

高等医药院校教材
(供医学、儿科、口腔、卫生专业用)

医用物理学

第二版

邱华俊 主编

人民卫生出版社

2496/17

医用物理学

邝 华 俊 主 编

人民卫生出版社出版
(北京市崇文区天坛西里10号)

四川新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米16开本 20¹/₂ 印张 4 插页 470 千字
1978年7月第1版 1984年6月第2版第3次印刷
印数: 280,201—323,300
统一书号: 14048·3624 定价: 1.95元

编者说明

本书是根据卫生部 1982 年颁发的高等医药院校医用物理学教学大纲（试用稿）修订的物理学教材。参加修订的同志有：江西医学院吕景新（第一至三章）、湖南医学院胡纪湘（第五至七章）、中国医科大学霍纪文（第八至十一章）、兰州医学院邝华俊（绪论、第四、十二至十四章）和哈尔滨医科大学刘骥（第十五至十七章），最后由邝华俊统一整理。武汉医学院曾仁端同志绘制了绝大部分插图。各院校参加审阅初稿、誊写稿件、核对算题等工作的同志很多，在此统致谢意。

由于时间仓促，不妥之处在所难免，欢迎批评指正。

医用物理学编审小组

1983 年 7 月 30 日

目 录

绪论	1
§ 0-1 物理学研究对象	1
§ 0-2 物理学与生物科学及医学的关系	1
第一章 力学基本知识	3
§ 1-1 质点运动学	3
参照系 坐标系 位移 速度 加速度 匀速圆周运动的加速度	
§ 1-2 质点动力学基本定律	7
牛顿运动定律 惯性系 惯性力 离心分离器	
§ 1-3 功和能	10
功 能 机械能守恒定律	
§ 1-4 动量和冲量	13
动量原理 动量守恒定律	
§ 1-5 刚体的转动	16
转动的运动学 转动的动能 转动惯量 转动定律 角动量	
§ 1-6 经典力学的适用范围	21
第二章 物体的弹性	25
§ 2-1 应变和应力	25
应变 应力	
§ 2-2 弹性模量	27
弹性和范性 弹性模量	
§ 2-3 弯曲和扭转	29
弯曲 扭转	
§ 2-4 弹性势能	31
§ 2-5 拉普拉斯公式	32
§ 2-6 肌肉和骨骼的弹性	34
第三章 流体的运动	36
§ 3-1 理想流体 稳定流动	36
理想流体 稳定流动 连续性方程	
§ 3-2 柏努利方程式	37
§ 3-3 柏努利方程式的应用	39
水平管中压强和流速的关系 流速计 压强与高度的关系	
§ 3-4 实际流体的流动 粘滞系数	41
片流 粘滞系数 湍流	
§ 3-5 泊肃叶公式	43
泊肃叶公式 斯托克司定律	
§ 3-6 血液的流动	46
第四章 振动、波动和声	50
§ 4-1 谐振动	50

谐振动方程	谐振动的振幅、频率和周期	谐振动的速度和加速度	谐振动的能量	
§ 4-2	阻尼振动、受迫振动与共振			54
	阻尼振动	受迫振动与共振		
§ 4-3	谐振动的合成			56
	两个同方向、同频率谐振动的合成	同方向不同频率谐振动的合成	两个同频率、同振幅、互相垂直的谐振动的合成	
§ 4-4	波的产生与传播			60
	波的产生	波阵面和波线		
§ 4-5	简谐波的波动方程			61
§ 4-6	波的能量			64
	波的强度	波的衰减		
§ 4-7	惠更斯原理			66
	波的衍射	波的折射		
§ 4-8	波的干涉			68
§ 4-9	驻波			70
§ 4-10	声波			73
	声波的物理性质	声压和声强	声强级与响度级	
§ 4-11	拍			76
§ 4-12	多普勒效应			77
§ 4-13	超声波及其医疗应用			79
	超声波的性质	超声波的产生和探测	超声扫描仪	多普勒超声血流计
	声的其它医疗应用			
第五章	气体分子运动论			83
§ 5-1	分子运动论的基本概念	理想气体状态方程		83
	物质微观结构的一些基本概念	理想气体状态方程		
§ 5-2	理想气体的压强公式和能量公式			84
	理想气体的微观模型	理想气体的压强公式	理想气体的能量公式	理想气体定律的推导
§ 5-3	气体分子的速率分布和能量分布			89
	麦克斯韦气体分子速率分布定律	玻尔兹曼能量分布定律		
§ 5-4	气体的扩散			92
第六章	液体的表面现象			94
§ 6-1	液体的表面层			94
	表面能	表面张力		
§ 6-2	球形液面内外的压强差			96
	球形液面的附加压强			
§ 6-3	毛细现象			97
	接触角	毛细现象	气体栓塞	
§ 6-4	表面活性物质	吸附		100
	表面活性物质	吸附	肺泡的表面张力	
第七章	热力学基础			103

§ 7-1 热力学的一些基本概念	103
热力学系统 热量和功	
§ 7-2 热力学第一定律	104
§ 7-3 理想气体的热力学过程	104
准静态过程 在准静态过程中对外界所作的功 等温过程 绝热过程 等容过程 等压过程	
§ 7-4 人体的能量变换	106
§ 7-5 热力学第二定律	108
热力学第二定律 热力学第二定律的统计意义	
§ 7-6 熵 熵增原理	110
可逆过程与不可逆过程 熵 熵增原理	
§ 7-7 热力学第二定律和生命系统	112
第八章 静电场	114
§ 8-1 电场 电场强度	114
库仑定律 电场与电场强度 点电荷的场强 场强叠加原理、点电荷系的场强 电力线	
§ 8-2 高斯定律	116
电通量 高斯定律 高斯定律的应用	
§ 8-3 电场力的功 电势	119
电场力的功 电势 点电荷电场的电势 电势叠加原理 电偶极子电场中的电势 电偶层的电势	
§ 8-4 电势和场强的关系	123
等势面 电势梯度和场强的关系	
§ 8-5 静电场中的电介质	125
电介质 介电常数	
§ 8-6 电容器 电场的能量	127
电容器 电容器中的能量 电场的能量	
第九章 电流	133
§ 9-1 电流密度和欧姆定律	133
电解质的导电 欧姆定律	
§ 9-2 电源与电动势	136
§ 9-3 直流电路 含源电路的欧姆定律	137
§ 9-4 基尔霍夫定律及其应用	139
基尔霍夫第一定律 基尔霍夫第二定律	
§ 9-5 电容器的充电放电过程	141
充电过程 放电过程	
§ 9-6 膜电位和神经传导	144
能斯特方程式 静息电位 动作电位 神经传导 心肌细胞的电偶极矩	
§ 9-7 电泳和电疗	148
电泳 电疗	
第十章 磁场	151
§ 10-1 磁场 磁感应强度	151

§ 10-2 带电粒子在磁场中的运动	152
质谱仪 霍尔效应 电磁流速计 电磁泵	
§ 10-3 磁场对载流导线的作用力	156
磁场对载流导线的作用力 磁场对载流线圈的作用	
§ 10-4 电流的磁场	158
毕奥-沙伐尔定律 长直电流产生的磁场 圆电流的磁场 直螺线管的磁场	
§ 10-5 磁介质	162
磁介质及其磁化, 分子磁矩 磁介质中的磁场, 磁导率	
§ 10-6 电磁感应现象	165
磁通量 电磁感应 自感现象 磁场的能量	
§ 10-7 交流电路	169
电阻在交流电路中的特性 电容在交流电路中的特性 电感在交流电路中的特性	
电阻、电容和电感串联的交流电路 RC 串联电路	
§ 10-8 电磁振荡与电磁波	174
位移电流 电磁振荡 电磁波 电磁波谱 无线电波和它的医疗应用	
§ 10-9 生物磁现象	179
生物磁现象 磁疗	
第十一章 医用电子测量技术	182
§ 11-1 测量系统的组成	182
测量系统的组成 转移函数	
§ 11-2 传感元件	182
电极 位移、力及加速度换能器 热电换能器 换能器的性能指标	
§ 11-3 信号放大器	188
放大器的幅频特性 脉冲信号的放大	
§ 11-4 干扰及其抑制	192
§ 11-5 信号的显示	192
描记仪器 示波器	
§ 11-6 用电安全措施	194
第十二章 光的波动性	197
§ 12-1 光的干涉	197
杨氏双缝实验 光程 薄膜干涉	
§ 12-2 光的衍射	200
单缝衍射 圆孔衍射 衍射光栅	
§ 12-3 光的偏振	205
自然光与偏振光 起偏和检偏	
§ 12-4 双折射现象	206
双折射 二向色性 圆偏振	
§ 12-5 其它产生偏振光的方法	208
反射产生偏振 散射产生偏振	
§ 12-6 旋光性	210
第十三章 几何光学	212
§ 13-1 球面折射	212

单球面折射 共轴球面系统	
§ 13-2 薄透镜·····	214
薄透镜公式 薄透镜的组合 透镜的象差	
§ 13-3 共轴球面系统的三对基点·····	219
§ 13-4 眼睛·····	220
眼的结构 眼的光学性质	
§ 13-5 非对称折射系统·····	222
§ 13-6 放大镜 角放大率·····	224
§ 13-7 显微镜·····	225
显微镜的光学原理 显微镜的分辨本领 相差显微镜 偏振显微镜	
§ 13-8 检眼镜 纤镜·····	228
检眼镜 纤镜	
第十四章 光的辐射和光的量子性 ·····	231
§ 14-1 热辐射·····	231
基尔霍夫辐射定律 黑体辐射定律	
§ 14-2 非温度辐射·····	233
荧光与磷光 荧光灯	
§ 14-3 光度学基本知识·····	235
光见度函数 光通量 发光强度 照度	
§ 14-4 光的吸收·····	237
§ 14-5 红外线和紫外线·····	238
红外线和紫外线 热象图	
§ 14-6 光的量子性·····	239
普朗克的量子假说 光电效应 爱因斯坦的光电效应方程式 光子的质量和动量 康普顿散射	
§ 14-7 微观粒子的波动性·····	243
德布罗意波 电子显微镜	
第十五章 原子、分子和光谱 ·····	247
§ 15-1 类氢原子的玻尔理论·····	247
§ 15-2 量子力学的基本概念·····	249
电子波 测不准原理 薛定谔方程 动量和能量的量子化	
§ 15-3 类氢原子的能级·····	255
自旋	
§ 15-4 多电子原子·····	258
泡利不相容原理	
§ 15-5 原子光谱·····	261
§ 15-6 分子光谱·····	261
双原子分子的转动能量级 双原子分子的振动能量级 红外吸收光谱的应用	
§ 15-7 激光·····	265
激光产生原理 红宝石激光器 激光的特点 激光的医学应用	
第十六章 X 射线 ·····	269
§ 16-1 X 射线的发现及其基本性质·····	269

§ 16-2 X射线发生装置	270
§ 16-3 X射线的强度与硬度	271
§ 16-4 X射线谱	272
连续X射线谱 标识X射线谱	
§ 16-5 X射线的衍射	275
X射线的衍射 X射线结构分析	
§ 16-6 X射线和 γ 射线的吸收规律	277
§ 16-7 X射线和 γ 射线与物质的相互作用过程	279
光电效应 经典散射和康普顿散射 电子对的生成 次级光子和粒子射线	
§ 16-8 X射线的医学应用	280
放射治疗 透视和照相 X射线断层照相术 电子计算机断层技术	
第十七章 原子核和放射性	285
§ 17-1 原子核的结构	285
原子核的组成 核力、结合能和质量亏损 原子核的稳定性	
§ 17-2 核衰变的类型	288
γ 衰变和内转换 α 衰变 β 衰变 电子俘获 β^+ 衰变	
§ 17-3 核衰变的规律	293
衰变定律 平均寿命 半衰期 统计涨落 放射性活度 有效半衰期	
§ 17-4 放射系和放射平衡	296
放射系 放射平衡	
§ 17-5 带电粒子与物质的相互作用	297
基本作用过程 射程和吸收规律	
§ 17-6 中子	299
§ 17-7 辐射剂量	300
照射量 吸收剂量 生物相对有效倍数和生物等效剂量	
§ 17-8 辐射防护	301
§ 17-9 射线的探测方法	303
电离室型探测仪器 盖革-弥勒计数管 闪烁计数器 热释光剂量计	
§ 17-10 放射性核素在医学上的应用	305
§ 17-11 基本粒子	306
描述基本粒子的物理量和守恒定律 基本粒子的相互作用 基本粒子及其相互转变	
附录	310
附录一 国际单位制	310
附录二 基本物理常数	313
附录三 希腊字母表	314
附录四 e^{-x} 函数表	315
习题答案	316

绪 论

医学生为什么要学习物理学？这是我们在开始学习这门课程以前应该明确的一个问题。要回答这个问题，首先得弄清楚物理学这门科学是研究什么的，它和生命科学有什么关系。

§ 0-1 物理学的研究对象

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学。

物质存在的最基本性质就是运动。这里所指的运动是广义的，它包括各种机械运动、变化、生长、相互作用和相互联系等过程。各种自然现象，如天体运动、化学变化、动植物的生长和生殖过程等都是不同形态的物质运动的表现。最简单的物质运动形态是机械运动，即物体在空间中的相对位移。稍为复杂一点的运动形态有各种物理的和化学的现象，而生命现象则是更加复杂、更加高级的物质运动形态。

各种自然科学以不同的物质运动形态作为研究对象。在所有自然科学中，物理学所研究的物质运动形态具有最基本和最普遍的性质。具体地说，物理学研究的就是：力学的现象、与实物的结构和状态有关的现象、各种场的性质、场和实物的相互作用等等。按照现象和过程来区分，物理学的研究对象可以分为力学、声学、热学、电学和磁学、光学、原子过程和原子核过程的理论等部分。由于各种物质运动形态都是互相联系、不能彼此分割的，因此物理学的各个部分之间的界线是不可能划得十分清楚的。

物理学研究的规律在自然界中具有最基本、最普遍的意义，因为物理现象存在于一切自然现象之中，和一切自然现象都有着不可分割的关系。例如，在任何化学反应中都包含有电子和分子运动、热和电的现象；人体中的神经活动包含着一系列电学过程等等。一切自然现象，包括有生命的与无生命的在内，都毫无例外地要受到能量守恒定律、万有引力定律以及其他物理定律的约束。物理现象的普遍性使得物理学基本知识成为研究任何科学技术所不可缺少的基础。

§ 0-2 物理学与生物科学及医学的关系

有一种相当普遍的看法，认为物理科学是研究没有生命的对象，而生物科学是研究生命现象的，两者的对象完全不一样，因此物理科学的结论不能适用于生命现象。还有一种看法代表另外一个极端，认为一切生命现象都可以用物理和化学的过程来解释。其实这两种看法都是不全面的。我们既不能把无机过程和有机过程划在两个互不相干的范畴内，也不能把生命过程看作是无机过程的简单组合。正如我们在上面指出的，生命现象在自然现象中属于较复杂、较高级的物质运动形态，它必然包含着许多较低级、较简单的物质运动形态。但是除了必须遵守有关的低级物质运动规律之外，生命现象还另有它自己的客观规律。换句话说，生命现象除了必须服从物理的和化学的规律外，还必须遵守生物学的规律。物理学和化学的知识是理解生命现象的基础，但不能代替生命科学去解释生命现象。

随着人类对生命现象认识的逐步深入, 生物科学已经从宏观形态的研究进入到微观机制的探讨, 从细胞水平提高到分子水平。生物化学曾经大大推动了生物医学科学的进展。生物物理学历史虽然较短, 但对阐明生命现象的本质已经作出了贡献。这些事实说明了物理科学与生物科学之间的不可分割的内在联系。

物理学与生物医学科学的联系还体现在另外一个方面, 即在生物科学研究和医疗实践中愈来愈广泛地采用物理学的方法和技术。光学显微镜对生物学的贡献是大家早已熟知的了。除此以外, 我们还可以举出放射性同位素、电子显微镜、各种仪器分析方法、各种医用电子技术、电子计算机、激光、超声波、红外技术等等在医学基础研究、临床诊断和治疗方面的应用。可以说, 物理学的每一个新的发现, 或技术发展到每一个新的阶段, 都会为生物科学和医学提供更新、更好的仪器与方法。事实上, 大量采用物理学的方法和设备已经成为现代医学研究和临床实践的一个特征了。

因此, 物理学对生物科学与医学的关系可以归结为两个方面: 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和技术为生物学及医学的研究、医疗实践开辟了许多新的途径。

医学院的物理学是一门基础课程, 它的主要任务是给医学生传授系统的物理学知识, 使他们进一步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准备基础。这样一门基础课程与专业课程不同, 它所讨论的内容一般并不直接用于解决医疗实践中所遇到的具体问题, 而只是为解决这些问题提供必要的基础知识。例如, 在原子物理学部分不可能详细讨论放射性同位素在医疗应用方面的技术细节, 这是核医学课程的任务。但是, 在物理学课程中应该详细介绍各种射线的本质、放射性的衰变规律、射线与物质的相互作用等方面的基本知识, 为以后的学习打好基础。

正确地认识物理学与医学的关系是学好这门课程的关键之一。

第一章 力学基本知识

力学 (mechanics) 是研究机械运动客观规律的学科。物理学中许多重要的基本概念, 如力、动量、能量、功等, 都是在力学中首先提出的。因此力学是研究物理学其他部分的基础。

力学的内容可以分为 **运动学** (kinematics)、**动力学** (dynamics) 和 **静力学** (statics) 三个部分。运动学研究物体位置变化与时间的关系, 但是不考虑引起变化的原因; 动力学研究产生各种机械运动的原因; 而静力学则研究物体在力或力矩作用下平衡的条件。

在这一章里, 将在中学物理学的基础上, 有所侧重地讨论力学中的一些基本概念与规律。

§ 1-1 质点运动学

在研究物体的运动时, 如果物体的大小和形状在所研究的问题中可以忽略, 我们就把它抽象为一个质量与它相同的点, 称为**质点** (particle)。在本章中我们讨论质点运动学的基本概念。

【参照系】 一个物体的位置有无变化只有在和其他物体对照时才能作出判断。因此在描述物体运动时, 必须先选定一个物体或物体系统作为参照标准。这样的物体或物体系统叫做**参照系** (reference system)。同一个物体的运动, 采用不同的参照系可能出现不同的结果。例如一个坐在运行着的火车上的乘客, 如果采用地面作为参照系, 他是运动着的; 如果采用车厢作为参照系, 他就是静止的。在分析一个问题时, 应该采用什么参照系, 要根据具体情况来决定。若不作特殊说明, 研究地球上的机械运动一般是以地面作为参照系的。

【坐标系】 要确定一个质点的位置, 除了必须选定一个参照系以外, 还需要在参照系上选用一个固定的坐标系, 并在参照系上选定坐标系的原点和坐标轴。较为常用的坐标系是直角坐标系, 它有三条互相垂直的坐标轴 (X 轴, Y 轴和 Z 轴)。质点 P 的位置就用三个坐标 x 、 y 、 z 来表示 (图 1-1)。

另外一种表示位置的方法就是用从原点 O 到 P 点的有向线段 r 来表示。矢量 r 的方向和长度完全决定了 P 的位置, 我们把它叫做**位矢** (position vector) 或**矢径** (radius vector)。从图 1-1 中可以看出, 坐标 x 、 y 、 z 就是 r 沿三条直角坐标轴的三个分量。 r 的大小是

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

它和 X 、 Y 、 Z 三条轴之间的夹角分别是

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r}$$

质点在运动时, 它的位置随时间发生变化, 可见 x 、 y 、 z 和 r 都是时间 t 的函数。

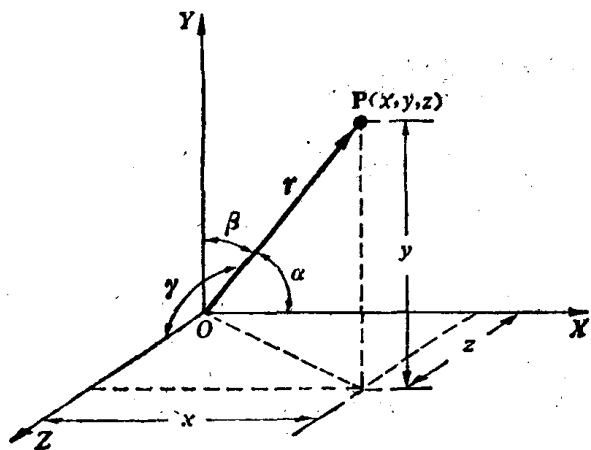


图 1-1 质点位置的表示法

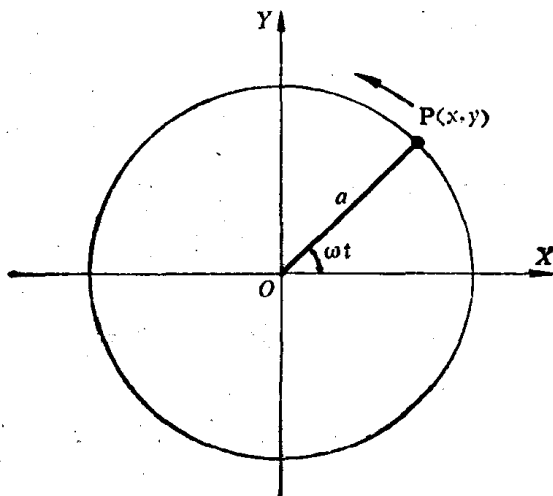


图 1-2 匀速圆周运动

例如，当质点沿 x 轴作匀速直线运动时，我们有

$$x = f(t) = vt + C$$

式中 v 是常数， C 是 $t = 0$ 时质点的坐标。这就是表示匀速直线运动的运动方程。当质点在 X - Y 平面上，以原点为圆心作匀速圆周运动时（图 1-2），它的运动方程是

$$\begin{cases} x = a \cos \omega t \\ y = a \sin \omega t \end{cases}$$

式中 a 是圆的半径， ω 是一个常数。根据具体条件求出质点运动方程的解，就是运动学的任务之一。

【位移】 在图 1-3 中，曲线 $\widehat{AB}$ 表示质点运动轨道的一部分。设质点原来在 A 点，位矢为 r_A ，后来到达 B 点，位矢为 r_B 。质点的位置变化可用从 A 到 B 的有向线段 Δr 来表示， Δr 称为质点的 **位移** (displacement)

$$\Delta r = r_B - r_A$$

位移是矢量，它除了表明 B 点到 A 点的距离外，还表明 B 点相对于 A 点的方位。必须注意，位移表示质点位置的改变，但它并不一定代表质点所经历的路程。在图 1-3 中，位移等于直线 $\overline{AB}$ ，而路程则等于曲线 $\widehat{AB}$ 。位移是矢量而路程是标量，它们是两个不同的概念。

【速度】 质点的位移是需要时间来完成的。位移的时间变化率称为 **速度** (velocity)。设质点的位移 Δr 是在时间 Δt 内完成的， Δr 与 Δt 的比值就是这段时间的平均速度 $\bar{v}$ (图 1-4)，即

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$$

用平均速度来描述质点的运动，是比较粗糙的。它不能反映质点在运动过程中某一时刻的速度。质点在某一时刻或某一位置的瞬时速度等于时间趋近于零时平均速度的极限值 (图 1-4)，即

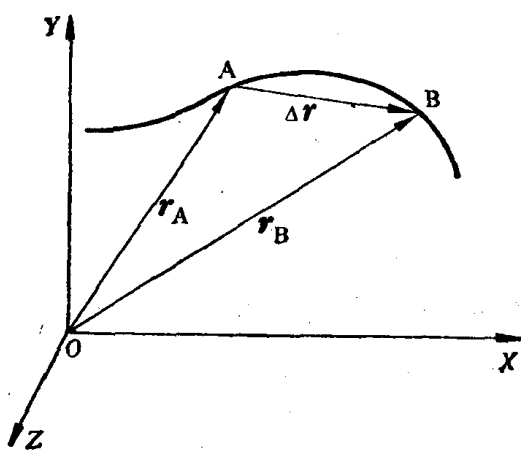


图 1-3 位移

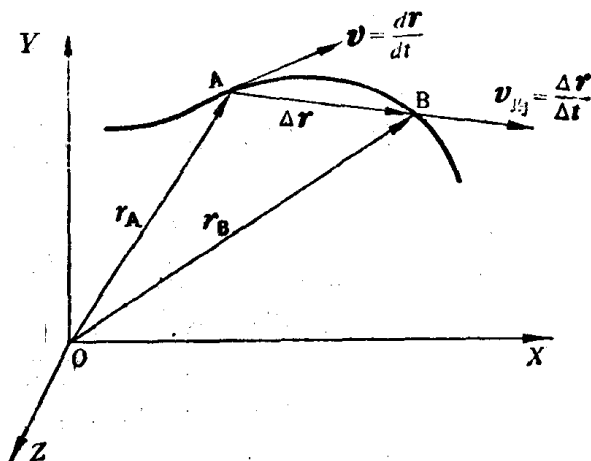


图 1-4 平均速度与瞬时速度

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

式 (1-1) 表明, 速度等于位矢对时间的一阶导数。

速度的方向就是 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向。在图 1-4 中, 质点经过 A 点时的 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向也就是曲线在 A 点的切线方向。

应该注意, 速度与速率不同。速度是位移的时间变化率, 而速率是路程的时间变化率。速度是矢量, 而速率是标量。

【加速度】 在非匀速运动中, 质点的速度是随着时间改变的。速度的时间变化率, 称为**加速度** (acceleration)。假设质点在图 1-5 中由 A 点移到 B 点所需要的时间为

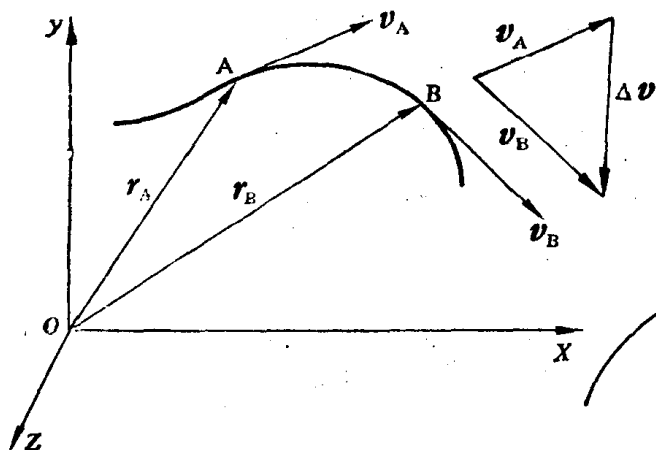


图 1-5 加速度

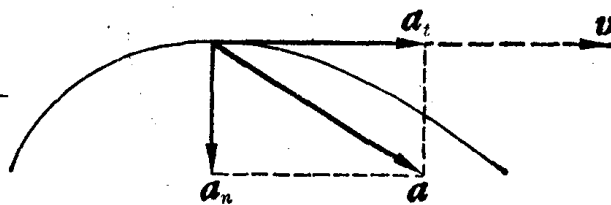


图 1-6 法向加速度和切向加速度

Δt , 在 A 点的速度为 $\mathbf{v}_A$ 而在 B 点的速度为 $\mathbf{v}_B$, 速度改变为 $\Delta \mathbf{v}$, $\Delta \mathbf{v}$ 与 Δt 的比值即代表质点运动的平均加速度, 以符号 $\bar{\mathbf{a}}$ 表示

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$$

质点在某一时刻或某一位置的加速度 (或称**瞬时加速度**) 等于时间趋近于零时平均

加速度的极限值, 即

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} \quad (1-2)$$

加速度的大小等于速度对时间的一阶导数。加速度的方向就是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向。

很明显, 如果加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向和速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向一致, 则结果只能引起速度 $\boldsymbol{v}$ 的量值发生变化而不会改变它的方向, 质点将作直线加速运动。只有当加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向与速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向不一致时, 质点才作曲线运动。另一方面如果加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向与速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向垂直, 则结果只会改变速度的方向而不改变它的量值。我们可以把曲线运动在任何时刻的加速度 $\boldsymbol{a}$ 分解为沿速度 $\boldsymbol{v}$ 方向的切向加速度 (tangential acceleration) $\boldsymbol{a}_t$ 和垂直于速度 $\boldsymbol{v}$ 方向的法向加速度 (normal acceleration) $\boldsymbol{a}_n$, 如图 1-6 所示。切向加速度的作用是改变速度的量值, 而法向加速度的作用是改变速度的方向。在 $\boldsymbol{a}_n = 0$ 而 $\boldsymbol{a}_t \neq 0$ 时, 质点作直线加速运动; 在 $\boldsymbol{a}_t = 0$ 而 $\boldsymbol{a}_n \neq 0$ 时, 质点作速率不变的曲线运动。

【匀速圆周运动的加速度】 圆周运动是曲线运动中一个常见的特例。在匀速圆周运动中, 速度的量值是不变的, 而速度的方向却在随时改变, 因此它是一种变速运动。

根据式 (1-2), 匀速圆周运动的加速度 $\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$ 。由图 1-7 可见, 三角形 OAB 和 O'A'B' 是两个相似的等腰三角形, $|\Delta \boldsymbol{v}|/v = \Delta r/r$, 于是

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v}{r} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{v}{r} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{v^2}{r} \quad (1-3)$$

加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向, 亦即速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向, 是指向圆心的。因此, 匀速圆周运动的加速度也常叫做向心加速度 (centripetal acceleration)。它是法向加速度。

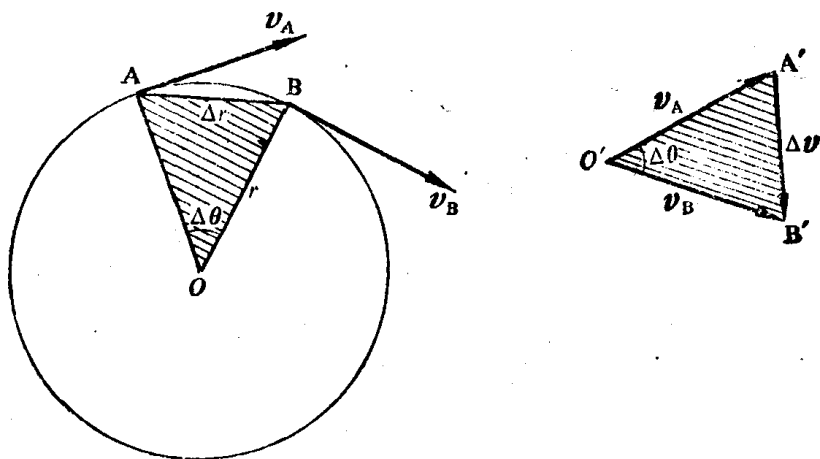


图 1-7 匀速圆周运动的加速度

设 ω 是质点作圆周运动时的角速度, 即 $\omega = \Delta \theta / \Delta t$, 则:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{\widehat{AB}}{\Delta t} = \frac{r \Delta \theta}{\Delta t} = r \omega$$

代入式 (1-3) 得

$$\boldsymbol{a} = r \omega^2 \quad (1-4)$$

§ 1-2 质点动力学基本定律

【牛顿运动定律】 牛顿 (I. Newton, 1642~1727) 的三条运动定律是经典力学的基础。

第一定律：物体（质点）如果不受外力的作用，它将保持原有的静止状态或作匀速运动（惯性定律）。

第二定律：作用在物体上的合外力 F 等于物体动量的时间变化率

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad (1-5)$$

式中的 p 是物体的质量 m 与速度 v 的乘积，称为动量 (momentum)

$$p = mv \quad (1-6)$$

动量是个矢量，它的方向和速度方向相同。如果物体的质量可以认为是不变的话（在经典力学的研究范围内，这个条件是满足的），式 (1-5) 可以写成

$$F = m \frac{dv}{dt} = ma \quad (1-7)$$

第三定律：力总是成对出现的。如果物体 A 以力 F_A 作用在物体 B 上，则物体 B 也必同时以一大小相等方向相反的力 F_B 作用在物体 A 上

$$F_A = -F_B \quad (1-8)$$

牛顿运动定律引入了力、惯性、质量和动量的概念。力就是外界环境对物体的影响；这种影响使物体的速度发生变化。物体在不受外力影响时保持原有运动状态的性质称为惯性 (inertia)，而惯性的大小则是以物体的质量来衡量的。质量大的物体，惯性也大，它的速度不容易改变。动量是质量与速度的乘积，它是一个表征物体运动状态的物理量。关于动量的一些性质，我们在后面还要讨论。牛顿运动定律把上述这些概念和运动学的基本概念联系起来了。

【惯性系】 前面提到，同一个物体的运动用不同的参照系来描述，结果是不一样的。那么牛顿运动定律是否对任何参照系都同样适用呢？

举例说明这个问题（图 1-8）。假定在一辆作匀速直线运动的火车车厢内，一个乘客正在观察一个放在光滑桌面上的小球。他发觉，如果不受外力作用，小球将保持静止状态。这里所谓静止是相对于车厢来说的。也就是说，乘客在观察小球时是以车厢为参照系的。用手对小球加力，小球就沿力的方向获得加速度向前运动。在这种情况下，小球完全服从牛顿运动定律。

但是，当车厢不再保持原来的速度（如加快，减慢或改变进行方向）的时候，这个乘客就会观察到小球出现违反惯性定律的现象。例如当车速加快时，小球在没有外力作用下会向后移动；车厢向右拐弯时，小球自动向左滚，等等。由此可见，惯性定律并不是对任何参照系都适用的。把适用惯性定律的参照系叫做惯性系 (inertial system)。

有那些参照系是惯性系呢？以恒星（包括太阳）为参照物的参照系都是惯性系。事实上，牛顿运动定律就是以这样的参照系观察大量天体运动归纳出来的结果。可以证

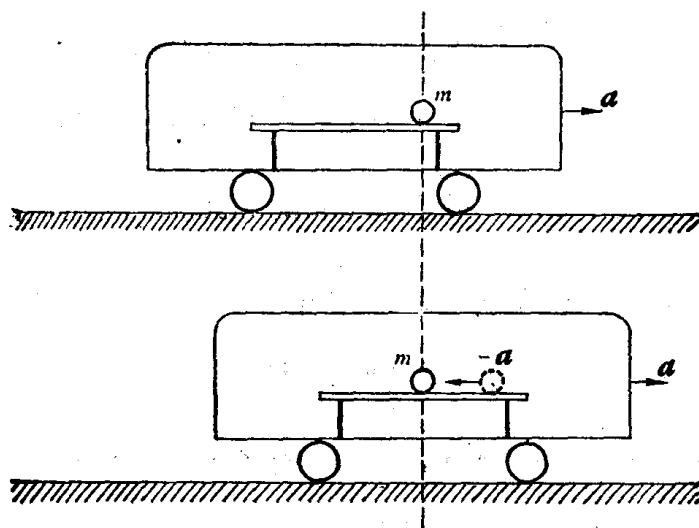


图 1-8 惯性系与非惯性系

明，凡是与惯性系相对作匀速运动的参照系都是惯性系，与惯性系相对作加速运动的参照系都不是惯性系。地球是绕着太阳作公转和自转的，因此严格说来固定在地面上的参照系也不是惯性系。不过地面相对于太阳的加速度很小（约为 0.006m/s^2 ），我们通常研究的加速度都比它大得多，所以可以把地面看作是惯性系。但是如果我们研究的加速度比地球表面的加速度还要小时（例如火星的轨道加速度只有 0.0025m/s^2 ），那么地面的参照系就不能再认为是惯性系了。

【惯性力】 假设图 1-8 中的车厢以加速度 a 相对于地面作直线运动。以车厢为参照系，我们看到质量为 m 的小球正以加速度 $-a$ 作加速运动。为了使牛顿运动定律适用于这一参照系，我们设想这时有一个力 $F = -ma$ 作用在这一小球上。这个力称为**惯性力** (inertial force)，它的方向是和参照系的加速度方向相反的。如果这时我们要使小球相对于车厢静止不动，就必须对小球施加一个与惯性力大小相等方向相反的力来抵消惯性力的作用。

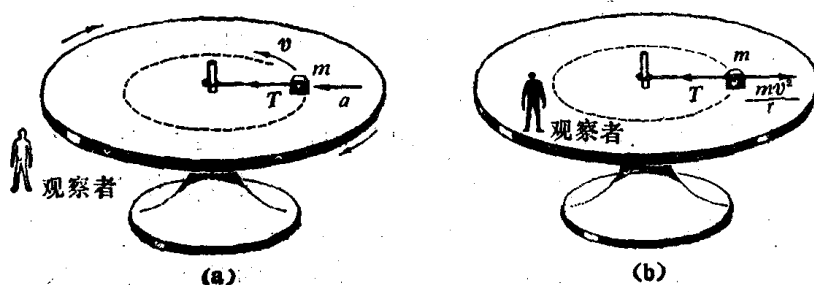


图 1-9 惯性离心力

图 1-9 的旋转平台也是一个非惯性系。在平台转动时，平台的每一点都作圆周运动，因此具有向心加速度，这样的参照系显然是非惯性系。假定在图中有一个相对于平台静止的物体 m 由一根连在中心柱上的绳子拉着。从地面上的观察者看来，物体 m 在作圆周运动，绳子的张力 T 提供所需的向心力 $m\omega^2 r$ 。但是从站在平台上的人看来，物体 m 是静止不动的，绳子有一张力 T 作用在物体上。为了使牛顿运动定律适用于这一情况，必