

·医·学·专·业·

物理学

湖南科学技术出版社

医学专业

R312

12

3

物理学

主编 胡纪湘

参加编写单位：
哈尔滨医科大学
四川医学院
湖南医学院
中山医学院
山西医学院

B201/20

湖南科学技术出版社



A 913831

医学专业
物 理 学

主编 胡纪湘
责任编辑: 朱 杰

*

湖南科学技术出版社出版
(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1982年7月第1版第1次印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22 插页: 1 字数: 621,000

印数: 1—15,700

统一书号: 14204·65 定价: 2.30元

前 言

鉴于全日制十年制中学物理学内容的加深和教学质量逐步提高,医学院校的教学计划有很大修订,原有的“医用物理学”已不能适应教学需要。为此,在中国医学物理学会的组织和帮助下,由湖南医学院、哈尔滨医科大学、中山医学院、四川医学院和山西医学院共同编写这本“医学专业物理学”教材。

本教材是以卫生部修订的高等医学院校医用物理学教学大纲(草案)为根据,参考国内外有关资料,广泛征求意见,并结合我们在教学中的实践经验编写的。本书可供高等医学院校医疗、儿科、口腔、卫生等专业学生使用,也可以作为生物医学工作者有关物理学方面的参考书。

本教材以高中物理学为起点,以物理学的基本理论、基本知识、基本技能为主要内容,并针对医学科学的需要,适当地联系医学实际,并尽可能避免与中学物理学内容的重复。对于某些中学的物理学内容,必要时只作概要的叙述,以保持内容的连贯性,对于这部分内容可以指定学生自学。

本教材以马列主义、毛泽东思想为指导,努力运用辩证唯物主义和历史唯物主义的观点阐述本学科的基本规律。

根据卫生部关于编写教材的几项原则,在中学的基础上,我们适当地应用了高等数学这一有利的工具,来说明某些物理量的概念和推导必要的公式,藉以培养学生的思维能力和增强学生对物理概念与理论的深入认识。为了克服教材内容多教学时数少的矛盾,除尽可能避免与中学内容的重复外,还贯彻少而精的原则,适当压缩了一些次要的内容。为了使本教材适应不同教学时数的要求,某些内容用小字编排,各院校可根据具体情况选择使用。部分内容可以留作以后参考。每章有习题,书末附有习题答案。

本教材在审稿过程中,除编写的同志参加外,吴幸生、刘普和、张书琴、吕景新、张增麟、陈秀文、闵基昌等同志也参加了审稿工作,并提了许多宝贵意见,在此表示谢意。

由于我们水平有限,实践经验不够,加以时间仓促,书中的缺点错误在所难免。我们恳切希望使用本书的教师、学生和读者,惠予批评指正,以便总结经验,加以修订。

编 者

1982年2月

目 录

绪 论	(1)	一 牛顿粘滞定律 粘度	(31)
第一节 物理学研究对象	(1)	二 实际液体的伯努利方程式	(33)
第二节 物理学与医学的关系	(1)	三 片流与湍流 雷诺数	(33)
第一章 力学基本知识	(3)	第五节 泊肃叶公式	(34)
第一节 位置矢量 位移 速度 加速度	(3)	第六节 粘度的测定	(35)
第二节 惯性系与非惯性系	(6)	一 奥氏粘度计	(35)
一 惯性系与非惯性系	(6)	二 锥板型粘度计	(36)
二 非惯性系中的力学定律 惯性力	(7)	三 斯托克司定律	(37)
三 惯性离心力 离心机	(7)	四 血液粘度的影响因素	(37)
第三节 刚体的转动	(9)	第七节 血液在人体循环系统中的 流动	(39)
一 刚体的平动和转动	(9)	一 体循环系统中的血流速度	(39)
二 刚体的转动动能 转动惯量	(11)	二 体循环系统中的血压分布	(40)
三 力矩 转动定律和动量矩守恒定律	(13)	三 心脏做功	(41)
第四节 物体的平衡	(15)	习 题	(42)
一 物体在共点力作用下的平衡 拉密定理	(15)	第三章 振动 波动与声学	(44)
二 转动平衡	(17)	第一节 简谐振动	(44)
第五节 固体的力学性质	(18)	一 简谐振动方程	(44)
一 杨氏模量	(18)	二 简谐振动的周期 频率和相位	(45)
二 切变模量和体积弹性模量	(20)	三 简谐振动的能量	(46)
三 骨的力学性质和应力分布	(21)	第二节 阻尼振动 受迫振动 共振	(48)
第六节 经典力学的适用范围	(23)	一 阻尼振动	(48)
习 题	(24)	二 受迫振动	(48)
第二章 液体的流动	(26)	三 共振	(49)
第一节 理想液体的稳定流动	(26)	第三节 简谐振动的合成	(49)
一 理想液体的稳定流动	(26)	一 同方向同频率简谐振动的合成	(49)
二 流线和流管	(26)	二 同方向不同频率简谐振动的合成	(50)
三 液流连续原理	(27)	三 拍	(52)
第二节 伯努利方程式	(28)	四 互相垂直的同周期简谐振动的合成	(53)
第三节 伯努利方程式的应用	(29)	第四节 机械波	(54)
一 水平管中压强和流速的关系	(29)	一 机械波的产生和传播	(54)
二 比托管	(30)	二 波长 波的周期和频率	(55)
第四节 实际液体的流动	(31)	三 波速	(55)
		四 波动方程	(56)

第五节 波的能量和能流	(57)	一 麦克斯韦气体分子速率分布定律	(89)
一 波的能量	(57)	二 平均自由程	(90)
二 能流和能流密度	(58)	第五节 输运过程	(91)
三 波的衰减	(59)	一 粘滞性	(91)
第六节 多普勒效应	(59)	二 热传导	(92)
第七节 惠更斯原理	(60)	三 扩散	(92)
一 惠更斯原理	(60)	习 题	(93)
二 波的反射与折射	(61)	第五章 热力学	(95)
第八节 波的迭加原理 波的干涉		第一节 热力学第一定律	(95)
驻波	(62)	一 内能 功和热量	(95)
一 波的迭加原理	(62)	二 热力学第一定律	(96)
二 波的干涉	(62)	三 热力学第一定律对理想气体的应用	(97)
三 驻波	(64)	第二节 热力学第二定律	(100)
第九节 声波	(66)	一 热功转换问题	(100)
一 声速	(66)	二 热力学第二定律	(101)
二 声压 声阻 声强	(66)	三 可逆过程和不可逆过程	(101)
第十节 响度和响度级 听力曲线	(68)	第三节 熵和熵增原理	(102)
一 响度和响度级	(68)	一 卡诺循环	(102)
二 听力曲线	(69)	二 熵和熵增原理	(103)
三 人耳的听觉	(70)	三 熵的计算	(104)
第十一节 超声	(71)	第四节 热力学第二定律的微观意义	(104)
一 超声的产生	(71)	一 不可逆过程的统计意义	(104)
二 超声的性质	(72)	二 熵的微观意义	(105)
三 超声在医学上的应用	(72)	三 热力学第二定律和生命系统	(105)
习 题	(75)	第五节 自由能和吉布斯函数	(106)
第四章 分子物理学	(77)	习 题	(107)
第一节 物质的微观结构和聚集态	(77)	第六章 静电学	(108)
一 物质微观结构的一些基本概念	(77)	第一节 电荷与电场	(108)
二 物质的聚集态	(78)	一 电荷及库仑定律	(108)
第二节 液体的表面现象	(81)	二 电场 电场强度 高斯定律	(109)
一 表面张力和表面能	(82)	第二节 静电场的电势	(115)
二 曲面下的附加压强	(83)	一 静电场力所作的功	(115)
三 毛细现象和气体栓塞	(84)	二 电势能 电势和电势差	(116)
四 表面吸附 表面活性物质	(85)	三 静电场强与电势的关系	(118)
第三节 理想气体分子运动论	(86)	第三节 静电场中的导体	(119)
一 理想气体的压强方程	(86)	一 导体的静电平衡	(119)
二 理想气体的能量方程	(88)	二 静电屏蔽	(120)
三 气体分子运动的方均根速率	(88)	三 电容器	(122)
第四节 气体分子运动的速率分布		第四节 静电场中的电介质	(123)
和平均自由程	(89)	一 电介质及其极化	(123)

二 极化强度与电极化率	(124)	二 带电粒子在电场和磁场中的运动	(162)
三 相对介电常数	(125)	三 磁场对载流导线的作用	(166)
第五节 静电场的能量	(126)	第三节 物质的磁性	(168)
第六节 心电	(127)	一 磁介质中的磁场	(168)
一 心电向量	(127)	二 顺磁质 抗磁质 铁磁质	(169)
二 心电图波形的形成	(128)	三 磁化强度 磁化率	(171)
三 中心电端	(129)	第四节 磁场的生物效应 人体	
习 题	(130)	磁场	(172)
第七章 恒定电流	(132)	一 磁场的生物效应	(172)
第一节 欧姆定律	(132)	二 人体磁场	(173)
一 电流 电流密度	(132)	三 磁疗	(173)
二 欧姆定律的微分形式	(134)	第五节 电磁波的产生和传播	(174)
第二节 非均匀电路的欧姆定律	(134)	一 磁场能量	(174)
一 一段非均匀电路的欧姆定律	(134)	二 电磁波的产生和传播	(175)
二 基尔霍夫定律	(137)	三 电磁波谱	(178)
三 基尔霍夫定律的应用	(138)	第六节 高频电对机体的作用	(178)
第三节 电容器的充电和放电	(139)	习 题	(180)
一 电容器的充电过程	(140)	第九章 电子学基础	(183)
二 电容器的放电过程	(141)	第一节 整流器	(183)
第四节 带电粒子输运过程中的电		一 半导体二极管	(183)
动势	(142)	二 整流电路	(186)
一 接触电势差	(142)	三 滤波电路	(188)
二 温差电动势	(144)	四 稳压电路	(189)
三 浓差电动势	(147)	第二节 放大器	(190)
四 扩散电动势	(148)	一 晶体三极管	(190)
五 流动电动势	(148)	二 低频电压放大器	(193)
第五节 电泳和电渗	(149)	三 直流放大器	(197)
一 电泳	(149)	第三节 振荡器	(200)
二 电渗	(149)	一 LC振荡器	(200)
第六节 直流电对肌体的作用	(150)	二 多谐振荡器	(203)
一 电极化与离子的水化	(150)	第四节 电子示波器	(206)
二 离子浓度变化	(151)	一 示波管	(206)
三 电解作用	(151)	二 锯齿波发生器	(208)
四 离子透入法	(152)	三 示波原理	(209)
习 题	(152)	四 示波器结构方框图	(210)
第八章 电磁现象	(156)	习 题	(211)
第一节 磁场	(156)	第十章 光的波动性	(213)
一 磁感应强度	(156)	第一节 光的干涉	(213)
二 磁通量 磁场中的高斯定理	(157)	一 相干光源	(213)
三 毕奥-沙伐尔定律	(159)	二 杨氏双缝实验	(213)
第二节 磁场对电流的作用	(161)	第二节 光的衍射	(215)
一 磁场对运动电荷的作用	(161)		

一 光的衍射现象	(215)
二 单缝衍射 圆孔衍射	(215)
三 衍射光栅 衍射光谱	(217)
第三节 光的偏振	(219)
一 自然光和偏振光	(219)
二 起偏器与检偏器	(219)
三 反射和折射产生偏振	(220)
四 双折射和二向色性	(221)
五 椭圆偏振光和圆偏振光	(225)
第四节 旋光性	(225)
一 旋光性糖量计	(225)
二 旋光性的解释	(227)
习 题	(227)
第十一章 光的辐射和吸收	
光的量子性	(229)
第一节 热辐射 基尔霍夫辐射定律	(229)
一 热辐射发射本领和吸收率	(229)
二 基尔霍夫定律	(230)
第二节 黑体的辐射定律 普朗克量子假设	(231)
一 黑体的辐射定律	(231)
二 普朗克量子假设	(232)
三 热辐射的应用	(233)
第三节 非温度辐射	(235)
一 微光现象和微光分析	(235)
二 冷光源	(235)
第四节 光电效应	(237)
一 光电效应	(237)
二 爱因斯坦光电效应方程	(238)
三 光子的质量和动量 微观粒子的波动性	(238)
四 光电效应的应用	(239)
第五节 光的吸收	(241)
一 选择性吸收和吸收光谱	(241)
二 朗伯-比尔定律	(242)
习 题	(243)
第十二章 几何光学	(245)
第一节 单球面折射 共轴球面系统	(245)
一 单球面折射	(245)
二 共轴球面系统	(246)

第二节 透镜	(247)
一 薄透镜	(247)
二 薄透镜公式	(248)
三 薄透镜的组合	(250)
四 厚透镜	(250)
五 圆柱透镜	(252)
六 透镜的缺陷和补救	(253)
第三节 眼屈光	(254)
一 眼睛	(254)
二 眼的分辨本领和视力	(256)
三 眼的屈光不正及其矫正	(257)
第四节 光度学的基本概念 眼的视觉	(259)
一 辐射通量 光见度函数	(259)
二 光通量 发光强度与照度	(260)
三 眼的视觉	(262)
第五节 放大镜 检眼镜 纤镜	(264)
一 放大镜	(264)
二 检眼镜	(265)
三 纤镜	(266)
第六节 显微镜 电子显微镜	(266)
一 显微镜	(266)
二 显微镜的分辨本领	(267)
三 电子显微镜	(270)
第七节 几种医用显微镜	(272)
一 暗视野显微镜	(272)
二 荧光显微镜	(272)
三 偏光显微镜	(273)
四 相位显微镜	(273)
习 题	(274)
第十三章 原子分子结构与光谱	(276)
第一节 原子结构与原子光谱	(276)
一 玻尔的氢原子理论	(276)
二 推广的玻尔理论	(279)
三 量子力学的原子结构概念	(281)
四 原子光谱	(283)
第二节 分子能级和分子光谱	(284)
一 分子能级	(284)
二 分子光谱	(287)
三 吸收光谱及其应用	(288)
第三节 激光	(289)
一 激光的一般介绍	(289)

二 受激辐射	(290)	三 原子核的稳定性	(308)
三 几种常用激光器的工作原理	(290)	第二节 放射性核素的衰变	(310)
四 激光的医学应用	(292)	一 α 衰变	(310)
习 题	(293)	二 γ 衰变和内转换	(310)
第十四章 X射线	(294)	三 β 衰变和电子俘获	(312)
第一节 X射线的一般性质及发生	(294)	第三节 放射性衰变规律	(314)
一 X射线的一般性质	(294)	一 衰变规律	(314)
二 X射线的发生	(295)	二 放射性强度	(316)
第二节 X射线衍射及X射线谱	(296)	三 两次串联衰变	(317)
一 X射线衍射	(296)	四 放射性核素发生器	(318)
二 X射线谱	(296)	五 放射性衰变的统计涨落	(319)
第三节 X射线的强度和硬度	(298)	第四节 射线与物质的相互作用	(320)
第四节 X射线的吸收	(299)	一 带电粒子和物质的相互作用	(320)
一 吸收规律	(299)	二 光子和物质的相互作用	(322)
二 滤线器	(300)	三 中子与物质的相互作用	(324)
第五节 X射线的生物效应和医学应用	(300)	第五节 射线的探测	(324)
一 X射线的生物医学作用	(300)	第六节 放射剂量	(328)
二 X射线的医学应用	(301)	第七节 放射性核素在医学上的应用	(329)
习 题	(306)	一 示踪的原理和应用	(330)
第十五章 原子核物理	(307)	二 诊断	(330)
第一节 核的组成	(307)	三 治疗	(331)
一 核的成份	(307)	第八节 防护	(332)
二 原子核的半径和质量	(307)	第九节 基本粒子	(333)
		习 题	(334)

绪 论

第一节 物理学的研究对象

辩证唯物主义认为,自然界是由运动着的物质组成的。我们周围所有的客观实在都是**物质(matter)**，“实物”和“场”是整个自然界中各种各样运动着的物质的具体形式。大至日月星辰,小到原子、电子等都是实物。实物是由质子、中子、电子等微粒组成的,这些实物都是物质;电场、磁场、引力场等也是物质,“场”是在某些方面不同于实物粒子的一种物质形式,例如一个物体的周围存在引力场,一个运动着的带电粒子的周围存在电场和磁场,一个核子的周围存在介子场等。可见,实物和场具有密切的联系;但场也可以独立于实物,如电磁场;而且在一定条件下可以相互转化。

物质存在的最基本的性质就是运动(motion)。没有运动的物质和没有物质的运动,都是不存在的。地球的运行、江河的奔流、生物的代谢,都是物质运动变化的例子。恩格斯指出:“运动,就其一般的意义来说,就它被理解为存在的方式、被理解为物质的固有属性来说,它包括宇宙中发生的一切变化和过程,从单纯的位置移动起直到思维。”^①物质的运动形式是多种多样的,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(physics)是研究物质运动的普遍性质和运动规律的科学。物理学的研究对象包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原

子和原子核内的运动等等。物理学研究的这些运动,普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中,所以物理现象也存在于一切自然现象之中,且和一切自然现象都有着不可分割的内在联系。例如,在化学反应中都包含有分子运动、热和电的现象;人体中的神经活动包含着复杂的电学过程。一切自然现象,包括生命的和无生命的在内,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。正是由于物理学所研究的规律在自然界中具有极大的普遍性,使得物理学的基本知识成为研究其他自然科学所不可缺少的基础。

第二节 物理学与医学的关系

医学是一门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。这种高级运动形态是以普遍的物理学和化学的运动形态为基础的。例如,呼吸、消化、血液循环等这些生理过程,就和力学、热学、电学的过程分不开。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,物理学和化学的基本知识是理解生命现象的基础。虽然高级的、复杂的生命过程都包含着简单的和普遍的物理学及化学过程,但是生命现象除了必须服从有关的物理学和化学的规律外,还有它自己独特的规律。因而不能简单地把生命现象看作是物理和化学过程的总和,而企图单纯地用物理学和化学的规律加以说明。

^① 恩格斯:《自然辩证法》,人民出版社,1971年版,第53页。

随着近代物理学的迅速发展,使人类对生命现象的认识逐渐深入,生物科学的研究已经从宏观形态进入微观,如分子水平的研究。医学各分枝学科已愈来愈多地把它们的理论建立在精确的物理科学基础之上。过去,生物化学的出现曾使医学向前跃进了一大步,而生物物理学的发展,对阐明生命现象的本质又作出了新的巨大贡献。如果说,过去基础医学和临床医学的研究主要是处于宏观现象的一般规律性的描述,那么,由于近代物理学、生物物理学和医学物理学的迅速发展并应用于医学,已使基础医学和临床医学的研究在理论、方法和技术有了突破性的进步,从细胞水平进入到超显微的分子水平。大量的事实表明,物理学在医学领域中的应用已更为广阔,更为深入。核物理的成就,促成了核医学的建立和发展,分子生物学和生物医学工程学的建立和发展,是物理学和生物学、物理学和医学互相渗透、互相促进的产物。可以预期,随着医学科学的发展,物理学和医学的关系也必将越来越密切。

此外,物理学的技术和方法,在医学研究和医疗实践中的应用也越来越广泛。光学显微镜和X射线对医学的巨大贡献是大家早已熟知的。玻璃光学纤维做成的各种内窥镜,已逐步淘汰了各种刚性导管内窥镜。电子计算机X射线断层扫描术(Computerized tomography 简称CT)的制成和应用,也将

逐步淘汰气脑造影、核素脑扫描和淋巴血管造影等。这些成就不仅直接促进了诊断学的发展,而且大大地减少了病人的痛苦和创伤。激光、红外摄影技术,超声波、射流技术、液晶技术,特别是电子技术等,这些近代物理学派生出来的新技术在医学上的广泛应用,已引起了临床诊断、治疗和护理技术发生质的飞跃。物理学的每一新的发现或是技术发展到每一个新的阶段,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。可以说,在现代的医学研究机构和医疗单位,没有一个是不采用物理学方法和设备的。

物理学与医学的关系可以归结为两个主要方面:

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,为医学研究和医疗实践开辟了许多新的途径。

由于物理学和医学的关系如此密切,所以物理学是医学院校一门必修的基础课。虽然一般说来,它所讨论的内容并不直接用于解决医疗实践中所遇到的具体问题,但是,掌握物理学所提供的、与医学紧密结合的一些系统知识,对一个医学生来说是必不可少的。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。

(湖南医学院 胡纪湘)

第一章 力学基本知识

物理学是研究物质运动的普遍性质和运动规律的科学。最简单而又最基本的运动形式，是物体之间或物体内部各个部分之间的相对位置变化，我们把这种相对位置变化称为机械运动。太阳系行星的绕日运行，飞机、火车、轮船的运动，工厂矿山中各种机器的运动，水、空气等流体的运动等等，都是机械运动。在物理学中，研究机械运动客观规律的部门叫做**力学**(mechanics)。力学中的一些概念和定律，不仅在物理学的其他部门中，而且在其他自然科学和技术部门中，都得到广泛的应用，因此，力学是物理学和其他科学技术最基本的知识。

力学的内容分为**运动学**(kinematics)、**动力学**(dynamics)和**静力学**(statics)三部分。运动学研究物体的位置变化与时间的关系，但不研究引起变化的原因；动力学研究各种机械运动发生的原因；静力学则研究物体平衡的条件。

在这一章里，我们将在中学物理学的基础上，进一步讨论在物理学中常用的一些基本概念和规律。

第一节 位置矢量 位移 速度 加速度

宇宙间一切物体都处在不停的运动之中。静止在地面上的物体，如房屋、树木、桥梁等，似乎是不动的，但地球既有自转，又绕太阳公转，因此地面上的物体也在运动。从整个银河系来看，太阳也是运动的。银河

系相对其它星系或星云来看，也都在运动着。因此，要研究一个物体的运动状态，必须选择另一个也在运动的物体作参考，这个参考的物体称为**参照系**(reference system)。同一个物体，在不同的参照系里，运动状态是不一样的。例如，一个人坐在公共汽车里，当汽车在公路上行驶时，若以地面为参照系，这个人的位置在不断变化；若以汽车为参照系，则这个人是静止的。这种同一物体对于不同的参照系，运动状态不同的性质，称为运动描述的相对性。因此，要研究任何物体的运动，首先要确定其参照系。

在参照系选取后，为了定量地描述物体的机械运动，还需要在参照系上选定一个适当的坐标系。最常用的坐标系是直角坐标系，这种坐标系是在参照系中选一固定点 O ，作

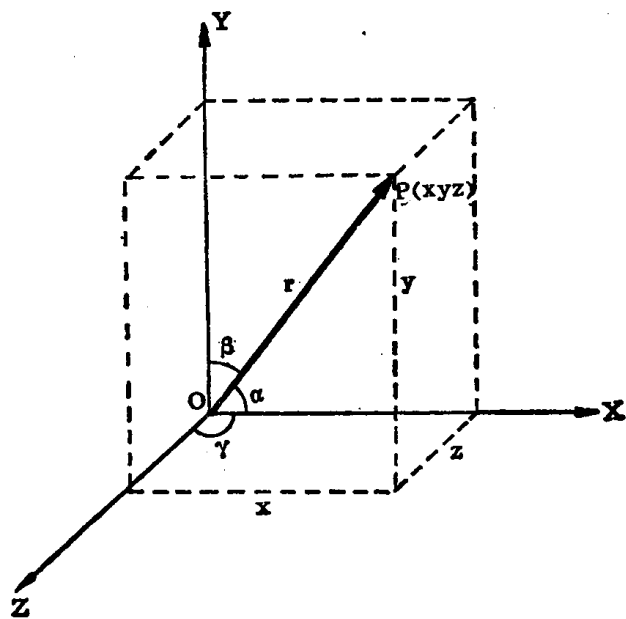


图1-1 位置矢量

为坐标的原点，经过这一点作三条互相垂直的X轴、Y轴和Z轴。物体在直角坐标系P点的位置，用x,y,z三个坐标来确定，或者用从原点O到P点的线段OP来表示，如图1—1所示。线段OP不仅有大小，而且有一定的指向（从O点指向P点）。除了数值还有方向的量称为**矢量**（vector）。我们用具有箭头的线段表示矢量，箭头指出矢量的方向，在选定的比例尺下，线段的长度表示矢量的数值。矢量通常用黑体字母如A、B、C等表示。矢量的数值叫做矢量的模，用普通字母如A、B、C等表示。图1—1中有向线段OP是矢量，叫做**位置矢量**，或称**矢径**（radius vector），用r表示。相应地，坐标x, y, z便是矢径r沿坐标轴的三个分量，矢径的模为

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

矢径的方向余弦为

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

$$(1-2)$$

式中 α 、 β 、 γ 分别是r和X Y Z轴的夹角，所以r实际代表x, y, z三个标量，亦即P点的位置由三个独立的量所确定。质点的机械运动是质点的位置随时间而变化的过程，这时质点的坐标x,y,z和矢径r都是时间t的函数。

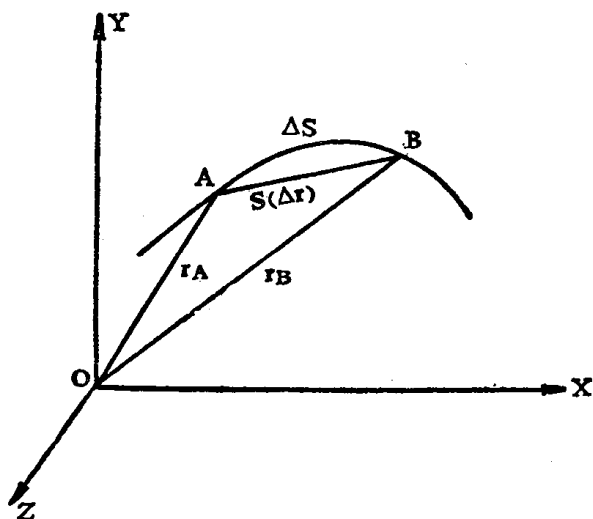


图1—2 曲线运动中的位移

在图1—2中，设曲线 $\widehat{AB}$ 是质点运动轨道的一部分。在时刻t，质点在A点处，在时刻 $t + \Delta t$ ，质点到达B点处。A、B两点的位置分别用矢径 $\mathbf{r}_A$ 和 $\mathbf{r}_B$ 来表示。在时间 Δt 内，质点的位置变化可用从A到B的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示， $\overrightarrow{AB}$ 称为质点的**位移**（displacement）。位移除了表明B点与A点之间的距离外，还表明了B点相对于A点的方位。所以位移是矢量，常用S表示。

根据矢量的平行四边形加法定律，从图1—2中可以看出，位移S和矢径 $\mathbf{r}_A$ 、 $\mathbf{r}_B$ 之间的关系为

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{r}_A + \mathbf{S}$$

$$\text{或} \quad \mathbf{S} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = \Delta \mathbf{r} \quad (1-3)$$

上式说明，位移S等于矢径 $\mathbf{r}_B$ 和 $\mathbf{r}_A$ 的矢量差，而矢量差就是矢径r在 Δt 时间内的增量

必须注意，位移表示质点位置的改变，它只决定于质点最初和最终的位置，而与质点沿什么途径运动无关。从图1—2中可以看出，位移是有向线段 $\overrightarrow{AB}$ ，是一矢量，它的数值 $|\Delta \mathbf{r}|$ 就是割线AB的长度，而路程是一标量，它是曲线 $\widehat{AB}$ 的长度 ΔS 。 ΔS 和 $|\Delta \mathbf{r}|$ 并不相等，只有在时间 Δt 趋近于零时， ΔS 与 $|\Delta \mathbf{r}|$ 可视为相等。此外，即使在直线运动中，位移和路程也是两个不同的概念。例如，一质点沿直线从A点到B点又折回A点，显然路程等于A、B之间距离的两倍，而位移为零。

为了说明质点运动的快慢和方向，我们引入**速度**（velocity）这个概念。速度是位移的时间变化率。在图1—2中，若质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的相应时间为 Δt ，我们把它们的比值称为在这段时间 Δt 内的**平均速度**

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

平均速度也是矢量，它的方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。在描述质点运动时，我们也常采用**速率**（speed）这个物理量。我们把路程 ΔS 与时间 Δt 的比值 $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ 称为质点在时间 Δt 内的**平均**

速率。这就是说，平均速率是一标量，等于质点在单位时间内所通过的路程，而不考虑运动的方向。因此，不能把平均速度与平均速率等同起来。例如，在某一段时间内，质点环行了一个闭合路径，显然质点的位移等于零，所以平均速度也为零，而平均速率却不等于零。

设质点在 t 时刻位于A点处，在 $t + \Delta t$ 时刻位于B点如图1—2。由于质点在 Δt 的时间内，运动是不均匀的，所以平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 只能近似地描写质点在 Δt 时间内的运动。显然 Δt 越小，则求得的平均速度就越接近于在A点时的速度。在极限的情况下，也就是当 Δt 无限减小时， $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 趋近于一个极限，这个极限值就称为质点在A点处的**瞬时速度 $\mathbf{v}$** ，简称**速度**：

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

上式说明，速度等于矢径 $\mathbf{r}$ 对时间 t 的一阶导数。速度是矢量，速度的方向就是当 Δt 趋近于零时，位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向，也就是沿着轨道上质点所在处的切线方向。速度的单位为米·秒⁻¹。

速度既是矢径对时间的导数，而矢径 $\mathbf{r}$ 在直角坐标轴上的分量为 x, y, z ，所以速度

在直角坐标轴上的三个分量 v_x, v_y, v_z 分别是

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad v_y = \frac{dy}{dt} \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1-6)$$

速度的量值为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-7)$$

为了说明速度变化的快慢和方向，引入加速度的概念。**速度的时间变化率称为加速度(acceleration)**，如图1—3所示。一质点在时刻 t 位于A点，速度为 $\mathbf{v}_A$ ，在时刻 $t + \Delta t$ 位于B点，速度为 $\mathbf{v}_B$ 。在时间 Δt 内，质点速度的增量为

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A \quad (1-8)$$

与平均速度的定义类似，质点的平均加速度定义为

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

当 Δt 趋近于零时，平均加速度的极限就是质点在任一时刻 t （或任一位置）的**瞬时加速度**，简称**加速度**。

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

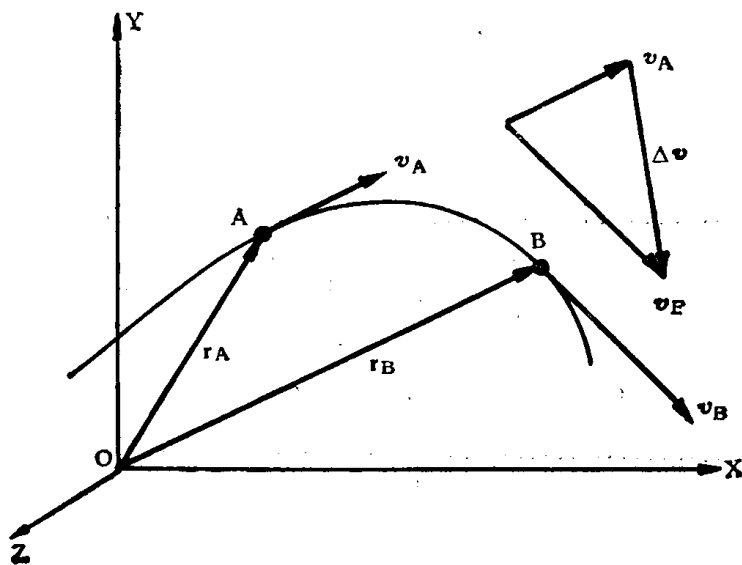


图1—3 速度的增量

$$= \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-9)$$

加速度 $\mathbf{a}$ 是矢量,其方向是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta \mathbf{v}$ 的极限方向。加速度等于速度对时间的一阶导数,或等于矢径对时间的二阶导数,单位为米·秒⁻²。在直角坐标系中,加速度的三个分量 a_x, a_y, a_z 分别为

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

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (1-10)$$

加速度的量值为

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-11)$$

很明显,如果加速度 $\mathbf{a}$ 的方向和速度 $\mathbf{v}$ 的方向一致时,加速的结果只能引起速度量值的改变,而不会引起速度方向的改变,此时质点作直线加速运动。只有当 $\mathbf{a}$ 的方向与 $\mathbf{v}$ 的方向不一致时,质点才作曲线运动。如果 $\mathbf{a}$ 的方向与 $\mathbf{v}$ 的方向互相垂直,那么质点运动的快慢(即 $\mathbf{v}$ 的量值)将不改变,而只有运动的方向改变。因此,我们可以把曲线运动在任何时刻的加速度 $\mathbf{a}$ 分解为沿速度 $\mathbf{v}$ 方向的切向加速度 a_t 和垂直于 $\mathbf{v}$ 方向的法向加速度 a_n ,如图1-4所示。 a_t 的作用是使 $\mathbf{v}$ 的量值发生改变; a_n 的作用是改变 $\mathbf{v}$ 的方向,也就是改变质点运动的方向。当 $a_n = 0$,而

$a_t \neq 0$ 时,质点作直线加速运动,当 $a_t = 0$,而 $a_n \neq 0$ 时,质点作等速率的曲线运动。

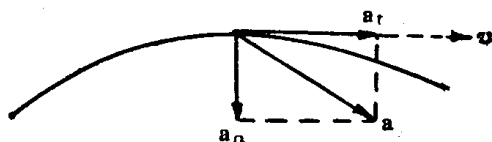


图1-4 切向加速度和法向加速度

第二节 惯性系与非惯性系

一、惯性系与非惯性系

在运动学中,研究任何物体的运动,首先要选取参照系。参照系如何选择,主要看问题的性质和研究是否方便。例如,研究物体对地面的运动时,选地球作参照系最为方便。如果研究在车厢内物体的运动时,则可选车厢为参照系。但在应用牛顿运动定律时,参照系就不能任意选取。例如,在一列以加速度 a_1 作直线运动的车厢里,有一个质量为 m 的小球,放在光滑的桌面上,如图1-5所示。如果选地面为参照系,地面的观察者得出的结论是:小球上的合外力等于零,小球相对地面保持静止状态,符合牛顿运动定律。如果取车厢为参照系,这个小球虽然所受合外力为零,但具有加速度 $-a_1$,即小球向车厢观察者加速运动。所以,对于车厢这个参照

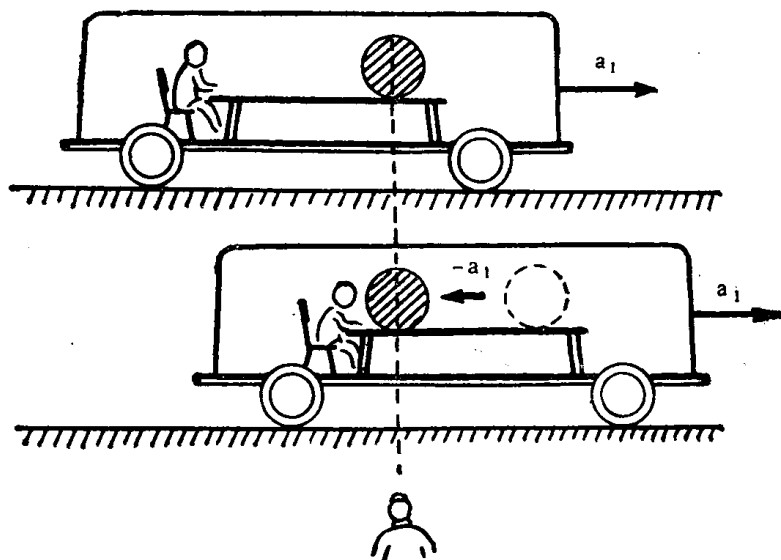


图1-5 加速运动的车厢中,牛顿运动定律不适用

系来说, 牛顿运动定律不成立。

凡是牛顿运动定律成立的参照系叫做惯性参照系, 简称惯性系(inertial system), 而牛顿运动定律不成立的参照系则叫做非惯性参照系, 简称非惯性系(non-inertial system)。要确定一个参照系是不是惯性系, 只能依靠观察和实验。天体运动的研究证明: 如果我们选择太阳为参照系, 以太阳中心为原点, 指向任一恒星的直线为坐标轴, 那么所观察到的无数天文现象, 都和牛顿运动定律及万有引力定律推出的结果相符合。因此, 在力学中通常把上述的参照系看作较好的近似惯性系。观察到的现象和已知理论还进一步证明: 所有相对于上述惯性系作匀速直线运动的参照系都是惯性系, 而相对于惯性系作变速运动的参照系就是非惯性系。

二、非惯性系中的力学定律 惯性力

在非惯性系中, 牛顿运动定律是不适用的, 但从实践得到, 只要我们在分析物体所受的作用力时, 加上一个假想的力, 则牛顿运动定律仍可应用。由于这个假想的力是由非惯性系引出来的, 故称为惯性力(inertial force)。

如图1—5, 在以加速度 a_1 作匀加速直线运动的车厢中, 假想质量为 m 的小球上有一大小等于 ma_1 、方向和 a_1 相反的力 $f = -ma_1$ 作用着, 那么小球的运动仍可以用牛顿运动定律来描述。这个假想作用在小球上的力 f 就是惯性力。

当把惯性力一并考虑时, 非惯性系中可借用牛顿运动方程的数学表示式, 即

$$F + \text{惯性力} = ma \quad (1-12)$$

式中 a 是物体相对于非惯性系的加速度, F 是由于相互作用物体所受到的合力。

【例1】 一质量为60千克的人, 站在升降机中的磅秤上。当升降机以 $2\text{米}\cdot\text{秒}^{-2}$ 匀加速上升时, 磅秤上的指示读数是多少?

【解】 升降机以匀加速度 a 上升, 从升

降机这一非惯性系来看, 人除了受到重力 G (方向向下)和磅秤对他的正压力 N (方向向上)之外, 还受到一个大小等于 ma , 方向与 a 相反的惯性力 $F_{\text{惯}}$ 。该人站在磅秤上, 由于他相对于升降机来说是静止的, 所以这三个力恰是“平衡”的, 即

$$N + G + F_{\text{惯}} = 0$$

$$\text{或 } N = |G + F_{\text{惯}}| = mg + ma = 60(9.8 + 2) = 708 \text{ 牛顿。}$$

磅秤的读数和 N 相等。

惯性力是为了在非惯性系中也能应用牛顿运动定律, 人为地增加的一个力。它与物体间的相互作用力不同。一切相互作用都有“施力者”, 而惯性力是没有“施力者”的。惯性力只能非惯性系中出现, 作用在相对于非惯性系运动的物体上。在惯性系中分析物体所受之力时, 切不要再加上一个惯性力。

三、惯性离心力 离心机

图1—6 是一个水平转台, 它以恒定的角速度 ω 转动。假想转台上坐有一人, 他手中持一质量为 m 的小球, 球与转轴的距离为 R 。

对于惯性参照系(比如地面参照系)而言, 为了使小球能与转台同时运动, 也就是说, 使小球以半径 R 作等速率圆周运动, 就

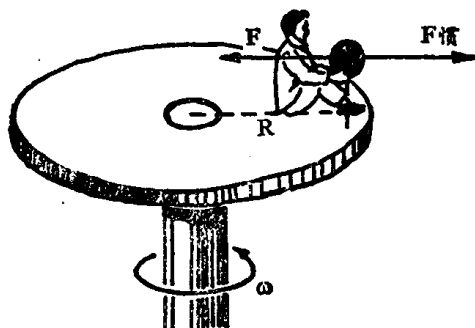


图1—6 惯性离心力

必须给小球以向心加速度 $a_n = \omega^2 R$, 即施一向心力 $F = m\omega^2 R$ 于小球上。坐在转台上的人必须不停地把小球拉向自己, 以使小球转弯。

如果没有 F 存在, 则小球将沿切线方向运动。

对于匀速转动的转台这一非惯性系而言, 小球除受到 F 的作用外, 还受到惯性力 $F_{\text{惯}}$ 的作用。由于小球对转台是相对静止的, 所以 $F_{\text{惯}}$ 和 F 两相平衡, 于是

$$F_{\text{惯}} = -F = -ma_n$$

这个非惯性系中作用着的惯性力, 它的方向是从转台的中心向外的, 叫做**惯性离心力**。

我们在日常生活中时常会遇到惯性力。例如当汽车突然制动, 或者以很大速度转弯时, 相对于汽车, 乘客就被抛向前方, 或被抛向外侧。这就是由于乘客保持着原来的速

度, 而车厢得到加速度。对于车厢这一非惯性系来说, 这种相对运动可以用惯性力来解释。

为了使液体中悬浮的微粒能够在较短的时间内分离出来, 在实验室中广泛使用各种离心机。最简单的离心机如图1—7(a)所示。两个金属筒 a 和 a_1 被装在轴 B 上的活动套环套住。被试液体放在金属筒中的玻璃管内。转动摇臂 P 使 B 轴转动, 达到一定转速后, 金属筒以及里面的玻璃管就几乎在水平面上运动, 如图1—7(b)所示。这样转动一定的时间以后, 试管中液体内的微粒就可以被分离出来。

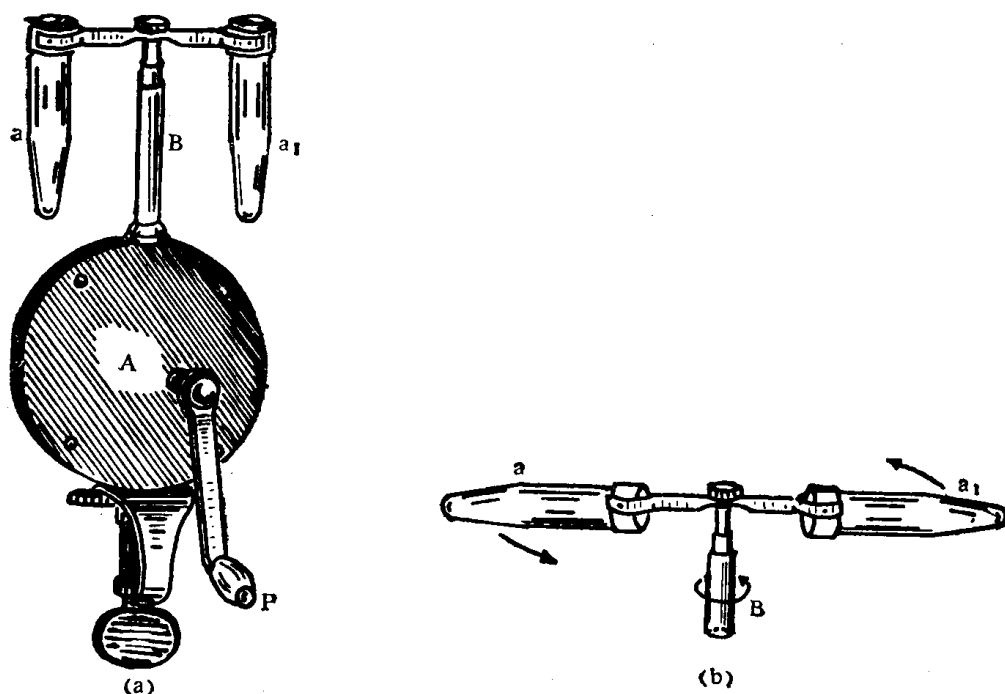


图1—7 离心机

显然, 对于这一转动的非惯性系中的微粒来说, 它因受惯性离心力的作用而移向管端。所受的惯性离心力越大, 移动的速度也就越快。

因为 $F_{\text{惯}} = m\omega^2 R = 4\pi^2 mn^2 R$

$$(1-13)$$

式中 n 是每秒的转数, m 是微粒的质量。每秒转数 n 越大, 微粒的质量 m 越大, 微粒所受的惯性离心力也越大, 因而微粒的“沉降”速度也就越快。因此, 过去常用每分钟的转数来

表示离心机的性能。但由式(1—13)可知, 对于一定质量的微粒来说, 其“沉降”速度不仅与离心机的转动快慢有关, 同时还和微粒与转动轴之间的距离 R 有关。因此, 目前都采用 $\omega^2 R$ 相当于若干 g (重力加速度)来表示离心机的性能, 称为 g 单位。例如, 一个每分钟3,000转的电动离心机, 在 $R=10$ 厘米处时

$$\begin{aligned} \omega^2 R &= \left(2\pi \times \frac{3,000}{60} \right)^2 \times 0.1 \\ &\approx 10^4 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-2} \end{aligned}$$