



中国科学院教材建设专家委员会规划教材

全国高等医药院校规划教材

医学物理学

第3版

甘平 主编



科学出版社

www.sciencepress.com



中华人民共和国教育部
全国高等学校教材
全国高等学校医学类规划教材

医学物理学

第3版

王力军 主编



人民卫生出版社
人民卫生出版社

中国科学院教材建设专家委员会规划教材
全国高等医药院校规划教材

医学物理学

第3版

主 编 甘 平
副主编 楼渝英 丘翠环 高 斌
编 委 (按姓氏笔画排序)
甘 平(重庆医科大学)
丘翠环(广东药学院)
苏爱华(重庆医科大学)
吴 静(郟阳医学院)
陈 萍(重庆医科大学)
陈龙聪(重庆医科大学)
张建军(石河子大学)
张淑丽(齐齐哈尔医学院)
奉 娇(重庆医科大学)
高 斌(重庆医科大学)
楼渝英(重庆医药高等专科学校)
熊兴良(重庆医科大学)

科学出版社

北 京

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303(打假办)

内 容 简 介

本教材是在前两版的基础上,组织多所医学院校教学力量,根据目前医学物理学教育的现状,并参照国家教育部颁发的医学物理学教学基本要求,总结了多所院校近年来医学物理学教学改革的经验,吸取国内外有关教材的优点而编写的。教材既重视物理学知识的系统性,又重点突出医学物理学的基本特点,注重物理学原理在医学临床治疗和诊断技术中的应用,着重培养学生分析问题和解决问题的能力以及科学的创新思维方式。

本书主要用于七年制、五年制及高职专科临床医学、儿科、预防医学、口腔医学、影像医学、麻醉、卫生管理、卫生检验、医学检验、食品营养与检验、护理、康复治疗技术、医疗美容技术、妇幼保健、药学、生物医学工程等医学专业教学,也可作为参考书供生命科学有关专业的师生和研究人员使用。同时备有配套实验教材《医学物理学实验》。

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学/甘平主编. —3版. —北京:科学出版社,2009

(中国科学院教材建设专家委员会规划教材)

ISBN 978-7-03-025416-0

I. 医… II. 甘… III. 医学物理学-高等学校-教材 IV. R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 151822 号

策划编辑:邹梦娜 李国红 / 责任编辑:邹梦娜 李国红 / 责任校对:朱光光
责任印制:刘士平 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2009年9月第三版 印张:22 1/4

2009年9月第七次印刷 字数:528 000

印数:15 501—20 501

定价:39.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自从2001年主编并出版本书第1版以来,现在呈现在我们面前的已经是该书的第3版了。回首本书不断更新的过程,依稀能够清晰地看见她成长的历程。虽然书名由第1版的《医用物理学》改为现在的《医学物理学》,但是,在不断总结教学改革经验,吸取国内外有关医学物理学教材优点的基础上,通过本教材的改进建立一个独具特色的、面向现代社会的医科大学物理课程教学体系的愿望仍然未改。

任何一门自然学科都是研究物质的运动规律,仅有简繁之分。物质运动的形态是多种多样的,它们既服从共同的普遍法则,又遵守各自独特的规律。物理学研究的运动普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中;一切自然现象都毫无例外地受到物理定律的约束。正是随着物理学与医学这两门学科不断发展,互相渗透,互相促进,从而形成了医学物理学。

认清医学物理学的特点,转变原有的教学思想,合理组织医学物理学的教学内容,仍然是医科大学医学物理学教学改革的关键,也是第3版编写的宗旨。修订后的第3版教材针对现代医学科学发展的需要,在充分发扬前两版教材成功经验的基础上,使教材更符合当前医学物理学的教学需要。保持本书一贯秉承的突出医科大学物理学的基本特点,注重物理学原理在医学临床治疗和诊断技术中的应用,借此培养学生理论联系实际的能力的编写风格。因此,特别加强了物理学研究方法、生物传感器和医学成像技术物理学原理的相关内容,除了将四大现代医学成像(X射线成像、磁共振成像、核医学成像和超声波成像)的物理原理各独立一章以外,还新增加了绪论和生物传感器两章。第3版的另一个特点是组织了兄弟院校的同行共同编写,从而凝聚了更多的教学经验。

全书共安排16章的学习内容,适用于高等医药院校七年制、五年制及高职专科学学生36~100学时的理论教学,最后两章可作为选修或者自学的内容。另外,不同学院不同专业可结合本专业的具体特点及教学计划选取有关章节。另外,备有由本人主编、已由科学出版社正式出版的配套实验教材《医学物理学实验》供选用。

本书主要用于五年制、七年制及高职专科临床医学、儿科、预防医学、口腔医学、影像医学、麻醉、卫生管理、卫生检验、妇幼保健、医学检验、食品营养与检验、护理、康复治疗技术、医疗美容技术、药学等专业教学,也可供医药院校其他专业,生命科学有关专业的师生和研究工作者作为参考书。

本书由甘平担任主编。参加本书编写的有(按姓氏笔画排序):甘平(重庆医科大学)、丘翠环(广东药学院)、苏爱华(重庆医科大学)、吴静(邵阳医学院)、陈萍(重庆医科大学)、陈龙聪(重庆医科大学)、张建军(石河子大学)、张淑丽(齐齐哈尔医学院)、奉娇(重庆医科大学)、高斌(重庆医科大学)、楼渝英(重庆医药高等专科学校)和熊兴良(重庆医科大学)。

本书在编写过程中曾借鉴了不少相关教材的优点,在此向所有编者一并表示谢意,并在主要参考文献中列出了其中的一部分。由于编者的水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2009年6月于山城重庆

目 录

前言	
绪论	(1)
第一章 人体力学的基础知识	(5)
第一节 质点力学的基本定律	(5)
第二节 刚体力学的基本定律	(10)
第三节 弹性力学的基本定律	(19)
第二章 流体的运动	(26)
第一节 理想流体的运动	(26)
第二节 连续性方程	(28)
第三节 理想流体的动力学方程	(29)
第四节 黏性流体的流动规律	(35)
第三章 液体的表面现象	(44)
第一节 液体的表面张力	(44)
第二节 弯曲液面的附加压强	(48)
第三节 附加压强在医学中的应用	(52)
第四节 液体与固体接触的表面现象	(54)
第四章 振动和波动及超声波成像的物理原理	(59)
第一节 简谐振动	(59)
第二节 实际振动	(64)
第三节 简谐振动的合成	(66)
第四节 简谐波	(72)
第五节 惠更斯原理及其应用	(80)
第六节 波的干涉	(82)
第七节 声波和超声波	(87)
第八节 多普勒效应	(93)
第九节 超声波成像的物理原理	(95)
第五章 生物热力学基础	(102)
第一节 热力学的基本概念	(102)
第二节 热力学第一定律	(104)
第三节 热力学第一定律的应用	(105)
第四节 热力学第二定律	(109)
第五节 生物热力学	(112)
第六章 静电场与心电图的物理原理	(115)
第一节 电场与电场强度	(115)

第二节	静电场的高斯定理	(120)
第三节	电场力做功与电势	(123)
第四节	电偶极子电场	(128)
第五节	静电场中的电介质	(131)
第六节	人体心电的物理原理	(135)
第七章	直流电	(142)
第一节	稳恒电流	(142)
第二节	电源电动势	(145)
第三节	基尔霍夫定律及其应用	(148)
第四节	电容器的充电及放电过程	(152)
第五节	电泳和电渗	(153)
第八章	电磁现象	(156)
第一节	磁感应强度	(156)
第二节	稳恒电流产生的磁场	(157)
第三节	磁场对电流的作用	(162)
第四节	磁介质	(166)
第五节	RL 电路的暂态过程及磁场的能量	(168)
第六节	电磁振荡和电磁波	(171)
第七节	高频电与生物磁场	(174)
第九章	波动光学	(178)
第一节	光的干涉	(178)
第二节	光的衍射	(187)
第三节	光的偏振	(196)
第四节	物质的旋光性	(200)
第五节	光的吸收和散射	(202)
第十章	几何光学	(207)
第一节	球面折射	(207)
第二节	薄透镜的成像公式	(210)
第三节	厚透镜的做图求像	(214)
第四节	眼睛的光学性质	(215)
第五节	光学仪器	(220)
第十一章	原子核物理学和核医学成像的物理原理	(228)
第一节	原子核的基本性质	(228)
第二节	原子核的衰变	(230)
第三节	放射性核素的衰变规律	(232)
第四节	射线与物质的相互作用	(235)
第五节	原子核技术在医学上的应用	(237)
第六节	核医学成像的物理原理	(239)
第十二章	光谱与激光在医学中的应用	(244)
第一节	可见光光谱	(244)

第二节	红外线和紫外线	(248)
第三节	激光	(250)
第四节	激光的医学应用	(256)
第十三章	X 射线成像的物理原理	(260)
第一节	X 射线的发现及其基本性质	(260)
第二节	X 射线谱	(263)
第三节	X 射线的衰减	(268)
第四节	X 射线在医学中的应用	(273)
第五节	X 射线计算机断层摄影术	(276)
第十四章	核磁共振成像的物理原理	(293)
第一节	核磁共振的物理学原理	(293)
第二节	核磁共振成像原理	(298)
第三节	磁共振技术在医学中的应用	(304)
第十五章	生物传感器	(308)
第一节	传感器简介	(308)
第二节	生物传感器	(310)
第三节	几种常见的生物传感器	(312)
第十六章	相对论力学与量子力学	(322)
第一节	相对论力学的基础知识	(322)
第二节	量子力学的基础知识	(329)
主要参考文献	(348)

绪 论

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学,是探讨物质结构、物质间相互作用及其运动规律的科学。它包括力学、声学、热学、电磁学、光学、原子和原子核物理学等多个分支学科。其基本理论和方法对现代科学技术(包括生物学和医学)的发展起着十分重要的作用。它尽可能广泛地揭示自然界的各种基本规律,从而成为了自然科学的理论基础。

医学是一门以人体为研究对象的自然学科。但是,一直到 20 世纪初期,医学基本上是一门形态科学,其研究方法主要是定性分析。而物理学则有其严格的定量理论,具有先进的实验方法和技术。

随着物理学原理、方法和技术在基础医学研究、临床医学的诊断和治疗中的逐步应用,从而促进了医学在认识上、理论上和测试手段上的发展和提高。随着物理学与医学这两门学科的不断发展,互相渗透,互相促进,于是形成了医学物理学。

一、物理学的内容和学科特点

(一) 学科定义

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学。它的研究对象是整个物质世界,它为人们深刻地认识世界提供了理论基础和实验依据。

(二) 学科内容

物理学的研究内容包括力学、声学、热学、电磁学、光学、原子和原子核物理学等多个分支学科。如果以其理论完善的先后时间划分,并以 20 世纪为分界线也可分为经典物理学和现代物理学(以量子物理学和相对论为代表)。

物理学家们从空间大尺度探索宇宙的结构、起源与演化,其相应的研究领域被称为天体物理学;从空间向小尺度探索物质的组成,其相应的研究领域为粒子物理学,这两个领域是目前物理学理论研究的前沿。在物质世界所涉及最大的空间尺度范围内的最大值是 10^{26} m(约 150 亿光年);最小可观测的空间尺度是普朗克长度,大约是 10^{-35} m;时空所涉及最大的时间是宇宙年龄,约为 10^{18} s(约 150 亿年);可观测的最小时间是约为 10^{-43} s。物理学按照时空尺度把物质世界分成宇观体系、宏观体系、介观体系和微观体系。物质世界基本的相互作用为:强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和引力相互作用。

(三) 学科特点

1. 成熟的定量学科 定量学科要求必须用定量的数值或具体的形象来说明被研究的对象和有关规律。其成熟的标志是具有严谨的理论体系和精巧的实验技术,任一分支只由

几个基本规律或概念贯穿其中。

2. 其研究方法是发现其他规律的钥匙 物理学研究方法:首先根据观测事实、实验或原理提出研究命题;然后,再根据问题进行抽象和简化,建立相应的物理模型;最后,用已知原理与推测做出定性解释,并用数学工具根据现有理论作定量计算和逻辑推理。当实验事实与旧理论不相符时,常常会让物理学家们兴奋不已,同时也激发他们进一步探索未知世界。因为这种不相符的实验结果可能正蕴涵着重大的理论突破。如果理论或者假说与实验或观测事实有出入,就需要进行修正,再做实验检验,经过反复多次的实验,从而找出自然界的客观规律。

物理学的分析方法可分为逻辑分析方法和物理学思维方法两大类:

(1) 逻辑分析方法(包括分析综合法和归纳演绎法)

1) 分析综合法:分析是把“整体”分解成“部分”;综合是把“部分”结合成“整体”。两者是一种可逆的思维过程,组合成综合分析法。比如,任何一种复杂的振动都可以分解成若干简谐振动,用傅里叶级数展开;反之,任何一种复杂的振动都是由若干简谐振动叠加而成。

2) 归纳演绎法:归纳是从“个别”到“一般”的认识方法;演绎则是从“一般”到“个别”的认识方法,即从一个已知的一般原理出发,考察某一特殊对象,从而得出结论。同样,归纳和演绎是科学认识过程中两个既互相独立又互相依存的思维方法。

(2) 物理学思维方法:在物理学的发现进程中,一个个奇迹的创造常常是科学家独特创造性思维的结果。这里仅简介三种常见物理思维方法。

1) 理想模型法:理想模型是为研究复杂的物理过程而建立的、能够抽象反映事物特征和本质的理想系统。在建立理想模型时,需要对复杂事物加以抽象简化,突出研究对象的主要特征。运用理想模型可以清晰地进行理论推理,从而得出相关的物理规律。比如,在研究复杂的流体运动规律时,就使用了理想模型的方法:先建立流体的理想模型——理想流体,得出相关的物理规律伯努利方程;然后从理想流体到牛顿流体,修正模型,得出反映牛顿流体流量规律的泊肃叶定律,逐渐让理想模型与实际的研究目标相吻合。在物理学中,质点、刚体、弹性体、弹簧振子、点电荷、绝对黑体以及各种原子模型等也都是典型的理想模型。

2) 物理类比法:类比方法是利用两种科学定律之间的相似性,用其中的一个去说明另一个。物理类比可以沟通不同领域的研究方法,也可以启发新的物理思想。比如,通过类比方法,可以让物理规律的线条清晰化:像重力势能、电势能、液体表面能和分子原子能态都有能量越低系统越稳定的规律;电力线、磁力线和不可压缩流体流线都是描述场状态的几何描述等等。

3) 物理假说法:假说是依据一定的科学理论和事实对研究中的问题提出假定性看法和说明。物理假说是科学认识发展的必要环节,也是物理学研究的主要方法。比如,普朗克为解释他与实验结果完全吻合的辐射公式,提出了能量量子化假说;爱因斯坦为解释光电效应实验提出了光量子假说等等。

综上所述,物理学研究方法是在学习过程中开启知识宝库的钥匙,是在研究领域从事科学创新的锐利武器。

3. 其理论突破将推动其他学科的发展和改变物质世界 物理学与科学技术的关系可以分为两种基本模式:一是由于生产实践需要而创建了技术。比如,从18世纪至19世纪的

蒸汽机等热机技术和热力学理论；二是先在实验室里揭示其基本规律，建立起完整的理论，再在实际生产中发展成为一种全新的技术。比如，在法拉第发现电磁感应现象以及麦克斯韦建立电磁场方程组的基础上创建了今天的现代电力工程与无线电技术。因为物理学已经成为现代高科技发展的先导和基础，因此，在当今世界上第二种模式更为重要。另外，蒸汽机、电磁、相对论、超导和纳米技术等推动其他学科的发展和改变物质世界。特别是相对论甚至对哲学领域产生了重大的影响。

整个 20 世纪自然科学的发展趋势就是以物理学的巨大变革为基础带动其他领域的科技进步。当今科学技术飞速发展充分证明，科研成果转化为生产力的周期在迅速缩短，知识更新的节奏也在不断加快，而作为知识核心的物理基本理论是长久不衰的。通过物理学的学习来培养学生正确的科学发展观是物理学科的教学特点之一。

二、物理学与医学的关系

（一）医学的定义

医学是人为研究对象的生物科学。它研究最高级的运动形式——生命现象。目前医学正在从宏观到微观，从定性到定量，从细胞水平到分子和量子水平，从手工的、机械的、接触型操作向自动化、智能化、非接触型操作发展。

（二）相互联系

1. 学科本质 任何一门自然学科都是研究物质的运动规律，仅有简繁之分。物质运动的形态是多种多样的，它们既服从共同的普遍法则，又遵守各自独特的规律。物理学研究的运动普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中。比如，人体内的神经电活动包含着复杂的电学过程；一切自然现象都毫无例外地受到能量守恒定律、万有引力定律以及其他物理定律的约束。

2. 学科的发展

(1) 定量分析：量子物理学+计算机技术⇒生命之谜。

(2) 交叉边缘学科：物理学与医学这两门学科的互相渗透形成了医学物理学；与生物学、医学、工程学的互相渗透又形成了生物物理学和生物医学工程学等。

生命是一种极其复杂的运动形式。即使像细菌这样最简单的生物也具有复杂结构。生命现象的复杂性，不仅要从微观角度看（即从分子水平上阐明机制），还需要从宏观规律上加以说明，特别要对控制、调节、自组织、分化、发育、生长、信息处理以及个体与环境间的关系等问题进行研究。当人们对生命现象的认识达到一定深度的时候，自然而然地会将医学研究与物理学的理论和思想方法结合起来，从而导致生命科学从描述宏观形态到探索微观机制，进入对生命现象本质性的研究阶段。

三、不断探索生命与自然奥秘

（一）物理学知识是了解生命现象所不可缺少的理论基础

例如，要了解人体骨骼和关节受力情况必须掌握弹性力学和静力学的知识；要了解血

液在心血管系统中运动的情况必须知道流体力学的基本定律;要了解眼睛的作用,不仅要掌握几何光学的原理,还要掌握波动光学的方法;要了解声音的感觉及超声在医学上的应用,必须学习机械波的物理性质;要了解心电、脑电、肌电等必须具备有关的电学知识等等。

(二) 物理学的方法和技术为临床医学提供了许多新的检测和治疗手段

几乎所有与物理学基本原理有关的现代高新技术都被医学所利用,为医学诊断和科学研究提供了强有力的工具。在物理治疗方面除了传统的光疗、热疗、电疗、声疗、X放射治疗之外,还有很多新的物理治疗手段和治疗仪器。例如,HIFU技术、血液透析技术、低温冷冻技术以及高频电刀、超声刀、心脏起搏器、心脏除颤器、医用激光器、X刀、医用加速器、钴-60治疗机等。

医学物理学是把物理学的原理和方法应用于人类疾病的预防、诊断、治疗和保健的一门交叉学科。两项开创性研究(1895年伦琴发现X射线并用于人体摄影和1898年居里夫人发现放射性元素镭并用于肿瘤的治疗)奠定了医学物理学的基础。作为一个独立学科,它形成于20世纪50年代,包括放疗物理、影像物理、核医学物理、保健物理、激光和超声物理等子学科。1974年,国际医学物理组织(IOMP)成立,标志着医学物理学科走向成熟。中国医学物理工作者,于1981年成立中国生物工程学会医学物理分会。1986年,医学物理分会以中国医学物理学会的名义加入IOMP。

在进入21世纪后物理学理论与医学研究的结合可以说是最具生机和活力的结合之一。从全球基因组计划的实施到蛋白质结构的揭秘,从干细胞学说的兴起到脑功能研究的深入,无不以物理学的前沿理论与先进技术为基础和工具,同时也为物理学的发展提供了新的研究课题。物理科学与生命科学的结合将绘制出物质世界上最精彩、最具吸引力的图像。医学物理学的学习将把医学生带进这些五彩缤纷的物理世界中去,并给出一定的理论解释,从而激发医学生不断探索生命与自然奥秘的兴趣和热情。

(甘 平)

第一章 人体力学的基础知识

力学是研究物体机械运动规律及其应用的科学。人体力学是医学物理学和其他医学技术的基础。本章将重点介绍在变力的作用下,质点动力学的基本规律、刚体转动的基本规律、物体形变和弹性的基本规律。

第一节 质点力学的基本定律

一、单位和量纲

(一) 单位

对于任何一个物理量,为了定量地描述它必须选定一个基本量(fundamental quantity),这个基本量就是它的物理量单位(unit)。例如,长度用米(m)作单位,质量用千克(kg)作单位,时间用秒(s)作单位。

物理学的单位又分为基本单位和导出单位。基本单位是直接规定的,在国际单位制(SI)中,直接规定长度、质量和时间为力学基本量。米(m)、千克(kg)和秒(s)就是相应的力学基本单位。由基本单位导出的物理量单位统称为导出单位。力学中的其他物理量(如速度、加速度和力等)都为导出量,它们的单位(m/s, m/s², kgm/s²)就是导出单位。

(二) 量纲

表示一个物理量是由哪些基本量所组成的表达式称为该物理量的量纲式。在SI中,用L、M和T分别表示长度、质量和时间这三个力学基本量的量纲。由此,任何导出量都可以用这三个基本量的某种组合表示出来:

$$[Q] = M^p L^q T^r \quad (1-1)$$

上式称为物理量Q的量纲式(dimension formula),其中指数p, q, r分别称为物理量Q对质量、长度和时间的量纲指数。例如,速度、加速度、力和角度的量纲式分别为:

$$[v] = [s]/[t] = LT^{-1}$$

$$[a] = [v]/[t] = LT^{-2}$$

$$[F] = [m][a] = MLT^{-2}$$

$$[\varphi] = [s]/[r] = 1$$

以上表明:速度对长度的量纲为1,对时间的量纲为-1,对质量的量纲为零。角度的量纲为零。量纲式还可以用于检验等式。

由于在较为复杂的等式中常常包含若干项物理量,因此确定等式是否正确,检验等式中各项的量纲式是必不可少的步骤。例如,在自由落体运动中,落体的末速度为: $v = (2gh)^{1/2}$ 。该等式左边的量纲式为:LT⁻¹,等式右边的量纲式为:(L² T⁻²)^{1/2} = LT⁻¹。由此

可见,该式两端各项的量纲是正确的。

二、质点的平面运动

(一) 参照系

为了描述某个物体的运动,首先要选定另一个物体(被看成相对静止的物体)或物体系统作为参考标准,这种被选来作为参考标准的物体或物体系统称为参照系(frame of reference)。选择不同的参照系描述同一物体的运动,其结果是不相同的。参照系的选择要根据研究对象的特点来确定。通常选用固定在地面的坐标系作为参照系来定量描述物体的运动。

(二) 位置矢量和位移

假设一个质点在 XOY 平面内沿着曲线 ABC 运动(如图 1-1),在 $t=0$ 的时刻,质点在 A 点,然后依次到达 B, C 等各点。从坐标原点 O 分别指向 A, B, C 各点的矢量 OA, OB, OC 等称为各该时刻的位置矢量(position vector)。

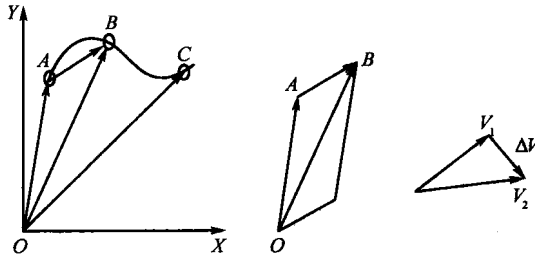


图 1-1 位置矢量和位移

从 A 到 B 画出的矢量 AB 称为从 A 到 B 这一时间间隔内质点的位移(displacement)。一般用 Δs 表示位移,即 $\Delta s = AB$ 。显然,矢量 AB 与 OA, OB 的关系为

$$OB = OA + AB, \quad AB = OB - OA \quad (1-2)$$

即位移矢量 AB 是位置矢量的增量。

(三) 平均速度和瞬时速度

位移 AB 与所经历的时间间隔 Δt 的比值 $AB/\Delta t$ 称为该时间间隔内的平均速度。即 $\bar{v} = AB/\Delta t$ 。当时间间隔 Δt 趋近于零时, \bar{v} 的极限称为该时刻的瞬时速度,简称速度(velocity)。即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} AB/\Delta t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s/\Delta t = \frac{ds}{dt} \quad (1-3)$$

速度是位移对时间的一阶导数。 v 是矢量,它的方向与该时刻位移矢量的方向一致。

(四) 平均加速度和瞬时加速度

在一段时间间隔 Δt 之内,速度的增量 Δv 与 Δt 的比值,称为该时间间隔内的平均加速度。即 $\bar{a} = \Delta v/\Delta t$ 。当时间间隔 Δt 趋近于零时, \bar{a} 的极限称为该时刻的瞬时加速度,简称加速度(acceleration)。即

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta v / \Delta t = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (1-4)$$

瞬时加速度是位移对时间的二阶导数。瞬时加速度是矢量，它的方向与该时刻速度增量矢量的方向一致。

(五) 法向加速度与切向加速度

在质点作曲线运动的情况下，质点的加速度 a 可分解为沿轨道切线方向的切向加速度 a_t (tangential acceleration) 和沿轨道法线方向的法向加速度 a_n (normal acceleration)。如图 1-2 所示，总加速度 a 是 a_t 与 a_n 的矢量和：

$$\begin{aligned} a &= a_n + a_t \\ a &= (a_n^2 + a_t^2)^{1/2} = [(v^2/R)^2 + (dv/dt)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (1-5)$$

(六) 匀加速直线运动

假设质点作匀加速直线运动。 $t=0$ 时， $v=v_0$ ，由式 (1-4)

$$\text{可得} \quad dv = a dt \quad (1-6)$$

因为加速度不变，将上式积分得， $\int_{v_0}^v dv = v - v_0 = at$

$$\text{即} \quad v = v_0 + at \quad (1-7)$$

又因为 $v = ds/dt$ ，即 $ds = v dt$ 。

假设 $t=0$ 时， $s=s_0$ ，将上式积分得

$$\int_{s_0}^s ds = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

即 $s - s_0 = v_0 t + (1/2)at^2$ 或 $s = s_0 + v_0 t + (1/2)at^2$ ，

$$\text{如果 } s_0 = 0, \text{ 则 } s = v_0 t + (1/2)at^2 \quad (1-8)$$

上式即为匀加速直线运动的路程公式。

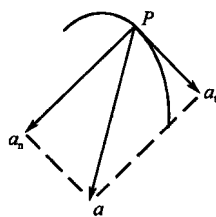


图 1-2 加速度的分解

三、质点动力学的基本定律

(一) 牛顿运动定律

1687 年，牛顿在他的著作《自然哲学的数学原理》中阐述了三条运动定律，后人称为牛顿运动定律 (Newton's Laws of Motion)。它不仅适合于质点的运动，也是研究一般物体运动的理论基础。

1. 牛顿第一定律 任何物体都保持静止状态或匀速直线运动状态，除非有外力作用迫使它改变这种状态。这个定律包含两层意义。首先，物体在没有外力作用的条件下，原来静止的保持静止状态；原来运动的物体将以原有的速度做匀速直线运动。换句话说，物体在没有外力的作用时，物体的运动状态不变，我们将物体具有保持原有运动状态的性质称为物体的惯性 (inertia)，因而牛顿第一定律也称为惯性定律。如果物体在外力作用下，它的运动状态就会发生改变，可见力是改变物体运动状态的原因。

2. 牛顿第二定律 物体运动的加速度 (acceleration) a 的大小与所受合外力 F 的大小成正比，与物体的质量 (mass) m 成反比，加速度的方向与合外力的方向一致。即

$$F=ma \quad (1-9)$$

牛顿第二定律阐明了力、质量和加速度之间的数学关系。注意：力和加速度都是矢量。

3. 牛顿第三定律 物体之间的作用力是相互的。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，而且 F' 与 F 大小相等，方向相反，作用在同一直线上。两力同时存在，同时消失。通常称其中任一力为作用力，另一力为反作用力。作用力与反作用力分别作用在两个物体上，因此不能相互抵消。

(二) 动能定理 机械能守恒定律

1. 功和功率

(1) 恒力的功：恒力的功等于在作用点位移方向的分力与位移大小的乘积：

$$W = F_s \cos\alpha \quad (1-10)$$

式中， α 是力的方向与位移方向的夹角。力和位移是矢量，而功是标量。式(1-10)为力和位移的标积，可写成：

$$W = F \cdot s \quad (1-11)$$

在国际单位制中，功的单位是焦耳(J)，其量纲为 ML^2T^{-2} 。

(2) 变力的功：假设在变力作用下，物体产生了位移，其变力所做的功由下列积分计算：

$$W = \int_a^b F \cos\alpha ds \quad (1-12)$$

(3) 功率：描述力对物体做功快慢程度的物理量称为功率。假设在 Δt 时间间隔内，力对物体所做的功为 ΔA ，则 ΔA 与 Δt 的比值 $\Delta A/\Delta t$ 称为这段时间的平均功率。当 Δt 趋于零时，比值 $\Delta A/\Delta t$ 的极限称为 t 时刻的瞬时功率，用 P 表示

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta A / \Delta t = \frac{dA}{dt}$$

在国际单位制中，功率的单位是瓦特(W)，其量纲为 $ML^2 T^{-3}$ 。

2. 动能和动能定理 假设质量为 m 的物体在合外力 F 的作用下，沿曲线从 a 运动到 b ，力 F 的切线分量为 $F \cos\alpha$ ，根据牛顿第二定律

$$F \cos\alpha = ma_t$$

式中： $a_t = dv/dt$ 是切向加速度，又因为 $v = ds/dt$ ， $ds = vdt$ ，所以在 ds 位移内，合外力对物体所做的功为

$$dW = F \cos\alpha ds = m(dv/dt)vdt = mv dv$$

用 v_a 和 v_b 分别表示物体在 a 点和 b 点的速度，利用式(1-12)可计算出合外力所做的功为

$$W = \int_a^b F \cos\alpha ds = \int_{v_a}^{v_b} mv dv = \frac{1}{2}mv_b^2 - \frac{1}{2}mv_a^2 \quad (1-13)$$

式中 $\frac{1}{2}mv^2$ 称为物体的动能(kinetic energy)，用 E_k 表示动能，用 E_{ka} 和 E_{kb} 分别表示物体在 a 处和 b 处的动能，则有

$$W = E_{kb} - E_{ka} \quad (1-14)$$

上式表明：合外力对物体所做的功等于物体动能的增量，这一结论称为动能定理。动能是标量，它的单位是焦耳(J)，量纲是 ML^2T^{-2} 。物体的动能越大，则它做功的本领也越大。

3. 保守力做功势能 首先讨论重力做功的情况。假设一个质量为 m 的质点,在重力作用下从 A 点沿着曲线运动到 B 点(图 1-3),计算重力所做的功,质点在曲线上移动 dl 重力所做的功为 $dW = mg dl \cos\theta$

质点从 A 点到 B 点由重力所做的总功为

$$W = \int_A^B dW = \int_A^B mg dl \cos\theta$$

因为, $dl \cos\theta = -dh$, 所以

$$W = - \int_A^B mg dh = -mg(h_B - h_A) = mgh_A - mgh_B$$

(1-15)

由此可见,重力所做的功等于势能的减少,即势能增量的负值。重力做功只决定于起点和终点的位置,而与所经历的路径无关。这是重力做功的重要特性。把具有这种特性的力称为保守力。

既然重力具有做功的能力,因此由地球和物体所组成的系统具有重力势能。重力势能为 $E_p = mgh + C$, 其中 C 是 $h = 0$ (即参考平面) 时的重力势能。

假设 $h = 0$ 时, $C = 0$, 则 $E_p = mgh$

(1-16)

式(1-16)还表明:重力做功使系统的重力势能降低。

4. 功能原理机械能守恒定律 现在考虑由 n 个质点组成的质点系,把适用于单个质点的动能定理推广应用到质点系,作用于各质点的力所做的功分别等于各质点的动能的增量:

$$W_1 = E_{k1} - E_{k10}$$

$$W_2 = E_{k2} - E_{k20}$$

.....

$$W_n = E_{kn} - E_{kn0}$$

式中: $E_{k1}, E_{k2}, \dots, E_{kn}$ 分别为各质点的末动能, $E_{k10}, E_{k20}, \dots, E_{kn0}$ 分别为各质点的初动能。将以上各式求和得

$$\sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n E_{ki} - \sum_{i=1}^n E_{ki0} \quad (1-17a)$$

系统内各质点所受的力包括外力和内力。无论外力和内力都可分为保守力与非保守力。作用于质点系各力的总功为

$$\sum_{i=1}^n W_i = W^e + W_c^m + W_{nc}^m = \sum_{i=1}^n E_{ki} - \sum_{i=1}^n E_{ki0} \quad (1-17b)$$

其中,系统内保守力所做的功等于势能增量的负值,即 $W_c^m = -(\sum_{i=1}^n E_{pi} - \sum_{i=1}^n E_{pi0})$

由此可得, $W^e + W_{nc}^m = (\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{pi}) - (\sum_{i=1}^n E_{ki0} + \sum_{i=1}^n E_{pi0})$

式中,动能和势能统称为机械能。分别以 E_0 和 E 表示初机械能和末机械能,

即 $E_0 = (\sum_{i=1}^n E_{ki0} + \sum_{i=1}^n E_{pi0}), E = (\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{pi})$

因此,式(1-17b)可表示为

$$W^e + W_{nc}^m = E - E_0 \quad (1-17c)$$

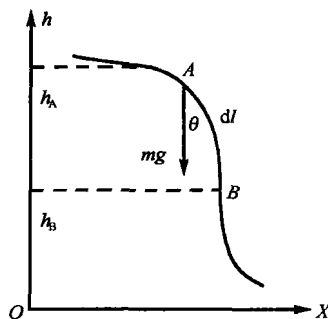


图 1-3 势能