

“十三五”全国高等医学院校本科规划教材

供基础、临床、护理、预防、
口腔、中医、药学、医学技术类专业用

医用物理学

Physics for Medical Students

· 第 5 版 ·

主编 喀蔚波 魏 杰



北京大学医学出版社

非
外
借

“十三五”全国高等医学院校本科规划教材

供基础、临床、护理、预防、口腔、中医、药学、医学技术类专业用

医用物理学

Physics for Medical Students

(第5版)

主 编 喀蔚波 魏 杰

副主编 杨晓岚 徐春环

编 委 (按姓名汉语拼音排序)

谷俊改 (承德医学院)

喀蔚波 (北京大学医学部)

李葵花 (承德医学院)

魏 冀 (贵州医科大学)

魏 杰 (蚌埠医学院)

肖 俊 (贵州医科大学)

徐春环 (牡丹江医学院)

杨晓岚 (福建医科大学)



北京大学医学出版社

YIYONG WULIXUE

图书在版编目 (CIP) 数据

医用物理学 / 喀蔚波, 魏杰主编. —5 版. —北京: 北京大学医学出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-5659-1928-2

I. ①医… II. ①喀… ②魏… III. ①医学物理学 - 医学院校 - 教材 IV. ① R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 303326 号

医用物理学 (第 5 版)

主 编: 喀蔚波 魏 杰

出版发行: 北京大学医学出版社

地 址: (100191) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内

电 话: 发行部 010-82802230; 图书邮购 010-82802495

网 址: <http://www.pumpress.com.cn>

E-mail: booksale@bjmu.edu.cn

印 刷: 北京瑞达方舟印务有限公司

经 销: 新华书店

责任编辑: 马联华 责任校对: 靳新强 责任印制: 李 啸

开 本: 850 mm × 1168 mm 1/16 印张: 14 字数: 404 千字

版 次: 2019 年 1 月第 5 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5659-1928-2

定 价: 30.00 元

版权所有, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

修订说明

国务院办公厅颁布《关于深化医教协同进一步推进医学教育改革与发展的意见》、以“5+3”为主体的临床医学人才培养体系改革、教育部本科临床医学专业认证等一系列重要举措，对新时期高等医学教育人才培养提出了新的要求，也为教材建设指明了方向。

北京大学医学出版社出版的临床医学专业本科教材，从2001年开始，历经3轮修订、17年的锤炼，各轮次教材都高比例入选了教育部“十五”“十一五”“十二五”国家级规划教材。为了顺应医教协同和医学教育改革与发展的要求，北京大学医学出版社在教育部、国家卫生健康委员会和中国高等教育学会医学教育专业委员会指导下，经过前期的广泛调研、综合论证，启动了第4轮教材的修订再版。

本轮教材基于学科制课程体系，在院校申报和作者遴选、编写指导思想、临床能力培养、教材体系架构、知识内容更新、数字资源建设等方面做了优化和创新。共启动47种教材，其中包含新增的《基础医学概论》《临床医学概论》《诊断学》《医患沟通艺术》4种。《基础医学概论》和《临床医学概论》虽然主要用于非临床医学类专业学生的学习，但须依托于临床医学的优秀师资才能高质量完成，故一并纳入本轮教材中。《诊断学》与《物理诊断学》《实验诊断学》教材并存，以满足不同院校课程设置差异。第4轮教材修订的主要特点如下：

1. 为更好地服务于全国高等院校的医学教育改革，对参与院校和作者的遴选精益求精。教材建设的骨干院校结合了研究型与教学型院校，并注重不同地区的院校代表性；由各学科的委员会主任委员或理事长和知名专家等担纲主编，由教学经验丰富的专家教授担任编委，为教材内容的权威性、院校普适性奠定了坚实基础。

2. 以“符合人才培养需求、体现教育改革成果、教材形式新颖创新”为指导思想，以深化岗位胜任力培养为导向，坚持“三基、五性、三特定”原则，密切结合国家执业医师资格考试、全国硕士研究生入学考试大纲。

3. 部分教材加入了联系临床的基础科学案例、临床实践应用案例,使教材更贴近基于案例的学习、以问题为导向的学习等启发式和研讨式教学模式,着力提升医学生的临床思维能力和解决临床实际问题的能力;适当加入知识拓展,引导学生自学。

4. 为体现教育信息化对医学教育的促进作用,将纸质教材与二维码技术、网络教学平台相结合,教材与微课、案例、习题、知识拓展、图片、临床影像资料等融为一体,实现了以纸质教材为核心、配套数字教学资源的融媒体教材建设。

在本轮教材修订编写时,各院校对教材建设提出了很好的修订建议,为第4轮教材建设的顶层设计和编写理念提供了详实可信的数据储备。第3轮教材的部分主编由于年事已高,此次不再担任主编,但他们对改版工作提出了很多宝贵的意见。前3轮教材的作者为本轮教材的日臻完善打下了坚实的基础。对他们的贡献,我们一并表示衷心的感谢。

尽管本轮教材的编委都是多年工作在教学一线的教师,但囿于现有水平,书中难免有不当之处。欢迎广大师生多提宝贵意见,反馈使用信息,以臻完善教材的内容,提高教材的质量。

“十三五”全国高等医学院校 本科规划教材评审委员会

顾 问 王德炳

主任委员 柯 杨 詹启敏

副主任委员 吕兆丰 王维民

秘 书 长 王凤廷

委 员 (按姓名汉语拼音排序)

蔡景一 曹德品 崔慧先 邓峰美 丁元林

管又飞 黄爱民 黄元华 姜志胜 井西学

黎孟枫 李春江 李春鸣 李 燕 刘传勇

刘永年 刘志跃 罗自强 雒保军 宋晓亮

宋焱峰 宋印利 唐世英 陶仪声 王 滨

王鹏程 王松灵 温小军 文民刚 肖纯凌

尹思源 于春水 袁聚祥 张晓杰 朱望东

序

国务院办公厅《关于深化医教协同进一步推进医学教育改革与发展的意见》(以下简称《意见》)指出,医教协同推进医学教育改革与发展,加强医学人才培养,是提高医疗卫生服务水平的基础工程,是深化医药卫生体制改革的重要任务,是推进健康中国建设的重要保障。《意见》明确要求加快构建标准化、规范化医学人才培养体系,全面提升人才培养质量。要求夯实5年制临床医学教育的基础地位,推动基础与临床融合、临床与预防融合,提升医学生解决临床实际问题的能力,推进信息技术与医学教育融合。从国家高度就推动医学教育改革作出了部署、明确了方向。

高质量的医学教材是满足医学教育改革、培养优秀医学人才的核心要素,与医学教育改革相辅相成。北京大学医学出版社出版的临床医学专业本科教材,立足于岗位胜任力的培养,促进自主学习能力建设,成为临床医学专业本科教学的精品教材,为全国高等医学院校教育教学与人才培养工作发挥了重要作用。

在医教协同的大背景下,北京大学医学出版社启动了第4轮教材的修订再版工作。全国医学院校一大批活跃在教学一线的专家教授,以无私奉献的敬业精神和严谨治学的科学态度,积极参与到本轮教材的修订和建设工作中。相信在全国高等医学院校的大力支持下,有广大专家教授的热情奉献,新一轮教材的出版将为我国高等医学院校人才培养质量的提高和医学教育改革的发展发挥积极的推动作用。

柯楊 詹不敏

前言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式及相互作用的自然科学。物理学的基本理论已渗透到自然科学的各个领域，并已应用于生产技术的许多部门，是其他自然科学和工程技术的基础。同时，在人类追求真理、探索未知世界的过程中，物理学所展现的一系列科学的世界观和方法论也深刻地影响着人类对物质世界的基本认识以及人类的思维方式和社会生活，是人类文明发展的基石，在人才的科学素质培养中具有十分重要的地位。作为公共基础课程，医药专业学生学习物理学不仅可以掌握物理学的基本概念、原理和方法，获得对自然界的基本认识，提高分析问题、解决问题的能力，而且在物理学课程学习中得到的训练对于自身科学素质的养成、研究能力的提高和科学世界观的形成也是其他课程无法替代的。正因如此，这些将使医药专业学生在物理学课程上的学习成果支撑他们今后的学习、研究和工作。

当然，物理学涉及的物理现象丰富，理论体系庞大，研究方法灵活多样，并且与大量的实验现象紧密结合，这些会使很多非物理学专业（特别是医药专业）的学生感到物理学课程难度大、掌握困难。要学好物理学，就需要了解物理学课程的特点，应将物理学的基本概念、基本原理和基本方法作为学习的重点，学习、体会物理学对于不同研究对象、不同运动形式所使用的研究手段和研究方法，寻找它们之间的联系和区别，思考这些研究手段和方法可以解决哪些实际问题。对于重要的公式，要清楚各个参量的物理意义，了解公式推导或证明的思路和过程，明确适用条件和范围。其实，并不是所有公式都要死记硬背，知道公式的由来后，只需记牢少数几个最基本的公式，其他公式则都可以由之推导出来。应摒弃中学应试的学习方法，对待习题的态度不应只关注结果，更要注重解题过程，把习题答案背下来应付考试的方式一定会事与愿违。本书也设置了习题，目的是帮助学生巩固知识、查找问题。解题时分析、思考解决问题的思路和方法才是最重要的。得到习题解答后应养成对结果进行讨论、反思的习惯，应能举一反三。总之，掌握正确的学习方法才能体会到物理学的简洁明快、均衡对称以及和谐统一的科学美感。

本书是在《医用物理学》(第4版)基础上修改、补充而成的,除了改正了第4版中发现的错误并使文字更加准确、流畅而易于理解外,与第4版相比,主要改动如下:①删除了气体分子动理论和热力学基本定律两章;②增加了二维码数字教学资源,在各章中均设置了二维码内容,读者可以通过手机扫码链接到我们提供的数字教学资源,这些教学资源包括每章的习题解答、教材的一些扩展内容、部分公式的推导过程以及新补充的物理学相关内容在医学中的应用;③在第一章中增加了“物体的弹性”一节;④对参考文献做了修改和补充。

本书主要由北京大学医学部、蚌埠医学院、福建医科大学、牡丹江医学院、贵州医科大学及承德医学院的教师编写。在此感谢前几版所有编委打下的良好基础,感谢北京大学医学出版社给予的大力支持,特别感谢责任编辑的辛勤工作。也希望读者能对本书中的不当之处提出批评指正,以使我们改进并提高本书的质量,更好地为读者服务。

喀蔚波

二维码资源索引

资源名称	资源类型	页码
1-1 矢量的标积和矢积	下载资源	2
1-2 刚体的平动	视频	7
1-3 切应力	视频	20
1-4 骨的力学性质	下载资源	22
1-5 习题解答	下载资源	23
2-1 流体力学的发展历程	下载资源	25
2-2 流动相似性	下载资源	32
2-3 泊肃叶定律的推导	下载资源	33
2-4 红细胞在血浆中的沉降速度	下载资源	34
2-5 计示压强	下载资源	35
2-6 柯氏音测量血压的原理	下载资源	35
2-7 习题解答	下载资源	37
3-1 阻尼振动、受迫振动与共振	下载资源	43
3-2 超声波	下载资源	59
3-3 习题解答	下载资源	61
4-1 新生儿呼吸窘迫综合征	下载资源	67
4-2 人体内的栓塞现象	下载资源	70
4-3 习题解答	下载资源	70
5-1 习题解答	下载资源	91
6-1 习题解答	下载资源	101
7-1 电磁振荡和电磁波	下载资源	116
7-2 习题解答	下载资源	119
8-1 习题解答	下载资源	143
9-1 习题解答	下载资源	160
10-1 习题解答	下载资源	175
11-1 习题解答	下载资源	187
12-1 习题解答	下载资源	199

目 录

第1章 力学基本定律.....1	
第一节 质点动力学的基本定律1	
一、牛顿运动定律1	
二、动能定理、功能原理和机械能守恒定律2	
三、动量定理和动量守恒定律5	
第二节 刚体的定轴转动6	
一、平动和转动6	
二、刚体定轴转动的运动学7	
三、刚体定轴转动定律8	
四、刚体定轴转动的功和能 ... 12	
第三节 角动量守恒定律 14	
第四节 进动 16	
第五节 物体的弹性 18	
一、弹性和塑性 18	
二、应变 18	
三、应力 19	
四、弹性模量 20	
习题 23	
第2章 流体的运动..... 25	
第一节 理想流体的定常流动 25	
一、理想流体 25	
二、定常流动 26	
三、连续性方程 26	
第二节 伯努利方程 27	
一、伯努利方程 27	
二、伯努利方程的应用 28	
第三节 黏性流体的流动 30	
一、牛顿黏滞定律 30	
二、层流、湍流与雷诺数 32	
三、泊肃叶定律 32	
四、黏性流体的伯努利方程 ... 33	
五、斯托克斯定律 34	
第四节 血液的流动 35	
一、血压 35	
二、血流速度 36	
三、血液的黏度 36	
习题 37	
第3章 振动和波动..... 39	
第一节 简谐振动 39	
一、简谐振动 39	
二、简谐振动的特征量 40	
三、简谐振动的旋转矢量表示法 42	
四、简谐振动的能量 42	
第二节 简谐振动的合成 43	
一、同方向、同频率的简谐振动的合成 43	
二、同方向、不同频率的简谐振动的合成 44	
三、相互垂直的、同频率简谐振动的合成 45	
四、相互垂直的、不同频率的简谐振动的合成 46	
第三节 平面简谐波 47	
一、机械波的产生 47	
二、波的特征量 48	
三、平面简谐波方程 48	
四、波的能量 50	
第四节 波的衍射和干涉 51	
一、惠更斯原理 51	
二、波的衍射 52	
三、波的叠加原理和波的干涉 ... 53	
四、驻波 54	
第五节 声波 56	
一、声速 56	
二、声压和声强 56	
三、声强级及与响度级 57	
四、声波的衰减和吸收 59	
第六节 多普勒效应 59	
一、声源不动，观察者运动 ... 59	

二、观察者不动, 声源运动	60	第五节 静电场中的电介质	86
三、声源与观察者相对于介质 同时运动	60	一、电介质及其结构	86
习题	61	二、电介质的极化	86
第4章 液体的表面现象	63	三、均匀电介质中的静电场	87
第一节 液体的表面张力和表面能	63	第六节 静电场的能量	88
一、液体的表面层	63	一、电容器及其电容	88
二、表面能和表面张力	64	二、电容器中的电能	89
三、表面张力系数	64	三、静电场的能量与能量密度	89
第二节 弯曲液面的附加压强	65	习题	91
一、弯曲液面的附加压强	65	第6章 直流电	92
二、肺泡中的表面活性物质	66	第一节 欧姆定律的微分形式	92
第三节 毛细现象	67	一、电流与电流密度	92
一、润湿与不润湿现象	67	二、欧姆定律的微分形式	93
二、毛细现象	68	三、电解质导电	95
三、气体栓塞	69	第二节 电源电动势	95
习题	70	一、电源	95
第5章 静电场	71	二、电源电动势	96
第一节 电场与电场强度	71	第三节 基尔霍夫定律及其应用	96
一、库仑定律	71	一、基尔霍夫定律	97
二、电场与电场强度	72	二、基尔霍夫定律的应用	97
三、场强叠加原理	72	第四节 电容器的充电和放电	98
四、场强的计算	72	一、RC 电路的充电过程	98
第二节 高斯定理	74	二、RC 电路的放电过程	100
一、电场线和电通量	74	习题	101
二、高斯定理	75	第7章 电磁现象	102
三、高斯定理的应用	76	第一节 磁场	102
第三节 静电场力的功与电势	78	一、磁场与磁感应强度	102
一、静电场力做功	78	二、磁通量	103
二、静电场的环路定理	78	三、电流元的磁场与毕奥-沙伐尔 定律	104
三、电势	79	四、安培环路定理	106
四、电势叠加原理	79	第二节 磁场对运动电荷的作用力	108
五、点电荷及点电荷系电场中的 电势	80	一、洛伦兹力	108
六、等势面	81	二、带电粒子在磁场中的运动	108
七、电场强度与电势的关系	81	三、霍尔效应	110
第四节 电偶极子的电场	82	第三节 磁场对载流导线的作用	111
一、电偶极子及其电偶极矩	82	一、载流导线在磁场中所受 的力	111
二、电偶极子电场的电势	82	二、载流线圈在磁场中所受的	
三、电偶极子电场的场强	83		
四、心电场与心电图	84		

力矩	112	第 9 章 几何光学	145
三、磁力矩的功和附加能量	113	第一节 球面折射成像	145
第四节 物质的磁性	114	一、单球面折射	145
一、磁介质及其磁化	114	二、共轴球面系统	147
二、磁导率与磁场强度	115	第二节 透镜	148
第五节 电磁感应	115	一、薄透镜成像公式	148
一、电磁感应的基本定律	115	二、薄透镜的组合	149
二、动生电动势和感生电动势	116	三、厚透镜	150
三、自感现象	116	四、柱面透镜	151
四、RL 电路的暂态过程	117	五、透镜的像差	152
五、磁场的能量	118	第三节 眼睛	152
习题	119	一、眼的光学结构	152
第 8 章 波动光学	121	二、眼的调节	153
第一节 光的干涉	121	三、眼的分辨本领及视力	154
一、光的相干性	121	四、眼的屈光不正及矫正	155
二、杨氏双缝实验	122	第四节 几种医用光学仪器	157
三、洛埃德镜实验	123	一、放大镜	157
四、光程和光程差	124	二、光学显微镜	157
五、平行平面薄膜的干涉	125	三、纤镜	159
六、增透膜	126	习题	160
第二节 光的衍射	126	第 10 章 量子物理基础	162
一、惠更斯-菲涅耳原理	127	第一节 热辐射	162
二、单缝衍射	127	一、热辐射现象及其规律	162
三、圆孔衍射	129	二、黑体辐射定律	163
四、光学系统的分辨本领	129	三、普朗克的量子假设	164
五、衍射光栅	130	第二节 光的量子性	165
第三节 光的偏振	133	一、光电效应和爱因斯坦的 光子假设	165
一、自然光与偏振光	133	二、康普顿效应	166
二、偏振片的起偏与检偏	134	第三节 微观粒子的波动性	167
三、马吕斯定律	135	一、德布罗意波(物质波) 及其实验验证	167
四、反射和折射时光的偏振	136	二、物质波的统计学解释	168
第四节 光的双折射现象	137	第四节 不确定关系	168
一、光的双折射现象	137	第五节 薛定谔方程及其应用	171
二、惠更斯原理在光的双折射 现象中的应用	138	一、波函数、定态薛定谔 方程	171
三、偏振光的干涉	140	二、势阱和势垒中的粒子 与隧道效应	172
第五节 旋光现象	141	三、氢原子和电子自旋	173
第六节 光的吸收和散射	141	习题	175
一、光的吸收	142		
二、光的散射	142		
习题	143		

第 11 章 原子物理学基础176

第一节 光谱176

一、氢原子光谱176

二、发射光谱和吸收光谱177

第二节 激光179

一、激光的特性179

二、激光的工作原理180

三、激光的生物效应及医学应用182

第三节 原子核的基本性质183

第四节 核衰变及其规律184

一、核衰变184

二、核衰变规律185

三、PET 及其融合技术186

习题187

第 12 章 X 射线188

第一节 X 射线的产生188

第二节 X 射线的基本性质190

第三节 X 射线衍射和 X 射线谱190

一、X 射线衍射191

二、X 射线谱191

第四节 物质对 X 射线的吸收规律194

第五节 X 射线的医学应用195

一、诊断方面的应用195

二、治疗方面的应用195

第六节 X 射线计算机断层成像 (X-CT)196

一、图像重建原理196

二、CT 变换与 CT 值197

三、CT 的分辨率197

四、CT 的临床应用198

习题199

附录200

中英文专业词汇索引205

主要参考文献210

力学基本定律



本章导读

力学 (mechanics) 是研究物体的机械运动规律及其应用的科学。机械运动是物体之间或物体内部各部分之间相对位置发生变化的运动。虽然物质世界存在多种多样的运动形态,但机械运动既是最基本、最直观的运动形式,也是研究复杂运动的基础。本章将以中学物理讨论过的质点在恒力作用下的运动规律为基础,介绍在变力作用下质点力学的基本概念和规律,并进一步讨论特殊的质点系——刚体——在定轴转动中的一些基本规律。实际物体 (如骨骼) 一般不是刚体,在外力作用下会发生形变,本章最后讨论物体的弹性。

第一节 质点动力学的基本定律

动力学研究的是物体的运动和物体间相互作用的联系及其规律。当物体的大小和形状在运动中所起的作用可以忽略不计时,为使问题简化,可以把它抽象成一个只有质量而没有大小和形状的点,称为质点 (mass point)——质点是一个理想模型。质点动力学的基本规律是牛顿 (I. Newton) 运动定律。

一、牛顿运动定律

(一) 牛顿第一定律

任何物体都保持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。

牛顿第一定律表明,如果没有其他物体的作用,则所研究的物体将保持其静止或匀速直线运动状态,物体的这种性质称为物体的惯性 (inertia),因此,牛顿第一定律也称为惯性定律 (inertial law)。牛顿第一定律还表明,要改变物体的运动状态使其产生加速度,一定要有其他物体对其施加作用,这种作用就是力 (force),也就是说,力是物体获得加速度的原因。

(二) 牛顿第二定律

物体受到外力作用时,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;获得的加速度的方向与合外力的方向相同。

牛顿第二定律确定了物体的加速度 a 与其所受的力 F 以及质量 m 之间的联系,在国际单位制中,牛顿第二定律的数学表达式为

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

该定律表明,任何两个物体在同样大小的合外力作用下,质量大的物体获得的加速度较小,而质量小的物体获得的加速度较大,即质量是改变物体运动状态难易程度的物理量,是物体惯性

的量度。因此,这一意义下的质量称为惯性质量(inertial mass)。

(三) 牛顿第三定律

当物体 A 以力 F 作用在物体 B 时,物体 B 也必定同时以力 F' 作用在物体 A; F 和 F' 在同一直线上,大小相等,方向相反。其数学表达式为

$$\mathbf{F} = -\mathbf{F}' \quad (1-2)$$

这两个力分别作用在不同的物体,其中一个力称为作用力,另一个力称为反作用力,它们是相同性质的力。力学中常见的力有三种:万有引力、弹性力和摩擦力。

实验表明,牛顿运动定律不是对任何参照系都成立的。例如,一辆车 A 静止停在站台上,车对地静止,加速度为零,因为该车受的合外力为零,牛顿运动定律对地面参照系成立;当另一辆车 B 加速驶过站台时,在 B 车上的观察者看来, A 车是在向相反方向做加速运动,但 A 车受力情况并未改变,合外力为零。因此,对于加速运动的 B 车参照系,牛顿运动定律不成立。凡是牛顿定律成立的参照系称为惯性参照系,简称惯性系(inertial system)。凡是牛顿运动定律不成立的参照系称为非惯性参照系,简称非惯性系(non-inertial system)。相对于惯性系做匀速直线运动的参照系都是惯性系。实际中是根据实验观察来判断一个参照系是否是惯性系。太阳参照系——以太阳中心为坐标原点、坐标轴指向固定方向——是惯性系。地心参照系近似为惯性系。研究地面物体的运动时,常以地面为参照系,该参照系也近似为惯性系。

二、动能定理、功能原理和机械能守恒定律

质点在力的作用下会发生运动状态、空间位置、运动形式等方面的改变,同时当力对质点做功时,质点的能量也会发生变化。功和能量的概念是解决动力学问题的另一途径。

(一) 力的功

1. 恒力的功 设物体(可视为质点)在恒力 F 的作用下沿直线运动,位移为 r ,力 F 的方向和质点的运动方向的夹角为 θ ,如图 1-1 所示,则力在位移方向的分量与该位移大小的乘积,就是力 F 对质点所做的功(work),用 A 表示,即

$$A = F \cos \theta \cdot r \quad (1-3)$$

功是标量(见数字资源),只有大小,没有方向。在功的表达式中,力和位移都是矢量,按照矢量标积的定义,式(1-3)可写成

$$A = \mathbf{F} \cdot \mathbf{r} \quad (1-4)$$

2. 变力的功 即质点在变力作用下沿任意曲线由 a 点运动到 b 点的过程中,变力对质点所做的功。如图 1-2 所示,将路径 ab 分成许多小段,当每一小段分得足够小时,小段弧可看做是直线,弧长等于弦长,且每一个小段上作用于质点的力可看做是恒力。任取一小段,位移为 $d\mathbf{r}$,相应的作用力为 $\mathbf{F}$,则这一小段上的力 $\mathbf{F}$ 对质点所做的功为元功,用 dA 表示,即

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F \cos \theta dr \quad (1-5)$$

式中 θ 为 $\mathbf{F}$ 与 $d\mathbf{r}$ 的夹角。将整个路径上的所有元功加起来,即可得到力沿整个路径对质点做的功。当 dr 取无限小时,即得到

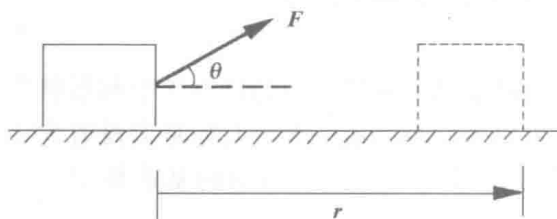


图 1-1 恒力的功

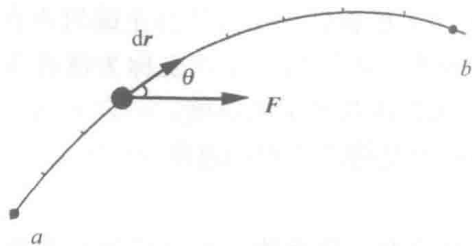


图 1-2 变力的功



$$A = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_a^b F \cos\theta dr \quad (1-6)$$

此式为功的一般定义式。可以看出，功是力对空间的积累效应。根据 F 与 θ 随路程 r 变化的函数关系，可由上式用积分法求出功的量值。

在国际单位制中，功的单位是焦耳 (J)。

3. 功率 功率是描述力对质点做功快慢的物理量。设在 Δt 时间内完成的功为 ΔA ，则这段时间的平均功率为

$$\bar{P} = \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

当 Δt 趋于零时，即得到 t 时刻的**瞬时功率** (简称功率，power)

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt} \quad (1-7)$$

由式 (1-5) 得

$$P = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = F \cos\theta \cdot v \quad (1-8)$$

由此可见，功率等于力在速度方向的分量和速度大小的乘积。

在国际单位制中，功率的单位是瓦特 (W)。

(二) 动能和动能定理

如图 1-3 所示，设质点在变力 $\mathbf{F}$ 作用下，沿任意曲线从 a 点运动到 b 点，将牛顿第二定律代入功的定义式 (1-6)，即得到在此过程中合外力所做的功为

$$A = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_a^b F \cos\theta dr = m \int_a^b a_t dr$$

其中 a_t 为质点的切向加速度，由于

$$a_t = \frac{dv}{dt}, \quad dr = v dt$$

得

$$A = m \int_a^b \frac{dv}{dt} v dt = m \int_a^b v dv = \frac{1}{2} m v_b^2 - \frac{1}{2} m v_a^2 \quad (1-9)$$

v_a 和 v_b 分别代表质点在 a 点和 b 点的速率。式 (1-9) 说明，力做功的结果是改变了物体的运动状态。定义物体的质量与其运动速率的平方的乘积的 $1/2$ 为物体的**动能** (kinetic energy)，用 E_k 表示，即

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1-10)$$

式 (1-9) 可以写为

$$A = E_{kb} - E_{ka} \quad (1-11)$$

式中 E_{ka} 和 E_{kb} 分别表示质点在 a 点和 b 点的动能。该式表明，合外力对质点所做的功等于质点动能的增量——这一结论称为**动能定理** (kinetic energy theorem)。

根据动能定理，仅由始末状态的动能就可以得到整个过程中力对物体所做的功，即后者不涉及运动过程。因此，在解决某些力学问题时，应用动能定理要比应用牛顿第二定律更简便。

动能是物体运动状态的单值函数，当运动速度发生变化时，动能随之而变。动能是标量，在国际单位制中，动能的单位与功的单位 (J) 相同。

(三) 保守力和势能

1. 重力的功 如图 1-4 所示，一质量为 m 的质点在重力作用下沿任一曲线 acb 由 a 点运动到 b 点的过程中，重力所做的功为

$$A = \int_{acb} mg \cos\theta dr = \int_a^b -mg dh$$

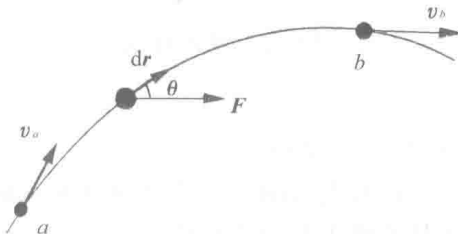


图 1-3 动能定理