

高等医学院校试用教材

医用物理学

秦任甲 明纪堂 主编

广西师范大学出版社

本书可作为高等医学院校物理专业教材



前 言

医用物理学是为实现医学各有关专业培养目标而开设的一门基础课。医学有关专业所涉及的物理知识十分广泛,但作为教材其内容的选择必然受到教学时数和其它一些条件的制约。为此,我们根据卫生部1982年颁布的高等医学院校医用物理学教学大纲的基本精神,结合我们的教学经验,从医学教育的实际出发,确定了本教材的内容。把与医学结合比较密切的物理基础理论和基本知识作为本教材的主要内容,适当介绍物理知识在医学上的应用,同时还编入了一些新发展起来的医学物理知识和应用技术。内容选择尽量避免与中学物理重复,力求具有医用物理学的特点,形成自身的有别于其它物理学的知识体系。

根据交直流电的内在联系,我们把交直流电路归为一章,这对于学生掌握较系统的交直流电知识是很有益的。考虑到学生入学前实际具有的交流电、电子技术、血液流变学等知识很少或者没有,而这些知识又在医学上已经或正在得到日益广泛的应用,为此,本教材较详细地介绍了交流电及其在医学上应用的基本知识,拓宽了生物医学测量技术一章的内容,在液体的流动一章编入了血液的流变性一节。

本教材力求内容少而精,循序渐进,概念通俗严谨,重点内容叙述详细。章末编有习题。

本教材由桂林医学院、长治医学院、川北医学院、石河子医学院、赣南医学院、包头医学院、张家口医学院、延安医学院、大理医学院、邵阳医学院、沈阳医学院、河北省职工医学院、河北医学院邯郸分院联合编写。可供临床医学、预防医学、基础医学类专业作教材,也可供各层次医学院校师生、各级医务工作者参考。

参加编写的有马德和(第一章),王天佑(第二、三章),明纪堂(第四、五章),侯载文(第六章),潘成巨(第七章),王阿立(第八章),谢勇(第九章),李启林(第十章),秦任甲(绪论、第十一、十二章),王德霞(第十三章),叶向前(第十四章),李前勋(第十五、十六章),陈文棠(第十七章)。最后由秦任甲统一整理。除编者外,钟育乔、陈世书、王录瑞、席青霄等同志参加了审稿工作,并提出了宝贵意见。黄慰怀为本书的主审。桂林医学院绘图室绘制了几乎全部插图,李琦同志誊抄了部分书稿。广西师范大学出版社和其他同志为本书的编写和出版给予大力支持和帮助,在此一并致谢!

初次合编,不足、甚至错漏之处难免,恳请读者批评指正。

编 者

1989年5月

目 录

绪 论

- 第一节 物质和运动..... (1)
- 第二节 物理学研究的对象..... (1)
- 第三节 物理学与医学的关系..... (2)

第一章 力学的基本定律

- 第一节 质点动力学的基本规律..... (3)
 - 一 牛顿运动定律..... (3)
 - 二 力学单位制和量纲..... (3)
- 第二节 功和能..... (4)
 - 一 功 功率 保守力的功..... (4)
 - 二 动能和势能..... (6)
 - 三 功能原理 机械能守恒定律..... (7)
- 第三节 动量和冲量..... (8)
 - 一 动量定理..... (8)
 - 二 动量守恒定律..... (9)
- 第四节 刚体的转动..... (11)
 - 一 刚体的定轴转动..... (11)
 - 二 转动动能 转动惯量..... (14)
 - 三 转动定律..... (16)
 - 四 角动量 角动量守恒定律..... (18)
- 第五节 经典力学的适用范围..... (20)
 - 一 经典力学只适用于解决物体的低速运动问题..... (20)
 - 二 经典力学只适用于宏观物体, 不适用于微观粒子..... (21)
- 习题..... (21)

第二章 物体的弹性

- 第一节 应力和应变..... (23)
 - 一 应力..... (23)
 - 二 应变..... (24)
- 第二节 弹性模量..... (25)
 - 一 弹性和范性..... (26)
 - 二 弹性模量..... (26)
- 第三节 拉普拉斯公式..... (27)
- 习题二..... (29)

第三章 液体的流动

- 第一节 理想流体的稳定流动..... (31)
 - 一 理想流体..... (31)

- 二 稳定流动..... (31)
- 三 连续性方程..... (32)
- 第二节 伯努利方程..... (32)
 - 一 伯努利方程..... (32)
 - 二 伯努利方程的应用..... (34)
- 第三节 牛顿粘滞定律..... (35)
 - 一 牛顿粘滞定律..... (36)
 - 二 实际液体的伯努利方程..... (38)
 - 三 血流速度和血压..... (38)
- 第四节 泊肃叶公式..... (39)
- 第五节 湍流..... (41)
 - 一 湍流及雷诺数..... (41)
 - 二 血液中的湍流..... (42)
- 第六节 血液的流变性..... (42)
 - 一 非牛顿流体与表观粘度..... (42)
 - 二 Casson 方程..... (43)
 - 三 影响血液粘度的因素..... (44)
 - 四 微血管中的血液流动..... (46)
 - 五 血液流变学的医学应用及其进展..... (46)
- 习题三..... (47)

第四章 振动和波

- 第一节 谐振动..... (48)
 - 一 谐振动方程..... (48)
 - 二 谐振动的速度、加速度及能量..... (49)
- 第二节 谐振动的合成..... (51)
 - 一 振动方向在同一直线上同频率谐振动的合成..... (51)
 - 二 振动方向在同一直线上, 而频率不同的谐振动的合成..... (52)
 - 三 谐振分析..... (53)
 - 四 互相垂直的同频率谐振动的合成..... (54)
- 第三节 简谐波..... (56)
 - 一 波的产生与传播..... (56)
 - 二 简谐波的波动方程..... (57)
 - 三 波的能量..... (58)
 - 四 波的衰减..... (58)
- 第四节 惠更斯原理..... (60)

一 波的衍射..... (60)	四 毛细现象..... (96)
二 波的反射..... (61)	五 表面活性物质..... (98)
三 波的干涉..... (61)	六 表面吸附..... (98)
四 驻波..... (63)	第五节 液态晶体..... (99)
习题四..... (65)	习题六..... (101)
第五章 声波	第七章 热力学基础
第一节 声波..... (66)	第一节 热力学系统和热力学过程..... (103)
一 声波的物理性质..... (66)	一 系统和环境..... (103)
二 声压 声强 声阻抗..... (66)	二 平衡态及其描述..... (103)
三 声波的反射和折射..... (67)	三 热力学过程..... (104)
四 声强级和响度级..... (69)	四 内能 功和热量..... (104)
第二节 叩诊和听诊的物理基础..... (70)	第二节 热力学第一定律..... (105)
一 叩诊的物理基础..... (70)	一 热力学第一定律..... (105)
二 听诊的物理基础..... (71)	二 热力学第一定律的应用..... (106)
第三节 噪声及其危害..... (72)	第三节 热力学第二定律..... (109)
第四节 多普勒效应..... (73)	一 可逆过程和不可逆过程..... (109)
第五节 超声和次声..... (75)	二 热力学第二定律..... (109)
一 超声波的产生..... (75)	三 热力学第三定律的统计意义..... (110)
二 超声波的性质..... (75)	第四节 熵 熵增原理..... (111)
三 超声波的作用..... (75)	一 熵..... (111)
四 超声波在医学上的应用..... (76)	二 熵增原理..... (113)
五 次声..... (79)	三 热力学第二定律和生命系统..... (113)
习题五..... (79)	习题七..... (114)
第六章 分子物理学	第八章 静电场
第一节 理想气体压强公式和能量公式..... (81)	第一节 电场强度..... (115)
一 理想气体..... (81)	一 电场强度..... (115)
二 理想气体的压强公式..... (83)	二 场强叠加原理..... (116)
三 理想气体的能量公式..... (84)	第二节 电势..... (117)
四 道尔顿分压定律..... (85)	一 电场力作功..... (117)
第二节 气体分子的速率分布和能量分布..... (86)	二 电势..... (118)
一 麦克斯韦速率分布定律..... (86)	三 电势叠加原理..... (119)
二 玻尔兹曼能量分布定律..... (88)	四 电场强度和电势的关系..... (120)
第三节 非平衡态物质的输运过程..... (88)	第三节 电偶极子的电势..... (121)
一 扩散过程..... (89)	一 电偶极子电场中的电势..... (121)
二 物质在生物膜内的输运..... (90)	二 电偶极层的电势..... (122)
三 气体的输运和交换..... (90)	第四节 静电场中的导体..... (124)
第四节 液体的表面现象..... (92)	一 导体的静电平衡..... (124)
一 表面能和表面张力..... (92)	二 静电屏蔽..... (125)
二 弯曲液面的附加压强..... (94)	第五节 静电场中的电介质..... (126)
三 气体栓塞..... (95)	一 电介质..... (126)
	二 电介质的极化..... (126)
	三 电极化强度与电极化率..... (127)

四 介电常数.....	(128)	第二节 电流的磁场.....	(165)
第六节 生物膜电位.....	(130)	一 毕奥-萨伐尔定律.....	(165)
一 能斯脱方程.....	(130)	二 几种电流的磁场公式.....	(166)
二 静息电位.....	(131)	第三节 磁场对载流导线的作用.....	(170)
三 动作电位.....	(132)	一 磁场对载流直导线的作用.....	(170)
四 神经冲动的传播.....	(132)	二 磁场对矩形载流线圈的作用.....	(171)
第七节 心电向量.....	(133)	三 磁矩 磁偶极子.....	(171)
一 心肌细胞的极化向量.....	(133)	第四节 物质的磁性.....	(172)
二 瞬间综合心电向量.....	(133)	一 磁介质对磁场的影响.....	(172)
三 空间心电向量环.....	(134)	二 磁介质.....	(174)
四 心电图.....	(134)	三 磁化强度和磁化率.....	(176)
习题八.....	(135)	第五节 磁场的生物作用和磁疗.....	(177)
第九章 电流.....		一 磁场的生物作用.....	(177)
第一节 电流强度和电流密度.....	(137)	二 磁诊断和治疗.....	(178)
一 电流 电流强度.....	(137)	习题十.....	(180)
二 电流密度.....	(137)	第十一章 生物医学电子测量技术.....	
三 欧姆定律的微分形式.....	(139)	第一节 测量系统.....	(181)
四 电解质的导电.....	(139)	一 测量系统的组成.....	(181)
五 电流密度在人体导电中的意义.....	(140)	二 测量系统的传递函数.....	(181)
第二节 含源电路的欧姆定律 基尔霍夫定律.....	(140)	第二节 生物电检测电极.....	(182)
一 电动势.....	(140)	一 电极的电位.....	(182)
二 闭合电路的欧姆定律.....	(142)	二 体表电极.....	(183)
三 一段含源电路的欧姆定律.....	(142)	三 体内电极.....	(183)
四 基尔霍夫定律.....	(144)	四 微电极.....	(184)
第三节 交流电路.....	(145)	第三节 医用换能器.....	(185)
一 正弦交流电.....	(145)	一 电阻应变式换能器.....	(185)
二 串联交流电路.....	(146)	二 电容式换能器.....	(187)
三 并联交流电路.....	(150)	三 热敏式换能器.....	(189)
第四节 电流对人体的作用.....	(152)	四 光敏式换能器.....	(189)
一 直流电对人体的作用.....	(154)	第四节 晶体管放大器.....	(190)
二 低、中、高频电流对人体的作用.....	(156)	一 晶体三极管.....	(190)
三 人体对微波的吸收.....	(157)	二 晶体管单级放大器.....	(193)
第五节 触电.....	(158)	三 晶体管多级放大器.....	(196)
一 人体阻抗.....	(158)	第五节 放大器的一些主要性能指标.....	(197)
二 触电因素.....	(159)	一 输入电阻和输出电阻.....	(197)
三 触电现象.....	(160)	二 放大器的增益.....	(198)
习题九.....	(160)	三 频率特性.....	(199)
第十章 磁场.....		四 信噪比.....	(199)
第一节 磁感应强度.....	(163)	第六节 显示与记录.....	(200)
一 磁感应强度.....	(163)	一 机械描记装置.....	(200)
二 磁通量.....	(164)	二 电子显示装置.....	(200)
		习题十一.....	(207)

第十二章 波动光学

第一节 光的干涉	(209)
一 光波的叠加	(209)
二 杨氏双缝干涉实验	(211)
三 薄膜干涉	(214)
第二节 光的衍射	(216)
一 单狭缝衍射	(216)
二 光栅衍射	(219)
三 圆孔衍射	(221)
第三节 光的偏振	(222)
一 偏振光和自然光	(222)
二 起偏和检偏	(223)
三 马吕斯定律	(223)
四 产生偏振光的几种方法	(224)
第四节 旋光性	(225)
一 旋光性	(225)
二 旋光计	(226)
习题十二	(227)

第十三章 几何光学

第一节 球面折射	(228)
一 单球面折射	(228)
二 共轴球面系统	(230)
第二节 透镜	(230)
一 薄透镜	(230)
二 厚透镜	(232)
三 柱面透镜	(234)
四 透镜的像差	(234)
第三节 眼睛	(235)
一 人眼的结构	(235)
二 平均眼和简约眼	(236)
三 眼的调节	(236)
四 眼的分辨本领和视力	(237)
五 眼的屈光不正及其矫正	(237)
六 眼的色觉	(240)
第四节 放大镜与显微镜	(241)
一 放大镜	(241)
二 显微镜	(242)
第五节 检眼镜和纤镜	(245)
一 检眼镜	(245)
二 纤镜	(245)
习题十三	(246)

第十四章 辐射 吸收 波粒二象性

第一节 热辐射	(248)
一 辐射本领和吸收率	(248)
二 基尔霍夫辐射定律	(249)
三 黑体辐射定律	(250)
四 热辐射的应用	(252)
第二节 非温度辐射	(253)
一 微光类型和荧光分析	(253)
二 紫外线	(254)
第三节 光的吸收	(255)
一 选择性吸收	(255)
二 朗伯-比尔定律	(255)
第四节 波粒二象性	(258)
一 光电效应	(258)
二 康普顿效应	(260)
三 光子的质量和动量	(261)
四 微观粒子的波动性	(262)
第五节 电子显微镜	(263)
习题十四	(264)

第十五章 原子结构理论基础

第一节 波尔的原子结构理论	(266)
第二节 波尔理论的发展	(267)
一 椭圆轨道理论	(267)
二 角动量的空间量子化	(269)
三 电子的自旋	(270)
四 原子的电子壳层理论	(270)
第三节 电子的几率分布	(271)
一 波函数的物理意义	(271)
二 氢原子电子的几率分布	(272)
第四节 光谱	(274)
一 原子光谱	(274)
二 分子光谱	(276)
三 吸收光谱	(277)
第五节 激光	(277)
一 激光产生的原理	(277)
二 激光的特性	(279)
三 激光的生物作用和医学应用	(280)
四 医学上常用的几种激光器	(281)
习题十五	(281)

第十六章 X射线

第一节 X射线的发生	(282)
一 X射线管	(282)

二 X射线的发生装置	(283)	四 放射系	(301)
第二节 X射线的基本性质 强度 硬度	(284)	五 放射性核素的来源	(301)
一 X射线的一般性质	(284)	第三节 射线与物质的相互作用	(304)
二 X射线的强度与硬度	(384)	一 带电重粒子与物质的相互作用	(305)
第三节 X射线谱	(285)	二 带电轻粒子与物质的相互作用	(305)
一 连续X射线谱	(286)	三 中子与物质的相互作用	(306)
二 线状X射线谱	(287)	四 γ 光子与物质的相互作用	(307)
第四节 X射线的衰减	(288)	第四节 辐射剂量	(307)
一 光电效应	(289)	一 照射剂量	(307)
二 康普顿效应	(289)	二 吸收剂量	(308)
三 电子对的生成	(289)	三 f 因子	(308)
四 X射线的衰减规律	(290)	四 剂量当量	(308)
第五节 X射线的医学应用	(291)	第五节 放射性探测器	(309)
一 放射治疗	(291)	一 电离室探测器	(309)
二 透视、照片和造影	(291)	二 盖革-弥勒计数管	(309)
三 X射线摄影的特种技术	(292)	三 闪烁计数器	(310)
习题十六	(293)	第六节 放射性核素在医学上的应用	(311)
第十七章 原子核和放射性		一 示踪法	(311)
第一节 原子核	(294)	二 放射性核素诊断	(312)
一 原子核的组成	(294)	三 核素显像装置	(312)
二 原子核的结合能	(294)	四 放射性核素治疗	(313)
三 原子核的大小	(296)	五 辐射防护	(313)
四 核力	(297)	习题十七	(314)
第二节 放射性核素的衰变	(297)	附录	
一 放射性核素的衰变方式	(297)	附录一 矢量的简单运算	(315)
二 放射性核素的衰变规律	(299)	附录二 国际单位制	(317)
三 放射性活度	(301)	附录三 常用物理常数	(323)
		附录四 部分习题答案	(324)

绪 论

第一节 物质和运动

辩证唯物论的观点认为，世界是由物质组成的。尽管组成世界的物质各种各样，但可划分成两种基本形态：大到地球上的山川河流、宇宙间的日月星辰，小到组成形形色色物体的分子、原子、电子，这种形态的物质称为实物。此外，还有引力场、电场、磁场和核力场等等，这种形态的物质有一个明显的特点，它不是由分子、原子组成，但其本身具有能量、动量等物质的特性，人们把它称为场。无论是实物还是场，都是不依赖于人们的主观意识而独立存在的、并能为人们所认识的客观实在。

实物和场既有本质的区别，又有密切的联系。任何实物周围都有引力场。任何电荷周围都存在电场，任何运动电荷周围都存在电磁场等等。相距遥远的天体之间的万有引力作用靠引力场来传递，电荷之间的作用靠电场来传递，因此场是实物之间相互作用的传递者。场和实物还可互相转化，例如一定能量的光子在核力场作用下可转化为正负电子对，而正负电子对湮灭时，又可转化为光子。

组成世界的一切物质都处于永恒不停的运动之中。这里说的运动是广义的，除机械运动即位置的变动外，还包括化学的变化，生物的变化，如生命过程，思维过程等等。总之，一切物质的运动、变化和过程都是物质的运动形态。物质与运动是不可分割的，运动是物质存在的形式，是物质的固有属性。绝对没有不运动的物质，也没有非物质的运动。运动是绝对的，静止是相对的。

物质的运动形态各种各样，有基本的、普遍的运动形态，也有高级的，复杂的运动形态。它们之间既有各自的规律，又有共同性。例如，无论怎样的运动变化，都必然遵守能量转换和守恒定律。

第二节 物理学研究的对象

把各不同种类的物质运动形态作为各自的研究对象，而形成了自然科学的各个分科。物理学研究的对象是物质的最基本、最普遍的运动形态，包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核运动等等。经过几千年，特别是近三百年的积累，物理学知识已十分丰富，形成了完整的物理学理论体系。

物理学研究的物质运动形态，普遍地存在于其它高级的、复杂的运动形态之中。化学变化，生物过程都是高级的、复杂的运动形态，其中必然包含着物理的运动形态。物理现象存在于一切自然现象之中，且与一切自然现象都有不可分割的内在联系。一切自然现象，无论是有生命的，还是无生命的都必然遵从能量转换和守恒定律。物理学与其它自然科学，互相渗透，不可能绝对分开。正是由于物理学与医学科学之间的互相渗透，才产生了生物物理学、量子生物学、医学物理学等等边缘科学，拓宽了物理学研究范围，大大

促进了物理学、医学科学和其它自然科学的发展与提高。

物理学建立在实验基础上。它的研究方法，遵循实践——理论——实践的认识规律。通过观察、实验、假说，上升到理论。人们首先从观察实验中获得大量的资料，然后经过分析、概括、判断和推理等一系列思维过程，把事物的本质和内在联系抽象到更一般的形式，从而产生假说。再经过实践（包括实验）检验，一旦证明假说是正确地反映了客观规律，它就成为物理定律和理论。随着科学的发展，认识的深化，物理定律和理论也将不断地完善，将更客观更全面更深刻地反映客观规律。

第三节 物理学与医学的关系

物理学和医学有不可分割的联系，主要体现在如下两个方面：

1. 物理学是学习医学所不可缺少的基础。

医学是以人为研究对象的生命科学，所研究的是高级的、复杂的物质运动形态——生命现象。物理学所研究的物质运动形态普遍存在于生命科学之中，生命现象也必然服从有关的物理学规律，物理学是其它自然科学的基础，也毫不例外地是医学科学的基础。

要了解呼吸过程、血液循环，必须掌握一定的分子物理学、流体力学的知识；要了解人体各种各样的生物电现象、生物磁现象，并进行生物电、生物磁的检测，必须掌握一定的电学、电磁学和电子学的知识；要了解热辐射、光辐射、X射线、 γ 射线和其它粒子射线对人体的诊断原理和治疗作用，必须了解其基本性质，掌握原子物理和原子核物理的基本知识。随着近代物理学的迅速发展，人类对生命现象的认识逐步深入，生物科学和医学科学已从宏观形态的研究进入微观机制的探讨，从细胞水平的研究深入到分子水平的研究，并把其理论建立在精确的物理科学基础之上，物理学在医学科学中应用更加广泛，更加深入。核物理的成就，促成了核医学的建立和发展。量子生物学的建立，生物物理学的发展，对揭示生命现象的本质做出了新的巨大贡献。物理学的新发现，常促使医学获得新的发展。

2. 物理学的方法和技术，为医学科学研究和医疗实践开辟了新的途径，提供了强有力的手段。

物理学的理论是设计制造各种各样医学科研仪器和医疗仪器的依据。随着物理学、电子技术的不断发展，医学仪器不断创新，不断提高，为医学科研和医疗实践提供了强有力的手段，极大地推动了基础医学和临床医学的发展。光学显微镜使人们的研究进入到细胞水平，而电子显微镜的出现使人们的研究深入到分子水平。X射线为临床诊断开辟了新的途径，电子计算机X射线断层扫描术（简称CT），使临床诊断的精确度大为提高。核磁共振、超声技术、激光技术、图象处理技术、红外线技术、光纤内窥技术等等，使医学科学获得迅速的发展和提高。没有物理学的理论、技术和方法，医学的发展是不可想象的，可以说，没有物理学的技术，就没有现代化的医学。

医学院校开设医用物理课程的目的，就是使学生较系统的学习物理知识，掌握物理学的基本概念，基本规律和基本方法，为学习后继课程以及将来从事医疗卫生工作和科学研究打下基础。

第一章 力学的基本定律

在物质世界多种多样的运动形式中,最简单、最基本的运动是物体位置的变化,称为机械运动。力学是研究机械运动规律的学科。力学中,研究物体位置随时间变化关系的内容属于运动学,而研究物体产生机械运动原因的内容属于动力学。本章将重点讨论动力学的一些基本概念与规律。

第一节 质点动力学的基本规律

在物理学中,我们可以将物体看作一个由质点组成的体系。因此质点动力学的基本规律就可作为动力学问题的基础。

一、牛顿运动定律

英国著名物理学家牛顿提出的三条运动定律是动力学的基本定律。

(一)第一运动定律 物体(质点)如果不受外力作用,它总保持静止或匀速直线运动状态。这里说的不受外力作用包括合外力为零的情况。

第一运动定律表明,任何物体都具有保持其运动状态不变的性质。这种性质称为惯性。所以第一定律也称为惯性定律,物体的惯性反映了物体改变运动状态的难易程度。质量是物体惯性大小的量度。

(二)第二运动定律 物体的加速度 a 跟所受外力的合力 F 成正比,跟物体的质量 m 成反比,加速度 a 的方向跟所受合外力 F 的方向相同。即

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

在国际单位制中,质量的单位是千克(kg),加速度单位是米/秒²(m/s²),力的单位则是牛顿(N)。

第二定律反映的是瞬时关系,加速度 a 及力 F 都是瞬时量。它们同时存在,同时改变,同时消失。

(三)第三运动定律 当物体A以力 F_1 作用在物体B上时,物体B也必定同时以力 F_1 作用在物体A上; F_1 和 F_2 在同一直线上,大小相等而方向相反。

$$F_1 = -F_2 \quad (1-2)$$

在 F_1 和 F_2 两个力中,若称其中一个力为作用力,则另一个力称为反作用力。所以第三定律可叙述为:作用力与反作用力总是同时出现,它们在同一直线上,大小相等,方向相反,分别作用在两个不同的物体上。一个物体所受作用力是不能和这个力的反作用力相互抵消的。

二、力学单位制和量纲

(一)力学单位制 在力学中有许多物理量,如位移、速度、加速度、时间、质量、力、功等等。可以选定几个物理量的单位作为基本单位,而其他物理量的单位则可根据物

理公式中其它物理量和这几个物理量的关系导出。这些推导出来的物理量称为导出量，它们的单位称为导出单位。

力学的单位制有多种，本书采用国际单位制（SI）。在国际单位制中，取长度、质量和时间作为力学的基本量，并规定长度的基本单位为米（m），质量的基本单位为千克（kg），时间的基本单位为秒（s）。例如，根据运动学中速度和加速度的定义，它们的单位分别为米/秒（m/s）和米/秒²（m/s²）。如果再选定质量的单位为千克（kg），根据牛顿第二定律 $F = ma$ 可以推导出力的单位是千克·米/秒²，即牛顿（N）。其它物理量的单位，也可根据相应的关系式导出。

（二）量纲 物理学中，导出量和基本量之间的关系可以用量纲来表示。我们用 L 、 M 和 T 分别表示长度、质量和时间三个基本量的量纲，其它力学量 Q 的量纲与基本量量纲间的关系可按下列形式表达，

$$[Q] = L^a M^b T^c \quad (1-3)$$

例如速度量纲是 $[v] = LT^{-1}$ ，加速度量纲是 $[a] = LT^{-2}$ ，力的量纲是 $[F] = [m][a] = LMT^{-2}$ 等。

量纲概念的引入，为在不同单位制中物理量单位间的换算带来了方便。同时，由于只有量纲相同的物理量才能相加减和用等号联接，所以可借助检验等式两端各项的量纲是否相同，来初步校验等式的正确性。例如，对匀加速直线运动有方程

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

上式每一项的量纲都为 L ，所以依照量纲的检验，上式是正确的。

第二节 功和能

人们在长期生产实践及科学实验中认识到，一种运动形式能转化为其他运动形式。在深入研究运动形式相互转化过程中，人们建立了功和能的概念，并发现了自然界中一条普遍规律——能量守恒定律。这里仅在机械运动范围内来讨论功和能，以及能量守恒定律。

一、功 功率 保守力的功

（一）功 在力的作用下物体发生了位移，称为力对物体做了功。恒力对物体所做的功等于力在作用点位移方向上的分量和作用点位移大小的乘积。图 1-1（a）表示恒力 F 与位移 s 方向相同时， F 对物体所做的功

$$A = Fs$$

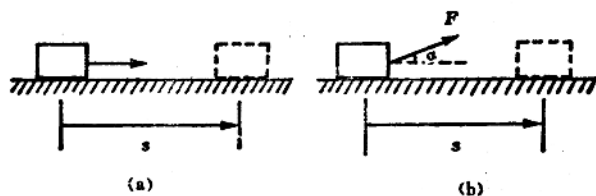


图 1-1 恒力做功

图 1-1 (b) 表示恒力 F 与位移 s 有一夹角 α 时, F 对物体所做的功。

$$A = F s \cos \alpha \quad (1-4)$$

考虑到力 F 和位移 s 都是矢量, 则上式可用 F 和 s 的标积 (见附录一) 来表示, 即

$$A = F \cdot s \quad (1-5)$$

从上式可见功是标量。当 $0 \leq \alpha < 90^\circ$ 时, 功为正值, 即力对物体做正功; 当 $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 时, 功为负值, 力对物体做负功。当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 力不做功。

功的单位由力及位移的单位确定。在国际单位制中, 功的单位是牛顿·米, 称为焦耳 (J)

功的量纲式为:

$$[A] = [F] [s] = L^2 M T^{-2} \quad (1-6)$$

设某物体(质点)在变力作用下沿任意曲线从点 a 移到点 b 如图 1-2 所示。我们可将全部路径分为许多小段, 每一小段的位移是无限小量 ds , 可看作是一直线段, 方向为该处路径的切向。在无限小位移之内, 力 F 的大小和方向可看作不变。根据恒力做功的定义, 力在这一位移内所做的微功

$$dA = F \cdot ds = F \cdot \cos \alpha \cdot ds$$

在 a 到 b 整个过程中, 力做的总功是所有微功的总和, 即对微功的积分

$$A = \int_a^b F \cdot ds = \int_a^b F \cdot \cos \alpha \cdot ds \quad (1-7)$$

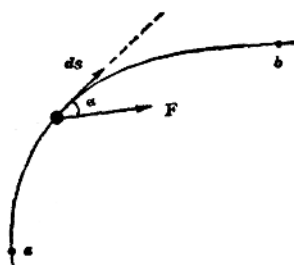


图 1-2 变力做功

(二) 功率 在实际问题中, 不仅要知道力所做的功, 而且要了解单位时间内做了多少功, 这就是功率。设在时间 Δt 内做功 ΔA , 则这段时间内的平均功率是

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

若 $\Delta t \rightarrow 0$, 得某时刻的瞬时功率为

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt} \quad (1-8)$$

考虑到 $dA = F \cdot ds$ 及 $v = \frac{ds}{dt}$, 则瞬时功率也可表示为

$$P = F \cdot v \quad (1-9)$$

可见, 功率等于力和物体运动速度的标积。

在国际单位制中, 功率的单位为焦耳/秒, 称为瓦特 (W)。功率的量纲为

$$[P] = M L^2 T^{-3}$$

(三) 保守力的功 我们以重力为例, 分析它做功的特点, 进而引入保守力的概念。

如图 1-3 所示, 设质量为 m 的物体从 a 点沿任意路径 acb 到达 b 点, a 点和 b 点的高度分

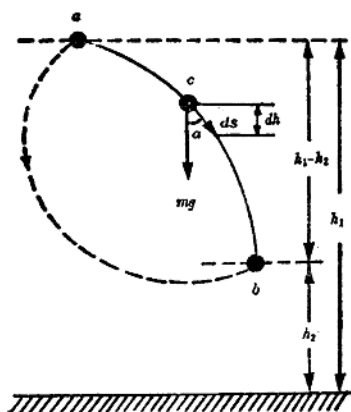


图 1-3 重力做功

别为 h_1 和 h_2 , 在位移 ds 上, 重力 G 做的微功为

$$dA = \mathbf{G} \cdot d\mathbf{s} = G \cdot \cos\alpha \cdot ds = -mg dh$$

式中负号表示高度增加, 即 $dh > 0$ 时重力做负功, 而高度降低, $dh < 0$ 时重力做正功。则在上述过程中重力做的总功为

$$A = \int_{h_1}^{h_2} -mg dh = mgh_1 - mgh_2$$

(1-10)

可见, 重力做功只与物体的始末位置 (h_1 和 h_2) 有关, 而与其所经过的路径无关。弹性力、万有引力和静电力所做的功都具有这个特点, 我们把具有这种性质的

力称为保守力。否则就是非保守力, 例如摩擦力, 它做的功就与路径有关。

二、动能和势能

能的概念在科学技术中十分重要。一个物体具有做功的本领, 就说这个物体具有能量。物体做功后, 它的能量就发生变化。因此, 功是能量变化的量度, 它们有相同的单位。

物体的能量大小与它所处状态有关, 例如它的速度、位置、温度等等的变化都会改变它的能量, 因此能量是物体状态的函数。能量有多种形式, 这里仅研究与力学状态有关的动能和势能, 即机械能。

(一) 动能 为简单起见, 这里仅讨论物体在恒外力作用下, 做匀变速直线运动的情况。设有一质量为 m 的物体, 初速度为 v_1 , 所受恒外力的合力为 F , 加速度为 a , 经位移 s 后速度变为 v_2 , 如图 1-4 所示, $v_2^2 = v_1^2 + 2as$, $F = ma$, 于是合外力对物体所做的功为

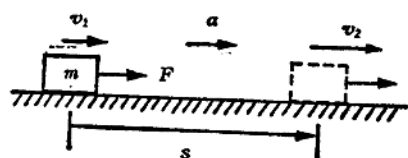


图 1-4 定义动能

$$A = Fs = mas = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

(1-11)

在合外力 F 是变力, 物体沿任意曲线运动情况下, 经过计算, 也能得出(1-11)

式。这里, 我们把(1-11)式中的 $\frac{1}{2}mv^2$

称为动能。它是物体由于运动而具有的能量, 用 E_K 表示。

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2$$

(1-12)

则(1-11)式可表示为

$$A = E_{K2} - E_{K1}$$

(1-13)

此式说明, 合外力对物体所做的功等于物体动能的增量, 这一关系称为动能定理。

(二) 重力势能 从(1-10)式中, 我们可以看到重力做功与物体所处高处差的关系。我们把式中 mgh , 即物体所受的重力和它距地面高度的乘积称为物体的重力势能。它是重力场中物体所具有的与高度有关的能量, 用 E_p 来表示,

$$E_p = mgh \quad (1-14)$$

这样(1-10)式也可写作

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}) \quad (1-15)$$

即重力对物体所做的功, 是物体重力势能增量的负值。

其他保守力所做的功, 也有类似的特点, 即: 保守力对物体所做的功等于物体势能增量的负值。

三、功能原理 机械能守恒定律

(一) 功能原理 在(1-13)式表述的动能定理中, A 表示合外力对物体所做的功。合外力包括保守力及非保守力, 测合外力所做的功 A 也包含保守力做的功 A_c 及非保守力做的功 A_n 两部分, 这样动能定理(1-13)式可改写为

$$A_c + A_n = E_{K2} - E_{K1} \quad (1-16)$$

又(1-15)式表示保守力对物体所做的功等于物体势能增量的负值, 即

$$A_c = -(E_{p2} - E_{p1})$$

将上式代入式(1-16)得

$$A_n = (E_{K2} + E_{p2}) - (E_{K1} + E_{p1})$$

这里的动能和势能(包括重力势能和弹性势能)总称为机械能, 用 E 表示, 即 $E = E_K + E_p$ 。则

$$A_n = E_2 - E_1 \quad (1-17)$$

此式表示非保守力对物体所做的功等于物体机械能的增量, 这称为功能原理。

从上面的叙述中可以看出, 动能定理和功能原理都是由牛顿第二定律 $F = ma$ 演变而来的, 是力对空间(位移)的一种累积形式。因此这两条定理成立的条件和适用范围与牛顿第二定律完全相同。但牛顿第二定律表示的是一种瞬时关系, 而动能定理与功能原理只考虑一个运动过程的始末状态, 而不涉及过程的细节, 因此在解决某些具体问题时, 应用这两条定理(原理), 显得比应用牛顿定律更方便。

(二) 机械能守恒定律 在功能原理(1-17)式中, 若 $A_n = 0$, 即在物体运动过程中非保守力不做功。则

$$E_2 = E_1 \text{ 或 } E = \text{恒量} \quad (1-18)$$

也就是说, 一个仅有保守力做功的物体(或物体系统), 虽然其动能和势能可以相互转化, 但总的机械能保持不变, 这一结论称为机械能守恒定律。

机械能守恒定律的使用有着严格的条件限制, 即要求非保守力做功等于零。这就意味着物体(或物体系统)在运动过程中仅有保守力(如重力、弹性力等)做功。

如果系统内除保守力做功外, 还有摩擦力等非保守力做功, 那么, 系统的机械能就要转化为其他形式的能, 例如热能。事实证明对于一个与外界没有能量交换的系统, 不论其内部的机械能及其它形式的能如何变化, 各种形式能量的总和仍是恒量。这就是说, 能量

既不能消失,也不能创造,只能从一种形式转化为另一种形式,这一结论称为能量转化和守恒定律或能量守恒定律。

能量守恒定律是自然界中最普遍的定律之一,它是人们在长期的生产实践和科学实验中总结出来的,它对于研究和分析各种实际变化过程具有重大的指导意义。历史上曾有许多人企图“发明”一种“永动机”,它不消耗任何能量而对外做功,或只消耗少量能量而能做大量的功。但这一切尝试均以失败而告终,因为这类设想都是违反能量守恒定律的。这一事实也以反面证明了能量守恒定律的正确性。

第三节 动量和冲量

力的作用在一持续过程中能够改变物体的运动状态,比如力的作用持续一个空间过程(位移)而改变物体的动能,并由此引入功的概念和动能定理。同样,力的作用持续一个时间过程也能改变物体的运动状态,在这样问题的研究中,我们将引入动量、冲量等概念和动量定理。

一、动量定理

我们考虑力的作用持续一个时间过程的效果。若质量为 m 的物体在时间 $t_1 \sim t_2$ 过程中受到力 F 的作用,为了考虑这一作用的效果,我们引入冲量的概念。用符号 I 表示冲量,若 F 为恒力,则

$$I = F(t_2 - t_1)$$

若 F 为变力,则冲量的表达式为

$$\begin{aligned} dI &= F dt \\ I &= \int_{t_1}^{t_2} F dt \end{aligned} \quad (1-19)$$

在牛顿第二定律 $F = ma$ 中,物体的加速度 a 是物体速度 v 随时间的变化率,即 $a = \frac{dv}{dt}$ 。若这一过程中物体质量 m 不变,则(1-19)式可变为

$$\begin{aligned} I &= \int_{t_1}^{t_2} F dt = \int_{t_1}^{t_2} ma dt = m \int_{t_1}^{t_2} \frac{dv}{dt} \cdot dt \\ &= m \int_{v_1}^{v_2} dv = mv_2 - mv_1 \end{aligned} \quad (1-20)$$

v_1 和 v_2 分别为 t_1 和 t_2 时刻物体的速度。

我们把物体的质量与它具有的速度的乘积称为物体的动量,用符号 p 表示,

$$p = mv \quad (1-21)$$

则(1-20)式可表示为

$$I = p_2 - p_1 \quad (1-22)$$

此式表示:物体在运动过程中所受的合外力的冲量等于物体动量的增量。这个结论称为动量定理。

(1-22)式是矢量式,在实际计算时,要先选取适当的坐标系,然后把矢量式变为在各坐标轴方向上的分量式。即

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \overline{F_x} (t_2 - t_1) = p_{2x} - p_{1x} \\ I_y &= \overline{F_y} (t_2 - t_1) = p_{2y} - p_{1y} \\ I_z &= \overline{F_z} (t_2 - t_1) = p_{2z} - p_{1z} \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

式中 $\overline{F_x}$ 、 $\overline{F_y}$ 、 $\overline{F_z}$ 是变力 F 的三个分量 F_x 、 F_y 、 F_z 在力的作用时间 $(t_2 - t_1)$ 内的平均值。(1-23)式中力和动量的分量的正负取决于它们与坐标轴方向的关系:同向为正,反向为负。

正如作用于物体的功可看作传递给物体动能一样,作用于物体的冲量可看作传递给物体动量。但功与动能是标量,而冲量与动量是矢量。动量的方向与物体的速度方向一致,单位是千克·米/秒 ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$)。冲量的方向和动量增量的方向一致,单位是牛顿·秒 ($\text{N} \cdot \text{s}$)。两种单位的量纲是相同的。

动量定理对于分析碰撞、打击一类作用时间十分短暂的问题特别适用。在这类问题中,力的作用时间十分短,而力的量值又很大,这种力(称为冲力)是很难测量的。但如果知道过程始末时刻物体的动量,即可算出力的冲量。若能测出力的作用时间,即可求得平均冲力。

二、动量守恒定律

物体系统内各物体受到的力包括两个方面:一是系统各物体间的相互作用力,称为系统的内力;一是系统外物体对系统内物体的作用力,称为系统所受的外力。

为简单起见,这里讨论动量定理在质量为 m_1 和 m_2 两个物体组成的系统中的应用。图 1-5 中 F_1 、 F_2 为外力, f_1 、 f_2 为内力,力的作用时间为 $t_1 \sim t_2$ 。应用动量定理则

$$\text{对 } m_1: \int_{t_1}^{t_2} (f + F_1) dt = m_1 v_{12} - m_1 v_{11}$$

$$\text{对 } m_2: \int_{t_1}^{t_2} (f_2 + F_2) dt = m_2 v_{22} - m_2 v_{21}$$

v_{11} 和 v_{12} 分别为物体 m_1 在 t_1 和 t_2 时刻的速度; v_{21} 和 v_{22} 分别为物体 m_2 在 t_1 和 t_2 时刻的速度。

根据牛顿第三定律, $f_1 = -f_2$ 。将上面两式相加得

$$\int_{t_1}^{t_2} (F_1 + F_2) dt =$$

$$(m_1 v_{12} + m_2 v_{22}) - (m_1 v_{11} + m_2 v_{21})$$

若系统内包含有 n 个物体,根据同样的方法,可以得到

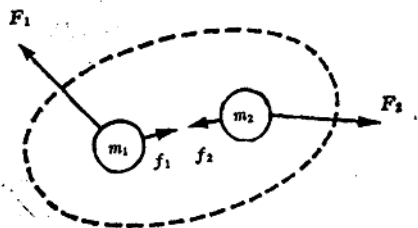


图 1-5 动量守恒定律

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum_i \mathbf{F}_i \cdot d\mathbf{t} = \sum_i \mathbf{p}_{i,2} - \sum_i \mathbf{p}_{i,1} \quad (1-24)$$

$\sum_i \mathbf{F}_i$ 为系统所受外力之和, $\sum_i \mathbf{p}_{i,2}$ 和 $\sum_i \mathbf{p}_{i,1}$ 分别为系统在 t_2 和 t_1 时刻的总动量。(1-24) 式称为系统的动量定理。

可见, 系统总动量的变化完全由合外力的冲量所决定。若系统所受的合外力为零 ($\sum_i \mathbf{F}_i = 0$), 则系统的总动量保持不变, 这一结论称为动量守恒定律。可表达为

$$\sum_i \mathbf{p}_i = \text{恒矢量} \quad (1-25)$$

虽然合外力不为零, 但它在某一方向上的分量为零, 则系统的总动量在该方向上的分量保持不变。例如在 X 方向上, $\sum_i F_{ix} = 0$, 则

$$\sum_i p_{ix} = \text{恒量} \quad (1-26)$$

人的心室射血过程可用动量守恒定律来分析。心脏每次搏动, 将质量 m_1 约为 0.07kg 的血液以平均速度 v_1 约为 0.3m/s 从左心室射入主动脉, 如图 1-6 (a) 所示。使血液获得向头部方向的动量。根据动量守恒定律, 身体其余部分也将同时得到大小相同向足部方向的动量。若人体质量 m_2 为 70kg , 则人体获得平均反冲速度 v_2 应满足

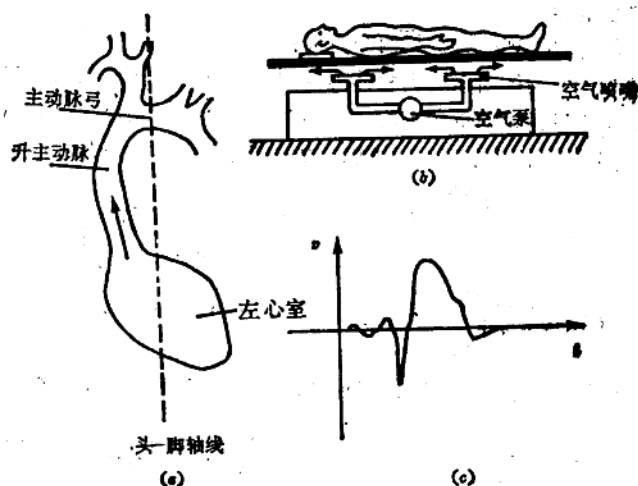


图 1-6 心动冲击图

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$$

$$v_2 = -\frac{m_1 v_1}{m_2} = -3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

这一速度虽然很小, 但现代测量技术可以把它描记下来, 描记的曲线称为心动冲击图。利