac{v_0 + v_t}{2} \right) t. \quad (2.7)$$

再把上式中的末速度 v_t 用公式(2.5)代入, 可得

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

即

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2. \quad (2.8)$$

这就是匀变速直线运动的路程公式。运用它就可以找出 [例题 2.3] 中的自行车在半分钟里通过的路程

$$s = 2 \times 30 + \frac{1}{2} \times 0.1 \times (30)^2 = 105 \text{ 米}。$$

[例题 2.4] 飞机在起飞前先要从静止出发，沿着跑道匀变速直线滑行 20 秒以获得 80 米/秒的起飞速度。问这条跑道至少需要几米长？

解：这条跑道的长度至少应该等于飞机在跑道上所作的匀加速直线运动的路程。今已知 $v_0 = 0$, $v_t = 80$ 米/秒, $t = 20$ 秒, 如果运用路程公式 (2.8) 来计算, 必须首先找出飞机在跑道上的加速度 a , 不如运用公式 (2.7) 可以直接得出

$$s = \left(\frac{v_0 + v_t}{2} \right) t = \frac{0 + 80}{2} \cdot 20 = 800 \text{ 米}。$$

[例题 2.5] 正以 36 公里/时的速度正常行驶的汽车, 突然发现前方 30 米处有羊群通过公路。如果汽车刹停的过程是匀变速直线运动, 问至少需要多大的加速度? 需要多长时间?

解：由于还不了解汽车刹停的时间 t , 因此不能直接按公式 (2.4) 找出加速度。但根据公式 (2.7) 可以得到 s 、 v_t 、 v_0 和 t 的关系

$$s = \left(\frac{v_t + v_0}{2} \right) t$$

即

$$t = \frac{2s}{v_t + v_0}$$

代入公式 (2.4) 可以得出

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} = \frac{(v_t - v_0)(v_t + v_0)}{2s} = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s}。$$

今已知 $v_t = 0$ 、 $v_0 = 36$ 公里/时 $= 10$ 米/秒、 $s = 30$ 米，所需的加速度

$$a = \frac{0 - 10^2}{60} = -1.67 \text{ 米/秒}^2。$$

刹停所需的时间

$$t = \frac{v_t - v_0}{a} = \frac{0 - 10}{-1.67} = 6 \text{ 秒}。$$

从以上的解题过程中，可以得出匀变速直线运动的速度 v_0 、 v_t 与加速度 a 、路程 s 间的关系式

$$a = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s}，$$

即

$$v_t^2 - v_0^2 = 2as。 \quad (2.9)$$

三、自由落体运动

让铁块和石块同时从同一高度由静止开始自由下落，尽管它们的重量不同，但速度的变化情况相同，都是不断地均匀地增大，并且同时到达地面。这表明它们在下落过程中具有相同的加速度。

在只有重力作用下，或者说在真空中（在真空中没有摩擦阻力）的物体由静止开始下落的运动叫做自由落体运动。羽毛、棉花等物在空气中所受的空气阻力与它们的重力相比是很大的，因此下落得较慢，不能看作自由落体运动。铁块、石块等物在空气中虽然也受到空气阻力，但和它们各自的重力相比要小得多，可以忽略不计，因此它们在空气中自由下落的

运动可以近似地看作自由落体运动(图 2.6)。

实践和理论都证明:在同一地点,一切自由落体在运动中的加速度,大小和方向都相同,叫做重力加速度,通常用字母 g 表示。 g 的方向是沿着重力的方向铅直向下的,而 g 的大小随着地域的差别而略有不同。例如在赤道上 $g=9.78$ 米/秒²;在两极 $g=9.83$ 米/秒²;在首都北京地区 $g=9.8012$ 米/秒²;在纬度 45° 的海平面上 $g=9.80665$ 米/秒²。因此,在一般的计算中,可以近似地取 $g=9.8$ 米/秒²。

很明显,自由落体运动就是初速度 v_0 等于零、加速度 a 等于 g 的匀变速直线运动,因此前面提到的有关匀变速直线运动规律的公式对于自由落体运动都能适用。根据公式 (2.5) 可以列出落体在自由下落 t 秒后的末速度

$$v_t = gt, \quad (2.10)$$

根据公式 (2.8) 可以列出 t 秒后自由落体下落的高度(即路程)

$$h = \frac{1}{2} gt^2. \quad (2.11)$$

根据公式 (2.9) 可以列出自由落体在下落过程中速度与相应的下落高度之间的关系

$$v^2 = 2gh. \quad (2.12)$$

[例题 2.6] 为了测定一口井的深度,让一块石块从井口自由下落,在 2 秒后听到石块落水的声音,略去声音传播的时间,问井有多深?

解:井的深度可按石块 2 秒后下落的高度算出。即

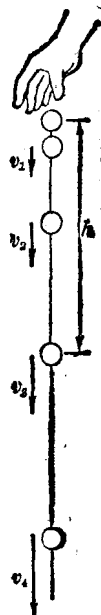


图 2.6 自由落体运动

$$h = \frac{1}{2} g t^2 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times 4 = 19.6 \text{ 米。}$$

[例题 2.7] 讯号枪弹以 100 米/秒的速度铅直向上射出, 在最初 2 秒内上升多高? 可能到达的最大高度有多少?

解: 讯号枪弹在铅直上升过程中, 由于重力加速度的方向与枪弹的初速度方向相反, 因此它的速度逐渐减小, 直到它的最高点时, 速度减小到零。这种运动叫做铅直上抛运动。它可以看作是初速度为 v_0 , 加速度为 $-g$ 的匀变速直线运动。因此 t 秒后讯号枪弹铅直上升的高度(即路程)可按匀变速直线运动公式(2.8)列出, 即

$$h = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2. \quad (2.13)$$

已知 $v_0 = 100$ 米/秒, $t = 2$ 秒, $g = 9.8$ 米/秒², 所以

$$h = 100 \times 2 - \frac{1}{2} \times 9.8 \times 4 = 180.4 \text{ 米。}$$

为了计算讯号枪弹可能到达的最大高度, 先根据公式(2.5)列出它 t 秒后的末速度公式

$$v_t = v_0 - g t. \quad (2.14)$$

由于讯号枪弹在到达它的最大高度时, v_t 已减小到零, 因此利用 $v_t = 0$ 的关系可从上式找出讯号枪弹到达最大高度的时间, 因为

$$v_t = v_0 - g t = 0,$$

即

$$t = \frac{v_0}{g}.$$

再把它代入公式(2.13)便可得出最大高度的公式

$$\begin{aligned} h_m &= v_0 \left(\frac{v_0}{g} \right) - \frac{1}{2} g \left(\frac{v_0}{g} \right)^2 \\ &= \frac{v_0^2}{g} - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_0^2}{g} \end{aligned}$$

即

$$h_m = \frac{v_0^2}{2g} \quad (2.15)$$

因此讯号枪弹可能到达的最大高度

$$h_m = \frac{100^2}{2 \times 9.8} = 510.2 \text{ 米}。$$

在铅直上抛物体到达它的最高点之后，物体就转而开始作自由落体运动。

习题 2.3 声音在温度为 20°C 的空气中的传播速度是 344 米/秒，如果在看见电闪以后隔 7 秒时间才听到雷声（假定闪光的传播时间可以忽略不计），问雷响处与观察处的直线距离有多远？

习题 2.4 汽车起动后，每隔 10 秒时间观察一次车离出发点的距离。连续观察三次的结果是：20 米、70 米、190 米，问这 30 秒、后 20 秒和最后 10 秒内汽车的平均速度各是多大？在这几个平均速度中哪一个最接近于汽车在 30 秒末的速度？

习题 2.5 汽车在向东有个速度时，是否可能同时向西有个加速度？汽车的加速度等于零时，它的速度也一定等于零吗？

习题 2.6 汽车的速度在 1 分 20 秒内从 3.6 公里/时增大到 32.4 公里/时，如果这个加速过程是匀变速直线运动过程，求在这段时间内汽车的加速度和所通过的路程。

习题 2.7 利用图 2.4 的自动仪器，已经测得枪弹的出膛速度为 865 米/秒，如果枪膛长 67.5 厘米，按匀变速直线运动的规律计算枪弹在枪膛内的加速度和运动时间。

习题 2.8 假设飞机降落时的着地速度为 60 米/秒，如果机上的制动装置所能产生的最大制动加速度为 -3 米/秒^2 ，问机场跑道至少需要多长？

习题 2.9 证明如果不考虑空气阻力，铅直上抛物体到达它的最高点所用的时间就等于它从最高点自由落回原地所用的时间。

第三节 匀速圆周运动

一、曲线运动的位移和速度

在直线运动中,物体位移、速度的大小虽然可以改变,然而它们的方向却始终沿着一直线,不是向前就是往后。曲线运动是物体沿着曲线轨道进行的运动。在曲线运动中,不仅物

体的位移、速度的大小可以改变,而且它们的方向也在不断地改变着。

我们已经知道物体位移的方向是从起点指向终点的,图 2.7 所示就是从 O 点出发作曲线运动的物体在各点的位移。那么在作曲线运动的过程中,物体速度的方向又是怎样的呢?例如,在旋转

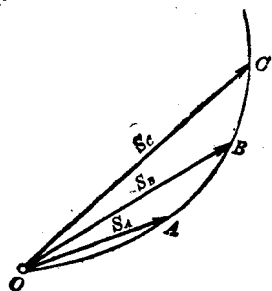
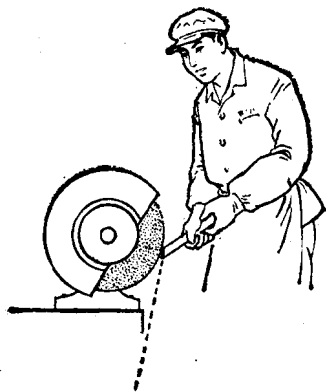
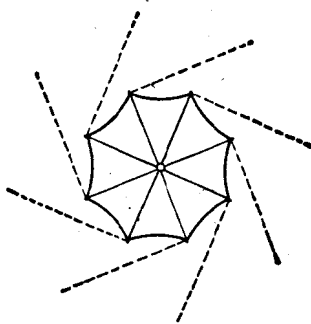


图 2.7 作曲线运动的物体的位移



(a) 从砂轮上溅出的火星



(b) 从雨伞边缘溅出的水滴

图 2.8 曲线运动的速度的方向

的砂轮上磨刀时,从砂轮边缘上射出的火星总是沿着砂轮的切线方向飞溅出来的(图 2.8a)。由于这些火星就是在磨刀时从刀上擦落下来的炽热的钢屑,因此火星飞溅的方向就表示砂轮边缘上与钢刀接触点速度的方向。又如下雨天把淋着雨的伞绕着伞柄旋转一下,也可以看到水滴从伞的边缘各点沿着由各点构成的圆周的切线方向飞出(图 2.8b)。这些现象都表明:在曲线运动中,物体速度的方向是在不断改变。它在每一点的速度的方向就是这一点在曲线上的切线方向(图 2.9)。

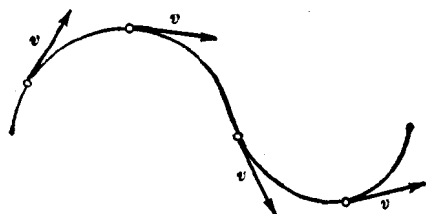


图 2.9 曲线运动中各点速度的方向就在它的切线方向上

二、匀速圆周运动的加速度

在直线运动中,物体加速度的方向总是和它的速度方向一致或者相反的,因此加速度的存在只能影响速度的大小,而不能改变速度的方向,即不能使物体偏离直线。在曲线运动中情况就不同,物体加速度的方向和它的速度方向并不在一直线上。这样的加速度不仅能影响物体速度的大小,而且还能改变物体速度的方向。

我们知道,匀速运动是路程与时间成正比的运动,因而在圆周轨道上进行的匀速运动叫做匀速圆周运动。物体在作匀速圆周运动时,虽然速度的大小是不变的,但是速度的方向却在不断变化。因此匀速圆周运动的加速度就是并不影响速度

的大小而只改变速度方向的加速度。

假设一物体在半径为 r 的圆周上作匀速运动。它以大

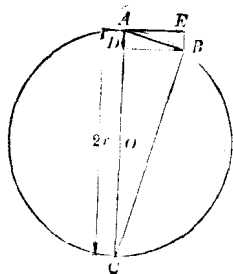


图 2.10 作匀速圆周运动的物体

小不变的速度 v 经过极短的时间 Δt 从 A 点运动到 B 点 (图 2.10)。由于时间 Δt 极小, 因此弦 \overline{AB} 和弧 \widehat{AB} 完全可以看成是重合的 (图上只是为了说明问题特地把 AB 两点距离画得较大), 即 $AB = v \cdot \Delta t$ 。

曲线运动的速度方向是沿切线方向的。如果没有加速度的作用, 物体将沿着速度 v 的方向经过时间

Δt 从 A 点到达 E 点。因此我们可以把物体经过时间 Δt 的位移 AB 看成是由两个分位移 AE 和 AD 合成的。其中分位移 AE 是速度 v 产生的, 即 $AE = v \cdot \Delta t$; 而分位移 AD 是匀速圆周运动在这一点 A 上的加速度产生的。假设这个加速度为 a_n , 于是根据在 AD 方向上初速度等于 0 的条件按匀变速直线运动的规律可以列出 $AD = \frac{1}{2} a_n (\Delta t)^2$ 。

为了找出加速度 a_n 的大小, 可以利用相似三角形的性质。先延长半径 AO 为直径 AC , 再联接 BC , 从图上可以看出直角三角形 ACB 和直角三角形 ABD 相似。于是可以列出

$$AD:AB = AB:AC,$$

即

$$AB^2 = AD \cdot AC,$$

前面已知 $AB = v \cdot \Delta t$, $AD = \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$, $AC = 2r$,

* Δ 是希腊字母, 读作“dai-er-ta”。 Δt 读作“dai-er-ta-t”, 表示时间间隔 (或称作时间的增量)。

代入得

$$v^2(\Delta t)^2 = \frac{1}{2} a_n(\Delta t)^2 \cdot 2r,$$

所以

$$a_n = \frac{v^2}{r}. \quad (2.16)$$

这就是匀速圆周运动的加速度公式。这个加速度的大小与速度的平方成正比，而与圆周的半径成反比；它的方向总是与速度方向垂直，而始终指向圆心（图 2.11）。因此我们把它叫做**向心加速度**，通常用字母 a_n 表示。向心加速度只改变速度的方向，不改变速度的大小。

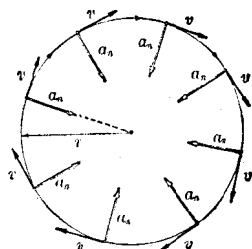


图 2.11 向心加速度的方向

【例题 2.8】一火车在用 36 公里/时的速度沿着半径为 200 米的圆弧形铁轨转弯时，问它的向心加速度有多大？

解：火车在转弯时如果速度的大小不变，可以看成是在作匀速圆周运动。今已知 $v = 36$ 公里/时 $= 10$ 米/秒， $r = 200$ 米，根据公式 (2.16)，向心加速度

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{10^2}{200} = 0.5 \text{ 米/秒}^2,$$

方向指向圆弧中心。

三、平抛运动

前面我们在分析物体作匀速圆周运动的位移时，是把它分解成两个互相垂直的分位移来讨论的（不仅位移可以这样分解，速度也可以这样分解，因为位移、速度、加速度和力一样

都是矢量,它们的合成与分解都符合于平行四边形法则)。这种分析方法就叫做运动的分解。一个物体可以同时参与两个独立的分运动,其效果就和一个合运动一样;反过来,一个合运动的效果也和两个分运动的共同效果一样。这是机械运动的一个重要性质,叫做运动迭加原理。例如工厂车间里的行车,在起吊重物的过程中,有时一面卷起钢丝绳,使重物向上运动,一面又驱动滑车在横梁上滑动,使重物向前运动(图 2.12)。这样,重物的实际位移就是它向上的分位移 S_y 和它向前的分位移 S_x 的合位移 S ,即重物是沿着斜线被吊起的。如果两个分运动都是匀速直线运动,那么重物的实际速度就是两个分速度的合速度。

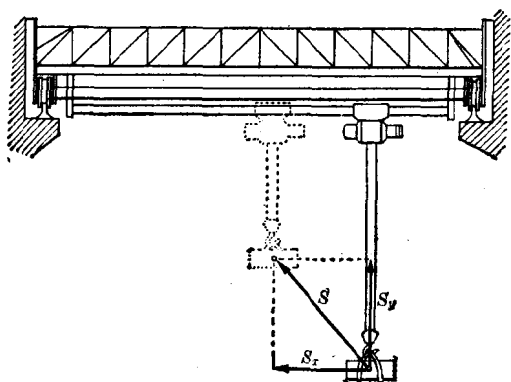


图 2.12 运动的迭加

实际上有些曲线运动也可以看成是由两个比较简单的直线运动合成的。下面我们就用运动的分解的方法来分析平抛运动。

例如我们在秧田里撒播谷种时,由水平方向抛出的谷种的运动;民兵在实弹演习时,由水平方向射出的枪弹的运动等

等,如果忽略空气阻力,都可以近似地看成平抛运动。

平抛运动的性质可用图 2.13 的仪器演示出来。在支架上端装有一块带圆孔的木板,板上放 A 、 B 两个小球,小球间的弹簧片 P 夹住圆孔上的小球 A ,使它不能下落。实验时,用小槌顺着箭头方向打击弹簧片,小球 A 因失去支持而通过圆孔作自由落体运动,同时弹簧片又使小球 B 水平弹出,开始作平抛运动。实验结果表明:(1)不管这两个小球离地面多高,也不管小球 B 的水平初速度有多大,它们总是同时落地的。可见平抛运动在铅直

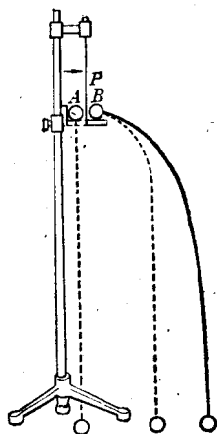


图 2.13 平抛运动的性质

方向上的分运动是自由落体运动。(2)两小球落地点之间的距离是和小球 B 的水平初速度成正比的。初速度越大,小球 B 落得越远。可见平抛运动在水平方向上的分运动是匀速直线运动。

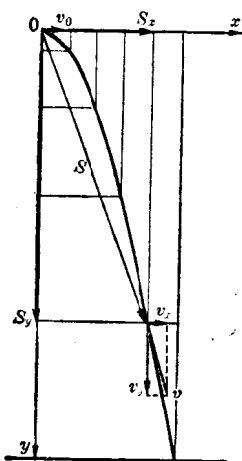


图 2.14 平抛物体在抛出 t 秒后的速度和位移

假设平抛物体的水平初速度为 v_0 (图 2.14), 根据匀速直线运动和自由落体运动的规律可以列出平抛物体从原点抛出 t 秒后的

$$\text{水平分速度 } v_x = v_0, \quad (2.17)$$

$$\text{铅直分速度 } v_y = gt. \quad (2.18)$$

所以根据运动迭加原理, 平抛物体在 t 秒后的合速度

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}. \quad (2.19)$$

同时也可以列出平抛物体在 t 秒后的

$$\text{水平分位移 } S_x = v_0 t, \quad (2.20)$$

$$\text{铅直分位移 } S_y = \frac{1}{2} g t^2, \quad (2.21)$$

所以平抛物体在 t 秒后的合位移

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} = \sqrt{v_0^2 t^2 + \frac{1}{4} g^2 t^4}. \quad (2.22)$$

消去分位移公式 (2.20)、(2.21) 中的时间 t , 可以得出平抛运动的轨道方程

$$y = \frac{g}{2v_0^2} x^2. \quad (2.23)$$

式中的 x 、 y 依次是平抛物体在某一时刻的水平位移和铅直位移, 也可以看成是曲线轨道上任何一点的 x 坐标和 y 坐标。从方程 (2.23) 可知, 平抛运动的轨道是一根抛物线。

〔例题 2.9〕 飞机在 1200 米的高空以 50 米/秒的速度沿水平方向飞行时, 要向地面上某一目标空投物资。问需要在到达目标上空前几秒就开始将物资投出? 这时离目标的水平距离有多大?

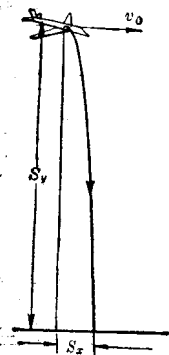


图 2.15

解: 因为物资离开飞机时的初速度 v_0 就等于当时飞机的速度, 即 $v_0 = 50$ 米/秒 (方向水平), 所以物资被空投到地面目标的运动是平抛运动 (图 2.15)。假设物资空投到地面目标的时间为 t 秒, 从它的铅直分位移 $S_y = 1200$ 米, 可按公式 (2.21) 列出

$$S_y = \frac{1}{2} g t^2 = 1200,$$

所以
$$t = \sqrt{\frac{2400}{9.8}} \approx 15.6 \text{ 秒},$$

而水平分位移 $S_x = v_0 t = 50 \times 15.6 = 780$ 米。

可见飞机在到达目标上空前 15.6 秒就要将物资投出, 这时离目标的水平距离等于 780 米。

习题 2.10 某人用 4 米/秒的速度在半径为 50 米的圆周上溜马, 求它的向心加速度。

习题 2.11 在横渡长江的游泳比赛中, 某人以 12 分钟的成绩获得了第一名。假设比赛地区长江宽度为 2500 米, 水流速度为 1.2 米/秒, 求他在游泳时的实际位移有多大?

(提示: 他游泳时的实际位移是由他横渡长江的位移和水流引起的位移合成的。)

习题 2.12 从 196 米高处水平发射一子弹, 已经测得子弹落地处离发射处的水平距离为 4 公里。求子弹的初速度。

第四节 物体的平动和转动

一、物体的平动

物体在运动时, 它的各部分的运动状态并不一定相同。拖拉机在前进时, 整个机座是在作向前的直线运动; 同时车轮包括轮胎上各点又都在作圆周运动; 其他传动零件的运动就更为复杂。为了便于分析物体各部分的运动, 通常把物体的运动简化为平动和转动两大类。

斜面上的木块在下滑过程中, 在任何时刻木块上各点运动的速度、位移都相同。象这种物体上各点的运动状态都相同的运动叫做物体的平动。例如河上行船的运动, 陆上各种车辆的运动, 如果不考虑它们内部机件的运动, 都可以看作是平动。

在分析物体的平动时, 只要讨论物体上任何一点的运动

情况就够了，因为任何一点的运动状态都能代表整个物体的运动状态。

二、物体的转动

仔细观察车轮的运动，情况就与平动不同。车轮上各点的运动状态各不相同，它们都在绕一固定直线旋转，而作半径并不完全相同的圆周运动。象这种物体上各点都在绕一固定直线旋转的运动叫做物体的转动，而这一固定直线就叫做物体的转轴。例如拖拉机变速箱里的齿轮、脱粒机的滚筒、纺车以及钟表上指针的运动都是转动。

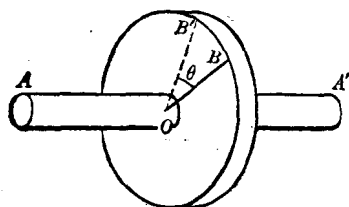


图 2.16 转动的飞轮

在分析物体的转动时，首先要找出它的转轴，然后再来确定它转动的状态。掌握了物体的转轴和转动状态以后，就可以找出物体上各点的运动状态。

怎样来确定物体的转动状态呢？图 2.16 所示就是一个绕转轴 AA' 转动的飞轮。飞轮上的 O 点由于是在转轴上，因而可以看作是静止不动的转动中心。可以设想飞轮在转动时，面上各点都在作以 O 为圆心的圆周运动。要确定飞轮的转动状态，只要观察任何一条由 O 点出发的转动半径（如 OB ）的转动情况就可以了。物体在转动过程中，任何一条转动半径所转过的角（如 $\angle B'OB$ ）叫做转角，用字母 θ 表示，就相当于物体转动的位移，因此又叫做角位移。

关于角位移的单位，通常用角的弧度单位制表示。一个单位弧度就是长度等于半径的圆弧所对应的中心角的大小（图 2.17 a）。圆弧长度是半径的多少倍，它所对应的中心角

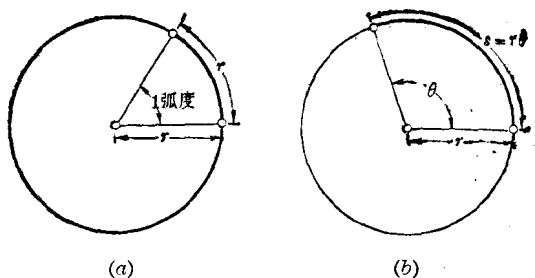


图 2.17 弧度和弧长公式的意义

就等于多少弧度。假设圆弧的长度为 s , 半径为 r , 那么根据弧度的含义可以列出弧长公式

$$s = r\theta, \quad (2.24)$$

式中 θ 就是中心角的弧度数(图 2.17 b), 而弧长 s 与半径 r 的单位是一致的。所以弧度数实际上就是弧长与半径的比值。由于半径为 r 的圆周长为 $2\pi r$, 因此 1 周角 $= 2\pi$ 弧度 $= 360^\circ$ 。于是可以列出角度与弧度的换算关系如下:

$$1 \text{ 弧度} = \frac{180^\circ}{\pi} \doteq 57.3^\circ;$$

$$1^\circ = \left(\frac{\pi}{180}\right) \text{ 弧度} \doteq 0.01745 \text{ 弧度}.$$

一般说来, 各种机器运转的快慢都是比较均匀的, 即在任, 何相等的时间内角位移都相等, 这种转动叫做**匀速转动**。就象匀速直线运动一样, 在匀速转动中, 物体的角位移和它转动的**时间成正比**。通常把物体在单位时间内转动的角位移叫做**转动物体的角速度**, 用字母 ω^* 表示, 即

$$\omega = \frac{\theta}{t}, \quad (2.25)$$

单位是弧度/秒。角速度反映了物体转动的快慢程度。此外,

* ω 是希腊字母, 读作 “o-mi-ga”。

在生产技术上还有用转速来表示物体转动快慢的。所谓转速就是物体每分钟转过的圈数,用字母 n 表示,单位是转/分。根据 $1 \text{ 周角} = 2\pi$ 弧度的关系很容易推导出角速度与转速之间的关系

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}。 \quad (2.26)$$

各种类型的发动机,如电动机、拖拉机的柴油发动机等都有一个额定的转速,表示它在规定的负载下的正常转速。至于在不同的负载下,发动机的实际转速会有所变化。

掌握了物体的转轴和转速(或角速度),就可以把物体上各点的速度找出来。为了区别于角速度,有时把一点沿曲线或圆弧运动的速度叫做线速度,用字母 v 表示。

当物体在作角速度为 ω 的匀速转动时,物体上各点都在

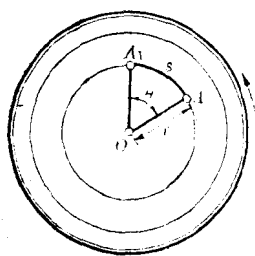


图 2.18 匀速转动的物体

作以轴心 O 为圆心的匀速圆周运动(图 2.18)。考虑物体上距离轴心 O 为 r 的一点 A , 假设物体在时间间隔 t 内转过的角位移为 θ , 同时点 A 转过一段圆弧 s 到达 A_1 位置。根据公式(2.24)、(2.25)可以列出点 A 的线速度

$$v = \frac{s}{t} = \frac{r\theta}{t} = r\omega。 \quad (2.27)$$

上式表明,在同一转动物体上,距轴心越远的点,线速度也越大。如果物体的转速为 n , 那么

$$v = r\omega = \frac{2\pi rn}{60} = \frac{\pi rn}{30}。 \quad (2.28)$$

[例题 2.10] 离心式水泵机轴的转速为 1450 转/分,轴上安装着直径为 225 毫米的叶轮,求叶轮的角速度和边缘上

一点的线速度。

解：由于叶轮与机轴的转速相同，因此叶轮的角速度

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{1450\pi}{30} \doteq 152 \text{ 弧度/秒。}$$

而叶轮边缘上一点距轴心 $r = \frac{0.225}{2}$ 米，因此它的线速度

$$v = \omega r = 152 \times \frac{0.225}{2} \doteq 17.1 \text{ 米/秒。}$$

平动和转动是物体的两种最基本的运动，其他较复杂的运动往往可以看作是由平动和转动组合而成的。例如车辆在行驶时车轮的运动，一方面随轴作平动；另一方面又绕轴作转动。又如地球在太阳系里的运动也可以看作是由平动和转动组合而成的，它一方面绕着地轴转动，叫做地球的自转；另一方面又随着地轴作平动，即地球上所有各点都在围绕太阳作近似的圆周运动，叫做公转。

习题 2.13 机车动轮的直径为 1050 毫米，如果列车的速度为 36 公里/时，求动轮的转速。

习题 2.14 当车刀在以 2 米/秒的速度切削直径为 80 毫米的工件时，求工件的转速。

第五节 运动定律

前面提到的位移、速度、加速度等物理量都是用来反映物体的运动状态及其变化情况的。然而物体的运动状态在什么情况下才保持不变，在什么情况下就发生改变呢？“和形而上学的宇宙观相反，唯物辩证法的宇宙观主张从事物的内部、从一事物对他事物的关系去研究事物的发展”。因此关于物体运动状态变化的问题也必须从内部，即从物体本身的性质上

去找根据；从外部，即从物体与其他物体的相互作用上去找条件。

一、惯性定律

停在路旁的劳动车，没有人去推动它，自己不会动起来；只有在人的推动下，或者在其他物体的作用下才会改变原来的静止状态。挂在墙上的书包，没有其他物体对它作用，也不会自动改变原来的静止状态。任何静止的物体，在没有另外的物体作用下，总是保持相对静止而不改变运动状态的。行驶着的汽车，在突然切断动力后并不立即停止，仍要保持原有的运动状态，继续向前滑行。但在地面摩擦力的作用下，汽车总会逐渐停下来。路面越光滑，摩擦力越小，汽车滑行的距离就越长。可以设想，如果汽车的驱动力恰好与地面的摩擦力以及空气阻力相平衡，汽车就保持原来的运动状态（速度不变）而作匀速直线运动。由此可见，任何运动的物体，如果没有另外的物体影响它，它的运动状态就保持不变；如果受到另外物体的作用，它的运动状态就会发生改变。

物体所受其他物体的作用力叫做外力。任何物体都不能离开周围物体的作用而孤立存在；不受任何外力作用的物体是不存在的。因此在一般情况下，物体总是在外力作用下经常改变它的运动状态，即作变速运动。但如果有几个外力同时作用，并且相互平衡，也就是说，外力的合力（合外力）等于零，这时物体的运动状态也可以暂时地保持不变。例如静止在地面上的物体，同时受到地球对它的重力和地面对它的支持力而相互平衡，因而保持相对静止。

归纳起来，可以得到如下的结论：如果作用在物体上的合外力等于零，满足了平衡条件，物体就保持相对静止或沿直线作匀速运动。这就是惯性定律，又叫做牛顿第一定律。

二、物体惯性的量度

站在卡车上的人在卡车突然启动时容易往后倒。卡车启动得越猛，人就往后倒得越厉害。因为卡车启动时，人的下半身随着卡车改变了运动状态，而上半身仍旧保持着原来的静止状态，结果整个身体就往后倒。

物体能保持原来运动状态的性质叫做物体的惯性。无论是在外力等于零，还是在外力不等于零的情况下，任何物体的惯性总是存在的。但不同物体的惯性可以不同。人们对物体惯性大小的认识，是通过改变物体运动状态的难易程度不同而得到的。例如，一辆空的劳动车，只要用力一推，即可推动，表示要改变它原来的静止状态较易，我们就说它的惯性较小；而一辆满载重物的拖拉机，要好几个人才能推动，表示要改变它原来的静止状态较难，我们就说它的惯性较大。因此我们可以用物体所含物质的多少来量度物体惯性的大小。惯性反映了物体保持原来运动状态的性质，标志出物体改变运动状态的难易程度。

表示物体所含物质多少的物理量叫做物体的质量，通常用字母 m 表示。物体的质量只有大小，没有方向，因而它是一种标量。质量的标准单位* 是公斤（千克），其他常用单位是吨、克等，其换算关系是

$$1 \text{ 吨} = 10^3 \text{ 公斤} = 10^6 \text{ 克} = 10^9 \text{ 毫克}。$$

因为地球对物体的吸引力的大小主要是由物体质量的多少决定的，并且在同一地点，物体的重量是与它的质量成正比的，

* 质量的标准单位是保存在法国巴黎附近国际权度局中的一个特制的铂铱合金圆柱体，它的质量叫做 1 公斤。各国都有精确的复制品。

所以通常可以用物体的重量来量度它的质量。一般说来，物体的重量是多少公斤，它的质量也就等于多少公斤。实际上我们就是这样规定力的实用单位的。然而质量虽然可以同重量具有相同的单位，但是它们在本质上是两个完全不同的物理量。

总之，物体的惯性是用物体的质量来量度的。质量较大的物体，惯性也较大。

惯性在生产技术上应用很广。例如用来扬谷的风谷机就是利用实谷粒和瘪谷在质量上的差别，即惯性的大小来进行分离的。图 2.19 就是一种较新式的风谷机，谷粒被送入喂料斗后就落在传送带上，由圆柱形的压辊压紧，使它们粘附在传送带上，同时给它一个相当大的初速度斜抛出去。实谷粒相对于瘪谷和草说来，由于质量较大而惯性较大，因而射程较远；瘪谷和草由于质量较小而惯性较小，在空气阻力的作用下射程较近，于是就从谷粒中分离出来。此外，我们在深耕时常利用铁耢（铁耙）下落时的惯性使它深入土内；在挑担走路时利用重物的惯性，使扁担有节奏地振动，要比扁担一直压在肩上省力些。

此外，惯性还有不利的一面。例如正是由于惯性，飞跑的

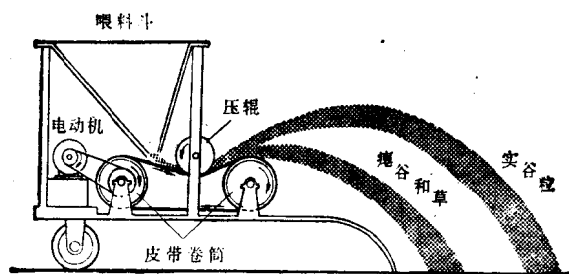


图 2.19 风谷机

汽车不能立即刹停，有时会造成事故。因此各种车辆在行驶中必须限制车速，前后两车之间必须保持适当的车距。

三、力、质量和加速度的关系

通常我们都有这样的经验：一辆停着的小车，如果拉力用得小就起动得慢；如果猛力一拉就起动得快。这表明物体运动的加速度和它所受的外力有关。对于同一物体说来，外力越大，物体运动的加速度也越大。大量的实验结果进一步表明：对于质量一定的物体说来，它运动的加速度与它所受的外力成正比，外力的方向就是加速度的方向。如果我们用同样的拉力分别去拉动两辆载重不同的小车，结果载重量大的起动得慢，而载重量小的起动得快。这表明物体运动的加速度和它的质量也有关系。在同样的外力作用下，物体的质量越大，它运动的加速度就越小。大量的实验结果进一步表明：在同样的外力作用下，物体运动的加速度与它的质量成反比。

把上述从大量实验事实中得出的两点结论再归纳起来，就可以总结出一条关于机械运动的基本规律：物体运动的加速度与它所受的外力成正比，而与它的质量成反比；加速度的方向就与外力的方向相同。这就是力、质量和加速度的关系，又叫做牛顿第二运动定律。如果用 a 表示物体运动的加速度， F 表示物体所受的外力， m 表示物体的质量，同时选择合适的单位，那么根据上述关系可以列出

$$a = \frac{F}{m}$$

或者

$$F = ma, \quad (2.29)$$

这就是运动定律公式。

一般说来，上式中的外力 F 是指物体所受的合外力。对于作平面运动的物体，根据运动的迭加原理，可以把上式改写成两个分量式，即

$$F_x = ma_x, \quad (2.30a)$$

$$F_y = ma_y, \quad (2.30b)$$

式中 F_x 、 a_x 、 F_y 、 a_y 分别表示物体在 x 轴和 y 轴方向上所受的分外力和分加速度。

这一定律虽然是从无数实验事实中归纳出来的客观规律，但是形而上学和机械唯物论者却利用它把力说成是产生运动的起因，从而导致一系列荒谬的结论，胡说什么“神最先推动了行星，使它们环绕着太阳运行。”

毛主席教导我们：“唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用。”可见外力作用只是引起物体运动状态发生变化的外因，即引起物体运动加速度的条件；而物体的惯性，即物体的质量才是物体运动状态发生改变、具有运动加速度的内因。在前述的风谷机的例子中，外力（空气阻力）虽然相同，但物体（实谷粒和瘪谷）的惯性即质量不同，运动状态改变就不同。这就说明物体在改变其运动状态时，外因是通过内因而起作用的。

列宁教导我们：“任何真理，如果把它说得‘过火’……，加以夸大，把它运用到实际所能应用的范围以外去，便可以弄到荒谬绝伦的地步，……。”近代科学研究进一步表明：运动定律只能适用于低速的宏观物体，对于运动速度接近光速（ 3×10^8 米/秒）的物体，它就不再适用了。因此运动定律不能无限推广，更不能用来说明运动的起源。

四、质量和重量的区别和联系

掌握了力、质量和加速度的关系之后,对质量和重量的区别和联系就更加清楚了。归纳起来,它们的本质区别是:

(1) 质量反映了物体所含物质的多少,是物体本身所具有的重要属性之一,是对物体惯性的量度。重量是指地球对物体的重力的大小。

(2) 在一般情况下,物体的质量是个常量;而物体的重量并不是一个常量,随着物体所在地点的不同以及离海平面高度的不同而有所改变。

(3) 质量是标量,没有方向性;重量是矢量,它的方向近似地指向地球中心,是铅直向下的。

然而物体的质量和它的重量有着密切联系。假设物体的质量为 m , 它在重力 P 的作用下作自由落体运动。这时它运动的加速度就是重力加速度 g 。因此根据运动定律公式可以列出

$$P = mg. \quad (2.31)$$

上式反映了物体的重量和质量的正比关系。在同一地点,由于重力加速度是一定的,因此重量相等的物体,质量也相等。图 2.20 是用来测定物体质量的天平,就是通过比较物体的重量来比较物体的质量的。当天平平衡时,两边的重量相等,因而可以确定左盘中待测物体的质量就等于右盘中砝码的质量。

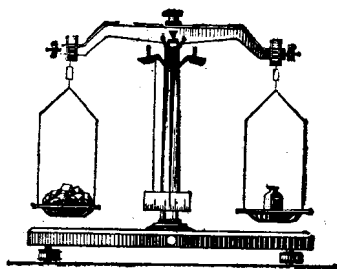


图 2.20 天平

物体的质量与它的体积之比叫做构成这种物体的物质的密度,用字母 ρ^* 表示; 物体的重量与它的体积之比叫做构成这种物体的物质的比重,用字母 d 表示。于是可以列出

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.32)$$

$$d = \frac{P}{V}, \quad (2.33)$$

把以上两式代入公式 (2.31), 可得比重与密度的关系式

$$d = g\rho. \quad (2.34)$$

由于重量和质量的单位相同, 因此比重和密度也具有相同的单位, 都是克/厘米³ 或吨/米³。对于同一种物质说来, 它的比重和密度在数值上也相同。表 2.3 列出了几种常见物质的密度与比重表。

表 2.3 几种常见物质的密度与比重表 (单位: 克/厘米³、吨/米³)

金	19.3	岩石	2.7~3.2	水银	13.6
铅	11.3	硅	2.4	硫酸	1.84
银	10.5	砖	1.4~2.2	甘油	1.26
铜	8.9	玻璃	2.4~2.8	海水	1.03
黄铜	8.5	有机玻璃	1.2~1.5	纯水(4°C)	1
铁、钢	7.8	冰	0.9	汽油	0.70
锌	7.1	木材	0.4~0.8	煤油	0.8
铝	2.7	软木	0.22~0.26	酒精	0.79

在运用运动定律公式解决实际问题时, 对于公式中的各个量都必须采用绝对单位制。在力学中常用的绝对单位制有米公斤秒制和厘米克秒制两种:

* ρ 是希腊字母, 读作“rho”

(1) 米公斤秒制

选用米、公斤、秒作为三个基本物理量长度、质量和时间的单位。由这些基本单位就可以导出其他物理量的单位。例如速度的单位是米/秒、加速度的单位是米/秒²。由这些单位根据运动定律公式导出的力的绝对单位叫做牛顿。即

$$F = m \times a,$$

$$1 \text{ 牛顿} = 1 \text{ 公斤} \times 1 \text{ 米/秒}^2,$$

表明质量为 1 公斤的物体在 1 牛顿的力的作用下具有 1 米/秒²的加速度。

(2) 厘米克秒制

选用厘米、克、秒作为长度、质量、时间的单位。由这些基本单位导出的加速度单位是厘米/秒²。由它们导出的力的绝对单位叫做达因。即

$$F = m \times a,$$

$$1 \text{ 达因} = 1 \text{ 克} \times 1 \text{ 厘米/秒}^2,$$

表明质量为 1 克的物体在 1 达因的力的作用下具有 1 厘米/秒²的加速度。由于 1 公斤 = 1000 克, 1 米/秒² = 100 厘米/秒², 因此

$$1 \text{ 牛顿} = 100000 \text{ 达因}.$$

表 2.4 列出了两种绝对单位制中各量的单位。

表 2.4 两种绝对单位制

单位制	长度	质量	时间	速度	加速度	力
米公斤秒制	米	公斤	秒	米/秒	米/秒 ²	牛 顿
厘米克秒制	厘米	克	秒	厘米/秒	厘米/秒 ²	达 因

在代公式时要注意到各个量的单位必须属于同一单位制, 否则就要出错。

那么力的绝对单位与实用单位如何换算呢？由于质量为 1 公斤的物体，它的重量就等于 1 公斤，因此按公式 $P=mg$ 即可计算出当质量 m 为 1 公斤时，若采用米公斤秒制

$$P=mg=1 \text{ 公斤} \times 9.8 \text{ 米/秒}^2=9.8 \text{ 牛顿},$$

若采用厘米克秒制

$$P=mg=1000 \text{ 克} \times 980 \text{ 厘米/秒}^2=980000 \text{ 达因},$$

可见力的实用单位与绝对单位的换算关系为

$$1 \text{ 公斤}=9.8 \text{ 牛顿}=980000 \text{ 达因}.$$

[例题 2.11] 质量为 10 公斤的物体放在光滑的水平桌

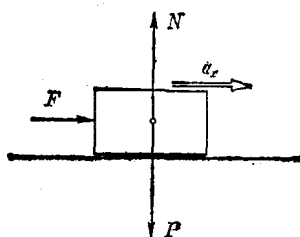


图 2.21

面上(图 2.21)。如果用 5 公斤的水平力去推动它，问它运动的加速度有多大？方向如何？

解：首先分析物体的受力情况，在不考虑摩擦力的情况下，物体受到重力 P 、桌面支持力和水平推力 F 等三个力的作用。在铅

直方向上， P 与 N 相互平衡，合力 $F_y=0$ ，因此可以列出

$$F_y=N-P=ma_y=0,$$

即 $a_y=0$ ，表示铅直方向上没有加速度。

在水平方向上可以列出

$$F_x=F=ma_x.$$

今采用米公斤秒制，已知 $m=10$ 公斤，水平力

$$F=5 \text{ 公斤}=49 \text{ 牛顿} \quad (\text{必须换算成绝对单位}),$$

$$\text{所以} \quad a_x=\frac{F}{m}=\frac{49}{10}=4.9 \text{ 米/秒}^2 \text{ (方向与水平力 } F \text{ 相同)}.$$

[例题 2.12] 总重为 7.5 吨的交通牌载重汽车由静止起开上一山坡。山坡坡度为 0.02 (即每前进 100 米上升 2 米)。

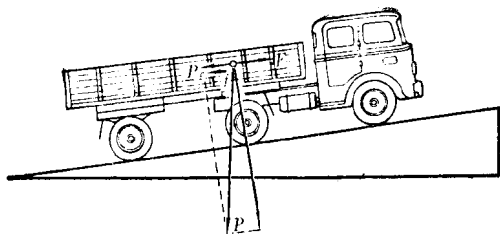


图 2.22

在行驶 200 米后，汽车速度增大到 36 公里/时。如果摩擦阻力是车重的 0.03 倍，问汽车在上坡时的平均牵引力有多大？

解：象这一类关于直线运动的问题，只要分析上坡汽车在运动方向上的受力情况就可以了，因为在其他方向上并不存在加速度。从图 2.22 可知汽车在运动方向上共受到汽车的平均牵引力 F 、摩擦阻力 f 以及汽车重力在运动方向上的分力 P_x 等三个力的作用。于是可按运动定律公式 (2.29) 列出

$$F - f - P_x = ma,$$

式中 a 就是汽车在上坡过程中的加速度。再根据公式 (2.9) 即可列出

$$F - f - P_x = m \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s}.$$

今已知 阻力 $f = 0.03 P = 0.03 \times 7500 \times 9.8$ 牛顿，

重力分力 $P_x = 0.02 P = 0.02 \times 7500 \times 9.8$ 牛顿，

汽车质量 $m = 7.5$ 吨 $= 7500$ 公斤，

汽车初速度 $v_0 = 0$ ，末速度 $v_t = 36$ 公里/时 $= 10$ 米/秒，

路程 $s = 200$ 米。

代入得

$$F - (0.03 + 0.02) \times 7500 \times 9.8 = 7500 \times \frac{10^2}{400},$$

所以平均牵引力 $F = 5550$ 牛顿 $= 566$ 公斤。

从上述例题的解题过程可以看出，在运用运动定律公式

解决实际问题时,一般可按下面六个步骤进行:

- (1) 确定所要考虑的运动物体作为研究对象。
- (2) 分析运动物体的受力情况。对于作直线运动的物体,只要考虑它在运动方向上的受力情况即可。
- (3) 分析运动物体的质量和加速度。
- (4) 根据运动定律公式,列出包含未知量的方程。
- (5) 将已知量代入方程,同时要注意到各量的单位是否属于同一单位制,然后解出要找的未知量。
- (6) 检验解答是否正确、合理。

习题 2.15 人从正在开动的汽车上跳下来为什么容易发生危险?

习题 2.16 试用物体的惯性分析手摇风谷机(图 2.23)的工作原理。

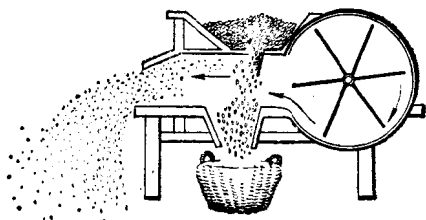


图 2.23 手摇风谷机

习题 2.17 有人说:“整块砖的质量比半块砖的大,所受的重力也大,因此加速度也大,在同一高度自由下落时应该比半块砖先落地”。这句话错在哪里?

习题 2.18 (1)在几个力作用下的运动物体是否一定具有加速度?
(2) 物体运动的方向和它所受合外力的方向总是一致吗?
(3) 物体运动速度很大时,是否表明作用在它上面的合外力也一定很大?

(4) 物体在作匀速运动时,它所受的合外力是否一定为零?

习题 2.19 要使质量为 2 吨的物体获得 5 米/秒^2 的加速度,需要几吨外力?

习题 2.20 载重卡车总重量为 10 吨, 在平地上起动, 5 秒后速度均匀增大到 32.4 公里/时。求它在起动中所受的合外力。

习题 2.21 质量为 10 克的子弹的出膛速度为 880 米/秒。如果枪筒长 55 厘米, 求火药的平均推动力。

习题 2.22 起重机在起吊时, 以 0.5 米/秒^2 的加速度将 1 吨重物从地面吊起, 问吊钩上受几吨拉力(图 2.24)?

(提示: 先找出重物受到吊钩多大的拉力。)

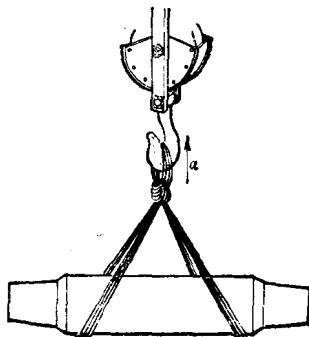


图 2.24

第六节 向 心 力

一、匀速圆周运动中的作用力

在麻绳的一端拴一物体, 用手抓住麻绳的另一端, 甩动物体, 使它作匀速圆周运动(图 2.25)。这时就会感到, 要物体转得越快, 手就要将麻绳抓得越紧。如果一松手, 物体就立刻沿圆周的切线

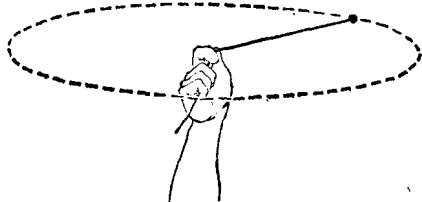


图 2.25 甩动物体作匀速圆周运动

方向飞出。

怎样解释这一现象呢？我们已经知道，作匀速圆周运动的物体具有向心加速度，这个向心加速度只改变速度的方向，并不改变速度的大小。当物体在作匀速圆周运动时，手通过麻绳对它的拉力，方向一直指向圆心。这个拉力对物体所引起的加速度就是向心加速度，促使物体不断地改变运动方向。如果一松手，麻绳对物体的拉力就立刻消失，那么物体的向心加速度也就立刻消失。于是物体的速度方向就不再改变，而沿着圆周的切线方向开始作直线运动。我们把使物体获得向心加速度的外部条件叫做向心力，通常用字母 F_n 表示。向心力的方向与向心加速度的方向是一致的。它与物体的运动速度方向垂直，永远指向圆心。

这个向心力有多大呢？根据运动定律公式 (2.29) 和向心加速度公式 (2.16) 可以列出

$$F_n = m a_n = m \frac{v^2}{r}, \quad (2.35)$$

式中 m 是作匀速圆周运动的物体的质量， v 是它的速度， r 是圆半径。上式表明：向心力与物体的质量、速度的平方成正比，而与圆半径成反比。

[例题 2.13] 总质量为 3.8 吨的小卡车沿着半径为 5 米的圆弧转弯。如果这时小卡车的速度为 2 米/秒，问需要多大的向心力？

解：已知 $m = 3800$ 公斤， $v = 2$ 米/秒， $r = 5$ 米，根据公式 (2.35) 可知这时它所需的向心力

$$F_n = m \frac{v^2}{r} = 3800 \times \frac{4}{5} = 3040 \text{ 牛顿} \approx 310 \text{ 公斤。}$$

那么车辆在转弯时的向心力是怎样获得的呢？我们在骑

自行车转弯时，都要把车身略略向内侧倾斜一下（图 2.26），它的作用就是使轮胎与地面接触处有向外侧滑动的趋势，这样就引起地面对自行车一个阻碍滑动的静摩擦力 f ，它与地面对自行车的铅直向上的支持分力 N_1 合成支持力 N ，这个支持力 N 与自行车的重力 P 的合力 F_n 就可以用来充当转弯时的向心力。转弯结束后，自行车不再倾斜，向心力就随着静摩擦力 f 的消失而消失。



图 2.26 转弯时的自行车

汽车、卡车、拖拉机等四轮车或三轮车，在转弯时无法造成车身的倾斜来获得向心力，因此在转弯时必须放慢速度，使需要的向心力减小，同时只能依靠在转弯时地面对轮胎侧面的静摩擦力来充当向心力。农村中常用的三轮小型拖拉机重心较高，尤其是在雨雪天，路面较滑，摩擦系数较小，如果在转弯时速度降低得不够，就容易翻倒，造成事故。因此

在驾驶时必须十分谨慎才行。

为了避免上述缺点，在公路的转弯处常把外侧的路面垫高，以利于汽车向心力的获得。火车转弯时的情况也是如此。图 2.27 是一节车厢连同车轮和钢轨在转弯处的横截面简

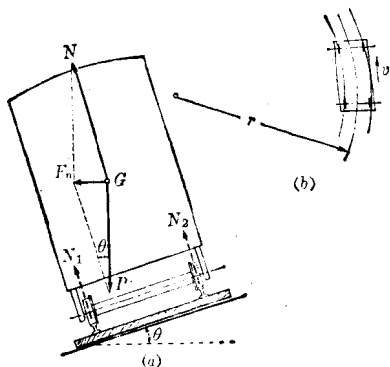


图 2.27 列车车厢在转弯处的横截面简图

图。当列车以一定的速度 v 经过这段倾斜的圆弧轨道时，轨道对车厢的支持力 N_1 、 N_2 的合力 N 穿过车厢的重心 G ，而与车厢的重力 P 合成力 F_n 。如果列车的速度 v 适宜，这个方向水平的指向圆弧中心的合力 F_n 就起了向心力的作用。

列车的速度 v 多大才是适宜的呢？从图上可以看出

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{F_n}{P} = \frac{mv^2/r}{mg} = \frac{v^2}{rg}, \quad (2.36)$$

式中 r 就是圆弧轨道的半径(图 2.27 b)。由此可见在轨道倾角 θ 一定的情况下，列车所容许的标准速度

$$v = \sqrt{rg \operatorname{tg} \theta}. \quad (2.37)$$

【例题 2.14】铁路转弯处圆弧半径为 300 米，两轨间宽度为 1435 毫米。如果列车通过这里的标准速度为 54 公里/时，问这里外轨与内轨的高度差是多少？

解：假设高度差为 h 毫米，两轨间宽度为 d ，从图 2.27 可知 $\sin \theta = \frac{h}{d}$ ，可见只要先找出倾角 θ ，即可求出 h 。今已知 $v = 54$ 公里/时 = 15 米/秒， $r = 300$ 米，根据公式 (2.36) 可以得出

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v^2}{rg} = \frac{15^2}{300 \times 9.8} = 0.0765,$$

查表得 $\theta = 4^\circ 22' 30''$ ，而 $\sin \theta = 0.0763$ ，于是两轨高度差

$$h = d \sin \theta = 1435 \times 0.0763 \doteq 109.5 \text{ 毫米}。$$

一般说来，由于轨道倾角 θ 很小， $\operatorname{tg} \theta$ 和 $\sin \theta$ 可以看作相等。

因此上述关系可以简化为 $\operatorname{tg} \theta = \frac{v^2}{rg} = \sin \theta = \frac{h}{d}$ ，高度差的公式也可以简化为 $h = \frac{v^2 d}{rg}$ 。

二、离心作用

汽车在急转弯时,如果车上的乘客不拉好把手,就要向外侧倾倒。这时我们就说乘客受到了离心作用。

离心作用是怎样形成的呢?我们已经知道,作圆周运动的物体需有一定的向心力。增大物体的速度,所需的向心力也就随着增大。如果这时外界对它的向心力不够大,物体就会因惯性而脱离原来的圆周轨道,沿切线方向运动到半径较大的圆周轨道上继续运动。如果物体的速度不断增大以致所需的向心力也越来越大,那么物体由于惯性离开圆心也越来越远。所以离心作用是作圆周运动的物体在得不到足够的向心力的情况下形成的,实质上就是物体惯性的表现。汽车在急转弯时,车上的乘客也在作圆周运动,如果不拉好把手就得不到足够的向心力,这就是他受到离心作用,要向外侧倾倒的原因。

利用离心作用而工作的机械叫做离心机械。例如农村的主要排灌设备离心式水泵(抽水机)就是利用水的离心作用而工作的。它的主要工作部件是一个叶轮1(图2.28)。它的中心部分与进水管2相通;它的边缘部分与泵壳3、出水口4相通;它的轮轴就是泵轴5,是和电动机轴连在一起的。在抽水前先把叶轮和通水源的进水管灌满水。当叶轮在电动机的带动下高速旋

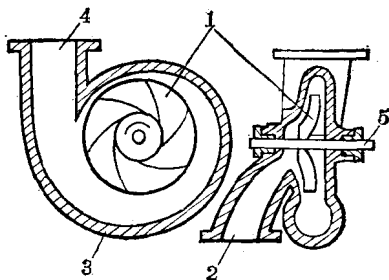


图 2.28 离心式水泵

1—叶轮; 2—进水管; 3—泵壳;
4—出水口; 5—泵轴

转时,叶片之间的水也跟着作速度很高的圆周运动,由于得不到所需的向心力,受到离心作用而向叶轮边缘飞去,经泵壳集中后沿切线方向冲入出水管。同时叶轮中央由于缺水而形成低压区,进水管下方的水就在大气压的作用下不断流入叶轮来补充。这就是离心式水泵在电动机的带动下能连续抽水的主要原理。

三、人造地球卫星

我们知道,在太阳系里,地球环绕太阳的运动轨道、月球环绕地球的运动轨道也都是近似于圆的椭圆。那么它们又是怎样获得所需的向心力的呢?原来宇宙间任何物体之间都存在着相互吸引力,叫做万有引力。万有引力的大小与相互吸引的物体的质量成正比,而与它们之间的距离的平方成反比;万有引力的方向就在它们的中心线上。这个结论就叫做万有引力定律。假设 m_1 、 m_2 分别是两个物体的质量(图 2.29),

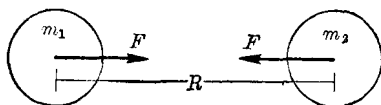


图 2.29 物体间的万有引力

R 就是它们中心间的距离,那么它们之间的相互吸引力,即万有引力

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad (2.38)$$

式中的比例系数 G 叫做引力常数。精确的实验结果表明:

在采用米公斤秒制时 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ 米³/公斤秒²,

在采用厘米克秒制时 $G = 6.67 \times 10^{-8}$ 厘米³/克秒²。

所以地球环绕太阳的运动就是以太阳对它的万有引力充当向

心力的；月球环绕地球的运动也是以地球对它的万有引力充当向心力的。

[例题 2.15] 根据天文测量资料，地球中心到太阳中心的距离 $R=1.5 \times 10^{11}$ 米，而地球环绕太阳运动的环绕速度 $v=3 \times 10^4$ 米/秒。问太阳的质量有多大？

解：因为地球环绕太阳的运动是以太阳对它的万有引力充当向心力的。今假设 M 、 m 为太阳和地球的质量，那么太阳对地球的万有引力

$$F = G \frac{Mm}{R^2},$$

又因地球运动的轨道半径就等于太阳与地球间的中心距离 R ，所以地球运动所需的向心力

$$F_n = m \frac{v^2}{R}。$$

根据 $F_n = F$ 的关系就可以列出

$$m \frac{v^2}{R} = G \frac{Mm}{R^2},$$

可见太阳的质量

$$M = \frac{v^2 R}{G} = \frac{(3 \times 10^4)^2 \times (1.5 \times 10^{11})}{6.67 \times 10^{-11}} = 2.02 \times 10^{30} \text{ 公斤}。$$

根据作用力和反作用力定律可知，太阳同时也受到地球对它的一个同样大小的万有引力。但是由于太阳的质量比地球的质量大得多，约为地球质量的 336000 倍，因此由这个引力引起的太阳的加速度可以忽略不计。

万有引力定律首先是从天体运动的观察与研究中归纳出来的，后来无数实验都证实，万有引力普遍地存在于任何物体

之间。地球对地面物体的万有引力就是重力*。假设 m 、 M 为物体和地球的质量，物体与地球的中心距离就近似地等于地球的半径 R 。于是可以列出物体的重力

$$P = G \frac{Mm}{R^2}。 \quad (2.39)$$

与公式 (2.31) $P = mg$ 相比较可以得出重力加速度

$$g = \frac{GM}{R^2}。 \quad (2.40)$$

上式不仅说明重力加速度与物体的质量无关，而且还指出地面各处的重力加速度有所不同，但变化不大。

为什么地球对它的卫星——月球的引力只能充当月球环绕地球运动的向心力，而不能把月球吸引到地面上来呢？这是因为月球不仅离地面较远，而且还具有很高的环绕速度。从地面附近发射的平抛物体，在地球引力和空气阻力的影响下在空中经过了一段曲线路程之后就被地球吸引到地面上来了。但是初速度愈大，它的射程也就愈大。如果把初速度增大到一定程度之后，这个抛射体就有可能沿着一条圆周轨道运行下去，不再落回到地面上来。这就是人造地球卫星的初步设想。

那么抛射体的速度至少需要多大才能成为人造地球卫星呢？假设 v_1 为抛射体 A 的速度， m 为它的质量 (图 2.30)。

* 地球对地面物体的万有引力就是重力。但是为什么同一物体在不同地点的重力可以不同呢？这是由于地球是个中间大、两头略小的椭圆球，随着地面上各点的纬度不同，地球的半径略有不同（赤道处半径为 6378 公里，两极处半径为 6357 公里）。因此地面上同一物体所受的万有引力从两极到赤道是逐渐减小的。此外又由于地球的自转，地面上的物体也随着地球作圆周运动。越靠近赤道，线速度越大，所需的向心力也越大。因此在物体所受的万有引力中，有一部分还要充当向心力。所以严格说来，物体的重力要比地球对它的万有引力小些。这就是地面上同一物体的重量从两极到赤道逐渐减小的原因。但是影响很小，一般可以忽略不计。

它所受地球的引力为 mg 。由于它是靠近地面运行的, 它的轨道半径就近似地等于地球的半径 R (6370 公里)。它作圆周运动所需的向心力 $F_n = m \frac{v_1^2}{R}$ 。很明显, 要使它成为人造地球卫星就必须由它所受的地球引力来充当向心力。即

$$\frac{mv_1^2}{R} = mg,$$

所以 $v_1 = \sqrt{Rg}$ 。 (2.41)

v_1 是人造地球卫星环绕速度的最低限度, 通常叫做第一宇宙速度。把已知数据代入可得

$$v_1 = \sqrt{6370 \times 1000 \times 9.8}$$

$$\approx 7900 \text{ 米/秒} = 7.9 \text{ 公里/秒。}$$

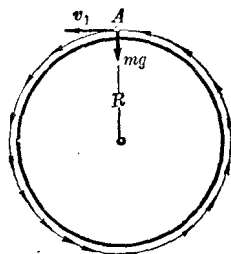


图 2.30 人造地球卫星

这个数值相当于声音在空气中的速度的 24 倍, 比超远程大炮炮弹的速度还要大四、五倍。

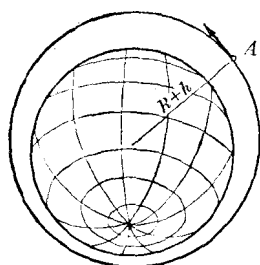


图 2.31 在高空中运行的人造地球卫星

必须指出, 要在地面附近获得这么高的速度是不可能的。这是因为地面上空气稠密, 它不仅会使抛射体的速度很快减小, 而且还会因摩擦生热而使抛射体烧毁。所以人造地球卫星必须用多级火箭穿过十多公里高的大气稠密区, 送到高空后才进入轨道。在距地面高度为 h 的高空中运行的人造地球卫星 (图 2.31), 轨道半径就等于 $R+h$ 。它所受的地球引力和向心力的关系是

$$G \frac{mM}{(R+h)^2} = m \frac{v_1^2}{R+h},$$

因此这时的第一宇宙速度

$$v_1 = \sqrt{\frac{R^2 g}{R+h}}, \quad (2.42)$$

式中 $g = \frac{GM}{R^2}$, 就是重力加速度。

掌握了人造地球卫星的环绕速度之后, 就可以把它环绕地球一周的时间计算出来。因为它的运动轨道可以近似看作是个圆周, 周长为 $2\pi(R+h)$, 所以人造地球卫星环绕一周所需的时间

$$T = \frac{2\pi(R+h)}{v_1} = 2\pi(R+h) \sqrt{\frac{R+h}{R^2 g}}, \quad (2.43)$$

通常把它叫做人造地球卫星的运行周期。

在毛主席的关于“我们也要搞人造卫星”的伟大号召下, 我国在 1970 年 4 月 24 日和 1971 年 3 月 3 日先后成功地发射了两颗人造地球卫星。这是毛主席无产阶级革命路线的伟大胜利, 也是无产阶级文化大革命的丰硕成果。它标志着我国的科学技术已经发展到一个新的水平。

人造地球卫星是近代的宇宙空间探测仪器, 应用十分广泛。例如在通讯上, 卫星可以用作无线电通讯的中继站, 来转播电视、传送电话电报等; 在气象上, 卫星可以用来搜集高空的气象资料, 供天气预报之用; 在国防上, 卫星还可以用来侦察敌人的军事动态等。

习题 2.23 我们在练习跑步时, 如果需要急转弯, 身体应该怎样倾侧? 为什么?

习题 2.24 我们在甩铁饼时, 为什么要使铁饼先随同人身旋转一周后再甩出? 在松手时会感到铁饼有一股朝外的作用, 这是什么作用?

习题 2.25 自行车在路口以 2 米/秒的速度沿着半径为 5 米的圆

弧转弯,问车身必须从铅直方向倾斜几度?

习题 2.26 如果地球质量为 6×10^{24} 公斤,月球与地球的中心距离为 3.84×10^8 米,问月球环绕地球运动的速度有多大?

复 习 题

习题 2.27 既然物体的运动是绝对的,为什么又说物体的运动又具有相对性呢?为什么选择不同的参照物来描述同一物体的运动情况可以得出完全不同的结论?举例说明。

习题 2.28 匀速直线运动和匀变速直线运动各有什么特征?反映这些运动规律的共有哪些公式?

习题 2.29 汽车在起动过程中,在开始的15秒里速度由0均匀地增大到18公里/时,在其次的5秒里速度不变,在最后的10秒里速度又均匀地增大到36公里/时。问在这三段时间里:(1)平均速度各是多少?(2)加速度各是多少?(3)经过的路程各是多少?

习题 2.30 用小火筒垂直向上发射焰火弹,如果不考虑空气阻力,问焰火弹的初速度至少要多大才能上升到160米的高度?

习题 2.31 在什么情况下物体才会作匀速圆周运动?什么叫向心加速度?它对物体的速度有什么影响?

习题 2.32 我们应该如何正确理解力、质量与加速度的关系?为什么说惯性定律是它的特例?

习题 2.33 质量和重量的本质区别是什么?同一物体先后在北京和广州用天平来称量,所得到的结果是否相同?而这一物体在北京和广州的重量是否相同?

习题 2.34 某卡车在空载时重5吨,满载时重8吨。如果在空载时汽车发动机的牵引力使汽车获得 1.6 米/秒^2 的加速度,假设阻力是车重的0.02倍。问在满载时,同样的牵引力能使汽车获得多大的加速度?

习题 2.35 已知我国第一次发射的人造地球卫星离地最近的距离为439公里,离地最远的距离为2384公里。试求它的运行周期。

(提示:取平均值作为它离地面的高度 h_0 。)

第三章 动量和能量

我们已经学过运动定律。在这一章里，我们要在运动定律的基础上进一步来研究物体在传递机械运动的过程中的一些客观规律。

第一节 动量 动量定理

一、动量——机械运动的一种量度

两辆跑得一样快的劳动车(即速度相同)，一辆是空车，另一辆满载着农具(即质量较大)。如果要使它们一起停下来，那么满载农具的那辆就费劲得多。这说明它们虽然速度相同，但是运动状态并不相同。要在同一时间内把它们从运动改变到静止，对质量较大的那辆就需要用较大的力。所以单用速度来反映物体的运动状态是不够的。物体的运动状态除了由物体的位移、速度来决定外，有时还要考虑到物体的质量。

我们把物体的质量 m 和速度 v 的乘积叫做物体的动量，用字母 p 表示。即

$$p = mv. \quad (3.1)$$

在一定的运动状态下，物体具有一定的动量。动量反映了物体的运动状态，它是对机械运动的一种量度。物体处在静止状态时的动量就等于零。

动量的单位是由质量和速度的单位组成的。常用的动量单位详见表 3.1。(表中的冲量单位见后述。)

表 3.1 动量和冲量的常用单位表

单 位 制	质 量	速 度	动 量	力	时 间	冲 量
厘米克秒制	克	厘米/秒	克·厘米/秒	达因	秒	达因·秒
米公斤秒制	公斤	米/秒	公斤·米/秒 = 10^3 克·厘米/秒	牛顿	秒	牛顿·秒 = 10^3 达因·秒

动量是有方向的,它是矢量。物体速度的方向就是它动量的方向。因此在计算由两个或两个以上物体组成的系统的合动量时,必须把系统内各个物体的动量按它们的大小和方向用平行四边形法则作出来,就象求几个力的合力一样。

[例题 3.1] 民兵在进行步枪射击时,子弹的出膛速度是 800 米/秒,同时步枪有个沿相反方向后退的速度 2 米/秒。假设子弹与步枪的质量分别为 10 克、4 公斤,问它们的动量各是多少?如果把它们看作一个系统,求系统的合动量。

解: 假设子弹出膛时速度的方向为正方向,根据动量公式(3.1)可知子弹和步枪的动量分别为 $p_1 = m_1 v_1 = 0.01$ 公斤 \times 800 米/秒 = +8 公斤·米/秒, $p_2 = m_2 v_2 = 4$ 公斤 \times (-2 米/秒) = -8 公斤·米/秒,所以系统的合动量为

$$\begin{aligned}
 p &= p_1 + p_2 \\
 &= 8 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒} - 8 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒} \\
 &= 0。
 \end{aligned}$$

二、动 量 定 理

物体在受到外力作用后,速度就要发生改变,故物体的动

量也要随着发生改变。下面我们运用运动定律来分析物体动量的改变与所受外力大小之间的关系。



图 3.1 在常力作用下作匀加速直线运动的物体

假设质量为 m 的物体，初速度为 v_0 ，在外力的合力 F (常力) 的作用下作匀加速直线运动。 t 秒后速度增大为 v (图 3.1)。根据运动定律公式 $F = ma$ 和加速度公式 $a = \frac{v - v_0}{t}$ ，可以列出

$$F = m \frac{v - v_0}{t},$$

$$Ft = mv - mv_0,$$

即

$$Ft = p - p_0, \quad (3.2)$$

式中 $p_0 = mv_0$ ，是物体的初动量； $p = mv$ ，是物体在 t 秒后的动量。上式表明：物体动量的改变不仅与外力有关，而且与外力的作用时间也有关。我们通常把力 F 与作用时间 t 的乘积叫做力的冲量。很明显，冲量反映了力改变物体动量的作用大小。从公式 (3.2) 可以看出：物体所受的冲量越大，它的动量改变就越显著。物体所受外力的冲量就等于物体在这段时间里动量的改变。这一结论叫做动量定理。

动量定理是运动定律的另一种表现形式。然而动量定理的应用要比运动定律广泛得多。因为运动定律只适用于质量不变的物体，对于质量随时间不断变化的运动物体就不能适用了。例如飞行中的火箭，由于燃料的不断消耗，它的质量是随时间不断在减小；秋收时用的联合收割机在工作时，由于已

割作物的不断积累，它的质量是随时间不断在增大。有关这一类运动物体的力学问题就必须运用动量定理来处理。

冲量的单位是由力和时间的单位组成的。常用的冲量单位详见表 3.1。这些冲量单位是与动量单位完全一致的。因为

$$1 \text{ 达因} \cdot \text{秒} = 1 [\text{克} \cdot \text{厘米/秒}^2] \text{秒} = 1 \text{ 克} \cdot \text{厘米/秒};$$

$$1 \text{ 牛顿} \cdot \text{秒} = 1 [\text{公斤} \cdot \text{米/秒}^2] \text{秒} = 1 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒}。$$

所以物体动量的改变完全可以用物体所受冲量来进行量度。

力的冲量也是矢量，力的方向就是它的冲量的方向。因此在计算时，要考虑它的方向。对于作直线运动的物体说来，冲量的方向只有两种可能，不是与物体原来的动量方向一致，就是相反。所以在直线运动中冲量的方向以及物体动量的方向都可以用正负号来表示。例如一运动物体的初动量 $p_0 = 5$ 公斤·米/秒，如果它受到的冲量 $Ft = +3$ 牛顿·秒，说明物体受的是推力，根据动量定理，物体的末动量

$$p = p_0 + Ft = 5 + 3 = 8 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒};$$

如果它受到的冲量 $Ft = -3$ 牛顿·秒，说明物体受的是阻力，根据动量定理，物体的末动量

$$p = p_0 + Ft = 5 - 3 = 2 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒}。$$

上述关系还可以用图 3.2 所示的方法表示出来。

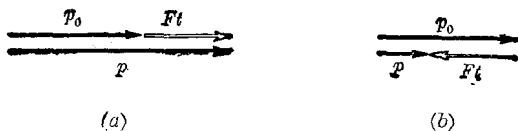


图 3.2 在直线运动中动量定理的图示

三、冲 力

应用动量定理来研究物体在冲击、碰撞、爆炸等过程中的

有关问题比较方便。例如在建筑工地上打夯时,夯体对水泥桩的作用力是很大的,但冲击时间却很短促,只有几分之一秒甚至几十分之一秒。我们把这种作用时间很短促的力叫做冲力。实际上冲力的大小即使在这么短促的时间内也并不是固定不变,而是随时间变化着的。很明显,要想对这种作用时间又短促、变化又大的冲力进行精确的测量是非常困难的。但是根据动量定理可知,在掌握了物体受冲击前后的动量变化之后就可以推知物体所受冲量的大小。如果能测出冲击时间,即可算出冲力的平均值,即平均冲力,通常用字母 F 表示。所谓平均冲力是设想在整个冲击时间内大小不变的冲力。

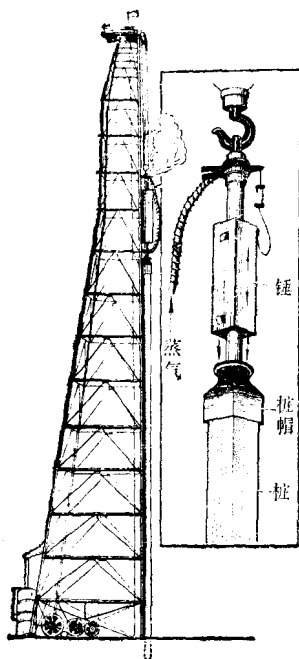


图 3.3 大型蒸汽打桩机

[例题 3.2] 图 3.3 是我国自行设计制造的大型蒸汽打桩机。铁塔高 40 米,在打桩时,由锅炉产生的高压蒸汽推动重锤上升到一定高度,然后排除高压蒸汽使重锤自由下落,有力地冲击着 20 多米长的钢筋混凝土桩。经多次冲击就能把桩体打入地层。

现在假设重锤的质量为 2 吨,它在距桩面 1.2 米高处自由下落。如果重锤对桩面冲击 0.1 秒而静止,求桩面所受的平均冲力。

解: 当重锤自由下落到冲击桩面时动量很大,但由于在冲击桩面的同时也受到桩面对它的反

冲击, 因此动量最后减小为 0。于是根据动量定理公式(3.2)可以列出

$$Ft = p - p_0。$$

但是分析一下重锤在冲击桩面时的受力情况可知这时重锤共受到两个力的作用: 铅直向下的重力 P 和铅直向上的桩面对它的反冲力 N 。再设重锤质量为 m , 冲击桩面前后的速度为 v_0 、 v , 于是可以把上式具体列为

$$(P - N)t = mv - mv_0。$$

今已知重锤重力 $P = 2000 \times 9.8$ 牛顿, 冲击时间 $t = 0.1$ 秒, 重锤质量 $m = 2000$ 公斤。冲击前速度可按自由落体运动公式计算, 即 $v_0^2 = 2gh$, $v_0 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 1.2} = 4.85$ 米/秒, 而 $v = 0$, 所以

$$(2000 \times 9.8 - N) \times 0.1 = -2000 \times 4.85,$$

$$1960 - 0.1N = -9700,$$

$$N = 116600 \text{ 牛顿} = 11840 \text{ 公斤}。$$

很明显, 这个 N 就是桩面对重锤的平均冲力, 方向铅直向上, 而重锤对桩面的平均冲力就是 N 的反作用力, 它们大小相等, 方向相反。因此重锤对桩面的, 即桩面所受的平均冲力也等于 11840 公斤, 只是方向铅直向下。

从上面的例题可以看出, 在打桩时我们利用重锤动量的迅速变化(即冲击现象), 可以获得比重锤重力大得多的冲力(这是冲力的平均值, 实际的最大冲力更大)。在动量变化一定时, 冲击时间越短促, 冲力越大。

当然, 冲力也有它不利的一面。在不可避免的碰撞中, 我们只能通过延长碰撞时间来减小冲力。例如玻璃器皿、陶瓷等易碎物体在装箱时, 总要垫上些纸屑或泡沫塑料以减少搬运中的损失。这是因为如果发生碰撞, 接触处垫上软物可以

延长碰撞时间,可使易碎物体所受的冲力减小。建筑工地上,在脚手架上装有安全网,这是对高空作业工人的一个极好的劳保措施。万一有人掉下来,安全网就能对人体起很大的缓冲作用,以避免发生摔伤事故。

习题 3.1 篮球运动员在用双手接快速飞来的球时,为什么总要顺着球的来势往后缩一下?

习题 3.2 用钉锤掀压铁钉不能使它进入木板,为什么用钉锤敲击铁钉就能使它进入木板?

习题 3.3 质量是 10 公斤的物体在外力作用下,在同一方向上速度由 10 米/秒增大为 20 米/秒。问物体动量改变多少?外力的冲量有多大?

习题 3.4 某地下铁道的列车共有 4 节车厢,每节车厢包括乘客在内共重 36 吨。它的特点是每节车厢都有动力装置,牵引力很大,因而它的加速性能好。若已知列车从某站开出后,在 20 秒内速度达到 72 公里/时,问在这一加速过程中列车所受的总牵引力有多大?

习题 3.5 原来静止的质量为 2 公斤的木球,在外力冲击下以 5 米/秒的速度沿外力方向开始运动。问: (1) 经过冲击木球的动量有多大的变化? (2) 如果冲击时间是 0.01 秒,木球所受平均冲力有多大?

习题 3.6 一汽锤质量为 560 公斤,打击铸件前的速度为 7 米/秒,打在铸件上经过 0.05 秒后停止。求汽锤打击铸件的平均冲力。

第二节 动量守恒定律

一、运动物体相互作用时动量的变化

运动物体在相互作用时,它们的动量会发生改变。一个动量减小,另一个动量就增大。例如蒸汽打桩机上重锤在冲击水泥桩之后,动量减小为 0,同时水泥桩经过重锤的冲击而获得了动量,逐渐深入地层。下面我们运用动量定理和作用力与反作用力的关系来分析运动物体在相互作用前后动量的

变化规律。

图 3.4 表示两个原来在一直线上沿同一方向运动的小球, 相互发生了碰撞。它们在碰撞时, 除了彼此受到冲力的作用外, 其他外力可以忽略不计。

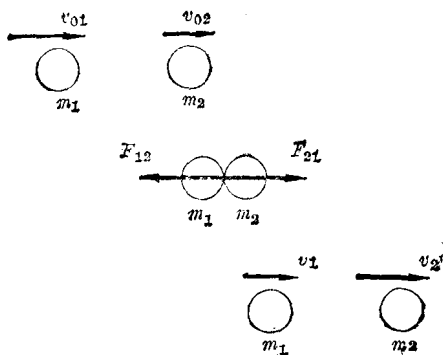


图 3.4 物体的动量在碰撞前后的变化

已知小球 1、2 的质量分别为 m_1 、 m_2 , 在碰撞前速度分别为 v_{01} 、 v_{02} , 在碰撞后速度分别变为 v_1 、 v_2 。假设在碰撞时, 小球 1 所受的平均冲力为 F_{12} , 而小球 2 所受的平均冲力为 F_{21} , 碰撞时间为 t 。根据动量定理公式 (3.2) 可以列出:

对于小球 1

$$F_{12}t = m_1v_1 - m_1v_{01},$$

对于小球 2

$$F_{21}t = m_2v_2 - m_2v_{02},$$

式中 F_{21} 与 F_{12} 是作用力与反作用力的关系, 它们大小相等, 方向相反, 即 $F_{21} = -F_{12}$ 。因此, 由上式可以推知

$$F_{12} = \frac{m_1v_1 - m_1v_{01}}{t},$$

$$F_{21} = \frac{m_2v_2 - m_2v_{02}}{t},$$

于是

$$\frac{m_2 v_2' - m_2 v_{02}}{t} = - \frac{m_1 v_1' - m_1 v_{01}}{t},$$

$$(m_2 v_2' - m_2 v_{02}) = - (m_1 v_1' - m_1 v_{01}).$$

由此可见，经过碰撞后，两小球的动量改变在数量上是相等的，只是符号不同。小球 1 动量减少多少，小球 2 动量就增加多少。这充分说明在碰撞中，小球 1 的部分动量传递给了小球 2。所以运动物体相互作用的过程是动量传递的过程，也就是机械运动的传递过程。

二、动量守恒定律

把前面得到的关系式再改变一下，可以列出

$$m_2 v_2' - m_2 v_{02} = -m_1 v_1' + m_1 v_{01},$$

即

$$m_1 v_1' + m_2 v_2' = m_1 v_{01} + m_2 v_{02}.$$

上式表示碰撞后两小球的合动量等于碰撞前两小球的合动量。这说明虽然运动物体在相互作用后动量都发生了改变（如小球 1 的动量由原来的 $m_1 v_{01}$ 改变为 $m_1 v_1'$ ，小球 2 的动量由原来的 $m_2 v_{02}$ 改变为 $m_2 v_2'$ ），但是如果把这两个小球看作是一个系统，它们在相互作用前后的合动量并没有改变。因此在不考虑其他外力的情况下，相互作用的物体的合动量保持不变。进一步的理论与实践都表明这个结论对于由两个以上的物体所组成的运动系统也同样适用的。我们通常把一个系统内部各个物体之间的相互作用力叫做内力，而把其他物体对系统内任何物体的作用力叫做外力。在外力可以忽略不计的情况下，系统的合动量保持不变。即

$$\sum^* p = \sum mv = \text{恒量}, \quad (3.3)$$

* Σ 是希腊字母，读作“xi-ge-ma”，表示合量， Σp 就表示合动量。

这个结论叫做动量守恒定律。

为什么系统的内力不会使系统的合动量发生改变呢？因为内力既然是系统内部各物体之间的相互作用力，它们必然是成对地出现的，而且彼此大小相等，方向相反。因此它们的冲量所引起的动量变化在合动量中也必然会相互抵消。所以系统的内力不会改变系统的合动量。举例来说，当公共汽车需要推动时，为什么车上的人要从车上下来站在地上推，而不能坐在车上推呢？很明显，人在车上已经成为汽车的一部分，人坐在车上对汽车的推力是内力而不是外力。人在车上推车的同时必然要受到车对人的反作用力，这两个内力大小相等，方向相反。它们的冲量所引起的动量变化必然是相互抵消的。因此并不能使整个汽车的动量发生改变。人下车以后，站在地上推汽车，这时的推力对汽车说来是外力了。只要人多力量大，就可以改变汽车的动量，就可以推动汽车。

动量守恒定律是自然界的一个很普遍的规律。它和自然界的其他物理定律一样，也是劳动人民在长期的生产实践中逐步认识而建立起来的。随着人们对自然界的认识的不断扩大，发现动量守恒定律比运动定律具有更大的普遍性。实验表明：对于分子、原子、电子等微观系统，运动定律一般已不再适用，但动量守恒定律却仍能适用。

三、反冲运动

我们先来看个例题。

〔例题 3.3〕 基干民兵在小船上进行水上射击训练。已知小船的总质量 $M=400$ 公斤（包括船上的人、枪以及其他装备的质量），而一颗子弹的质量 $m=50$ 克。当射击手在原来

静止于湖中央的小船上发射一枪时，问小船还继续保持静止吗？假设子弹的出膛速度 $v=800$ 米/秒，是沿水平方向射出的，湖水对小船的摩擦阻力可以忽略不计。

解：参加过水上射击的同志一定知道，在水上射击时，小船不再保持静止，船身会动荡不定。我们可以运用动量守恒定律来解释。

在射击前小船和子弹都是静止的，因而它们的合动量等于 0。根据动量守恒定律可知在射击前后由小船和子弹构成的系统的合动量保持不变，因此在射击后系统的合动量也应该等于 0。在射击后子弹已脱离小船，这时小船质量为 $M-m$ ，假设射击后小船的速度为 V ，于是可以列出射击后系统的合动量为

$$\Sigma p = (M-m)V + mv = 0。$$

很明显，在上述等式中 V 不可能等于 0，即表示射击后小船不再保持静止。进一步的计算表明小船射击后的速度

$$V = -\frac{m}{M-m}v = -\frac{0.05}{400-0.05} \times 800 \approx -0.1 \text{ 米/秒}。$$

即小船射击后将以 0.1 米/秒的速度沿着与子弹发射方向相反的方向运动。所以多次射击后船身就会向后移动。我们把小船的这种后退运动叫做反冲运动，而把小船在反冲运动中的速度叫做反冲速度。从上述关系式可以看出：小船的总质量越大，反冲速度越小，船身就越稳。

反冲运动是比较普遍的，都可以用动量守恒定律来解释。但是我们懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界这还不够，更重要的是要用这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。

在进行步枪射击时，必须把肩紧贴枪托，否则枪托的反冲

力会把肩撞得很疼。我们把枪托的后退叫做后座。当人们认识这一规律后,对步枪的枪膛后部进行改造,将不利因素转变为有利因素,制成一种自动化步枪。它可以利用这种后座作用来自动卸子弹壳和装子弹。

然而反冲运动并不是在任何情况下都是有害的。有时我们可以利用反冲运动使物体获得巨大的速度。我国早在八、九百年前的宋代,劳动人民已经发明用纸制成的装有火药的爆竹。点燃后由于火药爆炸而生成的髙压气体急速向下喷出,使自身获得一定的反冲速度而升到髙空去。近代火箭(图3.5)的飞行原理和它很类似。所不同的是火箭内部的固体燃料和助燃的氧化剂的爆炸性燃烧是连续爆发的,因而可以不断产生大量的髙温、髙压气体,从尾部喷出。这样就使火箭的飞行能持续很长时间,甚至能遨游太空,成为人造地球卫星的运载工具。在航空技术方面,喷气式飞机也是利用这种喷气发动原理设计而成的。

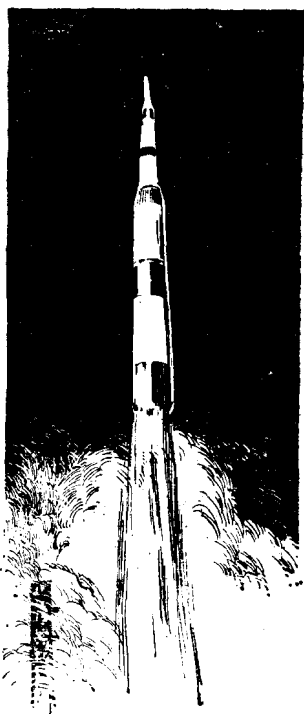


图 3.5 铅直发射的火箭

[例题 3.4] 一支重 8 吨的火箭,在铅直发射时,假设相对于火箭的喷气速度为 1000 米/秒,问每秒内至少必须喷出多少气体才能使火箭获得克服本身重力的上推力?(火箭因

不断喷出气体所发生的质量变化和阻力可以忽略不计。)

解: 假设火箭每秒喷出气体 m 公斤即可获得克服本身重力的上推力 F 。很明显, 这 m 公斤气体在未喷出前的动量为 $mv_0=0$, 喷出后的动量为 mv 。根据公式 (3.2) 可知这 m 公斤气体在脱离火箭时所受的冲力

$$F' = \frac{p - p_0}{t} = \frac{mv - mv_0}{t} = \frac{mv}{t},$$

同时根据作用力和反作用力定律可以推知: 喷出的气体在受到冲力 F' 的同时也给火箭一个反冲力 F , 它们大小相等, 方向相反。这个反冲力也就是使火箭克服重力的上推力 F , 于是可以列出

$$F = \frac{mv}{t}。$$

今已知上推力 $F=8$ 吨 $=8000 \times 9.8$ 牛顿, 喷气速度 $v=1000$ 米/秒, 时间 $t=1$ 秒, 所以

$$m = \frac{Ft}{v} = \frac{8000 \times 9.8 \times 1}{1000} = 78.4 \text{ 公斤}。$$

表明火箭每秒内至少必须喷出气体 78.4 公斤才能使本身获得克服重力的上推力。

习题 3.7 在风平浪静的水面上静止着的小船上, 有人从船的一头搬运物件走向另一头, 问这时小船还能继续保持静止吗? 为什么?

习题 3.8 帆船在风力的作用下就会前进。在无风的情况下, 如果在船上装一个很大的风扇, 它的风力虽然也能使船帆张满, 但不能使帆船向前移动。为什么?

习题 3.9 火箭起飞时, 假设在 1 秒内从尾部喷出气体 6.6 公斤, 喷气速度为 500 米/秒, 已知火箭质量为 300 公斤, 问火箭的起飞速度有多大? (阻力和火箭因喷出物质所发生的质量变化可以忽略不计。)

习题 3.10 质量为 50 克的机枪子弹的出膛速度为 1000 米/秒。假设机枪的发射速度为每分钟 200 发, 问在射击时机枪手需用多大的

力抵住机枪？（提示：这个力就相当于 200 发子弹在 1 分钟里所受的平均冲力。）

第三节 功 和 功 率

一、外力所作的功

力作用在物体上，使物体的位置发生了改变。这时我们就说外力对它作了功。

在上一章里，我们曾经指出过牛顿第一定律中所谓“如果没有外力来迫使它改变这种状态”是不符合客观实际的假设。也已说过在宇宙间完全孤立的运动物体是不存在的。一切保持相对静止或沿直线作匀速运动的物体都是处在外力平衡的情况下，而不是没有外力作用。例如在公路上作匀速直线运动的公共汽车，并不是不受到任何外力的作用。它的发动机仍需发生一定的牵引力，仍需消耗一定的汽油，用来克服阻力。因此这里就存在着一个作功和消耗功的问题。下面我们就来分析公共汽车在作匀速直线运动过程中各个外力的作功问题。

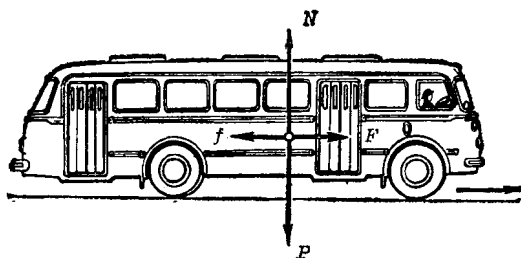


图 3.6 作匀速直线运动的公共汽车的受力情况

分析一下在平地上作匀速直线运动的公共汽车的受力情况可知：它共受到四个外力的作用（图 3.6）。汽车的重力 P

和地面对汽车的正压力 N 是互相平衡的, 它们的方向都与汽车的运动方向垂直。很明显, 它们对汽车的运动并不起作用, 我们就说 P 与 N 对汽车不作功。汽车发动机的牵引力 F 对汽车的运动起了推动作用, 因为汽车就是在力 F 的牵引下, 沿着力 F 的方向前进的。我们就说在运动中牵引力 F 对汽车作了功*。牵引力 F 越大, 对汽车作功越多; 汽车沿牵引力 F 方向运动的位移越大, 牵引力 F 对汽车作功也越多。阻力 (包括摩擦力和空气阻力等) f 的方向与汽车运动的方向正相反, 对汽车的运动起了阻碍作用。我们就说在运动中阻力 f 对汽车不但没有作功, 而且还消耗了功。阻力 f 越大, 对汽车消耗的功越多; 汽车沿与阻力 f 相反的方向运动的位移越大, 阻力 f 对汽车所消耗的功也越多。

我们知道, 汽车在作匀速直线运动的过程中牵引力 F 与阻力 f 是相互平衡的。从汽车的速度保持不变可以看出牵引力 F 对汽车所作的功与阻力 f 对汽车所消耗的功是相等的, 或者说发动机牵引力对汽车所作的功恰好消耗于克服阻力。

在运动中, 如果汽车发动机的牵引力 F 大于阻力 f , 牵引力 F 所作的功就大于阻力 f 所消耗的功。这时汽车的速度就要增大而作加速运动。反过来如果汽车发动机的牵引力 F 小于阻力 f , 牵引力 F 所作的功就小于阻力 f 所消耗的功。这时汽车的速度就要减小而作减速运动。

通过上面的分析可知, 外力对物体所作的功反映了力改变物体的运动状态 (位置、速度等) 的作用大小。在力学中, 我们把力 F 和受力物体在力 F 的作用下沿力 F 的方向运动的位移 S 的乘积叫做力 F (或施力物体) 所作的机械功, 简称功, 用

* 严格说来, 汽车发动机的牵引力是通过对车轮的转动力矩而作功的。

字母 W 表示。即

$$W = FS。 \quad (3.4)$$

从功的公式可以看出力和位移是作功的两大要素,缺一不可。如果没有力,也无所谓作功;如果物体在力的作用下没有沿力的方向移动任何距离,即没有位移,那么这个力也没有作功。例如举重运动员把一个 100 公斤的杠铃从地上举起,并举了几分钟才放下来。从力学的观点来看,举重运动员只是在把杠铃从地上举起到一定高度的过程中克服杠铃的重力同时有了位移,因此作了功。等他把杠铃举起之后停在那里几分钟,虽然也很费力,但是在这段时间里杠铃没有移动任何距离,即没有位移,因此他没有作功。

功的单位是由力和位移的单位组成的。常用的功的单位详见表 3.2。例如 1 牛顿的力连续作用在物体上使物体沿力的方向移动 1 米,即位移为 1 米,那么力所作的功就等于 1 牛顿·米,或者叫做 1 焦耳。

表 3.2 功的常用单位表

单 位 制	力	位 移	功
厘米克秒制	达因	厘米	达因·厘米=尔格
米公斤秒制	牛顿	米	牛顿·米=焦耳= 10^7 尔格
实 用 制	公斤	米	公斤·米=9.8 焦耳= 9.8×10^7 尔格

[例题 3.5] 起重机把 10 吨钢材从地面匀速举高 2 米,问它对钢材作了多少功? 如果起重机把这些钢材用 1 米/秒² 的加速度举高 2 米,它对钢材作了多少功?

解: 钢材在匀速上升过程中是处于外力平衡的情况下(图 3.7a),起重机的上举力 F_1 与钢材的重力 P 大小相等,方

向相反。已知 $P=10$ 吨 $=98000$ 牛顿; $S=2$ 米。所以起重机所作的功

$$W_1 = F_1 S = PS = 98000 \times 2 = 196000 \text{ 焦耳。}$$

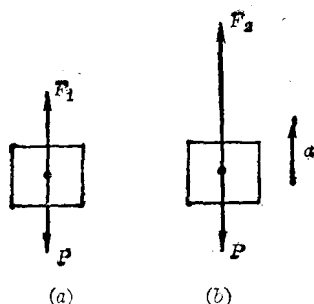


图 3.7 钢材在上升时的受力情况

钢材在加速上升过程中,起重机的上举力 F_2 大于钢材的重力 P (图 3.7b)。根据运动定律公式 (2.29) 可以列出

$$F_2 - P = ma。$$

钢材的质量 $m=10$ 吨 $=10000$ 公斤; 加速度 $a=1$ 米/秒², 代入上式得

$$F_2 = P + ma = 98000 + 10000 = 108000 \text{ 牛顿。}$$

于是起重机在加速上升过程中所作的功

$$W_2 = F_2 S = 108000 \times 2 = 216000 \text{ 焦耳。}$$

二、功 的 正 负

〔例题 3.6〕 拖拉机在牵引农机工作时, 假设拖拉机对农机挂钩的牵引力与水平方向所成的牵引角 $\theta=15^\circ$ (图 3.8)。如果平均牵引力为 500 公斤, 问拖拉机每前进 1 公里对农机作功多少?

解: 上述功的公式 (3.4) 只适用于外力的方向与物体的

位移方向一致的情况。现在牵引力 F 与农机前进的位移 S 之间成牵引角 θ ，显然不能直接用公式(3.4)来计算。

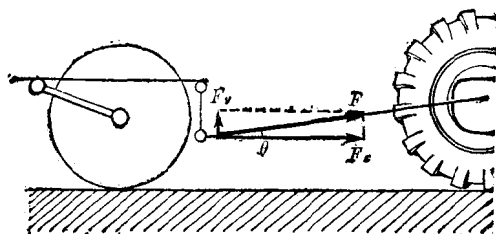


图 3.8 拖拉机的牵引角

为了解决这个问题，把牵引力 F 分解为平行于和垂直于农机位移 S 的方向的分力 F_x 、 F_y 。很明显分力 F_y 与农机位移 S 方向垂直，对农机的运动不起作用，并不做功。因此牵引力 F 对农机所作的功实际上就等于分力 F_x 对农机所作的功。所以牵引力 F 所作的功

$$W = F_x S = (F \cos \theta) \cdot S = FS \cos \theta。$$

今已知 $F = 500 \times 9.8$ 牛顿； $S = 1000$ 米； $\theta = 15^\circ$ 代入得

$$W = 500 \times 9.8 \times 1000 \times \cos 15^\circ \approx 4733 \text{ 千焦耳。}$$

这就是说，拖拉机每前进 1 公里对农机做功 4733 千焦耳。

根据对上述例题的分析可知，如果外力的方向和物体位移的方向不一致，或者说当外力 F 与物体的位移 S 之间成一夹角 θ 时，外力 F 所作的功就等于 F 、 S 以及它们之间的夹角 θ 的余弦的乘积。即

$$W = FS \cos \theta。 \quad (3.5)$$

功的这一公式要比前述公式(3.4)更为广泛。当力 F 与位移 S 方向一致时，夹角 $\theta = 0^\circ$ ，而 $\cos \theta = \cos 0^\circ = 1$ ，可见公式(3.4)只是公式(3.5)在 $\theta = 0^\circ$ 时的特殊情况。

仔细讨论公式(3.5)中角 θ 的大小，可以得出外力的三种

做功情况。

(1) 若 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ (图 3.9a), 那么 $\cos \theta > 0$, $W > 0$ 。说明力 F 对物体的运动起了推动作用, 即力 F 对物体作了正功。

(2) 若 $\theta = 90^\circ$ (或 $\theta = 270^\circ$) (图 3.9b), 那么 $\cos \theta = 0$, $W = 0$ 。说明力 F 对物体的运动不起作用, 即力 F 对物体不作功, 或者说力 F 对物体作了零功。

(3) 若 $90^\circ < \theta < 270^\circ$ (图 3.9c), 那么 $\cos \theta < 0$, $W < 0$ 。说明力 F 对物体的运动起了阻碍作用。即力 F 对物体作了负功, 或者说力 F 消耗了功, 也可以说物体克服力 F 作了功。

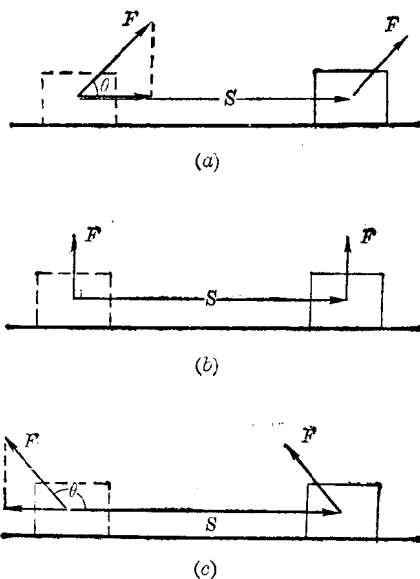


图 3.9 外力对物体做功的三种情况

总之, 力对物体作正功反映了力在物体的运动中起了推动作用; 力对物体作负功反映了力在物体的运动中起了阻碍

作用；力对物体作零功（即不作功）反映了力与物体的运动没有关系。

功虽然有正负之分，但这个正负并不是功的方向。功并没有方向，功不是矢量而是标量。

三、功 率

把一车化肥送到生产队里去，用马拉要比牛拉得快，用拖拉机装运就更快了。可见作同样的功，不同的作功物体完成的快慢程度就不同。在比较同类型的发动机性能好坏时，主要不是看它们能作功多少，而是看它们作功的快慢，也就是看它们在一定时间内作功的多少。我们把作功物体在单位时间内所作的功叫做功率，用字母 N 表示。即

$$N = \frac{W}{t}。 \quad (3.6)$$

功率反映了物体作功的快慢程度。

功率的单位是由功和时间的单位组成的。常用的功率单位详见表 3.3。

表 3.3 功率的常用单位表

单 位 制	功	时 间	功 率
厘米克秒制	尔格	秒	尔格/秒
米公斤秒制	焦耳	秒	焦耳/秒=瓦 (1 千瓦=1000 瓦 =1.36 马力)
实 用 制	公斤·米	秒	公斤·米/秒 (1 马力=75 公斤·米/秒 =0.735 千瓦)

〔例题 3.7〕 假设一头耕马以 3.6 公里/时的平均速度牵引单铧犁耕地，耕马的平均牵引力为 45 公斤。问耕马耕完

一块 15 亩的麦田作功多少？功率多大？（已知单铧犁的跨地宽度为 0.2 米。）

解：根据 $1 \text{ 亩} = 60 \text{ 丈}^2 = 6000 \text{ 尺}^2$ 和 $1 \text{ 米} = 3 \text{ 尺}$ 、 $1 \text{ 米}^2 = 9 \text{ 尺}^2$ 的关系，可把 15 亩麦田的面积化为 $15 \times \frac{6000}{9} = 10000 \text{ 米}^2$ （合 1 公顷）。又因单铧犁的跨地宽度为 0.2 米，所以耕马耕完这块麦田所运动的路程

$$S = 10000 \text{ 米}^2 \div 0.2 \text{ 米} = 50000 \text{ 米}。$$

从耕马平均牵引力 $F = 45$ 公斤可推知耕马所作的功

$$W = F \cdot S = 45 \times 50000 = 2250000 \text{ 公斤} \cdot \text{米}，$$

而耕马耕完这块麦田所需时间 t 可以按 $v = 3.6 \text{ 公里/时} = 1 \text{ 米/秒}$ 算出

$$t = \frac{S}{v} = \frac{50000}{1} = 50000 \text{ 秒}，$$

所以耕马耕田的功率为

$$N = \frac{W}{t} = \frac{2250000}{50000} = 45 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒} = 0.6 \text{ 马力}。$$

实际上作功物体在作功过程中，它的功率并不是固定不变的。耕马、耕牛在工作一段时间之后功率就要减小。因此严格说来，用公式 (3.6) 求得的功率只是作功物体在时间 t 内的平均功率。一般估计，耕马在长时间作功过程中的平均功率约为 0.6~0.7 马力。

在牵引力和运动位移方向一致的情况下，公式 (3.6) 可以变形为 $N = \frac{W}{t} = \frac{FS}{t}$ ，于是可以列出

$$N = Fv。 \quad (3.7)$$

这是作功机械（简称工作机）实际对外的输出功率的计算公式。对于公式中的 F 、 v ，如果以工作机在某一时刻的即时力

和即时速度代入, 所求得的 N 就是工作机在这一时刻的即时输出功率; 如果以工作机在某段时间内的平均牵引力和平均速度代入, 所求得的 N 就是工作机在这段时间内的平均输出功率。

仔细分析上述公式, 还可以看出它反映了有关输出功率的两条规律:

(1) 当牵引力 F 一定时, 输出功率 N 与它的速度 v 成正比。例如在牵引力一定的情况下, 汽车开得越快, 表明汽车的输出功率也越大。

(2) 当输出功率一定时, 牵引力 F 与它的速度 v 成反比。如果牵引力增大了, 速度就要减小; 要增大速度, 就必须减小牵引力。例如卡车在上坡时, 需要发出较大的牵引力; 但由于卡车的输出功率不能无限增大, 就必须用减小速度的方法来增大牵引力。

[例题 3.8] 上海牌 SH-380 型 32 吨自卸载重大卡车的最大输出功率为 400 马力。问当它的速度达到 45 公里/时时, 它的最大牵引力有多大?

解: 根据功率的计算公式 $N = Fv$, 今已知

最大功率 $N = 400$ 马力 $= 400 \times 75$ 公斤·米/秒,

$$\text{车速 } v = 45 \text{ 公里/时} = \frac{45000}{3600} \text{ 米/秒,}$$

所以卡车的最大牵引力

$$F = \frac{N}{v} = \frac{400 \times 75 \times 3600}{45000} = 2400 \text{ 公斤。}$$

[例题 3.9] 某自动打桩机的重锤质量为 375 公斤, 工作时, 每分钟举 12 次, 每次举高 1.6 米。求它输出的平均功率和在工作时输出的即时功率(假设重锤匀速上升)。

解：自动打桩机只是在把重锤从桩面举高 1.6 米的过程中做功，其他时间如在重锤自由下落和打桩过程中并不做功。因此根据每分钟举 12 次的条件可以算出它输出的平均功率。由于假设重锤匀速上升，自动打桩机对重锤的上举力就等于重锤的重力。因此自动打桩机输出的平均功率

$$N = \frac{W}{t} = \frac{375 \times 1.6 \times 12}{60} \\ = 120 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒} = 1.6 \text{ 马力}。$$

怎样计算自动打桩机工作时输出的即时功率呢？可以运用公式 $N = Fv$ ，关键在于找出重锤匀速上升时的速度。根据每分钟举 12 次的条件可以推知：自动打桩机把重锤举高一次的时间 t 加上重锤自由下落一次的时间 t' 等于 5 秒钟（这里重锤冲击桩体的时间很短，可以忽略不计）。根据自由落体运动公式

$$t' = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6}{9.8}} = \sqrt{\frac{16}{49}} = \frac{4}{7} \text{ 秒}。$$

所以重锤举高 1.6 米的时间

$$t = 5 - t' = 5 - \frac{4}{7} = 4.43 \text{ 秒}，$$

于是重锤匀速上升时的速度

$$v = \frac{h}{t} = \frac{1.6}{4.43} = 0.361 \text{ 米/秒}。$$

那么自动打桩机工作时输出的即时功率

$$N = Fv = 375 \times 0.361 = 135.4 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒} \\ = 1.8 \text{ 马力}。$$

【例题 3.10】某机械厂工人老师傅搞技术革新，利用旧车床进行高速切削。已知车刀消耗的功率是 5 千瓦，当切削

速度被提高到 420 米/分时,问车刀在切线方向上的切削力有多大?

解: 图 3.10 是车床的最简单的切削原理图。工件 W 在转动, 装在刀座 S 上的车刀 K 在缓慢前进切削工件。由于车刀的切削力 F 的方向是和工件上被切削点的运动方向相反的, 因此车刀在作负功, 即车刀在消耗功。车刀所消耗的功率 N 就等于车刀的切削力 F 与被切削点的运动速度 (切削速度) v 的乘积。今已知 $N=5$ 瓩 $=5000$ 瓦, $v=420$ 米/分 $=7$ 米/秒, 所以车刀在切线方向上的切削力

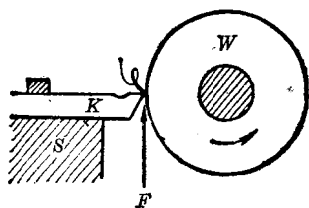


图 3.10 车床上车刀在切削转动的工件

$$F = \frac{N}{v} = \frac{5000}{7} = 714 \text{ 牛顿} = 72.9 \text{ 公斤}.$$

工作机 (如汽车、自动打桩机、车床、拖拉机等) 的输出功率是从哪里来的呢? 任何一种工作机都是在发动机的带动下工作的。例如汽车的发动机是汽油机; 车床的发动机是马达等。所以工作机的输出功率是由它的发动机的功率传递而来的。一般说来, 发动机的功率要比工作机的大些, 因为功率在传递过程中不可避免地要损耗一部分。例如拖拉机的柴油发动机的功率中就有一部分要消耗在轴承、齿轮、变速箱等机构的内部摩擦中、行驶时与地面的滚动摩擦中以及车轮打滑时的空转中。通常我们把工作机的输出功率和它的发动机功率的比叫做工作机的效率, 用字母 η^* 表示。即

* η 是希腊字母, 读作 “ai-ta”。

$$\eta = \frac{N_{\text{出}}}{N_{\text{动}}} \times 100\%, \quad (3.8)$$

式中 $N_{\text{出}}$ 是工作机的输出功率; $N_{\text{动}}$ 是工作机发动机的功率。例如丰收-35 型拖拉机在固定时, 我们可以利用它的发动机通过皮带轮直接拖带水泵等排灌设备以及其他副业生产设备。这时它的功率就近似地等于它的发动机功率 $N_{\text{动}}=35$ 马力。当它在牵引农具或农机耕作时, 挂钩上的牵引功率就是它的输出功率 $N_{\text{出}}$, 约等于 24 马力, 这时拖拉机的效率

$$\eta = \frac{24}{35} \times 100\% = 68.6\%。$$

然而工作机发动机的功率 $N_{\text{动}}$ 也不是固定不变的。按照设计要求每一台发动机都有一个额定功率, 是指正常使用时最适宜的功率。如果负载超出了限度, 如规定装两吨货物的卡车装了两吨多(即超载情况), 发动机的耗油量就要增大。此外还有一个最大功率, 超出这个限度, 发动机就要发生故障。

习题 3.11 在下列各情况下哪些力在作功? 作正功还是作负功? 哪些力不作功?

- (1) 汽车沿平直公路行驶, 刹车后停止;
- (2) 物体沿粗糙斜面下滑, 速度在增大;
- (3) 跳伞员张伞后匀速下降;
- (4) 在细线的向心力作用下的小球在光滑平面上作匀速圆周运动。

习题 3.12 在建造南京长江大桥时使用的预应力梁每根重 120 吨, 用起重机把它匀速地提升, 安装到高 40 米的铁路引桥桥墩上去。问起重机提升一根梁, 作功多少?

习题 3.13 拖拉机耕地时是匀速前进的。假设它所受阻力为 2400 公斤, 前进速度为 100 米/分, 问拖拉机的输出功率有多大?

习题 3.14 牛头刨床工作时, 假设刨刀所克服的阻力为 1000 公斤,

刨刀每切削1次的工作行程为12厘米，每分钟切削50次。求刨床的平均功率。

习题 3.15 总重为2吨的升降机在马达的带动下从地面静止出发加速上升到20米高度时的速度为2米/秒。求升降机在整个加速过程中的平均功率和升到20米高度时的即时功率。

第四节 动能 动能定理

一、动能——机械运动的另一种量度

在上一节里，我们通过汽车在平地上作直线运动的例子说明外力对物体所作的功反映了外力改变物体运动状态的作用大小。那么物体在受到外力对它做功之后，运动状态会发生怎样的变化呢？下面我们再运用运动定律来分析外力对物体做功后物体运动状态的变化规律。

假设质量为 m 的物体在外力的合力 F (常力)的作用下在光滑平面上滑动，摩擦阻力忽略不计(图3.11)。已知物体在某一点的初速度为 v_0 ，在沿着力 F 的方向上滑动一段位移 S 之后速度增大为 v 。很明显，在这一过程中，外力对物体所作的功

$$W = FS。$$

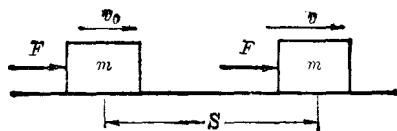


图 3.11 在外力的合力 F (常力) 作用下的运动物体

为了找出外力对物体所作的功与物体运动状态的变化关系，我们必须把上式中的 F 、 S 化为物体的质量 m 和外力做功

前后的速度 v_0 、 v 的关系式。根据运动定律可知 $F=ma$ ，又因 F 是常力，可以推知物体在这一过程中作匀加速运动，即

$$v^2 - v_0^2 = 2aS, \quad S = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}。$$

于是代入上式可得

$$\begin{aligned} W = FS &= ma \cdot \frac{v^2 - v_0^2}{2a}, \\ &= \frac{m}{2} (v^2 - v_0^2), \end{aligned}$$

$$\text{即} \quad FS = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_0^2。 \quad (3.9)$$

在上式中， $\frac{1}{2} mv^2$ 与外力做功后物体的运动状态有关； $\frac{1}{2} mv_0^2$ 与外力做功前物体的运动状态有关。因此 $\frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_0^2$ 反映了外力做功前后物体运动状态的变化情况。

我们把物体的质量 m 和速度的平方 v^2 的乘积的一半叫做物体的动能，用字母 E_k 表示。即

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2。 \quad (3.10)$$

在一定的运动状态下物体具有一定的动能。静止状态下的物体动能等于 0。可见动能和动量一样，也反映了物体的运动状态，它是对机械运动的另一种量度。但是动能和动量是有区别的。物体动量的变化决定于物体所受的外力的冲量，而物体动能的变化决定于物体所受的外力所作的功。关于动能和动量的区别以及它们各自的适用范围将在本章第七节中具体讨论。

动能的单位是由质量和速度的单位组成的。动能的常用单位详见表 3.4。这些动能的单位是与功的单位完全一致的。

表 3.4 动能的常用单位表

单 位 制	质 量	速 度	动 能	力	路 程	功
厘米克秒制	克	厘米/秒	克·厘米 ² /秒 ²	达因	厘米	达因·厘米=尔格
米公斤秒制	公斤	米/秒	公斤·米 ² /秒 ²	牛顿	米	牛顿·米=焦耳

因为

$$1 \text{ 克} \cdot \text{厘米}^2/\text{秒}^2 = 1 [\text{克} \cdot \text{厘米}/\text{秒}^2] \text{ 厘米} \\ = 1 \text{ 达因} \cdot \text{厘米} = 1 \text{ 尔格。}$$

$$1 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2/\text{秒}^2 = 1 [\text{公斤} \cdot \text{米}/\text{秒}^2] \text{ 米} \\ = 1 \text{ 牛顿} \cdot \text{米} = 1 \text{ 焦耳。}$$

物体的动能只有增减,没有方向,而且不会小于0。因此动能不是矢量而是标量。由两个或多个物体构成的系统的总动能就等于系统内各个物体的动能的和。

[例题 3.11] 电子以 10^9 厘米/秒的速度冲击在阴极射线管的荧光屏上。已知电子的质量是 9×10^{-28} 克,求这时电子的动能。

解: 根据动能的公式(3.10)可知这时电子的动能

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \\ = \frac{1}{2} \times 9 \times 10^{-28} \times (10^9)^2 \\ = 4.5 \times 10^{-10} \text{ 尔格。}$$

二、动能定理

掌握了动能的含义之后,再来看前面得出的关系式(3.9)

$$FS = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2,$$

即

$$W = E_k - E_{0k} = \Delta E_k. \quad (3.11)$$

ΔE_k 即为动能的增量, 上式说明外力对物体所作的功等于物体动能的增量。这个结论叫做动能定理。

自由落体下落路程越长, 重力对它作功就越多, 那么落体的动能也越大。运用动能定理也可以推导出自由落体的速度公式。假设质量为 m 的自由落体下落一段路程 h 后速度由 0 增大为 v 。很明显, 它所受的重力为 mg , 重力在这一过程中对落体所作的功为 mgh , 而落体的动能由原来的 0 增大到 $\frac{1}{2}mv^2$ 。因此按动能定理公式 (3.11) 可以列出

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 - 0.$$

把等式两边除以 m , 即可得出自由落体的速度公式:

$$v^2 = 2gh.$$

这一结果与前面按匀加速运动公式所得出的结果完全一致。

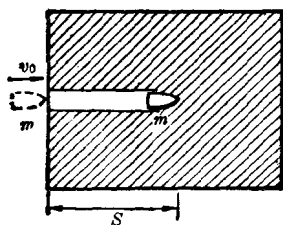


图 3.12 穿入木板的子弹

[例题 3.12] 质量为 10 克的子弹, 以 200 米/秒的速度射入一固定木板, 穿入 4 厘米深处而静止 (图 3.12)。求木板对子弹的平均阻力。

解: 假设木板对子弹的平均阻力为 F 。根据动能定理可知木板对子弹所作的功就等于子弹的动能的增量。即

$$FS = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2.$$

今已知子弹质量 $m=10$ 克 $=0.01$ 公斤, 穿入位移 $S=4$ 厘米 $=0.04$ 米, 子弹初速度 $v_0=200$ 米/秒, 末速度 $v=0$ 。代入上式得

$$0.04F = 0 - \frac{1}{2} \times 0.01 \times (200)^2 = -200.$$

所以木板对子弹的平均阻力

$$F = -\frac{200}{0.04} = -5000 \text{ 牛顿}.$$

负号表示平均阻力 F 的方向与子弹运动的方向正好相反。

这里特别要注意, 在运用动能定理实际问题时, 必须考虑到动能的单位与功的单位的一致性。在上述例题中, 由于采用了米公斤秒单位制, 因此质量 m 、速度 v 与位移 S 的单位都必须化为公斤、米/秒与米, 而求得平均阻力 F 的单位就是牛顿。

从上述例题中还可以看出, 由于木板对子弹所作的是负功, 因此子弹动能的增量是负的, 即子弹的动能逐渐减小为 0。或者说子弹在进入木板后, 克服木板对它的阻力而作了功, 因此本身的动能就逐渐减小到 0。

总之, 如果外力对物体作正功, 物体的动能就要增加; 外力对物体作多少正功, 物体动能就增加多少。如果外力对物体作负功, 物体的动能就要减少; 外力对物体作多少负功, 物体动能就减少多少。换句话说, 如果物体克服阻力做功, 物体本身的动能就要减少。物体克服阻力作多少功, 本身的动能就减少多少。

具有动能的物体可以作功的例子很多。在很早以前我国劳动人民就已在生产实践中利用风力、水力来代替人力作功。例如利用空气的动能推动风车, 带动水车引水灌溉农田; 利用

河水的动能冲击水轮机的叶片，使水轮机转动做功。此外象煤矿中用高速喷射的水流采挖煤层、蒸汽轮机中用高速蒸汽推动叶轮转动等也都是利用动能做功的例子。因此我们有时可以把能看作是物体所具有的做功本领，把动能看作是物体由于运动所具有的做功本领。物体具有多少动能，它就可以作多少功。这种说法是与动能定理完全一致的。

[例题 3.13] 一机车沿水平轨道以 10.8 吨的牵引力拖着 1200 吨的列车(包括机车本身的重量)从车站出发，假设在行驶中列车所受阻力是车重的 0.003 倍。求列车出站 200 米后的速度。

解：根据动能定理，外力对列车所作的功等于列车动能的增量。这列车在行驶中受到两个力的作用，牵引力 F 作正功；阻力 f 作负功。因此可以列出：

$$FS - fS = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2.$$

今已知机车牵引力 $F = 10.8$ 吨 $= 10800 \times 9.8$ 牛顿，

阻力 $f = 0.003 \times 1200$ 吨 $= 3600 \times 9.8$ 牛顿，

列车质量 $m = 1200$ 吨 $= 1200000$ 公斤，

列车初速度 $v_0 = 0$ ，

位移 $S = 200$ 米。

代入上式可得

$$(10800 - 3600) \times 9.8 \times 200 = \frac{1}{2} \times 1200000 v^2,$$

即 $3000 v^2 = 7200 \times 9.8$ 。

所以列车出站 200 米后的速度

$$v = \sqrt{\frac{72 \times 9.8}{30}} = 4.85 \text{ 米/秒}.$$

习题 3.16 一颗机枪子弹质量为 50 克, 射击时的出膛速度为 800 米/秒; 一座锻压机的重锤质量为 500 公斤, 工作时的打击速度为 8 米/秒。比较它们的质量、速度和动能。

习题 3.17 32 吨矿用自卸载重汽车, 自重 22 吨, 额定载重量为 32 吨, 最大车速为 45 公里/小时, 求空载时和满载时的最大动能。

习题 3.18 一辆重 2 吨的解放牌卡车, 在一条笔直的水平公路上行驶, 它的速度在 14 秒时间里, 由 46.8 公里/时增大为 72 公里/时。问卡车的动能增大多少? 假设卡车在行驶中所受阻力是车重的 0.02 倍, 问卡车至少需要多大功率?

习题 3.19 海燕牌 SWH-600 型微型货车的总重量为 1080 公斤, 最大车速为 65 公里/时。为了保证行车安全, 汽车的制动装置要能使车在 2.5 米的距离内停下来, 问此车需要的平均制动力至少应为多大? (不考虑地面的摩擦阻力。)

第五节 重力势能

一、势能

我们知道外力, 对原来静止物体做功时, 物体具有了速度, 获得了动能, 从而具有了做功本领。现在来分析另一种情况。蒸汽打桩机用高压蒸汽把重锤匀速地向上推时, 重锤的速度虽然没有改变, 但是这时重锤也具有了做功的本领, 获得了能量。因为重锤在自由下落时可以做功, 而且离地面越高, 可以作的功越多, 说明具有的能量也越多。钟表里的发条, 在受到外力做功而被卷紧之后也具有了做功的本领, 获得了能量, 因为它在逐渐放松时可以推动一系列齿轮转动而做功。

我们把具有相互作用的物体系统, 由于相对位置不同而具有的做功本领 (例如重锤和地球所构成的物体系统由于重锤离地面一定高度而具有的做功本领), 或由于物体内部各部分之间的相对位置不同而具有的做功本领 (例如钟表里的发

条由于被卷紧而具有的作功本领)叫做势能,或者叫做位能。

二、重力势能

卷紧的发条所具有的势能与弹力有关。因为发条在逐渐放松时,实际上是发条的弹力在推动齿轮转动而作功,所以我们把物体由于弹性形变而具有的势能叫做物体的弹性势能。

离地面一定高度的重锤所具有的势能与重力有关。因为重锤在自由下落过程中,实际上是重锤的重力在作功,通常把物体由于离地面一定高度而具有的势能叫做重力势能。然而这个重力势能并不只是离地面一定高度的物体所具有的,如果没有地球,物体也就没有重力,也就无所谓重力作功了。故物体的重力势能,实际上应称作“物体和整个地球所构成的系统所具有的重力势能”,“物体的重力势能”只是简称。

物体的重力势能是怎样进行量度的呢?假设质量为 m 的物体 A ,距地面有一定高度 h 。现在用绳把它通过滑轮与一个放在粗糙水平桌面上的物体 B 相连接(图3.13)。如果物体 B 在物体 A 的拉动下恰好作匀速直线运动,这表明物体 A 对物体 B 的拉力恰好与物体 B 所受的摩擦力大小相等,方向相反;而且在不考虑滑轮摩擦的情况下,物体 A 在匀速下落过程中,对物体 B 的拉力就等于它的重力 mg 。物体 A 下落一段高度 h 就等于拉物体 B 向前滑动一段距离 h ,即对物体 B 所作的功就等于 mgh 。同时物体 A 在下落过程中,由于速度不变,动能没有发生变化。它能作功显然是因为它具有重力势能,故物体 A 在这一高度上的重力势能可以用它对物体 B 所作的功 mgh 来进行量度。因此我们把质量为 m 的物体的重力 mg 和它离地面的高度 h 的乘积叫做物体的重力势能,用字母 E_p 表示。即

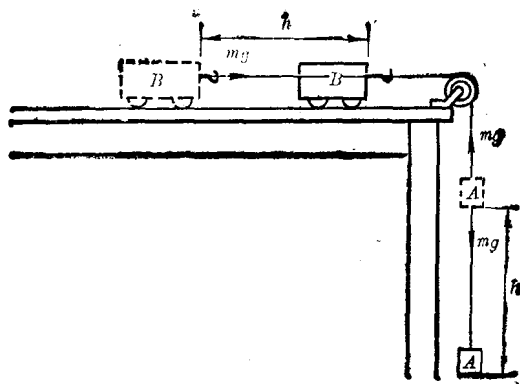


图 3.13 在匀速下落过程中作功的物体

$$E_p = mgh. \quad (3.12)$$

重力势能的单位是由质量、加速度和长度的单位组成的。常用的重力势能单位详见表 3.5。这些重力势能的单位与动能、功的单位是完全一致的。重力势能和动能以及其他任何形式的能量一样,是标量而不是矢量。

表 3.5 重力势能常用单位表

单 位 制	质 量	加 速 度	高 度	重 力 势 能	动 能	功
厘米克秒制	克	厘米/秒 ²	厘米	克·厘米 ² /秒 ²	克·厘米 ² /秒 ²	尔格
米公斤秒制	公斤	米/秒 ²	米	公斤·米 ² /秒 ²	公斤·米 ² /秒 ²	焦耳

严格说来,重力势能的数值具有相对性。通常我们规定地面上的物体的重力势能为 0,但并不等于说地面上的物体绝对没有重力势能。如果地面有洞,物体下落还可以继续作功,况且地面本身也是高低不平的,在我国西藏高原的地面要

比沿海地区的地面高出很多。因此在量度重力势能时，必须事先规定重力势能为 0 的水平面叫做零势面，而 h 是指从零势面算起的高度。

[例题 3.14] 质量为 m 的物体从倾角为 α ，高度为 h 的光滑斜面顶端下滑到斜面底端。问在这一过程中，物体的重力作了多少功(图 3.14)?

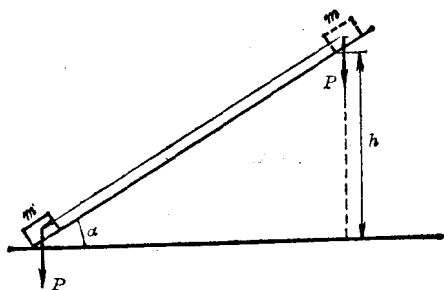


图 3.14 从光滑斜面顶端下滑的物体

解：由于物体的重力 $P=mg$ ，而物体下滑的位移 $S = \frac{h}{\sin \alpha}$ ， P 与 S 之间的夹角 $\theta=90^\circ-\alpha$ 。根据功的公式(3.5)可知重力所作的功

$$\begin{aligned} W &= PS \cos \theta = mg \frac{h}{\sin \alpha} \cos(90^\circ - \alpha) \\ &= mgh \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha} = mgh. \end{aligned}$$

从上述例题结果可以看出，从斜面上下滑的物体，它的重力所作的功只与物体下降的高度有关，而与斜面的倾角的大小以及斜面的长度没有关系。进一步的研究还表明，在地面附近物体由一点移到另一点，重力所作的功的多少只与始末两点的位置有关，而与物体通过的路径毫无关系。重力的这

个特点很重要,它表明在任何一点位置上物体下落到地面,重力所作的功都有确定的值,并不会由于物体下落的路径不同而有所改变。我们就是依据这个确定的值来量度物体在任何一点位置上的重力势能的,即如公式(3.12)所示。一般地说,对于质量为 m 的物体,如果它原来距地面高度为 h_0 ,重力势能 $E_{0p}=mgh_0$,在重力做功的情况下距地面高度改变为 h ,重力势能改变为 $E_p=mgh$,那么重力对它所作的功

$$W_p = -(mgh - mgh_0),$$

即

$$W_p = -(E_p - E_{0p}) = -\Delta E_p. \quad (3.13)$$

上式表明重力所作的功就等于物体重力势能的增量的负值。这就是重力所作的功与物体重力势能的变化关系。

为什么外力对物体作正功后,物体的能量有所增加,而重力对物体作正功后,物体的重力势能反而减少呢?首先应该明确,对于由物体和整个地球所构成的系统说来,物体的重力并不是外力。离地面一定高度的物体所以具有一定的重力势能就是因为它的重力可以作一定的功。在重力作了一些正功之后,物体离地面的高度减小了。这时重力所能作的功显然要减小,重力势能也减小了,可见重力所作的功是以重力势能的减少为代价的。这就是为什么重力作正功后物体的重力势能要减少的原因。

习题 3.20 喷气式客机总重 75 吨,在把它匀速地升高 2500 米的过程中,重力作了多少功?喷气发动机作了多少功?客机的重力势能有何变化?

习题 3.21 质量为 1 吨的蒸汽打桩机重锤从 20 米高处落到 18.5 米高的桩面上,问在这过程中重力做功多少?重锤的重力势能发生了多大的变化?

第六节 机械能守恒定律 功能定理

一、机械能

在前几节里,我们讨论了动能和势能。物体在某一运动状态(具有某一速度,在某一位置)所具有的动能和势能(包括重力势能和弹性势能)的总和称为机械能。假设质量为 m 的物体,离地面高度为 h ,运动速度为 v ,在这一状态下,物体所具有的机械能即为

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + mgh. \quad (3.14)$$

二、机械能守恒定律

【例题 3.15】 假设把质量为 20 公斤的夯体上举到离地面 5 米高处。问: (1) 夯体静止在离地面 5 米高处时,它的机械能有多大? (2) 如果夯体开始自由下落,当它下落到离地面 2.5 米高处时,它的机械能又是多大? (3) 当它自由下落到地面前一瞬间,它的机械能又是多大(图 3.15)?

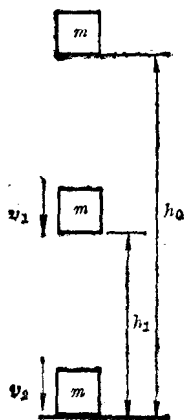


图 3.15 自由下落的夯体

解: (1) 夯体静止在离地面 5 米高处时,因为 $m=20$ 公斤, $h_0=5$ 米, $v_0=0$, 所以动能 $E_{0k}=0$, 重力势能 $E_{0p}=mgh_0$, 机械能 $E_0=E_{0k}+E_{0p}=mgh_0=20 \times 9.8 \times 5=980$ 焦耳。

(2) 夯体自由下落到离地面 2.5 米高处时, $h_1=2.5$ 米, 根据公式 (2.12)

$$v_1^2 = 2g(h_0 - h_1) = 2 \times 9.8 \times 2.5 = 49 \text{ 米}^2/\text{秒}^2,$$

$$v_1 = 7 \text{ 米/秒}。$$

所以动能 $E_{1k} = \frac{1}{2}mv_1^2$, 重力势能 $E_{1p} = mgh_1$, 机械能

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{1k} + E_{1p} = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 \\ &= \frac{1}{2} \times 20 \times 7^2 + 20 \times 9.8 \times 2.5 = 980 \text{ 焦耳}。 \end{aligned}$$

(3) 物体落到地面前一瞬间, $h_2 = 0$, $v_2^2 = 2gh_0 = 2 \times 9.8 \times 5 = 98 \text{ 米}^2/\text{秒}^2$, 因此 $v_2 = \sqrt{98} = 7\sqrt{2} \text{ 米/秒}。$

所以动能 $E_{2k} = \frac{1}{2}mv_2^2$, 重力势能 $E_{2p} = 0$, 机械能

$$E_2 = E_{2k} + E_{2p} = \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2} \times 20 \times 98 = 980 \text{ 焦耳}。$$

计算结果表明物体在自由下落过程中, 动能和重力势能虽然有所变化, 但是机械能总是保持 980 焦耳不变。这个现象究竟是偶然的巧合, 还是必然的规律呢? 下面就用功能关系来分析:

假设 1、2 是质量为 m 的物体在自由下落过程中的任意两个位置 (图 3.16)。物体在这两个位置上的速度分别为 v_1 、 v_2 ; 离地面的高度分别为 h_1 、 h_2 。物体在自由下落过程中动能的增大显然与重力做功有关, 而它的重力势能的减小也与重力做功有关。如果物体在自由下落经过位置 1 到位置 2 的过程中重力所作的

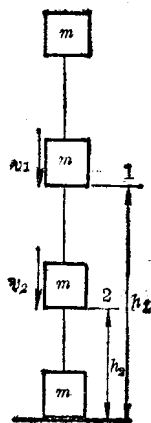


图 3.16 机械能守恒
(1、2 是物体自由下落过程中的任意两个位置)

功为 W_p 。根据动能定理公式(3.11)可以列出:

$$W_p = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2;$$

又根据重力所作的功与物体重力势能的变化关系(3.13)可以列出

$$W_p = -(mgh_2 - mgh_1)。$$

将上式代入可以得出

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = -(mgh_2 - mgh_1),$$

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

这表明物体在这两个位置上的机械能是相等的。由于这两个位置是任意取的,这就表明物体在整个自由下落过程中不论它的动能、重力势能如何变化,而它们的和,物体的机械能始终保持不变。

进一步的实践与理论研究表明,上述规律不仅适用于自由落体的运动过程,对于任何物体或由两个以上物体构成的系统说来,除重力外,没有其他任何外力或内力对它做功,它的动能和重力势能可以不断变化,相互转化,但系统的机械能始终保持不变。即

$$\Sigma E = \Sigma \left(\frac{1}{2}mv^2 + mgh \right) = \text{恒量。} \quad (3.15)$$

这个结论叫做机械能守恒定律。从机械能守恒定律可以看出,重力对物体所作的功可以使物体的动能和重力势能相互转化,但并不会使物体的总机械能发生变化。

三、功能定理

我们已经知道,物体在只受重力做功的情况下,机械能将

保持不变。如果物体在受重力做功的同时还受到其他外力对它做功，那么物体的机械能就要发生改变。例如起重机在把货物从地面上匀速提起时，货物的机械能就要随着重力势能的增大而增大；跳伞运动员在匀速降落时，除重力做功外，还要受到空气阻力对他作负功，因此他的机械能就要随着重力势能的减小而减小；正在上坡的拖拉机，除受到重力做功外，还要受到发动机的牵引力和摩擦阻力对它做功，因此它的机械能也在不断发生变化。

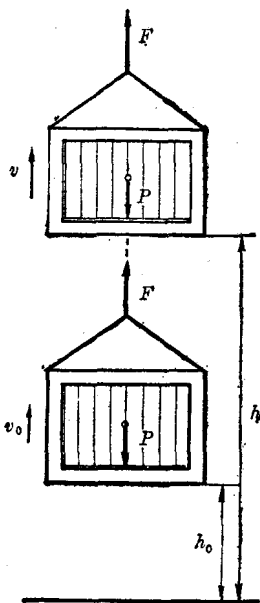


图 3.17 货物在起重机的作用下上提

假设质量为 m 的货物在起重机的作用下，由原来距地面高度为 h_0 处提到距地面高度为 h 处，速度由原来的 v_0 增大为 v ，如图 3.17 所示。设起重机对货物的上提力为 F ，空气阻力为 f 。先在不考虑重力势能的情况下，运用动能定理公式 (3.11) 可以列出

$$W_F + W_f + W_p = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2,$$

式中 W_F 是起重机所作的功； W_f 是空气阻力所作的功； W_p 是重力所作的功，而货物上提的位移 $S = h - h_0$ 。很明显 W_F 是正的，而 W_f 、 W_p 都是负的。

再根据重力所作的功与货物重力势能的变化关系列出

$$W_p = -(mgh - mgh_0).$$

代入上式可得

$$W_F + W_f - (mgh - mgh_0) = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2,$$

$$W_F + W_f = \left(\frac{1}{2}mv^2 + mgh\right) - \left(\frac{1}{2}mv_0^2 + mgh_0\right),$$

即

$$\Sigma W = E - E_0 = \Delta E. \quad (3.16)$$

上式表明:除重力外,其他外力对货物所作的功的总和就等于货物的机械能的增量。为什么重力要除外呢?因为重力所作的功只能使物体的重力势能和动能相互转化,并不会影响物体的机械能的变化。进一步的研究表明,上述规律不仅适用于物体在铅直方向上的运动过程。在任何运动过程中,除重力外,其他外力对物体(或系统)所作的功的总和就等于物体(或系统)的机械能的增量。这个结论叫做功能定理。

通过功能定理,我们可以更清楚地了解功和能的区别与联系。功和能虽然都是标量,它们的单位也相同,但是它们却是在本质上完全不同的两个物理量。能是用来反映物体的运动状态的物理量。处于一定的运动状态,物体就具有一定的能量。做功的过程是物体的相互作用的过程,也就是能量从一物体传递给另一物体的过程。因此功是用来反映某一过程中物体间能量传递了多少的物理量。

运用功能定理还可以来解决有关力学的实际问题。

[例题 3.16] 总重为 7.5 吨的交通牌载重汽车从静止起开上一山坡,坡度为 0.02,在行驶 200 米后,汽车速度增大到 36 公里/小时。如果阻力是车重的 0.03 倍,问汽车在上坡时的平均牵引力有多大(图 2.31)?

解:本例题曾在上一章出现过(即例题 2.12),当时是运用运动定律来解的,这里运用功能定理来解。首先考虑汽车

在上坡行驶 200 米这段运动过程中,除重力外,有哪些力对汽车作了功。参看图 2.22 可知,在这过程中平均牵引力 F 对汽车作正功 FS ,阻力 f 对汽车作负功 $-fS$ 。上坡前汽车的机械能 $E_0=0$,上坡 200 米后汽车的机械能 $E=\frac{1}{2}mv^2+mgh$ 。于是根据功能定理公式(3.16)可以列出

$$\Sigma W = E - E_0,$$

$$FS - fS = \frac{1}{2}mv^2 + mgh - 0.$$

今已知汽车总质量 $m=7.5$ 吨 $=7500$ 公斤;阻力 $f=0.03P=0.03 \times 7500 \times 9.8$ 牛顿; $S=200$ 米, $v=36$ 公里/时 $=10$ 米/秒, $h=200 \times 0.02=4$ 米。代入得

$$\begin{aligned} 200F - 0.03 \times 7500 \times 9.8 \times 200 \\ = \frac{1}{2} \times 7500 \times 10^2 + 7500 \times 9.8 \times 4 \end{aligned}$$

所以汽车的平均牵引力

$$F = \frac{7500 \times 148}{200} = 5550 \text{ 牛顿} \approx 566 \text{ 公斤}.$$

从上面的例题可以看出,运用功能定理来解决有关力学的实际问题的方法与运用运动定律完全不同。归纳起来可分下列五个步骤进行:

- (1) 决定考虑物体(或系统)的哪一段运动过程。
- (2) 分析物体在这段运动过程中的受力情况。除重力外,有哪些外力对物体作了功,分别列出它们各作了多少功,是正功还是负功。
- (3) 分析物体在这段运动过程前后的机械能,分别列出它们各是多少。
- (4) 根据功能定理可以列出包含未知量的等式,将已知

数据代入即可把未知量计算出来。

(5) 检验计算结果是否正确、合理。

四、能量守恒定律

我们知道,当一个物体对另一物体作正功后,这个物体的机械能就要减少,而另一物体的机械能就要增多。然而两个相互摩擦的物体,由于彼此都要克服阻力做功,它们的机械能都会减少。那么这两个物体所失去的机械能都到哪里去了呢?是被消灭了吗?不是。大家都知道相互摩擦的物体会产生热,所谓“摩擦生热”。很明显这个热决不是无中生有地产生出来的。物体在克服阻力做功的过程中,一部分机械能转化成了热,使物体本身和周围物体的温度有所升高。这就是“摩擦生热”的根本原因。所以物体克服阻力做功的过程,实际上就是机械能从这个物体传递给其他物体并转化成其他形式的能的过程。

能量从一种形式转化成另一种形式的例子是很多的,现在就拿我们农村中的小型水力发电站来举例。先是上游和下游水位的高低不同造成了水的快速流动,这样水的重力势能就在重力做功的过程中转化成动能。当高速的水流推动水轮机转动后,水流的速度就减小了,但发电机在水轮机的带动下,也发生了转动而发出了电流,即水的动能又进一步变成了电能。电能通过输电线送到各处,在那里又可以转化成各种其他形式的能。如在电灌站里通过电动机(马达)带动抽水机,电能又转化成水的重力势能、动能,使它流入渠道去灌溉农田;在居民点上,通过电灯,电能又转化成热,使灯丝发热发光;在社办工厂里,通过电动机带动各种类型的机床,电能又转化成机械能。因此所有的发动机和工作机都可以看作是能

量转化的装置。

能量可以从一种形式转化成另一种形式，但是能量不能创造，也不会消灭；总能量是守恒的。这个结论就叫做能量转化与守恒定律，或者简称能量守恒定律。

这个结论是从大量的生产实践和科学实验中总结出来的。它是自然界中最普遍和最重要的定律之一。它适用于任何变化过程，不论是机械的、热的、电磁的、原子和原子核内的，甚至化学的、生物的变化过程等等。

革命导师恩格斯曾经对能量守恒定律作过很高的评价，认为它是在确立辩证唯物主义世界观的历史过程中在自然科学上具有决定意义的三大发现之一（另外两个发现是细胞的发现和进化论的发现）。他认为正是由于能量守恒定律的发现，才使自然界的一切运动都可以归结为一种形式向另一种形式不断转化的过程，从此，“自然界中整个运动的统一，现在已经不再是哲学的论断，而是自然科学的事实了。”

习题 3.22 用 28 米/秒的初速度竖直上抛的物体在到达多大的高度时，它的动能和重力势能恰好相等？（不考虑空气阻力。）

习题 3.23 公路上有一段长 100 米，高 10 米的斜坡路，某人骑自行车下坡时没有蹬踏板，假设他是以 6 米/秒的初速下坡的，到达坡路末端时速度为 8 米/秒。如果车与人一起重 80 公斤，求他在下坡过程中所受的平均阻力。

第七节 机械运动的两种量度

动量和动能都反映了物体的运动状态，它们都是用来量度机械运动的。那么它们究竟有何不同呢？这个问题早在十八、十九世纪就有过长期的争论。后来革命导师恩格斯为了分清这两种量度的本质区别，在《自然辩证法》一书中作了详尽

的分析,他指出:“机械运动确实有两种量度……每一种量度适用于某个界限十分明确的范围之内的一系列现象。……一句话, mv 是以机械运动来量度的机械运动; $\frac{1}{2}mv^2$ 是以机械运动所具有的变为一定量的其他形态的运动能力来量度的机械运动。”这就是说,在同一水平面上的运动系统,当由于相互作用而运动发生变化时,它们的机械运动就可以用动量来量度。系统的动量变化决定于系统所受外力的冲量(动量定理)。如果除相互作用外,其他外力等于零,或可以忽略不计,那么系统的合动量就保持不变(动量守恒定律)。当物体在运动过程中,如果要涉及到机械运动和其他,如热、电等运动形态之间的转化(例如当物体离地面的高度发生变化时,就要涉及到机械运动与重力势能之间的转化;在克服阻力做功时,就要涉及到机械运动与热运动之间的转化),机械运动就要用动能来量度。系统的动能变化决定于系统所受外力所作的功(动能定理)。对于一个运动系统说来,除重力外,如果没有其他任何外力或内力对它做功,系统的动能和重力势能的总和始终保持不变(机械能守恒定律)。此外还必须注意到:动量是矢量,而动能是标量。

[例题 3.17] 图 3.18 是专门用来测量飞行中的子弹速度的装置——冲击摆。假设质量为 m 的子弹以水平速度 v 射入沙箱后,沙箱连同子弹一起摆动到某一高度 h ,若沙箱质量为 M ,证明子弹射入沙箱前的水平速度 $v = \left(1 + \frac{M}{m}\right)\sqrt{2gh}$ 。

解:这个题目可以分两个阶段来考虑:

(1) 子弹以水平速度 v 射入沙箱后与沙箱一起具有一个水平的共同速度 V (图 3.18a)。子弹是在同一水平面内运动,子弹与沙箱组成的系统的动量守恒,由此可以列出,

$$mv = (M+m)V。$$

在这一瞬间尽管系统的势能没有改变,但机械能并不守恒,也就是动能并不守恒。这是因为当子弹射入沙箱时,子弹和沙粒都要克服阻力做功,在这个做功过程中,部分动能就转化成热和声等形式的能量。

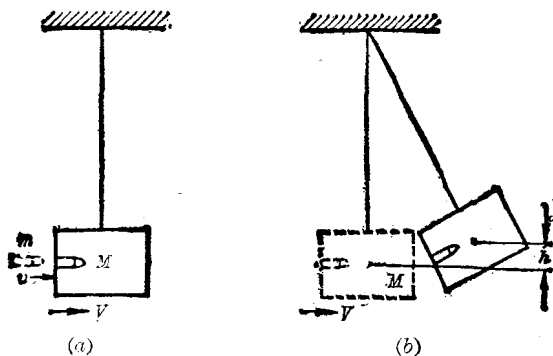


图 3.18 冲击摆

(2) 沙箱连同子弹按共同的初速度 V 一起摆动到高度 h (图 3.18b)。在这一过程中由于有高度的变化,因此不能再用力学量来量度机械运动。同时在这一过程中除有重力作用外,还有绳子对沙箱的拉力。但是这个拉力是和沙箱运动方向始终垂直的,表明它对沙箱并不做功。所以机械能守恒定律可以适用。由此可以列出

$$\frac{1}{2}(M+m)V^2 = (M+m)gh,$$

即
$$V = \sqrt{2gh}。$$

代入前式可得

$$v = \frac{M+m}{m}\sqrt{2gh} = \left(1 + \frac{M}{m}\right)\sqrt{2gh}。$$

复 习 题

习题 3.24 只具有能量而没有动量的物体是否存在？为什么？只具有动量而没有能量的物体是否存在？为什么？

习题 3.25 举重运动员可以举起比自己的体重重得多的杠铃，为什么不能把自己举起来？

习题 3.26 民兵训练中所用的步枪重 4 公斤，子弹重 10 克。假设子弹的出膛速度为 600 米/秒，求子弹出膛时，步枪的反冲速度有多大？如果民兵在射击时以 0.05 秒的时间阻止枪托后退，求作用在民兵肩上的平均冲力有多大？

习题 3.27 把一袋粮食扛到粮囤上去，所作的功与搬运的快慢是否有关？

习题 3.28 在汽车输出功率一定的情况下，为什么满载货物时要比空载时走得慢？

习题 3.29 飞机场上用汽车牵引飞机入库。若汽车的牵引力为 3000 牛顿，牵引角 $\theta = 15^\circ$ ，求牵引距离为 200 米时汽车所作的功。

习题 3.30 在一段长为 2 公里的平直铁路上重 2000 吨的列车速度由 54 公里/时增大到 72 公里/时，假设列车所受的阻力是车重的 0.003 倍，问在这一段路程上机车的平均功率有多大？

习题 3.31 重 5.5 吨的卡车能在关闭油门的情况下以 30 公里/时的速度匀速地从一个坡度为 0.03 的斜坡上驶下来，问这辆卡车需有多大的功率才能以同样大的速度开上斜坡？

(提示：以同样大的速度上坡时所受的阻力与下坡时相同。)

第四章 简单机械和机械传动

毛主席教导我们：“抓着了世界的规律性的认识，必须把它再回到改造世界的实践中去”。前几章我们学习了力和运动的各种性质和有关的规律性。在这一章里，就来讨论这些规律性在工农业生产技术上的应用。

人工翻地要用铁镢；机耕要用到拖拉机。车间里、工地上起重要用吊车、起重机；制造机器零件要用到各种机床。一般说来，凡是用来改变力的大小、方向，能节省人力甚至代替人力工作的设备、装置统称机械。然而不论多么复杂的机械，总是由一些简单机械组合而成的。因此，先来学习几种简单机械的原理，对于今后分析研究各种复杂机械中各个部件的作用是有帮助的。

第一节 杠 杆

一、杠杆的平衡条件

大寨在开山移石时，常用一根结实的撬棒，依靠人力将很重的大石块撬下山去（图 4.1）。这根撬棒就是一种简单机械，通常叫做杠杆。我们在用铁镢翻地、用粪勺浇地、用铡刀切草时，这些工具也都可以看作杠杆。杠杆就是一根可以围绕一点转动的棒。在杠杆上总可以找到“三点两臂”。工作时固定不动的一点叫支点；使杠杆转动的动力的作用点叫动力点；

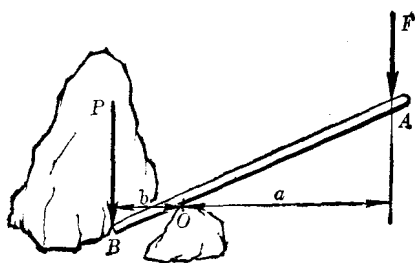


图 4.1 撬棒

杠杆克服阻力的作用点叫阻力点。动力和阻力对支点的力矩的力臂分别叫做动力臂和阻力臂。例如在图 4.1 中, F 是使撬棒转动的动力, P 是撬棒所克服的阻力, 即石块的重力。因此 O 点是支点; A 点是动力点; B 点是阻力点。 a 是动力臂; b 是阻力臂。当动力和阻力的方向与撬棒垂直时, 动力臂 $a=OA$, 阻力臂 $b=OB$ 。

为什么利用撬棒可以省力呢? 根据力矩的平衡条件可知, 当杠杆在平衡时, 即静止不动或在作匀速转动时, 合力矩等于 0。即

$$Pb - Fa = 0,$$

所以

$$\frac{F}{P} = \frac{b}{a}$$

或

$$F = \frac{b}{a} P. \quad (4.1)$$

上式表明: 动力与阻力之比就等于它们的力臂的反比。这一关系对于所有的杠杆都是适用的, 叫做杠杆平衡条件。在图 4.1 的例子中, 由于动力臂是阻力臂的 4 倍, 因此动力是阻力的 $1/4$ 。所以利用撬棒可以省力。

二、杠杆的种类

杠杆的种类是多种多样的，习惯上按照支点在杠杆上位置的差别，把杠杆分成三类：

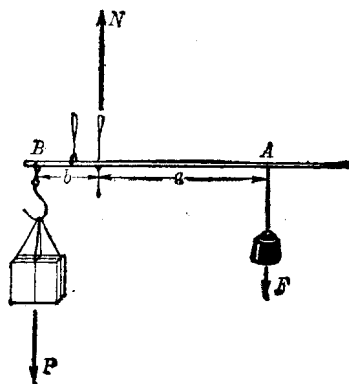
(1) 支点居中的杠杆

例如天平、杆秤、钢丝钳、剪刀等都属于这一类(图 4.2)。

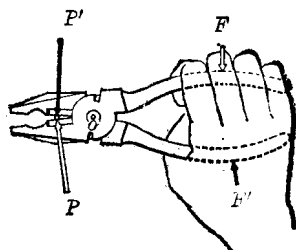
在使用杆秤(图 4.2a)时，秤纽处是支点；待称物体的重量可以看作阻力 P ，秤锤的重量可以看作动力 F ，因而挂秤钩、秤锤处 B 、 A 分别为阻力点、动力点。如果秤杆的重量忽略不计，在杆秤平衡时就可以从动力臂 a 的长度推算出待称物体的重量

$$P = \frac{a}{b} F^*.$$

从杠杆的受力情况分析可知，在秤的支点上杠杆还受到支持力 N ，相当于拎秤纽的手指所用的力。但支持力对支点的力矩等于 0，表明它对杠杆的转动不起作用。钢丝钳、剪刀等工具都可以看作是由两个形状对称的杠杆所组成(图 4.2b)。



(a) 杆秤



(b) 钢丝钳

图 4.2 支点居中的杠杆

* 实际计算中必须考虑秤杆本身的重量 W ，设秤杆重心到支点的距离为 c ，

$$\text{那么 } P = \frac{a}{b} F + \frac{c}{b} W.$$

它们具有同一个支点(即它们的联接点), 因而在支点上
的支持力大小相等、方向相反, 是相互平衡的。

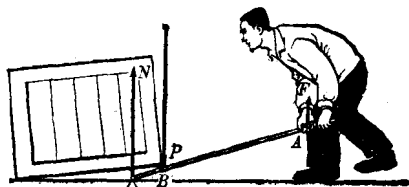
这一类杠杆的特点是动力 F 与阻力 P 同向, 而与支持力 N 反向, 因此 $N = F + P$ 。当动力臂大于阻力臂时, 动力就小于阻力, 杠杆可以省力; 当动力臂等于阻力臂时, 动力就等于阻力, 杠杆不能省力; 当动力臂小于阻力臂时, 动力就大于阻力, 杠杆反而费力。

(2) 阻力点居中的杠杆

例如切稻草用的铡刀就属于这一类(图 4.3a)。有时为了要替大木箱套上粗绳, 常用一根撬棒的一端伸进箱底, 然后向上用力, 把大木箱的底部抬空(图 4.3b)。这时的撬棒就是阻力点居中的杠杆。



(a) 铡刀



(b) 撬棒

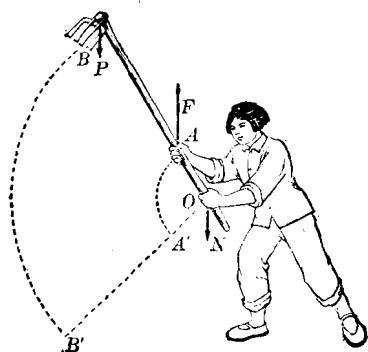
图 4.3 阻力点居中的杠杆

这一类杠杆的特点是动力 F 与阻力 P 反向, 而与支持力 N 同向。同时由于阻力点居中, 阻力臂总是小于动力臂, 因此动力总是小于阻力, $N = P - F$ 。所以这一类杠杆是省力杠杆。

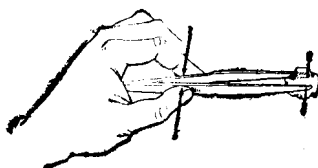
(3) 动力点居中的杠杆

在翻地时, 为了把铁锎举高, 往往左手握住铁锎柄的一

端^{*}，右手乘势向上用力(图 4.4a)。这时的铁镐就是动力点居中的杠杆。此外象锄头、铁铲、复打稻谷用的连枷、浇地用的粪勺等也都属于这一类。用来取轻小物体的镊子(图 4.4b)就是两个形状对称的这种杠杆组成的。



(a) 举高的铁镐



(b) 镊子

图 4.4 动力点居中的杠杆

这一类杠杆的特点是动力 F 与阻力 P 、支持力 N 都反向。同时由于动力点居中，动力臂总是小于阻力臂，因此动力总是大于阻力， $N = F - P$ 。然而这一类的杠杆的主要作用

^{*} 实际上左手也在动，为分析方便起见，把左手握处作为支点看待。

是省距离，就拿翻地时举高铁铤来说(图 4.4a)，在举高过程中，右手移动的距离是 $\widehat{A'A}$ ，显然要比铁铤移动的距离 $\widehat{B'B}$ 短得多。所以这一类杠杆是省距离杠杆。我们在运用这类农具时，双手要握得后些，使支点与动力点偏在柄的后端才能做到操作方便。

〔例题 4.1〕 要把装机器的木箱底部抬空几厘米以便穿进粗绳捆好让吊车运走(图 4.3b)。为此用长 1.8 米的铁撬棒的一端塞进箱底约 10 厘米后，在另一端用力向上抬。如果木箱重 0.5 吨，重心在木箱的中心上，问大约需要用多大的力向上抬才行？

解：假设木箱底部已被抬空，由于箱底的倾角很小，重心就在木箱的中心上，因此铁棒在 B 点所克服的阻力 P 约为木箱重量的一半，即 $P = \frac{1}{2} \times 500 = 250$ 公斤。然后再根据杠杆

平衡条件(4.1)可知在铁棒 A 点所用向上的动力

$$F = \frac{b}{a} P = \frac{OB}{OA} P = \frac{10}{180} \times 250 \\ = 13.9 \text{ 公斤。}$$

有些杠杆的结构，三点并不在一直线上。例如在用榔头拔铁钉时，榔头起了杠杆的作用(图 4.5a)，而 O 、 A 、 B 三点并不在一直线上。对于这种杠杆，平衡条件(4.1)依然适用。至于支点 O 上支持力 N 的大小和方向可按三力平衡的条件来确定(图 4.5b)。

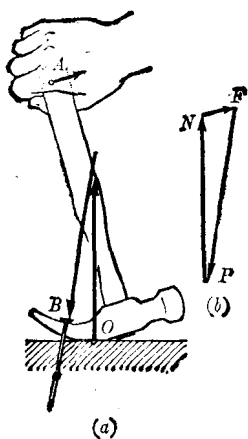


图 4.5 用羊角榔头拔铁钉

习题 4.1 在称量较长的木材时, 可以先将木材的一端着地, 另一端搁在落地磅秤的平台面上, 称得一个数字; 然后反过来将另一端着地, 称这一端。不论木材的重心在哪一点上, 两次称量的总和就是木材的重量。试用杠杆原理来分析证明这种方法的正确性。

习题 4.2 工厂里剪铁片用的剪刀为什么刀口特别短而握柄较长? 理发用的剪刀为什么刀口特别长而握柄较短?

习题 4.3 铁鎗重 1.2 公斤, 竹柄长 1.8 米, 重量忽略不计。如果左手握住柄端, 右手握在离柄端 30 厘米处, 问在缓慢举高铁塔的过程中(图 4.4a), 左右手各用力多大?

习题 4.4 图 4.6 是利用小杆秤来称量较大重量的方法的示意图。在杠棒的重心 G 点上用粗绳扎紧, 并通过另一杠棒由两人抬着; 在靠近 G 的一点 A 上系紧待称的巨大物件的悬绳, 在杠棒末端 B 用绳系在小秤的秤钩上。当小秤取得平衡时记下读数 w , 再用米尺量得 GA 和 GB 的长度, 就可以推算出物件的重量 W 。

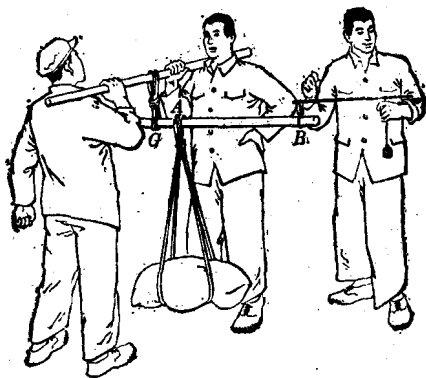


图 4.6 利用小杆秤称量较大重量的方法

(1) 如果 $w=12$ 市斤, $GA=5$ 厘米, $GB=95$ 厘米, 求物件的重量 W ;

(2) 如果每根杠棒重 4 市斤, 另一杠棒上与 G 相连的结点到两人的肩部等距, 问每人肩上压力多大?

习题 4.5 拔钉的羊角锄头柄长 26 厘米, 锄头背与木板的接触点

与铁钉相距 3 厘米 (图 4.5)。如果手在柄端用力 6 公斤恰好能把钉拔出, 求木板对铁钉的最大阻力。

习题 4.6 用铁铲运土时, 两手应当握在什么部位才能省力? 应当握在什么部位才能操作方便?

第二节 滑轮 轮轴

一、滑 轮

在工厂、建筑工地、港口码头上广泛使用着起重机来运送材料、货物。由滑轮构成的滑轮组就是起重机的主要部件。什么叫做滑轮呢? 滑轮俗称葫芦, 是一种周边有凹槽, 安装在框架的枢轴上能自由旋转的圆轮 (图 4.7)。滑轮一般是用铸铁制成的, 小型的滑轮也有用硬木做的。根据使用时安装的方法不同, 滑轮可分为定滑轮和动滑轮两种。

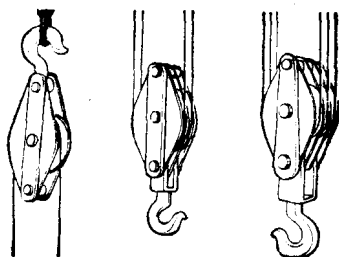


图 4.7 滑轮

框架固定安装, 转轴位置固定的滑轮叫做定滑轮。在建筑工地上, 通过拉动绕过定滑轮凹槽的绳索就可以把拴在绳索另一端的材料运送到高处去 (图 4.8)。

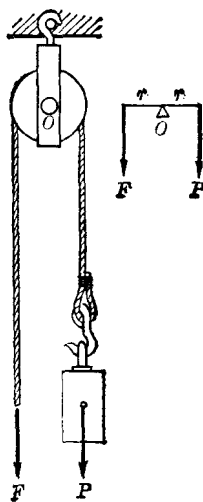


图 4.8 定滑轮

实践表明,定滑轮只能用来改变动力的方向,不能省力。因为如把定滑轮看作杠杆,在不考虑绳索的自重和摩擦等阻力的情况下,拉力 F 就是动力,重物的重量 P 就是阻力。由于动力臂和阻力臂都等于滑轮的半径 r ,因此根据杠杆平衡条件: $F = \frac{r}{r}P = P$,不能省力。所以定滑轮的作用就在于改变动力的方向。如果不用定滑轮而直接将重物上提,不仅不方便,而且也不能举得很高。

框架可以上下移动,转轴位置不固定的滑轮叫做动滑轮。在使用动滑轮时,先把绳索的一端固定在高处,让另一端绕过动滑轮,再把重物挂在动滑轮框架的吊钩上。这样通过向上拉动绳索的另一端,就可使重物随着动滑轮一起上升。由于这样操作极不方便,因此习惯上总是把绳索的另一端再绕过一个定滑轮,由动滑轮和定滑轮配合起来使用(图 4.9)。

实践表明,采用动滑轮可以省力。因为如把动滑轮看作杠杆,它就是一种阻力点居中的省力杠杆。在不考虑动滑轮和绳索的自重和摩擦等阻力的情况下,向上的拉力 F 就是动力,重物的重力 P 就是阻力。由于动力臂 $a=2r$,而阻力臂 $b=r$,因此根据杠杆平衡条件: $F = \frac{r}{2r}P = \frac{P}{2}$,可以省力一半。

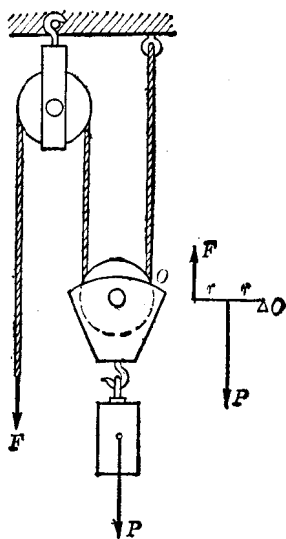


图 4.9 动滑轮

二、机械的功的原理

认识来源于实践，人们对于功的概念的认识就是从研究和
使用各种机械的大量实践中逐步建立起来的。就拿图 4.9
的滑轮装置来说，根据以上的理论分析，在不考虑动滑轮和绳
索的自重和摩擦等阻力的情况下可以省力一半。举例来说，
在绳索一端用 10 公斤的拉力 F 就可以使吊钩上重 20 公斤
的重物上升。如果要问：重物上升 1 米，在绳索一端必须将绳
索向下拉多少呢？从图上可以看出，要使重物上升 1 米，只有
把动滑轮两边的绳索都上升 1 米才行。或者说，必须将绳索
收缩 2 米，重物才能上升 1 米，因此拉力 F 必须将绳索向下
拉 2 米，吊钩上的重物才能上升 1 米。总之，用定滑轮提升重
物，不能省力，拉绳索 1 米，重物就上升 1 米；用动滑轮提升重
物，虽然可以省力一半，但拉绳索的距离增长了，要拉绳索
2 米，重物才上升 1 米。根据具体计算，直接将重物提升 1 米，
外力所作的功

$$W = PS = 20 \text{ 公斤} \times 1 \text{ 米} = 20 \text{ 公斤} \cdot \text{米}。$$

如果用滑轮装置将重物提升 1 米，外力对滑轮装置所作的功

$$W = \frac{P}{2} \cdot 2S = 10 \text{ 公斤} \times 2 \text{ 米} = 20 \text{ 公斤} \cdot \text{米}。$$

由此可见，使用滑轮装置可以省力，但不能省功。

实践表明，上述规律不仅适用于滑轮装置，对于一切机
械也都同样适用。在同一过程中，外力对机械所作的功就等
于机械克服阻力所消耗的功。这个结论就叫做机械的功的原
理。如用 $W_{\text{动}}$ 表示动力对机械所作的动力功，而用 $W_{\text{阻}}$ 表示
机械克服阻力所消耗的阻力功，那么可以列出

$$W_{\text{动}} = W_{\text{阻}}。 \quad (4.2)$$

实际上这一规律也就是能量守恒与转化定律的又一形式，通常可以用来分析各种机械的原理。

三、滑 轮 组

图 4.10a 就是货轮上装卸货物用的桅杆式起重机。它的主要部件就是一个由 3 个动滑轮和 3 个定滑轮构成的滑轮组。图中 MN 是固定在货轮甲板上的桅柱。 DE 是安装在桅柱上的起重臂杆，它与桅柱间的夹角可以通过一根变幅钢丝绳 L_1 来调节。 L_1 的一端是固定在臂杆 DE 的顶端耳环 m 上；另一端绕过导向定滑轮 K_1 和卷扬机 W_1 相连。在臂杆 DE 顶部安装着一组具有同一枢轴和框架的定滑轮，通过起重钢丝绳 L_2 与另一组具有同一枢轴和框架的动滑轮相连。 L_2 的一端是固定在臂杆 DE 顶端的耳环 n 上，然后按图

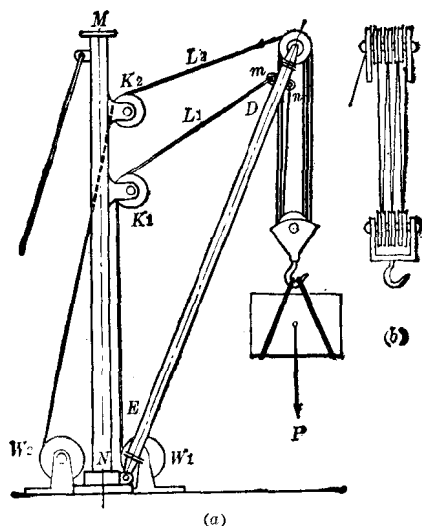


图 4.10 桅杆式起重机

4.10b 所示, 循次绕过两组滑轮中的 6 个滑轮, 引出后再绕过导向定滑轮 K_2 和卷扬机 W_2 相连。在需要装卸货物时, 先开动两台卷扬机的电动机, 放松变幅钢丝绳 L_1 来调节臂杆的位置, 同时放松起重钢丝绳 L_2 , 使滑轮组下降到它的吊钩能钩住货物为止。然后再改变电动机的转向, 收缩起重钢丝绳 L_2 将货物吊起, 并移到指定的地点卸落。

采用这种由 3 个定滑轮和 3 个动滑轮构成的滑轮组可以省力多少呢? 这可以通过机械的功的原理分析出来。从图 4.10b 上可以看出, 重物连同动滑轮组由 6 段钢丝绳支持着, 可见要使重物上升一段高度 S , 卷扬机 W_2 就必须把起重钢丝绳 L_2 的长度收缩 $6S$ 才行。根据机械的功的原理 $W_{\text{动}} = W_{\text{阻}}$ 可以列出

$$F \cdot 6S = PS,$$

即

$$F = \frac{P}{6},$$

表明动力 F 只要相当于重物重量 P 的 $1/6$, 就可以把重物吊起。由此可知, 对于由 n 个动滑轮和 n 个定滑轮构成的滑轮组说来, 如果不考虑动滑轮和钢丝绳的自重和摩擦等阻力, 动力与阻力的关系就是

$$F = \frac{P}{2n}. \quad (4.3)$$

实际上在使用滑轮装置时, 绳索与轮缘凹槽间的摩擦是不容忽视的。况且重物在上升过程中, 动滑轮也在随着上升, 它的自重也需要由动力来负担。因此严格说来, 在动力对机械作动力功的同时, 机械克服阻力所消耗的阻力功可分为两部分: 一部分是克服有用阻力所消耗的有用阻力功; 另一部分是克服无用阻力所消耗的无用阻力功。例如滑轮装置克服重

$$\eta = \frac{W_{\text{有效}}}{W_{\text{动}}} \times 100\% = \frac{1000S}{140 \times 8S} \times 100\% = 89.3\%。$$

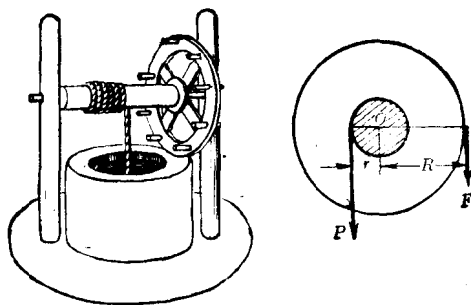
四、轮轴 卷扬机

在图 4.10 的桅杆式起重机里, 钢丝绳的放松与收缩都是由卷扬机来调节的。卷扬机, 俗称绞车。它是由几组轮轴组成的, 在电动机的带动下可以发出巨大的拉力。

轮轴是卷扬机的基本组成部分。它是由同一转轴上的粗细两个圆柱体组成的机械, 粗的部分就叫轮, 细的部分就叫轴。图 4.11 就是安装在井上提水用的轮轴, 又叫做辘轳。轮轴可以看作是支点居中的省力杠杆。它的阻力臂 r 总是小于动力臂 R , 根据杠杆平衡条件可以列出

$$F = \frac{r}{R} P。 \quad (4.6)$$

上式表明, 在不考虑摩擦的情况下轮轴的轮半径是轴半径的几倍, 动力就是阻力的几分之一。



(a) 辘轳

(b) 受力情况分析

图 4.11 轮轴

实际上作用在轮轴上的动力 F 并不一定与阻力 P 平行, 但它们对公共转轴 O 的力矩的转向总是相反的。有时加在轮轴上的动力也可以不止一个, 如木工师傅用来在木板上钻孔的陀螺钻(图 4.12)。

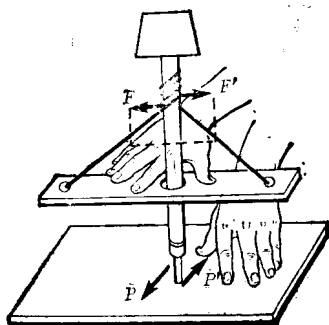


图 4.12 陀螺钻

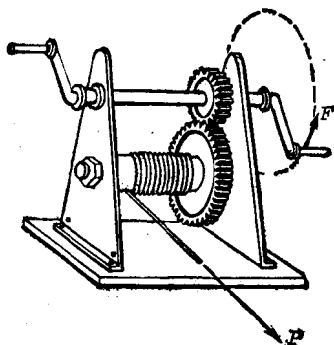


图 4.13 手摇卷扬机

卷扬机是轮轴原理的典型应用。它可以用电动机来带动, 有的卷扬机也可以用手摇。图 4.13 就是一台手摇卷扬机的示意图。它是由两组轮轴构成的。一组是手摇柄和小齿轮, 手摇柄就相当于轮而小齿轮相当于轴; 另一组是大齿轮和缠有绳索的卷筒, 大齿轮就相当于轮而卷筒相当于轴。这两组轮轴是通过小齿轮和大齿轮啮合在一起的。

[例题 4.3] 在建筑工地上, 要用手摇卷扬机将重 500 公斤的材料送往高处。已知卷扬机的大齿轮每转 1 周而小齿轮转 3 周, 卷筒直径为 20 厘米, 摇手柄长 60 厘米(参看图 4.13)。假设卷扬机的机械效率为 90%, 问必须用多大的力摇动手柄才行?

解: 假设在手摇柄上用动力 F 时就可以使钢丝绳获得巨大的拉力 $P=500$ 公斤。根据机械效率的公式(4.5)可知,

在考虑机械效率时

$$\eta W_{\text{动}} = W_{\text{有用}} \quad (4.7)$$

今已知卷筒直径为 $d=20$ 厘米, 手摇柄长度为 $L=60$ 厘米。

当手摇柄转 1 周时, 动力 F 所作的动力功

$$W_{\text{动}} = 2\pi LF。$$

由于小齿轮每转 1 周而大齿轮转 $i = \frac{1}{3}$ 周 (通常把 i 叫做齿轮组的传动比, 将在本章第四节具体讨论), 因此可以列出卷扬机在这一过程中克服有用阻力 P 所消耗的有用阻力功

$$W_{\text{有用}} = \pi diP,$$

代入公式(4.7)可得

$$\eta \cdot 2\pi LF = \pi diP,$$

即

$$F = \frac{id}{2L\eta} P。 \quad (4.8)$$

将已知数据代入即可算出手摇柄上的动力

$$F = \frac{\frac{1}{3} \times 20 \times 500}{2 \times 60 \times 0.9} \approx 30.9 \text{ 公斤}。$$

如果两人一起摇, 每人需用力约 15.45 公斤。

此外, 还有一种车间、工地上常用的差动滑轮。它是根据滑轮和轮轴的原理制成的特殊滑轮组。用了它, 上吨重的东西, 一个人就可以不太费劲地把它吊起来, 因此人们把它叫做神仙葫芦。图 4.14 就是差动滑轮的构造示意图。它的定滑轮是由两个半径分别为 R 和 r 的齿轮结合在一起构成的, 而用闭合的铁链与动滑轮相联接。

为什么使用差动滑轮能这样省力呢? 从图上可以看出, 当我们用力 F 拉定滑轮边缘的铁链时, 由于大小两个定滑轮

一起转动,同时铁链又是闭合的,因此由大轮拉过来的铁链又被小轮拉过去一部分。具体地说,如果动力 F 拉铁链使定滑轮转动 1 周,它所作的动力功

$$W_{\text{动}} = 2\pi RF,$$

那么在这一过程中,重物上升多少呢?

由于被大轮拉上的铁链长度为 $2\pi R$, 同时又被小轮放下的铁链长度为 $2\pi r$, 因此重物实际上升的高度 $h = \frac{2\pi R - 2\pi r}{2} = \pi(R - r)$ 。由此可

见在这一过程中,整个装置克服有用阻力 P 所消耗的有用阻力功

$$W_{\text{有用}} = Ph = \pi(R - r)P。$$

在不考虑动滑轮和铁链的自重以及摩擦等阻力的情况下,根据公式(4.2)可以列出

$$2\pi RF = \pi(R - r)P,$$

即

$$F = \frac{R - r}{2R} P。 \quad (4.9)$$

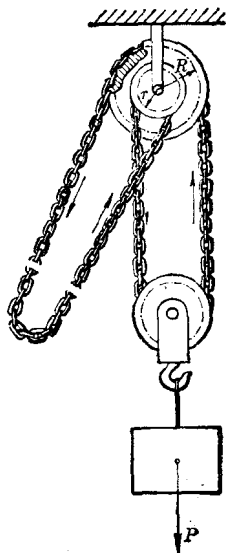


图 4.14 差动滑轮

习题 4.7 在工地上需要将重 120 公斤的木材竖立起来,使用了简单滑轮装置如图 4.15 所示。假设木材全长 3.6 米,而重心距粗端 1.2 米。假设不考虑滑轮装置的无用阻力,问: (1) 如果将木材粗端着地,起重细端时拉力多大? (2) 假设木材与泥地间的滑动摩擦系数 μ 为 0.3,在起重过程中,不断将木材粗端向前推所用的推力有多大?

习题 4.8 在图 4.10 中的桅杆式起重机上,假设这个由 3 个定滑轮和 3 个动滑轮构成的滑轮组的机械效率为 90%,问在起重半吨货物时卷扬机需要用多大的拉力来拉动钢丝绳?

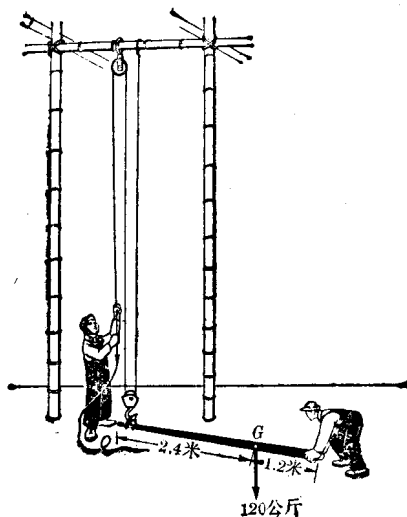


图 4.15

习题 4.9 已知手摇卷扬机的摇手柄长 48 厘米, 卷筒直径为 30 厘米, 齿轮组的传动比为 $1/5$ 。假定卷扬机的机械效率为 85%, 要使钢丝绳上产生 50 公斤的拉力, 问手摇柄上必须用多大?

习题 4.10 假设差动滑轮的两个定滑轮半径分别为 16、15.5 厘米; 在不考虑无用阻力的情况下, 要起吊重 1500 公斤的重物所用的拉力有多大?

习题 4.11 我国古代劳动人民创制的一种建筑工地上用的轮轴如图 4.16 所示, 实际上是一种特殊的差动滑轮, 它的两个卷筒的半径分别为 R 和 r , 手柄长度为 L , 卷筒的两个半径相差很小。试根据机械的原理列出这种轮轴的省力公式。

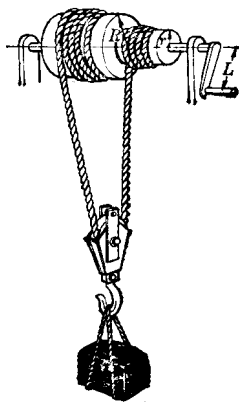


图 4.16

第三节 斜面 螺旋

一、斜 面

在装卸卡车上的重物时,往往将一块长木块斜搁在车尾上,再把重物沿着板面推上去或者滑下来。这样做不仅操作方便,而且要比沿着铅直方向直接抬上抬下省力得多。这块搁在车尾上的木板叫做斜面。

我们已经在第一章里通过力的分解分析过斜面上物体的受力情况,现在再根据机械的功的原理进一步分析在考虑摩擦的情况下斜面的机械效率。

物体在斜面上滑动时,它所受的滑动摩擦力有多大呢?根据滑动摩擦力的公式(1.1), $f = \mu N$, 由于重量为 P 的物体与倾角为 θ 的斜面间的正压力 $N = P \cos \theta$ (图 4.17), 假设物体与斜面间的滑动摩擦系数为 μ , 那么物体在斜面上所受的滑动摩擦力

$$f = \mu N = \mu P \cos \theta, \quad (4.10)$$

它的方向总是与物体的滑动方向相反。

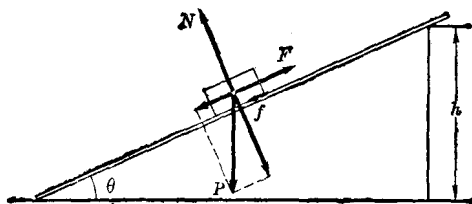


图 4.17 物体在力 F 的作用下在斜面上匀速上移

假设斜面的长度为 S , 高度为 $h = S \sin \theta$, 那么沿斜面方向的外力 F 把物体从斜面底部匀速推到顶端所作的动力功

$$W_{\text{动}} = FS。$$

而斜面所消耗的有用阻力功就相当于

$$W_{\text{有用}} = Ph = PS \sin \theta,$$

斜面所消耗的无用阻力功就相当于摩擦力所消耗的功, 即

$$W_{\text{无用}} = fS = \mu PS \cos \theta。$$

于是根据机械的功的原理的具体公式(4.4)可以列出

$$FS = PS \sin \theta + \mu PS \cos \theta。$$

可见在考虑摩擦的情况下, 要把斜面上的物体匀速向上推, 沿斜面向上的外力

$$F = (\sin \theta + \mu \cos \theta) P。 \quad (4.11)$$

在这种情况下斜面的机械效率

$$\eta = \frac{W_{\text{有用}}}{W_{\text{动}}} = \frac{Ph}{FS} = \frac{PS \sin \theta}{(\sin \theta + \mu \cos \theta) PS},$$

即

$$\eta = \frac{\sin \theta}{\sin \theta + \mu \cos \theta}。 \quad (4.12)$$

[例题 4.4] 在倾角 θ 为 30° 的斜面上, (1) 沿斜面方向要用多大的力才能把重 60 公斤的物体匀速地推上去? 假设物体与斜面间的滑动摩擦系数 $\mu = 0.20$; (2) 沿斜面方向向上至少要用多大的力才能使重 60 公斤的物体静止在斜面上? 假设物体与斜面间的最大静摩擦系数 $\mu_m = 0.25$ 。

解: (1) 已知 $P = 60$ 公斤, $\theta = 30^\circ$, $\mu = 0.20$, 根据公式(4.11)可知把重物匀速向上推, 沿斜面方向所用的外力

$$F = (\sin 30^\circ + 0.2 \cos 30^\circ) \times 60 \approx 40.4 \text{ 公斤};$$

(2) 再根据最大静摩擦力的规律, 斜面上的重物沿斜面的方向上向下的合力只要小于它向上的最大静摩擦力 f_m , 就可以停留在斜面上静止不动(图 4.18)。从这一关系可以列出

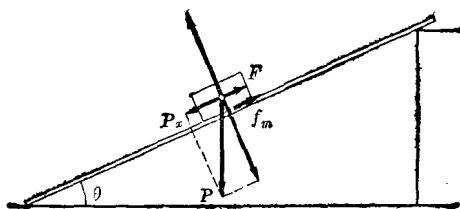


图 4.18 物体停留在斜面上

$$P_x - F < f_m,$$

$$P \sin \theta - F < \mu_m P \cos \theta,$$

所以

$$F > P(\sin \theta - \mu_m \cos \theta),$$

$$F > 60 \times (0.5 - 0.25 \times 0.866) \approx 17 \text{ 公斤}.$$

表明 F 至少等于 17 公斤才能使重物静止在斜面上。

然而当斜面足够粗糙时，即当物体与斜面间的最大静摩擦系数 μ_m 足够大时，即使不加外力，物体也能静止在斜面上。这种现象叫做自锁。

在什么条件下，斜面上的物体才会自动保持静止而出现自锁现象呢？这个条件就是物体沿斜面方向上的重力分力小于它所受到的最大静摩擦力。即

$$P \sin \theta < f_m. \quad (4.13)$$

可以设想当物体沿斜面方向上的重力分力等于它所受到的最大静摩擦力时(图 4.19)，物体就开始下滑。通常把物体从斜

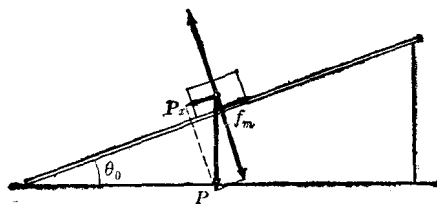


图 4.19 摩擦角

面上开始下滑时斜面的倾角叫做摩擦角, 又称静角。很明显, 当物体从斜面上开始下滑时

$$P \sin \theta_0 = f_m = \mu_m P \cos \theta_0.$$

因此

$$\operatorname{tg} \theta_0 = \mu_m, \quad (4.14)$$

式中 θ_0 就是摩擦角。上式表明: 摩擦角的大小完全决定于物体与斜面间的最大静摩擦系数。无论物体是轻是重, 只要把斜面的倾角增大到它的摩擦角, 物体就开始下滑; 如果斜面倾角小于摩擦角, 物体就会出现自锁现象。例如码头、粮仓以及各种农产品收购站里使用的皮带运输机(图 4.20)就是利用斜面的自锁作用制成的。在倾斜的梁架上安装着由电动机带动的传送皮带, 货物从底端装上后, 依靠斜面的自锁作用就被传送到顶端。

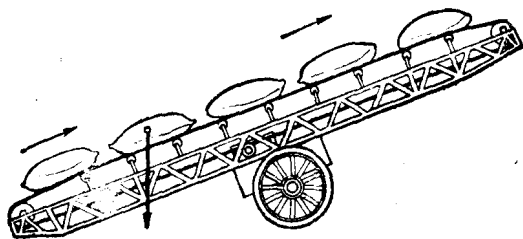


图 4.20 皮带运输机

此外, 摩擦角公式(4.14)还提供了一种测定物体间最大静摩擦系数的简便方法。例如要测定石板与铁块间的最大静摩擦系数, 只要把铁块放在由石板制成的斜面上, 不断增大斜面的倾角, 直到铁块开始在石板上滑动时, 测出它们之间的摩擦角 θ_0 。于是根据公式(4.14)即可找出它们之间的最大静摩擦系数。

二、尖 劈

你可知道为什么大多数农具的工作部件都呈尖劈形吗？例如镰刀、锄头、铧犁的刀口是尖劈形的，木工用的凿、刨、斧的刀口也是尖劈形的（图 4.21）。甚至连安装在工具上的斧柄、镰柄和其他农具的手柄也都是尖劈形的。原来尖劈实际上是由两个斜面组成的。它也是一种省力机械。

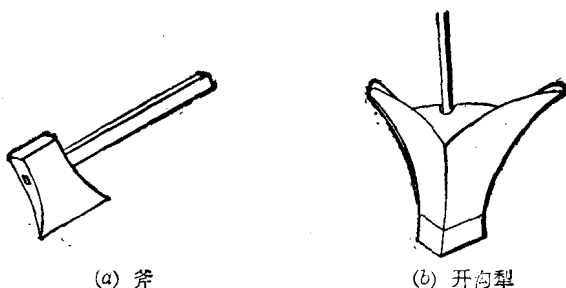


图 4.21 尖劈

图 4.22 就是对称形的斧头在劈柴时，斧刃受力情况的截面图。图中的 2θ 叫做尖劈角。当斧背上受到动力 F 时， N 、 N' 就是它的两个刃面上所克服的有用阻力，同时沿着两个刃面出现了与斧刃运动方向相反的两个滑动摩擦力 f 、 f' 。根据斧刃截面的对称性可以认为两个刃面上受力的大小也是对称的。即 $N' = N$ ； $f' = f = \mu N$ ， $= \mu N'$ 。式中 μ 就是接触面间

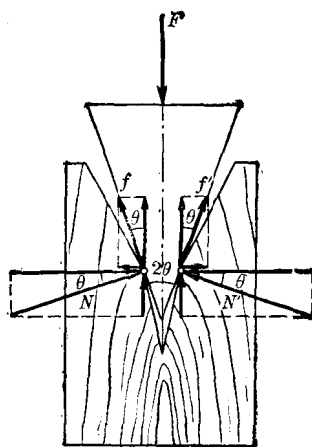


图 4.22 斧刃受力情况的截面图

的滑动摩擦系数。

通过力的分解, 可以列出当斧刃的锋口沿着力 F 的方向匀速移动时, 在力 F 的方向上各个力的平衡条件是

$$\begin{aligned} F &= N \sin \theta + f \cos \theta + N' \sin \theta + f' \cos \theta \\ &= N \sin \theta + \mu N \cos \theta + N \sin \theta + \mu N \cos \theta \\ &= 2(\sin \theta + \mu \cos \theta) N. \end{aligned} \quad (4.15)$$

上式表明, 尖劈角 2θ 越小, 就越省力; 滑动摩擦系数越小, 也越省力。但是事物总是一分为二的, 随着刀具尖劈角的减小, 它对抗阻力的强度就要减弱, 容易摧折而形成缺口。因此一般刀具都要根据工作情况的不同来选择适宜的尖劈角, 以照顾省力和强度两方面的因素。表 4.1 列出了几种常用刀具的尖劈角范围。

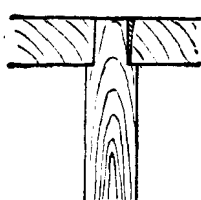
表 4.1 几种常用刀具的尖劈角范围

刀 具 种 类	尖 劈 角
裁纸刀、小刀	小于 1°
厨刀、剃头刀口、镰刀	$2^\circ \sim 5^\circ$
木工用平凿刀	宽刀 $15^\circ \sim 20^\circ$
	狭刀 $25^\circ \sim 30^\circ$
金属切削用车刀	$30^\circ \sim 80^\circ$

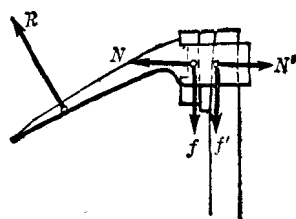
尖劈公式(4.15)与斜面公式(4.11)很相似。根据机械的功的原理也可以推导出尖劈的机械效率公式, 它与斜面的机械效率公式(4.12)完全一致, 式中的 θ 就相当于尖劈角的一半。尖劈和斜面虽然具有不少共同点, 但也存在着区别。尖劈具有两个工作面而斜面只有一个; 它们所克服的有用阻力的性质也不同, 尖劈所克服的有用阻力是正压力 N , 而斜面

所克服的是重力 P 。

尖劈的另一个重要作用就是通过减小尖劈角使它的一半远小于它的摩擦角,从而利用尖劈的自锁作用来安装工具,或者连接两个部件使它们不致脱离。这种尖劈叫做楔。例如日常用的长凳、桌椅等都有榫头,为了使榫头装牢,往往在接榫处嵌入尖劈形的木楔(图 4.23a)。在安装锄头、铁锸等农具的竹柄时,也要嵌木楔进去才能装牢。图 4.23b 所示就是锄头和竹柄的连接情况。锄头的套部和一端削平的竹柄就是靠一块凹槽板和一块尖劈形的木楔牢固地连接起来的。当锄口出现与锄面垂直的阻力 R 时,木楔的两面就对凹槽板和竹柄施加压力 N 、 N' , 同时在接触面上出现摩擦力 f 、 f' , 可以防止锄头与竹柄相脱离。



(a) 接榫处的木楔



(b) 安装锄头用的木楔

图 4.23 木楔

三、螺 旋

在各种机器上都有带螺纹的零件,例如螺丝杆、螺丝帽、螺丝钉等统称螺旋。螺旋实际上就是缠在圆柱体上的斜面。用纸裁成狭长的纸条,将它象图 4.24 那样稍为倾斜地缠在铅笔杆上,在铅笔杆上就出现了螺纹。杆上缠到纸条的部分就相当于凸起的螺牙;没有缠到的部分就相当于凹槽。螺旋也是一种省力机械。它可以用作起重工具;或者利用它的自锁

作用来固定或联结机件。此外,螺旋还可以用来传动,这将在本章第四节里具体讨论。

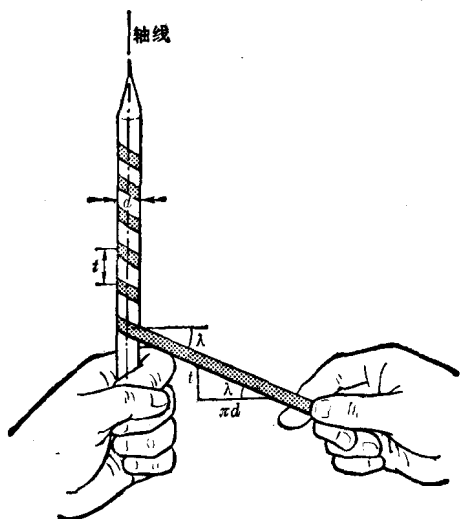


图 4.24 螺旋是缠在圆柱体上的斜面

一般说来,螺旋都是由外螺旋和内螺旋配合起来使用的。表面上制有凸螺纹的金属杆叫做外螺旋,又称螺杆、螺栓;而内表面制有凹螺纹的带圆孔的金属部件叫做内螺旋,又称螺母。只有凹凸螺纹啮合得很好的内、外螺旋才能配套使用,(图 4.25)。

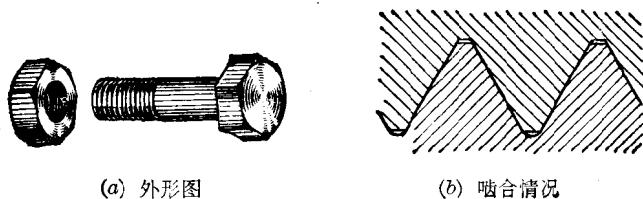


图 4.25 配套的内、外螺旋

根据不同的需要, 螺纹的截面可以有不同的形状, 叫做牙形。例如三角螺纹、梯形螺纹、矩形螺纹等(图 4.26)。梯形和矩形螺纹, 强度较大, 是用来传递动力和运动的螺纹。三角螺纹是普通螺纹, 是用在固定或联结机件的螺旋上的。

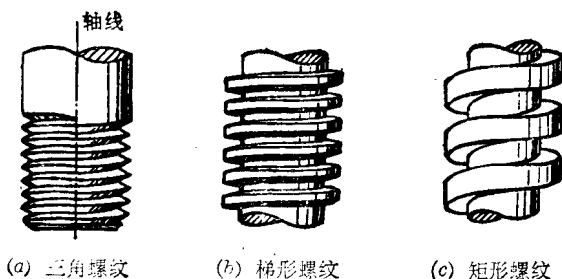


图 4.26 螺纹的牙形

螺纹的中心轴线叫做螺旋的轴线(图 4.26a)。从牙尖算起的直径叫做螺旋的外径; 从牙底算起的直径叫做螺旋的内径。外径和内径的平均值叫做螺径, 通常用字母 d 表示。两相邻牙尖之间的距离叫做螺距, 它就相当于缠圆柱体一周时斜面的高度, 通常用字母 t 表示(参见图 4.24)。螺纹线与螺旋横截面所成的角叫做螺旋的升角, 它就相当于缠在圆柱体上的斜面的倾角, 通常用字母 λ^* 表示。由于 πd 相当于缠圆柱体一周时斜面的底边, 因此螺距

$$t = \pi d \operatorname{tg} \lambda。 \quad (4.16)$$

只有当内、外螺旋的螺纹相同时(包括螺纹的牙形、外径、螺距都相同), 它们才能啮合得很好, 才能配套使用。通常把牙形、外径、螺距叫做螺纹的三要素。

* λ 是希腊字母, 读作“lan-mi-da”。

图 4.27 是一种最简单的手摇式螺旋起重机。用了它,可以毫不费劲地把沉重的机器或汽车抬高,俗称螺旋千斤顶。从图上可以看出它的构造很简单,在机座 M 内安装着矩形螺纹的螺母和螺杆,在螺杆顶端装有长臂手柄 H 和用来支承重物的托杯 C 。在托杯与螺杆间装有轴承,在螺杆旋转时可以防止托杯跟着旋转。

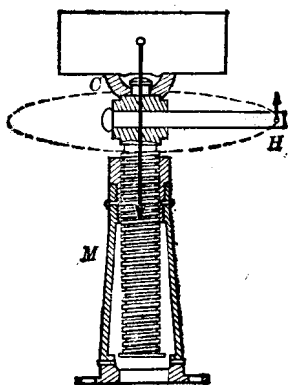


图 4.27 螺旋起重机

当托杯上顶有重物时,如果用手扳动手柄,就会使螺杆在螺母中旋转而逐渐上升,同时把重物抬高。当扳动手柄使螺杆旋转 1 周时,螺杆就上升一段螺距,重物也被顶高一段螺距。

假设螺距为 t , 手柄长度为 L , 作用在手柄末端的动力为 F , 那么力 F 使手柄旋转 1 周所作的动力功

$$W_{\text{动}} = 2\pi LF。$$

在这一过程中,由于螺杆上升一段螺距 t , 整个装置克服有用阻力,即克服重物重力 P 而消耗的有用阻力功

$$W_{\text{有用}} = Pt。$$

在考虑机械效率的情况下,根据机械的功的原理,按公式 (4.7) 可以列出

$$\eta 2\pi LF = Pt,$$

即

$$F = \frac{t}{2\pi L\eta} P。 \quad (4.17)$$

由于螺距 t 与手柄长度 L 相比是极小的,因此利用螺旋起重机可以省力很多。但在工作过程中,螺纹间存在着很大的正

压力, 因而摩擦力很大, 故螺旋起重机的机械效率很低, 一般在 30~50% 之间。

[例题 4.5] 已知螺旋起重机螺杆的螺径 $d = 18.2$ 毫米, 螺纹的升角 $\lambda = 5^\circ$, 手柄长度 $L = 0.6$ 米, 假设机械效率 $\eta = 45\%$, 问起重 2.5 吨重物时, 手柄端需要用力多大?

解: 首先按公式(4.16)找出螺距

$$t = \pi d \operatorname{tg} \lambda = 3.14 \times 18.2 \times 0.0875 = 5 \text{ 毫米,}$$

然后根据螺旋起重机公式(4.17)可算出动力

$$F = \frac{t}{2\pi L \eta} P = \frac{5 \times 2500}{2 \times 3.14 \times 600 \times 0.45} = 7.4 \text{ 公斤.}$$

由于螺纹间的最大静摩擦系数 μ_m 约为 0.2, 可按公式(4.14)算出摩擦角 $\theta_0 = 11^\circ 19'$, 可见螺旋的升角 λ 远小于它的摩擦角 θ_0 。因此螺旋起重机具有自锁作用, 即使在手柄上停止加力时重物仍能依靠静摩擦力而取得平衡, 螺杆不会自动下滑。

习题 4.12 用 5 米长的跳板一端搁在 1.5 米高的车尾上, 把重 200 公斤的大木箱经跳板推上卡车。假设木箱与跳板间的滑动摩擦系数 $\mu = 0.3$, 问沿跳板方向的上推力需要多大? 木箱对跳板的压力有多大? 跳板的机械效率有多大?

习题 4.13 在板面比较粗糙, 倾角又比较小的斜面上, 为什么重物不会自动下滑? 假设滑动摩擦系数为 μ , 倾角为 θ , 必须沿斜面方向施加多大的下推力才能使重量为 P 的物体匀速下滑?

习题 4.14 在爬山时为什么坡度越陡越感到费劲? 如果坡面泥泞而较滑就更难上, 这又是为什么?

(提示: 联系到摩擦角和自锁现象来考虑。)

习题 4.15 当刀锋变钝或刀面生锈时, 为什么切割物体特别费劲? 刀面在磨过以后再切割为什么就比较省力?

习题 4.16 电力灌溉渠上的闸门是用起重螺旋设备来升降的(图 4.28)。如果闸门重 1.2 吨, 螺距为 15 毫米, 手轮的直径为 0.6 米。假

设机械效率为 60%，问用双手转动手轮时，每只手需用力多大才能提起闸门？

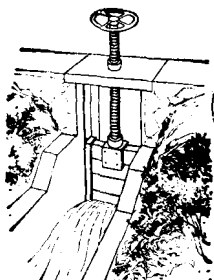


图 4.28 起重螺旋

第四节 机械传动

一、传动装置

手摇式螺旋起重机是在人力的摇动下工作的；农村中有些水车是由风车带动而工作的；货轮上的大型卷扬机是用电动机来带动的。不论效率多高的机械，如果没有发动机来带动，就不能工作。这是因为动力不对机械做功，机械也就不能对外做功。然而一般说来，发动机与工作机并不是直接相连的，在它们中间还需要有一整套传动装置。传动装置不仅能将发动机的动力和运动传递给工作机，而且还可以变换动力的大小和运动的快慢。例如在汽车和拖拉机上安装了齿轮变速箱这种传动装置后，就可以根据需要变换行驶速度和牵引力的大小。

机械传动的型式很多，常见的有皮带传动、齿轮传动，此外还有以蜗轮蜗杆传动等。

二、皮 带 传 动

当我们需要用拖拉机的发动机来带动离心式水泵抽水时，就要用到皮带传动。在用电动机带动脱粒机工作时也要用到它(图 4.29)。皮带传动是机械传动中最简单的一种。

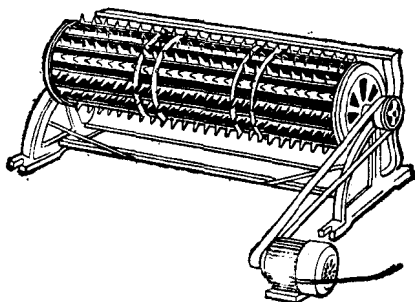
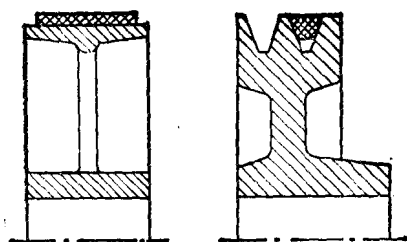


图 4.29 电动脱粒机

皮带传动是利用张紧的皮带和轮面或轮槽间的静摩擦力来传递转动和功率的。与发动机(如电动机)轴相连的皮带轮叫做主动轮；与工作机(如脱粒机)轴相连的皮带轮叫做从动轮。把闭合的皮带紧套在这两个皮带轮的轮面上，当主动轮随发动机轴转动时，轮面与皮带间的静摩擦力就使皮带也跟随主动轮转动起来，皮带的转动又通过皮带与从动轮面间的静摩擦力使从动轮以及工作机也跟着转动起来。

皮带轮一般是用钢或铸铁制成的，而常用的皮带是用皮革或有帆布衬里的橡胶制成的。根据皮带截面形状的不同，可分平皮带和三角皮带两种(图 4.30)。三角皮带由于截面是楔形的，传动时嵌在轮槽中，在皮带与轮槽之间就形成了两个摩擦面，而且产生很大的正压力，因此可以传递较大的功率，使用也比较广泛。有时为了传递大功率，皮带轮缘上往往制有三、四个轮槽，同时嵌入三、四根三角皮带一起传动。即

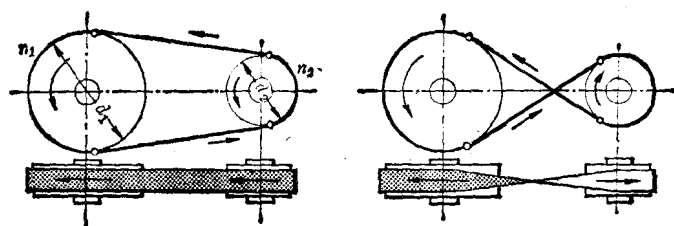


(a) 平皮带 (b) 三角皮带

图 4.30 平皮带和三角皮带的截面

使其中有一根发生断裂也不致影响传动中断。

平皮带在传动时，有开放和交叉两种形式(图 4.31)。开放式传动可以使从动轮的转向与主动轮一致；而交叉式传动可以使从动轮的转向与主动轮相反。但三角皮带的传动只能采用开放式。



(a) 开放式

(b) 交叉式

图 4.31 平皮带的安装

皮带传动时，从动轮的转速与主动轮的转速存在什么关系呢？假设主动轮的直径、转速分别为 d_1 、 n_1 ，而从动轮的直径、转速分别为 d_2 、 n_2 (见图 4.31a)。由于皮带是紧套在这两个轮缘上转动的，如果皮带不打滑，那么主动轮缘上和从动轮缘上各点的线速度都相等。于是根据线速度公式(2.28)

$$v = \frac{\pi d_1 n_1}{30} = \frac{\pi d_2 n_2}{30}, \text{ 可以列出}$$

即

$$\pi d_1 n_1 = \pi d_2 n_2,$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{d_1}{d_2}。 \quad (4.18)$$

上式表明:从动轮、主动轮的转速与它们的直径成反比。通常把从动轮与主动轮转速的比值 n_2/n_1 叫做皮带传动装置的传动比,用字母 i 表示。

掌握了这个规律,只要改变从动轮和主动轮的直径就可以变换传动比,从而变换工作机的转速。

[例题 4.6] 用皮带传动的方法将电动机的动力传递给钻床。已知电动机轴的转速为 900 转/分。(1)如果主动轮与从动轮直径分别为 160、200 毫米,问钻床转轴的转速有多大?(2)如果把两轮对调一下,钻床转速又是多大?

解: (1) 已知 $n_1=900$ 转/分, $d_1=160$ 毫米, $d_2=200$ 毫米,根据皮带传动的传动比公式(4.18)可知,钻床转速

$$n_2 = \frac{d_1}{d_2} \cdot n_1 = \frac{160}{200} \times 900 = 720 \text{ 转/分}。$$

(2) 两轮对调以后, $d_1=200$ 毫米, $d_2=160$ 毫米,而电动机转速不变,因此钻床转速

$$n_2 = \frac{d_1}{d_2} \cdot n_1 = \frac{200}{160} \times 900 = 1125 \text{ 转/分}。$$

实际上钻床转轴上的从动轴和电动机轴上的主动轮都是由几个直径不同的轮槽迭合而成的,叫做塔轮(图4.32)。工作时,三角皮带可以根据需要套在不同的轮槽上以改变钻床的转速。

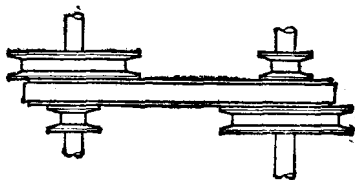


图 4.32 塔轮

皮带传动的优点是结

构简单, 安装方便; 当负载过重而拖不动时, 皮带会自动打滑, 不致造成机件的损坏; 可以用来传递中心距离较大的转轴间的动力。但它的缺点是不能传递比较大的功率; 传动比不能过大(平皮带在 $1/3 \sim 3$ 之间, 三角皮带在 $1/6 \sim 6$); 由于皮带与轮面之间存在滑动, 因此传动比不够稳定。

三、齿 轮 传 动

齿轮是机械传动中的重要组成部分。齿轮传动是靠主动齿轮的牙齿依次拨动与它啮合着的从动齿轮的牙齿而实现的。它能传递高达几万马力的功率, 因此在各种机器设备中都有着广泛的应用。

根据传动轴之间的相对位置不同, 齿轮可以有不同的形状。用在平行轴之间传递转动的叫做圆柱齿轮(平齿轮); 用在相交轴之间传递转动的叫做圆锥齿轮(伞齿轮)(图 4.33)。

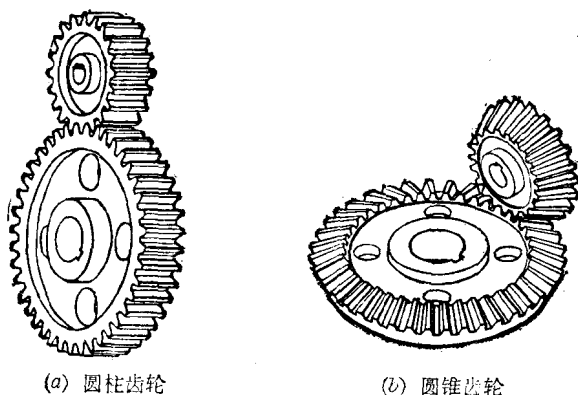


图 4.33 不同形状的齿轮

现在以圆柱齿轮为例, 通过图 4.34 来说明齿轮各部分的名称。由齿轮各齿顶所构成的圆叫做齿顶圆, 它的直径叫做

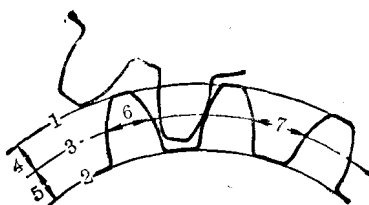


图 4.34 标准圆柱齿轮各部分的名称

1—齿顶圆； 2—齿根圆弧； 3—分度圆弧；
4—齿顶高； 5—齿根高； 6—齿厚； 7—齿间

齿顶圆直径,用字母 $D_{\text{顶}}$ 表示。由齿轮各齿根所构成的圆叫做齿根圆,它的直径叫做齿根圆直径,用字母 $D_{\text{根}}$ 表示。由齿轮啮合时实际接触点所构成的圆叫做分度圆,它的直径叫做分度圆直径,用字母 $d_{\text{分}}$ 表示。齿顶圆与分度圆之间的径向距离叫做齿顶高,用字母 $h_{\text{顶}}$ 表示;齿根圆与分度圆之间的径向距离叫做齿根高,用字母 $h_{\text{根}}$ 表示。齿顶高与齿根高的和叫做齿高,用字母 h 表示。在分度圆上每个齿所占的圆弧长叫做齿厚,用字母 S 表示;每个齿槽所占的圆弧长叫做齿间,用字母 α 表示。齿厚与齿间的和叫做齿轮的周节,用字母 t 表示。以上各量的通用单位是毫米。

假设齿轮的齿数为 z , 由于分度圆的周长为 $\pi d_{\text{分}}$, 那么它的周节即可按下列公式求出

$$t = \frac{\pi d_{\text{分}}}{z} \quad (4.19)$$

在计算齿轮各部分的尺寸时,有一个基本参数,叫做模数。它是齿轮的分度圆直径除以齿数所得的商,通常用字母 m 表示,即

$$d_{\text{分}} = mz, \quad (4.20)$$

式中模数 m 的单位也是毫米。掌握了齿轮的齿数与模数之

后, 齿轮上各部分的尺寸即可按下列公式计算出来。标准齿轮规定

$$h_{\text{顶}} = m, \quad h_{\text{根}} = 1.25m,$$

因此 $h = h_{\text{顶}} + h_{\text{根}} = m + 1.25m = 2.25m,$

$$D_{\text{外}} = d_{\text{分}} + 2h_{\text{顶}} = mz + 2m = m(z + 2),$$

$$D_{\text{根}} = d_{\text{分}} - 2h_{\text{根}} = mz - 2.5m = m(z - 2.5),$$

$$t = \pi \frac{d_{\text{分}}}{z} = \pi m。$$

对于齿数相同的齿轮说来, 模数越大, 尺寸就大, 牙齿也大, 牙齿所能承受的力、所能传递的功率也都大。例如轧钢机上使用的齿轮, 模数可达 25 毫米以上。

[例题 4.7] 已知某标准齿轮的齿数 $z = 20$; 模数 $m = 5$ 毫米, 试计算齿轮各部分的尺寸。

解: 根据模数的含义, 齿轮分度圆直径

$$d_{\text{分}} = mz = 5 \times 20 = 100 \text{ 毫米},$$

再根据规定:

$$h_{\text{顶}} = m = 5 \text{ 毫米}; \quad h_{\text{根}} = 1.25m = 6.25 \text{ 毫米},$$

因此 齿高 $h = 5 + 6.25 = 11.25 \text{ 毫米},$

$$\text{齿顶圆直径 } D_{\text{顶}} = 5(20 + 2) = 110 \text{ 毫米},$$

$$\text{齿根圆直径 } D_{\text{根}} = 5(20 - 2.5) = 87.5 \text{ 毫米},$$

$$\text{周节 } t = 5\pi = 15.708 \text{ 毫米}。$$

齿轮在传动过程中, 当前一对牙齿啮合完毕后, 后一对牙齿必须已开始啮合, 否则传递的动力就会中断。保证两齿轮能连续啮合的条件就是它们的模数必须相等。

当所需的传动比不太大时, 采用一对齿轮来传动就够了, 叫做齿轮的一级传动。这时与主动轴相连的齿轮叫做主动齿轮; 与从动轴相连的齿轮叫做从动齿轮(图 4.35)。

假设主动齿轮和从动齿轮的齿数依次为 z_1 、 z_2 ，它们的转速依次为 n_1 、 n_2 转/分，那么根据它们在传动过程中，每分钟啮合的齿数相等的关系可以列出

$$n_1 z_1 = n_2 z_2,$$

因此在一级传动中，齿轮的传动比

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{z_1}{z_2}. \quad (4.21)$$

上式表明，从动齿轮、主动齿轮的转速是与它们的齿数成反比的。改变两齿轮的齿数关系，就可以改变它们的传动比。采用齿轮的一级传动时，从动轴与主动轴的转向相反。

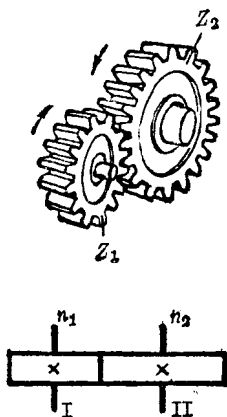


图 4.35 齿轮的一级传动

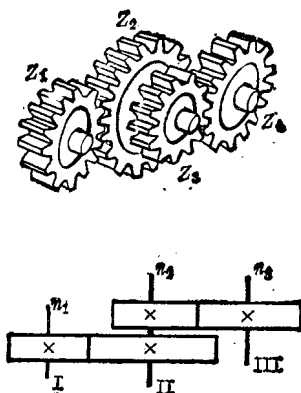


图 4.36 齿轮的二级传动

如果所需的传动比很大，采用一级传动就会使其中一个齿轮过大而造成传动装置体积庞大，况且如果齿轮的齿数过少也会造成加工困难。为了克服这一缺点，可以采用齿轮的多级传动。图 4.36 就是二级传动的示意图。具体的方法是在主动轴 I 与从动轴 III 之间增加一根中间轴 II，然后用一

对齿轮在轴 I、II 之间传动,再用一对齿轮在轴 II、III 之间传动。

假设轴 I、II、III 的转速依次为 n_1, n_2, n_3 , 而齿轮 1、2、3、4 的齿数依次为 z_1, z_2, z_3, z_4 , 那么根据齿轮的传动比公式(4.21)可以同时列出:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{z_1}{z_2}, \quad \frac{n_3}{n_2} = \frac{z_3}{z_4},$$

将两式相乘,即可得到在二级传动中齿轮组的传动比

$$i = \frac{n_3}{n_1} = \frac{z_1 \times z_3}{z_2 \times z_4} \quad (4.22)$$

上式表明,在二级传动中,齿轮组的传动比就等于前后两次传动比的相乘积,从而可以推知:在多级传动中,齿轮组的传动比就等于每一级传动比的相乘积。

然而象车床、拖拉机、汽车等机器,为了工作上的需要,往

往要求传动装置具有多种传动

比,可以任意变换。例如拖拉

机在工作时就有好几档速度。

要做到这一点就必须采用齿轮

变速箱。图 4.37 就是最简单

的一级齿轮变速箱。其中主动

轴 I 上的双联齿轮可以在轴上

滑动,利用主动轴上方的拨叉

可以使双联齿轮变换位置,从而使从动轴获得两种不同的传动比。

[例题 4.8] 在图 4.37 的一级齿轮变速箱中, $z_1=22$, $z_2=44$, $z_3=30$, $z_4=36$, 假设主动轴转速 $n_1=600$ 转/分,问从动轴可以获得哪两种不同的转速?

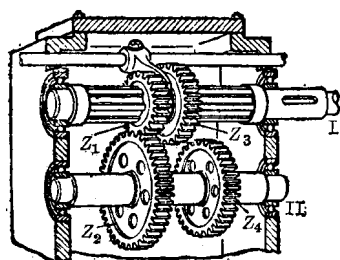


图 4.37 一级齿轮变速箱

解：根据齿轮的传动比公式(4.21)当拨叉使齿轮 1、2 啮合，齿轮 3、4 脱开时

$$n_{21} = \frac{z_1}{z_2} \times n_1 = \frac{22}{44} \times 600 \\ = 300 \text{ 转/分,}$$

当拨叉使齿轮 3、4 啮合，齿轮 1、2 脱开时

$$n_{22} = \frac{z_3}{z_4} \times n_1 = \frac{30}{36} \times 600 \\ = 500 \text{ 转/分。}$$

齿轮传动与皮带传动相比，它的优点在于不会打滑，有较精确的传动比；能传递很大的功率；转速可以很高。但它的缺点是制造复杂、造价贵；在负载过重时容易产生冲击、打牙现象；传动不平稳会产生噪声等。

四、其他传动

如果所需的降速比（即传动比的倒数）很大，但由于结构要紧凑不能采用多级齿轮传动时，可以采用蜗轮蜗杆的传动（图 4.38）。由蜗轮蜗杆传动的两转轴是互相垂直的。蜗杆可以看成是在圆柱体上制有齿槽螺纹的螺旋，而蜗轮就象一个斜齿轮。在传动过程中，蜗杆每转一周，蜗轮只绕过一个齿*，因此它们的传动比

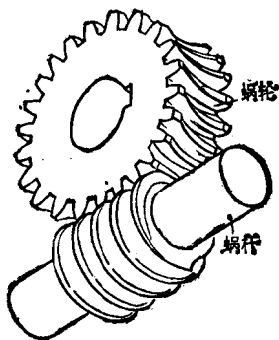


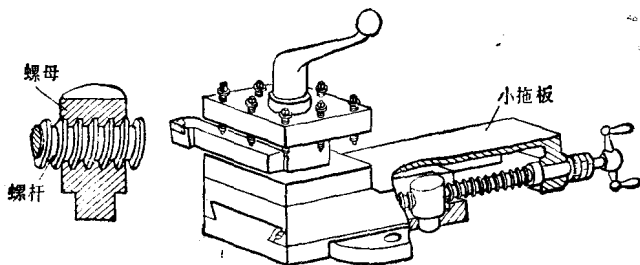
图 4.38 蜗轮蜗杆的传动

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{z}, \quad (4.23)$$

* 这里是指单头蜗杆而言。

式中 z 就是蜗轮的齿数。一般说来, 由于蜗杆螺旋线的升角 λ 远小于它的摩擦角, 因而蜗轮蜗杆传动具有自锁作用。即只能由蜗杆带动蜗轮, 而蜗轮不能带动蜗杆。

此外, 还有一些是在平动与转动之间传动装置。例如图 4.39a 就是利用螺杆螺母传动的示意图。当螺杆在转动时, 就能推动与螺母相连的滑块沿轴向作直线运动。车床上装刀架的小拖板就是利用螺杆螺母来传动的(图 4.39b)。螺母与底板固定, 转动螺杆就使小拖板作直线运动。但是利用螺杆螺母传动, 只能使转动变为平动, 并不能使平动变为转动。齿轮齿条传动可以使平动与转动互换。例如龙门刨床上的平台运动就是依靠齿轮齿条来传动的(图 4.40)。



(a) 示意图

(b) 车床上装刀架的小拖板

图 4.39 螺杆螺母传动

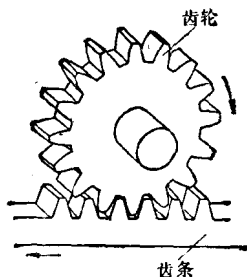


图 4.40 齿轮齿条传动

习题 4.17 在图 4.29 中, 已知电动机轴的转速为 1440 转/分, 轴上的皮带轮直径为 150 毫米。如果脱粒机滚筒的转速需要 150 转/分, 问在滚筒轴上需要装配直径多大的皮带轮?

习题 4.18 如果两个同类型的齿轮的分度圆直径相等, 但齿数不等, 能不能啮合配套使用? 如果齿数相等但分度圆直径不等呢?

习题 4.19 假设两根平行轴的中心距离为 400 毫米, 需要配上一对啮合齿轮而传动比等于 $1/4$, 问这对齿轮的分度圆直径各需多大? 如果取模数为 8 毫米, 问主、从动齿轮的齿数各是多大?

复 习 题

习题 4.20 用杠杆的平衡条件来分析各类杠杆的特点。为什么杠杆只能省力却不能省功?

习题 4.21 在自来水笔杆和笔套上的螺纹能起什么作用? 为什么?

习题 4.22 为什么电动起重机械一般都装有齿轮减速箱? 为什么汽车在爬坡时总要用头档低速行驶?

习题 4.23 工厂车间里通常使用的行车的起重部件叫做电动滑车

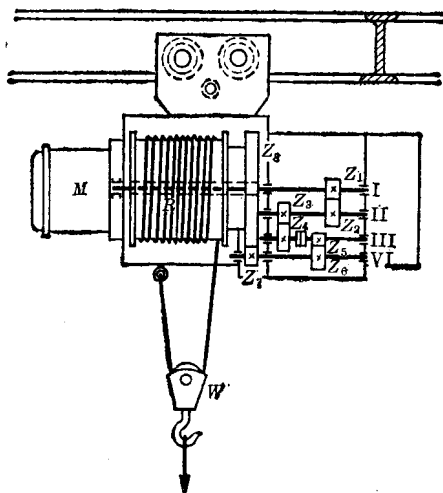


图 4.41 电动滑车

(图 4.41)。它包括电动机 M 、卷筒 R 和滑轮 W 三部分。电动机轴穿过卷筒中心孔与减速箱轴 I 相连。减速箱内齿轮的齿数依次为 $z_1=14$ 、 $z_2=18$ 、 $z_3=12$ 、 $z_4=20$ 、 $z_5=8$ 、 $z_6=16$ 、 $z_7=12$ 、 $z_8=76$ 。问减速箱是几级传动？传动比有多大？

习题 4.24 上题中如果卷筒直径为 165 毫米, 电动机的功率为 2.5 马力, 转速为 940 转/分, 整个装置的机械效率为 90%, 问动滑轮的升降速度有多大? 最大起重量有多大?

(提示: 滑轮的升降速度相当于钢丝绳速度的一半。为什么?)

第五章 流体的力学性质

在前几章里,主要讨论了固体的力学性质,这一章进一步来讨论流体的力学性质以及它们在生产技术上的应用。所谓流体就是具有显著的流动性的物体,是液体和气体的统称。

液体和气体的性质并不完全相同。例如气体很容易压缩,而液体的压缩性就很差,几乎不能压缩;液体具有一定的体积,而气体可以无限膨胀等等。然而液体和气体也有许多类似的性质。

在这一章里,我们先来讨论液体和气体在静止时的一些共同性质,然后再来分析液体和气体在运动时的基本规律,同时扼要介绍这些内容在生产技术上的应用。在叙述中虽然主要是讨论液体,但所得到的结论对于气体也同样适用。

第一节 流体的压强

一、压力和压强

在开过拖拉机的泥地上会留下很深的轮胎痕迹,表明地面受到很大的压力,产生了形变。压力对受力面的作用效果除与压力大小有关外,与受力面积的大小也有关系。例如我们在水田里拔秧时,如果坐在四脚小凳上,凳脚往往在泥里陷得很深;如果将凳的底面改成板状(图 5.1),扩大了受力面积,坐在上面总的压力虽不变,但由于压力比较分散,就不容

易下陷了。

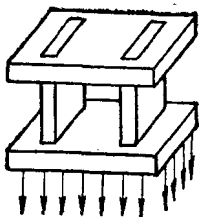


图 5.1 底面是板状的拔秧凳

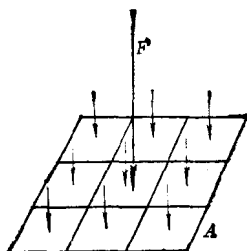


图 5.2 压强的含义

通常把单位面积上受到的压力叫做压强,用字母 p 表示。如图 5.2 所示,若用 F 表示总压力, A 表示受力面积,那么

$$p = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

压强反映了压力对受压面作用效果的大小。上式表明:在总压力一定的情况下,压强与受压面积成反比;受压面积越大,压强就越小。所以载重汽车的车轮较多,而且轮胎也比较宽,为的是增大与地面的接触面以减小对地面的压强。

压强的单位是由力的单位和面积的单位组成的。常用的压强单位有达因/厘米²(微巴)、公斤/厘米²等。详见表 5.1。

一般说来,受压面上的压力分布状况往往是不均匀的,因此由公式 (5.1) 算出的压强只能表示在面积 A 的范围内的平均压强。只有在把受压面取得很小时,算出的值才能精确地反映出这个小范围(近似于一点)的压强。

【例题 5.1】 计算 10 米高的砖墙对地基的压强有多大? 假设砖的比重为 1.8 吨/米³。

解: 在已知条件中并未给出砖墙有多长多宽。先假设砖墙长为 a 米, 宽为 b 米, 高为 h 米。由于砖墙对地基的总压力

就是砖墙的总重量,可按它的体积 $V=abh$ 和比重 d 求出。于是可以列出砖墙对地基的总压力

$$F=P=Vd=abhd,$$

而砖墙与地基的接触面积 $A=ab$, 因此砖墙对地基的压强

$$p=\frac{F}{A}=\frac{abhd}{ab},$$

即

$$p=hd,$$

将已知数据代入得

$$p=10 \times 1.8 = 18 \text{ 吨/米}^2 = 1.8 \text{ 公斤/厘米}^2。$$

从上面的例题中可以看出, 固体由于重量而引起的压强总是沿着重力的方向作用的。对于象直角柱体、圆柱体等截面积大小不变的固体说来, 不论它的底面积多大, 它对底面压强的大小, 只决定于它的高度和比重。当固体的截面积有增大或减小时(图 5.3), 它对底面的压强就要减小或增大。这时上述公式就不再适用。

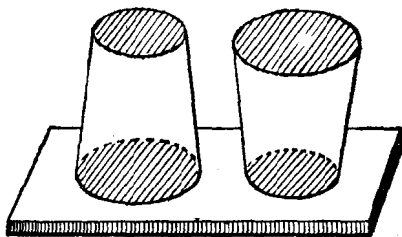


图 5.3 截面积大小不同的固体

二、液体的压强

盛水的桶, 不仅桶底漏了要漏水; 即使桶壁上有漏洞, 水也会喷出来(图 5.4)。这就表明液体由于重量而引起的压强, 不仅沿着重力方向作用在容器底部, 而且还沿着各个方向作用在容器的整个侧壁上。通常把这个压强叫做液体的侧压强。正是由于水的侧压强的存在, 因此水库的堤坝要修筑得很坚固。

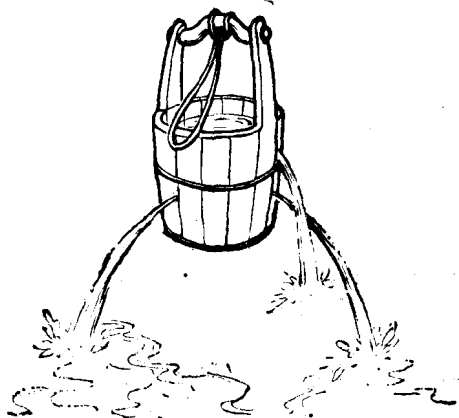


图 5.4 漏水的桶

从图 5.4 中还可以看出，在水桶的侧壁上同一深度上的漏洞，水喷得同样远；而越在下端的漏洞，水喷得越远。这就

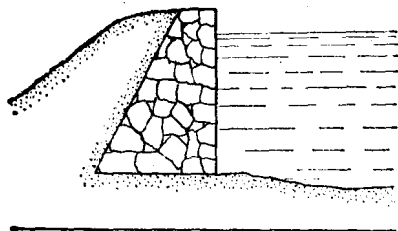


图 5.5 堤坝

表明液体的侧压强是随着水的深度而增大的。所以堤坝是越往下筑得越厚的，这样才能承受越来越大的侧压强(图 5.5)。

此外，同一个容器，器壁上所受的压强，在装水银时要比在装水时大得多。这就表明，液体由于重量而引起的压强和它的比重有关。总之，深度和比重是影响液体由于重量而引起的压强大小的两个因素。实验表明：液体由于重量而引起的压强可由它的深度和比重的乘积来计算。即

$$p = h\gamma, \quad (5.2)$$

式中 h 表示液体的深度, d 表示液体的比重。上述公式不仅可以用来计算液体对容器的侧压强, 而且还可以用来计算液体对容器底部的压强, 无论容器壁的形状如何。

【例题 5.2】某抽水站的进水闸门宽 4 米, 高 2 米 (图 5.6)。从上游的水面到闸门上、下檐的深度分别为 8 和 10 米。求作用在闸门上的总压力。

解: 要计算水作用在闸门上的总压力, 首先必须算出闸门所受水的侧压强。由于深度不同, 闸门上各点所受的侧压强也并不一样, 因此取闸门中点的压强作为平均压强, 即

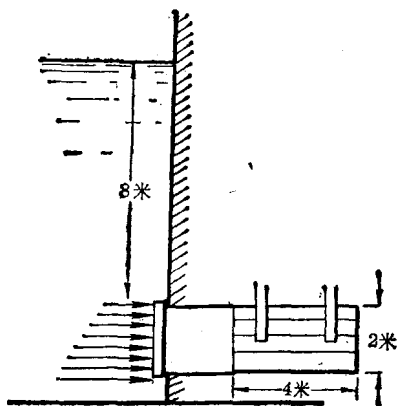


图 5.6

$$\bar{p} = hd = \frac{1}{2} (8 + 10) \times 1 = 9 \text{ 吨/米}^2,$$

所以根据闸门的面积 $A = 4 \times 2$ 米可以算出闸门所受的总压力

$$F = \bar{p}A = 9 \times 4 \times 2 = 72 \text{ 吨}。$$

潜水员在潜入水下进行深水作业时, 身体四周都会受到水的压强, 表明液体由于重量不仅对容器侧壁存在压强, 而且在液体内部, 对浸在液体内的其他物体也都存在压强。通常把这个压强叫做液体的内部压强。因为液体的内部压强同样是由它的重量所引起的, 所以它的大小同样决定于液体的深度和比重, 同样可按公式 (5.2) 计算, 而且它的方向是指向一切方向上的, 或者说液体内部任一点的压强在一切方向上。

都是相等的。这可以根据力的平衡原理来解释。在静止的液体

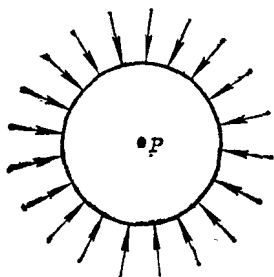


图 5.7 液体内部任一点的压强在一切方向上都相等的说明

体里取一个以 P 点为中心的液体小球 (图 5.7), 它显然是在重力和周围液体对它的侧压力的作用下而处于平衡状态。如果小球的半径足够小, 它的重力就可以忽略不计, 而周围液体对它的侧压力依然存在。根据力的平衡原理, 可以认为来自各个方向的侧压力都指向中心 P 而且大小都相等。这是因为只有这样才能保证合力等于 0, 否则小球就要

沿合力的方向而发生移动。从周围液体对 P 点的来自各个方向的侧压力都相等可以推知 P 点对周围各个方向上的侧压力以及侧压强也都相等。这样也就证明了液体内部任一点的压强在一切方向上都相等的结论。

图 5.8 是一个由底部互相连通的几个容器组成的容器, 叫做连通器。实验表明: 无论它的各组成容器器壁的形状如何不同, 当连通器中的液体静止时, 各容器内的液面总是在同一水平面上。从这点事实

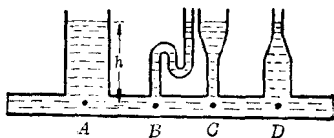


图 5.8 连通器

可以推知连通器底部在同一水平面上的各点, 如图 5.8 中的 A 、 B 、 C 、 D 等点的压强都是相等的, 不然

的话, 液体就要发生流动了。由此可见, 液体内部任一点的压强只决定于液体的深度和比重, 并不受容器器壁形状的影响。例如假设图 5.8 的连通器内液体的比重为 d , 那么 A 、 B 、 C 、 D 等点的压强就都等于 hd (h 是这些点离液面的深度)。

连通器原理的应用很广泛。如在工业用锅炉、贮油槽或大容量变压器的油箱上都附装一根铅直的细玻璃管，叫做水位计(图 5.9)。它的两端都与贮液槽相连通，因此只要观察水位计内液面的高度就可以推测出贮液槽内液面的高度。

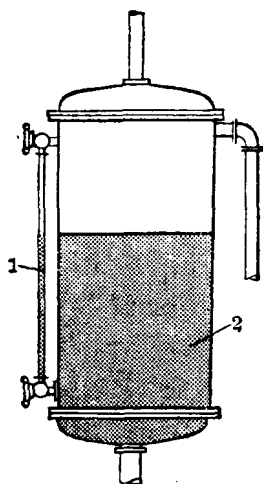


图 5.9 水位计
1—水位计；2—贮油槽

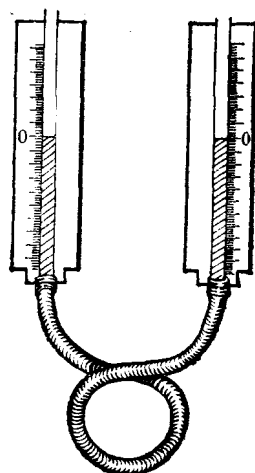


图 5.10 简易测高仪

在平整大面积农田、山区开辟梯田或栽种果树时，往往需要测量所开辟的地面是否平坦，或者要测出不同地面相差的高度。这时我们就可以利用连通器原理来制作一个简易的测高仪。它是由一根较长的橡皮管和两根附有刻度尺的长玻璃管连接起来构成的，刻度尺的 0 点设在中间。使用前，先在管内灌上水，使两玻璃管铅直地放在同一水平面上，管内水面恰好都在 0 刻度上(图 5.10)，这样就成了一个连通器。为了便于观察，最好在水中加些颜色水。

在测量不同地面相差的高度时，先将两刻度尺铅直地分

别插在两个要测高度差的不同地点上。如果两地是在同一水平面上,不存在高度差,两玻璃管内的水面就都在0刻度上;如果两地存在高度差,就可以根据各地玻璃管内水面在0刻度的下方或上方来决定该地的高低,而两地的高度差就等于任一水面与0刻度的距离的2倍。

三、大气压强

我们所居住的地球表面充满着一层厚厚的大气层。众所周知,大气也有重量,因而它对地面上和空间的一切都有压强,这个压强就叫做大气压强。

那么大气压强有多大呢?由于在不同的高度上大气的比重是不同的,因此不能象计算液体的内部压强那样按公式(5.2)直接计算出来。为了确定大气压强的大小,可以做这样的实验。取一根一端封闭的长1米左右的细玻璃管,先将管口向上,用小漏斗往管内灌满水银。然后用手指堵住管口,将玻璃管倒置过来,如图5.11a所示,并把管口插入槽内的水银面下才松开手指。这时管内的水银就要下降而流入槽内,但等管内水银面下降到一定程度后,就不再下降如图5.11b所示。如果使玻璃管保持铅直位置,用直尺来测量一下水银柱超出槽内水银面的高度,一般总为75~76厘米。这时我们就说大气的压强就相当于玻璃管内水银柱底部的压强。为什么呢?我们可以把图5.11b中的玻璃管和水银槽看成是一个连通器,那么槽内水银面上某一点和玻璃管内同一水平面上的一点压强应该相等。由于管外的那点与大气相通,它所受的压强就是大气压强。而管内这一点所受的压强就是水银柱对它的压强;又因管内水银面上方是真空区域,并不存在空气,因此只要计算出这点的压强,就得出这时的大气压强。

实际上,大气压强的大小并不是固定不变的。它不仅随着各地区海拔高度的增大而略为减小,而且还与当时当地的气候条件有关。因为水汽的比重较空气的小,所以当大气中水汽的含量增多或减少时,大气压强就有所减小或增大。一般说来,夏天的大气压强比冬天的小;晴天的大气压强比雨雪天的大。通常把纬度为 45° 的海平面上的大气压强叫做标准大气压,它就相当于76厘米高的水银柱底部的压强。根据公式(5.2)可以算出

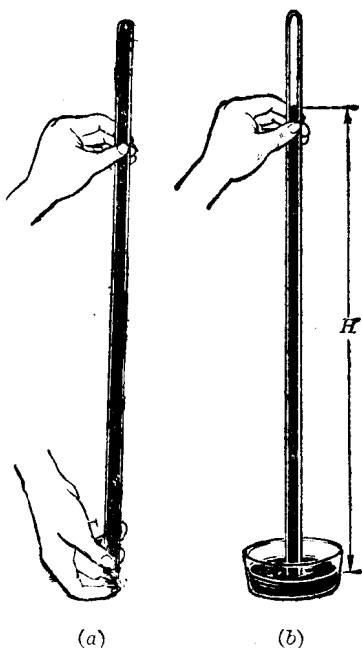


图 5.11 确定大气压强大小的实验

$$\begin{aligned}
 1 \text{ 标准大气压} &= 76 \text{ 厘米水银柱高} \\
 &= 76 \times 13.6^* \\
 &= 1033.6 \text{ 克/厘米}^2 \\
 &= 1.0336 \text{ 公斤/厘米}^2。
 \end{aligned}$$

在工业上不需要很精确的工作中,往往把 1 公斤/厘米^2 的压强叫做 1 个工业大气压。例如电焊用的氧气瓶在充足氧气时,压强为 150 个工业大气压,即 150 公斤/厘米^2 。在低气压,特别是在真空工作中常把 1 毫米高的水银柱底部的压强

* 指水银比重为 13.6 克/厘米^3 。

叫做 1 托。即

$$1 \text{ 托} = 1 \text{ 毫米水银柱高} = 0.1 \times 13.6$$

$$= 1.36 \text{ 克/厘米}^2 = 0.00136 \text{ 公斤/厘米}^2。$$

此外，在气象工作中还规定一种叫做毫巴的压强单位。所谓 1 巴就等于 1000000 达因/厘米²，而

$$1 \text{ 巴} = 1000 \text{ 毫巴} = 1000000 \text{ 微巴，}$$

因此

$$1 \text{ 毫巴} = 1000 \text{ 达因/厘米}^2； \quad 1 \text{ 微巴} = 1 \text{ 达因/厘米}^2。$$

在表 5.1 中列出了各种量度压强的常用单位以及它们之间的换算关系。

表 5.1 几种常用的压强单位

单 位 制	压 力	面 积	压 强	换 算 关 系
厘米克秒制	达 因	厘米 ²	达因/厘米 ²	=1 微巴
实 用 制	公 斤	厘米 ²	公斤/厘米 ² (工业大气压)	=980000 微巴 =980 毫巴
			标准大气压	=1.0336 公斤/厘米 ² =1013.6 毫巴 =760 托
			毫米水银柱 高(托)	=1.333 毫巴 =0.001315 标准大气压
			巴	=1000000 达因/厘米 ² =1000000 微巴 =1000 毫巴

测量大气压强的仪器种类很多。在实验室、气象站里使用的槽式水银气压表(图 5.12)就是根据上述实验原理制成的。图中 *E* 是盛水银的皮囊,转动旋钮 *D* 可以调节囊内水银面的高低,使它恰好与尖端 *B* 相接触;*C* 是密封玻璃管内的水

银柱，玻璃管外有金属壳保护，金属壳上附有从 E 和 B 接触处开始算起的刻度尺，因此可以直接从 A 处刻度上读出管内水银柱的高度。

四、压 强 计

要测量密闭容器内气体或蒸汽的压强时，就要用到压强计。

通常在空气压缩机、蒸汽锅炉等设备上用的是一种金属压强计（图5.13），俗称压力表。它的主要构造是一个圆弧形的有弹性的空心扁铜管 R ，管的一端 A 是开口的，经过直管和待测的气体相连通；另一端 B 是能够自由活动的闭合端，经过杠杆和一对传动齿轮与指针相连。当待测气体进入扁铜管后，由于它对管壁的压强，使扁铜管发生形变，从而带动杠杆等使指针发生偏转，就在刻度盘上把

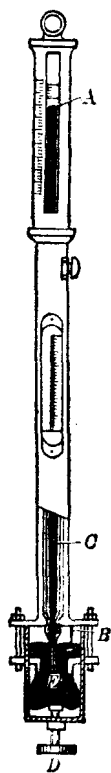


图 5.12 槽式水银气压表

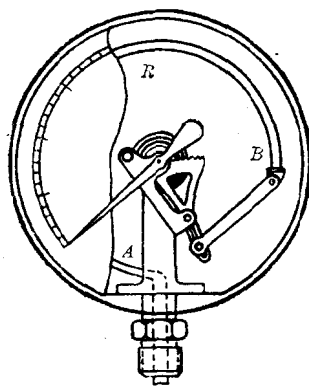


图 5.13 金属压强计

待测气体的压强指示出来。

当金属压强计与大气相通时, 指针就指在零刻度上。这就表明在金属压强计上, 指针所指的数值是指气体压强超出大气压强的数值, 通常把它叫做气体的相对压强, 或者简称气体的表压, 用字母 p_g 表示。如要找出气体实际的压强, 还必须加上当时的大气压强 H 。即待测气体的实际压强(或称绝对压强)

$$p = p_g + H. \quad (5.3)$$

金属压强计的规格很多, 高压金属压强计可以用来测量高压气体的压强。例如一般在装氧气的钢瓶头上装有两个金属压强计。一个是高压的, 刻度可达 250 个工业大气压, 是用来指示贮气瓶内氧气的压强的; 另一个是低压的, 刻度只到 10 或 20 个工业大气压, 是用来指示使用端的氧气压强的。这是因为使用端的氧气压强可以根据需要由一个针阀来调节控制。

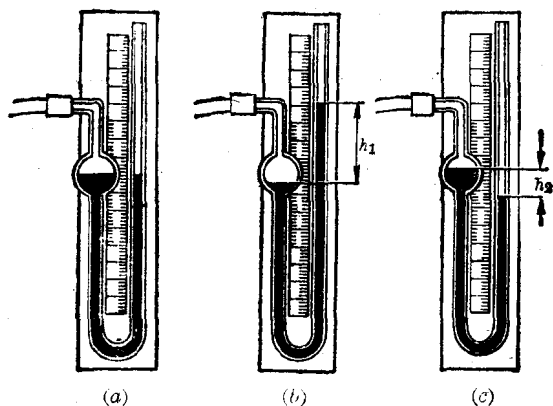


图 5.14 U 形管水银压强计

要测量低于或略高于大气压强的气体压强, 可以使用 U 形管水银压强计(图 5.14)。它是一个盛有水银的 U 形管, 旁

边附有刻度尺。U形管的开端与大气相通，另一端由橡皮管与待测气体的容器相通。如果U形管内两端水银面高度相等(图 5.14a)，表明待测气体的压强 p 等于当时的大气压强 H ；如果U形管内左端水银面低于开端水银面 h_1 毫米(图 5.14b)，表明待测气体的压强 $p = H + h_1$ (托)；如果U形管内左端水银面高于开端水银面 h_2 毫米(图 5.14c)，表明待测气体的压强 $p = H - h_2$ (托)。

习题 5.1 用较宽的扁担挑重物与窄的扁担相比有什么好处？

习题 5.2 重 2200 公斤的履带式拖拉机，如果它的两条履带和地面的接触面积共为 6400 厘米²，求它对地面的压强。

习题 5.3 我国新安江水力发电站的拦河大坝长 405 米，高 105 米。当坝内水深 75 米时，问坝体上受到的最大压强有多大？平均压强有多大？总压力又有多大？

习题 5.4 水闸的矩形闸门宽 2 米，高 1 米，安装在水闸的斜壁上(图 5.15)，壁与水平面成 45° 角，闸门的上槽离上游水面的深度为 2 米，求闸门所受的平均压强和总压力。

习题 5.5 茶壶盖上都有一个小孔。在茶壶里灌满水的情况下，盖上如没有小孔，水就不容易倒出来，为什么？在茶壶里水不满时，为什么盖上的小孔又失去作用了？

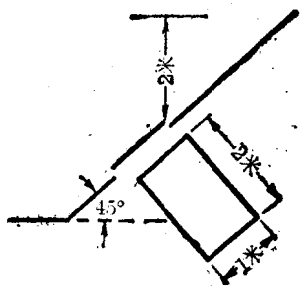


图 5.15

习题 5.6 如果想用一根一端封闭的长玻璃管盛满水来做图 5.11 的确定大气压强大小的实验，是否可能？为什么？

第二节 液体对压强的传递

一、液体压强传递的规律

“有比较才能鉴别。”为了弄清液体压强传递的规律，先

来观察固体是怎样传递压力的作用的。

用钉锤在墙上敲铁钉时,铁钉把它受到的压力传递给墙壁。在传递过程中,如果钉锤对铁钉的压力是2公斤,那么铁钉对墙壁的压力也是2公斤,而且方向完全一致。但由于铁钉尖端与墙壁的接触面积很小,因此铁钉对墙壁的压强就要比钉锤对铁钉的压强大的很多。上述实例表明,固体在传递压力时,大小和方向都不变,但压强可以随着接触面积的增大或减小而有所变化。这就是固体对压力传递的规律。对于液体说来,由于它的流动性,情况就完全不同了。

图5.16是一个一端带有活塞的球形容器,上面布满着细孔。当容器里装满水,而用手将活塞向容器里的水施加压力时,不仅沿着压力方向上的细孔有水喷出,而且所有的细孔都有水喷出。这表明密闭容器里的液体能把它在一处受到的压力向内部各处和向各个方向传递。

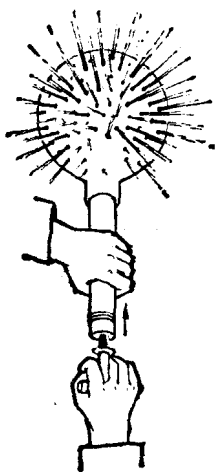


图 5.16 液体压强
传递演示器

那么液体在传递压力过程中,压力的大小是否有变化呢?这可以用图5.17的实验来说明。图中 G 是一个广口玻璃瓶,瓶中装有颜色水。在瓶塞上开四个孔,插进四根玻璃管,然后将瓶塞塞紧以防止漏气。三根玻璃管的下端是在水中的不同深处,开口的方向也各不同;另一根的下端在水面上,上端经过一个三通管 T 与一个装水的U形管压强计和打气球相连通。在没有打气以前,压强

计两端水面在同一水平面上,表示广口瓶内水面上密封气体的压强等于大气压强。这时三根玻璃管内的水面也和瓶内的

水面一致。用手挤压打气球,将空气压进瓶内,U形管开端水面就上升,表示瓶内水面上的气体压强增大了。这时瓶内三根玻璃管内的水面也随着上升,表示瓶内水面下这三根玻璃管的下端开口处的压强也都增大了。虽然它们在水面下的深度不同,而且开口的方向也各不相同,但它们压强的增大部分都相当于一段高 h 的水柱,即等于U形管两端水面的高度差 h 。这一事实充分表明,瓶内水面上受到的气体对它的压强已经大小不变地传递到水面下各点的各个方向上。由此可知,密闭容器内的液体能把它在一处受到的压强大小不变地向内部各点和各个方向传递。这就是液体压强传递规律,又叫做巴斯噶原理。这条规律和其他所有的物理定律、原理一样,是人们经过长期的生产斗争和科学实验而总结出来的。

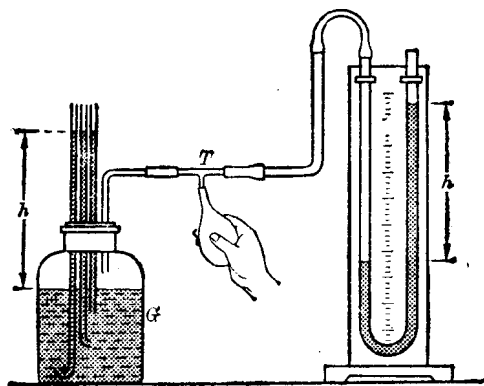


图 5.17 关于液体压强传递的实验

从图 5.17 的实验中还可以看出,瓶内水面下各点的压强是由两部分组成的,一部分是由于液体重量而引起的;另一部分是由于液面受到的压强传递给它的。因此一般说来,在计算敞开的液面下某一点的压强时,除了按公式(5.2)算出由于

液体重量而引起的压强外，还必须加上传递给它的液面上的大气压强。

二、液压传递规律的应用

掌握了液体压强的传递规律，就可以把它运用在生产技术上，变小压力为大压力，同时还可以改变压力的方向，制造一种简单机械。例如油压千斤顶、万吨水压机以及拖拉机、汽车、机车、机床上的液压、气压传动与控制设备等都是利用这一规律制成的。

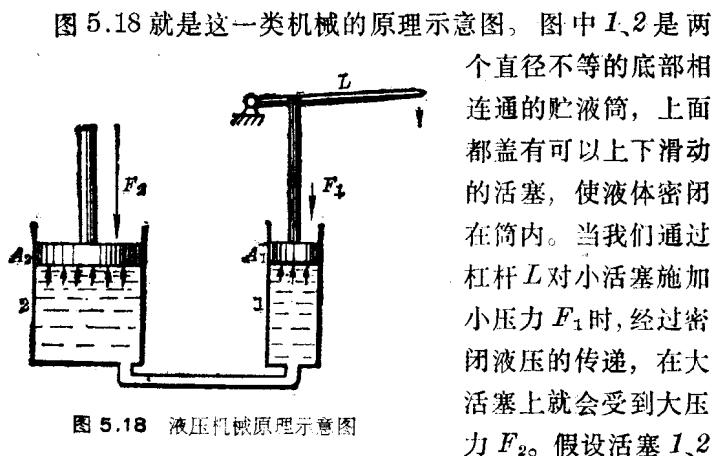


图 5.18 液压机械原理示意图

的面积依次为 A_1 、 A_2 ，那么小活塞作用在密闭液体上的压强

$$p = \frac{F_1}{A_1},$$

经过密闭液压的传递，在大活塞上也受到同样大小的压强 p 。于是可以列出

$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1},$$

即

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1。 \quad (5.4)$$

上式表明：如果大活塞的面积是小活塞的几倍，大活塞上所受的
压力就是小活塞所加的几倍。

下面就来简单介绍这一类机械的主要结构和动作原理。

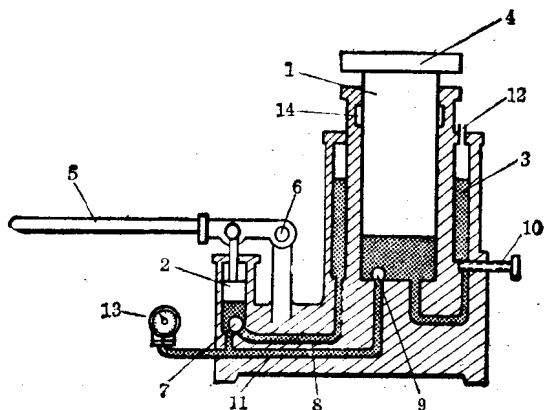


图 5.19 油压千斤顶结构截面示意图

- 1—大活塞；2—小活塞；3—贮油槽；4—平台；5—手动杠杆；
6—杠杆支点；7—进油阀；8—进油管；9—压油阀；10—针阀；
11—压油管；12—通气孔；13—压力表；14—防漏皮圈

油压千斤顶是一种小型的油压起重机，在检修拖拉机、棉花打包时都可以使用它。图 5.19 就是它的结构截面示意图。它的主要结构是两个附有活塞 1、2 的圆筒和套在大圆筒周围夹层里的环形贮油槽 3。它们之间都有管道和阀门相连通。大活塞上的平台 4 是顶抬重物用的；与小活塞相连的是一套手动杠杆 5、6 就是它的支点。工作时，只要把大活塞上的平台顶住重物，同时上下扳动杠杆的手柄，大活塞就会慢慢上升，

将重物顶高起来。

这里扳动杠杆手柄包括两个过程，起了两个作用。在把手柄向上扳的过程中，小活塞跟着向上移动。这时小活塞下油的压强减小，底部的进油阀 7 被吸开，贮油槽内的油在大气压强的作用下经过进油管 8 从进油阀进入小圆筒；同时与大圆筒相连的压油阀 9 被压紧，切断了两圆筒间的联系。因此这个过程的作用是把贮油槽里的油吸进小圆筒。在把手柄向下压的过程中，小活塞也跟着向下移动。这时小活塞下油的压强增大，底部进油阀被压紧，切断了与贮油槽的联系；同时与大圆筒相连的压油阀被顶开，两个圆筒就连通了。小圆筒里的油就流向大圆筒，并依靠油压的传递，将大活塞抬高。因此这个过程的作用是把小圆筒里的油压进大圆筒。

连续扳动杠杆手柄，就能把重物顶高到所需的高度。在需要将大活塞回降时，可以开放针阀 10，大圆筒里的油就直接流回贮油槽。

〔例题 5.3〕 建筑工地上用的油压起重机的最大起重量是 10 吨。已知小活塞直径 $d_1 = 1.6$ 厘米、大活塞直径 $d_2 = 12$ 厘米，手动杠杆全长 $l = 30$ 厘米、从小活塞杆销到支点的距离 $s = 2.5$ 厘米。问在杠杆手柄处必须用多大的力才行（参看图 5.19）？

解：假设大、小活塞的面积分别为 A_2, A_1 厘米²，而作用在它们上面的压力依次为 F_2, F_1 公斤。根据已知条件可知

$$A_1 = \frac{\pi}{4} d_1^2 = \frac{3.14}{4} \times (1.6)^2 \doteq 2.01 \text{ 厘米}^2,$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} d_2^2 = \frac{3.14}{4} \times (12)^2 \doteq 113 \text{ 厘米}^2,$$

$$F_2 = 10 \text{ 吨} = 10000 \text{ 公斤}。$$

在忽略摩擦和活塞本身重量的条件下, 根据公式(5.4)可以算出作用在小活塞上的压力

$$F_1 = \frac{A_1}{A_2} F_2 = \frac{2.01}{113} \times 10000 \doteq 178 \text{ 公斤。}$$

再根据杠杆原理可知, 手柄上所用的力

$$F = \frac{s}{l} F_1 = \frac{2.5}{30} \times 178 \doteq 14.8 \text{ 公斤。}$$

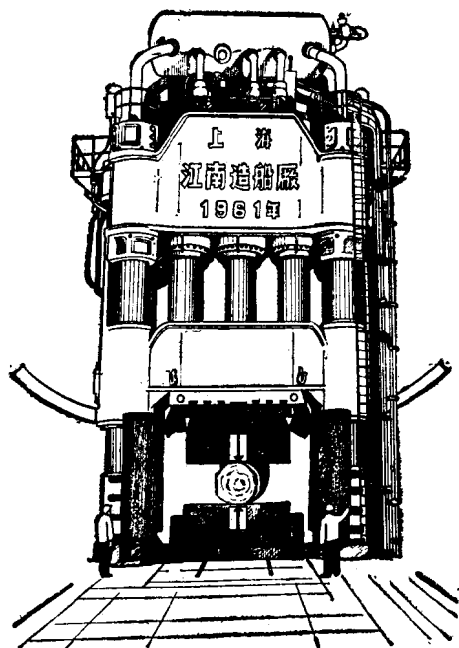


图 5.20 我国自行设计制成的第一台万吨水压机

万吨水压机是一种重型锻造机械, 是重型机械制造工业的关键设备。它的主要工作原理大体上是和上述油压机一样的, 只是结构较复杂, 并有一整套辅助设备和操作设备。我

国工人阶级遵照毛主席关于“独立自主,自力更生”的教导,敢于攀登科学技术高峰,采取土洋结合的办法,经过四年的艰苦奋战,终于在1961年自行设计制成了我国第一台12000吨水压机(图5.20)。

这台万吨水压机的压强和动力来源是依靠电动机带动空气压缩机产生的高压空气。高压空气分别作用在六台高压水泵上,打出高压水,它的压强高达300公斤/厘米²,作用在相当于大活塞的柱塞上。柱塞的面积为40000厘米²,因此产生的总压力可达12000吨。工人老师傅把这种增大压强的原理总结为“气压水,水压铁”。

习题5.7 当一艘潜水艇潜入海面下50米深处,问这时潜水艇表面受到的平均绝对压强有多大?(海水的比重为1.03吨/米³。)

习题5.8 利用油压机可以省力,但是能否省功呢?为什么?

习题5.9 假设某简单油压机的大活塞面积是小活塞的8倍,如果通过手柄对小活塞加压力15公斤,并使小活塞下移1厘米,问大活塞受到多大的压力?并上移多少距离?

第三节 浮 力

一、浮 力 定 律

我们在用木桶从河里汲水时,必须先把桶底朝上,否则就需要费很大劲才能把桶掀下水去。这表明在水面上的木桶要受到水对它的上托力。通常把浸在液体中的物体所受到的上托力叫做液体的浮力。不仅象铝锅、瓷碗、水泥船等能浮在水面上的物体要受到水的浮力,即使全部没在水中的物体也要受到水的浮力作用。

浸在液体里的物体将受到多大的浮力呢?让我们来做个简单的小实验。把一个空的小铝锅放在水面上,可以看到铝

锅的大部分露在水面上。当用手把它往下掀时(图 5.21a),就会感到越往下掀, 阻力越大。这个阻力就是水对铝锅的浮力。上述实验表明, 物体没在液体中的部分越多, 受到的浮力就越大。或者说, 被物体排开掉的液体越多, 物体所受到的浮力就越大。如果在铝锅里加些水来代替手的压力(图 5.21b), 就会发现铝锅内外的水面几乎是一样平的。这表明铝锅所受到的浮力差不多等于被它排开掉的水的重量。进一步精确的实验表明: 浸在液体中的物体所受到的浮力的大小就等于被它排开掉的液体的重量。这个结论就叫做浮力定律, 又叫做阿基米德定律。

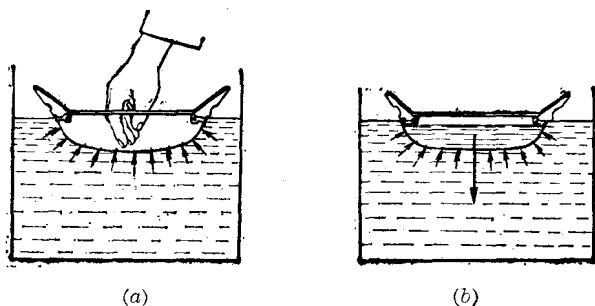


图 5.21 关于液体浮力的小实验

根据浮力定律, 对于全部浸在液体中的物体说来, 它所受浮力的大小就等于与它同体积的液体的重量; 对于部分浸在液体中的物体说来, 它所受浮力的大小就等于它浸在液体中的那一部分体积的液体的重量。

那么液体的浮力是怎样形成的呢? 这可以用液体的内部压强来解释。

假设有一块立方体全部浸在液体中(图 5.22), 它的前后、左右、上下六个表面都受到液体的压力。由于它的上表面与

液面平行, 因此它的前后、左右四个表面都在同一深度上, 所受到的平均压强都相等。所以它的前后表面上和左右表面上

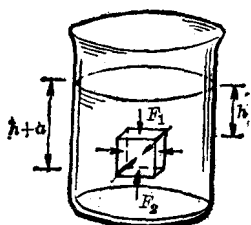


图 5.22 关于液体浮力形成的解释

所受到的压力都相互平衡, 而只有上下两个表面上所受的压强不同, 压力也不同, 下表面所受的压力较大。立方体在这两个表面上所受的压力的合力就是它所受的浮力。因此浮力的方向总是铅直向上的。

设立方体每边为 a 厘米, 上表面离液面 h 厘米, 液体的比重为 d 克/厘米³。这样上表面所受的向下的压力

$$F_1 = A_1 p_1 = a^2 h d,$$

而下表面所受的向上的压力

$$F_2 = A_2 p_2 = a^2 (h+a) d。$$

因此立方体所受的向上的合力就是液体对它的浮力

$$F = F_2 - F_1 = a^2 (h+a) d - a^2 h d = a^3 d,$$

式中 a^3 就是立方体的体积 V , 即

$$F = V d。$$

上式表明, 立方体所受的浮力 F 就等于与它同体积的液体的重量 Vd 。

利用浮力定律可以把形状不规则的固体的体积和比重很快测定出来。具体的方法是先用弹簧秤或杆秤称出待测固体在空气中的重量 P , 再把待测固体浸没在已知比重为 $d_{\text{液}}$ 的液体中, 称出它在这种液体中的重量 P' , 从而可以推知固体在

* 实际上物体在空气中也要受到空气的浮力, 因此严格说来在空气中称得的固体重量要比固体的实际重量轻些。这个差额就等于与它同体积的空气中的重量, 一般可以忽略不计。

这种液体中所受的浮力 $F = P - P'$ 。根据浮力定律可知，这个浮力 F 就等于被固体排开掉的与它同体积的液体的重量，因此被排开掉的液体的体积

$$V = \frac{F}{d_{\text{液}}} = \frac{P - P'}{d_{\text{液}}},$$

这个体积 V 也就是待测固体的体积。于是可以算出待测固体的比重

$$d_{\text{固}} = \frac{P}{V},$$

即

$$d_{\text{固}} = \frac{P}{P - P'} d_{\text{液}}。 \quad (5.5)$$

如果在测定过程中所用的液体是纯水，由于纯水的比重为 1 克/厘米³，公式(5.5)就可以简化为

$$d_{\text{固}} = \frac{P}{P - P'}。 \quad (5.6)$$

此外，用类似的方法还可以来测定液体的比重，所不同的是用比重已知的固体，称出它在空气中的重量 P 和在待测液体中的重量 P' ，然后按公式(5.5)即可算出待测液体的比重

$$d_{\text{液}} = \frac{P - P'}{P} d_{\text{固}}。 \quad (5.7)$$

二、物体的浮沉

既然所有浸在液体中的物体都要受到液体的浮力，那么为什么在液体中有的物体会上浮，而有的物体却下沉呢？

原来物体在液体中是上浮还是下沉，不仅决定于它所受浮力的大小，而且还与它的重量有关。一般说来，浸没在液体中的物体同时受到浮力和重力的作用，它们的方向恰好相反。

因此,当浮力大于重力时,物体就上浮,直到露出液面,成为浮

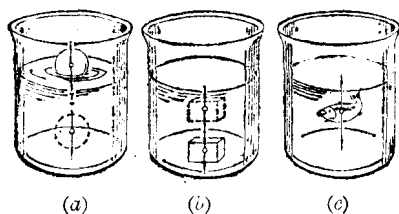


图 5.23 物体的浮沉

体(图 5.23a); 当浮力小于重力时,物体就下沉,一直沉到液体底部,由底部向上的支持力来帮助平衡,成为沉体(图 5.23b); 当浮力等于重力时,物体就能在液体

的任何深度下保持平衡,成为悬浮体(图 5.23c)。

对于比重均匀的实心物体说来,假设它的体积为 V , 比重为 $d_{\text{实}}$, 那么它的重量就等于 $Vd_{\text{实}}$ 。当它浸没在比重为 $d_{\text{液}}$ 的液体中时,根据浮力定律,它所受的浮力就等于 $Vd_{\text{液}}$ 。因此这种实心物体在液体中的浮沉条件就可以通过比较 $d_{\text{实}}$ 和 $d_{\text{液}}$ 的大小来决定。例如铁块在水中就下沉,而在水银中就上浮,因为铁的比重大于水而小于水银。

在农业上就是利用这一原理来进行浮力选种的。将硫酸铵水或盐水或泥水配成比重小于饱满种子而大于瘪粒的溶液,把待选的种子倒进溶液后,其中饱满的种子就下沉,而瘪粒和病虫粒就上浮,捞去液面上的不用,余下的就是饱满的好种子了。对于稻种和麦种,一般用 20% 的盐水或 25% 的硫酸铵水或 30% 的泥水即可,如对种子质量要求更高时,可把浓度再增高一些。

三、浮 体

空心物体,尽管它的材料的比重可以比水(或其他液体)的大,但由于构成中空形状后体积增大了,能排开的水也增多了,因此它所受的浮力可以比它的重量大得多而上浮。但是

为什么当它在露出水面之后，到一定程度就不再继续上浮了呢？因为在露出水面之后，随着它的没在水里的部分体积的减小，它所受的浮力也在减小。当浮力减小到恰好与重力的大小相等时，它就处于平衡状态而成为浮在水面上的浮体。由此可知，浮体的重量就等于它所受的浮力的大小，也就等于被它排开掉的液体的重量。

[例题 5.4] 某山区知识青年计划用木筏将山货运输出去。组成木筏所用的木料长 $l=10$ 米，直径 $d=0.25$ 米，如果要装的山货包括运送人员和其他装备共重 1.2 吨。问这个木筏至少需要由几根木料组成？假设当木筏负载时，90% 的体积没在水中，而木料的比重 $d_*=0.6$ 吨/米³。

解：假设木筏由 n 根木料组成，那么木筏本身的重量

$$\begin{aligned} w &= V d_* = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot n \cdot d_* \\ &= \frac{3.14 \times (0.25)^2}{4} \times 10 \times 0.6 n \\ &= 0.294 n \text{ 吨,} \end{aligned}$$

于是木筏的总重量 $P=1.2+0.294 n$ 吨。

而木筏负载时所受的浮力

$$\begin{aligned} F &= V_{\text{浸}} d_* = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot n \cdot 90\% \cdot d_* \\ &= \frac{3.14 \times (0.25)^2}{4} \times 10 \times 0.9 n \\ &= 0.441 n \text{ 吨。} \end{aligned}$$

由于浮体重量等于它所受的浮力，因此

$$1.2 + 0.294 n = 0.441 n,$$

即

$$n = \frac{1.2}{0.147} \doteq 8.16,$$

可见至少需要用 9 根木料才能组成这样的木筏。

各种类型的船舶也都是浮体，因此船舶的重量就等于它所排开的水的重量。所谓船舶的排水量就是指包括自身重量在内的最大载重量，又叫做船舶的吨位。超过这个限度，在航行中容易发生危险。因此较大的船只在船体上都画有吃水线，在载货时要注意不让水面超过它的吃水线。

比重计是一种能直接测定液体比重的仪器。它也是根据浮体的性质制成的。它一般由密封的玻璃管制成(图 5.24)，上端粗细均匀，管内贴着标度纸尺；中部比较粗；下端呈球形，球内装有细铅粒。因此它的重心很低，能在待测液体中稳定地竖立着成为浮体。

由于比重计的重量是固定不变的，因此把它插进任何液体里，所受的浮力总是一定的，只是在比重不同的液体中，它浸没的深度不同。液体的比重越小，它的没入部分的体积就越大，浸没得越深。所以从待测液面在比重计上端所指的标度就可以直接读出它的比重。

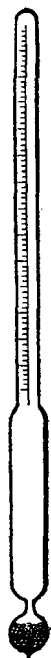


图 5.24

比重计

习题 5.10 物体在液体的不同深度下，所受的浮力是否相同？为什么？

习题 5.11 要把 5 吨沉入海底的钢条打捞上来，至少需要用多大的力才行？

习题 5.12 一块矿石在空气中重 0.8 公斤，在汽油中重 0.65 公斤，求它的比重。

习题 5.13 我国远洋轮“郑州号”的排水量为 32600 吨，船的自重为 8600 吨，问它的载重量是几吨？

习题 5.14 矩形运煤船的横截面积为 100 米^2 ，满载时和空载时吃水深度相差 1.5 米，求运煤船的载重量。

第四节 液体流动的基本规律

一、液体流动连续性

河水川流不息地从上游往下流动；由水泵打上来的水川流不息地经过各条渠道去灌溉农田；秧田里的积水又不断地流入小溪。这些都是液体流动的例子。

液体在流动中，由于它的流动性，只要受到很小的外力，就可以引起它内部各部分之间的相对运动。这种相对运动就在各部分液体之间产生了内摩擦。这种性质就叫做液体的粘滞性。所以液体在流动中，它的各部分的速度是不同的。这是液体的运动和固体运动不同的地方。例如河水在流动中，靠近河底或河岸的水由于和固体的河床之间存在着摩擦，因此流速较小。离河床越远的水流速度就越大，而在河面中心处的水流速度最大。

一般说来，液体经过管道中任何一固定点时的流速是随着时间的不同而有所变化的。但如果液体是在管道中连续地缓慢地稳定地流动，那么它经过任何一固定点时的流速变化就很小。通常把经过任何一固定点时的流速不随时间变化的流动叫做液体的稳定流动，简称稳流。打开自来水龙头，等水流稳定下来，水管中的流动就是稳流；而大河中的波浪运动、急流中的涡旋运动都不是稳流。

液体在稳流中，虽然在经过任何一固定点时的流速是固定不变的，但是在从一点流到另一点时，它的流速是要改变的。例如在同一河流里的水，当它流到河面窄处，流速就增大；流到河面宽处，流速就减小。又如在泄放水稻田里的积水时，放水口处的水流得特别急，而经过放水口以后，水又流得缓慢

了。这些都表明液体的流速与管道的粗细有着密切的关系。

通常把单位时间里通过管道某一截面液体的体积叫做液体在这一截面上的流量,用字母 Q 表示。为了抓住主要矛盾,暂时不考虑液体的粘滞性,我们可以假设液体在经过管道的同一截面上的各点时,流速都相等。这样液体通过截面的流量就等于截面上的流速与截面积的乘积。即

$$Q = Av, \quad (5.8)$$

式中 A 表示截面积, v 表示流速。表 5.2 列出了流量的常用单位。

表 5.2 流量的常用单位表

单位制	截面积	流速	流量	换算关系
厘米克秒制	厘米 ²	厘米/秒	厘米 ³ /秒	$=0.000001 \text{ 米}^3/\text{秒}$
米公斤秒制	米 ²	米/秒	米 ³ /秒	$=1000000 \text{ 厘米}^3/\text{秒}$

因为液体在稳流中是川流不息的,具有连续性,在管道中并不会发生空隙、中断等情况,同时液体又很难压缩,所以在

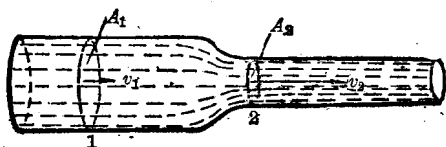


图 5.25 液体的连续性方程的示意图

同一管道中,液体在各个截面上的流量都是相等的。在图 5.25 中,假设 A_1 、 A_2 是同一管道中 1、2 处的截

面积,而 v_1 、 v_2 是液体在 1、2 处的流速。那么根据 1、2 处液体流量相等的关系可以列出

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 = \text{常数}, \quad (5.9)$$

上式叫做液体的连续性方程。该式表明,液体通过同一管道任一截面的流速是和它的截面积成反比的。即在同一管道中,截面积越大的地方液体的流速越小。

二、液体流动的基本规律

水从高处流向低处时,总是越流越快。这表明液体在稳流中,高度与流速以及压强之间都存在着一一定的关系。下面就用功能原理来分析这个关系。

设想在粗细不均匀的管道中取一段正在稳流中的液体1、2,设1、2处的截面积分别为 A_1 、 A_2 ,流速分别为 v_1 、 v_2 ,压强分别为 p_1 、 p_2 ,离一基准水平面的高度为 h_1 、 h_2 (图5.26)。

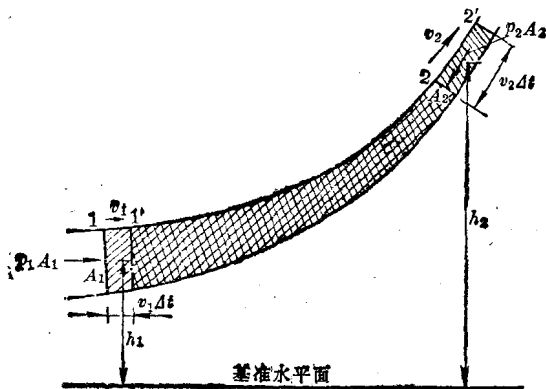


图 5.26 液体在稳流中的基本规律的推导过程

在经过一段很短的时间 Δt 以后,这段液体到达了1'、2'的位置。由于所移动的距离都很小,因此可以认为1'、2'处的截面积、压强、流速、高度都分别与1、2相同。很明显,在压强 p_1 、 p_2 的作用下,这段液体在稳流中两端都受到压力,其中压力 $p_1 A_1$ 与流速同向,起了动力的作用;而压力 $p_2 A_2$ 与流速反向,起了阻力的作用。因此在这段时间里,外力对这段液体所作的总功

$$W = p_1 A_1 \overline{11'} - p_2 A_2 \overline{22'} = p_1 A_1 v_1 \Delta t - p_2 A_2 v_2 \Delta t.$$

按液体的连续性方程 $A_2 v_2 = A_1 v_1 = Q$, 代入上式得

$$W = (p_1 - p_2) A_1 v_1 \Delta t = (p_1 - p_2) Q \Delta t,$$

即
$$W = (p_1 - p_2) V,$$

式中 V 就是管道 $1, 1'$ 间或 $2, 2'$ 间液体的体积。

根据功能原理, 外力对这段液体所作的功就等于这段液体的机械能的增加。但是这段液体在经过时间 Δt 后机械能的增加, 就相当于管道 $1, 1'$ 间的液体移到 $2, 2'$ 间所增加的机械能。设这一小段液体的质量为 m , 它势能的增加

$$\Delta E_p = mgh_2 - mgh_1 = mg(h_2 - h_1),$$

动能的增加

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{m}{2} (v_2^2 - v_1^2)。$$

于是根据功能原理可以列出

$$(p_1 - p_2) V = mg(h_2 - h_1) + \frac{m}{2} (v_2^2 - v_1^2),$$

即
$$p_1 V + mgh_1 + \frac{m}{2} v_1^2 = p_2 V + mgh_2 + \frac{m}{2} v_2^2。$$

由于截面 $1, 2$ 是在同一管道中任意取的, 因此对于在同一管道中任何截面说来

$$pV + mgh + \frac{m}{2} v^2 = \text{常量}, \quad (5.10)$$

式中 pV 也是液体能量的一种形式, 叫做压力能。上式反映了液体在稳流中的一条基本规律: 在同一管道的任何截面上, 液体的动能、重力势能和压力能的总和是个常量。这个结论叫做流体力学基本定律, 上式又叫做伯努利方程。它实际上就是流体在稳流中的能量守恒定律。

假设液体的密度为 $\rho = \frac{m}{V}$, 代入公式(5.10)可得

$$pV + \rho ghV + \frac{1}{2} \rho v^2 V = \text{常量},$$

再在两边除以 ρgV , 上式可变形为

$$\frac{p}{g\rho} + h + \frac{v^2}{2g} = \text{常量}, \quad (5.11a)$$

$$\frac{p}{d} + h + \frac{v^2}{2g} = \text{常量} \quad (5.11b)$$

式中 $g\rho$ 是液体的比重 d , 上式是柏努利方程的又一表示式。它的优点是每一项的单位都可用简单的长度单位米(或厘米)表示, 运用比较方便。例

如第一项 $\frac{p}{d}$ 的单位可用 $\frac{\text{吨/米}^2}{\text{吨/米}^3}$ (或 $\frac{\text{克/厘米}^2}{\text{克/厘米}^3}$) 即米(或厘米)表示。它就相当于压强 p 压在这点上的液柱的高度, 叫做压强水头。这个高度可直接用测压管测出(图 5.27), 因此又叫做测压高度。第二项 h 是管道截面的重心离开

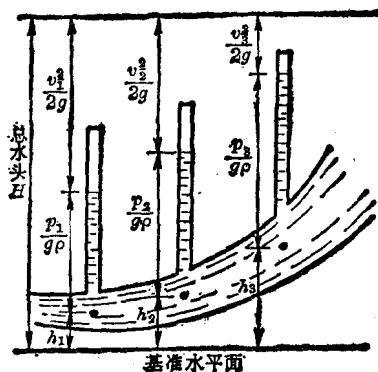


图 5.27 位置水头、压强水头、速度水头的总和是个常数

地面或其他基准平面的高度, 单位也可用米(或厘米)表示, 叫做位置水头, 又叫做测地高度。第三项 $\frac{v^2}{2g}$ 的单位也可用 $\frac{[\text{米/秒}]^2}{\text{米/秒}^2}$ (或 $\frac{[\text{厘米/秒}]^2}{\text{厘米/秒}^2}$) 即米(或厘米)表示。它就相当于单靠液体的动能可以把 1 公斤(或 1 克)液体举起的高度, 叫做速度水头, 又叫做速度高度。这三个水头的和 H 叫做总水

头。图 5.27 就表示同一管道的任何截面上液体的这三个水头的总和相等的关系。

三、流速与压强的关系

有经验的船工都知道,无论河道多宽,两条船不能并排前进,否则就要有互相碰撞的危险。这是什么原因呢?

先来做实验。用测压管来测定在一根粗细不均匀的水平管道里流动的液体的

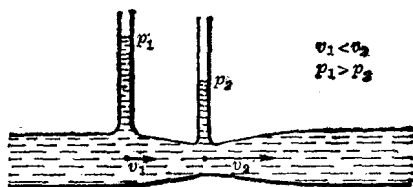


图 5.28 测定液流的压强

压强(图 5.28), 就会发现液流在细管处的压强要比在粗管处的小些。再根据液体的连续性方程可知, 在同一管道中, 截面积较小的细管处液

体的流速较大。这就表明液体流速较大的地方压强较小。

为什么液体的流速与压强之间会存在这样的关系呢? 这可以用柏努利方程来解释。比较管道粗细不同处的液流情况, 由于管道水平, $h_1 = h_2$, 因此可以列出

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g}。$$

上式表明, 在水平管道里, 液体在任一截面处的压强水头和速度水头的和是个常量。在截面积较小的细管处, 由于流速较大, 速度水头也较大, 因此它的压强水头就较小, 压强也较小。

正是由于这个原因, 当两条船并排前进时(图 5.29), 它们之间的水流

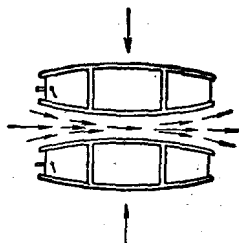


图 5.29 两条并排前进的小船越来越靠近

因河道变窄而流速增大,从而使两船内侧所受的压强减小。于是两条船就会在外侧的压力作用下,越来越靠近而发生碰撞。

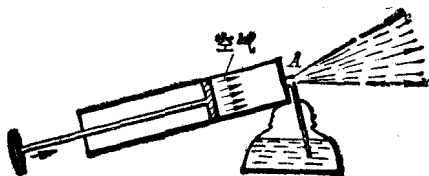


图 5.30 喷雾器

图 5.30 是一个喷雾器,容器内盛了杀虫药液。当用力把圆筒里的活塞向里压入时,筒内空气就以很大的速度从圆筒末端处小孔 A 流出,从而使 A 处的压强减小到大气压强以下,于是容器内的药液就在液面空气的大气压强的作用下沿细管上升,被 A 处气流带走而喷成雾状。象这种在细管的一端形成低压而使水沿管上升的作用就叫做大气的空吸作用。例如用自来水笔灌墨水也是对大气的空吸作用的利用。

[例题 5.5] 图 5.31 是专门测量流体流速的仪器,叫做流速计。它的主要构造就是一个 U 形管水银压强计。把一端 A 与待测液管相连通;而把另一端 B 也接进待测液管,并弯成直角,让它的管口正对着待测液体的流动方向。试运用流体动力学基本

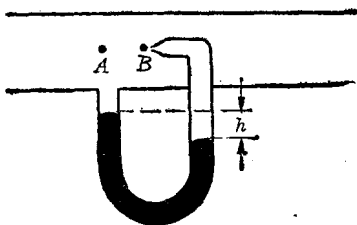


图 5.31 流速计

定律证明如果 U 形管两端水银面高度差为 h 厘米,待测液体比重为 d 克/厘米³,那么待测液体的流速

$$v = \sqrt{\frac{27.2gh}{d}} \text{ 厘米/秒.}$$

解：根据公式(5.11)比较 U 形管两端管口 A、B 处的液流情况，由于待测液管水平， $h_A = h_B$ ，因此可以列出

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2g} = \frac{p_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2g}。$$

很明显， v_A 、 p_A 就相当于待测液体的流速和压强。而管口 B 正对待测液流，液流到达 B 处时流速改变为 0，从而压强也有所增大，即 $v_B = 0$ ， $p_B > p_A$ 。代入上式得

$$\frac{v_A^2}{2g} = \frac{p_B - p_A}{\rho}。$$

从 U 形管两端水银面的高度差为 h 可以推知 $p_B - p_A = 13.6h$ 克/厘米²。代入得

$$v_A^2 = \frac{2g(p_B - p_A)}{\rho} = \frac{27.2gh}{\rho}，$$

即待测液体的流速

$$v = v_A = \sqrt{\frac{27.2gh}{\rho}} \text{ 厘米/秒}。$$

四、液体在稳流中的损耗水头

由于液体的粘滞性，在稳流中也不可避免地要产生内摩擦。因此必然要损耗一部分能量，而转变成热。由此可知流体动力学基本定律只是忽略了一切损耗的理想情况。实际的情况是：液体在稳流时，管道中各点的总水头并不是一个常数，而是顺着流速的方向逐渐在减小。或者说管道中任一点液体的总水头总要比在它上游的各点的总水头低些。所以柏努利方程必须作如下的修正。当液体在稳流时，假设管道中点 1 是在点 2 的上游，那么

$$\frac{p_1}{\rho} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (5.12)$$

式中 h_f 叫做损耗水头, 它代表液体在由点 1 到点 2 的稳流中所损耗的那一部分能量, 也以长度单位米(或厘米)表示。图 5.32 就是这种损耗水头的示意图。

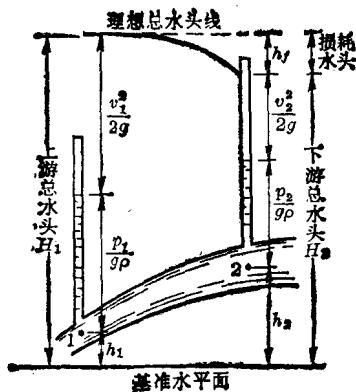


图 5.32 损耗水头的示意图

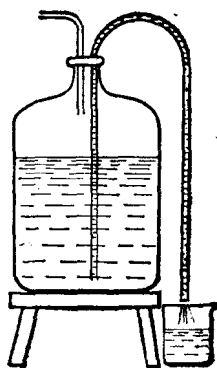


图 5.33 虹吸管

把一根 U 形管颠倒过来, 一端插入容器的液面下, 从另一端将管内空气抽走, 利用空吸作用, 不仅能使容器内的液体沿 U 形管上升, 而且还能使液体连续不断地从 U 形管的另一端流出来(图 5.33), 直到容器内的液面降低到与出口面相平时为止。这种现象叫做虹吸现象, 而这根液体能自动流通的管子就叫做虹吸管。

在我国华北地区有些小型水库的拦河坝是沙质土壤筑成的, 经不起水流的冲刷, 因此要想利用水库里的水来灌溉农田, 不宜让水流从坝身下方通过。利用虹吸管就可以使水流越过堤坝, 流入渠道来进行灌溉。黄河下游的水面大多高出堤内的地面, 当地贫下中农也是利用这种方法使河水越过堤岸来灌溉农田的。

图 5.34 就是这种钢制排灌虹吸管的安装简图。虹吸管的进水端浸没在水源下, 装有单向阀, 只能进水, 不能出水; 外面还套有滤栅, 防止泥沙带进管内, 造成淤塞。出水口上装有紧密的螺盖。此外在虹吸管的顶部设有加水孔塞。操作时, 先将出水口的螺盖旋紧, 再通过加水孔在管内灌清水将空气排出。然后旋紧加水孔塞, 再旋开水出口螺盖, 水流就源源不绝沿虹吸管流入灌溉渠。

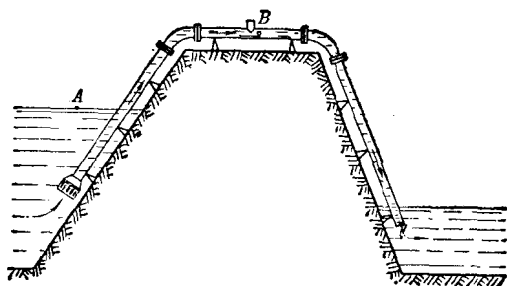


图 5.34 排灌虹吸管的安装简图

实践表明, 虹吸管可以把水扬升的高度并不是没有限制的。这可以运用公式(5.11)来解释。比较图 5.34 中虹吸管内与水源表面相平的 A 点和顶部 B 点的水流情况可以列出

$$\frac{p_A}{\rho} + h_A + \frac{v_A^2}{2g} = \frac{p_B}{\rho} + h_B + \frac{v_B^2}{2g} + h_f$$

由于 $p_A = p_0$ (大气压强), $v_A = v_B$; 如果取出水面为基准平面, 并设水源表面的高度为 h , 那么 $h_A = h$; $h_B = h + h_0$, 这里 h_0 就是虹吸管把水扬升的高度。因此代入上式可得

$$\frac{p_0}{\rho} + h = \frac{p_B}{\rho} + h + h_0 + h_f,$$

即扬升高度

$$h_0 = \frac{p_0 - p_B}{\rho g} - h_f = \frac{p_0}{\rho g} - \frac{p_B}{\rho g} - h_f.$$

上式表明扬升高度不能超过大气压强所相当的水柱高度，即 10.3 米，还要减去顶部 B 点的压强水头和损耗水头。因此这个扬升高度至多只有 5~7 米。

进一步的实践与理论还表明，虹吸管的流量

$$Q = CA\sqrt{2gh} \text{ 米}^3/\text{秒}, \quad (5.13)$$

式中 A 是虹吸管的截面积，单位为米²； h 是水源平面与出水面的高度差，单位为米；系数 C 由于因素较多，必须经过实际测定才能得出。上式表明，水源平面与出水面的高度差越大，流量也越大。

习题 5.15 在一根直径为 1.2 厘米的管道中，水的流量必须多大才能使它的速度水头等于 0.25 厘米？

习题 5.16 为什么卫生员能将药液吸进针筒(图 5.35)？

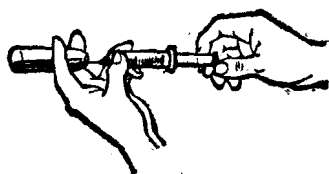


图 5.35

习题 5.17 图 5.36 是一种水流抽气计。只要把它的 A 端与自来水龙头接通， B 端与需要抽气的容器 C 相连通，让自来水流动一段时间，容器 C 内的气压可以抽到约 10 毫米汞柱的真空度。试解释它的工作原理。

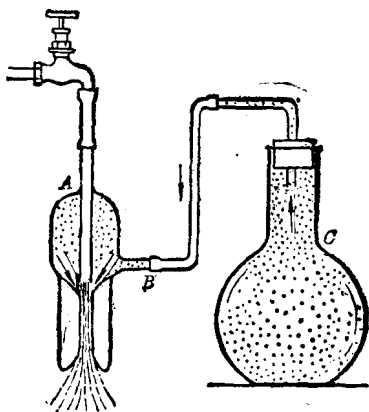


图 5.36 水流抽气计

习题 5.18 用流速计测定石油在管道中的流速。已知 U 形管水银压强计上的高度差为 12 毫米, 而石油比重为 0.85 克/厘米^3 , 求石油的流速。如果管道直径为 15 厘米, 问石油的流量有多大(参看图 5.31)?

第五节 水 力 机 械

毛主席教导我们:“水利是农业的命脉”。兴修农田水利是扩大耕地面积、旱涝保收、提高产量的一项重要措施, 其中涉及到的水力机械不外乎两类: 一类是把电动机等动力机的机械能转变成水流的动能或势能的提水机械, 各种类型的水泵都属于这一类; 另一类是反过来利用水流的势能和动能做功的动力机械, 各种类型的水轮机都属于这一类。

本节主要是简单介绍这些水力机械的工作原理和主要结构。

一、水泵的主要结构

水泵, 俗称抽水机, 是一种通用的提水机械。它的使用范围很广, 种类也很多, 有活塞式的, 也有叶片式的。大多数水泵都是用电动机、内燃机等发动机来带动的, 但也有象水轮泵是直接由水流的动力来推动的。这里主要介绍几种最常见的农用水泵。

离心式水泵, 简称离心泵。在第二章里已初步介绍过它的工作原理。离心泵是主要利用旋转水流的离心作用, 使水在泵壳中产生高压强, 被压出水管, 同时又依靠空吸作用由进水管连续吸水的提水机械。

图 5.37 就是离心泵的结构简图。图中泵壳 1 是个蜗壳形的铁壳, 与机座 2 相连; 上侧有出水口 3, 与出水接盘 4 相连; 侧面有进水口 5, 与进水盖 6 相连。壳上的加水孔 7 是水泵工

作前往壳内灌水用的；放水塞 8 是工作完毕时放掉壳中余下的积水用的。叶轮 9 由两块圆板组成，中间装着几片弯曲的叶片。叶轮的中心有轴孔，用来套在泵轴 10 上。泵轴和电动机轴相联接，轴承 11 安装在机座上。当泵轴随电动机转动时，叶轮可以随着在壳内自由旋转。因为水泵在工作时，壳内充满着水，为了防止壳内水渗出壳外，或壳外有空气渗进泵壳造成水压的降低，在泵轴穿出泵壳处装有圆环形的铁盒，叫做填料盒 12，盒内充填着浸过油的石棉或纱线，用来堵塞水流。

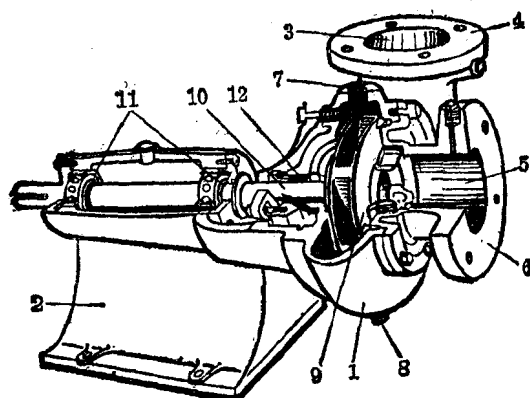


图 5.37 离心泵的结构简图

1—泵壳；2—机座；3—出水口；4—出水接盘；5—进水口；6—进水盖；
7—加水孔；8—放水塞；9—叶轮；10—泵轴；11—轴承；12—填料盒

图 5.38 是离心泵的安装图。图中电动机 1 是水泵的动力来源，2 是把泵轴和电动机轴联接起来的联轴器。3 是压水管，弯头 4 是用来改变水流方向的。5 是进水管，6 是装在进水管头上的单向阀门，它只能往里开，用来防止在叶轮停止旋转时，管内的水倒流出去。单向阀门的外面还装有滤栅，用来防止水草、泥砂等杂物被带入进水管。

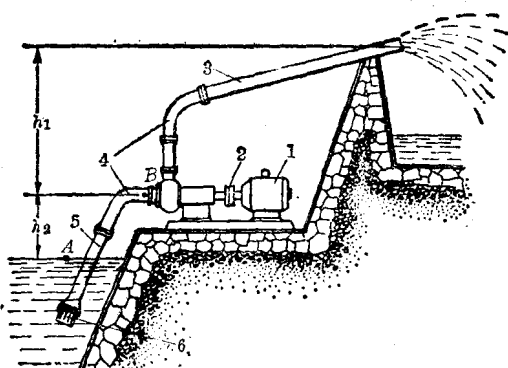


图 5.38 离心系的安装

1—电动机；2—联轴器；3—压水管；4—弯头；5—进水管；6—单向阀门

从水泵叶轮中心到压水管出口的一段铅直高度 h_1 叫做压水扬程；从吸水河面（或井面）到水泵叶轮中心的一段铅直高度 h_2 叫做吸水扬程。吸水扬程和压水扬程的总和叫做实际扬程，就是水泵使水实际提升的铅直高度（见图 5.38）。通常扬程是以米为单位的。

常用的离心泵有 Sh 型的和 BA 型的两种。Sh 型离心泵的特点是扬程高、流量大，但体积也比较大，只适合于安装在抽水站里固定使用。Sh 型离心泵当扬程在 9~140 米时，流量为 126~12500 米³/时。BA 型离心泵的特点是体积小、重量轻，固定或移动使用都很合适，但流量较小。BA 型离心泵当扬程在 8~98 米时，流量为 4.5~360 米³/时。

轴流式水泵，简称轴流泵。它的工作原理与离心泵不同，是靠浸在水面下的螺旋桨式叶轮的迅速旋转把水向上推的。水一面上升，一面又旋转，很不稳定，经过导叶的稳流作用，水就顺利地沿着轴线方向向上输出。同时依靠空吸作用，使水源的水连续不断地被大气压强压进泵内。

图 5.39 就是轴流泵的外形和结构简图。图中泵壳是个圆柱形的弯管，共分三节。下端一节象个喇叭口 1，为的是使进来的水逐步收缩，保持连续不断；中间一节成锥形，在内壁上铸有固定不动的数片导叶 4，叫做导叶座 2，起着稳流的作用；上端一节是出水弯管 3。它的叶轮 5 象个螺旋桨，装在一根细长的钢制泵轴 6 上，借上下两个橡皮轴承 7 支承在泵壳上。泵轴的上端穿出弯管，接联轴器 8 与电动机轴相连。轴与弯管接触处的橡皮轴承上方装有填料盒，防止往外冒水。

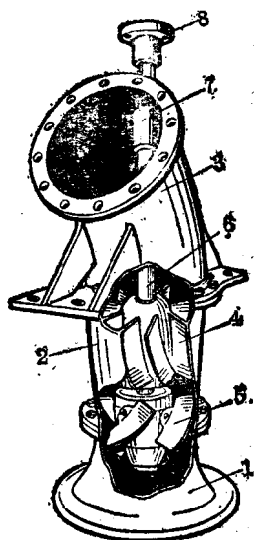


图 5.39 轴流泵

1—喇叭口；2—导叶座；
3—出水弯管；4—导叶；
5—叶轮；6—泵轴；7—
橡皮轴承；8—联轴器

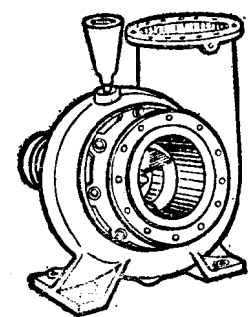


图 5.40 混流泵

为 2000~2500 米³/时。

混流式水泵，简称混流泵（图 5.40）。这种水泵把离心泵和轴流泵的特点混合在一起。它的泵壳和轴的装置与离心泵相似，没有导叶座，但是它的叶轮兼有离心泵和轴流泵的特点，对水既有离心作用，又有推力作用。混流泵又叫丰产泵，是我国工人阶级专为江南水田地区农田排灌设计而成

的。就拿 5LN-33 混流农排泵来说，它具有体积小、重量轻、容易搬运、使用简便等特点。在额定扬程为 3.5 米时，流量为 90 米³/时。动力采用 1.5 瓩立式电动机直接带动或 3 马力的内燃机带动。

二、水泵的有效功率和效率

关于水泵的吸水扬程可按柏努利方程来计算。例如我们比较图 5.38 中吸水河面上一点 A 和水泵进水口 B 处的水流情况可以列出

$$\frac{p_A}{\rho} + h_A + \frac{v_A^2}{2g} = \frac{p_B}{\rho} + h_B + \frac{v_B^2}{2g} + h_f。$$

由于吸水河面处与大气相通 $p_A = p_0$ (大气压强)；若以吸水河面为基准面， $h_A = 0$ ；吸水河面由于水源充足，流速可以忽略不计， $v_A = 0$ 。于是可以列出吸水扬程

$$h_B = \frac{p_0 - p_B}{\rho} - \frac{v_B^2}{2g} - h_f。$$

上式表明，吸水扬程等于大气压强的水柱高度和水泵进水口的测压高度的差额，通常叫做真空度，减去水泵进水口的速度高度以及由于吸水管、弯头、滤栅等引起的耗损水头。因此一般水泵的吸水扬程大都在 2.5~6 米左右。

在各种类型的水泵的铭牌上都标有这台水泵的额定总扬程。所谓总扬程就是实际扬程和损耗扬程的和。这里所谓的损耗扬程不仅包括在进水管以及压水管里的耗损水头，还包括由于出水速度而损失的扬程。因此在选用水泵时，必须使水泵的额定总扬程略高于实际扬程，否则就会影响水泵的效率。

怎样来计算水泵的有效功率(实际输出功率)和效率呢？

假定水泵的进水管、压水管都是粗细均匀的, 截面积为 A 米², 实际扬程为 h 米, 那么水泵要维持流量 Q 米³/秒就需要有多大的功率呢? 由于管中水柱底部的压强 $p = hd$ 吨/米², 总压力就等于 $F = pA = hdA$ 吨, 同时要使管中维持水的流速为 v 米/秒, 那么根据功率公式 (3.7) 可知水泵的有效功率

$$\begin{aligned} N_{\text{效}} &= Fv = hdAv \text{ 吨} \cdot \text{米/秒} \\ &= hdQ \text{ 吨} \cdot \text{米/秒} = 1000 hdQ \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒}, \end{aligned}$$

即
$$N_{\text{效}} = \frac{40}{3} hdQ \text{ 马力} = 9.8 hdQ \text{ 瓩}. \quad (5.14)$$

对于水泵说来, 它的轴功率(输入功率)总要比它的有效功率大些。这是由于损耗水头以及填料盒、轴承间的摩擦损耗所造成的。因此水泵的效率

$$\eta = \frac{N_{\text{效}}}{N_{\text{轴}}} \times 100\%. \quad (5.15)$$

一般说来, 水泵的效率是在 60~90% 之间。

【例题 5.6】 一台 Sh 型离心泵在正常工作时, 流量 $Q = 486$ 米³/时, 扬程 $h = 14$ 米, 求它的有效功率。如果轴功率 $N_{\text{轴}} = 21.8$ 瓩, 求水泵的效率。

解: 根据水泵的有效功率公式 (5.14) 可知

$$N_{\text{效}} = 9.8 hdQ = \frac{9.8 \times 14 \times 486}{3600} \approx 18.5 \text{ 瓩},$$

再根据水泵的效率公式 (5.15) 可知

$$\eta = \frac{N_{\text{效}}}{N_{\text{轴}}} = \frac{18.5}{21.8} \times 100\% \approx 85\%.$$

【例题 5.7】 已知一台 20 ZLB-70 型轴流泵的轴功率 $N_{\text{轴}} = 50$ 瓩, 扬程 $h = 7$ 米, 效率 $\eta = 80\%$ 。求它的流量。若用它灌溉农田, 每亩要求灌水 25 吨, 每日水泵工作 10 小时。问

每日能灌溉几亩？设灌溉渠耗失流量 10%。

解：首先可根据公式(5.15)算出水泵的有效功率

$$N_{\text{效}} = \eta N_{\text{轴}} = 50 \times 80\% = 40 \text{ 瓩。}$$

于是就可按公式(5.14)算出它的流量

$$Q = \frac{N_{\text{效}}}{9.8 h d} = \frac{40}{9.8 \times 7 \times 1} \doteq 0.583 \text{ 米}^3/\text{秒} = 2099 \text{ 米}^3/\text{时}。$$

假设此泵每日可灌溉农田 x 亩，可以列出

$$25x = 10 \times 2099 \times 90\%，$$

所以

$$x = \frac{2099 \times 9}{25} \doteq 756 \text{ 亩。}$$

三、水 轮 机

水轮机是利用水流的势能和动能来作功的水力发动机。它可以用来带动发电机发电，成为水力发电站的原动力机。在农村里，小型的水轮机也可以充当一般动力机，用来磨面、榨油等。常用的水轮机可分冲击式的、两击式的和螺旋桨式的三种。

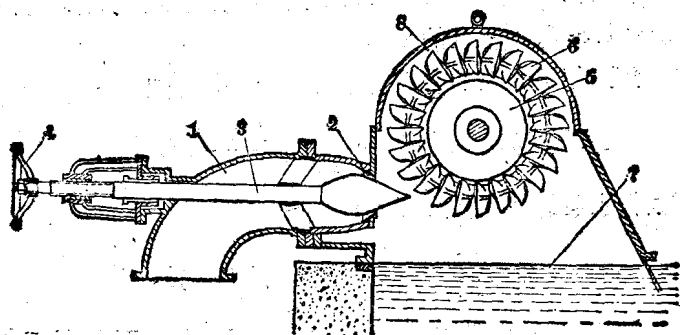


图 5.41 冲击式水轮机的基本结构图

1—压力水管；2—圆锥形孔；3—针杆；4—手轮；5—工作轮；
6—叶片；7—尾水槽；8—罩壳

冲击式水轮机主要是利用喷射水流冲击工作轮来作功,从而使工作轮转动的。当水流从喷头喷出时,水流的势能已经完全转变成动能。图 5.41 就是冲击式水轮机的基本结构图。在工作轮的上缘位置安装着一个带喷头的压力水管 1,喷头前面是个圆锥形的孔 2,喷头的针杆 3 由手轮 4 操纵,可以前后移动,来调节压力水管流量的大小。工作轮 5 的轮缘上装有许多杓子形的叶片 6,叶片中央有条凸棱,使冲击在叶片上的水流分成两股,各从杓的边缘向相反的方向流出,落在尾水槽 7 中,同时工作轮叶片在水流的冲击下就转动起来。工作轮外装有罩壳 8,罩壳的下面就是尾水槽。

冲击式水轮机,要求水的流量较小,但却需要很高的水头(又叫做落差),约在 30 米以上。这就需要建筑拦河坝来抬高上游水位。因此冲击式水轮机只适用于作为大型水电站的原动力机,它的功率可达 20 万瓩,效率可达 90%。

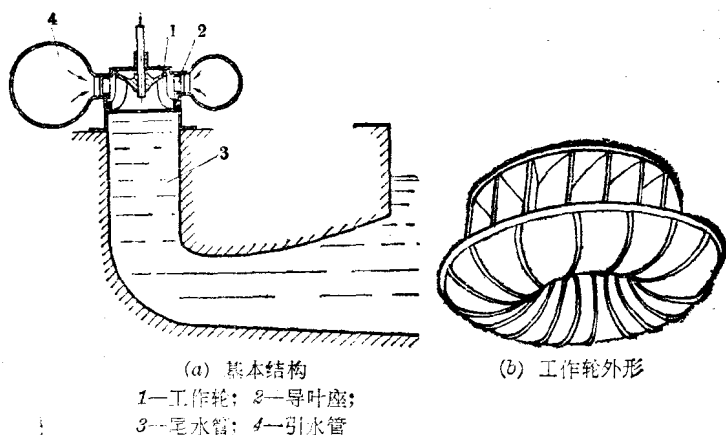


图 5.42 两击式水轮机

冲击-反击式水轮机,除了利用水流的冲击力外,还根据

反冲原理利用水流的反冲力，因而又叫做两击式水轮机。图 5.42 就是它的主要结构，包括工作轮 1、导叶座 2 和尾水管 3 三个部分（图 5.42a）。水流先从四周的引水管 4 流入导叶座，导叶座本身并不转动，只对水流起导向作用。水流经导叶座引导向后喷射在工作轮的叶片上。工作轮叶片间的入口大，出口小（图 5.42b），因此水流经过工作轮时，加大了速度，减小了压强，然后以较大的速度和接近于大气压的压强从中央沿轴线方向喷出，进入尾水管，于是工作轮的叶片就在水流的反冲作用下沿相反的方向转动起来。

两击式水轮机所需水头在 6~30 米之间，适用于中型水电站，但缺点是必须具备流量较大的水源，才能使它正常运转。

螺旋桨式水轮机的工作原理和两击式的基本相同，特点是能适用于 6 米以下的低水头水电站。图 5.43 就是采用这种水轮机的立式小型水电站的剖面图。从图上可以看到这种水轮机构造比较简单，不需要机壳，直接装在机室下。它的工作轮是个螺旋桨式的叶轮，轴的下端成锥形，叫做泄水锥，能起加快泄水速度的作用。

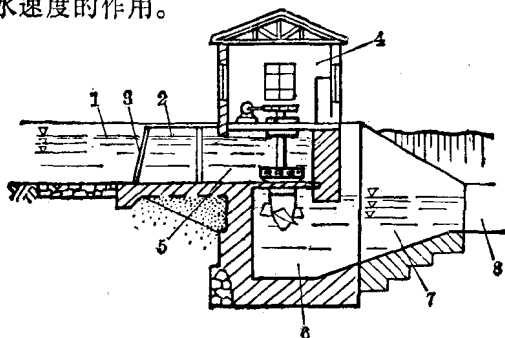


图 5.43 农村小型立式水力发电站剖面图

1—引水渠；2—导水槽；3—拦泥栅；4—机电室；5—水轮机室；
6—尾水室；7—尾水管；8—尾水渠。

如果进入水轮机的水头为 h 米, 流量为 Q 米³/秒, 那么水轮机的理论功率(输入功率)

$$N_{\text{理论}} = Fv = h d A v = h d Q \text{ 吨} \cdot \text{米/秒},$$

即
$$N_{\text{理论}} = \frac{40}{3} h d Q \text{ 马力} = 9.8 h d Q \text{ 千瓦} \quad (5.16)$$

但由于水进入水轮机时的阻力以及水轮机运转部分的机械摩擦必然会造成一部分能量的损失, 因此水轮机轴的实际功率(输出功率)就小于它的理论功率。通常把水轮机轴的实际功率与它的理论功率的比叫做水轮机的效率。即

$$\eta = \frac{N_{\text{实际}}}{N_{\text{理论}}} \times 100\%。 \quad (5.17)$$

通常是在 90~93% 之间。所以水轮机轴的实际功率

$$N_{\text{实际}} = \eta N_{\text{理论}} = \frac{40}{3} \eta h d Q \text{ 马力} = 9.8 \eta h d Q \text{ 千瓦} \quad (5.18)$$

农村小型立式水力发电站由引水、厂房、泄水三个部分组成。一般小型低水头水电站都采用明渠引水(见图 5.43), 在引水渠 1 和水轮机室中间修有导水槽 2, 通过导水槽使水平稳地流入水轮机室。导水槽的闸前设有拦泥栅 3, 防止泥污进入水轮机室。厂房分上下两部分。水上部分是机电室 4, 用来安装发电机、配电盘、加工机械等。水下部分又分上下两层: 上层是水轮机室 5; 下层是尾水室 6。泄水部分有尾水渠, 水从尾水管 7 进入尾水渠 8, 流到下游溪流中去。

沿海的一些内河, 由于潮汐的影响, 水位每天要出现两次涨落, 利用潮差来发电的水电站叫做潮汐电站。最简单的单程潮汐电站利用涨潮蓄水, 退潮发电。在不影响航运和灌溉的情况下, 把电站和水闸建筑在潮水的通道上。涨潮时, 开闸进水; 潮满时, 关闸。退潮时, 闸门内外水位差逐渐增大; 当水

位差达到水轮机的最小工作落差时,便开闸放水发电。等到下一次涨潮时,当闸门内外水位差减小到水轮机的最小工作落差以下时,水轮机停止转动,发电停止。

习题 5.19 一台 Sh 型离心泵,在正常工作时,总扬程为 14 米,流量为 $0.54 \text{ 米}^3/\text{秒}$,求它实际的输出功率(有效功率)。如果它的轴功率是 98 瓩,问它的效率有多大?

习题 5.20 水轮机的作用与水泵有什么不同?

复 习 题

习题 5.21 如果发现在堤坝的水面下 5 米处,有面积约为 2 厘米^2 的裂缝,问至少需用多大的力才能把它堵住?

习题 5.22 当 U 形管里装着两种不同的液体,如图 5.44 所示。问哪一种液体比重较大?为什么?如果左管装的是水,已知 $h_1=2 \text{ 厘米}$, $h_2=1.6 \text{ 厘米}$,问右管装的液体比重大大?

习题 5.23 有人说:“固体传递的是压力,液体传递的是压强。”这句话正确吗?为什么?

习题 5.24 已知当水压计小活塞下压 25 厘米,大活塞只上升 5 毫米,问如果作用在小活塞上的压力是 20 公斤,问大活塞上所受的压力有多大?

习题 5.25 用同一种物质制成的体积相同的两物体,一个是实心的,一个是空心的,如果让它们从同一高度由静止开始下落,问哪一个物体先落地?为什么?

习题 5.26 用木桶在河边汲水时,如果木桶自重 6 公斤,能装满 25 公斤水,那么将空桶底朝下地往水里撤,至少需要用多大的力才能使它完全浸没在水中?(取木材比重为 0.6 公斤/厘米^3)

习题 5.27 在一根粗细不均匀的管道中,测得水在直径为 $d_1=20 \text{ 厘米}$ 处的流速 $v_1=25 \text{ 厘米/秒}$ 。问水在直径为 $d_2=10 \text{ 厘米}$ 处的流速有多大?水在管中的流量又是多大?

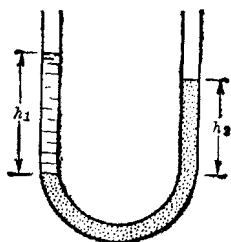


图 5.44

第二编 热 学

我们已经讨论过物质的最简单的运动形式——机械运动的规律。热学所研究的是物质的另一种运动形式，即物质的热运动的规律。

什么叫做物质的热运动呢？原来任何物质都是由大量的分子或原子构成的，而这些分子或原子永远是处在杂乱无章的运动状态之中。它们就好比是我们在阳光下看到的尘埃，一刻不停地在飞舞着。所谓热运动就是物质分子或原子的无规则运动。实践和理论研究都表明，物质的状态变化（如压强、体积、温度的变化，固体、液体、气体等物态间的变化）以及同时发生的热现象都与物质的热运动有关。因此要了解热现象的本质，首先必须掌握物质分子的热运动的规律。

本编包括第六、七、八三章，主要介绍有关热学的基础知识以及它们在工农业生产技术上的应用。

第六章 基本热现象

热现象一般是指与温度有关的现象。热现象在工农业生产和科学实验中大量存在着，如在工件的热处理、材料的提纯、金属的熔化、汽车拖拉机的运转……等过程中无不存在着热现象。农作物的生长也跟气温以及与气温有关的物理现象有着密切的关系。

第一节 温度和温度的测量

一、温 度

在日常生活中，我们都是凭自己的主观感觉来区别冷热的。但是单凭感觉并不能真正区分冷热。例如在夏天我们感到井水凉；到了冬天却又觉得井水暖了，其实井水本身的冷热变化并不是很大的。为了科学地描述物体的冷热现象，就需要有个客观标准。温度就是对物体的冷热程度的客观量度。

在现代生产技术和科学实验中，测量温度和控制温度的工作占着很重要的地位。这是因为物质的物理和化学性质都与温度有关，同时温度也是物态变化的重要条件。

物体温度的高低是怎样量度的呢？要量度物体的温度，就必须将温度与物体的其他性质联系起来。物体的许多性质都与温度有着密切的联系。例如水热到一定程度会沸腾，冷到一定程度又会结冰；又如物体都具有热胀冷缩的特性等。

因此我们不仅可以根据这些现象来确定温度的标准，还可以利用某些物体的体积随温度而变化的规律来量度其他物体的温度。这就是用来量度物体温度的仪器——温度计的基本原理。

二、摄氏温标

现在，先来介绍一种最常用的温度计——水银温度计。它是利用水银的热胀冷缩的特性来测量物体温度的。它的构造(图 6.1)的主要部分是一根内径很小而且均匀的细玻璃管和一个相连通的玻璃泡。泡内装有水银。细管内是真空；细管上刻着标度。随着温度的变化，由于体积的膨胀收缩，泡内水银就会沿细管上升或下降。因此细管内水银柱的高度就反映了泡内水银的温度。在测量物体的温度时，只要把温度计的玻璃泡部分与待测物体相接触，经过一定时间的热交换，泡内水银温度与待测物体的温度就会趋于一致而达到所谓热平衡状态*。于是根据细管内水银柱高度即可读出待测物体的温度。

温度计上的标度又是怎样确定的呢？确定温标的方法很多，这里介绍的是最常用的一种，叫做摄氏温标。

在大气压强下，纯水和冰到达平衡时的温度（冰点）和纯水沸腾时的温度（沸点）是比较稳定的。即使与外界有少量的热交换，它们的温度也不会改变。在摄氏温标中，这两点的温度被取为两个标准点：规定冰点为 0



图 6.1 水银温度计

* 详见本章第二节。

度, 沸点为 100 度。所以一般的水银温度计就是用这两个标准点来确定标度的。当温度计上这两个标准点的刻度确定后, 再在它们之间均匀地划分 100 等分, 这每一等分就叫做摄氏 1 度。由于温度计细管的内径是均匀的, 因此我们还可以用同样的间隔继续标出摄氏 0 度以下和摄氏 100 度以上的刻度。这就是摄氏温标, 通常用符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。例如一般人体的正常温度等于摄氏 37 度, 可以记作 37°C ; 又如冬季上海地区的最低气温平均为摄氏零下 8 度, 可以记作 -8°C 。

我们知道, 农作物是离不开土壤的, 而土壤的温度与农作物的发育和成长有着密切的关系。如果土壤温度过低, 即使土壤内含有足够的水分, 播下的种子也不会发芽, 而且还会腐烂。表 6.1 就是几种主要农作物的发芽温度范围。因此在春播以前最好在田里直接测量一下土壤的温度。在测量土壤表面的温度时, 要把温度计水平地放置在地面上, 让温度计水银泡的一半埋在土壤内, 另一半露在地面上。观察温度计的读数时必须俯下身去而不要把温度计拿起来看, 否则读数就不准确了。要测量土壤表面以下的温度 (如种子所在点的土壤温度), 就必须把温度计铅直地插在土壤中。

表 6.1 几种主要农作物的发芽温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)

冬小麦	玉米	水稻	甜菜	向日葵	胡萝卜
4~32	9~44	12~45	4~30	8~35	4~30

三、几种常用的温度计

水银温度计的构造简单, 使用方便, 价格便宜, 这些都是

它的优点。通常测量体温的医用温度计(体温表)就是一种水银温度计(图 6.2)。这种温度计的玻璃细管靠近水银泡处,有一段特别细,如图中 P 点所示。它的作用是使体温表离开口腔后,水银面所指的刻度仍旧表示人体的温度。因为在温度计离开人体冷却时,水银由于收缩而在 P 点处断开,这样就使细管里的水银面保持原来的位置。必须用力甩动,水银柱才会回降。

利用水银、酒精等液体热胀冷缩的特性,制成的温度计统称为液体温度计。它们的测温范围是有一定限度的。例如水银由于到 -39°C 就要凝结成固体,因此水银温度计不宜测量低温;而酒精到 78.4°C 时就沸腾,因此酒精温度计不宜测量高温。家用寒暑表一般是酒精温度计,它的最高刻度为 50°C 。

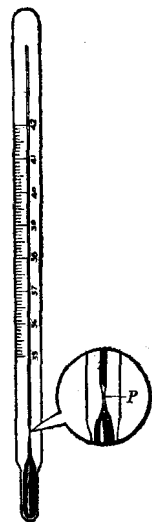


图 6.2 体温表

此外,电阻温度计是利用金属的电阻会随温度而变化的特性制成的。它的特点是读数精确、可以用在对温度的遥测、遥控和自动记录上。光测温度计是专门用来测定炉火、钢水或其他炽热发光体的温度的。它主要是利用炽热发光体的颜色随温度而变化的特性,通过观测光色来判断它的温度。

四、绝对温标

绝对温标,又叫做国际实用温标,是目前国际上通用的一种温标。我国自 1973 年 1 月 1 日起已开始使用。在绝对温标中,把水的三相点(即冰、水、汽三者共存时的温度)作为一个标准点,并规定此点为 273.16 度;同时把水在大气压强下

的沸点作为另一个标准点,规定为 373.15 度。

绝对温标的分度方法基本上是和摄氏温标一致的,只是对零点规定不同罢了。例如水的正常沸点是摄氏 100 度,记作 $t=100^{\circ}\text{C}$; 而它的绝对温度是 373.15 开尔文,记作 $T=373.15\text{K}$ 。开尔文是绝对温度的单位,通常用字母 K 表示。因此绝对温标和摄氏温标的关系是

$$T=t+273.15, \quad (6.1a)$$

$$t=T-273.15. \quad (6.1b)$$

在不需要很精确的情况下,可以认为同一物体的绝对温度的数值比摄氏温度大 273 度。例如水的冰点是 0°C , 就相当于 273K。

第二节 热量 热平衡方程

一、热 量

大家都知道,茶壶里的水所以会烧开,锅炉里的水温所以会升高都是由于燃料(如柴草、煤炭、煤油、煤气等)在燃烧过程中放出大量的热,而水吸收了这些热的缘故。物体放热或吸热多少的量叫做热量,通常用字母 Q 表示。

热量的单位是怎样规定的呢?很明显,锅炉里的水,加热时间越长,吸收热量越多,温度升得越高。茶壶里的水越多,把它烧开所需要的燃料也越多,即需要吸收的热量也越多。这些实例表明物体吸收热量的多少不仅与温度升高多少有关,与物体本身的质量也有关系。因此我们规定质量为 1 克的纯水温度升高(或降低) 1°C 所吸收(或放出)的热量为 1 卡;质量为 1 公斤的纯水温度升高(或降低) 1°C 所吸收(或放出)的热量为 1 千卡(或大卡)。显然,1 千卡=1000 卡。

二、比热 热容量

在两个小烧杯里,分别盛以质量相同的水和水银,同时分别把它们放到两个同类型的炉子上去加热。如果我们不断用温度计测量它们的温度,就会发现虽然它们吸收的热量差不多是一样多,但水的温度升高得慢,而水银的温度升高得很快,平均水每升高 1°C ,水银要升高将近 30°C 。可见由质量相同的不同物质组成的物体温度升高(或降低) 1°C 所吸收(或放出)的热量并不相同,说明物体吸收(或放出)热量的多少除了与物体的质量、升高(或降低)的温度有关外,还与组成物体的物质的性质有关。我们把质量为1克的物质温度升高(或降低) 1°C 所吸收(或放出)的热量的卡数,或者质量为1公斤的物质温度升高(或降低) 1°C 所吸收(或放出)的热量的千卡数叫做这种物质的比热,通常用字母 c 表示。比热的单位是卡/克·度或千卡/公斤·度。比热反映了物质的热性质。

假设质量为 m 的物体吸收了热量 Q 之后温度从原来的 t_1 升高到 t_2 ,那么组成这物体的物质的比热

$$c = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)}。 \quad (6.2)$$

严格说来,任何物质的比热都不是常数,温度改变时,物质的比热也略有变化。但是这种变化是微不足道的,可以忽略不计。表6.2列出了几种常见的固体物质和液体物质的比热。

从表6.2可以看出水的比热要比其他物质的大得多。夏天,一些工厂、车间为了降温,往往采用浇水这种最简单的措施,因为水在温度升高和蒸发过程中可以吸收比其他物质多得多的热量。沿海地区的气温早晚相差比较小,主要也是由于海水在起着调节作用。白天气温较高时,海水由于比热较

表 6.2 几种常见物质的比热

(单位: 卡/克·度或千卡/公斤·度)

煤油	0.50	水	1.00	水银	0.033	石英砂	0.196
蓖麻油	0.43	铝	0.21	铂	0.032	粘土	0.233
酒精	0.60	铁	0.11	铅	0.031	灰质砂	0.214
乙醚	0.56	铜	0.093	金	0.031	腐殖质	0.477
冰	0.50	银	0.056	铋	0.029	黑土	0.23

大,随着气温的升高吸收了大量的热量;晚上气温下降了,海水又随着气温的下降把大量的热量放出来。

掌握了物质的比热就可以把物体在温度改变过程中吸收或放出的热量计算出来。具体的公式可以从公式(6.2)推出,即

$$Q = cm(t_2 - t_1)。(6.3)$$

当 $t_2 > t_1$ 时, $Q > 0$, 表示物体吸热; $t_2 < t_1$ 时, $Q < 0$, 表示物体放热。

[例题 6.1] 质量为 5 公斤的钢铸件需要进行热处理(退火),先把它加热到 600°C ,然后再使它逐渐冷却到 20°C (室温)。问铸件在冷却过程中向外放热多少?已知钢的比热 $c = 0.12$ 千卡/公斤·度。

解:今已知铸件质量 $m = 5$ 公斤,钢的比热 $c = 0.12$ 千卡/公斤·度,始末温度 $t_1 = 600^{\circ}\text{C}$, $t_2 = 20^{\circ}\text{C}$,按公式(6.3)得

$$Q = 0.12 \times 5 \times (20 - 600) = -348 \text{ 千卡},$$

负号表示铸件放热。

烧开水时,不仅水要吸收热量,盛水的容器由于温度是随着水温一起升高的,因此也要吸收热量。容器温度升高 1°C

所吸收的热量就是它的热容量。所谓物体的热容量就等于构成它的物质的比热和它的质量的乘积，可用 cm 表示。热容量的单位是卡/度或千卡/度。

在农业上，土壤的热容量对于作物的生长发育有着重要的影响。从表 6.2 里可以看到土壤的各种组成成分的比热，其中石英砂的比热最小，腐殖质的比热最大。因此愈富有腐殖质的土壤，热容量愈大。在土壤的组成成分中，除了石英砂、粘土、灰质砂和腐殖质外，还含有水分。由于水的比热最大，因此包含水分较多的土壤热容量较大。浸得很湿的土壤，比热就接近于 1 卡/克·度。

在耕作上，浸得极湿的粘土叫做冷土。冷土包含很多水分，热容量较大，在太阳光照射下，温度上升很慢。在春播时，如果土壤包含水分过多，温度不易上升，地气不暖，种子就不容易发芽。因此在播种前要采取开沟排水的措施。相反，包含很少水分的砂土叫做暖土。暖土包含水分很少，热容量较小，在太阳光照射下，温度上升较快；在傍晚后温度下降也很快。温度这样忽高忽低，对于作物是不利的。因此要多加绿肥以增加腐殖质；还要经常进行适当的灌溉以增加水分。这样，土壤的热容量才会有所增大，以利于作物的生长和发育。

上海市郊马桥人民公社俞塘大队的贫下中农认真贯彻农业“八字宪法”，实行科学种田。他们经过长期的科学实验，初步总结出一整套在水稻主要生育期间用水来调节温度改变农田小气候的有效措施。按照他们的经验，在早稻生长前期，由于气温较低，采取薄水浅灌（灌水 10 毫米左右）可使土温比气温高出 $4\sim 6^{\circ}\text{C}$ ，有利于早稻发棵好，抽穗开花多。在灌浆期和成熟期要采取日灌夜排的措施，而白天灌水要深（2.5~4

厘米), 这样可以降温增湿, 以防止夏日的闷热。

三、热平衡方程

经验告诉我们, 两个温度不同的物体在相互接触之后, 它们的温度就会趋向一致。这是因为热量总是从温度高的物体向温度低的物体传递的缘故。

温度是反映物体所处的热状态的。一个各部分温度都相同的物体是处于热平衡状态的物体。当两个温度不同的物体相互接触之后, 它们就失去了热平衡。于是就发生了热量的传递, 温度逐渐趋向一致而达到新的热平衡状态。

很明显, 两个相互接触的物体在趋向热平衡状态的过程中, 如果与其他物体没有热交换, 那么原来温度高的物体所放出的热量 Q 和原来温度低的物体所吸收的热量 Q' 大小相等, 符号相反。即

$$Q + Q' = 0, \quad (6.4)$$

这就是热平衡方程。利用这个方程, 可以测定物质的比热。现在就来介绍一种粗略的测定物质比热的实验方法。

[例题 6.2] 把质量为 0.5 公斤的碎铜片加热到 100°C , 然后把它投在 0.4 公斤的水中。设水的初温为 15°C , 投入铜片后, 温度升高到 23.6°C 才稳定下来。试根据这些数据求出铜的比热。

解: 根据热平衡方程, 铜片和水在趋向热平衡状态的过程中, 铜片所放出的热量 Q_1 与水所吸收的热量 Q_2 大小相等, 符号相反。现在假设铜的比热为 c_1 千卡/公斤·度, 铜的初温为 $t_1^{\circ}\text{C}$, 最后温度为 $t^{\circ}\text{C}$, 铜片的质量为 m_1 公斤, 于是

$$Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1).$$

而水的质量为 m_2 公斤, 比热为 c_2 千卡/公斤·度, 初温为 $t_2^{\circ}\text{C}$,

最后温度也是 $t^{\circ}\text{C}$, 因此

$$Q_2 = c_2 m_2 (t - t_2)。$$

而

$$Q_1 + Q_2 = 0,$$

即

$$c_1 m_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_2) = 0,$$

所以

$$c_1 = -\frac{c_2 m_2 (t - t_2)}{m_1 (t - t_1)}。$$

把已知的数据代入上式可得铜的比热

$$c_1 = \frac{-0.4(23.6 - 15)}{0.5(23.6 - 100)} = 0.09 \text{ 千卡/公斤} \cdot \text{度}。$$

实际上为了保证在实验过程中, 铜片和水都不同周围其他物体产生热的传递, 它们都是放在量热器里进行实验的。因此在实际计算中, 量热器的热容量也要考虑进去。

量热器(图 6.3)是一种隔热很好的容器。它的主要部分是一只磨光的薄壁金属杯 A, 这个金属杯又是放在另一个较大的金属杯 B 中的, 底上有不易导热的软木塞支持着。这样的装置目的就是为了尽量避免金属杯 A 和外界进行热传递。

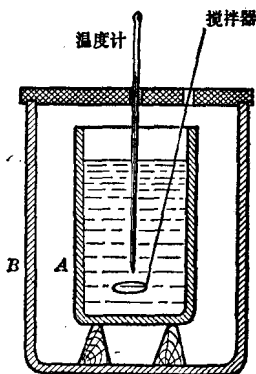


图 6.3 简单的量热器

四、燃 烧 值

现在讨论获得热量的方法。前面已经讲过, 燃料在燃烧时会放出大量的热量, 这是我们取得热量最常用的方法。但是质量相同的各种燃料在燃烧过程中放出的热量是有多有少的。为了比较各种燃料的发热本领, 我们把质量为 1 公斤的燃料在完全燃烧过程中所放出的全部热量叫做燃料的燃烧

值,通常用字母 q 表示。燃料燃烧值的单位是卡/克或千卡/公斤。表 6.3 列出了几种常用燃料的燃烧值。因此质量为 m 、燃烧值为 q 的燃料在完全燃烧过程中所放出的总热量

$$Q = qm. \quad (6.5)$$

表 6.3 几种常用燃料的燃烧值

(单位: 卡/克或千卡/公斤)

干木柴	8000	酒 精	7200	煤 油	11000
无烟煤	8000	柴 油	10200	汽 油	11000
木 炭	8000	石 油	10500	重油 (40 号)	9470

在燃料燃烧时放出的总热量中,除一部分被用热器(如水壶)所吸收外,不可避免地还要有一部分热量被烟气带走,散失在周围的空气中,此外由于燃料的不完全燃烧,还有热量损失。我们把用热器所吸收的有用热量 Q_1 与燃料在完全燃烧中放出的总热量 Q 的比叫做供热装置的燃烧效率,通常用字母 $\eta_{\text{燃}}$ 表示。即

$$\eta_{\text{燃}} = \frac{Q_1}{Q} \times 100\%. \quad (6.6)$$

在大型的热电站中,锅炉的燃烧效率可达 90%,而一般的煤油炉、柴灶的燃烧效率都很低。

提高燃烧效率的方法在于使燃料充分燃烧(如采取加煤均匀、让空气流通等措施)和减少热量的散失。这样就可以提高燃料的利用率,以达到节约燃料的效果。

[例题 6.3] 在煤油炉上烧一壶水,已知壶内盛水 1.5 升(即质量为 1.5 公斤),初温为 10°C ,铝壶本身的热容量为 150 卡/度。煤油炉每分钟烧煤油 3 克,如果它的燃烧效率为 30%,问要多少时间才能烧开?

解：设需要 T 分钟水才能烧开。

总 热 量(放热)

每分钟烧煤油 3 克,

T 分钟烧煤油 $3T$ 克,

煤油的燃烧值

$$q = 11000 \text{ 卡/克,}$$

所以 放出的总热量

$$Q = qm$$

$$= 11000 \times 3T$$

$$= 33000T \text{ (卡)}。$$

有用热量(吸热)

水: $10^\circ\text{C} \rightarrow 100^\circ\text{C}$,

$$Q_{\star} = c_1 m_1 (t_2 - t_1)$$

$$= 1 \times 1500 \times (100 - 10)$$

$$= 135000 \text{ (卡)}。$$

铝壶:

$$Q_{\text{壶}} = c_2 m_2 (t_2 - t_1)$$

$$= 150 \times (100 - 10)$$

$$= 13500 \text{ (卡)},$$

所以 吸收的有用热量

$$Q_1 = Q_{\star} + Q_{\text{壶}}$$

$$= 148500 \text{ (卡)}。$$

又因煤油炉的燃烧效率

$$\eta = \frac{Q_1}{Q} = \frac{148500}{33000T} = 30\%,$$

所以水烧开需要时间

$$T = \frac{1485}{33 \times 3} = 15 \text{ (分)}。$$

习题 6.1 医生在测病人体温时,总要把体温表含在病人口中几分钟才取出来读数,为什么?

习题 6.2 有人说:“热水和冷水混合之后,热水降低的温度就等于冷水升高的温度。”这句话对吗?为什么?

习题 6.3 质量为 10 克的铜球,在炉内烧了一段时间后,立即取出放到 10°C 的水中,结果水温上升到 25°C 才稳定下来。如果水的质量为 50 克,问炉内温度是多少?

习题 6.4 某厂每天回收废汽的热量,相当于 5000 升(1 升 = 1000 厘米³)水温度从 20°C 升高到 100°C 的热量。如果每年以 300 个工作日计,问该厂每年可回收多少热量?如果燃烧效率以 80% 计,相当于节约

了多少无烟煤?

习题 6.5 40 升水从 20°C 升高到 100°C , 用掉 2 公斤石油。求火炉的燃烧效率。

第三节 物体的热膨胀

一、固体的线膨胀

为什么公路上的高压电线冬天绷得紧而夏天就会下垂? 为什么随着气温的上升, 温度计里的水银面就会上升? 为什么夏天清晨出门时, 自行车胎里的气不宜打得过足, 否则中午时气温一升高, 车胎就容易被爆破? 这些大家都知道, 因为固体、液体、气体都具有热胀冷缩的性质。

现在先来讨论固体的热膨胀的规律。当温度升高时, 固体的各个线度(如长度、宽度、高度、直径等)都要增长, 因此体积也要增大。线度的增长叫做线膨胀; 体积的增大叫做体膨胀。液体和气体都没有一定的形状, 所以线膨胀对固体才有意义。

固体的线膨胀跟哪些因素有关呢? 实验表明, 对于同一种物质组成的固体说来, 温度每升高 1°C , 线度的增长基本上是相同的。因此可以说固体的线度的增长是跟温度的升高成正比的。同时实验还表明固体的线度的增长跟它原来的线度也成正比。原来线度大的固体随着温度的升高, 线度的增长也大。

不同的固体物质, 它们的热膨胀程度是否相同呢? 把两块不同的金属片铆合在一起(例如铜片在下、铁片在上), 让它一端固定, 另一端放在火上加热(图 6.4a), 不固定的一端就要向上弯, 说明这两种金属的热膨胀程度不同, 铆在下方的铜

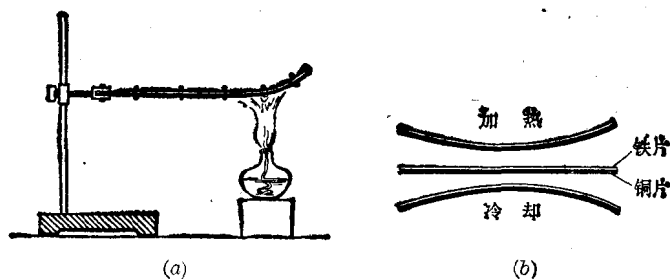


图 6.4 双金属片的作用

片的热膨胀程度比铁片的大。浇水冷却时,它又要向下弯(图 6.4b)。

由于这种双金属片的弯曲程度跟温度的变化有关,在工业上就利用它来制成金属温度计(图 6.5)。图中盘着的就是双金属片,它的 A 端固定,随着温度的变化, B 端就会伸展或者更加弯曲从而带动指针 C 发生偏转来指示温度。在农业上用来人工孵化家禽的恒温箱,有的也是利用双金属片来自动调节温度的。从图 6.6 上可以看出这种温度调节器的作用原理。弧形的双金属片 C 的 O 端固定,另一端与一金属板 M 相连。当 C 伸展时, M 碰到接触点 K ;当 C 更加弯曲时, M

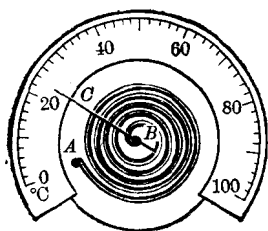


图 6.5 金属温度计

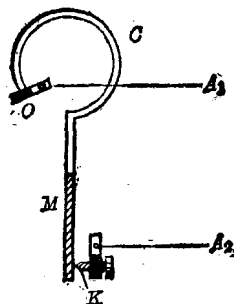


图 6.6 温度调节器原理示意图

就与接触点 K 断开。接触点 K 上装有螺钉是用来调节 K 点的位置的。工作时，把它放在恒温箱内，同时把 O 和 K 串联在电热器(如电炉)的两个接线柱 A_1 和 A_2 上。如果箱内温度超过规定温度， C 的更加弯曲使 M 脱离 K ，于是电路断开，电热器停止供热；如果箱内温度过低， C 的伸展使 M 又和 K 接触，于是电路接通，电热器又开始供热。这样就可以使箱内自动保持恒定的温度。

为了表明各种物质的线膨胀的特性，我们把固体由于温度升高或降低 1°C 所引起的线度的增长或缩短与 0°C 时的线度之比叫做固体物质的线胀系数，通常用字母 α 表示。线胀系数的单位是 $1/\text{度}$ 。

假设固体在 0°C 时的长度为 l_0 ，在 $t^\circ\text{C}$ 时的长度为 l_t ，那么温度升高 $t^\circ\text{C}$ ，固体长度就增长 $l_t - l_0$ ，平均每升高 1°C ，固体长度增长 $\frac{l_t - l_0}{t}$ 。于是固体的线胀系数

$$\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}, \quad (6.7)$$

$$\alpha l_0 t = l_t - l_0,$$

即

$$l_t = l_0(1 + \alpha t). \quad (6.8)$$

上式表明：知道了物体在 0°C 时的长度和线胀系数，就可以把

表 6.4 几种固体物质在通常温度范围内的线胀系数

(单位: $1/\text{度}$)

铝	0.000238	黄铜	0.000019	铂	0.000009
铅	0.000029	铜	0.000017	玻璃	0.000010
锡	0.000027	铁	0.000012	殷钢	0.0000015
银	0.000019	钢	0.000011	石英玻璃	0.0000005

物体在任何温度下的长度计算出来。表 6.4 列出了几种固体物质在通常温度范围内的线胀系数。实际上线胀系数的数值就相当于在 0°C 时 1 米长的固体温度升高 1°C 时所增长的长度的米数。

如果已知物体在 $t_1^{\circ}\text{C}$ 时的长度为 l_1 ，要找物体在 $t_2^{\circ}\text{C}$ 时的长度 l_2 。为了方便可以不必去找物体在 0°C 时的长度，而直接按下面的近似公式来计算

$$l_2 = l_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)]。 \quad (6.9)$$

[例题 6.4] 为了考虑到钢轨热胀冷缩的特性，一般规定铁路钢轨间的最大空隙是 1.10 厘米，如果再大就会引起列车震动。假设因四季温度变化引起钢轨温度变化的最大范围是 80°C ，问每段钢轨的长度最长不能超过多少米？

解：假设钢轨在当地最低温度 t_1 时的长度为 l_1 ，这时各段钢轨之间都有空隙 1.10 厘米。温度升高 80°C 而到达 t_2 时，钢轨长度增为 l_2 ，这时空隙已不存在，表明每段钢轨只能增长 $l_2 - l_1$ ，即 1.10 厘米。于是根据公式 (6.9)

$$\begin{aligned} l_2 &= l_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] = l_1 + \alpha l_1 (t_2 - t_1), \\ l_2 - l_1 &= \alpha l_1 (t_2 - t_1), \end{aligned}$$

把已知数据代入，可得钢轨在当地最低温度时的最大长度

$$l_1 = \frac{l_2 - l_1}{\alpha(t_2 - t_1)} = \frac{1.10}{0.000011 \times 80} = 1250 \text{ 厘米}。$$

二、固体和液体的体膨胀

固体的体膨胀的规律和线膨胀十分相似。我们把固体由于温度升高或降低 1°C 所引起的体积的增大或缩小与 0°C 时的体积的比叫做固体物质的体胀系数，通常用字母 β^* 表示。

* β 是希腊字母，读作“bei-ta”。

体胀系数的单位也是 $1/^\circ\text{C}$ 。

假设 V_0 、 V_t 分别表示固体在 0°C 和 $t^\circ\text{C}$ 时的体积，同样可以列出固体的体胀系数

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}, \quad (6.10)$$

即

$$V_t = V_0(1 + \beta t), \quad (6.11)$$

以及近似公式

$$V_2 = V_1[1 + \beta(t_2 - t_1)]. \quad (6.12)$$

关于各种固体物质的体胀系数也必须通过实验来测定，它在数值上就相当于在 0°C 时体积为 1 厘米^3 的固体温度升高 1°C 时所增大的体积的立方厘米数。

对于在各个方向上线胀系数都相同的固体说来，它的体胀系数是它的线胀系数的 3 倍，即

$$\beta = 3\alpha_0. \quad (6.13)$$

液体的体膨胀规律与固体的完全一样，只是液体的体胀系数要比固体的大得多。表 6.5 列出了几种液体物质的体胀系数。

表 6.5 几种液体物质在通常温度范围内的体胀系数

(单位: $1/^\circ\text{C}$)

乙 醚	0.00165	煤 油	0.00100	甘 油	0.00050
酒 精	0.00110	硫 酸	0.00056	水 银	0.00018

固体和液体的体积随温度发生变化之后，它们的密度也要发生改变。根据公式 $\rho = \frac{m}{V}$ ，读者很容易证明，固体和液体在 $t^\circ\text{C}$ 时的密度 ρ_t 与在 0°C 时的密度 ρ_0 之间的关系为

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad (6.14)$$

上式表明, 物体的密度随着温度的上升而减小。很明显, 物体的比重与温度也存在着这样的关系。

三、水的反常膨胀

冬天, 不论天气多么寒冷, 比较深的池塘、湖泊里的水都不会全部冻结成冰。凿开湖面结得很厚的冰层, 就会发现湖底的水温仍然保持在 4°C 左右, 因此水中的鱼类在寒冷季节仍能得以生存(图 6.7)。这是为什么呢?

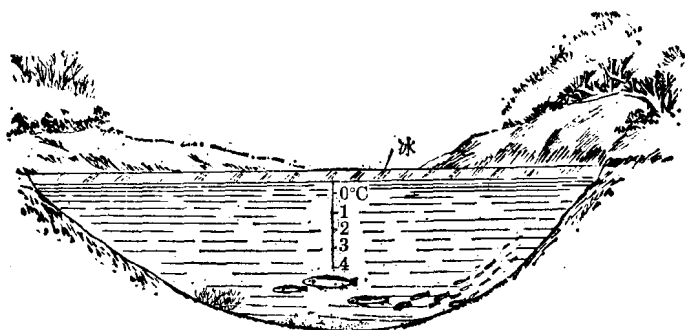


图 6.7 冬天比较深的湖泊池塘内水温的分布

原来水的热膨胀情况除了有一般物质都有的热胀冷缩的共同性一面外, 还有它的特殊性一面。实验表明, 水在 0°C 到 4°C 这一温度范围里, 受热时体积不但不增大, 反而缩小。因此在这一范围里, 水的体胀系数是负的, 我们把这一现象叫做水的反常膨胀。在温度高于 4°C 之后, 它的情况就和其他物质一样热胀冷缩了。所以对于一定质量的水说来, 它在 4°C 时的体积最小, 密度最大, 等于 1 克/厘米^3 。图 6.8 就是反映水的密度随温度变化情况的图线。

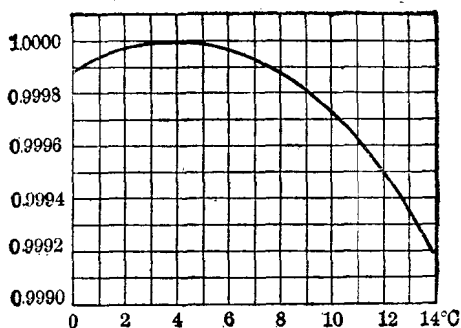


图 6.8 水的密度随温度变化的图线

正是这个原因,当冬天的气温降低到 4°C 以下时,湖面上的水由于反常膨胀,体积反而增大,密度反而减小。于是冷水层就停留在上面继续冷却,直到温度降到 0°C 以下冻结成冰为止。湖底温度较高的水都由于密度较小而浮到湖面上来散发热量,直到温度降到 4°C 时由于密度最大沉在湖底不再上浮。所以湖底的水温仍可保持在 4°C 左右。

四、热应力的防止和应用

我们知道,固体的线胀系数很小,由于温度变化而引起线度的增减也是很微小的。但是这种微小的变化却不可忽视。如果在温度变化时,固体的膨胀或收缩受到阻碍,就会产生很大的力。这种由于温度变化而在物体内部产生的应力叫做热应力。

在工程技术上,为了防止热应力带来的危害,采取种种防护措施。例如长的钢铁桥梁不能两端都固定,而只能固定一端,把另一端架在滚子上,让它可以自由伸缩(图 6.9)。许多仪器、机器和建筑物通常都是用不同的材料制成的。在选用

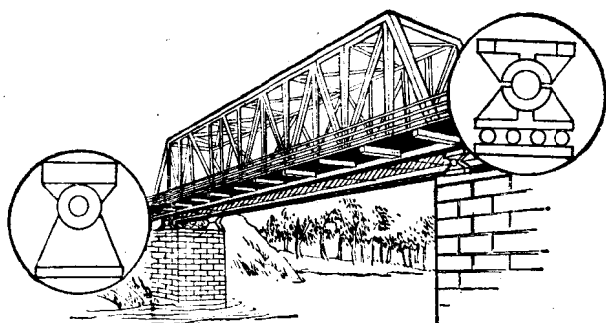


图 6.9 钢铁桥梁只能固定一端,把另一端架在滚子上

这些材料时就要求它们的线胀系数必须十分接近。如在各种电灯泡、电子管中焊接在玻璃中的那部分金属线就是一种特种合金(铁 58% 和镍 42% 的合金,叫做杜美丝),它的线胀系数和玻璃的很接近。这样在温度变化时就可以防止产生热应力。同样由于铁和混凝土的线胀系数很接近,因此在建筑工程上广泛使用钢筋混凝土的结构。

热应力有时也可利用来加固器具。比如为了使内燃机气缸上的零件——活塞销紧紧地装进活塞孔内(图 6.10),制造时就使活塞销的直径稍稍大于活塞孔的直径。在装配时先把活塞加热,活塞孔的直径因受热而胀大,趁热把销插入孔内,冷却后孔收缩,销就紧紧地固定在活塞上了。

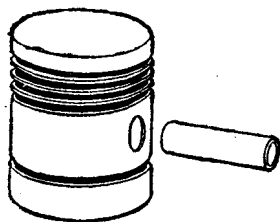


图 6.10 把活塞销装进活塞孔

习题 6.6 细颈烧瓶里装着煤油,用橡皮圈套在瓶颈上标出油面。如果把烧瓶放在热水中,就会看到油面先下降,然后再开始上升。这是什么原因?

习题 6.7 在热电厂里, 输送蒸汽的长直导管每隔一定距离在中间总要安装一段弯曲的伸缩管或波纹管, 如图 6.11 所示。为什么?



图 6.11 伸缩管和波纹管

习题 6.8 某钢梁大桥的桥身在 0°C 时长 1082 米。当温度从 -15°C 变化到 40°C 时, 桥身的长度变化了多少?

习题 6.9 原来温度为 1200°C 的钢质铸件, 体积为 2500 厘米³, 当冷却到 20°C 时, 体积缩小多少?

习题 6.10 桶的容积是 38 升, 在 10°C 时装入煤油 37 升, 问当温度升高到 35°C 时煤油会不会从桶口溢出? (桶的膨胀可以忽略不计。)

习题 6.11 要把一个钢制齿轮装到轴上去。轴的直径是 48 毫米, 在温度 25°C 时齿轮内径比轴小 0.004 毫米。若用加热方法把齿轮装上去, 问至少需要把齿轮的温度升高到多大才行?

第四节 热 传 递

各部分温度都相同的物体是处在热平衡状态之中。但是“所谓平衡, 就是矛盾的暂时的相对的统一。”物体所处的热平衡状态也是暂时的。随着与其他物体的接触, 平衡就成为不平衡, 热量就从温度高的物体流向温度低的物体, 而趋向新的热平衡状态。这个过程就是热传递过程。那么温度不同的物体间的热传递过程是怎样进行的呢? 实践和理论的分析都表明: 不论多么复杂的热传递过程, 总不外乎三种基本方式: 传导、对流和辐射。

一、传 导

把一根长的铁丝的一端插在火炉中,不一会儿,铁丝的另一端也会烫手,表明热量从铁丝的一端传递到了另一端。热的烙铁接触到焊锡,也会把热量传递给焊锡而使焊锡熔化。这种热量从物体的一部分传递到另一部分,或从一物体传递到与它接触的另一物体的过程叫做热的传导。传导的特点是在传递过程中,传热的物质本身并没有移动。

同样把一根木柴的一端插在火炉中,烧得灼灼作响,但是手握另一端仍不会感到烫手。这说明不同物质的导热性能是不同的。我们把容易导热的物质叫做热的良导体。金属是热的良导体,而木材、陶瓷、玻璃、塑料都是热的不良导体。

各种金属材料的导热性能也各不相同。实验表明,金属中最容易导热的是银,其次是紫铜、铝等。

物体传导热量的多少不仅与构成物体的材料有关,而且还与物体的导热面积以及它与周围的温度差都有关系。在工业上常用热的良导体制成各种散热器。为了提高散热能力,散热器常制成片状以扩大散热面积。图 6.12 就是一个大功率晶体管的铝质散热器。散热器的作用在于吸收大功率晶体管在工作时所产生的热量,并通过铝片把热量散发到周围的大气中去,从而使体积很小、热容量很小的晶体管不致因发热过多,温度过高而影响工作性能,甚至受到

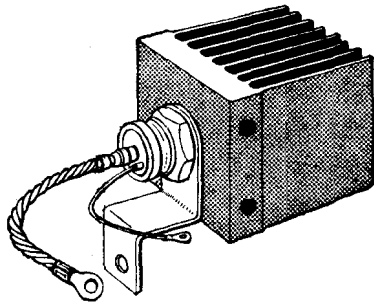


图 6.12 大功率晶体管散热器

功率晶体管在工作时所产生的热量,并通过铝片把热量散发到周围的大气中去,从而使体积很小、热容量很小的晶体管不致因发热过多,温度过高而影响工作性能,甚至受到

损坏。

液体除水银外都是热的不良导体。把一个盛满水的玻璃管的上半段放在火上加热(图 6.13),即使上面水已烧开,下半段的水还是冷的。这说明水是热的不良导体。气体的导热性能更差。

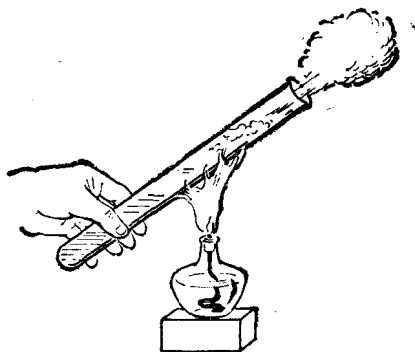


图 6.13 水是热的不良导体

多孔的物质内存有大量的空气,因此也是热的不良导体,可以用来绝热保温,象稻草、软木、羊毛以及由玻璃纤维织成的玻璃棉都是很好的绝热材料。我们冬天穿棉衣所以能保暖就是因为棉花纤维中存有许多空气,使人身上发出的热量不容易传出去。火炉的内壁所以要用耐火砖来砌也是因为耐火砖的导热性能很差,这样可以减少热量的损失,提高燃烧效率。

二、对 流

我们已经从图 6.13 的实验知道水是热的不良导体。如果把盛满水的玻璃管的底部放在火上加热,手拿着上面(图 6.14),那么不多会儿就感到烫手了。这是什么原因呢?难道

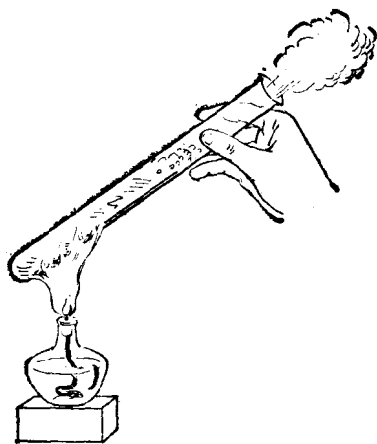


图 6.14 烧水时的对流现象

现在水又变成热的良导体了吗？不是。原来在这种情况下，水又以另一种方式传递热量了。

通常我们在烧开水时，也是对水壶底部加热的。水在壶底受热膨胀，密度减小。热水比冷水轻了就上浮。上面冷水的密度没有减小，比热水重了就下沉。这样川流不息形成循环的流动。最后全壶的水都逐渐地热起来。

气体也有类似的现象。在寒冷地区，冬天室内需要生火取暖。虽然火炉是放在室内的角落里，为什么满房的空气都会变暖呢？这也是因为热空气密度较小而上升，冷空气密度较大而下降，就形成了空气的循环流动，使整个室内的气温逐渐升高。

依靠液体或气体本身的流动来传递热量的过程叫做对流。对流的特点是流动，因此只有液体和气体才能进行对流。

液体或气体由于本身各处的密度不同而形成的对流叫做自然对流。但是在生产技术上，例如在汽车、拖拉机的冷却系

统中,往往用水泵、风扇的转动来强迫水和空气循环流动把热量带走。这种办法叫做强制对流。

发电机在发电过程中,它的定子(固定部分)和转子(转动部分)都要发热,使定子线圈和转子线圈的温度升高。如果温度过高就会把电机烧坏。因此一般的发电机都需要有冷却设备。过去对大型发电机的冷却方法是把空气或氢气吹入发电机,即利用空气或氢气的强制对流,效率较低。而水的导热性能与气体相比要好得多,相当于气体的3~8倍,况且水的比热又大,所以用水来冷却发电机,效果肯定比气体好。可是直到1956年国外才造出定子用水冷的发电机。如何把水通到每分钟旋转3000周的转子中去,而且还要保证滴水不漏,这个难题在国外始终未能解决。用毛泽东思想武装起来的我国工人阶级和工程技术人员首先创造出了世界上第一台双水内冷发电机。不仅如此,到了1969年,在无产阶级文化大革命的推动下,我国又制造出当时世界上独一无二的十二万五千瓩双水内冷汽轮发电机组,最近又成功地安装了三十万瓩双水内冷汽轮发电机组。所谓双水内冷发电机就是定子和转子都是利用水的强制对流来冷却的发电机。这种发电机的定子线圈和转子线圈都用空心铜管制成,因此可以让水通过这些管子来冷却。实践证明:双水内冷的效果是空气冷却的50倍,是氢气冷却的12倍。改善发电机的冷却效果是提高发电量的关键。和同体积、同材料的其他发电机相比,双水内冷发电机的发电量可以提高2~3倍。

三、辐 射

地球上绝大部分的热量来自太阳。然而太阳和地球之间大部分的空间是真空的,那么太阳对地球的热传递过程就不

可能用传导和对流来解释。实际上太阳的热量是直接发散到地球上来的。我们在太阳光下就会感受到由太阳直接发散过来的热。这种由热源直接向空间发散热量的过程叫做热的辐射。辐射的特点是热量直接由热源射出，可以不依靠其他物质。由热源辐射出来的热量叫做辐射热。

一切物体都在辐射热量，物体的温度越高，辐射的热量越多。我们站在高温炉前，手放在发亮的电灯泡旁，都会感到它们在辐射热量。但是如果我们用一块板、一片纸挡一下，就感觉不到了。这说明辐射热象光线一样是沿直线辐射出来的。

热源的辐射本领除和热源的温度有关外，还和它表面的颜色以及表面的性质有关。实验表明：黑色的表面、粗糙的物体善于辐射热量，而白色的表面、光滑的物体不善于辐射热量。这就是说在与周围物体的温度差相同的情况下，黑色的表面、粗糙的物体要比白色的表面、光滑的物体辐射热量快些。

另外，实验还证明：黑色的表面、粗糙的物体善于吸收外来的辐射热而反射得很少；明亮的表面、光滑的物体善于反射外来的辐射热而吸收得很少。

土壤吸收辐射热和发散辐射热的本领决定于土壤表面的性质、土壤的组成成分以及土壤中包含水分的多少。一般说来，土壤的颜色越深，吸收辐射热的本领越大。因此黑土最易温暖，在土壤表面撒些炭粉（或草木灰）可以提高它吸收太阳辐射热的能力从而使土壤的温度增高。在土壤的组成成分中，矿物质要比有机物容易发散辐射热，其中以石英砂发散辐射热的本领最大，水分也具有较大的发散辐射热的本领。凡是善于吸收辐射热的土壤，也善于发散辐射热。

以上我们分别讨论了热传递的三种基本方式。但是在实

际的热传递过程中,传导、对流和辐射往往是同时存在的。就拿烧水的例子来说,整壶水逐渐热起来当然主要是靠对流,但是与壶接触的水是靠传导获得热量的,在壶底壶壁附近的水还受到辐射热。因此在分析时要根据具体情况,抓住主要矛盾,分清主次,逐一解决。

四、热传递的加速和防止

为了尽快地取得热量或驱散热量,就需要加速热传递过程。在生产技术上增大器件的散热面积就是为了加速传导和辐射过程;利用水泵、风扇使水、油或空气作强制对流就是为了加速对流过程。

大容量的变压器为了避免使产生的热量聚集起来,它的主要部件是全部浸没在油箱中的(图 6.15)。在油箱外面还装了许多与油箱相连通的散热油管。变压器所产生的热量就是通过对流传递给油箱壁以及油管的,然后再通过传导和辐射散发到周围的空气中去。采用这些装置就可以使变压器冷却得快些。

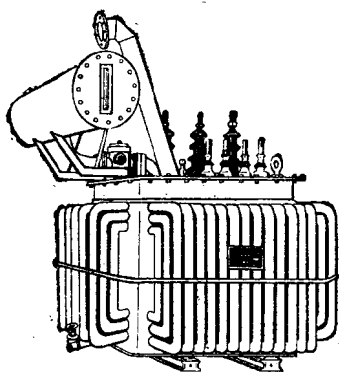


图 6.15 大容量的变压器



图 6.16 保暖瓶的剖面图

在各种保温绝热装置中，就需要防止热传递过程。我们经常用的保温瓶（热水瓶）是怎样防止热传递的呢？图 6.16 就是保温瓶的剖面图。它的主要部分就是一只瓶胆，瓶胆是由双层薄玻璃制成的，夹层里的空气抽得很稀薄，里里外外都镀有一层薄银，因此里外很光亮；瓶口用软木塞盖着。由于玻璃和软木塞的导热性能都很差，就可以防止传导；夹层里空气稀薄可以防止对流；里外表面都很光亮可以把两面发散来的辐射热都反射回去。因此只要把瓶塞盖紧，在几小时内可以起到保温作用。

习题 6.12 热传递在流体中主要是依靠什么方式进行的？在固体中呢？

习题 6.13 为什么旧棉衣的保暖作用比不上新棉衣？又为什么把旧棉花弹一弹松，保暖作用可以提高？

习题 6.14 冬天用手接触铁器要比接触木器感觉到冷得多，为什么？

习题 6.15 为什么把空锅放在火上要烧坏，而盛满水的锅放在火上就不会烧坏呢？

习题 6.16 沿海地区白天常有海上吹来的风，晚间却有吹向海面的风，这是什么原因？

习题 6.17 在简易冰箱内，冰块应放在上部还是下部？为什么？

习题 6.18 为什么散热片要涂成黑色，而冷藏车的车厢要漆成白色？

复 习 题

习题 6.19 温度和热量有什么区别？

习题 6.20 水银温度计和电阻温度计各是利用物体的什么性质来测量温度的？它们各有什么优缺点？

习题 6.21 体积相同的铜块、铅块和铝块，哪一块热容量最大？

习题 6.22 有一个铝质容器，如果把与容器质量相同的热水倒进

容器里，这时热水冷却所降低的温度与容器受热所升高的温度是否相等？为什么？

习题 6.23 为了测定铜的比热，把质量为 500 克的铜砝码加热到 100°C ，然后把它放进盛有 400 克水的铝质量热器内，量热器质量为 60 克，量热器内水的初温为 15°C ，最后温度为 23.4°C 。求铜的比热。

习题 6.24 燃烧效率为 30% 的煤炉，每分钟烧 8 克煤，问需要多长时间才能把 1.5 升 10°C 的水加热到 100°C (假设煤的燃烧值为 6600 卡/克)？

习题 6.25 如果对金属圆环加热，它的内径是增大还是减小？为什么？

习题 6.26 对体积等于 60 厘米 \times 20 厘米 \times 5 厘米的铁梁加热共用去 400 千卡的热量。问铁梁的体积增大多少？

习题 6.27 热传递有哪几种基本方式？各有什么特点？

习题 6.28 为什么工厂或实验室中所用的烘箱的加热丝一般都装在箱的底部？

第七章 分子运动论

毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”在这一章里，我们就从物质的内部结构来了解热现象的本质，并进一步用以探讨气体、液体和固体的一些性质以及存在于它们之间的物态变化的规律。

第一节 分子运动论概述

一、分子运动论

坚硬的铁块可以挫成细末，而细末仍旧具有铁的性质；喷雾器可以把农药喷成很细的液沫，而这种液沫仍旧保持着农药的性质。这表明任何物质都可以分割成许多极小的微粒，它们仍旧保持着物质原有的性质。通常把可以独立存在并保持物质原有性质的最小微粒叫做物质的分子。物质就是由分子构成的。

所有物质的分子都是极小的。如果把它看成圆球，那么各种分子的直径都在几个埃*（以符号 \AA 表示）左右。在 0°C 和标准大气压下，1 厘米³ 的空气含有 2.7×10^{19} 个分子。近年来由于电子显微镜的发明，我们已能拍摄出某些物质分子的照片。图 7.1 就是用电子显微镜拍摄的蛋白分子结构的照片。

* 1 埃 = 10^{-8} 厘米。

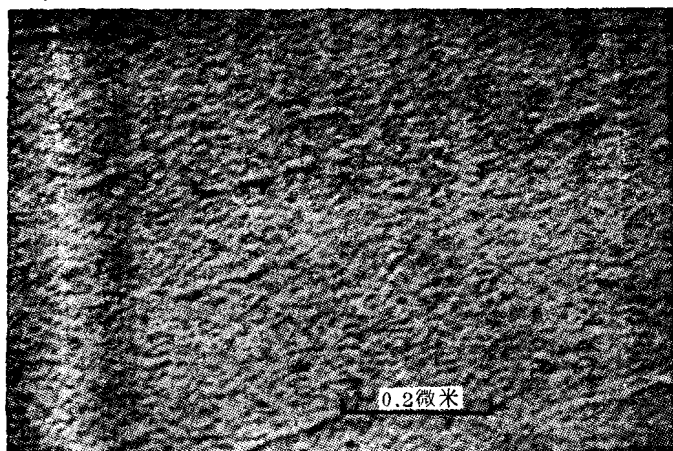


图 7.1 蛋白分子结构的照片

然而分子并不是构成物质的最小微粒，分子还可以分解为原子。但是物质分割成分子只是由大到小的量变，把分子继续分解成原子就从量变引起了质变，原子已不再具有物质原有的性质了。例如一个水分子可以分解成两个氢原子和一个氧原子，而氢和氧的性质与水的性质完全不同。

气体很容易压缩，自行车内胎里的气可以多打些，也可以少打些。这说明气体的分子之间存在着很大的空隙。同样，液体、固体分子之间也有空隙存在，只是不象气体分子间的空隙那么大，有人曾用二万个大气压的压强压缩钢筒中的油，结果油透过筒壁而流出，表明即使钢铁也决不是“铁板一块”，它的分子间也有空隙存在。

既然分子间存在着空隙，为什么固体的分子并不散开，固体仍能保持一定的形状呢？这是因为固体分子间存在着引力作用，要使固体分开还需要有一定的外力。此外从固体分子间存在空隙还表明固体分子间不仅存在着引力，还存在着斥

力。这种分子间的引力和斥力统称分子力。

分子力的大小与分子间的距离有关。图 7.2 就表明了这种关系。当分子间距离为

r_0 时, 分子间的引力和斥力相互平衡, 即分子力为零。因此 r_0 就相当于正常情况下分子间的空隙, 一般只有几个埃; 当距离小于 r_0 时, 分子间的斥力和引力都增大, 但斥力增大得较快, 因此这时分子力表现为斥力; 当距离大于

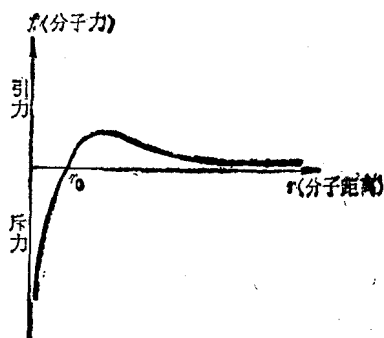


图 7.2 分子力与分子距离的关系

r_0 时, 从几个埃增大到几百个埃, 斥力和引力都减小, 但斥力减小得较快, 因此这时分子力表现为引力; 当距离大于 600 埃时, 分子力就很快趋于零。

以上是固体分子力的大致情况。液体由于分子间空隙较大, 因此液体分子力较小。气体由于分子间空隙更大, 因此在一般情况下气体分子力可以忽略不计。

经过化肥厂时, 老远就会闻到化学药品的气味; 在盛满水的喷雾器药筒里滴上几滴二二三乳剂, 不一会儿整筒水就变成浓度均匀的二二三药水。象这种物质分子从浓度较大的地方向浓度较小的地方迁移的现象就叫做扩散。

上面举的是气体、液体扩散的例子。固体也会扩散吗? 长期堆煤的墙角上会变黑, 而且擦洗不掉, 表明煤的分子已经扩散到墙壁里去了。固体扩散在金属热处理等生产技术上起着重要作用。然而在室温条件下固体的扩散, 速度十分缓慢, 因此必须在高温下进行。例如把铸铁或钢质的工件(如铈

犁、齿轮等)放在木炭和某些碳酸盐的混合物中,一起加热到 950°C ,经过一天时间,在工件表面的一层铸铁或钢质里就有一些碳分子扩散了进去。工件表面增加了碳的成分,可以提高硬度和耐磨性。这种方法叫做渗碳。此外在钢质里渗氮可以提高耐腐蚀性;渗铝可以提高耐热性。制作晶体管的半导体材料也是利用固体的扩散在洁净的硅(或锗)晶片上渗入少量的杂质(如锑、磷等)而制成的。

气体、液体和固体的扩散表明一切物质的分子都在不停地作无规则的运动。温度越高,分子运动得越快。因此我们把分子的这种无规则运动叫做分子的热运动。

进一步的实验还表明:固体分子运动的范围很小,只在它们各自的平衡位置附近作很小的振动,因此可以保持一定的体积和形状。液体分子是在作距离较大的振动,分子群并能作相对的整体移动,因此具有流动性。气体分子是在作方向不变的直线运动,直到跟别的分子或容器壁发生碰撞时才改变运动方向,因此气体的体积可按容器的大小任意变化。

总之,物体都是由大量的分子构成的;分子间存在着空隙;存在着一定的相互作用;分子都在不停地作无规则运动。这些就是分子运动论的主要内容。

二、用分子运动论来解释基本热现象

大量的实验事实都表明:虽然就个别分子的运动来看是无规则的,但由于作热运动的分子数量极大,就大量分子的集体表现来看,它遵循着一定的统计规律。

什么叫做统计规律呢?例如成年人的体重,有的轻些,有的重些,似乎没有什么规律,但如果我们对某个生产队所有成年人的体重作个统计,就会发现大于150斤的人是少数,小于

90 斤的人也是少数,多数人的体重是在 105~135 斤之间,平均体重约为 120 斤。这表明成年人体重的分布存在着“中间大,两头小”的统计规律。统计的人数愈多,这一规律就愈明显。

拿分子的速度来说,在一定温度下个别分子的速度有时大、有时小,没有一定的规律。

但就大量分子的速度来说,速度很大和速度很小的分子总是占少数,而接近平均速度的分子总是占大多数。因此,在一定温度下,分子速度的分布也符合“中间大,两头小”的统计规律。表 7.1 列出了 139°C 时氮气分子在各个速度区间所占的百分比。这一结果还可以作成如图 7.3 的图线。图中纵坐标表示在不同速度区间内分子数所占的百分比;横坐标表示速度大小。如果把速度区间分得无限细小,分子速度的分布曲线如图 7.4 所示。

表 7.1 139°C 时氮气分子在各个速度区间内所占的百分比

速度区间 (米/秒)	分子数百分比 (%)
0~100	0.6
100~300	12
300~500	30
500~700	29
700~1000	23
1000 以上	5.4

个别分子或原子所具有的体积、质量、速度和能量是微观量,直接测量是有困难的;而象温度、压强、体积等用来反映大量分子的集体特性的是宏观量。热学的任务就是采用统计规律找出大量分子的微观量的平均值,来说明物质宏观现象的微观本质。例如每个分子由于速度不同,因而动能也不一样。要表示物体大量分子热运动的动能就不能单取个别分子的动能,而必须取它们的统计平均值。科学研究表明,温度高时,分子热运动较强,分子的平均动能也较大;温度低时,分子热

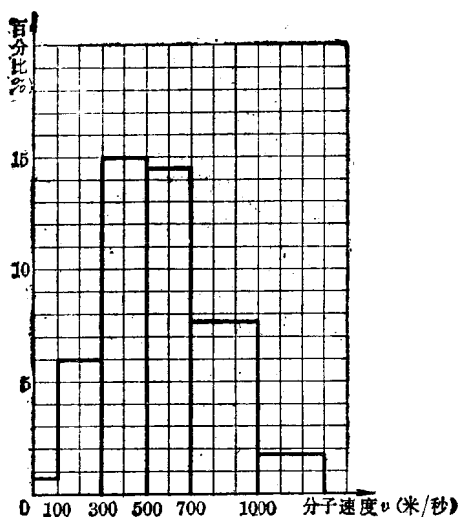


图 7.3 139°C 时氮气分子在各速度区间内所占的百分比

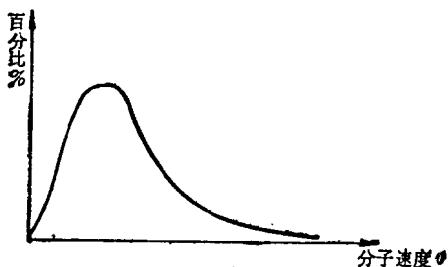


图 7.4 分子速度的分布曲线

运动较弱，分子的平均动能也较小。由此可知物体的温度就是它的分子平均动能大小的标志；温度的高低反映了物体分子热运动的状态。

在固体中，热量是怎样从一端传导到另一端去的呢？因为固体的分子、原子都不能自由运动，而是在各自的平衡位置

附近作振动。但热端的温度较高,分子、原子的平均动能也较大,振动较强。通过分子、原子间的相互作用,动能较大的原子的振动就迫使邻近原子的振动也增强起来,这样一个个传递过去,就把热运动的能量由热端传到冷端,使冷端的温度逐渐升高。这就是非金属固体的原子导热情况。金属的热传导除了原子导热外,主要依靠自由电子导热,它比原子导热的贡献大几十倍到几百倍,因此金属的导热性能较强。由此可见,热传导的过程就是能量迁移的过程。

物体热胀冷缩的特性也可以用分子运动论来解释。由于温度的升高标志着固体分子平均动能的增大,因此分子的振动加强了,即各个固体分子偏离各自的平衡位置的距离增大了,也就是体积发生了膨胀。

习题 7.1 试用分子运动论解释:

- (1) 在通常情况下气体的密度要比液体的密度小得多;
- (2) 在高温下固体的扩散速度可以加快;
- (3) 压缩固体要比压缩气体费劲得多。

习题 7.2 有人用钉锤不断敲击铅块,结果铅块温度显著升高,为什么?

习题 7.3 试举实例说明“中间大,两头小”的统计规律。

第二节 气体的性质

一、气态方程

在拖拉机气缸里,燃烧生成的高温高压气体在推动活塞做功的过程中,体积逐渐增大,压强逐渐减小,同时温度也有所下降。堵住打气筒的出气口,将活塞越往下压就越费劲,同时气筒还会发热。这表明筒内空气随着体积的减小,压强在增大,同时温度也在上升。由此可见气体的体积、压强和温度

三者之间存在着密切的联系。

从无数的实验事实中可以归纳出这样一条规律：对于一定质量的气体说来，无论它的体积、压强、温度如何变化，在稳定之后，它的压强与体积的乘积与绝对温度的比总是一个常量。即

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{常量}, \quad (7.1)$$

这个关系式就叫做气体的状态方程，简称气态方程。

在气态方程中，1、2是指气体在变化前后的状态。 p_1 、 p_2 分别表示一定质量的气体在变化前、后的压强，常用的单位是达因/厘米²、毫和大气压等。 V_1 、 V_2 分别表示气体在变化前、后的体积。由于气体总是充满整个容器的，因此容器中气体的体积就相当于容器的容积，常用单位是升、厘米³等（1升=1000厘米³）。 T_1 、 T_2 分别表示气体在变化前后的绝对温度。

实践表明，气态方程近似地反映了一般气体（如氧气、氮气、空气等）在温度不太低、压强不太大的情况下的状态变化的规律。通常把能严格遵循气态方程所反映的变化规律的气体叫做理想气体。因此在通常的温度和压强下，一般气体都可以看作是理想气体。

【例题 7.1】 在温度为 50°C，压强为 1 大气压时，汽油机气缸里气态混合物的体积为 0.93 升。在活塞的推动下气态混合物的体积缩小到 0.155 升，而压强增大到 10 大气压，问这时气态混合物的温度是摄氏几度？

解：在活塞推动前，气态混合物的 $p_1=1$ 大气压， $V_1=0.93$ 升， $T_1=50+273.15=323.15\text{K}$ ；活塞推动后， $p_2=10$ 大气压， $V_2=0.155$ 升，假设这时绝对温度为 T_2 ，根据气态方程 (7.1) 得

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} T_1 = \frac{10 \times 0.155}{1 \times 0.93} \times 323.15 = 538.58 \text{ K},$$

即压缩后气态混合物的摄氏温度

$$t_2 = T_2 - 273.15 = 538.58 - 273.15 = 265.43^\circ\text{C}.$$

二、气体的等温变化

图 7.5 是个最普通的风箱(压气机)的原理示意图。要使刚加过煤炭的炉子发火,只要用力推拉手柄 A , 空气就被不断地由出口 B 压进炉膛来帮助燃烧。仔细分析风箱里的空气,它也有个状态变化的过程。但在这过程中,空气的温度保持不变,或变化很小,可以忽略不计。象这种在温度不变情况下的气体状态变化就叫做气体的等温变化。

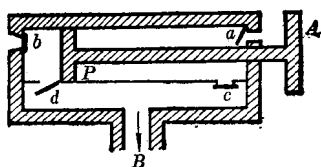


图 7.5 风箱(压气机)的原理示意图

根据气态方程可知,一定质量的气体在等温变化中,压强与体积成反比。即当 $T_1 = T_2$ 时,

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{常量}。 \quad (7.2)$$

这一结论又叫做波义耳定律。上式表明,当一定质量的气体体积减小时,压强就增大;体积增大时,压强就减小。掌握了上述规律,就不难弄清风箱的原理。从图 7.5 可以看出,风箱有两个进气阀 a, b 和两个出气阀 c, d , 其中 a, b 只能往里开,而 c, d 只能往下开。在把手柄 A 用力向前推的过程中,活塞 P 前方的空气由于体积减小而压强增大,因此进气阀 b 被压闭,而出气阀 d 被压开,空气就由出口 B 压进炉膛;同时活塞 P 后方的空气由于体积增大而压强减小到大气压以下,因此出气阀 c 被吸闭,而外部空气经进气阀 a 被吸进风箱。同样,

在把手柄 A 用力向后拉的过程中, 活塞 P 后方的空气经 c 、 B 被压进炉膛, 而外部空气经 b 被吸进风箱。

为什么在等温变化中, 一定质量的气体的压强和体积存在反比关系呢? 可用分子运动论来解释。所谓气体的压强, 是由气体分子对容器壁的碰撞而引起的。分子的密度越大, 分子的速度越大, 在单位时间里, 气体分子对容器壁的碰撞次数就越多, 压强就越大。对于一定质量的气体说来, 分子数是一定的。温度保持不变, 表明分子的平均动能不变, 即分子的速度不变。因此如果把气体的体积减小为原来的 $1/2$, 单位体积内的分子数(分子密度)就增大为原来的 2 倍, 那么在单位时间里气体分子对容器壁碰撞的次数就增多为原来的 2 倍, 压强也就增大为原来的 2 倍。这就是为什么气体的压强与体积成反比的原因。

三、气体的等压变化

气体也具有热胀冷缩的特性吗? 由于气体的体积除了与温度有关外, 还与压强有着一定的联系, 在压强变化的情况下, 一定质量的气体随着温度的上升, 它的体积可以胀大, 也可以不胀大, 甚至缩小。因此气体的热胀冷缩的特性只有在压强不变的情况下才能显示出来。通常把在压强不变情况下的气体状态变化叫做气体的等压变化。

根据气态方程可知, 一定质量的气体在等压变化中, 体积与绝对温度成正比。即当 $p_1 = p_2$ 时,

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \text{常量}。 \quad (7.3)$$

这一结论又叫做盖·吕萨克定律。

空气受热膨胀的规律对农作物的生长有一定的影响。例

如土壤颗粒间的空气就是由于热胀冷缩而不断得到更新的。白天由于太阳的照射，土壤温度升高，体积增大，颗粒间空隙减小。同时土壤颗粒间的空气也受热膨胀，而使部分空气扩散到土壤外面来。夜间气温下降，土壤温度也随着下降，体积减小，颗粒间空隙增大。同时土壤颗粒间的空气也由于温度下降而体积减小，填不满空隙。于是土壤外的新鲜空气就填补进去。就这样随着白天黑夜气温的变化，土壤内的空气不断得到更新。这一现象叫做土壤的换气。它能促使农作物不断吸收到新鲜空气中的氧气，使根部不致腐烂，并促进发育。疏松的土壤，颗粒间空隙较大，因而换气能力较强。所以在农作物生长期，应该经常把土壤耙松。

四、气体的等容变化

[例题 7.2] 某充氧车间温度是 18°C ，氧气瓶上压强计读数为 150 公斤/厘米²，当送进 -30°C 的冷藏库时，发现氧气瓶上压强计读数减小为 125 公斤/厘米²。为什么？是氧气瓶漏气了吗？

解：氧气瓶从车间送进冷藏库，温度下降了，但氧气的体积没有变，压强会不会减小呢？

根据气态方程可知，一定质量的气体在体积不变情况下，压强与绝对温度成正比。即当 $V_1 = V_2$ 时，

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \text{常量}。 \quad (7.4)$$

这一结论又叫做查理定律。

可见氧气瓶送进冷藏库，压强是要随温度的下降而减小的，但会不会减小这么多呢？已知氧气原来的绝对压强 $p_1 = 151$ 公斤/厘米²， $T_1 = 18 + 273.15 = 291.15\text{K}$ ， $T_2 = -30 +$

273.15 = 243.15 K, 因此氧气瓶送进冷藏库时的绝对压强

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 = \frac{243.15}{291.15} \times 151 = 126.1 \text{ 公斤/厘米}^2.$$

现在实际表压为 125 公斤/厘米², 表明漏气现象并不严重, 压强的减小主要是由于温度下降而引起的。

通常把在体积不变情况下气体的状态变化叫做气体的等容变化。

习题 7.4 试用分子运动论来解释查理定律。

习题 7.5 为什么稀薄气体的压强小, 而稠密气体的压强大?

习题 7.6 电灯泡内充有氮和氩的混合气体, 要使泡内的混合气体在 100°C 时压强不超过 1 个大气压, 问在室温 (20°C) 下, 泡内混合气体的压强至多只能充到多大?

习题 7.7 一包炸药如果燃烧, 生成的气体在 547°C 时体积为 250 升, 压强为 8 公斤/厘米², 现在把它装在容积是 1 升的爆破筒里点燃, 问生成的气体在温度升高到 2600 K 爆炸时压强多大?

第三节 液体的表面现象

一、液体的表面张力

如果把一根细针轻放在水面上, 它就会停在水面上而不下沉; 夏天的一些小昆虫也会在河面上走动而不下沉。这些现象都表明液体的表面就好比是一层张紧着的弹性薄膜。图 7.6 是一个由铅丝弯成的方框, 其中有一边是可以上下滑动的。把它放在肥皂水里浸一浸, 框上就布满了肥皂液膜。这时如把可滑动的一边轻轻往下拉, 等手一松, 它就会往上缩, 表明肥皂液膜表面在收缩。通常把这种存在于液体表面使表面收缩的力叫做液体的表面张力。正是由于表面张力的作用, 液体表面才具有收缩到尽可能小的趋势, 才能保持象一层

张紧着的弹性薄膜。

液体的表面张力是怎样形成的呢？用分子运动论来解释，这是由液体表面层里的分子所处的特殊情况所引起的。从图 7.7 可以看到，位于液体内部的分子 A 的周围都有其他液体分子包围着，它们对分子 A 的引力可以相互平衡；而位于液体表面层的分子 B 、 C ，由于上方完全没有或者一部分没有液体分子，因此周围液体分子对分子 B 、 C 的引力就不能相互平衡，

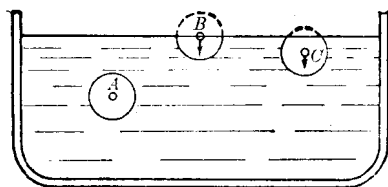


图 7.7 液体表面层里的分子

它们的合力与液面垂直而指向液体内部。所以位于液体表面层里的分子都要受到一个指向液体内部的力的作用。凡是从液体内部移动到表面层上来的分子，都必须克服这个力的作用而作功，这就好比离开地面上抛的石块要克服重力而作功一样。因而液体表面层里的分子就象上抛的石块要下落一样，有向液体内部移动的趋势。这就是液体表面张力的形成原因。

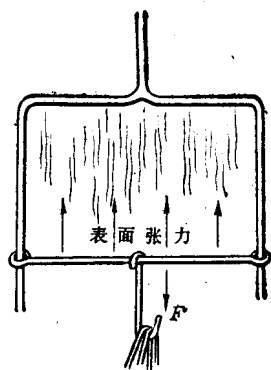


图 7.6 肥皂液膜的收缩

它们

二、浸润和不浸润现象

为什么打在玻璃窗上的雨水会附着在玻璃上而荷叶上的露珠却并不附着在荷叶上呢？原来当液体和固体接触时，可以产生两种不同的现象。把水或酒精滴在玻璃板上，就向四面散开而附着在玻璃板上。这就叫做浸润现象（图 7.8a），表

示水或酒精能浸润玻璃，即水和酒精是玻璃的浸润液体。把水银滴在玻璃板上，就收缩成椭球形，可以滚动而并不附着在玻璃板上。这就叫做不浸润现象(图 7.8b)，表示水银不能浸润玻璃，即水银是玻璃的不浸润液体。然而液体是否能浸润固体，这不仅与液体本身的性质有关，而与所接触的固体的性质也有关系。水银虽然不能浸润玻璃，却能浸润铜、铁、锡等金属。

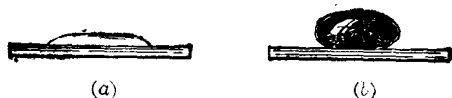


图 7.8 浸润和不浸润现象

浸润和不浸润现象是怎样形成的呢？用分子运动论来解释，这是由与固体接触面附近的液体分子所处的特殊情况所决定的。这些液体分子不仅受到液体内部其他分子对它们的引力作用(叫做内聚力)；同时还受到固体分子对它们的引力作用(叫做附着力)。如果固体分子与液体分子间的附着力大于液体分子间的内聚力，就会产生浸润现象，表明液体能浸润这种固体；反过来，如果附着力小于内聚力，就会产生不浸润现象，表明液体不能浸润这种固体。水银分子间的内聚力大于玻璃分子对水银分子的附着力，因而水银不能浸润玻璃而收缩成球形。

正是由于这个原因，在容器里的液体，如果能浸润器壁，在容器内壁附近的液面就向上弯曲(图 7.9a)；如果不能浸润器壁，在容器内壁附近的液面就向下弯曲(图 7.9b)。容器内径愈小，液面弯曲程度就愈显著。因此在细管里，浸润液体的液面是凹形的弯月面，而不浸润液体的液面是凸形的弯月面。

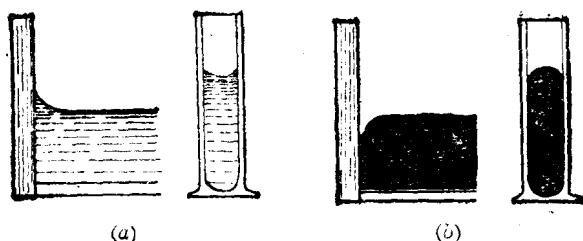


图 7.9 弯月面

三、毛细现象

在三秋季节种麦时,为什么刚下好麦种,总要用脚踏一踏或者用滚子把地面压紧呢?这就要从毛细现象说起。把几根内径在1毫米以下的细玻璃管插在水中,细管中的水面就比细管外的水面要高(图 7.10a);把这些细管插在水银里,细管中的水银面就比细管外的水银面要低(图 7.10b)。象这种细管内的液面能比细管外的液面高或低的现象就叫做毛细现象,能发生毛细现象的细管就叫做毛细管。从图中还可以看出,管子越细,毛细现象越显著。管子粗了,毛细现象就显不出来。

毛细现象是怎样形成的呢?这可以用液体表面张力的作用来解释。把毛细管插在浸润液体中,管内液面由于靠近管

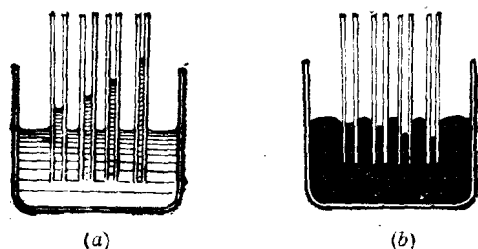


图 7.10 毛细现象

壁处的液面向上弯曲而形成凹形的弯月面，这样液体的表面就扩大了。由于液体表面具有收缩趋势，在表面张力的作用下液体表面就向上收缩而又成平面。同时由于附着力大于内聚力，靠近管壁的液面又向上弯曲，凹形的弯月面又形成了。于是在表面张力的作用下液面又一次向上收缩成平面。就是这样，细管内的液面逐渐上升，直到向上的表面张力与由于液面升高而形成的液柱的重量平衡时，液面才停止上升。

纸张、棉纱和海绵等物体中都有很多毛细管，把它们和浸润液体接触，液体就能沿毛细管渗进去。这就是为什么吸水纸能吸水、煤油炉里煤油能沿灯芯上升的原因。刚种好麦，用脚踏一踏，把地面压紧就可以在土壤中形成很多毛细管，使地下的水分沿毛细管上升来浸润麦种，促使种子及早发芽。如果想保存地下的水分，使它不能上升到地面而蒸发掉，就必须破坏土壤里的毛细管。大田里松土的作用就在于破坏土壤里的毛细管以保存农作物根部附近的水分。

习题 7.8 钢笔为什么不能在油纸上写字？

习题 7.9 在建筑房屋时，在地基上有时铺一层涂过煤焦油的厚纸(油毛毡)，否则房子就容易受潮。为什么？

习题 7.10 植物根部的养分为什么能升到植物上部？

习题 7.11 试运用液体的表面张力作用来解释不浸润液体的毛细现象。

第四节 固体的性质

一、晶 体

冬天在下雪时，仔细观察雪花，可以看到雪花是由许多小冰粒排列而成的，它们整齐地排列成各种有规则的六角形图案(图 7.11)。供食用的粗盐的颗粒也是有规则的立方体或八

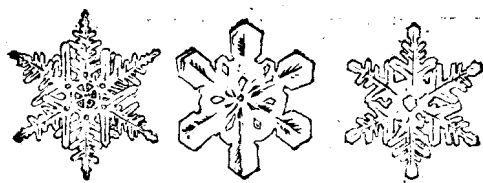


图 7.11 雪花

面体(图 7.12)。象这种在外表上具有一定的几何形状的固体叫做晶体。例如砂糖、石英、碳、云母、明矾等都是晶体。晶体上各个光洁的面叫做晶面。把一块食盐的小晶粒放在一杯极浓的盐水溶液中,几天之后,随着水分的蒸发,溶液里的盐分子就会沿着小晶粒结晶起来,越结越大。这样结晶而成的晶体叫做单晶体。

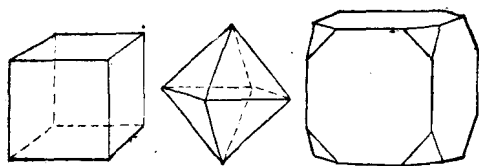


图 7.12 食盐的晶体

在外力作用下,单晶体很容易沿晶面裂开,而裂开后的晶面仍旧很光洁。例如通常用作绝缘体的云母片就是从层状的云母晶体上沿着晶面一层层剥开来的。但如果沿其他方向来撕就很难把它撕断。这表明单晶体在各个方向上的机械强度大不相同。单晶体的这种性质叫做各向异性,这是晶体最基本的特征。钟表里的钻石轴承就是利用红宝石晶体在某个特殊方向上的耐磨强度而制成的。单晶体的各向异性还表现在线胀系数、导热性、导电性的不同上。

为什么单晶体具有各向异性呢?这就要从晶体的微观结

构上去找原因。科学研究表明：组成晶体的微粒(分子、原子或离子)在空间按照一定规律,彼此相隔一定距离排列而成整齐的行列,这叫做空间点阵。图 7.13 就是食盐(氯化钠)的空间点阵的一部分,其中黑点表示带正电的钠离子、白点表示带负电的氯离子。它们之间的相互作用力叫做空间点阵的结合力。这种结合力就是促使晶体微粒排列成空间点阵的条件,而晶体的空间点阵就是它具有一定几何形状的根本原因。正是由于空间点阵,在不同方向上微粒排列的密度就不同,因此单晶体具有各向异性。

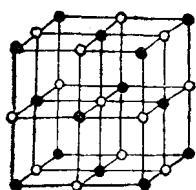
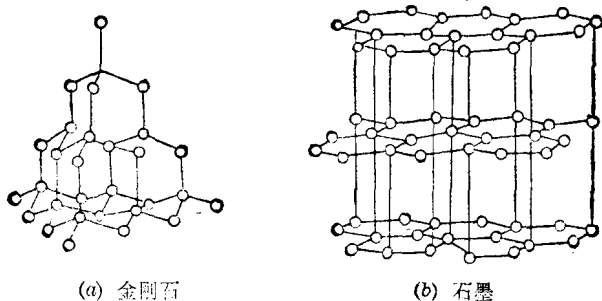


图 7.13 食盐的空间点阵

晶态物质的空间点阵结构不同,物理性质也不同。例如金刚石和石墨虽然都是由碳原子组成的,但由于空间点阵结构不同,它们的物理性质就大不相同(图 7.14)。金刚石很硬,可以用来划玻璃,制成各种磨具、钻具,而石墨却很软,可以用来做铅笔芯;石墨的熔点很高,可以制成能加热到 2000°C 的坩埚,而把金刚石加热到 700°C 就会燃烧起来。

有些晶体,象各种金属、岩石等,它们在外形上并没有一



(a) 金刚石

(b) 石墨

图 7.14 金刚石和石墨的空间点阵

定的几何形状。虽然这些晶体也是由许多小晶粒组成的，但由于这些小晶粒的排列，不象单晶体那么整齐，而是杂乱无章的，因此晶粒的各向异性就显不出来。象这种由许多排列杂乱的晶粒集合而成的晶体叫做多晶体。

此外，象玻璃、沥青（柏油）、橡胶、松香等固体，它们的分子的排列，没有一定的规律性，因而没有一定的几何形状，叫做非晶体。非晶体在各个方向上的物理性质都相同。

二、固体的弹性和塑性

我们已经知道，固体在外力作用下要产生形变，同时在固体内部就产生了企图恢复原状的弹力。这个弹力是怎样形成的呢？当起重机在工作时（图 7.15），它的各条钢丝绳的两端都受到大小相等而方向相反的拉力作用，从而产生拉伸形变；而在撑杆的两端要受到大小相等而方向相反的压力作用，从

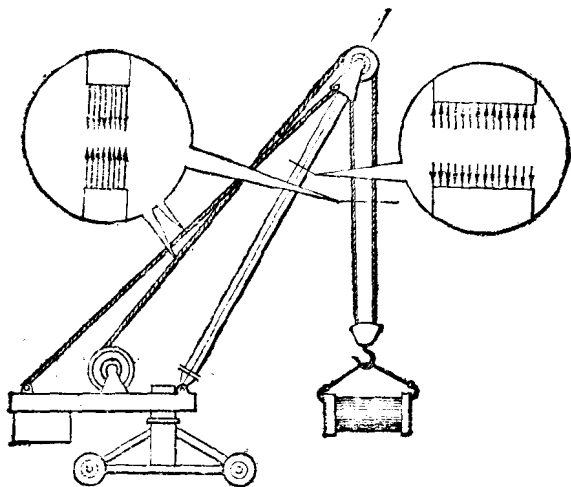


图 7.15 起重机工作时各部件所产生的形变

而产生压缩形变。很明显，拉伸形变增大了物质分子间的距离，分子间就显出了引力；压缩形变减小了物质分子间的距离，分子间就显出了斥力。固体的弹力就是它的分子间的这些附加引力或斥力引起的。外力撤除后，正是分子间的附加引力或斥力使固体的形变逐渐消失。象这种在外力撤除后能完全消失的形变叫做弹性形变，固体的这种性质就叫做弹性。

当固体发生形变时，由于在它所有的分子间都出现了附加引力或斥力，因此在它的每一个截面上都有弹力存在。通常把固体在单位截面积上产生的弹力叫做应力，用字母 σ^* 表示，即

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (7.5)$$

式中 F 是固体的弹力， A 是固体的截面积。当固体的形变保持一定时，弹力与外力相平衡，这时固体的应力就等于它所受外力的强度。同时我们假设固体的原来长度为 l_0 ，形变后的长度为 l ，那么 $\Delta l = l - l_0$ 就叫做固体的绝对伸长（或绝对缩短），而绝对伸长（或绝对缩短）与原来长度之比就叫做相对伸长（或相对缩短），简称应变，用字母 ε^{**} 表示，即

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}. \quad (7.6)$$

无数的实践都表明这样一条规律：在弹性限度以内，固体的应力是与应变成正比的。这条规律叫做弹性定律，又叫做虎克定律。用公式表示就是

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (7.7)$$

* σ 是希腊字母 Σ 的小写，读作“xi-ge-ma”。

** ε 是希腊字母，读作“ai-pu-xi-lang”。

式中的比例系数 E 叫做弹性模量。它的大小决定于各种物质的性质。表 7.2 列出了几种常用材料的弹性模量。在习惯上, 弹性模量的单位, 和应力的单位一样, 用公斤/毫米² 表示。

表 7.2 几种常用材料的弹性模量

(单位: 公斤/毫米²)

材 料	弹 性 模 量	材 料	弹 性 模 量
合 金 钢	$2.1 \sim 2.2 \times 10^4$	铝 合 金	0.72×10^4
碳 钢	$2 \sim 2.1 \times 10^4$	木材(顺纹)	$0.1 \sim 0.12 \times 10^4$
熟 铁	2×10^4	木材(横纹)	$0.005 \sim 0.01 \times 10^4$
铸 铁	$0.75 \sim 1.6 \times 10^4$	混 凝 土	$0.1 \sim 0.3 \times 10^4$
铜 合 金	$0.7 \sim 1.3 \times 10^4$		

[例题 7.3] 把长 1.8 米、直径 0.5 毫米的铁丝上端固定, 下端悬挂 1.5 公斤重物。若铁丝本身重量忽略不计, 问它这时伸长多少?(假设铁的弹性模量 $M = 2 \times 10^4$ 公斤/毫米²)。

解: 由于铁丝所受外力 $F = 1.5$ 公斤, 截面积 $A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} \times (0.5)^2$ 毫米², 这时铁丝内部的弹力与外力平衡, 即 $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1.5}{0.393} = 3.82$ 公斤/毫米²。再根据弹性定律公式 (7.7) 可知 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{3.82}{20000} = 0.000191$, 可见铁丝的绝对伸长

$$\Delta l = \varepsilon l_0 = 0.000191 \times 1800 = 0.3438 \text{ 毫米。}$$

如果应力超过了固体的弹性限度, 那么在外力撤除后, 固体就不能恢复原状, 这时保留下来的永久形变叫做塑性形变, 固体的这种性质就叫做塑性。各种金属的塑性的大小是决定它是否能作为压力加工材料的主要因素。例如生铁的塑性较

小,在受力作用后很容易发生断裂,叫做脆性材料;而铝具有较大的塑性,叫做塑性材料,因此可以用来冲压而制成铝锅等器具。

一般说来,任何固体都具有弹性和塑性,只是它们的弹性限度大小不同罢了。在一定条件下,固体的弹性和塑性还能相互转化。例如在常温下弹性很大的钢材,当温度升高到 1000°C 以上时,就转化成塑性很大的钢材了。

材料在断裂前所能承受的最大压强叫做材料的极限强度,用字母 $s_{\text{限}}$ 表示。表7.3列出了几种常用材料的极限强度。根据表上的数据,只要掌握了某一构件的材料和截面积,即可推算出它所能承受的最大拉力和最大压力。但在实际使用材料时,为了安全起见,必须使材料所产生的实际应力远小

表 7.3 几种常用材料的极限强度和屈服强度

(单位: 公斤/毫米²)

材 料	极 限 强 度		屈 服 强 度	
	抗 拉	抗 压	抗 拉	抗 压
铸 铁	10~22	37~88	—	—
低 碳 钢	50	40	25~30	25~30
高 碳 钢	95	67	36	36
强 铝	40~45	—	33	—
合 金 钢	75~150	—	50~120	—
木材(顺纹)	8	4	—	—
木材(横纹)	—	0.5	—	—
砖	0.2	0.6	—	—
混 凝 土	0.05~0.2	0.5~5	—	—

于它的极限强度。通常把材料在安全使用时所允许产生的最大应力叫做材料的许用应力,用字母 $\sigma_{\text{用}}$ 表示。象生铁、砖等脆性材料的许用应力只是它的极限强度的几分之一。即

$$\sigma_{\text{用}} = \frac{s_{\text{限}}}{n}, \quad (7.8)$$

式中的 n 叫做脆性材料的安全系数。

对于象钢、铝、铜等塑性材料说来,由于在断裂前已出现显著的塑性形变,通常把塑性材料开始出现塑性形变时所产生的应力叫做屈服强度,用字母 $s_{\text{屈}}$ 表示。因此塑性材料的许用应力只是它的屈服强度的几分之一。即

$$\sigma_{\text{用}} = \frac{s_{\text{屈}}}{n_1}, \quad (7.9)$$

式中的 n_1 叫做塑性材料的安全系数。

安全系数通常是根椐材料的性能、构件所受负载的情况(是固定的、变化的还是带冲击性的)以及周围环境等具体情况取用的。如果取得过大就会浪费材料;如果取得过小就会发生事故。一般说来,脆性材料的安全系数 n 是在 4 与 8 之间;塑性材料的安全系数 n_1 是在 2 与 4 之间。如果构件的负载情况是变化的,安全系数要取得大些;带冲击性的就要取得更大些。

[例题 7.4] 已知钢丝绳的屈服强度 $s_{\text{屈}} = 30$ 公斤/毫米², 现在要用它来起吊重 2 吨的农机,问钢丝绳的截面积至少需要多大?

解: 根据钢丝绳的负载情况,取安全系数 $n_1 = 2$, 根据公式(7.9), 钢丝绳的许用应力

$$\sigma_{\text{用}} = \frac{s_{\text{屈}}}{n_1} = \frac{30}{2} = 15 \text{ 公斤/毫米}^2,$$

因此在起吊重量 $F=2$ 吨 $=2000$ 公斤时，钢丝绳的截面积至少是

$$A = \frac{F}{\sigma_{\text{许}}} = \frac{2000}{15} = 133 \text{ 毫米}^2 = 1.33 \text{ 厘米}^2。$$

三、材料的弯曲形变

我们在挑担时，扁担就要变弯。这是由于扁担两端和中间受力的方向不同所引起的，这种形变就叫做弯曲形变(图 7.16)。



图 7.16 弯曲形变

材料的弯曲形变可以看作是由拉伸形变和压缩形变所组成。当横梁在发生弯曲形变时(图 7.17)，靠凸面的部分是伸长而靠凹面的部分是缩短。可见在梁的中部一定有既不伸长又不缩短的一层，通常把不发生形变的这一层叫做中立层。中立层和中立层附近的材料由于形变微小而产生的弹力也很小，它们在承担外力上几乎不起作用；而离中立层较远的材料由于形变较大而产生的弹力也较大，在承担外力上它们起着主要作用。根据劳动人民长期积累的生产经验，把横梁中立

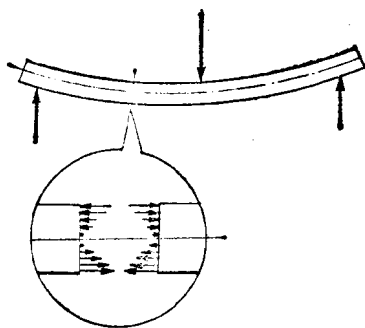


图 7.17 中立层

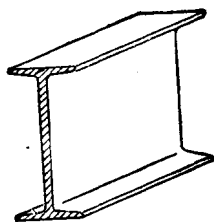


图 7.18 工字梁

层附近的材料除去，对横梁的抗弯能力影响极小。因此目前基建上用的钢梁以及钢筋混凝土梁的截面都是工字形的，叫做工字梁（图 7.18）。它的抗弯能力并不比实心的横梁差，但材料可以节省，还可以减轻横梁本身的重量。此外象空心管的抗弯能力要比材料、体积、长度都一样的实心棒的更强些，也是同样的原因。

习题 7.12 长 10 米、截面积为 0.75 毫米^2 的金属丝，在受到 10 公斤的拉力时伸长 1 厘米。求这种金属材料的弹性模量。

习题 7.13 一根生铁杆件，要承受 8000 公斤的压力，如取安全系数 $n=6$ ，问它的截面积至少需要多大？（设生铁的抗压极限强度为 80 公斤/毫米²）

第五节 物 态 变 化

物质分子可以聚集成固、液、气三种状态，叫做物质的三态。在一定的压强与温度下，物态又可以相互转化，叫做物态变化。在生产和生活实践中到处可以看到物态变化的例子。在蒸汽锅炉里，水在不断地化为蒸汽；在深秋季节，大气中的

水汽夜间在地面上凝成露、霜,甚至会使农作物遭受损伤。下面就来讨论物态变化的基本规律。

一、熔解和凝固

在严寒的积雪天,用脸盆从室外盛一团雪到温暖的室内来,并把温度计插入雪球。仔细观察就会发现,随着雪球的不断吸热,温度是在缓慢上升。但是等上升到 0°C 时,雪球的温度就不再继续上升而开始熔化。再经过一段吸热时间直到这团雪球全部熔化成 0°C 的水之后,温度才继续上升。反过来,把一碗水放在雪地里,情况也一样。随着水的不断向四周放热,等温度下降到 0°C 时才开始结冰。这时水虽然继续向四周放热,但温度保持不变,直到水全部结成 0°C 的冰以后,温度才继续下降。通常把物质从固态转变为液态的过程叫做熔解;而把物质从液态转变为固态的过程叫做凝固。从上述冰、水的熔解和凝固可以得出一般晶态物质的一条规律:晶态物质在熔解或凝固中,液态和固态共存,温度保持不变。这个温度就叫做晶态物质的熔点或凝固点。钨、钼、钽等金属的熔点很高,可达摄氏二、三千度,是耐高温的好材料。合金的熔点要比它所含的各种纯金属的熔点都低。在工业上常用这种方法制成熔点只有 200°C 左右的镉、锡、铅、铋合金,作为电路中的保险丝。其他几种常用金属材料,如铁、铜、铝在1个大气压下,熔点分别为 1525°C 、 1073°C 、 658°C 。

既然晶体在熔解中,温度保持不变,那么为什么还需要吸收热量呢?因为晶体的分子是按一定规律排列成空间点阵的。在熔解前,晶体所获得的热量,主要转变为分子的动能,使温度升高。熔解开始后,分子的动能变化很小,因而温度保持不变;而外界继续传递给晶体的热量,只用来增大分子的势

能* 以克服空间点阵的束缚,使分子间距离增大,空间点阵破坏而呈现液态。

相反,晶态物质在凝固中,分子由杂乱状态排列成空间点阵。由于分子间距离的缩短,分子的势能逐渐减小而动能变化很小,因此这时晶态物质向四周放出的热量只来源于分子势能的减小,而温度保持不变。

实验表明,任何物质在熔解(或凝固)中所吸收(或放出)的热量是和它的质量成正比的。通常把单位质量的物质在熔点时,由固态完全转变成液态所吸收的热量叫做这种物质的熔解热,通常用字母 λ 表示。设 m 为物质的质量, Q 为熔解时所吸收的总热量,那么

$$Q = \lambda m, \quad (7.10)$$

式中熔解热 λ 的单位是千卡/公斤或卡/克。反过来,单位质量的物质在凝固时放出的热量就等于它的熔解热。几种常见的晶体如食盐、冰、铝、铜,其熔解热分别为124、80、92、42卡/克。

【例题7.5】在 0°C 的冰上放一块质量为200克、温度为 100°C 的铜砝码,测得当砝码温度降低到 0°C 时,冰已熔化22.4克。计算冰的熔解热。

解:在不考虑其他热交换的情况下根据热平衡方程,铜砝码放出的热量 Q_1 和冰吸收的热量 Q_2 数量相等,即

$$Q_1 + Q_2 = 0。$$

假设冰的熔解热为 λ 卡/克,质量为 m_2 克,那么冰所吸收的热量 $Q_2 = \lambda m_2$ 。而铜砝码所放出的热量 $Q_1 = c_{\text{铜}} m_1 (t - t_0)$ 。于是可以列出

* 详见本书第八章第二节。

$$Q_1 + Q_2 = c_{\text{冰}} m_1 (t - t_0) + \lambda m_2 = 0,$$

$$0.09 \times 200 (0 - 100) + 22.4 \lambda = 0.$$

所以冰的熔解热

$$\lambda = \frac{1800}{22.4} = 80.3 \text{ 卡/克}.$$

大多数晶体都是熔解时体积增大，凝固时体积减小的。但是也有少数晶体，如冰、铸铁、锑等情况恰恰相反，它们在凝固时体积增大，而熔解时体积减小。因此在冬天，露天的水缸里的水要倒净，否则缸内的水凝固成冰时会把水缸胀裂。越冬作物要防止霜冻，也就是因为作物体内的水分凝固成冰时体积要增大，会把细胞胀裂而造成作物死亡。通常把含碳量较高（达2~4%）的生铁叫做铸铁就是因为它非常适合于用来浇铸器件。把铁水浇满砂模后，凝固时体积再增大，使砂模的极细致部分也都充满生铁，从而保证铸件与模型完全一致。

在大雪天，为什么车马来往频繁的路面上的积雪熔化得比较早呢？原来晶体的熔点并不是固定不变的，而要随着外界的压强而改变。大多数晶体由于熔解时体积要增大，而外界压强的增大却阻碍了它体积的增大，因而它的熔点要随着外界的压强增大而升高。但是少数熔解时体积要缩小的晶体如冰雪、铸铁、锑等，由于外界压强的增大有助于它体积的缩小，因此它们的熔点要随着外界压强的增大而降低。路面上的积雪熔化得早，除了由于车轮与路面摩擦而生热的缘故外，还因为在车轮的挤压下雪的熔点降低了。

对于非晶体（如玻璃、松香、沥青等）说来，情况与晶体完全不同。它们在受热时逐渐变软，粘滞性逐渐减小，最后成为液态，并没有一定的熔点。这是因为非晶体的结构不象晶

体那样有规则。外界传递给它的热量主要都转变为分子的动能,因此在任何情况下只要吸收热量,温度就升高。同样,非晶体的液态物质在冷却时,粘滞性逐渐增大,最后凝固成非晶体,也没有一定的凝固温度,也不放出熔解热。所以一般说来,非晶体分子所具有的势能要比晶体的多些,这就是非晶体不象晶体那样稳定的原因。

二、蒸发 饱和汽

用湿布擦过的桌面很快就会干;洗好的湿衣服晾在阳光下也会逐渐变干;一瓶汽油或酒精如果瓶塞没有盖紧很快就会显著减少;水烧到 100°C , 整壶水都沸腾起来。这些都是液体变成气体的例子。通常把物质从液态转变为气态的过程叫做汽化。汽化有两种方式:一种是在任何温度下发生在液体表面的叫做蒸发;另一种是在一定温度下在液体内部和表面同时发生的叫做沸腾。

为什么液体表面在任何温度下都在进行汽化呢?用分子运动论来解释,蒸发就是液体分子飞出液面而成为气体分子的过程。然而液体分子要离开液面必然会受到表面层分子的阻碍。但在任何温度下总有一些动能比较大的分子能挣脱表面层分子的引力飞出液面而成为汽分子。

实践表明:液体的温度越高,液面越大,就蒸发得越快。此外在相同的外界条件下,不同的物质蒸发的快慢程度也不同。例如酒精就比水银蒸发得快得多。因为水银分子间的引力较大,它要飞出液面就必须具有较大的动能。

为什么我们在淋了雨之后,不把湿衣服换掉就容易着冷呢?因为液体在蒸发时,飞出液面的分子都是动能较大的分子,这样剩下的液体的分子平均动能就要减小,温度就要下

降,从而向周围吸收热量。穿着湿衣服,水分在蒸发时就要从人体上吸收热量,这就是容易着冷的原因。医生在注射前总要在你手臂上擦些酒精来消毒,这时你就会感觉到冷,也是因为酒精在蒸发时带走了热量的缘故。外科医生在施行小手术时,往往用一种蒸发得很快液体——氯乙烷来做麻醉剂,使病人的皮肤冷却到失去疼痛感觉的程度。

必须指出:在某些固态物质的表面,也会产生类似蒸发的现象。例如冬天晾在外面的湿衣服,虽已冻结成冰,但衣服也会干,这就表明即使固体分子只要具有足够的动能,也能挣脱其他分子的吸引,飞出固体表面而成为汽分子。物质从固态直接转变为气态的过程叫做升华。衣箱里的樟脑丸,放久了颗粒会变小,同时在箱内可以闻到浓厚的气味,说明樟脑升华了。

虽然汽油、酒精很容易蒸发,但如果把它装在密闭容器里,为什么就不会完全蒸发掉呢?原来在密闭容器里,从液面蒸发出去的分子,由于不能扩散掉,经过相互间以及与器壁的碰撞,其中一部分又飞回到液体中来。所以在密闭容器内的液面上总是同时存在着这样两个相互对立的矛盾过程。起初,当液面上方的汽的密度较小时,在同一时间内离开液面的分子数要比回到液体里来的分子数大,这时蒸发是矛盾的主要方面。随着离开液面的分子的增多,液面上方的汽分子密度增大了,回到液体里来的分子也要增多,最后总会达到这样的状态,就是在同一时间内离开液面的分子数恰好等于回到液体里来的分子数。从这时起,液面上方的汽分子密度就不再改变,液体也不会减少,汽和液体之间就达到了动态平衡(图 7.19)。或者说液面上的汽达到了饱和状态。和液体处于动态平衡的汽叫做饱和汽;饱和汽的压强叫做饱和汽压,用字

母 p_s 表示。液体和它的饱和汽的动态平衡也与其他平衡状态一样,是暂时的。随着外界条件的变化,平衡就会遭到破坏,而被新的动态平衡所代替,出现新的饱和状态。这时饱和汽压也随着有所改变。



图 7.19 密闭容器里液面上的动态平衡

实验表明,在相同的温度下,不同液体的饱和汽压也不同。对于任何一种液体说来,它的饱和汽压只是和温度有关,而和它的体积大小没有关系。表 7.4 列出了在不同温度下水的饱和汽压;图 7.20 画出了表示水的饱和汽压随温度变化的图线。图线表明,水的饱和汽压随温度的升高而增大,但并不是

表 7.4 不同温度下水的饱和汽压表

(单位: 千)

$t(^{\circ}\text{C})$	p_s	$t(^{\circ}\text{C})$	p_s	$t(^{\circ}\text{C})$	p_s	$t(^{\circ}\text{C})$	p_s
-17	1.03	-1	4.22	15	12.79	31	33.70
-16	1.13	0	4.58	16	13.63	32	35.66
-15	1.24	1	4.93	17	14.53	33	37.73
-14	1.36	2	5.29	18	15.48	34	39.90
-13	1.49	3	5.69	19	16.48	35	42.18
-12	1.63	4	6.10	20	17.54	36	44.56
-11	1.78	5	6.54	21	18.65	37	47.07
-10	1.95	6	7.01	22	19.83	38	49.69
-9	2.13	7	7.51	23	21.07	39	52.44
-8	2.32	8	8.05	24	22.38	40	55.32
-7	2.53	9	8.61	25	23.76	50	92.5
-6	2.76	10	9.21	26	25.21	60	149.4
-5	3.01	11	9.84	27	26.74	70	233.7
-4	3.28	12	10.52	28	28.35	80	355.1
-3	3.57	13	11.23	29	30.04	90	525.8
-2	3.88	14	11.99	30	31.82	100	760.0

简单的正比关系,它是一条曲线。这是因为温度升高时,不仅

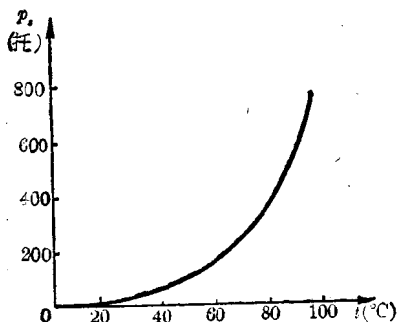


图 7.20 水的饱和汽压和温度的关系

饱和汽分子的平均动能增大了;而且随着液体分子平均动能的增大,从液面飞出的分子数也增多了,即饱和汽分子的密度也增大了。所以饱和汽压随温度增大得很快。

为什么饱和汽压只跟温度有关而与体积无关呢?因为在一定温度下,饱和汽的密度总是一定的。如果饱和汽的体积增大了,液面下的分子就飞出来补充;如果饱和汽的体积减小了,就有一部分分子飞回液面去。同时液面上动态平衡的条件依然存在。所以不论饱和汽的体积如何改变,并不会影响饱和汽压。

没有达到饱和状态的汽,叫做未饱和汽。它的密度比同温度下的饱和汽的密度小,因此在同一温度下,未饱和汽压要比饱和汽压小。所以要使未饱和汽转变为饱和汽的方法不外乎减小它的体积以增大汽压,或者降低它的温度,使它的汽压接近于饱和汽压。

如果降低饱和汽的温度,或者减小它的体积以增大汽压,饱和汽就逐步凝结成液态(水)。天上的云、地面上的雾就是大气中的饱和水汽遇冷凝结而成的。

三、沸 腾

把一壶水烧到 100°C 时,不仅在水面;而且在水的内部也要发生剧烈的汽化,形成一串串大汽泡,靠水对它的浮力作用

上升到水面后,汽泡破裂,就把水汽释放出来(图 7.21),这就是水的沸腾现象。沸腾是在一定温度下在液体表面和内部同时发生的汽化现象,这个一定的温度就叫做沸点。

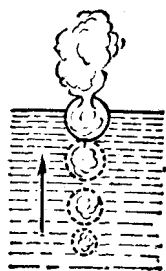


图 7.21 水的沸腾现象

为什么水要烧到 100°C 时才会沸腾呢?原来一串串的汽泡是在水壶底部或器壁附近形成的。汽泡内的气体主要是水的饱和汽。当水温较低时,汽泡里的饱和汽压也较小,而汽泡周围水的压强略高于大气压,大大超过汽泡内的饱和汽压,因此这时不会形成大汽泡。

随着水温的升高,蒸发加快了,汽泡里的饱和汽压也增大了。当水温升高到 100°C 时,从表 7.4 可以查得这时饱和汽压等于 760 托,即相当于水面外的压强(大气压)。于是周围的水迅速向汽泡内汽化,形成了大汽泡,并在浮力作用下很快上升,就出现了沸腾。由此可见只有当液体的饱和汽压和外部压强相等时,液体内部才会发生沸腾,而沸点就是液体的饱和汽压等于外部压强时的温度。

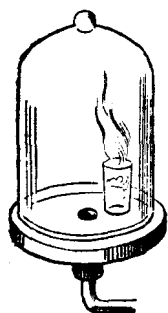


图 7.22 沸点随外部压强的减小而降低

掌握了沸腾的这个规律,就可以通过改变外部压强的方法来改变液体的沸点。例如把一杯温度只有 90°C 的热水放在接有抽气机的玻璃罩内(图 7.22),如果用抽气机把罩内空气抽到压强等于 525.8 托时,杯里的水就沸腾起来。这是因为 90°C 的水的饱和汽压就等于 525.8 托。高原地区由于气压较低,在敞开的铝锅里水的沸点低于 100°C ,饭不容易煮熟,因此在烧饭时,必须把锅盖盖紧,通过增大锅内的汽压来提高沸点。蒸

汽锅炉里水面上蒸汽的压强很高,可达 15 个大气压,因而锅炉里水的沸点可接近 200°C 。通常我们把液体在标准大气压下的沸点叫做正常沸点。不同液体的正常沸点都不同,例如酒精的正常沸点是 78°C ,而乙醚的是 35°C 。

液体在沸腾时,虽然继续吸收热量,但温度并不升高,直到液体全部汽化为汽之后,温度才继续开始上升。这表明液体在汽化时所吸收的热量主要是转变为分子的势能,用来挣脱其他分子对它的阻碍。在一定温度下,单位质量的液体转变为同温度的汽所吸收的热量叫做汽化热,通常用字母 L 表示。设 m 为液体的质量, Q 为汽化成同温度的汽所吸收的总热量,那么

$$Q = Lm, \quad (7.11)$$

式中汽化热 L 的单位是千卡/公斤或卡/克。反过来,单位质量的汽转变为同温度的液体所放出的热量和同温度下的汽化热相等。

实验表明:不仅各种液体在相同的条件下具有的汽化热是不同的,即使是同一种液体在不同温度下的汽化热也不相同,它随着温度的升高而减小。表 7.5 列出了几种液体在正常沸点下的汽化热;表 7.6 列出了水在不同温度下的汽化热。

表 7.5 几种液体在正常沸点时的汽化热

液 体	正常沸点 ($^{\circ}\text{C}$)	汽 化 热 (卡/克)	液 体	正常沸点 ($^{\circ}\text{C}$)	汽 化 热 (卡/克)
水	100	539	乙 醚	35	81
酒 精	78	204	液态氨	-33	327
水 银	357	69	液态氧	-252.5	108

表 7.6 水在不同温度下的汽化热

温 度 (°C)	0	50	100	150	200	250	300	374.2
汽 化 热 (卡/克)	595	568	539	506	468	408	330	0

必须指出,液体不仅在沸腾时要吸收汽化热,在蒸发时也要吸收汽化热。它们的区别在于沸腾时汽化热是由外界供给的,因此温度并不降低;而蒸发时汽化热是消耗液体本身的内能*而获得的,因此温度必然要降低。

因为水的汽化热很大,所以应用很广泛。例如大的食堂利用锅炉蒸汽来蒸饭、蒸菜;手扶拖拉机的冷却系统就是利用水在沸腾时吸收汽化热的办法来散热的。

四、气体的液化

物质从气态转变为液态的过程叫做液化,或称凝结。要想把气体液化,首先必须把它转变为饱和汽,这个过程实际上就是把未饱和汽转变成饱和汽的过程。具体的方法不外乎增大压强或降低温度。

然而早在一百多年前,人们就发现任何气体都有一个特殊的温度,在这个温度以上,无论增加多大的压强也不会使它饱和或者液化,这个温度叫做临界温度。例如水的临界温度为 374.2°C ,这就是说当温度大于 374.2°C 时,只有水气存在。要液化 374.2°C 以上的水气,必须先把它的温度降低到 374.2°C 以下,再增大它的压强才行。要液化临界温度的气体所加的最低压强叫做临界压强。在临界温度和临界压强下的状态叫做临界状态。在临界状态下,同一物质的液态和气态密度相

* 详见本书第八章第二节。

等,因此这时的液态和气态已经没有什么区别了。

临界温度以上的气态物质由于不能直接液化,通常叫做气;临界温度以下的气态物质叫做汽。

物质不同,临界状态也不同。表7.7列出了几种物质的临界温度和临界压强。从表上可以看出有些气体的临界温度非常低。对于这些气体的液化,关键就在于低温的获得。近年来由于低温技术的不断完善,我们不但能使一切气体液化,而且还能使它们变成固体。

表 7.7 几种物质的临界温度和临界压强

物 质	水	乙醚	二氧化碳	氧	氮	氢	氦
临界温度 (°C)	374.2	193.8	31.1	-118.8	-147.1	-239.9	-268.0
临界压强 (大气压)	218.2	35.0	73.0	49.7	35.0	12.8	2.3

五、大气的湿度 露点

大气是由80%的氮气、18%的氧气和一小部分二氧化碳、水汽以及其他气体混合而成的。由于各组成气体的相互渗透,它们相互间的比例总是固定不变的,但水汽要例外。随着水的不断蒸发,来自海洋或潮湿地带的气流含有较多的水汽,而来自大陆或干燥地带的气流,水汽的含量就较少。地面水分的蒸发和凝结是吸热和放热的过程,对大气的温度影响很大,同时一定温度下大气中水汽含量的多少对农作物的生长、工业生产以及人们生活各方面都有着密切的关系。例如空气太干燥,农作物容易枯萎,纺纱厂里棉纱容易断;空气太潮湿,会推迟农作物的成熟时间,影响产量,纺纱厂里棉

纱要发霉。

大气的干湿程度,通常用大气中水汽的密度,即每立方米大气中所含水汽的克数来表示,叫做大气的绝对湿度。但是要直接测定大气中水汽的密度比较复杂,而实践和理论表明:在一般气温下,1米³大气中所含水汽的克数与大气中水汽压强的水银柱高度毫米数(托数)十分相近。因此通常可用大气中水汽的压强来表示绝对湿度,用字母 H 表示,单位是托。

然而在许多与大气湿度有关的现象里,如蒸发的快慢等,并不只是与大气中所含水汽的绝对数量有关,还要看大气的温度,主要是与大气中水汽离饱和状态的远近程度有关。例如初夏的中午气温较高,假如有 28°C,而大气的绝对湿度 H 为 12 托,这时人们就会感到干燥,从查表 7.4 可知 28°C 时水的饱和汽压为 28.35 托,说明这时绝对湿度离饱和状态较远。到了夜晚假如气温降低到 19°C,如果大气的绝对湿度没有改变,这时人们却会感到潮湿,因为在 17°C 时水的饱和汽压为 14.53 托,这样的绝对湿度离饱和状态较近。因此通常把大气的绝对湿度与同温度下水的饱和汽压的百分比叫做当时大气的相对湿度,用字母 B 表示。即

$$B = \frac{H}{p_s} \times 100\%, \quad (7.12)$$

式中 p_s 就是同温度下水的饱和汽压,可从表 7.4 查出。在上述的例子中:

$$B_1 = \frac{12}{28.35} \times 100\% = 42.3\%,$$

$$B_2 = \frac{12}{14.53} \times 100\% = 82.5\%.$$

一般说来,大气的相对湿度在 60~70% 范围内,人体水分蒸发正常,感觉舒适。农村养蚕也需要一定的温度和相对湿度。

在孵化和饲养期间，室内温度一般在 $25\sim 27^{\circ}\text{C}$ 之间，相对湿度在 $71\sim 79\%$ 之间，而在育小蚕的坑房里，相对湿度要高达 $85\sim 93\%$ 之间。因此通常在蚕室内都放有盛着黄沙的蚕匾，要经常黄沙上洒水以提高室内的相对湿度。

在大田里，白天由于太阳光的照射使地面温度升高，水分蒸发较快；到了夜间，又由于地面辐射热量而使接近地面的空气、树木、农作物、石块等温度降低。这样空气中原来的未饱和水汽就到达或接近了饱和状态。当饱和水汽接触到这些较冷物体时就凝结成水滴，叫做露。例如在三秋季节的清晨，棉田里往往露水很大。根据贫下中农的经验，露往往发生在天空无云而又无风的夜间。因为无风，从地面蒸发的水汽在空中不会被吹散，因而绝对湿度较大；天空无云，地面的热量就可以毫无阻挡地辐射出去，使地面温度降低得很快。

露水对农作物是有利的。在炎热的夏天，农作物在白天蒸发掉大量的水分，就要发生枯萎现象，在夜间出现的露水就能使农作物恢复生长力。

如果夜间地面以及作物的温度降低到 0°C 以下，那么当空气中的饱和水汽接触到冷的物体时，就不凝结成露而直接变成冰晶，叫做霜。结霜的天气条件和露一样，不同的只是温度在 0°C 以下。如果夜间温度降低得很慢，空气中的水汽就先凝结成露，当温度继续降低到 0°C 以下时，露再凝固成霜。

所谓“霜冻”，原来是指农作物在结霜时所受的冻害，其实农作物并不一定要在结霜时才受冻害，只要地面的气温突然降低就会受害。因此通常把地面空气温度突然降低的现象统称为霜冻。霜冻的危害程度不仅决定于霜冻本身的性质，而且还与地形、土壤性质以及农作物的种类都有关系。一般说来，霜冻的危害性对低地较高地为大，对空气不流畅的低地或

盆地危害更大，对密植作物的危害较稀植作物更为严重。

从以上的分析可以看出露、霜的形成与大气中的相对湿度有着密切的关系。那么大气中的绝对湿度和相对湿度是怎样测定的呢？下面就来介绍一种最简单的间接测定空气的绝对湿度和相对湿度的方法，即通过露点的测定来得到。

什么叫做露点呢？露点就是能使空气里原来所含的未饱和水汽变成饱和水汽的温度。或者说，当空气的温度降低到露点时，空气里原来所含的未饱和水汽就到达了饱和状态。只要能测出露点，就可以求出空气的绝对湿度，从而把相对湿度找出来。露点湿度计就是利用这一原理制成的。它的构造很简单，完全可以自制。在一

只玻璃杯里装少量的乙醚（图 7.23），杯盖上有三个孔：一个用来插温度计；另外两个分别插两根弯曲的玻璃管，下端伸到液面下的那根与打气球相连，是往里面打气用的，另一根

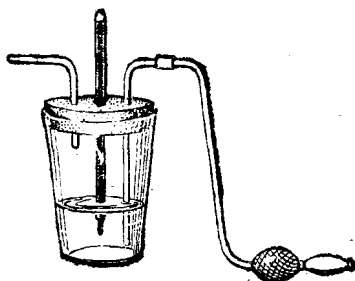


图 7.23 露点湿度计

是要用来出气的。如果要测定田间的露点，就把它带到田间，用手不断挤压打气球向杯里打气，使乙醚迅速蒸发，从而使杯内温度不断下降。当杯内温度降低到一定程度，周围空气里的未饱和水汽接触到冷玻璃就在杯壁上凝结出一层薄薄的露珠来，表明未饱和水汽温度降低到冷玻璃杯的温度时就成了饱和汽，可见这时冷玻璃杯的温度就是当时空气的露点。因此当我们发现杯壁上出现露珠时，就立刻观察温度计记下读数，同时在停止打气后，杯内温度由于受周围的影响而要回升，等杯壁上的露珠因蒸发而完全消失时，再观察温度计记下读数。这两次温度计读数的平

均值就是要测定的田间空气的露点。从表 7.4 查出这个露点时的饱和水汽压,就是当时的绝对湿度,再求出它与当时温度下饱和水汽压的百分比,就是当时田间空气的相对湿度。

[例题 7.6] 公社气象站的同志在气温 20°C 时测得露点为 12°C , 求测定地点大气的绝对湿度和相对湿度。

解: 先从表 7.4 查出露点 12°C 时的饱和水汽压, 从而找出测定地点大气的绝对湿度 $H=10.52$ 托。再从表 7.4 查出实际气温 20°C 时的饱和水汽压 $p_s=17.54$ 托。所以测定地点大气的相对湿度

$$B = \frac{H}{p_s} \times 100\% = \frac{10.52}{17.54} \times 100\% \approx 60\%。$$

露点的测定很重要。掌握了露点可以预料夜间有无霜冻出现。及早采取预防措施。

[例题 7.7] 白天气温为 0°C , 测得大气的相对湿度为 70%, 如果夜间地温降到 -5°C , 问是否会有霜冻出现?

解: 从表 7.4 查得 -5°C 时饱和水汽压为 3.01 托, 只要大气里的绝对湿度, 即大气里所含水汽的实际压强 $H < 3.01$ 托, 就不会出现霜冻。今已知 $B=70\%$, 查表知 0°C 时 $p_s=4.58$ 托, 因此由公式(7.12)知

$$H = Bp_s = 70\% \times 4.58 = 3.21 \text{ 托。}$$

可见如果夜间地温降到 -5°C , 霜冻一定会出现。

为了保护农作物免受霜冻的侵袭, 常用的防御措施是:

(1) 烟熏法

把略为潮湿的草皮、茎秆、牛马粪聚集成柴堆, 放在上风头。点燃之后, 放出大量烟气, 不仅可以加热空气, 而且还可以使烟气笼罩在农作物的上空。这样地面的辐射热就被烟气所吸收而不会随空气扩散开去。此外大气中水汽凝结在烟气

分子上又能放出汽化热，因此农作物周围大气的温度就不会降低过多，霜冻即可避免。

(2) 灌水法

霜冻前往地里灌水，由于潮湿的土壤热容量较大，所以地温就不容易降低。同时在灌水后，即使地面有少量的水分蒸发成水汽，它还可以吸收地面的辐射热，当这些水汽在农作物上空凝结成雾或霜，也要有汽化热、溶解热释放出来，使地温不会继续降低过多，霜冻也就可以避免。

此外，对于小块试验田、果园等还可采用热水浇地或用塑料薄膜、草席覆盖等方法来避免霜冻。

六、云、雾、雨、雪的成因

我们知道，包围地球的大气有将近一千公里厚，它的密度随着离地面的高度而逐渐减小。根据在不同高度上的物理特性，大气可以分为对流层、平流层、中间层以及热层等四个层次。在各层之间并无固定的分界面，因为大气永远是处在运动状态之中，各层之间的空气是在不停地互相交换。对流层是最接近地面的一层，它的厚度约为8~18公里。在对流层中，大气的对流运动十分激烈，这主要因为对流层的大气温度的分布是随高度的增大而降低，每上升100米温度降低约0.6°C；从而就使大气中水分的循环运动都发生在对流层中。所以许多重要的天气现象都是集中在对流层里发生的。

正是由于对流层高空的温度较地面为低，当地面的未饱和水汽上升到高空时就会达到饱和而凝结成无数的细水滴。这些细水滴悬在高空就成为云，接近地面的就成为雾。所以云、雾与露、霜的成因，都是由于水汽冷却凝结而成的。

那么云又是怎样变成雨或雪的呢？在0°C以上的高空凝

结而成的细水滴形成的云叫做暖云；在 0°C 以下的高空凝固而成的小冰晶和过冷水滴形成的云叫做冷云。所谓过冷水滴就是指温度在凝固温度以下但由于缺少晶核还没有凝固成冰晶的水滴。科学研究表明，构成暖云的细水滴一定要和小冰晶结合起来才会下降成雨或雪。起初在冷云里的冰晶和过冷水滴体积很小，重量很轻，上升的气流使它们在高空中飘浮，不能下降，等它们的体积增大到足以反抗气流而向地面降落时，才会发生降雨或降雪的过程。水滴或冰晶体积增大的过程有两种方式：一种是水滴和冰晶随着气流上升或下降时，彼此碰撞而合并成较大的微粒；另一种是水汽分子从水滴不断向冰晶扩散。结果水滴的分子越来越少，而冰晶的分子越来越多，最后水滴消灭了而冰晶越来越大，终于变成了小雪花。雪花再吸收水汽而逐渐变大。当它的体积大到空气的浮力托不住它时就要下落。如果下面的温度在 0°C 以上，雪花下落时便溶解成水滴，降到地面便是雨；如果下面的温度也在 0°C 以下，雪花就不会溶解而一直降到地面便是雪。

适时的雨雪对农业生产帮助很大，而久旱不雨危害极大。经过人们的科学实践，目前已能做到在适宜的条件下实现人工降雨来与干旱作斗争。人工降雨的必要条件是天空有云。一般说来，空中有云而不降雨，原因是云里没有小冰晶。如果用人工的方法能在云中产生大量的冰晶，就可以实现人工降雨。常用的方法是用飞机或火箭将干冰（固态的二氧化碳）引入云中，就能使云降温而形成大量冰晶。

习题 7.14 为什么说冰和水的混合液的温度比较稳定，即使与外界有少量的热交换，温度也不会改变？

习题 7.15 把 40 克 -20°C 的冰投入 100 克 60°C 的水中，问冰是否会全部熔解？最后温度为几度？

习题 7.16 为什么说非晶体是一种处于不稳定状态的物质?

习题 7.17 制造铅弹时,把 50 公斤在凝固温度的液态铅一滴滴地滴在 25 公斤 20°C 的水中。当液态铅全部凝固成小铅弹时,水的温度将升高到几度? 已知铅的熔点为 327°C 、熔解热为 6 卡/克(可以不考虑容器的热容量以及其他热交换)。

习题 7.18 为什么冬天能看到呼吸时所呼出的“白气”,而夏天却看不到?

习题 7.19 气温在 10°C 时测得大气的相对湿度为 80%,如果不刮风,空气的绝对湿度不变,气温升高到 15°C 时,相对湿度多大?

复 习 题

习题 7.20 分子运动论是建立在哪些实验事实的基础上的? 根据分子运动论,气体、液体、固体的分子运动各有什么特点?

习题 7.21 在室温 27°C 时发现氧气瓶上压强计读数为 55 公斤/厘米²(表压),已知氧气瓶所能承受的最大压强是 60 公斤/厘米²,问温度升高到多大时氧气瓶就有爆炸的危险?

习题 7.22 把碎玻璃放在火上烧熔,原来尖的地方就会变圆,为什么?

习题 7.23 车轮在潮湿的地面上滚过之后,被车轮压过的地方会有水渗上来,为什么?

习题 7.24 用抗压极限强度为 60 公斤/厘米²的砖砌水塔,如果取安全系数为 10,水塔至多只能砌多高? 假设砖的比重为 1.8 克/厘米³。

习题 7.25 为什么把墨水写在纸上很快就变干,而放在瓶里墨水可以保存很久?

习题 7.26 为什么被 100°C 的蒸汽烫伤要比 100°C 的开水烫伤更为严重?

习题 7.27 某社办制糖厂要想用沸腾的方法来除去糖汁中的水分。为了不使糖烧焦,沸腾温度必须大大低于 100°C ,怎样才能做到?

习题 7.28 在很热的浴室里,地下的水为什么不容易变干?

习题 7.29 黄昏时的气温为 15°C ,相对湿度为 64%。如果夜间气温降低到 5°C ,是否会出现露?

第八章 热和功 热机

本章主要从能量观点出发, 来分析热和功的转化过程, 并讨论包括热现象在内的能量守恒与转化定律以及永动机的不现实性。然后再扼要介绍几种常见的热力发动机的工作原理。

第一节 热 功 当 量

一、热和功的转化

火车在运转中, 它所有的车轮都会发热, 尤其是在缺少润滑油的情况下, 由于摩擦而产生的热甚至可使轴承熔化, 因此必须经常检查。这表明物体在克服阻力作功的过程中, 一部分机械能就转变成热。

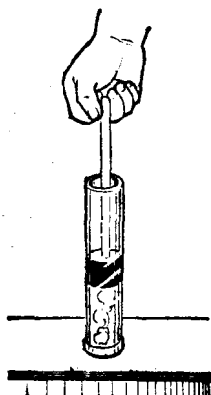


图 8.1 机械功转化成热的实验

不仅摩擦作功可以产生热, 用其他方法作功也可以产生热。可以作这样的实验: 在一个带活塞的厚壁玻璃筒内, 放少量在乙醚中浸过的棉花 (图 8.1)。如果把活塞很快地向筒底压下去, 棉花就会燃烧起来。这是因为活塞的移动压缩了筒内的空气作了功, 产生了热, 使空气的温度升高到乙醚的燃点, 棉花就燃烧

起来。

机械功可以转化成熟,那么热是否可以转化成机械功呢?水烧开时所生成的蒸汽可以把茶壶盖顶开就是明显的例子。现在工业上广泛应用的蒸汽机、内燃机、喷气发动机等都是靠燃料燃烧时所发出的大量的热而转化成机械功的。象这种可以不断把热转化成机械功的装置就叫做热机。由此可知:热和机械功在一定条件下是可以相互转化的。

二、热 功 当 量

早在一百多年前,人们为了改进蒸汽机,提高蒸汽机的效率,使它能消耗较少的燃料而作尽可能多的机械功,就很自然地提出了在热和功之间是否存在着一一定的数量关系的问题。后来经过许多次的实验,终于证实了这样的结论:要获得单位热量所需作的功是一定的;并且还初步测出了它的数值。这一事实充分证明了革命导师恩格斯的光辉论断:“科学的发生和发展一开始就是由生产决定的。”

根据近代精确实验的结果表明:要产生1千卡的热量就需要作功427公斤·米,或4.18千焦耳。通常把产生单位热量所需作的功叫做热功当量,用字母 J 表示。如果用 Q 表示所产生的热量,而用 W 表示由于产生这些热量所作的功,那么热功当量

$$J = \frac{W}{Q}, \quad (8.1)$$

式中 $J=427$ 公斤·米/千卡或4.18焦耳/卡。

[例题 8.1] 某人用质量为0.5公斤的铁锤去敲质量为50克的铁钉。假设铁锤的末速度等于12米/秒,一共敲20次。如果打击时所作的功全部转化成熟,并且全部用于使铁

锤和铁钉的温度升高,问可以升高几度?

解:要计算温度升高几度,首先必须算出铁锤对铁钉共作了多少功,转换成多少热量,然后再根据铁锤和铁钉的热容量找出它的温度差。由于铁锤每敲铁钉一次所作的功可从铁锤接触铁钉一瞬间的动能算出,因此铁锤所作的总功

$$W = \frac{1}{2} m v^2 \times 20 = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 12^2 \times 20 = 720 \text{ 焦耳。}$$

再按公式(8.1)算出消耗这些功所得到的热量

$$Q = \frac{W}{J} = \frac{720}{4.18} \doteq 172 \text{ 卡。}$$

对于铁锤和铁钉说来,质量 $m=550$ 克;比热 $c=0.11$ 卡/克·度,因此在吸收热量 Q 之后温度的升高

$$t - t_0 = \frac{Q}{cm} = \frac{172}{0.11 \times 550} \doteq 2.84^\circ\text{C}。$$

进一步的实践表明,功可以全部转化成熟,但热并不能全部转化成功。例如汽车在行驶过程中,汽油燃烧发出的热量并不能全部转化成推动汽车前进的功,必然要有很大一部分热量在空中散失掉。通常把热机实际转化成有用功的热量与燃料完全燃烧时放出的总热量的百分比叫做热机的总效率,用字母 $\eta_{\text{总}}$ 表示。即

$$\eta_{\text{总}} = \frac{Q'}{Q} = \frac{W}{JQ} \times 100\%, \quad (8.2)$$

式中 Q 表示总热量, Q' 表示实际转换成有用功的热量, W 表示有用功。一般说来,热机(包括机车、汽车、拖拉机等)的总效率都很低。

[例题 8.2] 海燕牌 SWH-600 型微型货车功率为 20 马力,今备有汽油 10 公斤,如果总效率为 20%,按 50 公里/时

的速度行驶,可以行驶几公里?

解:要计算货车能行驶几公里,首先必须算出10公斤汽油能发出多少热量,再根据总效率算出可以转化成多少有用功,最后再根据功率算出做功时间,并按速度算出路程。

根据汽油的燃烧值为11000千卡/公斤,可以算出燃料发出的总热量

$$Q = 11000 \times 10 = 110000 \text{ 千卡,}$$

再按公式(8.2)算出有用功

$$W = \eta_{\text{总}} JQ = 20\% \times 427 \times 110000 = 9394000 \text{ 公斤} \cdot \text{米,}$$

又因货车功率 $N = 20 \text{ 马力} = 1500 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒}$,所以货车能作功的时间

$$t = \frac{W}{N} = \frac{9394000}{1500} \approx 6263 \text{ 秒,}$$

因此货车能行驶的路程

$$s = vt = 50 \times \frac{6263}{3600} = 87 \text{ 公里.}$$

习题 8.1 速度为100米/秒的铅弹射入一木板内。如果铅弹冲击木板时,它的动能全部转化成热量,而其中的50%使铅弹本身温度上升,问铅弹温度升高几度?

(提示:铅弹质量可假设为 m 克,并不影响计算结果。)

习题 8.2 已知2吨载重汽车在满载时的总重量为3.8吨。当它在以50公里/时的速度正常行驶时突然紧急刹车,问汽车在刹停过程中克服阻力作了多少功?产生了多少热量?

习题 8.3 交通牌 SH-141 型载重汽车的最大功率为90马力。如果总效率为25%,问汽车每小时消耗汽油几公斤?

习题 8.4 某内燃机功率为40马力,如果每小时消耗汽油10公斤,求它的总效率。

第二节 内 能

一、物体的内能

我们再来分析图 8.1 的实验。筒内空气在外界活塞对它做功之后，温度有所上升，使在乙醚中浸过的棉花燃烧起来。从能量的观点看来，做功的过程就是能量从一物体传递给另一物体，或者从一种形式转化成另一种形式的过程。既然活塞对筒内空气作了一定量的功，就必然有一定量的机械能转化成其他形式的能而传递给筒内空气，使空气内部的能量有所增多。我们把物体内部所含有的能量叫做物体的内能，通常用字母 U 表示。筒内空气在受到外界活塞对它做功后，它的内能增多的标志就在于温度升高了，压强增大了或者体积减小了。

任何物体，无论是气体、液体还是固体都具有内能。从分子运动论的观点看来，物体的内能就是物体内所有的分子无规则运动的动能和分子间相互作用的势能的总和。

什么叫做分子势能呢？分子间存在着相互作用力，因此就象弹簧一样，要改变分子间的相对位置，外力就必须克服分子间的作用力而做功。于是就象弹性势能一样，通常把分子由于相对位置改变而具有的能量叫做分子势能。在一般情况下，分子间的作用力是引力，因此在引力范围内，分子间距离越大，分子势能也越大。当分子间的距离超出引力范围之外，分子势能就不再存在。所以对于理想气体说来，分子势能可以忽略不计。

物体内能的大小与哪些因素有关呢？它的大小是由物体的热运动状态来决定的。具体地说，它与物体的质量、温度以

及物态等等都有关系。物体质量越大,分子越多,内能也越大。物体温度越高,表明分子的平均动能越大,内能也越大。对于质量相等、温度是 0°C 的冰和水说来,虽然它们的分子数和分子的平均动能都相等,但由于水分子间的距离较大,分子势能较大,因此水的内能比冰大。这也就是为什么当 0°C 的水凝结成 0°C 的冰时会放出热量来的原因。

内能是不同于机械能的另一种形式的能量。当物体在作机械运动时,例如正在公路上跑的卡车、从高处往下流动的水、从拖拉机废气管喷出的废气等,它们的分子除了作无规则的热运动外,作为一个整体还在作有规则的机械运动。在这种情况下,分子的有规则运动(即机械运动)的能量,即机械能决定于物体机械运动的状态(速度、位置等);而分子的无规则运动(热运动)的能量,即内能决定于分子热运动的状态(温度、物态等)。

二、物体内能的改变

因为物体的内能是指它所有分子的热运动的动能和势能的总和,所以要想算出一杯水或者一定质量的气体的内能究竟有多大是不可能的,也是不必要的。实际上我们所关心的只是物体在经过某一过程之后,它的内能改变了多少,是增加还是减少。通常用 ΔU 表示物体内能的增量。

图 8.1 的实验表明,我们可以通过对物体做功来改变它的内能。在这种情况下外界对物体做功的过程就是物体内能改变的过程,因此物体内能改变多少就可以用作功的多少来量度。外界对物体作了多少正功,它就增加多少内能;外界对物体作了多少负功,或者物体对外界作了多少正功,它就减少多少内能。

拖拉机发动机在工作时,气缸里的高温气体通过热传递使气缸体、活塞、气缸盖、气门等部件的温度都升高了;这些部件又通过热传递使冷却水套、散热器以及周围的空气温度也都升高了。这些例子都表明,通过热传递也可以改变物体的内能。在这种情况下外界对物体热传递的过程就是物体内能改变的过程,因此物体内能改变多少就可以用传递热量的多少来量度。物体从外界吸收多少热量,它就增加多少内能;物体向外界放出多少热量,它就减少多少内能。

总之,做功和热传递都可以改变物体的内能,这两种过程的作用是相同的,因而功和热量都可以用来量度物体内能的变化。我们已经掌握了它们之间的数量关系——热功当量。然而严格说来,热和功之间的转化并不是直接进行的,必须经过物体内能的变化。就拿图(8.1)的实验来分析,这中间既有做功过程,又有热传递过程。应该说先是活塞对筒内空气作了功,增加了空气的内能,温度升高了;然后空气再消耗内能向浸过乙醚的棉花传递热量,使棉花的温度升高到乙醚的燃点以上而燃烧起来。如果没有空气,活塞也不可能做功,棉花也不可能得到热量。

通过上面的讨论,可以进一步认识到热量和功一样,也可以用来量度在某一过程中物体内能的变化。所谓物体放出或吸收多少热量,实质上就是指这物体在热传递过程中减少或增加了多少内能。因此要问一杯水具有多少热量是毫无意义的。

三、热力学第一定律

假定有一个盛有一定质量的未饱和蒸汽的汽缸(图8.2),它四周都有绝热设备,只有底部和一热源相接触,上面的活塞

可以上下自由滑动，不必考虑摩擦力。很明显，在汽缸和热源的接触中，必然要有一定量的热量为蒸汽所吸收，同时由于蒸汽受热后体积的膨胀，要推动活塞向上而做功。在这一过程中，应该如何来计算蒸汽内能的改变呢？

设 U_1 、 U_2 分别为蒸汽在受热膨胀做功前、后的内能，而 Q 是外界(热源)传递给蒸汽的热量， W 是蒸汽由于膨胀而对活塞所作的功。根据前面的分析可知，外界传递给蒸汽热量 Q ，就使蒸汽内能增加，而蒸汽对外界做功 W ，又使内能减少。因此，在这一过程中蒸汽内能的增量

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W,$$

即

$$Q = \Delta U + W. \quad (8.3)$$

上式表明：传递给物体(或系统)的热量，一部分使物体(或系统)内能增加；另一部分消耗在物体(或系统)对外界做功上。这个结论就叫做热力学第一定律。

热力学第一定律说明，要使一个系统的内能增加，其他系统必须对它传递热量、做功或者既传递热量又做功，其他系统要减少等量的内能，而二者的总能量保持不变。所以热力学第一定律实际上就是包括热现象在内的能量守恒与转化定律。它对于任何物体(或系统)在任何过程中都是适用的。

在运用热力学第一定律公式(8.3)时，要注意到：(1)公式里各个量的单位必须利用热功当量，把它们一致起来。可以

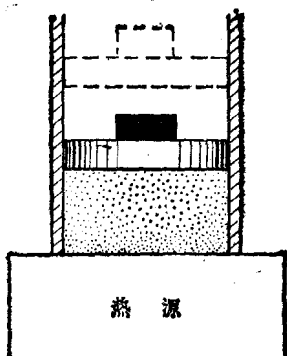


图 8.2 未饱和蒸汽受热膨胀做功示意图

都用卡、千卡；或者都用焦耳、公斤·米。(2)公式里各量的正负号要用得确当。例如

$Q > 0$ 表示系统吸热； $Q < 0$ 表示系统放热。(这一点与热平衡方程中热量 Q 的正负是一致的。)

$\Delta U > 0$ 表示系统内能增加； $\Delta U < 0$ 表示系统内能减少。

$W > 0$ 表示系统对外界作正功； $W < 0$ 表示系统对外界作负功。

[例题 8.3] 锅炉内盛水 150 公斤，当温度从 20°C 升高到 100°C 时，如果不考虑水的体积由于受热而产生的微小膨胀，问水的内能改变多少？

解：假设锅炉内的水在温度升高前后的内能增量为 ΔU ，水从外界吸收的热量

$$Q = cm(t - t_0) = 1 \times 150 \times (100 - 20) = 12000 \text{ 千卡。}$$

由于不考虑水的微小膨胀，因此它对外界所作的功 $W = 0$ 。于是按公式(8.3)可以列出

$$\Delta U = Q - W = 12000 \text{ 千卡，}$$

表明水的内能增加 12000 千卡。

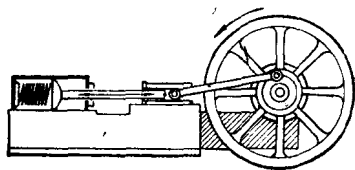
四、永 动 机

历史上曾经有不少人幻想能造出一种机器，它一经开后，不需要消耗任何动力和燃料，即不需要对它作功或传递热量，就可以不断地运转而对外界作出功来。这就是所谓永动机。数百年来人类的大量实践都一再证明这种努力是徒劳的，是不可能实现的。

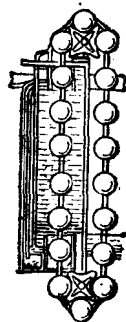
图 8.3 所示就是两个典型的永动机：(a)幻想用弹簧来代替汽缸里的蒸汽，利用弹簧的弹力来推动活塞做功；(b)幻想利用成串的浮桶在水里受到的总浮力，来带动发电机轴的转

动而发电, 所谓“静水发电”。

为什么永动机不能实现呢? 因为永动机是违背自然界的客观规律的。毛主席教导我们: “人们要想得到工作的胜利即得到预想的结果, 一定要使自己的思想合于客观外界的规律性, 如果不合, 就会在实践中失败。” 具体说来, 永动机是违背热力学第一定律的。要知道一个系统在对外界做功的过程中, 它的内能就要减少。要想不消耗它的内能, 外界就必须同时对它做功, 或者对它传递热量, 也就是不断地供给它能量。因此无论把永动机设计得如何巧妙, 要想在没有外界能量供给的情况下不断对外界做功, 显然是办不到的。



(a)



(b)

图 8.3 不能实现的永动机

正是这个原因, 所以一切永动机的设计都是脱离实际的。从图上粗看看, 似乎有点道理, 仔细分析就会看出破绽来。例如图 8.3a 的永动机的失败就是由于没有考虑到摩擦。即使一开始用力使弹簧振动, 它也会很快就会静止的。图 8.3b 的永动机的失败也在于没有考虑浮桶在水中所受的摩擦力。

能量转化与守恒定律在一定程度上说来, 就是从这类永动机的失败教训中总结出来的。

习题 8.5 为什么功和热量只能用来量度物体内能的改变而不能直接用来量度物体的内能?

习题 8.6 已知活塞在对气缸里的空气进行压缩过程中作功 85.4 公斤·米, 同时气缸向外界散发热量 0.05 千卡。问空气的内能改变多少?

习题 8.7 柴油机在压缩冲程中, 活塞急速压缩气缸内的空气。如果活塞作功 33.9 公斤·米, 假设在这过程中空气与外界没有热交换, 问空气的内能改变多少?

第三节 蒸汽发动机

一、热机的组成部分

热机就是热力发动机, 分蒸汽发动机和内燃发动机两大类。它是一种把燃料的化学能转化成机械能的装置。要做到这一点, 热机就需要有作功的媒介物。先是燃料的化学能转化成媒介物的内能, 然后媒介物再消耗内能推动机件作功。这种作功的媒介物叫做热机的**工质**。例如蒸汽发动机的工质就是蒸汽; 内燃发动机的工质就是燃料燃烧时生成的气体。

热机包括三个主要的组成部分: 发热器、工作部分和冷凝器。**发热器**是使燃料的化学能转化成工质的内能的装置。它是工质的热源。**工作部分**是工质消耗内能对外作机械功的场所。**冷凝器**是接受工作部分排出的废工质的装置。它是工质的冷源。

不同类型的热机构造虽不同, 但都具有上述三个主要的组成部分。

二、锅 驼 机

锅驼机是我国北方农村常用的动力装置。它是锅炉和蒸汽机紧凑地联合在一起的小型蒸汽动力装置。用它来带动水泵、水车就可以灌溉排水; 带动发电机就可以发电; 带动其他

各种机械就可以进行农副产品的初加工。它的蒸汽机的废汽还可以利用来作加热、蒸发、干燥或取暖的热源。图 8.4 和图 8.5 就是国产北京型立式 7.5 马力锅驼机的锅炉和蒸汽机的结构简图。

国产北京型锅驼机是以立式火管锅炉作为发热器的。图 8.4 是它的剖面图。在它下部的底座 9 内是由耐火砖砌成的火室，是燃料燃烧的地方。燃料由炉门 1 进入火室，燃烧后，炉灰通过炉篦 2 落入灰室 10。它的中部炉筒 5 是盛水的大圆筒，中间贯穿着许多细管，叫做火管 4，外面敷有石棉和铁皮。燃烧生成的烟气通过火管，把一部分热量传递给锅筒中的水，使它转变成饱和蒸汽。通过火管的烟气经上方的烟箱 6 后由烟囱排出。在烟箱里装有螺旋形的过热管，叫做过热器 7。炉筒内生成的饱和蒸汽在送往蒸汽机以前，还要经过热器在烟箱中再一次加热。因为饱和蒸汽的温度稍为降低、压强稍为增大就容易凝结成水，这些水在蒸汽机中不能作功，要造成热量的浪费，所以把饱和汽进一步加热，可以使它成为远离饱和状态的未饱和汽，通常把它叫做过热蒸汽。烟箱旁的新汽吹风管 8 可以把炉筒内的饱和蒸汽从烟囱喷出，利用空吸作用带走烟气，起着增强火室的通风作用。

北京型锅驼机是以立式、单缸、单动、提阀配汽蒸汽机作为

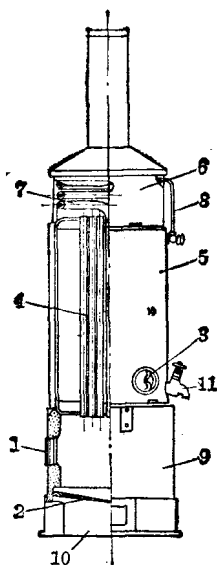


图 8.4 北京型锅驼机的立式火管锅炉的结构简图

1—炉门； 2—炉篦； 3—手孔； 4—火管； 5—炉筒； 6—烟箱； 7—过热器； 8—新汽吹风管； 9—底座； 10—灰室； 11—泄水阀

工作部分的。图 8.5 是它的剖面图。从锅炉引过来的过热蒸汽由新汽进口 7 经进汽阀 8 进入汽缸 9, 随着进汽阀的关闭, 蒸汽由于膨胀而推动活塞 10 下移做功。活塞的下移又带动连杆 11 往下, 使装在主轴 13 上的曲柄 14 转动, 从而使装在主轴上的质量很大的飞轮 22 也转动起来。当活塞到达它的最低位置(下止点)时, 在飞轮的惯性作用下, 由于曲柄的继续转动, 促使连杆带动活塞上移。这里, 飞轮的惯性作用, 不仅能使曲柄连杆装置顺利地通过活塞的上止点和下止点, 而且还能使主轴的转动速度比较均匀。在活塞上移时, 进汽阀已关闭, 同时排汽口 17 和辅助排汽口 20 已开启, 因而活塞的上

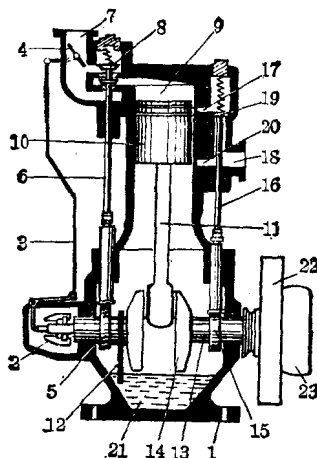


图 8.5 北京型锅驼机的立式单缸单动提阀配汽蒸汽机的结构简图

- 1—底座; 2—调速器; 3—杠杆; 4—节流阀; 5—进汽阀凸轮; 6—进汽阀挺杆; 7—新汽进口; 8—进汽阀; 9—汽缸; 10—活塞; 11—连杆; 12—润滑油环; 13—主轴; 14—曲柄; 15—排汽阀凸轮; 16—排汽阀挺杆; 17—排汽口; 18—废汽出口; 19—排汽阀; 20—辅助排汽口; 21—润滑油池; 22—飞轮; 23—皮带轮

移起了排除废汽的作用。等活塞上移到它的最高位置（上止点）时，排汽阀已关闭而进汽阀已开启，又引进新汽来推动活塞下移做功。就这样在蒸汽的推动下活塞的往复直线运动由曲柄连杆机构转换成主轴的转动。通过皮带轮 23，装上皮带即可成为其他机械的动力装置。象这种只从活塞上方进汽膨胀做功的蒸汽机叫做单动式蒸汽机。

那么进汽阀和排汽阀的开和关是怎样控制的呢？在曲柄两旁的主轴上分别装有凸轮 5、15。所谓凸轮就是边缘上有一部分特别凸出的圆轮。它们都是随主轴转动的。例如当凸轮 15 的凸出部分转到上方时，就把挺杆 16 向上提（图 8.6a），这时排汽阀 19 就被顶开。等凸出部分转过上方时，汽阀弹簧又使挺杆下落，排汽阀就自行关闭（图 8.6b）。这种配汽装置就叫做提阀式配汽装置。活塞每上下 1 次，蒸汽机完成 1 个工作循环，主轴转动 1 转，进汽阀、排汽阀各开启 1 次。

图 8.5 中的 2 是与主轴相连的调速器，如果主轴转得过

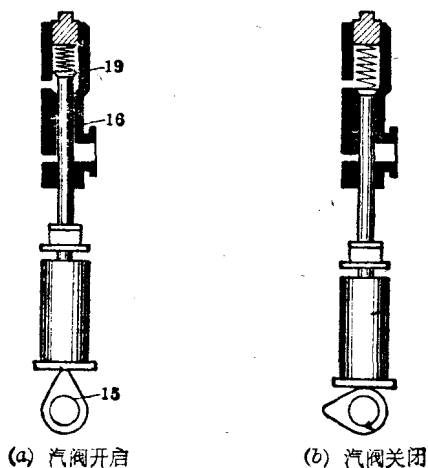


图 8.6 提阀配汽装置

快，调速器中的飞球就会由于离心作用而外移，从而带动杠杆3使节流阀4关小，来调节进入汽缸的蒸汽量；如果主轴转得过慢，调速器中的飞球就会相应往里移动，从而通过杠杆使节流阀开大以增大蒸汽量。

蒸汽机废汽的温度很高，可以用来预热锅炉的进水管，然后把废汽管接到烟囱喷入大气，可以帮助通风。因此锅驼机是以大气作为冷凝器的。

为了鉴别锅驼机等蒸汽动力装置的性能好坏，通常是由燃烧效率、热效率和机械效率等三个数字来反映它们在各方面的性能的。图 8.7 是蒸汽动力装置的热量损耗示意图。

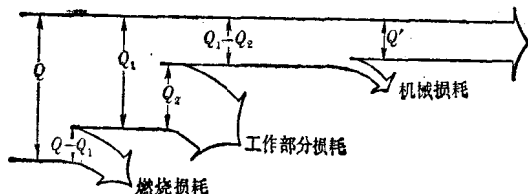


图 8.7 蒸汽动力装置的热量损耗示意图

燃烧效率反映了蒸汽动力装置在锅炉部分的热量损耗情况。假设燃料完全燃烧后能放出的全部热量为 Q ，而实际传递给蒸汽的热量为 Q_1 ，那么锅炉的燃烧效率

$$\eta_{\text{燃}} = \frac{Q_1}{Q} \times 100\%。$$

一般火管锅炉的燃烧效率只有 65~70% 左右；而现代大型水管锅炉装置的燃烧效率可达 90% 以上，船用蒸汽锅炉由于受到体积与重量的限制，燃烧效率在 75~80% 左右。

蒸汽从锅炉吸收的热量 Q_1 ，并不能全部转化成对外所作的功，必然要在工作部分损耗一部分热量 Q_2 ，其中包括不可避免地蒸汽带到冷凝器（或大气中）去的热量。通常把工质

在工作部分实际消耗内能转化成机械功的热量 $Q_1 - Q_2$ 和工质从热源吸收的热量 Q_1 的比叫做蒸汽动力装置等热机的热效率, 用字母 $\eta_{\text{热}}$ 表示, 即

$$\eta_{\text{热}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\%。 \quad (8.4)$$

由于大量的热量被废汽带走, 因此锅驼机的热效率很低, 一般只有 5~10%; 性能最好的蒸汽机, 热效率也不会超过 20%。实践和理论都表明, 热源温度越高, 热源和冷源的温度差越大, 热效率就越高, 因此提高锅炉温度, 降低冷凝器的温度是提高一切蒸汽动力装置的热效率的主要途径。

机械效率反映了热机在机械传动装置上的能量损耗情况。假设在可以转化成机械功的热量 $Q_1 - Q_2$ 中, 实际只有一部分 Q' 是转化成有用功的, 那么热机的机械效率

$$\eta_{\text{机}} = \frac{Q'}{Q_1 - Q_2} \times 100\%。$$

一般蒸汽动力装置的机械效率可达 85~90%。由于蒸汽动力装置的总效率是实际转化成有用功的热量 Q' 与燃料完全燃烧时放出的热量 Q 的比, 因此可以列出

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{Q_1}{Q} \times \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times \frac{Q'}{Q_1 - Q_2},$$

即

$$\eta_{\text{总}} = \eta_{\text{热}} \times \eta_{\text{热}} \times \eta_{\text{机}}。 \quad (8.5)$$

上式表明, 蒸汽动力装置的总效率就等于它的燃烧效率、热效率和机械效率的乘积。

因为热效率只有 5~10%, 所以锅驼机的总效率很低, 只有 4~8% 左右。这是所有以蒸汽机为工作部分的动力装置的最大缺点, 它们的总效率最高也不超过 15%。但蒸汽机也有不少优点, 如结构较简单, 容易制造; 坚固耐用; 操作方便,

可以倒转；能使用各种燃料等。因此目前还被广泛应用在铁路运输上。

三、蒸汽轮机

蒸汽机热效率低的原因还在于它的活塞是往复运动的。这样，机轴每转一周，活塞的速度就要有两次等于零，所以就有很大一部分能量要用来克服活塞的惯性。为了避免这一缺点，一般大型火力发电厂都不采用蒸汽机，而是采用蒸汽轮机来作为发动机的。蒸汽轮机是热机中输出功率最大的一种。大型蒸汽轮机输出功率可达几十万千瓦。近年来上海汽轮机厂已制成 12.5 万千瓦蒸汽轮机，与相同功率的双水内冷发电机相匹配构成火力发电厂的成套设备。目前我国已能自行设计制造 30 万千瓦蒸汽轮机，这标志着我国热力工程技术的新的跃进。

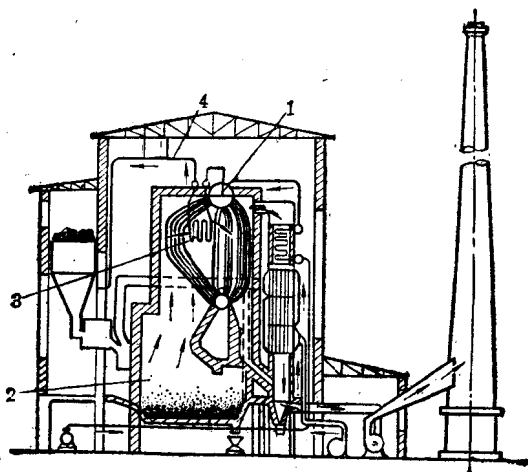


图 8.8 大型水管锅炉设备的示意图

1—汽锅； 2—燃烧室； 3—过热器； 4—汽管

蒸汽轮机也是以锅炉作为发热器的。图 8.8 就是火力发电厂里专门用来供给蒸汽轮机过热蒸汽的大型锅炉设备的示意图。为了增大汽锅的受热面积,提高燃烧效率,这种锅炉与图 8.4 的火管锅炉不同,它是让水通过许多与汽锅相连通的水管,而用燃料燃烧所生成的炽热烟气来烧水管的,通常把它叫做水管锅炉。图中的汽锅 1 就是由两个水筒和许多水管所组成的,当在燃烧室 2 里生成的烟气沿着箭头表示的路线穿过这些水管和过热器 3,就把大部分热量传递给它们。水管中的水受热后变成饱和蒸汽就进入上水筒,再由汽管通入过热器进一步加热成过热蒸汽经汽管 4 送往蒸汽轮机。

蒸汽轮机又是怎样避免蒸汽机活塞往复运动的缺点而使蒸汽作功的呢?图 8.9 就是一个最简单的单级蒸汽轮机的旋转部分,叫做转子。图中 1 是蒸汽轮机的轴,轴上装有叶轮 2,一个中央很厚,边缘上有许多小叶片 3 的钢盘,叶轮旁的喷管 4 是固定在机壳上的。来自锅炉的过热蒸汽首先通过喷管,在喷管中把它的势能全部或部分地转化成动能,然后从喷口以很大的速度喷在叶轮的叶片上。于是蒸汽就把大部分动能变换成使叶片连同机轴转动的机械能。因此蒸汽轮机不需要连

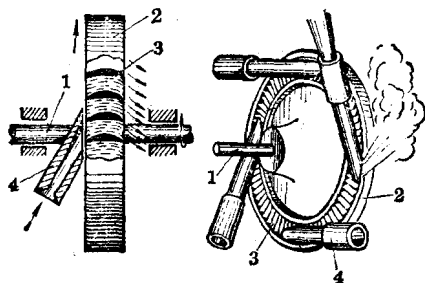


图 8.9 单级蒸汽轮机的转子

1—机轴; 2—叶轮; 3—叶片; 4—喷管

杆、曲柄和飞轮等装置,就可以使机轴均匀地转动。

要想只通过一圈叶片就把蒸汽的全部动能接受下来是不

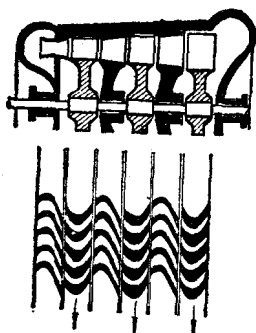


图 8.10 三级蒸汽轮机
示意图

可能的。图 8.10 就是一个三级蒸汽轮机的示意图。蒸汽从第一级喷管喷出,推动第一级叶轮转动之后,再经过一排固定的叶片,改变了运动方向继续喷出去推动第二级叶轮,这样前面这一排固定的叶片就起了喷管的作用,因而叫做第二级喷管。接着蒸汽又从第三级喷管喷出推动第三级叶轮。由于蒸汽的体积是在不断膨胀,因此这三级叶轮

一级比一级大些,它们都是安装在同一根机轴上一起转动的,而三排固定的叶片是固定在机壳上的。

要提高蒸汽轮机的热效率,除了要设法提高来自锅炉的过热蒸汽的温度,还要尽量降低废汽的温度。由于外界是大气压强,饱和汽的最低温度也要在 100°C 左右。如果再要设法降低温度就必须设法使汽压低于 1 个大气压,这就需要有一个特殊的设备,这个设备就是冷凝器。冷凝器的作用就在于把蒸汽轮机或蒸汽机的废汽凝结成水,送回锅炉,同时在大量蒸汽凝结成水的过程中,由于体积突然缩小,压强要降低,造成一定的真空度,从而使废汽温度大大低于 100°C ,以提高热效率。

蒸汽轮机与蒸汽机相比具有许多优点:(1)与功率相同的蒸汽机比较起来重量轻、体积小;(2)由于没有滑动部分,摩擦损耗少,机械效率高;(3)废汽温度较低,热效率比蒸汽机高,它的总效率可达 $25\sim 30\%$;(4)转速高而均匀,并能产生很大的功率。因此只要把它的机轴和发电机轴连在一起,就

可以带动发电机发电，不需要任何变速装置。所以蒸汽轮机应用很广泛，还能用在快速军舰和远洋轮上。但另一方面，蒸汽轮机也有转速过高、不能改变转向、装配复杂、制造叶片的材料要求高、造价贵、检修困难等缺点。

第四节 内燃发动机

蒸汽发动机都必须由锅炉供给蒸汽，这样就使整个装置显得非常笨重，这对小型交通车、拖拉机、飞机说来就很不适用。后来人们设计成一种不需要锅炉设备，而让燃料在气缸内直接燃烧的热机，叫做**内燃发动机**。经过几十年的不断改进与发展，根据所用的燃料和工作过程的不同，内燃发动机又可分为汽油发动机和柴油发动机两种。

一、165 型汽油发动机

165 型单缸、立式、四冲程汽油发动机是我国自行设计制成的小功率发动机。型号中的“1”表示单缸，“65”表示气缸直径的大小为 65 毫米。它具有结构紧凑、重量轻、操作方便、维护简单和耗油省等优点；主要适用于作为农业机械的原动力，如带动喷雾机、插秧机、离心式水泵工作等，也能用作小型车辆或船只的原动力。

图 8.11、8.12 就是 165 型汽油发动机的外形图及其结构简图。在图 8.12 中气缸体 1、气缸盖 2 和活塞 3 组成了发动机的主要工作部分。活塞是上端封闭而中间空心的圆筒，外表面上有几条环形槽，槽内嵌着活塞环 4，它的作用是提高气缸的密封性能，防止漏气和刮出缸壁上多余的润滑油。活塞通过活塞销和连杆 5、曲轴 6 连在一起，连杆的作用是把活塞

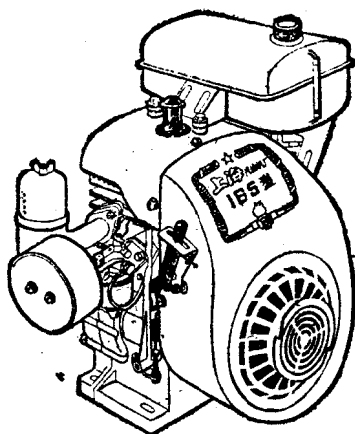


图 8.11 165 型汽油发动机的外形图

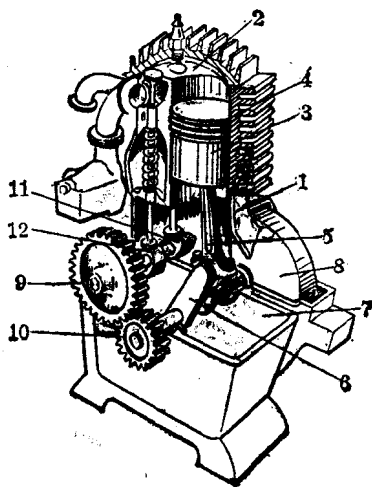


图 8.12 165 型汽油发动机的结构简图

1—汽缸体；2—汽缸盖；3—活塞；4—活塞环；5—连杆；
6—曲柄；7—曲轴箱；8—飞轮；9、10—准时齿轮；11、12—凸轮

的往复直线运动转化成曲轴的转动。曲轴是装在曲轴箱 7 里的，它的一端还装有飞轮 8，用来减少曲轴转动的不均匀性，并且帮助活塞通过上止点和下止点。

所谓上止点、下止点就是活塞在气缸内最上端和最下端的两个位置。它们之间的距离叫做活塞的冲程。当活塞在下止点时，气缸内活塞上方的体积叫做气缸的总容积；活塞在从下止点移动到上止点的过程中所排出气体的体积叫做气缸的工作容积；当活塞在上止点时，气缸内活塞上方的体积叫做气缸的余隙容积。因此气缸的总容积就等于工作容积和余隙容积的和。通常把气缸总容积与余隙容积的比叫做内燃发动机的压缩比。165 型汽油发动机的冲程为 55 毫米；气缸的工作容积为 182 厘米³；压缩比为 6:1。

所谓四冲程发动机是指发动机的整个工作循环是在四个活塞冲程中完成的(图 8.13)。

第一冲程又叫做吸气冲程(图 8.13a)。吸气前，活塞在

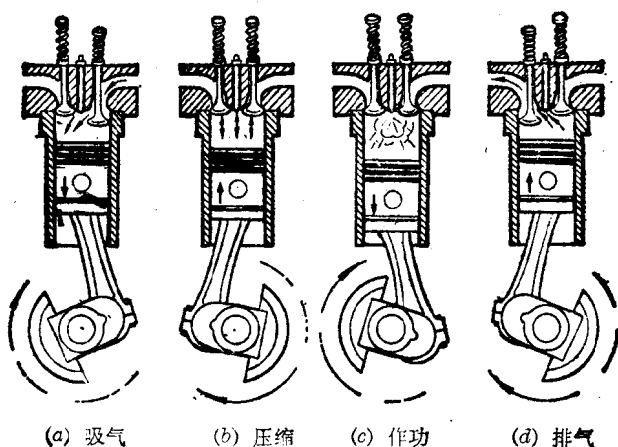


图 8.13 四冲程发动机的四个冲程

上止点上，余隙体积中还有上一工作循环剩下的废气。活塞往下移动到下止点，这期间排气阀关闭，进气阀开启，汽油和空气混合而成的雾状的可燃混合气被吸进气缸。这时混合气的温度约为 50°C ，气缸内压强约为 $0.85\sim 0.95$ 大气压。

第二冲程又叫做压缩冲程（图 8.13b）。活塞由下止点开始向上移动到上止点，这期间进、排气阀都关闭着，因而混合气受到绝热压缩，温度可达 $150\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，压强可达 $6\sim 12$ 大气压。

第三冲程又叫做做功冲程（图 8.13c）。在活塞接近上止点时，用电火花对气缸里的压缩混合气进行点火。由于混合气的猛烈燃烧，气缸内温度和压强都急剧上升，温度可达 $1800\sim 2000^{\circ}\text{C}$ ，压强可达 $25\sim 30$ 大气压。于是由燃烧而生成的气体就发生绝热膨胀，迫使活塞往下移动到下止点。膨胀结束时气体的温度约为 1000°C 左右，压强约为 $2.5\sim 3.5$ 大气压。

第四冲程又叫做排气冲程（图 8.13d）。在活塞接近下止点时，排气阀已开启，气体压强进一步降低到接近大气压，接着活塞又向上移动，将作过功的废气挤出气缸。废气温度约为 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 。等活塞移动到上止点，就完成了—个工作循环。

在汽油机的燃料供给系统中，最主要的部件就是汽化器，它的作用是把从油箱里送来的汽油和空气按一定比例配制成雾状的可燃混合气，以供给气缸。汽化器是依靠活塞在吸气冲程中所产生的空吸作用工作的，图 8.14 就是用来说明汽化器原理的简图。当经过滤清器的空气经入口 1 被吸到喉管处 2，速度增大，压强减小，因而使汽油从喷油口 3 喷出，并被气流喷散成雾状，与空气充分混合成可燃混合气，进入气缸。

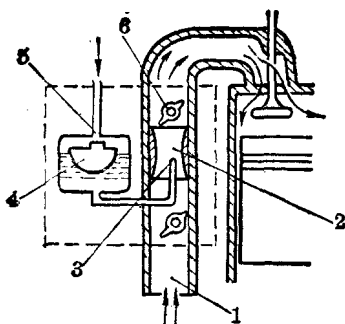


图 8.14 汽化器的原理简图

1—入口； 2—喉管； 3—喷油口； 4—浮子； 5—汽油进口；
6—节气阀

汽化器油池中的油量由浮子 4 控制。油量过多，浮子就上浮，把汽油进口 5 堵住。喉管上方的节气阀 6 是用来控制混合气进入气缸的油量的。

汽油机的配气装置也是提阀式的。当曲轴在转动时，通过一对准时齿轮 9、10 带动凸轮轴转动（参看图 8.12），凸轮轴上装着两个凸

轮 11、12，分别控制进气阀和排气阀的开和关。由于这一对准时齿轮的传动比为 $1/2$ ，因此发动机每完成一个工作循环，曲轴转动 2 转，凸轮轴转动 1 转，进气阀、排气阀也各开启一次。

汽油机的点火工作是靠高压电流通过火花塞，使两电极间产生电火花而实现的。图 8.15 是火花塞的简图。在它中央有个中心电极 1，与外壳之间用瓷质绝缘材料 3 隔开。与外壳相连还有一个电极叫做旁极 2。这两个电极间只有不到 1 毫米的间隙。当高压电流从中心电极流向旁极时，在两极间就产生电火花，使气缸中的可燃混合气点燃。外壳上的螺纹 5 是用来安装在气缸盖上的，上端的黄铜接头 4 是联接引入电流的导线用的。

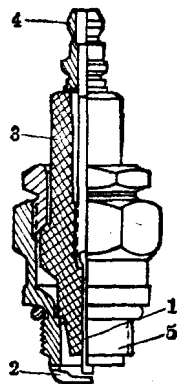


图 8.15 火花塞简图

1—中心电极； 2—旁极；
3—绝缘材料； 4—黄铜接头； 5—螺纹

汽油机在工作时，气缸内的温度很高，必须及时冷却。165 型汽油机由于功率较小，额定功率为 3 马力，因此是依靠在气缸壁和气缸盖四周的许多肋片用周围的空气来冷却的（图 8.12），这种冷却方法叫做风冷。把气缸体外形制成肋片形是为了增大散热面积。对于大型的汽油机，就需要用水冷却的方法。

165 型汽油机是采用飞溅法进行润滑的。所谓飞溅法就是在曲轴箱的底部储放足够的润滑油成为油池，当发动机工作时，连杆的底端冲击油池使油滴飞溅到气缸壁、曲轴等零件的摩擦表面上去进行润滑，以尽量减少各零件的磨损。

对于内燃发动机说来，由于燃烧是在气缸里直接进行的，因此它的燃烧效率和热效率就无法区别而统称热效率。内燃发动机的总效率可以根据它实际输出的功率（有效功率）和它的耗油率计算出来。

[例题 8.4] 165F-1 型汽油机的有效功率为 4 马力，在正常负荷下工作的耗油率是 290 克/马力·时。已知汽油的燃烧值为 11000 千卡/公斤，求它的总效率。

解：根据有效功率可以推知汽油机每小时实际输出的有用功

$$W = Nt = 4 \times 75 \times 3600 = 1080000 \text{ 公斤} \cdot \text{米},$$

相当于热量

$$Q' = \frac{W}{J} = \frac{1080000}{427} \approx 2529 \text{ 千卡}.$$

而每小时汽油机消耗的总热量

$$Q = qm = 11000 \times 0.29 \times 4 = 12760 \text{ 千卡},$$

因此汽油机的总效率

$$\eta_{\text{总}} = \frac{Q'}{Q} \times 100\% = \frac{2529}{12760} \times 100\% = 19.8\%。$$

内燃发动机的热效率可以根据它在气缸里产生的功率(通常可用一种叫做示功器的仪器来测定,叫做指示功率)和它的耗油率计算出来。有效功率 N 与指示功率 $N_{\text{示}}$ 的比就是内燃发动机的机械效率。即

$$\eta_{\text{机}} = \frac{N}{N_{\text{示}}} \times 100\%。 \quad (8.6)$$

实践和理论都表明,汽油机的热效率与它的压缩比有关,压缩比越大,热效率也越大,从而总效率也越大。大型多缸汽油机的总效率可达 25~30%。

二、195-2C 型柴油发动机

为了提高内燃机的热效率,人们不断提高汽油机的压缩比。但实际上由于汽油机气缸吸进的是空气和汽油的可燃混合气,因此压缩比最大不能超过 7:1。实践表明,如果压缩比超过 7:1,可燃混合气在压缩冲程中就会在点火以前自发地燃烧起来,造成发动机工作的突然停顿。这是限制汽油机效率的主要障碍。

“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。”在实践中人们又设计出一种压缩比可以大大超过 7:1 的热机,并且可以用比汽油便宜的柴油作为燃料,因而叫做柴油发动机。我国自行设计制造的工农-11 型 10 马力手扶拖拉机(图 8.16)就是用 195-2C 型柴油机作为动力的。这种手扶拖拉机既适宜于旱田作业,又可以进行水田耕作。

图 8.17 就是 195-2C 型卧式单缸四冲程柴油发动机的剖

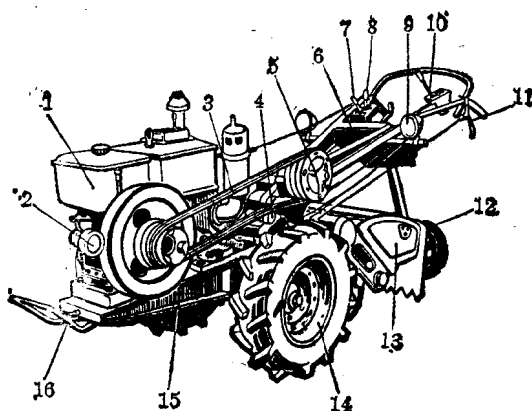


图8.16 工农-11型10马力手扶拖拉机

1—195-2型柴油机； 2—照明用发电机； 3—三角皮带； 4—张紧轮； 5—离合器； 6—工具箱； 7—犁刀变速手柄； 8—主变速手柄； 9—照明灯； 10—离合及制动手柄； 11—转向手柄； 12—耕耘尾轮； 13—旋耕机； 14—驱动轮； 15—机架； 16—支撑架。

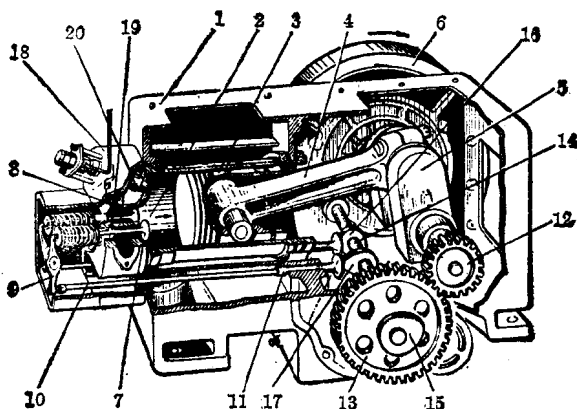


图 8.17 195-2C 型卧式单缸四冲程柴油发动机结构简图

1—气缸体； 2—气缸套； 3—活塞； 4—连杆； 5—曲轴； 6—飞轮； 7—进气门； 8—排气门； 9—摇臂； 10—推杆； 11—挺柱； 12—曲轴准时齿轮； 13—凸轮轴准时齿轮； 14—凸轮轴； 15—油泵凸轮； 16—排气凸轮； 17—进气凸轮； 18—气缸盖； 19—气门导管； 20—喷油嘴。

面图。它的构造基本上与汽油发动机很类似。

四冲程柴油机的工作循环也是由吸气、压缩、做功、排气等冲程所组成。它与四冲程汽油机所不同的是：

(1) 在吸气冲程中，吸进气缸的是不带燃料的新鲜空气，因而柴油机不需要汽化器。

(2) 在压缩冲程中，由于压缩的是空气，不会发生自燃现象，因此压缩比可以大大超过 7:1 而到达 15:1 甚至 20:1。这时空气的压强可达 30~50 大气压，温度高达 500~700°C。

(3) 在压缩冲程接近结束时，装在气缸盖上的喷油嘴(参看图 8.17 中的 20) 在高压油泵的作用下把柴油喷成雾状进入气缸。由于柴油的燃点是 500°C，在与气缸里的高温高压空气接触后就立即燃烧起来，燃烧生成的气体温度可达 2000°C，压强可达 60~100 大气压。这就迫使活塞往下移动而完成做功冲程；因而柴油机不需要火花塞等点火装置。

由于工作过程的不同，柴油机的燃料供给系统就和汽油机完全不同。在柴油机中，空气是经过空气滤清器之后，直接由进气管、进气阀进入气缸的；而供油系统包括油箱、柴油滤清器、高压油泵和喷油嘴等几部分。柴油从油箱流出，经过滤清器滤去机械杂质。为了能被喷进气缸，它的压强必须大大超过气缸内压缩空气的压强，这就是高压油泵的作用。柴油经过高压油泵后，油压已升高到 125 大气压以上，再经过高压油管到达喷油嘴。

喷油嘴是柴油机供油系统中的主要部件，它的任务是将柴油喷成细小而均匀的雾粒，以便均匀地分布在气缸里与空气混合而得到充分燃烧。图 8.18 就

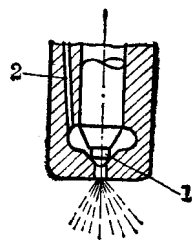


图 8.18 喷油嘴简图
1—针状阀； 2—孔道

是喷油嘴的头部构造简图。中间是一针状阀 1, 在不喷油时被顶杆由高压弹簧压住。当高压油泵送来的高压柴油由左边的孔道 2 进入头部, 针状阀就被顶开, 柴油就从喷油孔中喷出。至于喷油时间是象进气阀、排气阀一样, 由凸轮轴上的油泵凸轮所控制。当油泵凸轮转到某一位置时, 凸轮就推动油泵柱塞将柴油压出。

柴油机由于气缸内温度很高, 如果不及时冷却, 让活塞、气缸壁等机件温度过高就会引起活塞因热膨胀过度而卡住气缸套, 甚至造成烧坏活塞、气缸壁、喷油嘴等事故。因此在气缸壁上制有夹层, 内有冷却水, 叫做冷却水套, 并与冷却水箱相连通。经过水箱和水套内水的对流循环, 不断把气缸的热量传递出去。这样气缸壁周围的水温可保持在 100°C 左右。

[例题 8.5] 1105-W 型单缸四冲程柴油机, 气缸直径 D 为 105 毫米, 活塞冲程 S 为 120 毫米。经过测定已知燃气对活塞的平均指示压强 \bar{p} 为 6.5 公斤/厘米², 而飞轮的转速 n 为 2000 转/分, 求它的指示功率。如果耗油率为 3 公斤/时, 求它的热效率(柴油的燃烧值为 10200 千卡/公斤)。

解: 对于四冲程柴油机说来, 飞轮每转两转, 活塞才完成一个工作循环。因此根据飞轮的转速可以推算出活塞完成一个工作循环的时间

$$t = 2 \times \frac{60}{n} = 2 \times \frac{60}{2000} = 0.06 \text{ 秒}。$$

又根据在一个工作循环中, 燃气对活塞只在第三冲程中作功, 可以算出所作的功

$$\begin{aligned} W &= FS = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \bar{p} \cdot S = \frac{\pi (10.5)^2}{4} \times 6.5 \times 0.12 \\ &= 67.5 \text{ 公斤} \cdot \text{米}。 \end{aligned}$$

所以这台柴油机的指示功率

$$N = \frac{W}{t} = \frac{67.5}{0.06} = 1125 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒} = 15 \text{ 马力}。$$

根据耗油率, 柴油机每秒钟消耗的总热量

$$Q = qm = 10200 \times \frac{3}{3600} = 8.5 \text{ 千卡},$$

而每秒钟在气缸里产生的指示功相当于热量

$$Q_{\text{示}} = \frac{W}{J} = \frac{1125}{427} \doteq 2.63 \text{ 千卡},$$

因此这台柴油机的热效率

$$\eta_{\text{热}} = \frac{Q_{\text{示}}}{Q} \times 100\% = \frac{2.63}{8.5} \times 100\% = 30.9\%。$$

和汽油机相比, 柴油机的热效率较高, 可达 30~40%; 不仅燃料(柴油)的价格便宜, 而且耗油率一般可以比同类型的汽油机节省 30~40%, 因此柴油机比较经济。但由于压缩比高, 各种部件, 如气缸、活塞等都必须做得比汽油机结实, 因此柴油机比较笨重, 在运转中震动也比较厉害。一般适用于作为轮船、潜艇、坦克、拖拉机、载重汽车等等的动力。

此外, 内燃机由于每一个工作循环的四个冲程中只有一个作功冲程, 其余三个都是辅助冲程, 全靠作功冲程来供给能量的, 因此单缸内燃机的运转很不均匀。为了使它运转平稳, 增加功率又不增加机器的重量, 大型内燃机往往采用多气缸。根据具体技术要求可采用二缸、三缸、四缸、六缸、八缸等。例如丰收-35 型拖拉机的发动机就是四气缸四冲程柴油机。图 8.19 就是这种发动机的示意图。这种发动机的曲轴上有四个曲柄, 第一缸和第四缸的曲柄方向相同; 第二缸和第三缸的曲柄方向也相同。因为各个气缸的作功冲程是交替进行的, 在工作中, 总有一个气缸在作功, 所以这种发动机运转比

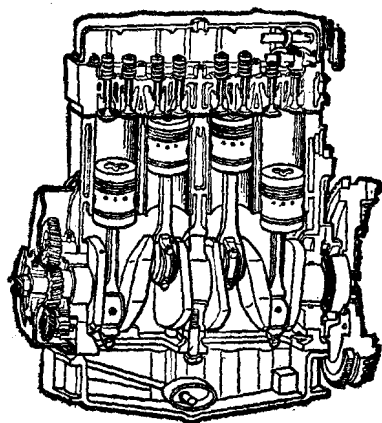


图 8.19 四气缸四冲程内燃发动机示意图

较均匀,而且功率也较大。小型内燃机在起动时,需要用手摇,使飞轮转动,引起第一个作功冲程动作后才能发动。大型多缸内燃机都备有起动马达或压缩空气起动系统来帮助发动机起动之用。

复 习 题

习题 8.8 在一质量为 700 克的铁质工件上钻孔,如果钻床的功率中有 0.8 马力消耗于转化成热量,共钻 3 分钟,问可以产生多少热量?如果这些热量的 75% 转化成工件的内能,问工件的温度将升高几度?

习题 8.9 假设汽油机在一次作功冲程中消耗 0.006 克汽油,作功 5.4 公斤·米,若不计算其他热量损耗,问气缸内燃气的内能改变多少?

习题 8.10 石家庄动力机械厂制造的 38 马力锅驼机,耗煤率是每小时 55 公斤,求锅驼机的总效率(煤的燃烧值为 7000 千卡/公斤)。

习题 8.11 水管锅炉和火管锅炉在构造上有什么区别?哪一种效率高些?为什么?

习题 8.12 柴油机和汽油机有什么区别?哪一种发动机的效率高些?为什么?

附录：习题答案

第一章

- 1.8 取 $\mu=0.02$, 得 $f=100$ 公斤。 1.9 0.5 公斤。
1.12 52 公斤。 1.14 500、866 公斤。 1.15 4.7、1.7 公斤。
1.18 按顺时针方向转动、+55 厘米·公斤。
1.19 前 48 公斤、后 72 公斤。
1.20 (1) 23.1、65.4 公斤; (2) 10.5、18 公斤。
1.23 23.2°。 1.30 (1) 19、9 吨; 10、20 吨; (2) 4.22 吨。

第二章

- 2.2 10 公里、0。 2.3 2408 米。 2.4 6.33、8.5、12 米/秒; 12 米/秒。
2.6 0.1 米/秒²; 400 米。 2.7 5.54×10^5 米/秒²; 1.56×10^{-3} 秒。
2.8 600 米。 2.10 0.32 米/秒²。 2.11 2645 米。
2.12 632.5 米/秒。 2.13 182 转/分。 2.14 478 转/分。
2.19 1.02 吨。 2.20 1837 公斤。 2.21 718 公斤。
2.22 1.05 吨。 2.25 4°40'。 2.26 1021 米/秒。
2.29 (1) 2.5、5、7.5 米/秒; (2) 0.33、0、0.5 米/秒²; (3) 37.5、
25、75 米。 2.30 56 米/秒。
2.34 0.927 米/秒²。 2.35 114 分钟。

第三章

- 3.3 100 公斤·米/秒; 100 牛顿·米, 方向与初动量一致。
3.4 14700 公斤。 3.5 (1) 10 公斤·米/秒; (2) 1000 牛顿。
3.6 83888 牛顿。 3.9 1.5 米/秒。 3.10 17 公斤。
3.12 4.8×10^6 公斤·米。 3.13 53.3 马力。 3.14 100 公斤·米/秒。
3.15 19.8 千瓦; 39.6 千瓦。 3.16 16000 焦耳。
3.17 1.72×10^6 、 4.22×10^6 焦耳。 3.18 231 千焦耳; 23 千瓦。
3.19 -7.04×10^4 牛顿。 3.20 -1.84×10^9 、 1.84×10^9 ;
增加 1.84×10^9 焦耳。 3.21 14700、-14700 焦耳。
3.22 20 米。 3.23 67.2 牛顿。 3.26 1.5 米/秒; 120 牛顿。
3.29 579600 焦耳。 3.30 2560 千瓦。 3.31 36.7 马力。

第 四 章

- 4.3 右手 7.2 公斤, 左手 6 公斤。 4.4 (1) 228 市斤; (2) 112 市斤。
4.5 52 公斤。 4.7 (1) 20 公斤; (2) 24 公斤。 4.8 92.6 公斤。
4.9 3.68 公斤。 4.10 23.4 公斤。 4.11 $F = \frac{R-r}{2L} P$ 。
4.12 117.2 公斤、190.8 公斤、51.2%。 4.13 $(\mu \cos \theta - \sin \theta) P$ 。
4.16 7.96 公斤。 4.17 480 毫米。 4.19 160、640 毫米; 20、80。
4.23 四级、7/190。 4.24 0.149 米/秒; 1.13 吨。

第 五 章

- 5.2 0.34 公斤/厘米²。 5.3 7.5、3.75 公斤/厘米²; 113.9 万吨。
5.4 0.235 公斤/厘米²; 4.71 吨。 5.7 6.184 公斤/厘米²。
5.9 120 公斤; 0.125 厘米。 5.11 4.34 吨。 5.12 4.8 克/厘米³。
5.13 24000 吨。 5.14 150 吨。 5.15 25 厘米³/秒。
5.18 194 厘米/秒、34.3 升/秒。 5.19 74 千瓦、75.5%。
5.21 1 公斤。 5.22 1.25 克/厘米³。 5.24 1000 公斤。
5.26 约 29 公斤。 5.27 100 厘米/秒; 7.85 升/秒。

第 六 章

- 6.3 831°C。 6.4 1.2×10^3 千卡; 18750 公斤。 6.5 15.2%。
6.8 0.6546 米。 6.9 93.7 厘米²。 6.10 不会溢出。
6.11 32.57°C。 6.21 铜块。 6.23 0.0905 卡/克·度。
6.24 8.5 分钟。 6.26 16.78 厘米³。

第 七 章

- 7.6 0.786 大气压。 7.7 6340 公斤/厘米²。
7.12 1.33×10^4 公斤/毫米²。 7.13 600 毫米²。 7.15 17.1°C。
7.17 49.2°C。 7.19 57.6%。 7.21 48.4°C。 7.24 33.3 米。
7.29 会。

第 八 章

- 8.1 19.3°C。 8.2 367000 焦耳、87.8 千卡。 8.3 20.7 公斤。
8.4 23%。 8.6 增加 0.15 千卡。 8.7 增加 33.9 公斤·米。
8.8 25.3 千卡、243°C。 8.9 53.4 卡。 8.10 6.25%。

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 物理基础知识 (上册)

作者 = 上海师范大学物理系

页数 = 342

SS号 = 10071264

出版日期 = 1974年09月第1版

前言

目录

引言

第一编 力学

第一章 力和力的平衡

第一节 力

第二节 作用力和反作用力定律

第三节 力的种类

第四节 力的合成和分解

第五节 平行力的平衡

复习题

第二章 运动和运动定律

第一节 运动的绝对性和相对性

第二节 直线运动

第三节 匀速圆周运动

第四节 物体的平动和转动

第五节 运动定律

第六节 向心力

复习题

第三章 动量和能量

第一节 动量 动量定理

第二节 动量守恒定律

第三节 功和功率

第四节 动能 动能定理

第五节 重力势能

第六节 机械能守恒定律 功能定理

第七节 机械运动的两种量度

复习题

第四章 简单机械和机械传动

第一节 杠杆

第二节 滑轮 轮轴

第三节 斜面 螺旋

第四节 机械传动

复习题

第五章 流体的力学性质

		第一节	流体的压强
		第二节	流体对压强的传递
		第三节	浮力
		第四节	液体流动的基本规律
		第五节	水力机械
		复习题	
第二编	热学		
	第六章	基本热现象	
		第一节	温度和温度的测量
		第二节	热量 热平衡方程
		第三节	物体的热膨胀
		第四节	热传递
		复习题	
	第七章	分子运动论	
		第一节	分子运动论概述
		第二节	气体的性质
		第三节	液体的表面现象
		第四节	固体的性质
		第五节	物态变化
		复习题	
	第八章	热和功	热机
		第一节	热功当量
		第二节	内能
		第三节	蒸汽发动机
		第四节	内燃发动机
		复习题	
	附录	习题答案	