

医用物理学

PHYSICS FOR MEDICAL SCIENCES

谢楠柱 郭清玉 主编
苏炽辉



SIEMENS



广东高等教育出版社

医 用 物 理 学

Physics for Medical Sciences

谢楠柱 郭清玉 主编
苏炽辉

明纪堂 侯载文 杜万丰 编写
胡栋仙 陆士良

广东高等教育出版社

内 容 简 介

本书是根据八十年代我国高等医学专科学校教学计划要求而编写的医用物理学新教材。

全书分九章，包括力学基本知识、振动与波、液体的流动、热运动的基本知识、电磁学基础、医用电子测量技术、物理光学、几何光学、原子物理学基础等内容。

本书适当结合现代医学实际，适应自学之需，注意保持物理学的系统性，可作为高等医学专科学校的医用物理学教材，也可作为高等医学院校和中等医科学学校的物理教学参考书，也可供一般医学工作者作自学用书。

医用物理学

谢楠柱 郭清玉 主编
苏焯辉

广东高等教育出版社出版发行

韶 关 新 华 印 刷 厂 印 刷

787×1092毫米 16开本 10.25印张 220千字

1988年7月第1版 1988年7月第1次印刷

印数 1—10 000册

ISBN 7-5361-0140-6/R·15

定价： 2.85元

前 言

本书是根据八十年代我国高等医学专科学校计划要求而编写的医用物理学新教材。医用物理学是必修的基础课程，本书可供讲授40~46学时的理论课之用，其中标有*号的内容是供教师选讲或学生自学之用。

本书的编写力求运用辩证唯物主义和历史唯物主义的观点阐述物理学的基本概念、定律和公式，力求具有较完整的科学系统性，加强物理学基础知识的传授和培养学生的智能，尽量避免与中学物理课的简单重复。在内容选择上适当联系现代医学实际，力求具有医用物理学的特点，并注意启发性，文字流畅，适应自学之需，力求使教师易教、学生易学。

本书既可供高等医学专科学校用作教材，也可作为高等医学院校和中等医科学校的物理教学参考书，也可供一般医学工作者作自学用书。

本书由广州医学院医学物理教研室主任谢楠柱教授主编。牡丹江医学院郭清玉主任和广州医学院苏炽辉副主任为副主编。参加编写工作的有长治医学院明纪堂（物理光学与几何光学），河北医学院邯郸分院侯载文（力学基本知识与热运动的基本知识），济宁医学院陆士良（液体的流动），沈阳医学院胡栋仙（原子物理学基础），开封医学专科学校杜万丰（医用电子测量技术），牡丹江医学院郭清玉（振动与波），广州医学院苏炽辉（电磁学基础）。广州医学院谢楠柱负责编写绪论及总的定稿审图工作。郭清玉、苏炽辉负责审稿、校对、审图等工作。广州医学院黄大同讲师负责本书的编辑工作，梅秉强讲师绘制全部插图，陈灼慈、林超华、苏炽辉负责全书的抄稿工作。陈灼慈副教授、黄大同讲师还参加了部分审稿工作。新乡医学院朱平福主任、河北职工医学院王德霞主任、贵州黔南民族医专郭昌俊老师及大部分编者参加了在广州医学院举行的定稿会议，提出了宝贵意见。广东高等教育出版社李敏康同志为本书的责任编辑。

本书的编写、出版和发行工作得到广东省教育局和广州医学院领导的大力支持，特此表示衷心的感谢。

编 者

1988年6月

绪 论

现代医学的飞跃发展，迫切需要物理学的基本知识和实验技能，医用物理学已成为高等医学教育的重要必修课程，每一位医学生必须认识物理学的研究对象、研究方法和它与现代医学的密切关系。

§ 0-1 物理学的研究对象

辩证唯物主义认为，世界是物质的，物质是永远不停地在运动的。物理学是研究物质运动最基本、最普遍的形式和规律的一门基础学科，并被举世公认为自然科学中的领头学科。

什么是物质？大至天体、日月星辰，小到分子、原子、电子及其他基本粒子等实物，还有电场、磁场、电磁场及引力场等，都是物质。简言之，物质包括实物与场。

什么叫运动？一切物质都在不停地运动着，绝对不动的物质是不存在的。这里所说的运动是广义的。天体的运行，江河的奔流，化学变化，动植物的生长发育，以至人的生理和病理过程等等，都是物质运动的不同形式。物质与运动是不可分的。运动是物质的存在形式，是物质的固有属性。宇宙间没有不运动的物质，也没有非物质的运动。人类生活中的所谓“静止”，都是相对于一定参照系来说的。所以，运动是绝对的，静止是相对的。

物理学的研究对象是什么？物体的机械运动，分子的热运动，电磁运动，原子的运动和原子核内的运动等等，都是物质运动中最基本、最普遍的形式，也是物理学的研究对象。物理学所研究的物质运动形式，普遍存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中，因此物理学所研究的许多物质运动规律具有普遍性。例如，地球上的一切物体，不论它们的化学性质如何，有无生命，都遵从物理学中的万有引力定律；一切物质的变化，不管它们是否具有化学的、生物的或其他特殊的性质，都遵从物理学中的能的转换与能量守恒定律。

必须认识，生命现象在自然现象中属于高级的、复杂的物质运动形式，它们除了遵从物理学的普遍定律外，还有自己独特的生物学规律。物理学知识只是理解生命现象的基础，但不能用来解释复杂的生命现象。

§ 0-2 物理学的研究方法

物理学的研究方法一般包括观察、实验、假说和理论等步骤。观察与实验是研究物理学的基础。观察是对自然界中发生的某种物理现象按其原来的样子加以观察研究，例如对天体运动或光现象的观察研究。但是对许多较复杂的物理现象，经过观察研究之

后，还要做有关的实验。实验是使所研究的现象在人为的情况下反复产生，作进一步细致的分析研究，获取实验数据或实验结果。由于自然界发生的物理现象往往很复杂，在实验时必须尽可能把影响现象的主要因素和次要因素分开，使问题简化，以便于揭示现象的本质和规律。

在观察和实验所获得的大量资料的基础上，还要经过分析、概括、判断和推理等一系列过程，把现象的本质和内在联系抽象到更一般的形式，再经过反复考验，被证明可正确地反映现象的客观规律时，才导致物理定律和理论的建立。可见，物理定律和理论不能是人为地硬套在自然现象上的主观思想，而是自然现象本身所具有的客观规律在人们头脑中的反映。

有些物理定律和理论的建立过程，有时需要先提出假说，假说是在观察和实验的基础上概括和抽象出来的。在一定范围内经过不断的考验而被证实是正确的假说，最终也可导致定律和理论的建立。例如，1900年普朗克提出的量子假说，大胆地突破经典理论的约束，假设能量是量子化的，最终导致了量子力学的建立。在物理学的研究中，大量假说的提出，导致了許多物理定律和理论的建立，其重要性已为举世所公认。

理论建立以后，还要回到实践中反复验证是否正确。所以，理论必须通过实践而得到验证，而正确的理论对实践又具有指导作用。实践出真知，真知指导新的实践，循环不息，使理论不断更新并趋于完善。

§ 0-3 物理学与现代医学的关系

20世纪初，生物学与医学基本上是一门形态科学，其研究方法主要是收集和整理材料并进行观察和归纳。物理学家发明了光学显微镜，使这种观察达到了细胞水平，促进了医学的发展。近八十多年来，物理学和工程技术的飞跃发展，特别是从原子时代进入到电脑时代，电子显微镜、电子医学仪器及电子计算机广泛应用于生物学和医学上，又使医学研究从细胞水平进展到分子水平、电子水平，定性医学正在向定量医学过渡，生物医学的研究将进一步触及到生命现象的本质，如疾病发生的微观机理、有机体内的控制与调节、新陈代谢的微观过程以及遗传与变异等微观基础的研究迅速发展。对寻找防病治病的有效途径正在起重要作用。

近卅年来，医学科学的理论，越来越多地建立在精确的物理学基础之上，物理学和现代医学不断发展，互相渗透，互相促进，形成了一门新的边缘学科，称为医学物理学(Medical Physics)。物理学、工程学、数学及其它自然科学与生物医学互相渗透，互相促进，又形成了一门多边缘综合性学科，称为生物医学工程学(Biomedical Engineering)这两门新学科对阐明生命现象的本质和对生物体包括人体进行探索和改造，已经作出了许多新贡献，指明了许多值得注意的发展方向。

物理学与现代医学的密切关系主要表现在下列两个方面：

(1) 物理学所提供的方法和技术，为基础医学和临床医学的研究以及医疗实践，开辟了许多新途径，发明和创造了许多现代医学诊断、护理、医疗的新技术和设备。例如X光机、心电图机、超声诊断仪、光纤内窥镜、电子监护系统、X射线CT机、发射型

CT机、核磁共振CT机、放射治疗设备等等，这些高级技术和医疗设备为防病治病作出了卓越的贡献，而它们都是按照物理学原理和方法设计制造出来的。1987年超导体研究的突破，钇钡铜氧组成的新型陶瓷，可以在液态氮温度范围内实现超导，这是物理学的最新成就。可以预言，超导体研究的进一步发展，必将在医学上获得广泛应用，特别是有朝一日，价值昂贵的液态氮低温超导磁场的核磁共振CT机，将可改装为成本大降的液态氮高温超导磁场的核磁共振CT机，届时将会广泛应用于临床早期诊断恶疾，为人类造福。

(2) 物理学是学习医学和研究生命现象不可缺少的基础。物理学是举世公认为一切其他自然科学和现代工程技术的基础。对医学来说也不例外。例如，要了解人体血液循环系统中的血流规律，就必须掌握流体动力学的基本知识；要了解眼的作用，也要掌握光学的基本知识；要了解人体内的电是神经与肌肉组织中的基本活动，就要了解脑电、心电、肌电、眼电、胃电等的有关电学知识。对于人体生理和病理过程中的控制和调节过程，必须懂得反馈的概念。在健康防护方面，必须考虑所处环境的物理因素。可见，缺少物理学基础，是不可能学习与研究医学的，每一位医学生必须认识这一点，才能自觉地学好医用物理学课程。

目 录

绪论	1
第一章 力学基本知识	1
§ 1-1 牛顿运动定律	1
牛顿三大定律(1) *经典力学的适用范围(2)	
§ 1-2 功和能	3
功的概念(3) 功能原理与机械能守恒定律(4)	
§ 1-3 刚体的转动	5
描写转动的几个物理量(5) 线量和角量的关系(6) 刚体转动定律(6)	
第二章 振动与波	11
§ 2-1 谐振动	11
谐振动(11) 谐振动方程(12) 振幅 频率 周期和位相(13) 谐振动的能量(13)	
§ 2-2 振动的合成	14
两个同方向、同频率谐振动的合成(14) 相互垂直、频率相同的两谐振动的合成(15)	
§ 2-3 波动方程和波的能量	17
波动方程(17) 波的能量(18)	
§ 2-4 惠更斯原理和波的干涉	19
惠更斯原理(19) 波的迭加原理 波的干涉(20)	
§ 2-5 声波	22
声波的物理性质(22) 声压 声强和声阻(23) 声强级和响度级(24) *多普勒效应(25)	
§ 2-6 超声波及其医学应用	26
超声波的性质(26) *超声波的产生和探测(27) *超声波在医学上的应用(27)	
第三章 液体的流动	30
§ 3-1 理想液体 稳定流动	30
理想液体(30) 稳定流动(30) 连续性方程(31) 柏努利方程(31) 柏努利方程的应用(33)	
§ 3-2 实际液体的流动	35
片流(35) 粘滞定律(36) 实际液体的柏努利方程(36) 泊肃叶定律(37)	
§ 3-3 血液的流动	38
第四章 热运动的基本知识	42
§ 4-1 理想气体的压强公式和能量公式	42
理想气体的微观模型(42) 理想气体的压强公式(43) 理想气体的能量公式(44) 道尔顿分压定律(45)	
§ 4-2 液体的表面性质	46
表面能(46) 表面张力(47) 弯曲液面的附加压强(48) 气体栓塞(50) 表面吸附和表面活性物质(50)	

§ 4-3 热力学定律.....	51
热力学系统(51) 内能(52) 热量和功(52) 热力学第一定律(52) 人体的能量交换(53) 热力学第二定律(53) *热力学第二定律的统计意义(55) *热力学第二定律与生命系统(55)	
第五章 电磁学基础	57
§ 5-1 静电场.....	57
电场(57) 电场强度(58) 电势(59) 电偶极子(60) 电场中的电介质(61) 电场的能量(63)	
§ 5-2 稳恒电流.....	65
电流强度与电流密度(65) 欧姆定律的微分形式(67) 直流电桥(68) *直流电对机体的作用(69)	
§ 5-3 磁场.....	69
磁场 磁感应强度(69) 磁感应线与磁通量(71) 电流的磁场(71) 安培力与洛仑兹力(73) 电磁感应和电磁波(74)	
第六章 医用电子测量技术	78
§ 6-1 测量系统的组成.....	78
§ 6-2 信号的检测.....	78
电极(78) 医用换能器(80)	
§ 6-3 信号的放大.....	84
晶体管放大器(85) 放大器的频率特性(88) *干扰与抑制(89)	
§ 6-4 信号的显示.....	89
描记器(90) 示波器(90)	
第七章 物理光学	95
§ 7-1 光的干涉.....	95
杨氏双缝实验(95)	
§ 7-2 光的衍射.....	96
单缝衍射(97) 圆孔衍射(99) 衍射光栅(100)	
§ 7-3 光的偏振.....	102
自然光和偏振光(102) 起偏和检偏(102) 双折射现象(103) *旋光性(105)	
§ 7-4 光的量子性.....	106
普朗克的量子假说(106) 介质对光的吸收(106) *光电效应(107) 德布罗意波(108)	
* § 7-5 红外线和紫外线.....	109
第八章 几何光学	111
§ 8-1 球面折射.....	111
单球面折射(111) 共轴球面系统(113) 薄透镜(114) 共轴球面系统的三对基点(116)	
§ 8-2 眼睛.....	118
眼的结构(118) 眼的分辨本领(119) 非正常眼的矫正(120)	
§ 8-3 光学仪器.....	122
放大镜(122) 显微镜(123) 显微镜的分辨本领(124) *电子显微镜(125) *纤镜(126)	
第九章 原子物理学基础	128

§ 9-1 原子结构	128
玻尔氢原子理论(128) *原子的电子壳层结构(131)	
§ 9-2 激光	133
激光产生原理(133) 激光的特性(136) *氦-氖激光器(137) *激光在医学上的应用(137)	
§ 9-3 X射线	138
X射线的产生及其性质(138) X射线的强度和硬度(139) 连续X射线(140) *标识X射线(142) X射线的吸收(142) *X射线的医学应用(143)	
§ 9-4 原子核的放射性	144
原子核的结构(144) 原子核的放射性衰变(146) 放射性衰变的规律(149) *射线的剂量(151) *放射性核素在医学上的应用(151)	
附录一 常见物理常数	153
附录二 希腊字母	153
附录三 医用物理学的标准男人数据	154

第一章 力学基本知识

力学是物理学中研究机械运动规律的分科。物理学中的许多基本概念，例如力、动量、能量、功等，都是在力学部分中首先提出的。因此，力学是研究物理学其它部分的基础。

在这一章中，我们将就后续各章涉及到的力学问题，提供最基本的力学知识。

§ 1-1 牛顿运动定律

牛顿三大定律

在经典力学的范围内，牛顿三大定律不仅是质点运动的规律，而且也是研究一般物体机械运动的基础。

1. 牛顿第一定律

牛顿第一定律可以表述为：任何物体都保持静止或匀速直线运动状态，直到其它物体所作用的力迫使它改变这种状态为止。

牛顿第一定律给出了力是物体间的相互作用这样一个基本概念。定律指出物体不受另一物体作用时，它将保持原来的状态，可见力又是改变物体运动状态的原因。

牛顿第一定律指出，任何物体都具有一种保持原来运动状态的特性，这种特性称为物体的惯性。惯性是物体所固有的属性。

2. 牛顿第二定律

牛顿第二定律可以表述为：在受到外力作用时，物体所获得的加速度的大小与合外力的大小成正比，并与物体的质量成反比，加速度的方向和合外力的方向相同。

牛顿第二定律的数学表达式为

$$F = ma \quad (1-1)$$

或

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

众所周知，牛顿第二定律是经典力学的基础，它给出了力、加速度、质量三者的数量关系。必须指出，牛顿第二定律揭示了力对物体的瞬时作用规律。当物体受到外力作用时，物体将立即产生按定律所确定的加速度，加速度的产生并不是逐渐的。当外力从物体上移去时，物体运动的加速度立即等于零，而不是逐渐减少的。

3. 牛顿第三定律

牛顿第三定律可以表述为：当物体A以力F作用在物体B上时，物体B也必定同时以力F'作用在物体A上，F与F'在同一条直线上，大小相等而方向相反。

牛顿第三定律表述中的F和F'，又称为作用力和反作用力。究竟哪一个为作用力哪

一个为反作用力，视研究对象而定。但必须指出，作用力和反作用力总是同时出现的，而且作用在两个不同的物体上。

*经典力学的适用范围

前面我们已经阐述了牛顿的三条运动定律，以牛顿运动定律为基础的力学通常称为经典力学或牛顿力学，以区别于现代物理中的其他力学。因为物体的机械运动是最简单最基本的运动形式，也是人们经常遇到的运动形式，所以经典力学是自然科学中一门发展最早的学科，也是最先成为理论严密、体系完整的学科。

但是，任何理论都只代表某一发展阶段中的相对真理，既要来自实践中来，还要继续在实践中加以检验并求得发展。自十九世纪以来，物理学家相继发现有一些实验事实不能用经典力学的理论解释，因而提出了和经典力学不同的观点，并建立了更为精确的相对论力学和量子力学。

举例来说，按照经典力学，质量 m 是一个与运动状态无关的不变量，但在相对论力学中则认为物体的质量是随着物体的速度而改变的。根据相对论力学的推论，如果 m_0 为物体静止时的质量(称为它的静止质量)， c 为光在真空中传播的速度(等于 3×10^8 米/秒)，那么物体在以速度 v 运动时的质量是

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1-2)$$

从上式看出，当物体的速度比光速小得多时， m 与 m_0 相差极小。例如物体以每秒30公里的速度运动时(这是地球公转的速度，它相当于发射到太阳系的宇宙火箭速度的两倍多)， $m = 1.00000005m_0$ 。这样小的质量差异实际上是无法观测的。但是如果物体的速度接近光速，那么质量的变化就非常明显了。

考夫曼曾用不同速度的电子，观察电子在磁场作用下的偏转，从而测定电子的质量。实验证明，电子的质量随速度不同而有不同的量值，其结果与式(1-2)很好地符合，如图1-1。例如，当 $v = 0.98c$ 时，电子的质量变化是十分显著的，此时

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (0.98)^2}} = 5m_0$$

近代的高能加速器，已可将质子也加速到具有 $v/c = 0.98$ 的程度了。

应当指出，当运动速度很小时，从相对论力学所得出的关系式都可以化成经典力学中的公式，因此平常我们用经典力学来讨论速度不大的物体的运动，也是很正确的。可以说，经典力学是相对论力学的特殊情况。对于高速(接近光速)运动的物体，经典力学就不能适用，而必须用相对论力学。

另一方面，经典力学所研究的对象是由大量分子、原子所构成的所谓宏观物体，在经典力学中，物体的位置和动量被看作是相互独立的，各自可以有一定的数值并且可以连续地变化。但在量子力学中，物体的位置和动量是相互联系、相互制约着的，并且一般作不连续的变化。当物体的质量很小时，这种量子力学规律的特性就明显地表现出来。但当物体的质量比电子等微粒的质量大很多时(例如质量为 10^{-10} 克的一粒尘埃)这种特性就不明显，量子力学的结论和经典力学的结论就近似相同。由此可知，经典力学只适用于常见的质量较大的物体，量子力学可以适用于质量很小的微粒。这一事实

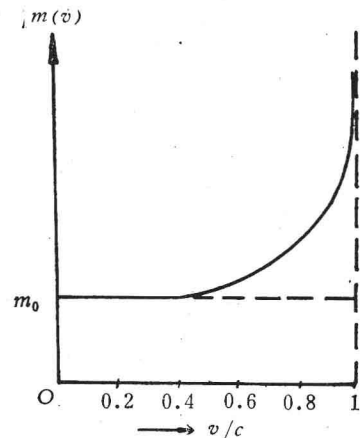


图1-1 电子质量随速度不同而改变

也说明了电子、光子等粒子的运动和一般物体的机械运动是有本质区别的。

由上所述可知，只有当物体的速度极大或物体的质量极小时，经典力学才不能适用，而必须为相对论力学或量子力学所代替。对于普通的物体(包括一般科学技术上所应用的物体)来说，经典力学还是有它很广阔的适用范围。

最后还须指出，虽然经典力学中的若干概念已被修正，经典力学的若干定律有一定的适用范围，但是经典力学中所讲的动量守恒定律、动量矩守恒定律和能量守恒定律这三条守恒定律，直到现在，并未发现它们的适用范围有何限制。在任何已经研究过的各种现象中，这三条守恒定律都被证明是完全正确的。事实上，前两条守恒定律都另有实验基础，不一定要从牛顿定律导出，而后一守恒定律则不属于经典力学范围之内，因此，牛顿定律和由它导出的各种结论虽有一定的适用范围，而上述三条守恒定律则是普遍的规律。

§ 1-2 功和能

功的概念

物理学中功的概念是从人的劳动与生产实践中形成的。恒力的功的定义是：力在作用点位移方向的分量和位移大小的乘积。例如在水平面上有一物体，在水平恒力 F 的作用下沿力的方向运动，位移为 s 。力 F 对物体所做的功 A 为

$$A = Fs$$

如果 F 和 s 不在同一方向，两者之间的夹角为 α ，则功 A 为

$$A = F \cos \alpha s = Fs \cos \alpha \quad (1-3)$$

功是标量，它只有大小，没有方向。恒力作功是一种特殊情况，我们已比较熟悉，这里不多加讨论。现在介绍变力的功。

在一般情况下，作用在物体上的力 F 的大小和方向都在改变，物体将作曲线运动。显然，我们不能直接应用式(1-3)来计算功值，而必须将上述结果加以推广。

设一物体在变力的作用下作曲线运动，如图 1-2 所示。现在来计算变力 F 在 ab 这段路程上所做的功。

由于 F 是变力，它的大小和方向随时在改变，我们需要把全部路程分成许多极小的位移元，如 Δs_i 等，在各段位移元内，力都可视为不变。于是力在第 i 段位移中的功是

$$\Delta A_i = F_i \cos \alpha_i \Delta s_i$$

而力在从 a 到 b 的全部路程中的功近似为

$$A \approx \sum F_i \cos \alpha_i \Delta s_i \quad (1-4)$$

若分段越多，上式的和越接近总功 A 。当 Δs_i 趋于零时，上式求和的极限等于总功

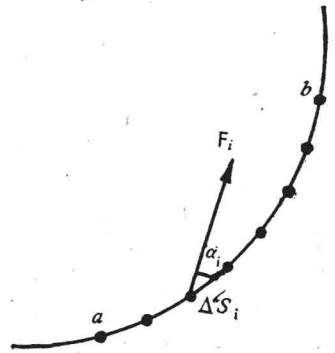


图1-2 变力的功

$$A = \lim_{\Delta s_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{\infty} \Delta A_i = \lim_{\Delta s_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{\infty} F_i \cos \alpha_i \Delta s_i$$

计算上式的数值时，可用图解的方法。当力随路程 s 的变化关系为已知时，以 $F \cos \alpha$ 为纵坐标， s 为横坐标，就可作出表示 $F \cos \alpha$ 随 s 的变化关系曲线如图 1-3 所示。由于每个小元功 $\Delta A_i = F_i \cos \alpha_i \Delta s_i$ 的数值等于图中一个窄条 $ABCD$ 矩形面积的数值，在 Δs_i 趋近于零的极限情况下，所有小元功的总和就是变力 F 在整个路程上所作的功，它等于变力曲线与 s 轴在 a 与 b 之间的面积。用图解法求功有直接、方便的优点，面积的大小可用面积仪求出。

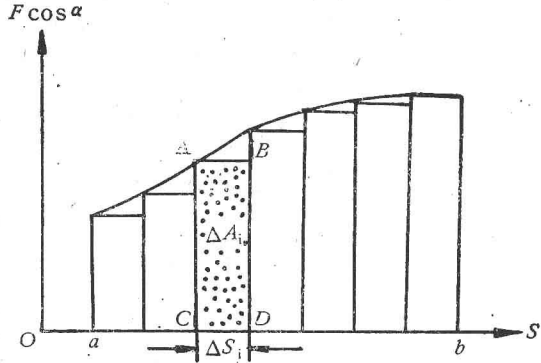


图1-3 变力作功的示意图

假如有许多力作用于同一物体上，我们不难证明合力的功等于各分力之功的代数和。

在国际单位制中，功的单位是牛顿·米，称为焦耳。1焦耳等于力在作用点位移方向的分量为1牛顿、作用点位移为1米时，此力所作的功。

功能原理与机械能守恒定律

能量的概念是物理学中最重要的概念之一，一个物体能够作功，我们就说这个物体具有能量。功和能是两个密切联系的物理量。下面我们在动能定理的基础上讨论功能原理和机械能守恒定律。

对单个物体来说，合外力对物体所作的功等于该物体动能的增量，这称为单个物体的动能定理。它可推广到很多物体组成的系统。对于系统中，每一个物体都可以写出一个方程。然后把它们加在一起，就得到系统的动能定理，显然它和单个物体的动能定理，有相同的形式。

$$A = E_k - E_{k_0}$$

这时 E_k 和 E_{k_0} 表示系统终态和初态的总的动能， A 为作用在各个物体上一切力所作功的代数和。

对于一个系统来讲，作用力可以分为外力和内力，外力是指系统外其它物体对系统内各物体的作用力，内力是指系统内各物体之间的相互作用力。而内力又可分为保守内力和非保守内力。如果一种力，它所作的功与运动物体经历的路程无关，仅由运动物体的起点和终点的位置所决定。或者说，若物体沿任意闭合路径绕行一周，力所作的功恒为零。那么，这种力称为保守力，如重力和弹性力都是保守力。凡不具有上述特性的力称为非保守力，如摩擦力是非保守力。若用 $A_{外}$ 、 $A_{保}$ 、 $A_{非保}$ 分别表示外力、保守内力、非保守内力对系统所作的功，于是上式可写成

$$E_k - E_{k_0} = A_{外} + A_{保} + A_{非保}$$

保守力所作的功等于系统势能增量的负值

$$A_{保} = -(E_p - E_{p_0})$$

所以

$$\begin{aligned}
 E_k - E_{k0} &= A_{\text{外}} - (E_p - E_{p0}) + A_{\text{非保}} \\
 (E_k + E_p) - (E_{k0} + E_{p0}) &= A_{\text{外}} + A_{\text{非保}} \\
 E_n - E_{n0} &= A_{\text{外}} + A_{\text{非保}}
 \end{aligned}
 \tag{1-5}$$

式中 $E_n = E_k + E_p$, $E_{n0} = E_{k0} + E_{p0}$, 表示系统末态和初态所具有的机械能。

式(1-5)说明: 对物体系统来说, 外力和非保守内力所作功的总和等于系统机械能的增量。这一结论称为功能原理。

由式(1-5)可知, 若 $A_{\text{外}} + A_{\text{非保}} = 0$, 则 $E_n - E_{n0} = 0$, 即 $E_n = E_{n0} = \text{恒量}$ 。这说明: 若一个系统只有保守内力做功, 而非保守内力和外力都不做功(或所作总功为零), 则系统的机械能保持不变。这一结论称为机械能守恒定律。

§ 1-3 刚体的转动

有一些物体在某种情况下, 可以看作是质点, 在另一些情况下, 又可以看作是刚体。那么在什么情况下, 物体可以看作是刚体呢? 所谓刚体, 就是在任何情况下, 其形状和大小都不发生变化的物体。也就是说, 物体上任意两个质点之间的距离保持不变。刚体的运动规律, 反映了机械运动中另一种典型的运动形式。

刚体最简单的运动是平动和转动。如果刚体内任何一条固定的直线在运动中始终保持它的方向不变, 这种运动称为平动。如果刚体运动时, 刚体内部的质点都绕同一直线作圆周运动, 这种运动称为转动, 该直线称为转轴。如果转轴固定不动就称为定轴转动。本节只讨论刚体绕定轴的转动。

描写转动的几个物理量

1. 角坐标 ϕ

角坐标是描写转动体上任意一点所处位置的物理量, 单位用弧度。

2. 角位移 $\Delta\phi$

角位移 $\Delta\phi$ 是描写刚体转动时, 刚体上任意一点位置变化的物理量。如图1-4所示, 刚体上一点 P , 初始位置时 OP 与 Ox 夹角为 ϕ_0 。经过 Δt 时间后, 转到 P' 。 OP' 与 Ox 夹角为 ϕ , 则 $\Delta\phi = \phi - \phi_0$ 。 $\Delta\phi$ 叫做在 Δt 时间内的角位移, 单位用弧度。

3. 角速度 ω

角速度是描写角位移变化快慢的物理量, 如在 Δt 时间内发生了 $\Delta\phi$ 角位移, 则在这段时间内的平均角速度为

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \tag{1-6}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时式(1-6)写成

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \tag{1-7}$$

式(1-7)中 ω 表示瞬时角速度, 它表示刚体转动时某一时刻或某一位置的角速度。角速度的单位是弧度/秒。

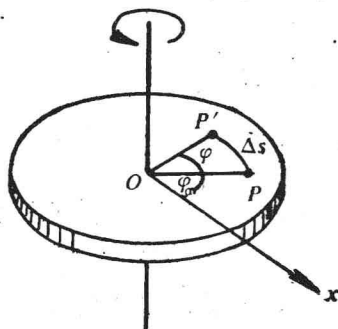


图1-4 刚体的转动

角速度 ω 是一个矢量,它的方向是这样规定的:将右手伸出,四手指和大拇指垂直,若四手指弯曲的方向,指向转动的方向,则大拇指所指的方向是角速度 ω 的方向。可见角速度的方向垂直于转动平面,与转轴方向一致。对于定轴转动来说,角速度方向只有两个,通常规定,逆时针方向转动时,角速度为正,顺时针方向转动时,角速度为负。

4. 角加速度 β

角加速度是描写角速度变化快慢的物理量。如果在 Δt 时间内,角速度改变了 $\Delta\omega$,则

$$\bar{\beta} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (1-8)$$

式(1-8)表示在 Δt 时间内的平均角加速度,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,式(1-8)写成

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (1-9)$$

式(1-9)表示瞬时角加速度。角加速度的单位用弧度/秒²。角加速度也是一个矢量,它的方向依赖于角速度的变化。对于定轴转动,若角速度随着时间逐渐增大,则角加速度为正,其方向和角速度的方向一致。反之则为负,其方向和角速度的方向相反。

线量和角量的关系

为了讨论转动,我们引入了角坐标 ϕ ,角位移 $\Delta\phi$,角速度 ω ,角加速度 β 。它们和研究平动时引入的线坐标 x ,线位移 Δx ,线速度 v ,线加速度 a 是一一对应的。

在图1-4中, P 为刚体上任意一点,设在 Δt 时间内走过了路程(弧长)为 Δs ,而此过程中,刚体的角位移是 $\Delta\phi$,设 P 点的矢径为 r ,则由图中可知 Δs 与 $\Delta\phi$ 有如下关系

$$\Delta s = r\Delta\phi \quad (1-10)$$

由此可进一步求得 P 点的速度和刚体的角速度之间的关系如下

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} r \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = r\omega \quad (1-11)$$

根据以上结果,又可以求得 P 点的法向加速度 a_n 和切向加速度 a_t 与刚体的角加速度 β ,角速度 ω 之间的关系

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{(r\omega)^2}{r} = r\omega^2 \quad (1-12)$$

$$a_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(r\omega)}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = r\beta \quad (1-13)$$

有了以上的关系式,我们只要知道了刚体的转动情况,就可以求出刚体上各点的运动情况。

刚体转动定律

1. 转动动能与转动惯量

现在我们来研究刚体的定轴转动。把刚体看成由许多质点所组成时,刚体的动能就

是各质点的动能之和。当刚体绕定轴转动时，各质点的角速度 ω 完全相同。设第*i*个质点的质量是 Δm_i ，和转轴的垂直距离是 r_i ，那么它的速度是 $v_i = r_i \omega_i$ ，它的动能为

$$\frac{\Delta m_i v_i^2}{2} = \frac{\Delta m_i r_i^2 \omega^2}{2}$$

整个刚体的动能则为

$$\sum \Delta m_i r_i^2 \omega^2 / 2$$

刚体绕定轴转动时的动能，称为转动动能。因为 $\omega^2/2$ 对各质点均为同值，可从总和号内抽出，所以转动动能是

$$E_k = (\sum \Delta m_i r_i^2) \frac{\omega^2}{2}$$

若以符号*I*代表 $\sum \Delta m_i r_i^2$ ，即

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1-14)$$

这就是刚体转动动能的表达式。其中 $I = \sum \Delta m_i r_i^2$ 是每个质量元的质量 Δm_i 与它到转轴的垂直距离平方 r_i^2 的乘积的总和。对给定转轴的刚体来说各质量元至转轴的距离不随刚体的转动而变化，故这个总和具有一个确定的数值，叫做刚体对给定轴的转动惯量。将刚体转动动能 $\frac{1}{2} I \omega^2$ 与平动动能 $\frac{1}{2} m v^2$ 相比较，*I*相当于*m*，可见在刚体转动中，转动惯量起着平动中质量的作用。表1-1给出了一些物体对不同转轴的转动惯量。

表1-1 转动惯量

物 体	转 轴	转动惯量
细 棒 (质量 <i>m</i> , 长 <i>l</i>)	通过中心与棒垂直	$\frac{1}{12} m l^2$
	通过一端与棒垂直	$\frac{1}{3} m l^2$
细 圆 环 (质量 <i>m</i> , 半径 <i>r</i>)	通过中心与环面垂直	$m r^2$
	沿 直 径	$\frac{1}{2} m r^2$
薄 圆 盘 (质量 <i>m</i> , 半径 <i>r</i>)	通过中心与盘面垂直	$\frac{1}{2} m r^2$
	沿 直 径	$\frac{1}{4} m r^2$
球 体 (质量 <i>m</i> , 半径 <i>r</i>)	沿 直 径	$\frac{2}{5} m r^2$
	沿 切 线	$\frac{7}{5} m r^2$

2. 力矩与转动定律

这里，我们先来认识一下力矩的概念，然后研究刚体的角加速度和刚体所受外力矩之间的定量关系。

一个具有固定轴的静止物体，在外力作用下可能发生转动，也可能不发生转动。物体的转动与否，不仅与力的大小有关，而且与力的作用点以及作用力的方向有关。例如，当我们开关门窗时，如果作用力与转轴平行或通过转轴，那么不论多大的力也不能