



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

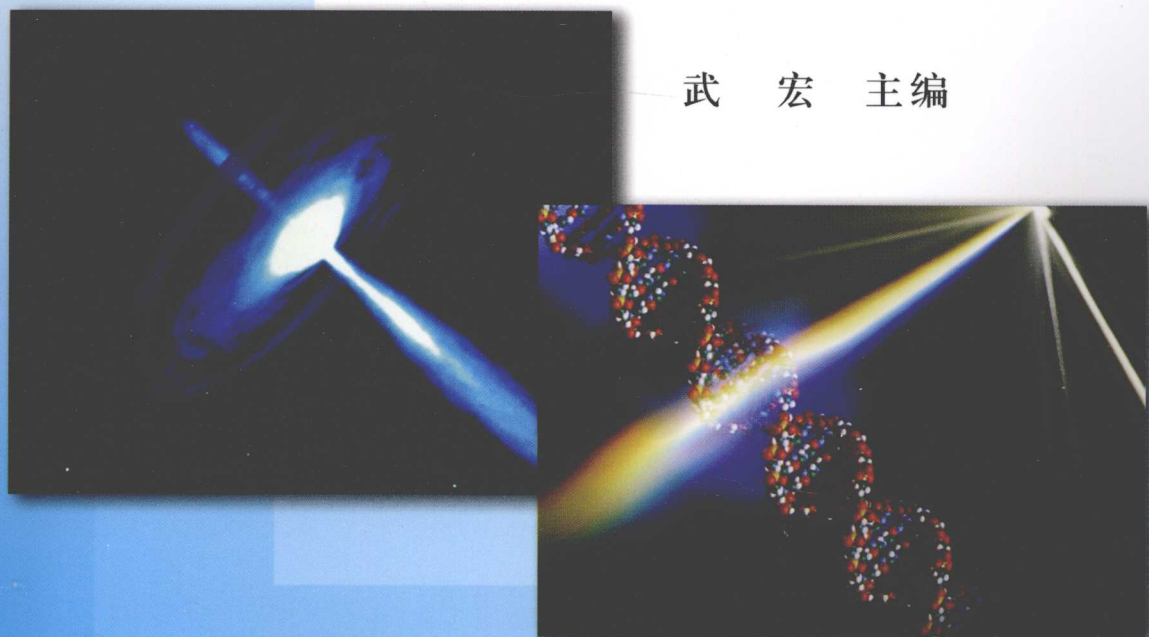
全国高等医药院校教材

供临床、预防、基础、口腔、麻醉、影像、药学、检验、护理、法医等专业使用

医用物理学

第3版

武 宏 主编



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国高等医药院校教材

供临床、预防、基础、口腔、麻醉、影像、药学、检验、护理、法医等专业使用

医用物理学

第3版

主 编 武 宏
副主编 吴明海 汤乐民 唐伟跃
编 者 (按姓氏笔画排序)

马远新 新疆医科大学
方立铭 皖南医学院
计晶晶 包头医学院
邓 玲 第三军医大学
吕小云 青海大学
刘凤芹 山东大学
刘婉华 郑州大学
汤乐民 南通大学
李乐霞 宁夏医科大学
吴明海 山东大学
武 宏 山东大学
唐伟跃 郑州大学
盖志刚 山东大学
彭友霖 赣南医学院

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

医用物理学是物理学的重要分支学科,是物理学与医学相结合所形成的交叉学科。在内容上,既要有物理学系统的基础理论,又要与医学有机的结合。因此,本书包含了力学基本定律、物体的弹性、流体的运动及液体的表面现象、振动、波动、声学、电学、磁学、直流电、光学、激光、X射线、原子核和放射性、量子基础等物理知识的系统内容。还包括以上物理知识在医学中的应用。如肌肉、骨骼的力学性质,血液的流动,呼吸系统气体的流动,听觉的物理过程及听力测试,人体导电性、心电、脑电、电生理有关知识,以及X射线、原子核的放射性,激光等在医学中的应用。每章都给出了相当数量的思考题、习题,帮助学生理解和掌握各章的知识。

本书适用于高等医药院校及综合大学五年制和长学制学生,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者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

医用物理学 / 武宏主编. — 3版. — 北京:科学出版社,2009
普通高等教育“十一五”国家级规划教材·全国高等医药院校教材
ISBN 978-7-03-024420-8

I. 医… II. 武… III. 医用物理学-医学院校-教材 IV. R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 057549 号

策划编辑:胡治国 / 责任编辑:胡治国 / 责任校对:包志虹
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>

辽宁印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000年8月第 一 版 开本:850×1168 1/16

2009年6月第 三 版 印张:14

2009年6月第五次印刷 字数:389 000

印数:12 001—16 000

定价:28.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第 2 版前言

本教材依据卫生部医用物理学教学大纲,参考国内外有关教材,以第 1 版为基础,并结合我们的教学经验编写而成。在内容的广度、深度上有一定提升。其特点是针对我国目前医学教育现状及培养医学专业学生的自然科学思维能力,围绕当前提高学生素质教育的目标,精选内容、突出学生能力的培养。由于教学时数的限制和学生打好三基(基础理论、基本知识和基本技能)的特定要求,其内容以高中物理学为起点,重点讲述和医学关系密切的物理学内容,并适当地介绍当前物理学在医学应用中的新进展。

由于水平有限,不妥之处在所难免,恳请批评指正。

编者
2003 年 9 月

第3版前言

本书是在2004年出版的21世纪高等医学院校教材《医用物理学》(第2版)的基础上修订而成。从2000年出版第1版至今,本书多次印刷,深受广大读者的欢迎。本次修订的出发点主要有两个:一是本书被选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,应按照国家规划教材的要求进行修订;二是医用物理学是医学生学习医学基础课与专业必修课的基础课程,由于现代物理学的研究方法和技术在医学中的应用发展十分迅速,针对我国目前医用物理学教育现状以及21世纪高等医学教育的要求,对第2版的内容进行调整、充实和提高亦十分必要。

本书的修订工作主要体现在以下几个方面:

(1) 调整了章节结构。由原书的11章扩充为14章。在本书中,原第1、2、3、5、6、7、10章内容与原书基本相同,并相应调整成第1、3、4、7、8、9、13章;保留原书第4章中的振动,调整成第5章,抽出波动和声经过扩充后形成第6章;原书第8、9、11章分别调整为第11、10和第14章。

(2) 增加了新的章节。在第3版中新增了相对论(第2章)和量子力学基础(第12章)。

(3) 充实了部分章节内容。在第1章中增加了质点的运动、旋进;在第5章中增加了阻尼振动、受迫振动、共振;在第11章充实了光学的生物医学应用;在第14章中新增了电离生物效应及发生机制等。另外,为更好地体现教材的先进性、科学性和实用性,突出高等医药院校物理学的特点,修订时注重了物理原理在临床诊断与治疗中应用的新进展,将近几年快速发展的物理学在生物医学方面的新技术应用充实到相关章节,包括电磁定位、外科手术导航系统、光学分子成像、光学相干断层成像、核医学功能成像及应用、功能测定及应用、物理新技术疾病治疗等。

第3版教材仍保持了原有的风格和特点,但教材体系和知识结构更趋系统和完善。教材内容的宽度和深度比原书略有增加,这为教师确定教学内容提供了较大的选择空间。

第3版教材概念明确,重点突出,各物理量及其单位、符号均按《中华人民共和国标准——量和单位》标定,全书符号、名称、单位前后一致,构成一个完整体系。

本书适用于高等医药院校及综合大学五年制和长学制学生,并可作为与生命科学相关专业师生、研究人员的教学和科研参考书。

在本书修订期间,得到山东大学领导、物理学院领导、教务处以及各位编者所在学校领导的关心支持,得到科学出版社领导和责编大力支持和热心指导,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2008年12月

目 录

第3版前言	
第2版前言	
绪论	(1)
一、物理学研究的对象	(1)
二、物理学与医学的关系	(1)
三、物理学的学习方法	(1)
第1章 力学基本规律	(3)
第一节 质点的运动	(3)
第二节 牛顿运动定律	(4)
一、牛顿运动定律	(4)
二、单位和量纲	(5)
三、参照系	(5)
第三节 功和能、能量守恒定律	(6)
一、功	(7)
二、动能、势能	(7)
三、功能原理 机械能守恒定律	(8)
第四节 动量守恒定律	(9)
一、动量、冲量、动量定理	(9)
二、动量守恒定律	(10)
第五节 刚体的转动	(10)
一、刚体的平动和转动	(10)
二、刚体的转动动能、转动惯量	(12)
三、力矩、转动定律和角动量守恒定律	(13)
四、刚体的平衡	(15)
第六节 应力和应变	(18)
一、应力	(18)
二、应变	(19)
第七节 弹性模量	(20)
一、弹性和塑性	(20)
二、弹性模量	(20)
三、骨的力学性质	(21)
四、肌肉的力学特性	(23)
第2章 相对论基础	(26)
第一节 伽利略变换	(26)
一、牛顿力学的绝对时空观和相对性原理	(26)
二、伽利略变换	(26)
第二节 狭义相对论基本原理	(27)
一、迈克耳孙-莫雷实验与绝对时空观的破产	(27)
二、狭义相对论的基本原理	(28)
三、洛伦兹变换	(29)
第三节 狭义相对论的时空观	(30)
一、“同时”的相对性	(30)
二、时间的相对性(时间膨胀)	(30)
三、长度的相对性(长度收缩)	(31)
四、光多普勒效应	(31)
五、退行红移和膨胀宇宙	(31)
第四节 相对论动力学	(31)
一、动量和质量	(32)
二、力和动能	(32)
三、质量和能量的关系	(33)
四、能量和动量的关系	(33)
第五节 广义相对论简介	(33)
一、等效原理	(34)
二、广义相对性原理	(34)
三、引力场的时空特性	(35)
四、引力坍缩与黑洞	(36)
五、引力波	(36)
第3章 流体的流动	(38)
第一节 理想流体的定常流动	(38)
一、理想流体	(38)
二、定常流动	(38)
三、连续性方程	(39)
四、伯努利方程	(39)
五、伯努利方程的应用	(40)
第二节 黏性流体的流动	(41)
一、层流和湍流	(41)
二、牛顿黏滞定律	(42)
三、雷诺数	(43)
四、黏性流体的伯努利方程	(43)
五、泊肃叶定律	(43)
六、斯托克斯定律	(45)

第三节 血液的流动····· (45)	第三节 波的干涉····· (69)
一、血液的流速····· (45)	一、惠更斯原理····· (69)
二、血压····· (46)	二、波的叠加原理····· (70)
三、心脏做功····· (46)	三、波的干涉····· (70)
第4章 液体的表面现象 ····· (48)	第四节 声波 ····· (71)
第一节 液体的表面张力及表面能····· (48)	一、声波的性质····· (71)
一、液体的表面张力····· (48)	二、听觉区域和声强级····· (72)
二、表面能····· (49)	三、听力测试与助听····· (73)
第二节 弯曲液面的附加压强····· (50)	第五节 多普勒效应 ····· (75)
第三节 毛细现象和气体栓塞····· (51)	一、多普勒效应····· (75)
一、接触角····· (51)	二、超声波及其医学应用····· (76)
二、毛细现象····· (51)	第7章 静电场 ····· (80)
三、气体栓塞····· (52)	第一节 电场强度····· (80)
第四节 表面活性物质与表面吸附····· (53)	一、电荷和库仑定律····· (80)
一、表面活性物质····· (53)	二、电场与电场强度····· (80)
二、表面吸附····· (53)	三、场强的计算····· (81)
第5章 机械振动 ····· (55)	第二节 高斯定理 ····· (82)
第一节 简谐振动····· (55)	一、电通量····· (82)
一、简谐振动方程····· (55)	二、高斯定理····· (83)
二、简谐振动的特征量····· (55)	三、高斯定理的应用····· (83)
三、简谐振动的矢量图示法····· (56)	第三节 电势 ····· (85)
四、简谐振动的能量····· (57)	一、静电场力做功····· (85)
第二节 阻尼振动 受迫振动 共振····· (57)	二、电势····· (86)
一、阻尼振动····· (57)	三、电场强度与电势的关系····· (87)
二、受迫振动····· (58)	第四节 电偶极子和电偶层 ····· (88)
三、共振····· (59)	一、电偶极子的场强····· (88)
第三节 简谐振动的合成····· (59)	二、电偶极子的电势····· (89)
一、两个同方向、同频率简谐振动的合成····· (59)	三、人体内的电现象····· (90)
二、同方向、不同频率简谐振动的合成····· (60)	第五节 静电场中的电介质 ····· (94)
三、振动谱····· (60)	一、电介质的极化····· (94)
四、两个同频率、互相垂直的简谐振动的合成····· (61)	二、极化强度····· (95)
第四节 振动医学应用简谐振动的合成····· (62)	三、介电常数····· (95)
一、机械振动对人体的生物效应····· (62)	第8章 稳恒电流 ····· (98)
二、振动测量技术在医疗上的应用····· (63)	第一节 电流的描述····· (98)
第6章 波动和声 ····· (66)	一、电流线····· (98)
第一节 机械波的产生及描述····· (66)	二、电流强度····· (98)
一、机械波····· (66)	三、电流密度····· (99)
二、波函数····· (67)	四、稳恒电流····· (100)
第二节 波的能量与强度····· (68)	第二节 欧姆定律 ····· (100)
一、波的能量····· (68)	一、物质的导电性····· (100)
二、波的强度····· (68)	二、欧姆定律····· (100)
三、波的衰减····· (69)	第三节 含源电路的欧姆定律 ····· (101)
	一、一段含源电路的欧姆定律····· (101)
	二、闭合电路的欧姆定律····· (102)

第四节 基尔霍夫电路方程	(102)	二、夫琅和费单缝衍射	(132)
一、节点电流方程	(102)	三、夫琅和费圆孔衍射	(134)
二、回路电压方程	(103)	四、衍射光栅	(135)
第五节 电容器的充放电过程	(103)	第三节 光的偏振与旋光性	(136)
一、充电过程	(103)	一、自然光和偏振光	(137)
二、放电过程	(104)	二、起偏与检偏	(137)
第六节 神经纤维的电缆方程	(104)	三、马吕斯定律	(138)
一、神经纤维的电缆性质	(104)	四、偏振光的产生	(139)
二、动作电位	(106)	五、物质的旋光性	(141)
第9章 电磁现象	(108)	第11章 几何光学	(144)
第一节 磁场、磁感应强度	(108)	第一节 球面折射	(144)
一、磁场	(108)	一、单球面折射	(144)
二、磁感应强度	(108)	二、共轴球面系统	(145)
三、磁通量	(109)	第二节 透镜	(146)
第二节 电流的磁场	(109)	一、薄透镜	(146)
一、毕奥-沙伐尔定律	(109)	二、薄透镜公式	(146)
二、安培环路定律	(112)	三、薄透镜的组合	(147)
第三节 磁场对电流的作用	(113)	四、厚透镜	(147)
一、磁场对运动电荷的作用	(113)	五、圆柱透镜	(149)
二、磁场对载流导线的作用	(115)	六、透镜的像差	(149)
三、磁场对载流线圈的作用 磁矩 ..	(116)	第三节 眼睛的屈光系统	(150)
第四节 磁介质	(117)	一、人眼的光学结构 眼睛的调节 ..	(150)
一、顺磁质与抗磁质	(117)	二、人眼的分辨本领和视力	(152)
二、磁导率、磁场强度	(117)	三、散光眼的矫正	(152)
三、铁磁质	(118)	第四节 放大镜 检眼镜 纤镜	(153)
四、磁致伸缩效应	(119)	一、放大镜	(153)
第五节 电磁感应	(119)	二、检眼镜	(153)
一、电磁感应定律	(119)	三、纤镜	(153)
二、动感电动势 涡旋电场	(119)	第五节 显微镜	(154)
第六节 磁场的医学应用	(120)	一、显微镜的光学原理	(154)
一、生物磁场现象	(120)	二、显微镜的分辨本领	(155)
二、磁场的生物效应	(120)	第六节 光学的生物医学应用	(156)
三、磁场疗法(磁疗)	(121)	一、光与生物组织的相互作用	(156)
四、磁技术在生物医学中的应用	(121)	二、光学生物医学成像	(157)
第10章 波动光学	(125)	三、激光光动力学治疗肿瘤	(159)
第一节 光的干涉	(125)	四、光学口腔医学诊断技术	(160)
一、光的相干性	(125)	五、光镊	(160)
二、光程、光程差	(126)	第12章 量子力学基础	(163)
三、杨氏双缝干涉	(127)	第一节 光的波粒二相性	(163)
四、洛埃镜	(128)	一、黑体辐射	(163)
五、薄膜干涉	(129)	二、光电效应	(164)
六、等厚干涉	(130)	三、康普顿效应	(165)
第二节 光的衍射	(132)	第二节 氢原子结构、玻尔理论	(166)
一、惠更斯-菲涅耳原理	(132)	一、氢原子光谱的规律性	(166)

二、玻尔的氢原子理论	(166)	一、原子核的组成	(188)
第三节 微观粒子的波粒二相性	(167)	二、原子核的大小与密度	(188)
一、德布罗意波	(167)	三、原子核的性质	(188)
二、电子衍射	(168)	四、质量亏损和结合能	(189)
三、不确定关系	(169)	五、原子核的稳定性	(189)
第四节 薛定谔方程	(170)	第二节 原子核的放射性衰变	(190)
一、薛定谔方程的建立	(170)	一、核的衰变规律	(190)
二、一维无限深势阱	(171)	二、半衰期和平均寿命	(191)
三、势垒 隧道效应	(172)	三、有效半衰期	(191)
四、薛定谔方程在原子分子中的应用	(173)	四、统计涨落现象	(192)
第五节 激光	(174)	五、放射性活度	(192)
一、激光的产生	(174)	第三节 核衰变方式	(193)
二、光学谐振腔	(175)	一、 α 衰变	(193)
三、激光的特点	(175)	二、 β 衰变	(193)
四、激光的生物效应	(176)	三、 γ 衰变和内转换	(194)
五、激光在生物学中的应用	(178)	第四节 放射平衡和放射性核素来源	(195)
第 13 章 X 射线	(180)	一、放射平衡	(195)
第一节 X 射线的基本性质	(180)	二、医用放射性核素来源	(196)
第二节 X 射线的产生	(180)	第五节 射线与物质的相互作用	(197)
一、X 射线发生装置	(180)	一、带电粒子与物质的相互作用	(197)
二、X 射线的产生	(181)	二、 γ 射线与物质的相互作用	(199)
第三节 X 射线的强度和硬度	(181)	三、中子与物质的相互作用	(201)
一、X 射线的强度	(181)	第六节 辐射剂量与辐射防护	(201)
二、X 射线的硬度	(181)	一、照射量	(202)
第四节 X 射线谱	(182)	二、吸收剂量	(202)
一、连续 X 射线谱	(182)	三、当量剂量	(202)
二、标识 X 射线谱	(183)	四、有效剂量	(203)
第五节 物质对 X 射线的吸收	(183)	五、天然本底辐射	(203)
第六节 X 射线的医学应用	(184)	六、辐射防护	(204)
一、治疗应用	(184)	第七节 放射性核素的医学应用	(205)
二、诊断	(184)	一、射线探测	(205)
第 14 章 原子核和放射性	(188)	二、放射性核素在医学上的应用	(208)
第一节 原子核的结构与基本性质	(188)		
附录	(210)		
一、常用物理常数(表附 1-1)	(210)		
二、国际单位制(SI)基本单位表(表附 1-2)	(210)		
三、国际单位制的一些导出单位(表附 1-3)	(211)		
四、国际单位制辅助单位(表附 1-4)	(211)		
五、国际制词冠(表附 1-5)	(211)		
六、具有专门名称的国际制导出单位(表附 1-6)	(212)		
七、希腊字母表(表附 1-7)	(212)		
八、与国际单位制并用的一些单位(表附 1-8)	(213)		
英中名词对照索引	(214)		

绪论

医用物理学是医学专业学生的基础课之一。开设这门课的目的是根据专业培养目标的要求,在中学物理学的基础上,进一步深化物理概念和物理规律,扩大物理知识的领域,为学习现代医学打下必要的物理学基础。要学好这门课,首先要了解物理学研究的对象、方法及其与医学的关系。

一、物理学研究的对象

物理学是研究最普遍、最基本的物质运动形态的科学,是探索物质运动规律、物质结构及相互作用的科学。物质是在人们周围存在着客观实体,从粒子、原子、分子到宇宙天体,从蛋白质、细胞到人体,从电磁场到引力场都是物质。所有物质都在不停地运动和变化着,运动是物质存在的形式,是物质的固有属性。因此,物理学研究的领域非常宽广,如自然界和人类活动中最常见的机械运动、分子热运动、电磁变化、原子和原子核的运动等都属于物理学研究的范畴。物理学研究的范围在空间尺度上所涉及的从小到质子半径 10^{-15}m ,大到可观测到最远类星体的距离 10^{26}m ;在时间尺度上从短到 10^{-25}s 的最不稳定的粒子的寿命,直到长达 10^{39}s 的质子寿命。物理学所研究的运动形式,普遍存在于其他高级、复杂的物质运动形式之中。生命现象是物质世界中的高级运动形态,不管生命活动多么复杂,其中也必定涉及一些物理现象。例如,细胞、分子、电子之间都遵守万有引力定律;人体的代谢遵从能量守恒和转换定律;生物电的电学性质符合电磁学的规律等。因而,物理学是自然科学和工程技术的基础,也是医学的基础。

二、物理学与医学的关系

生产实践和科学实践是物理学发展的动力,反过来物理学的成就又促进了生产实践和科学实践的发展。物理学与医学的关系也不

例外。物理学的一些新发现,为医学的发展提供了理论基础和手段。反过来,医学的不断发展,又向物理学提出了新的课题。它们互相促进,互相推动。

医学是以人为对象的生物科学。它所研究的是属于高级的、复杂的物质运动形态——生命现象。这些运动形态是以物理学和化学的运动形态为基础的。因此,不掌握物理学的基本规律,就无法深入了解医学所研究的生命现象。生命现象除了必须服从有关的物理学和化学的规律外,还有它独特的规律,因而不能简单地把生命现象看做是物理学和化学的总和。

随着人们对生命现象认识的逐步深入,生命科学已经从宏观形态的研究进入到微观机制的探讨,从细胞水平进入到分子水平。对生命现象本质的研究,需要研究生物分子本身的结构、构象、能量状态及其变化,以及这些状态和变化与功能之间的联系。这些研究应用了过去已经发展起来的以及近代正在发展的各种物理学技术,如电子显微镜、光学显微镜、荧光偏振、光散射,以及各种光谱和波谱等技术。在医学研究、预防、临床诊断和治疗方面的技术手段正日新月异地发展着,其中主要是物理学技术,如各种内镜、微波、超声、激光、磁共振成像(MRI)、电子计算机 X 线断层扫描术(X-CT)、核医学等技术。物理学每一次的新发现或技术发展到一个新的阶段,都为医学研究和医疗实践提供更先进、更方便和更精密的仪器和方法。

物理学与医学的关系可归结为两个方面:①物理学知识是了解生命现象所不可缺少的基础。②物理学所提供的方法技术,为医学研究和医疗实践开辟了新的途径。

三、物理学的学习方法

物理学的发展过程是人类对自然界认识过程中的一个重要组成部分。物理学中的规

律大都来自长期的科学实践。因此,物理学
的研究应以观察和实验为基础,并对观察与实验
的结果进行定量的或定性的分析。在观察和
实验所得大量资料的基础上,经过分析、概括、
判断和推理,把事物的本质和内在联系抽象到
更一般的形式,于是就有了假设。由假设再经
反复验证,被证明能正确反映客观规律时,则
上升为定律和理论,理论再回到实践中去
检验。

物理学是一门实验科学,要学好物理学,
必须重视物理实验,学会使用基本仪器,掌握
一些测量方法、技术操作等。在实验过程中积
极思维,敢于实践,勇于创新。

我们一方面要牢固掌握书本的讲授内容,
另一方面还要经常注意医学物理学的新进展、
新发现,为学好医学打下必要的基础。

(武 宏)

第 1 章 力学基本规律

第一节 质点的运动

研究物体的运动时,如果物体的大小和形状在所研究的问题中可以忽略,在物理学中一般将其抽象为一个质量与它相同的点,叫质点 (particle)。

质点在一段时间内移动的实际距离称为这段时间内的路程,其位置的改变称为它的位移 (displacement),如图 1-1 所示。设质点在 t 和 $t+\Delta t$ 时刻分别通过点 A 和点 B ,其位置矢量,简称位矢 (position vector) 为 $\mathbf{r}(t)$ 和 $\mathbf{r}(t+\Delta t)$,则位移即为 Δt 时间内的增量 $\Delta\mathbf{r}=\mathbf{r}(t+\Delta t)-\mathbf{r}(t)$ 。

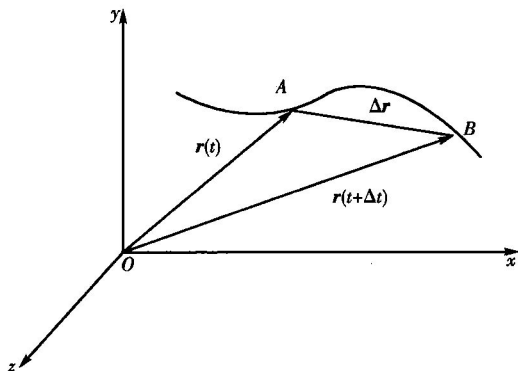


图 1-1 位移

质点的运动实际上就是它的位置,即位矢随时间的变化。在直角坐标系中,用函数可以表示为

$$\mathbf{r}=\mathbf{r}(t) \quad (1-1)$$

式(1-1)即为质点运动方程的矢量表示式。若位矢在直角坐标系中的三个分量分别是 $x(t)\mathbf{i}$, $y(t)\mathbf{j}$ 和 $z(t)\mathbf{k}$,则有

$$\mathbf{r}(t)=x(t)\mathbf{i}+y(t)\mathbf{j}+z(t)\mathbf{k} \quad (1-2)$$

作为时间函数的三个坐标值

$$x=x(t), y=y(t), z=z(t) \quad (1-3)$$

这组函数称为质点的运动函数,是运动方程的标量表示式。这三个函数表示的是质点沿各坐标轴的分运动,而实际运动是由这三个函数的总体表示的。质点的实际运动是各分

运动的矢量合成,这一关系称为运动的叠加原理。

位移 $\Delta\mathbf{r}$ 和发生这段位移所经历的时间 Δt 的比称为质点在这段时间内的平均速度 (mean velocity),即

$$\bar{\mathbf{v}}=\frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-4)$$

平均速度也是矢量,它的方向就是位移的方向,如图 1-2。当 Δt 趋于零时,式(1-4)的极限,即位移对时间的变化率,称为质点在时刻的瞬时速度 (instantaneous velocity),简称速度 (velocity)。即

$$\mathbf{v}=\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t}=\frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-5)$$

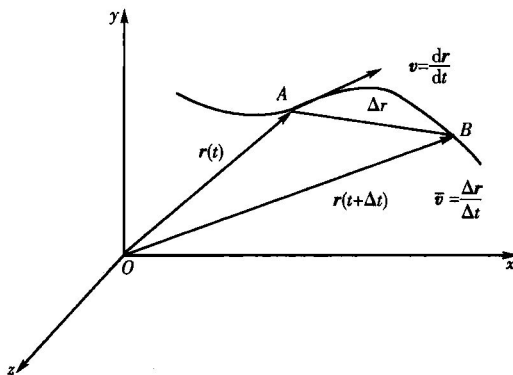


图 1-2 平均速度与瞬时速度

速度是位移的导数,所以某点处的速度方向,就是该点处趋于零时的方向,即沿着该时刻质点所在处运动轨道的切线方向。

在直角坐标系中,速度的分量表示为

$$\mathbf{v}=\frac{dx}{dt}\mathbf{i}+\frac{dy}{dt}\mathbf{j}+\frac{dz}{dt}\mathbf{k}=v_x\mathbf{i}+v_y\mathbf{j}+v_z\mathbf{k} \quad (1-6)$$

速度的大小称为速率 (speed),即

$$|\mathbf{v}|=\left|\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right|=\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta\mathbf{r}|}{\Delta t}$$

用 Δs 表示在时间 Δt 内质点沿轨道所经历的路程。当 Δt 趋于零时, $|\Delta\mathbf{r}|$ 和 Δs 趋于相同,所以速率 v 又可写为

$$|\mathbf{v}|=\left|\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right|=\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta\mathbf{r}|}{\Delta t}=\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{ds}{dt} \quad (1-7)$$

即速率等于质点所走过的路程对时间的

变化率,是标量。

当质点的运动速度随时间改变时,常常需要了解速度变化的情况。速度变化的情况用加速度(acceleration)表示。以 $\boldsymbol{v}(t)$ 和 $\boldsymbol{v}(t+\Delta t)$ 分别表示质点在时刻 t 和 $t+\Delta t$ 的速度,则在这段时间内的平均加速度是

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\boldsymbol{v}(t+\Delta t) - \boldsymbol{v}(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \quad (1-8)$$

当 Δt 趋于零时,平均加速度的极限,即速度对时间的变化率,称为质点在时刻 t 的瞬时加速度,简称加速度,即

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} \quad (1-9)$$

加速度也是矢量,它是速度对时间的一阶导数,同时也是位移对时间的二阶导数,见下式。不论是速度的大小发生改变,还是速度的方向发生变化,都会产生加速度。

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1-10)$$

在直角坐标系中,加速度的分量表示式为

$$\boldsymbol{a} = \frac{dv_x}{dt} \boldsymbol{i} + \frac{dv_y}{dt} \boldsymbol{j} + \frac{dv_z}{dt} \boldsymbol{k} = a_x \boldsymbol{i} + a_y \boldsymbol{j} + a_z \boldsymbol{k} \quad (1-11)$$

显然,如果加速度的方向和速度的方向一致,那只是由于速度的量值发生变化而方向不变,质点在做直线运动。如果加速度的方向和速度的方向不一致,质点在做曲线运动。如果加速度的方向和速度的方向垂直,那只是由于速度的方向在改变而量值不变。所以曲线运动在任何时刻的加速度都可以分解为沿速度方向的切向加速度(tangential acceleration) \boldsymbol{a}_t 和垂直于速度方向的法向加速度(normal acceleration) \boldsymbol{a}_n 。切向加速度描述了速度量值的改变,法向加速度描述了速度方向的改变。

第二节 牛顿运动定律

研究物体运动与物体间相互作用的联系和规律是力学的动力学部分,牛顿运动定律是动力学的基本内容。牛顿运动定律一般是对质点而言,但由此可导出刚体、流体等的运动定律。因此,牛顿运动定律是整个经典力学的基础。

一、牛顿运动定律

牛顿总结了前人的成就,于1687年在《自

然哲学的数学原理》中提出了三条运动规律,统称为牛顿运动定律。

牛顿第一定律:任何物体都保持其静止或匀速直线运动状态,直到其他物体的作用迫使它改变这种状态为止。

牛顿第一定律表明,任何物体都有保持其原有运动状态不变,即保持其速度不变的特性。这一特性叫做物体的惯性,因此,第一定律也叫惯性定律。

牛顿第二定律:物体受到外力作用时,所获得的加速度的大小与合外力的大小成正比,与物体的质量成反比;加速度的方向与合外力的方向相同。

第二定律指出,质量为 m 的物体,在合外力 \boldsymbol{f} 作用下,如果获得的加速度为 \boldsymbol{a} ,则

$$\boldsymbol{f} = k m \boldsymbol{a} \quad (1-12)$$

式中 k 为比例系数。在国际单位制中, $k=1$ 上式可写成

$$\boldsymbol{f} = m \boldsymbol{a} \quad (1-13)$$

这就是通常所用的牛顿第二定律的数学表达式。

牛顿第三定律:当甲物体有力作用于乙物体时,乙物体也必然同时有力作用于甲物体,这两个力在同一直线上,大小相等而方向相反,即 $\boldsymbol{F}_甲 = -\boldsymbol{F}_乙$ 。

第三定律表明,作用力和反作用力必定分别作用在相互作用着的两个物体上。作用力和反作用力还必定是属于同一性质的力,如同属弹性力、万有引力、摩擦力等等。

这三条定律是密不可分的整体。第一和第二定律分别定性和定量地说明了物体运动状态的变化和其他物体对它作用的力之间的关系。第三定律则进一步说明力的相互作用性质及相互作用的力之间的定量关系。

对于不同的参考系,同一物体的运动形式可以不同,但运动的描述是相对的,可以根据研究问题的方便任意选取参考系。那么应用牛顿定律时参考系能否任意选吗?例如,停在火车站台上的一辆小车,在站台上的人看来,小车受的合力为零,加速度也为零,符合牛顿定律。可是在加速行驶的列车车厢中的人观察这辆小车,将发现小车向列车尾部方向做加速运动。小车受的合力仍为零,合力为零而有了加速度,这是违背牛顿定律的。这是因为在

不同的参考系中,物体受力相同,而加速度则可能不同。

凡牛顿定律成立的参考系叫做惯性参考系,简称惯性系。由实验表明,相对于上述惯性系做匀速直线运动的参考系都是惯性系,做变速运动的参考系是非惯性系。前面提到的加速运动的列车车厢,由于它相对于地面参考系有明显的加速度,所以不能当做惯性系看待。具体判断一个实际的参考系是不是惯性系,要根据经验观察。

二、单位和量纲

各物理量间常常通过定义或定律有一定的联系,如力、质量和加速度通过牛顿第二定律联系在一起。一般常选几个物理量作为基本量(fundamental quantity),规定它们的单位作为基本单位(fundamental unit),其他物理量及其单位通过定义或定律由基本量及基本单位导出,由基本量导出的物理量叫做导出量(derived quantity),其单位叫做导出单位(derived unit)。

基本单位选择不同,组成的单位制就不同。本书采用的国际单位制,选定长度、质量和时间为力学基本量,米(m)、千克(kg)、秒(s)为力学基本单位,力学中其他各量都是导出量。

任何物理量都可以用基本量的某种组合来表示。国际单位制中,以 L 、 M 和 T 分别表示长度、质量和时间三个力学基本量,力学的其他物理量 Q 可用 L 、 M 和 T 的幂次组合表示出来,形式为

$$[Q] = M^\alpha L^\beta T^\gamma$$

上式叫做物理量 Q 的量纲(dimension), M 、 L 、 T 分别为质量、长度、时间的量纲。如速度、加速度的量纲为 $[\mathbf{v}] = LT^{-1}$, $[\mathbf{a}] = LT^{-2}$ 。对于不同的单位制,如果基本量的选择不同,则同一物理量的量纲也不同。此外,量纲可用来校核等式,如一个方程式两端量纲必须相同,相加减各项量纲必须相同。由此可借助量纲检验一个等式是否正确,确定方程中系数的单位,并可推测某些定律。量纲也可以定出同一物理量不同单位之间的换算关系。

三、参 照 系

同一物体的运动在不同的参照系(reference frame)可以具有不同的形式,即运动的描述是相对的,可以根据研究问题的方便性任意选择参照系。但如果问题涉及运动和力的关系,即须应用牛顿运动定律时,是否也可以任意选择参照系呢?

如图1-3,假如一辆小车内有一个圆球,小球与车内以及小车与地面间可无摩擦地滚动。当小车由静止开始加速向右边运动时,车内小球由于惯性就会滚到小车后侧,在小车后壁的作用力 f 的作用下,随车一起向右加速运动。从地面上观察这辆小车,小车受牵引力作用加速向右运动,符合牛顿运动定律。车内小球受支持力 f 的作用加速向右运动,也符合牛顿运动定律。但如果从车内观察小球,小球受力 f 的作用却保持静止状态,这显然是不符合牛顿运动定律的。可见相对与做加速运动的车厢参照系,牛顿运动定律是不成立的。

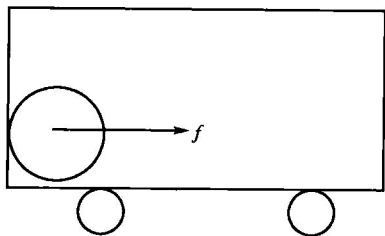


图 1-3 地面上向右运动的小车

由此可见,牛顿运动定律对有些参照系是成立的,对另一些参照系却是不成立的。实际上,牛顿运动定律只有在惯性参照系中才成立。惯性参照系(inertial frame)就是牛顿运动定律成立的参照系,在此参照系中,一个不受力作用的物体将保持静止或匀速直线运动状态。惯性系有一个重要的性质,即如果确认了某一参照系为惯性系,则相对于此参照系做匀速直线运动的任何其他参照系一定是惯性系,而做加速运动的参照系一定不是惯性系,是一个非惯性系。

一般来说,太阳参照系是一个很好的惯性系,地心参照系可以近似当作惯性系看待。由于地球围绕自己的轴相对于地心参照系不断地自转,所以坐标轴固定在地面的地面参照系

不是惯性系。但由于地面上各处相对于地心参照系的法向加速度最大不超过 $3.40 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (在赤道上), 所以地面参照系也可以近似当作惯性系看待。至于前面提到的加速运动的小车, 由于它相对于地面参照系有明显的加速度, 因此它不是惯性参照系, 不能直接运用牛顿运动定律。

在实际问题中常常需要在非惯性系中观察和处理物体的运动现象。在这种参照系中, 牛顿运动定律是不成立的。但是为了方便起见, 也常常在形式上利用牛顿运动定律分析问题, 为此引入惯性力 (inertial force) 的概念。

以加速平动参照系为例。设有一质点, 质量为 m , 在外力 F 的作用下产生相对于某一惯性系 S 的加速度 a ; 设另一参照系 S' 相对于惯性系统以加速度 a_0 平动; 设质点相对于参照系 S' 的加速度是 a' 。由运动的相对性可知。根据牛顿第二定律得

$$F = m(a' + a_0) = ma' + ma_0$$

即 $F + (-ma_0) = ma'$
此式说明, 质点所受的和外力并不等于 ma' , 因此牛顿第二定律在参照系 S' 中不成立。但是, 如果假定在参照系 S' 中, 除了实际的外力 F 外, 质点还受到一个大小和方向由 $(-ma_0)$ 决定的叫做惯性力的力, 结果相对于参照系 S' , 质点所受到的合外力, 即实际外力和惯性力之和, 等于它的质量与加速度的乘积。因此在形式上就可以应用牛顿第二定律了。

在加速平动参照系中, 惯性力的大小等于质点的质量与此非惯性系相对于惯性系的加速度的乘积, 方向与此加速度的方向相反。以 F_0 表示惯性力, 则有 $F_0 = -ma_0$ 。惯性力是一种虚拟力, 不表示真实的相互作用。

绕一个相对于惯性系固定的轴转动的盘也是一个非惯性系。在这样一个非惯性系中应用牛顿第二定律也需要引入一个虚拟的惯性力。如图 1-4, 设一个质量为 m 的小球置于一个绕固定轴匀速旋转的光滑的盘上。此时以盘为参照系观测, 小球虽受到细绳的拉力 T 的作用, 却静止不动, 不符合牛顿第二定律。为了保持牛顿第二定律的形式, 假设小球还受到一个与力 T 相平衡的惯性力的作用, 其大小为

$$f_c = m \frac{V^2}{R} = m\omega^2 R$$

这个惯性力也称为惯性离心力, 简称离心力。

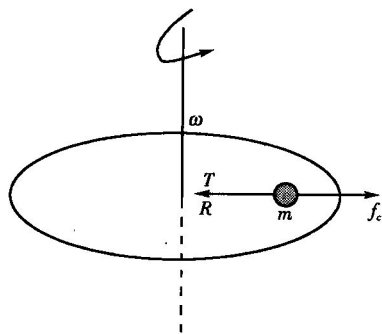


图 1-4 惯性离心力

利用离心力的概念, 可制成快速分离悬浮液中不同密度微粒的装置——离心机。图 1-5 是离心机的原理图。使装有试样 (血液、尿等) 的离心管在水平面上绕轴快速旋转, 试样中的微粒受到离心力的作用向管底转移。由于密度大的粒子受到的离心力大, 因此经过一段时间以后, 管中的微粒将按密度的大小分离, 密度最大的位于管底, 最小的靠近管口。如果离心机转速高, 则向心加速度的值可比重力加速度 g 的值大许多倍, 于是可大大加快分离的速度。近代超速离心机的转速可达 60000r/min , 若以 $R = 10 \text{cm}$ 计算, 则向心加速度约为重力加速度的 40 万倍, 即 $4 \times 10^5 g$ 。这样的高速离心机可分离线度小于几个微米的病毒和蛋白质分子。

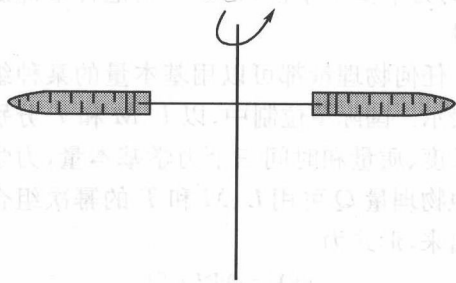


图 1-5 离心机原理

第三节 功和能、 能量守恒定律

一个物体的运动总是与其他物体的运动有联系。通过力的作用, 可使机械运动从一个物体转移到另一个物体, 也可使机械运动和别的运动形式相互转化, 如摩擦生热就是机械运动转化为热运动。功和能量就是研究转化问题的重要物理量。

一、功

功是描述力在物体移动过程中的空间累积效应。

1. 功 物体在恒力 f 作用下做直线运动时(图 1-6),力在位移方向上的分量与位移的乘积,就是力 f 对物体所做的功,即

$$A = f \cos \theta \cdot r = \mathbf{f} \cdot \mathbf{r} \quad (1-14)$$

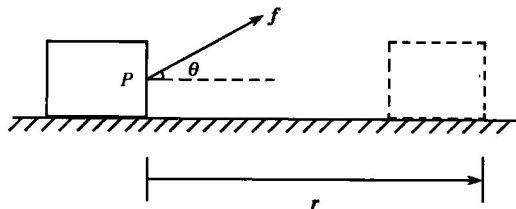


图 1-6 恒力的功

式中 θ 为力与位移的夹角。功只有大小、正负而无方向,是个标量。由上式可见, $\theta < \pi/2$ 时力做正功; $\theta = \pi/2$ 时,力不做功; $\theta > \pi/2$ 时,力做负功。

在国际单位制中,功的单位是焦耳(J),功的量纲为 ML^2T^{-2} 。

若物体在变力 f 的作用下,由 A 沿曲线轨道运动到 B 的过程中(图 1-7),可将轨道分成若干小段。只要每小段足够小,就可看成直线,而且在这一小段上的力也可视为恒力。这样,力在任一小段位移 Δr_i 上的元功为

$$\Delta A_i = f_i \cos \theta_i \Delta r_i = \mathbf{f}_i \cdot \Delta \mathbf{r}_i \quad (1-15a)$$

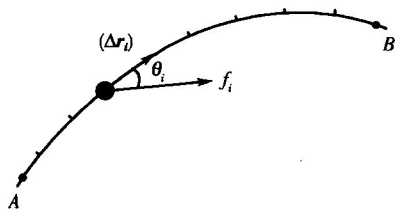


图 1-7 变力的功

总功 A 就是各元功之和在每一小段都趋于零时的极限值

$$\begin{aligned} A &= \lim_{\Delta r_i \rightarrow 0} \sum_i \Delta A_i = \lim_{\Delta r_i \rightarrow 0} \sum_i (f_i \cos \theta_i \Delta r_i) \\ &= \int_A^B f \cos \theta ds = \int_A^B \mathbf{f} \cdot d\mathbf{s} \end{aligned} \quad (1-15b)$$

2. 功率 单位时间内完成的功称为功率。设时间 Δt 内完成的为 ΔA ,则这段时间的平均功率

$$\bar{P} = \frac{\Delta A}{\Delta t} \quad (1-16)$$

当 Δt 趋近于零时,得时刻 t 的瞬时功率(简称功率)

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt} \quad (1-17)$$

国际单位制中,功率的单位为焦耳·秒⁻¹,叫做瓦特(W),量纲为 ML^2T^{-3} 。

二、动能、势能

能是指物体所具有的做功本领。机械运动范围内,物体的能量有动能和势能两种形式。物体由于运动,即由于具有速度而具有的能量叫做动能(kinetic energy);由于相互作用着的物体之间或同一物体各部分之间相对位置的改变而具有的能量叫做势能(potential energy)。由于相互作用力性质的不同,势能相应地分为重力势能、万有引力势能、弹性势能等等。

1. 动能 物体动能的大小应由具有一定速度的物体能对外做多少功来衡量。质量为 m 的物体,在外力的作用下沿曲线由 A 至 B (图 1-8),此过程中力 f 对物体做的功

$$\begin{aligned} A &= \int_A^B f \cos \theta \cdot dr = \int_{v_1}^{v_2} m \frac{dv}{dt} \cdot v dt \\ &= m \int_{v_1}^{v_2} v dv = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \end{aligned} \quad (1-18)$$

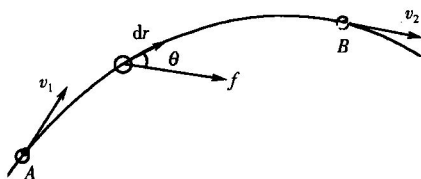


图 1-8 动能定理

式中 v_1 、 v_2 分别表示物体在点 A、B 时的速率。如果 $v_2 = 0$,即物体由 A 点以速度 v_1 开始运动,在力 f 作用下到 B 静止,这一过程中力 f 做的功为 $-\frac{1}{2} m v_1^2$,或者说这一过程中物体克服外力做功为 $\frac{1}{2} m v_1^2$ 。这说明质量为 m 的物体,速度为 v 时能对外做功,即具有的能量定义为物体的动能。以 E_k 表示

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1-19)$$

则(1-18)式为

$$A = E_{k_2} - E_{k_1} \quad (1-20)$$

即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。

动能和功一样,都是标量,单位和量纲与功相同。但是,动能是状态量,功是过程量,它们是不同的两个物理量,不能混为一谈。

2. 势能 同样,物体势能的大小也可通过外力对物体做功来考察。

(1) **重力势能**: 地面物体受重力,物体位置发生改变时,重力要做功。设质量为 m 的物体由 P_1 沿路径 L_1 到达 P_2 (如图 1-9), 在位移 dr 上重力的元功

$$dA = (G \cos \theta) dr = mg(-\cos \theta) dr = -mg dh$$

物体由 P_1 到 P_2 过程中,重力所做的总功

$$A = \int_{h_1}^{h_2} (-mg) dh = mgh_1 - mgh_2 \quad (1-21)$$

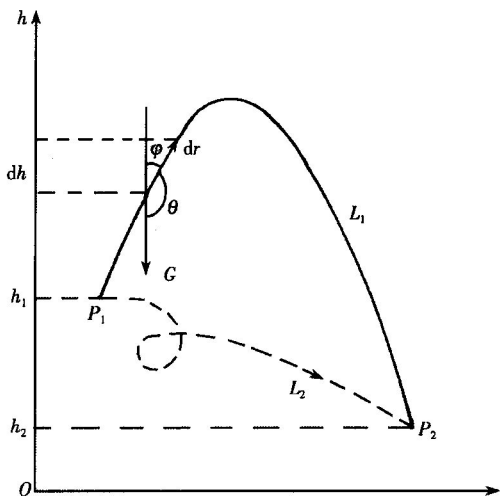


图 1-9 重力的功

可以证明,若物体由 P_1 沿任一路径 L_2 运动到 P_2 , 这一过程重力所做的功仍为式(1-21)。这说明重力的功只与运动物体的始末位置(h_1 和 h_2)有关,而与运动物体所经过的路径无关。如果以 O 点为势能零点,则 mgh 称为物体在高度 h 处的重力势能,以 E_P 表示

$$E_P = mgh \quad (1-22)$$

则

$$A = E_{P_1} - E_{P_2} = -(E_{P_2} - E_{P_1}) \quad (1-23)$$

上式表明,重力对物体所做的功,等于物体重力势能增量的负值。

重力做功这一特点也可表述为,物体沿任一闭合路径绕行一周时,重力所做的功为零。

一种力,如果它对物体沿任一闭合路径绕行一周所做的功为零,这种力叫做保守力。重力、弹性力及万有引力等都是保守力。对保守力都可引入相应的势能,保守力的功等于势能增量的负值。

势能也是标量,其量纲和单位与功相同。

(2) **弹性势能**: 如图 1-10 所示,弹簧一端固定,另一端连接一物体,该物体在光滑水平面上运动, O 点是弹簧没有形变时物体的位置,叫做平衡位置。如果弹簧伸长量为 x , 据胡克定律,在弹性限度内,弹簧的弹性力为

$$f = -kx \quad (1-24)$$

式中负号表示 f 永远指向平衡位置 O 。 k 叫做弹簧劲度系数,简称劲度。

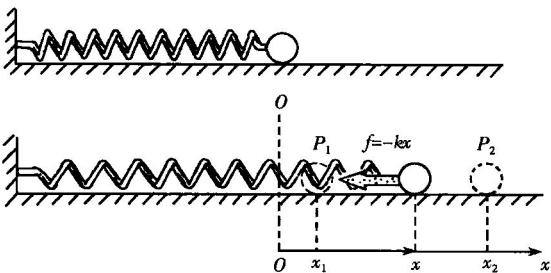


图 1-10 弹性力的功

在物体由 P_1 沿 x 轴运动到 P_2 过程中,弹性力的功为

$$A = \int_{x_1}^{x_2} f dx = - \int_{x_1}^{x_2} kx dx = -\frac{1}{2} kx_2^2 + \frac{1}{2} kx_1^2 \quad (1-25)$$

如果物体由 P_1 先向左运动,然后再折向右运动到达 P_2 点,整个过程中弹性力的功同上。这说明弹性力的功也只与运动物体的始末位置有关,而与路径无关。弹性力是保守力,可引入相应势能来计算弹性力的功。如果以平衡位置 O 为零势能点,可将 $\frac{1}{2} kx^2$ 叫做物体在 x 处的弹性势能(elastic potential energy)

$$E_P = \frac{1}{2} kx^2 \quad (1-26)$$

则

$$A = E_{P_1} - E_{P_2} = -(E_{P_2} - E_{P_1}) \quad (1-27)$$

因此,保守力的功都等于系统势能增量的负值

三、功能原理 机械能守恒定律

1. 功能原理 势能是属于系统的。重力