

徐 佩 璜 主 编
张 珮 明
王 林 森 副主编

高等医学院校医学、儿科、口腔、卫生等专业用

物 理 学

江 苏 科 学 技 术 出 版 社

11002

高等医学院校医学、儿科、口腔、卫生等专业用

物 理 学

徐 佩 璜 主 编
张 珩 明 副主编
王 林 森

一九八六年五月七日

江苏科学技术出版社

高等医学院校医学、儿科、口腔、卫生等专业用

物 理 学

徐 佩 璜 主 编

张玥明 王林森副主编

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：盐城市印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 24.75 字数 594,400

1985年9月第1版 1985年9月第1次印刷

印数 1—12,545 册

书号：13196·197 定价：4.70 元

责任编辑 王永发

前 言

根据卫生部颁布的高等医学院校物理教学大纲,我们华东地区六所医学院校联合编写了这本教材,供高等医学院校医学、卫生、儿科、口腔等专业使用。

本书以新编中学物理教材的内容为起点,在保持物理学自身系统性的前提下,密切联系医学院校实际,为医学院校学生和医务工作者提供必需的物理学基础知识。我们力求文字通顺,说理清楚,对重点或较难内容的叙述做到循序渐进、深入浅出;对基本公式的推导做到定量分析。为了便于教和学,书中选有较多的典型例题,每章后都有一定数量的思考题和练习题,并附答案。全书基本上采用国家标准物理量符号和国际单位制。

本书由浙江医科大学徐佩璜为主编,南京医学院张玥明、南京铁道医学院王林森为副主编。上海铁道医学院刘鼎年、林纪孟编写第一章;温州医学院金畴编写第二章,陈式苏编写第十二章;苏州医学院秦诚编写第三章,李乃锦编写第四章;浙江医科大学徐佩璜编写第五章,宓世梁、胡永耀编写第八章,梁中庆编写第十三章;南京铁道医学院王林森、张连栋编写第六章,陈志道、刘世乐编写第七章;南京医学院张玥明编写第九章,黄祖述编写第十章,石大有编写第十一章。本书插图主要由南京铁道医学院杨植云和南京医学院王景瑜绘制。

本书原系内部讲义,经过几年试用,效果良好。一九八四年夏,在收集了多方面意见的基础上,我们召开了本书的审稿会议,作了全面的修改。根据卫生部颁布的物理学教学大纲的要求,这次修改还增加了“放大器基础及生物医用放大器”一章。该章由南京铁道医学院王林森编写。

上海第一医学院沈一英副教授,第四军医大学、皖南医学院、无锡卫校等兄弟院校的老师参加了本书的审稿会,并提供了许多宝贵意见。本书的编写还得到南京大学物理系龚昌德教授、夏元复副教授的关心和支持,徐龙道副教授审阅了全稿,在此一并表示感谢。

本书包括的内容比较全面,考虑到各医学院校情况不同,学时不等,为使教材有较大的选择余地,在有些章节的标题上标有“*”号,可作选学内容。我们恳切希望兄弟院校在使用本书过程中提出宝贵意见,以便我们总结经验,再版时加以订正。

编 者

绪 论

物理学的研究对象 物理学是一门自然科学，它研究的对象是物质的基本性质和物质运动的客观规律。物质是存在于我们意识之外的客观实在，大至天体、日月星辰，小至分子、原子、电子等，都是物质，重力场、电场、磁场、介子场等也都是物质。物质和运动是不可分的，不运动的物质和没有物质的运动都是不可能的。物质运动的形式是多种多样的，从简单的位置变化，一直到复杂的思维等，都是物质的运动。它们既服从共同的普遍规律，又各自有其独特的规律。对各种不同的物质运动形式的研究，形成了自然科学的各个分科。

物理学所研究的运动如机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核内部的运动等，普遍地存在于其他复杂的、高级的运动形式（如化学过程、生命过程等）之中。因此，物理学所研究的许多物质运动规律有最大的普遍性。不管哪一种有生命的或无生命的变化过程，都必须服从物理学所确定的基本定律，如万有引力定律、能量守恒定律、质量守恒定律等。但是复杂的、高级的运动形式如生命的发展过程，不能简单地用物理学定律去硬套。

物理学是自然科学和一切科学技术的基础，不掌握基础知识，就很难顺利地学好其他专业课程。人们研究自然科学的目的，不单纯是反映客观世界，了解物质运动的客观规律；而是为了探索自然界发展的内在联系，找出其规律性，利用自然力量为人类谋福利，为共产主义事业服务。另一方面，通过实际材料，学习辩证唯物主义，培养正确的思想方法。

物理学研究方法 物理学研究方法采用观察、实验、假说和理论等过程，其中以观察最为基本。有些自然现象，如天体运动，不能由人们所控制，对这些现象的研究，只有通过观察方法；有些现象虽然可用人为的实验方法加以研究，但还是要通过观察的帮助。一般说，观察和实验是研究的基础，从观察和实验得到的资料，经过分析、概括、判断、推理等一系列过程，把它们归纳到更一般的形式，再经过反复的实践考验，可以足够正确地反映客观规律，这就可以建立定理和理论。理论是知识系统化的更高阶段，理论可以指导实验。

在建立定律和理论过程中，常常要经过假说的阶段。假说是在一定的观察和实验的基础上提出来的，是探索新的定律和理论的重要方法，也是科学发展过程中的必不可少的一个阶段。

从观察、实验、假说到理论，这是物理学研究方法，理论是否完善，还要经过实践的考验。如果一个理论不仅能够解释已知现象，而且还能预言未知的现象，指导新的实践，推出新的自然规律，得到新的实践验证，这样就能证明理论的正确性。另一方面，如果一个理论或从它推出的结果跟新的实验事实有矛盾，就必须对这理论加以补充、修改，甚至放弃，并根据新的实验，另外建立能正确反映客观实际的新理论。例如带电粒子受电磁力作用，当速度很高时，牛顿力学应修改为相对论力学。正确的理论对实践具有指导作用，而理论需要通过实践来加以完善。实践是理论的基础，理论是实践的指南。随着科学技术的不断进步，物理学将会越来越完整地反映自然现象的客观规律。

物理学和医学关系 医学是以人为对象的生命科学。生命现象属于物质的高级运动形态,它以物理的和化学的运动形态为基础。研究生命现象离不开物理学的基础知识,如研究人体骨骼的结构和受力问题,需要有力学的知识;研究肌肉收缩、物质传输等,需要有热力学知识;研究血液流动、心脏的液泵作用等,需要有流体力学知识;其他如耳鼻喉科、眼科、心电、脑电、神经传导等,需要有声、光、电等知识。人们要了解生命现象,所需要的物理学知识是非常广泛的。

医学院校的物理学是一门基础课,主要任务是给学生以系统的物理学知识,为其他医学基础课、医学专业课以及临床诊断和治疗等方面提供必要的基础知识。医务工作者的知识面扩大了,分析问题和解决问题的能力必定提高,就能更好地为医学事业服务。

另外,由于近代生命科学的研究,已经从宏观的定性的形态描述,发展到微观的定量的本质探讨,这就更需要全面的深入的物理学知识。自从本世纪初期发明了电子显微镜,现在能够分辨一个血细胞的万分之一的大小,即达 7×10^{-10} 米的数量级的结构,从而能在原子水平上认识生物分子的细节;1953年根据脱氧核糖核酸(DNA)分子的X射线衍射资料和有关的生化数据,提供了DNA的双螺旋的分子结构模型;同时,用X射线晶体学的方法也测定了蛋白质的立体结构。这一切的成就,都说明了物理学的理论和实验方法,在探索生命的奥秘中起着越来越大的作用。生命科学向微观定量方向发展,也给物理学提出了新的课题,如非平衡开放系统的热力学等。

总之,物理学中的有些发现,都曾被应用到医学上,推动了医学的发展;反过来,医学的发展,在一定程度上对物理学的发展也起到了激励作用。物理学和医学的关系,是相互促进,紧密联系着的。

浙江医科大学 徐佩璜

目 录

绪 论

第一章 机械运动 1

§ 1—1 平动 1

一、位移 速度 加速度, 二、牛顿运动定律 动量守恒原理, 三、单位制 量纲

§ 1—2 惯性力 11

一、参考系和惯性系, 二、非惯性系中的惯性力

§ 1—3 转动 12

一、角速度和角加速度, 二、转动动能和转动惯量, 三、转动定律 角动量守恒定律, *四、进动

§ 1—4 振动 23

一、简谐振动 简谐振动方程 周期频率振幅位相 谐振动的能量, 二、振动的合成 同频率同方向
的两个谐振动的合成 不同频率同方向的两个谐振动的合成——拍 相互垂直的同频率的谐振动的
合成

习题 32

第二章 波与声波 35

§ 2—1 波 波动方程 35

一、波的一般描述, 二、波动方程

§ 2—2 波的能量和能流密度 40

一、波的能量, 二、能流密度

§ 2—3 波的迭加 42

一、惠更斯原理, 二、波的迭加原理, 三、波的干涉, 四、驻波

§ 2—4 声波 50

一、声速, 二、声压、声强与声阻, 三、声波的反射和折射, 四、声波的吸收

§ 2—5 听觉域 声强级 听力曲线 56

§ 2—6 多普勒效应 58

§ 2—7 超声波及其在医学上的应用 60

一、超声的产生和接收, 二、超声波的特性和作用, 三、超声在医学上的应用举例

习题 67

第三章 液体的流动 70

§ 3—1 理想液体的流动 70

一、理想液体, 二、稳定流动 流线 流管, 三、液体连续性原理

§ 3—2 柏努利方程及其应用 72

一、柏努利方程, 二、柏努利方程的应用

§ 3—3 实际液体的流动 75

一、液体的粘滞性 粘滞系数, 二、实际液体的柏努利方程, 三、泊肃叶公式 流量与流阻、压力

差的关系, 四、片流 湍流 雷诺数, 五、血细胞的轴流现象	
§ 3—4 粘滞系数的测定	81
一、奥氏粘度计, 二、斯托克斯定律, *三、血液粘滞系数与其他因素的关系	
§ 3—5 血液在循环系统中的流动	83
一、血液循环, 二、心脏做功, 三、血液中的流速和血压, 四、血压的测量	
习题	87
第四章 分子物理学	90
§ 4—1 分子运动论的一些基本概念	90
一、分子的运动, 二、分子之间的相互作用力, 三、物质的聚集态	
§ 4—2 理想气体状态方程	93
一、气体的状态参量 平衡态, 二、理想气体的状态方程	
§ 4—3 理想气体的压力公式 温度的微观意义	96
一、理想气体的微观模型, 二、压力公式的推导, 三、温度的微观意义, 四、气体分子的方均根速率, 五、能量按自由度均分原理	
§ 4—4 气体分子的速率分布 平均自由程	100
一、麦克斯韦气体分子速率分布定律, 二、分子的平均自由程和碰撞频率	
§ 4—5 气体中的输运过程	104
一、粘滞现象, 二、热传导现象, 三、扩散现象	
§ 4—6 液体的表面现象	107
一、表面张力和表面能, 二、弯曲液面下的附加压力, 三、毛细现象 气体栓塞, 四、表面吸附 表面活性物质	
习题	113
第五章 热力学	115
§ 5—1 热量和比热容 固体摩尔热容	115
§ 5—2 热力学系统的内能和热力学第一定律	117
§ 5—3 热力学第一定律的应用	118
*一、动物体的新陈代谢, 二、理想气体的四种过程	
§ 5—4 卡诺循环与热机效率	126
§ 5—5 可逆过程和不可逆过程	129
§ 5—6 热力学第二定律和熵	130
一、热力学第二定律, 二、熵和热力学第二定律, *三、克劳修斯等式和熵变化的计算, 四、生物生长过程中的熵	
§ 5—7 自由能	137
*一、亥姆霍兹自由能, 二、吉布斯自由能(自由焓)	
§ 5—8 生命系统和自由焓	141
一、生命系统, 二、生命系统中的自由焓	
习题	142
第六章 静电学	145
§ 6—1 电场强度	146
一、电场强度, 二、场强迭加原理	
§ 6—2 高斯定理	151

一、电场的图示法 电力线, 二、电通量, 三、高斯定理, 四、高斯定理的应用	
§ 6—3 静电场的电势	156
一、电场力的功 电势能 电势 电势差, 二、电偶极子电场的电势, 三、等势面 静电场强与电势的关系	
§ 6—4 电容 电容器	165
一、孤立导体的电容, 二、电容器, 三、平行板电容器	
§ 6—5 静电场中的电介质	167
一、电介质的极化, 二、电极化强度, 三、介电常数	
§ 6—6 静电场的能量	171
一、点电荷系统的能量, 二、电荷连续分布时的能量, 三、静电场的能量	
习题	175
第七章 恒稳电流	178
§ 7—1 欧姆定律	178
一、电流密度, 二、欧姆定律的微分形式	
§ 7—2 非均匀电路的欧姆定律	181
一、一段含源电路的欧姆定律, 二、基尔霍夫定律	
§ 7—3 电容器的充电和放电	186
一、电容器的充电过程, 二、电容器的放电过程	
§ 7—4 带电粒子输运过程中的电动势	190
一、电子的逸出功, 二、接触电势差, 三、温差电动势, *四、浓差电动势, *五、扩散电动势, *六流动电动势	
§ 7—5 直流电在医学中的应用	195
一、直流电疗法的概念, 二、电泳	
习题	197
第八章 电磁学	200
§ 8—1 磁场	200
一、磁场 磁感应强度, 二、磁通 磁场中的高斯定律	
§ 8—2 毕奥-沙伐定律及其应用	202
一、毕奥-沙伐定律, 二、载流长直导线的磁场, 三、载流圆线圈轴线上的磁场	
§ 8—3 安培环路定律及其应用	204
一、安培环路定律, 二、长直螺线管内的磁场, 三、螺线环内的磁场	
§ 8—4 洛伦兹力及其应用	207
一、洛伦兹力, 二、霍耳效应	
§ 8—5 磁场对载流导线的作用 安培定律	209
一、安培定律, 二、磁场对载流线圈的作用 磁矩	
§ 8—6 物质的磁性	211
一、磁导率 磁场强度, 二、顺磁质 抗磁质 磁化强度, 三、铁磁质 磁畴, 四、生物磁现象, 五、磁场的生物效应	
§ 8—7 电磁感应	216
一、电磁感应现象, 二、楞次定律, 三、法拉第电磁感应定律, 四、自感与互感, 五、磁场的能量	
§ 8—8 位移电流 电磁波	222

一、位移电流, 二、电磁波及电磁波谱	
§ 8—9 高频电磁场对人体的作用	224
习题	226
第九章 光的波动性	229
§ 9—1 光的干涉	229
一、相干光, 二、杨氏双缝实验, 三、菲涅耳双镜实验 洛埃镜实验, 四、光程 光程差, 五、薄膜干涉, 六、全息照相	
§ 9—2 光的衍射	237
一、平行光的单缝衍射, 二、双缝衍射 衍射光栅, 三、圆孔衍射	
§ 9—3 光的偏振	243
一、自然光与偏振光, 二、偏振片 马吕斯定律, 三、反射产生偏振 布儒斯特角, 四、双折射 二向色性, 五、旋光性	
习题	249
第十章 光辐射和光的量子性	251
§ 10—1 热辐射的基本定律	251
一、基尔霍夫辐射定律, 二、绝对黑体辐射定律, 三、普朗克量子假设	
§ 10—2 光电效应	255
一、光电效应, 二、爱因斯坦光电效应方程 光子, 三、光电效应的应用	
§ 10—3 微观粒子的波动性 德布罗意波	260
§ 10—4 微光现象 红外线和紫外线	262
§ 10—5 光的吸收 朗伯-比尔定律	264
一、光的吸收, 二、朗伯-比尔定律, 三、比色法原理	
§ 10—6 光度学基本知识	267
一、辐射通量 光通量 视见函数 发光效率, 二、发光强度 照度, 三、面发光强度 亮度	
习题	272
第十一章 几何光学	274
§ 11—1 引言	274
§ 11—2 单球面折射 共轴球面系统	275
一、符号规则, 二、单球面折射, 三、共轴球面系统	
§ 11—3 透镜	282
一、薄透镜, 二、薄透镜组, 三、厚透镜	
§ 11—4 透镜成像的缺陷及补救方法	286
一、色差及其矫正方法, 二、单色象差	
§ 11—5 眼	289
一、眼的光学性质, 二、视力, 三、眼的屈光不正	
§ 11—6 光学仪器	293
一、纤镜, 二、检眼镜, 三、放大镜和显微镜	
* § 11—7 电子显微镜	298
一、电子显微镜的基本结构, 二、电子束的会聚, 三、扫描电子显微镜	
习题	301
第十二章 原子、分子结构与光谱	303

§ 12—1 原子光谱与原子结构·····	303
一、氢原子光谱, 二、玻尔的氢原子理论, 三、玻尔理论的缺陷, 四、量子条件与量子数, 五、原子的电子分布规律, 六、选择定则 原子光谱	
§ 12—2 分子结构与分子光谱·····	314
一、分子构成, 二、分子光谱, 三、分子吸收光谱及其应用	
§ 12—3 X射线·····	318
一、X射线谱, 二、X射线的产生, 三、X射线的强度和硬度, 四、X射线的吸收, 五、X射线在医学上的应用	
§ 12—4 激光·····	327
一、激光的产生, 二、激光在医学上的应用	
习题 ·····	332
第十三章 原子核和放射性 ·····	334
§ 13—1 原子核的结构·····	334
一、原子核的组成, 二、核的大小, 三、核力 核模型	
§ 13—2 原子核衰变·····	336
一、核衰变类型, 二、核衰变规律, *三、递次衰变	
§ 13—3 射线与物质的相互作用·····	346
一、带电粒子与物质的相互作用, 二、光子与物质的相互作用, 三、中子与物质的相互作用, 四、辐射剂量及其单位, *五、放射性探测器	
§ 13—4 放射性同位素在医学上的应用 ·····	356
习题 ·····	357
*第十四章 放大器基础及生物医用放大器·····	359
§ 14—1 晶体三极管·····	359
一、PN结的形成及其作用, 二、晶体三极管的结构, 三、晶体三极管的电流放大作用, 四、晶体三极管的特性曲线	
§ 14—2 晶体管放大器的基本原理·····	363
一、共发射极放大器基本电路, 二、放大器的工作过程, 三、放大器的直流工作点, 四、放大器的偏置电路, 五、放大器的级间耦合与匹配, 六、放大器的主要性能指标	
§ 14—3 生物医用放大器·····	370
一、负反馈放大器, 二、直流放大器, 三、功率放大器 四、心电图机简介	
附录一 国际单位制SI	
附录二 常用基本物理常数	

第一章 机械运动

物质运动的最简单形式就是机械运动 (*mechanical motion*)，即一个物体相对于另一个物体，或一个物体中各个部分之间相对的位置变动。物体在空间位置的变动，是人们在生活和生产中经常观察和接触到的现象。例如，月球绕地球运动、各种机器的运转和人体四肢的运动等等，都是机械运动。

物体作机械运动都遵从一定的客观规律。本章要研究的就是机械运动的客观规律及其应用。

§ 1-1 平 动

物体运动过程中，如果其上任意一条直线在各个时刻的位置始终彼此平行，这种运动称为平动。因此，物体作平动时，物体上各点的运动是完全相同的。当我们研究的问题与物体的形状大小无关时，我们还可以把物体看作质点 (*particle*)。

一、位移 速度 加速度

1. 矢径 表示运动质点的位置，先应选取参考系，在参考系上选定坐标系 (*system of coordinates*)，如图1-1所示。质点 P 的位置由 $P(x, y, z)$ 来确定，或用从原点 O 到 P 点的有向线段 $\overrightarrow{OP}$ ($=r$) 来表示，矢量 r 称为矢径。坐标 x, y, z 就是该矢径 r 沿坐标轴的三个分量。

矢径 r 的大小由关系式

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-1)$$

决定，矢径的方向余弦是

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r}. \quad (1-2)$$

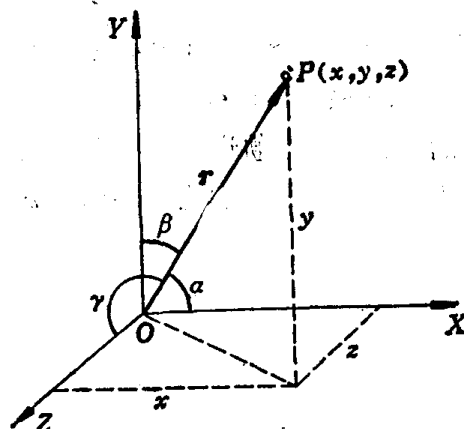


图1-1 矢径

2. 位移 设曲线 $\widehat{AB}$ 是质点运动轨道的一部分，如图1-2所示。在时刻 t ，质点在 A 点处，而在另一时刻 $t + \Delta t$ ，质点在 B 处。 A, B 两点的位置分别用矢径 r_A 和 r_B 来表示。在时间 Δt 内，质点位置的变化，则以 A 到 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示，称为质点的位移 (*displacement*)。位移是矢量 (*vector*)，它既表明 B 点与 A 点的距离，又表明了 B 点相对于 A 点的方位。位移和路程，是两个不同的概念，位移表示物体位置的改变，并非质点所经历的路程。在图1-2中，路程是曲

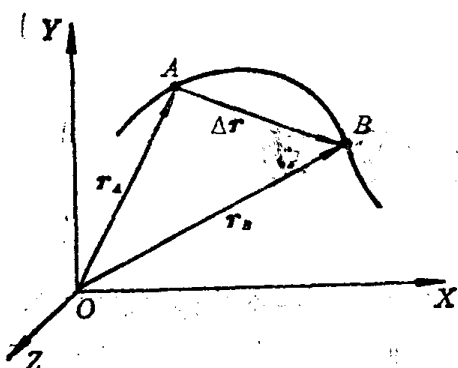


图1-2 质点的位移

度。其公式为

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

平均速度 $\bar{v}$ 的方向与位移 Δr 的方向相同。用平均速度来描述物体的运动是粗略的,它所反映的只是一段时间内位移的平均变化。精确的反映应该用当时间 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta r / \Delta t$ 的极限值——瞬时速度这一物理量来描述。瞬时速度(简称速度)的数学式是

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

即速度等于矢径对时间的一阶导数。速度的方向,则是 t 时刻质点所在位置的曲线的切线方向。速度是矢量,它的单位在SI制中是 m/s 。

设矢径 r 在直角坐标轴上的分量分别是 x, y, z , 则速度的三个分量是

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt},$$

并且

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-6)$$

4. 加速度 (acceleration) 描述变速运动还必须引入加速度这一物理量。如图1-3所示,质点在时刻 t 在轨道上 A 点位置时速度为 v_A , 在时刻 $t + \Delta t$ 时,质点在 B 点位置时速度为 v_B , 从速度矢量图可以得到在时间 Δt 内质点速度的增量为

$$\Delta v = v_B - v_A$$

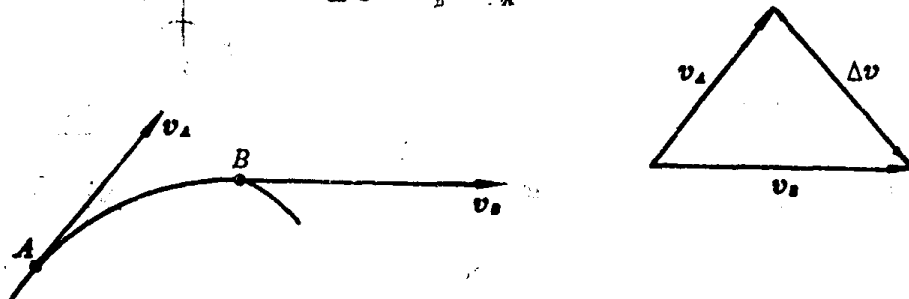


图1-3 速度的增量

比值 $\Delta v / \Delta t$ 称为平均加速度, 即

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1-7)$$

平均加速度只是粗略地反映一段时间内的速度变化。精确地描述, 应该是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,

$\Delta V/\Delta t$ 的极限值,称为瞬时加速度(简称加速度),即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{V}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}. \quad (1-8)$$

瞬时加速度等于速度对时间的一次导数,或矢径对时间的二次导数。在直角坐标系中,加速度的三个分量是

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2},$$

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2}.$$

并且

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (1-9)$$

曲线运动中质点的加速度可能与轨道成任一角度。设轨道上A点处的曲率中心为O,曲率半径为r。加速度 $\mathbf{a}$ 总是指向曲率圆内这一边的,如图1-4(a)。加速度是一个矢量,我们也可以将它分解为两个分加速度,一个沿着切线方向,称为切向加速度,以 a_t 表示,另一个沿法线方向,称为法向加速度,以 a_n 表示,如图1-4(b),则

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_n. \quad (1-10)$$

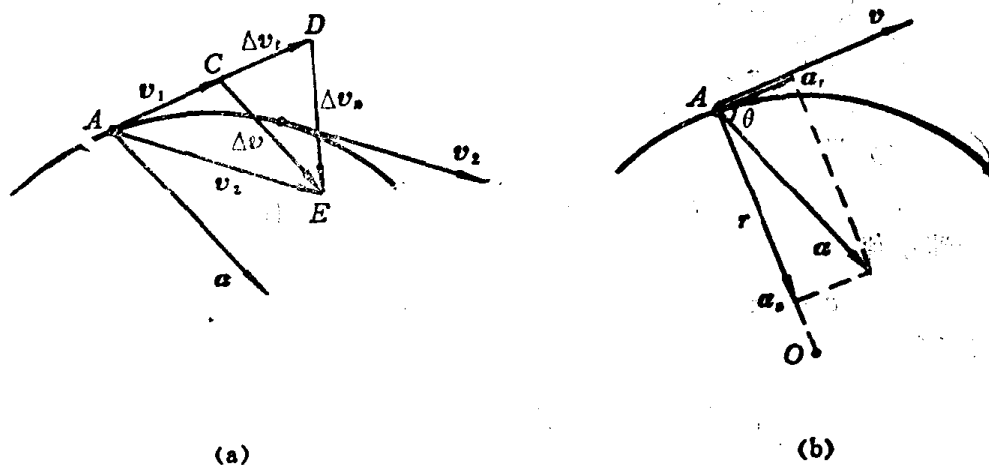


图1-4 曲线运动中的加速度

在中学物理中,我们曾学习了等速率圆周运动,并了解到作等速率圆周运动质点的加速度是向心加速度,即法向加速度 a_n ,它只是起到改变速度的方向,而不改变速度的大小的作用,在量值上为

$$a_n = \frac{v^2}{r} = r\omega^2, \quad (1-11a)$$

式中 v 是切向速度, r 是圆的半径, ω 是角速度(*angular velocity*)。上式同样适用于一般的曲线运动,只是公式中的 r ,应是曲线上A点处的曲率半径。从 a_n 只是改变速度的方向,而 $\mathbf{a}$ 的另一分量,切向加速度 a_t ,乃是改变速度的大小,而在量值上为

$$a_t = \frac{dv}{dt}, \quad (1-11b)$$

并且 $\mathbf{a}$ 的大小及 $\mathbf{a}$ 和切线所成的角 θ 是

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2}, \quad \theta = \arctg \frac{a_n}{a_t}. \quad (1-11c)$$

上述关系,也可以作简要证明如下:在图1-4(a)中,以 $AE(=V_2)$ 为腰,作出等腰 $\triangle AED$,于是将速度增量 ΔV 分解为二:即 $\overrightarrow{CD} = \Delta V_t$ 和 $\overrightarrow{DE} = \Delta V_n$,速度 $V_1 + \Delta V_t = \overrightarrow{AD}$, $\overrightarrow{AD} + \Delta V_n = V_2$,可见增量 ΔV_t 只改变速度的大小,而增量 ΔV_n 只改变速度的方向。平均加速度则为

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta v_t}{\Delta t} + \frac{\Delta v_n}{\Delta t}.$$

而瞬时加速度应是

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_t}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t},$$

即

$$a = a_t + a_n.$$

Δv_t 方向与 v_1 一致,故 a_t 的方向与 v_1 一致,即 a_t 在A点的切线方向,所以称 a_t 为切向加速度。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, v_2 以 v_1 为极限,同时 $\angle CAE \rightarrow 0$, Δv_n 的极限方向与 v_1 相垂直,即 a_n 在A点的法线方向且指向曲率中心O。所以称 a_n 为法向加速度。

例1 以初速度 $v_0 = 20\text{m/s}$ 与水平成 $\alpha = 45^\circ$ 的射出弹丸,求经1s后弹丸的速度。(设 $g = 9.80\text{m/s}^2$,空气阻力不计)

解 水平方向速度分量

$$v_x = v_0 \cos \alpha = 20 \cos 45^\circ = 14.14\text{m/s},$$

竖直方向的速度分量

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt = 20 \sin 45^\circ - 9.80 \times 1 = 4.34\text{m/s}.$$

经过1s后的速度值

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{14.1^2 + 4.3^2} = 14.7\text{m/s},$$

v 与水平线夹角 θ

$$\theta = \arctg \frac{v_y}{v_x} = \arctg \frac{4.34}{14.1} = 17.1^\circ.$$

例2 以半径 $r = 0.40\text{m}$ 作圆周运动的质点,其切线速度的大小与时间的关系为 $v = t^2/3$ (v 的单位是 m/s , t 的单位是 s).求经过3s时质点的(1)切线速度 v_3 , (2)切向加速度 a_t ,法向加速度 a_n ,合加速度 a , (3)经过路程 s .

解 (1)已知 $t = 3\text{s}$,得 $v_3 = \frac{t^2}{3} = \frac{9}{3} = 3\text{m/s}$.

$$(2) a_t = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{t^2}{3} \right) = \frac{2t}{3}, \quad \text{当 } t = 3\text{s} \text{ 时,}$$

$$a_t = \frac{2 \times 3}{3} = 2\text{m/s}^2, \quad a_n = \frac{v_3^2}{r} = \frac{3^2}{0.40} = 22.5\text{m/s}^2.$$

合加速度

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{2^2 + 22.5^2} = 22.6\text{m/s}^2,$$

a 与切线夹角

$$\theta = \arctg \frac{a_n}{a_t} = \arctg \frac{22.5}{2} = 84.9^\circ.$$

(3)设 dt 时间通过路程 ds ,则有 $ds = v dt$,当 $t = 3\text{s}$ 时,通过路程是

$$s = \int_0^t v dt = \int_0^t \frac{1}{3} t^2 dt = \frac{1}{3} \left[\frac{t^3}{3} \right]_0^t = 3 \text{ m}.$$

例3 已知一质点沿 x 轴作匀加速运动,加速度为 a ,求这质点的运动方程。

解 设在 $t=0$ 时刻,质点的坐标为 x_0 ,初速度为 v_0 ;在任一时刻 t ,它的坐标为 x ,速度为 v 。

根据加速度数学式 $a = dv/dt$, 得 $dv = a dt$, 式中 a 是一常量,对两边取积分,并应用质点在 $t=0$ 时刻 $v=v_0$ 的初始条件,得

$$\int_{v_0}^v dv = \int_0^t a dt, \text{ 即 } v - v_0 = at,$$

或

$$v = v_0 + at. \quad (1)$$

这就是确定质点在匀加速直线运动中任一时刻 t 时,运动速度 v 的关系式。

再根据速度数学式 $v = dx/dt$, 得 $dx/dt = v_0 + at$,所以

$$dx = (v_0 + at)dt.$$

取积分 $\int_{x_0}^x dx = \int_0^t (v_0 + at)dt$, 得

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2,$$

或

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2. \quad (2)$$

这就是确定质点在任一时刻时位置的关系式。 $x - x_0$ 便是质点从 $t=0$ 时刻到 t 时刻中所经历的位移。上式(2)就是质点的运动方程。

此外,如果把加速度改写成 $a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx}$, 得到 $v dv = a dx$,取积分

$$\int_{v_0}^v v dv = \int_{x_0}^x a dx \text{ 得}$$

$$\frac{1}{2} (v^2 - v_0^2) = a(x - x_0),$$

即

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \quad (3)$$

上式(3)便是质点作匀加速直线运动时,坐标 x 和速度 v 之间的关系式。

上面,我们以推导匀加速直线运动的三个基本公式为例,介绍了微积分方法的运用。以后我们在研究一般的变速运动时,也可以运用微积分方法。

二、牛顿运动定律 动量守恒原理

以上讨论了位移、速度、加速度的概念,并用以描述质点运动状态。现在要进一步讨论物体作机械运动时所遵守的各种定律。质点运动的基本定律是牛顿的三条运动定律,而且是一切物质作机械运动的基本定律。

1. 牛顿运动定律 (Newton's laws of motion)

(1) 牛顿第一运动定律 一切物体都将保持静止或匀速直线运动状态,直到其他物体所

作用的力，迫使它改变这种状态为止。

牛顿第一运动定律是从客观事实中间接推出的结论，其正确性在于从它所推出的结果和实验结果相符合。第一定律肯定了力的意义，也阐明了力的平衡状态。同时也说明了力迫使

物体改变速度，即获得加速度。第一定律还指出任何物体都具有
一种特性，这特性表现在物体不受外力作用时保持速度不变这一
事实上。我们把这种特性称为惯性（inertia）。

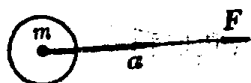


图1-5 作用力与加速度

(2) 牛顿第二运动定律 物体受到外力 F 作用时，物体所获得的加速度 a 的大小和外力的大小成正比，并和物体的质量 m 成反比，加速度的方向和外力的方向相同（图1-5）。即

$$a \propto \frac{F}{m} \quad \text{或} \quad F = kma,$$

式中比例系数 k 决定于力 F 、质量 m 和加速度 a 的单位。在SI制中， m 的单位是 kg ， F 的单位是 N ， a 的单位是 m/s^2 ，系数 $k=1$ ，于是上式可写为

$$F = ma. \quad (1-12)$$

牛顿第二运动定律是从观察和实验中归纳出来的客观规律。它说明了作用在一物体上的外力和加速度的正比关系；在相等的外力作用下，不同质量的物体所获得的加速度不同，获得

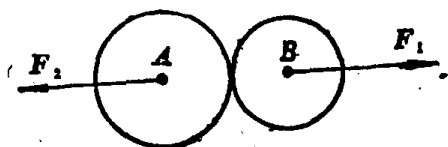


图1-6 作用力与反作用力

较大加速度的物体，表明惯性较小，亦即阐明了物体的质量就是物体 惯性大小的量度。

(3) 牛顿第三运动定律 当物体 A 以力 F_1 作用在物体 B 上时，物体 B 也以力 F_2 作用在物体 A 上；力 F_1 和 F_2 作用在同一直线上，大小相等，方向相反。（图1-6）。即

$$F_1 = -F_2.$$

应用牛顿运动定律，应注意下述几点：

① 经典力学的适用范围。上面讨论的力学，是早在十九世纪前以牛顿运动定律为基础所建立的体系严谨、完整的经典力学。经典力学在自然科学中的应用，已获得了广泛辉煌的成就。由于近代物理学的迅速发展，发现经典力学中若干概念不完全适用于新发现的事实，并在新的实验基础上建立了量子力学等。但在一定的条件下，从量子力学所推得的结果与经典力学是一致的。

在经典力学中，认为物体的质量是不变的，但事实上物质的质量是要随着物体的速度而改变的。

设 m_0 为物体静止时的质量， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为光在真空中的速度，则物体在以速度 v 运动时的质量是

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1-13)$$

在物体的宏观运动中，如超声速的飞机以速度 $v = 4 \times 10^2 \text{ m/s}$ 飞行时，它的速度已很大，但它的质量改变是多大？用公式(1-13)分析，得

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{(4 \times 10^2)^2}{(3 \times 10^8)^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{16}{9} \times 10^{-12}}} \approx m_0.$$