



中国科学院教材建设专家委员会规划教材

全国高等医药院校规划教材

供临床、预防、基础、护理、影像、检验、麻醉、中医学、
中西医结合、口腔、药学、法医等专业使用

医学物理学

李宾中 主编



科学出版社

www.sciencep.com

中国科学院教材建设专家委员会规划教材
全国高等医药院校规划教材

供临床、预防、基础、护理、影像、检验、麻醉、中医学、中西医结合、口腔、
药学、法医等专业使用

医学物理学

科学出版社

北京

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303(打假办)

内 容 简 介

本书是根据现代医学对物理学的基本要求,在参考国内外有关教材,并结合我们的教学实践经验,由五所院校合作共同编写而成的。在取材上紧密结合医学,把教材的先进性、科学性、实用性结合在一起。重点阐述物理学的基本理论和基本知识,强化现代物理思想、概念和方法,避免了部分繁琐的内容,深入浅出地介绍了部分现代物理学的新技术和方法。全书共19章,前14章为基本内容,后5章为医学物理专题内容。内容丰富,为医学生提供了大量的现代科技信息,有助于拓宽学生知识面,开拓学生思维。

本书可供医药类专业大学生作为教材,也可供自学者使用。

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学 / 李宾中主编. —北京:科学出版社,2010.5

(中国科学院教材建设专家委员会规划教材·全国高等医药院校规划教材)

ISBN 978-7-03-027314-7

I. 医… II. 李… III. 医学物理学-医学院校-教材 IV. R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 072944 号

策划编辑:邹梦娜 李国红 / 责任编辑:邹梦娜 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘 超 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年5月第一版 开本:850×1168 1/16

2010年5月第一次印刷 印张:23

印数:1—6 000

字数:687 000

定价:49.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

医学物理学是现代物理学与医学相结合所形成的交叉学科,是生命科学的基础学科之一。物理学的新理论、新技术、新方法为医学的基础研究和临床应用提供了有力的手段,并促进了医学的发展。

本书是根据现代医学对物理学的基本需求,在参考国内外有关教材,并结合我们的教学实践和教改经验,由五所院校共同编写而成的。本教材在取材上紧密结合医学,把教材的先进性、科学性、实用性结合在一起。重点阐述物理学的基本理论和基本知识,强化现代物理思想、概念和方法,避免了部分繁琐的内容,深入浅出地介绍了部分现代物理学的新技术和方法。本书结构上分为两个部分,前14章为基本内容,每章末附有阅读材料;后5章为医学物理专题内容。这种结构体例使教材具有较大弹性,既保证了基本内容的介绍,又不失现代科学成就的介绍,可供不同教学时数的教学需求。本书内容丰富,为医学生提供了大量的现代科技信息,有助于拓宽学生知识面,开拓学生思维,提高学生科学素质。

本书适合高等医药院校临床、预防、基础、护理、影像、检验、麻醉、中医学、中西医结合、口腔、药学、法医等专业使用,也可供医学院校其他专业、生命科学有关专业的师生和研究工作者作为参考用书。本书编写有配套教材《医学物理学实验教程》和《医学物理学学习指导与习题解答》,便于教学和学生自学。

在编写过程中,由于编者的知识和能力有限,加之脱稿仓促,教材中的错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2009年12月

目 录

前言

绪论	(1)
第 1 章 力学基础	(4)
第一节 运动的描述	(4)
第二节 牛顿运动定律	(6)
第三节 运动定理与守恒	(8)
第四节 刚体定轴转动的运动描述	(13)
第五节 刚体定轴转动的角动量 转动惯量	(14)
第六节 刚体定轴转动的转动定律	(16)
第七节 刚体定轴转动的角动量定理及角动量守恒定律	(17)
第八节 刚体定轴转动中的功能关系	(17)
第九节 进动	(19)
习题一	(20)
阅读材料	(21)
第 2 章 物体的弹性	(29)
第一节 应变和应力	(29)
第二节 弹性模量	(31)
第三节 弹性势能	(36)
第四节 弹性腔的力学问题	(37)
习题二	(38)
阅读材料	(39)
第 3 章 流体的运动	(43)
第一节 理想流体的流动	(43)
第二节 伯努利方程	(45)
第三节 黏性流体的流动	(49)
第四节 黏性流体的流动规律	(51)
习题三	(54)
阅读材料	(55)
第 4 章 振动、波动和声波	(61)
第一节 简谐振动	(61)
第二节 阻尼振动、受迫振动和共振	(64)
第三节 简谐振动的合成	(66)
第四节 简谐波	(69)
第五节 简谐波的波动方程	(71)
第六节 波的能量	(72)
第七节 惠更斯原理	(74)

第八节 波的干涉	(75)
第九节 声波	(78)
第十节 多普勒效应	(82)
第十一节 超声波	(84)
习题四	(86)
阅读材料	(88)
第5章 分子动理论	(93)
第一节 物质微观结构的基本概念	(93)
第二节 理想气体分子动理论	(94)
第三节 气体分子速率和能量的统计分布	(97)
第四节 气体内的输运过程	(101)
第五节 液体的表面现象	(103)
习题五	(110)
阅读材料	(111)
第6章 热力学基础	(114)
第一节 热力学第一定律	(114)
第二节 热力学第一定律的应用	(117)
第三节 循环过程 卡诺循环	(121)
第四节 热力学第二定律	(123)
第五节 熵与熵增加原理	(125)
习题六	(128)
阅读材料	(129)
第7章 静电场	(132)
第一节 电场和电场强度	(132)
第二节 高斯定理	(134)
第三节 电势和电势梯度	(139)
第四节 电偶极子与电偶层	(143)
第五节 静电场中的电介质	(145)
第六节 静电场的能量	(148)
习题七	(151)
阅读材料	(154)
第8章 直流电	(157)
第一节 电流密度	(157)
第二节 基尔霍夫定律	(161)
第三节 电容器的充电和放电	(163)
习题八	(165)
阅读材料	(167)
第9章 磁场	(169)
第一节 磁场 磁感应强度	(169)
第二节 磁场对运动电荷和电流的作用	(170)
第三节 电流的磁场	(173)
第四节 磁介质	(176)
第五节 电磁感应定律	(178)

第六节 电磁振荡和电磁波	(181)
习题九	(184)
阅读材料	(187)
第 10 章 波动光学	(190)
第一节 光的干涉	(190)
第二节 光的衍射	(195)
第三节 光的偏振	(200)
习题十	(206)
阅读材料	(207)
第 11 章 几何光学	(212)
第一节 球面折射	(212)
第二节 透镜	(215)
第三节 眼睛	(220)
第四节 几种医用光学仪器	(224)
习题十一	(228)
阅读材料	(229)
第 12 章 量子力学基础	(235)
第一节 热辐射	(235)
第二节 光的量子性	(239)
第三节 微观粒子的波动性	(243)
第四节 薛定谔方程	(246)
第五节 氢原子理论	(250)
第六节 原子壳层结构	(254)
第七节 原子光谱与分子光谱	(255)
习题十二	(258)
阅读材料	(260)
第 13 章 X 射线	(262)
第一节 X 射线的发生	(262)
第二节 X 射线的性质和 X 射线衍射	(265)
第三节 X 射线谱	(267)
第四节 物质对 X 射线的吸收规律	(270)
习题十三	(271)
阅读材料	(272)
第 14 章 原子核和放射性	(281)
第一节 原子核的基本性质	(281)
第二节 原子核的衰变	(285)
第三节 放射性核素的衰变规律	(289)
第四节 射线与物质的相互作用	(291)
第五节 辐射剂量	(296)
习题十四	(297)
阅读材料	(298)
第 15 章 生物热力学	(307)
第一节 人体代谢过程中的能量转换	(307)

第二节 生物系统热力学	(309)
习题十五	(311)
第 16 章 生物电现象	(312)
第一节 细胞膜电位及神经传导的电学原理	(312)
第二节 心电图的形成	(317)
习题十六	(321)
第 17 章 生物磁现象	(322)
第一节 磁场的生物效应	(322)
第二节 生物磁场	(325)
习题十七	(328)
第 18 章 激光及其医学应用	(329)
第一节 激光的基本原理	(329)
第二节 激光器	(332)
第三节 激光的特性	(335)
第四节 激光的医学应用	(337)
习题十八	(343)
第 19 章 磁共振成像	(344)
第一节 核磁共振的基本概念	(344)
第二节 核磁共振现象	(347)
第三节 磁共振成像的原理	(351)
第四节 MRI 的应用与发展	(355)
习题十九	(356)
参考文献	(357)

绪论

物理学是研究物质结构、物质相互作用和运动规律的一门自然科学,是自然科学中最重要、最基础学科之一。它对科学技术的发展起到至关重要的作用。现代物理学的原理、方法与技术的应用已经广泛深入到生产、生活、医疗等各个领域。下面,概括介绍一下物理学的研究对象、物理学与医学的关系、物理学的研究方法及其科学思维。

一、物理学的研究对象

物理学是探讨物质结构、相互作用和运动规律的学科,是自然科学的基础。它的研究对象十分广泛,包括宇观、宏观、微观世界。

空间尺度:从 10^{26} m(约 150 亿光年)的宇宙世界到 10^{-20} m 的夸克物质,相差 10^{46} 倍。

时间尺度:从 10^{18} s(150 亿年)的宇宙年龄到 10^{-27} s 的硬 γ 射线周期,相差 10^{45} 倍。

速率范围:从 0(静止的物体)到 3×10^8 m/s 的光速,相差 10^8 倍。

自然界中的客观存在都是物质,所有物质都处于运动之中,运动既是物质存在的形式,也是物质的固有属性。物质的运动形式多种多样,各种运动形式之间既有相互联系,又有本质区别;既服从普遍规律,又有各自独特的规律。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学科。

在自然科学中,物理学所研究的是物质运动所具有的最基本和最普遍的性质。物理学研究的运动包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子内部运动、场与物质的相互作用等。这些运动形式普遍存在于其他高级而复杂的物质运动之中。因此,物理学所研究的规律具有最基本、最普遍的意义,从而使物理学的知识和理论成为研究其他自然科学不可缺少的基础。

一切自然现象,包括生命的和无生命的在内都要受到能量守恒定律、万有引力定律、热力学定律以及其他物理学定律的约束。正是由于物理学所研究的物质运动形态和运动规律在各自适用的范围内有其普遍的适用性、统一性和简单性,随着现代科学技术的迅速发展和各门学科之间的相互渗透,形成了许多与物理学直接有关的新兴边缘学科(或前沿学科),如物理化学、生物物理学、生物物理化学、量子化学、生物物理遗传学、医学影像物理学、激光医学、量子生物学、生物医学工程学等。物理学的每一次重大发现和发明都极大地推动了其他自然科学的发展,促使科学技术和生产技术发生根本性的变革。

医学物理学是现代物理学与医学相结合所形成的交叉学科,它的基础知识,已成为研究医学所不可缺少的基础,并为医学提供物理依据。

二、物理学与医学的关系

医学是以人体为研究对象的生命科学。生命现象属于物质的高级而复杂的运动形式,并且有其自身的运动规律,在生命活动中包含着大量的物理现象和物理过程。在医学的发展进程中无时无刻不在运用着物理学的理论、方法和技术。物理学每一新进展无不对医学施以巨大影响,促使医学产生突破性的进步。例如,显微镜的发明和使用,使医学由解剖水平进入细胞水平;电子显微镜的出现,又使医学发展到亚细胞水平;而 X 射线衍射技术、波谱技术、电泳、色谱等又促使医学达到分子生物学水平。下面从两个方面简略介绍物理学与医学的关系:

1. 物理学知识是理解和揭示生命现象本质不可缺少的基础

物理学是除数学之外的一切其他自然科学和工程技术的基础,当然它也是医学的基础。例如,血液的循环流动涉及流体力学的知识;神经的兴奋传导、心脏的搏动需要应用力学知识和电学知识;视觉的形成及对视觉异常的矫正要运用光学知识;体温的调节,机体对能量的吸收、传递和利用离不开热学知识;要了解人体骨骼和关节受力情况,必须学习弹性力学和静力学的知识;要了解声音的感觉过程及超声在医学上的应用,必须知道声波的物理性质和传播规律;等。随着物理学的迅速发展和现代科学技术的日新月异,人类对生命现象的认识逐渐深入,生物学和医学已从宏观形态的研究进入微观领域的研究,从细胞、亚细胞水平的研究上升到分子水平的研究,并逐渐将其建立在精确的物理学基础之上。任何生命过程都和物理过程密切联系,进而揭示生命现象的本质。例如,能量交换、信息传递、生理过程的控制与调控、疾病的发生机制、物理因素对生物体的作用等,都要应用物理学的知识和理论加以解释或说明。物理学在生物学和医学领域中的应用日益广泛和深入,对阐明生命现象的本质作出了新的贡献。可以说,没有物理学这一基础理论,不具备一定的物理学知识,就难以认识、洞察生命现象的本质,医学研究也就无法步入更高层次。故而,无论是现代基础医学研究,还是临床医学实践无不把其自身建立在精确的现代物理学理论基础之上。

2. 物理学的新理论、新技术、新方法为生物学和医学的基础研究和临床应用开辟了许多新的方法和途径

物理学的新技术和新方法广泛应用于生物学和医学的基础研究和临床医疗实践。例如,心电、脑电、肌电的描记技术、光学显微镜、X线透视和照片、放射性同位素、光纤内镜等已广泛应用于医学领域;电子显微镜成为研究细胞超微结构的重要工具;计算机X线断层摄像术(X-CT)大大提高了图像的清晰度;磁共振成像(MRI)技术显著提高了成像的灵敏度和照片的清晰度,除了显示解剖学图像外,还能显示代谢过程和生化信息的图像;激光扫描共聚焦显微镜能拍摄到细胞内部瞬间变化的实时而真实的彩色图像,可达每秒120幅画面,为细胞生物学、分子生物学、生物化学、免疫学、遗传学、医学和神经生物学等研究领域提供了崭新的途径。超声波成像术应用于临床诊断,能方便、快捷、有效、无损伤地获得器官或组织的动态彩色图像以及相应的照片。还有数字减影血管造影技术(DSA)、单光子和正电子发射型断层成像(ECT)、放射免疫分析等。总之,物理学每一次新的理论发现和技术发展都会为医学研究和医疗实践提供新的理论基础和更先进、更方便、更精密的仪器和方法。与此同时,生物学和医学的不断向前发展,又给物理学提出了新的研究课题。两者相互促进、相互渗透、共同前进,不断揭示生命现象的本质。

由上可知,物理学的理论和方法是学习和研究医学的基础,它为现代医学提供了准确可靠的检测手段和先进的治疗方法,极大地促进了医学的发展。因此,在高等医药院校里开设物理学课程是十分必要的,其主要任务是向医学学生传授系统的物理学知识和理论,使医学学生进一步掌握物理学的基本概念、基本规律、基本方法和基本技能及其科学思维,为学习医学奠定必要的物理学基础。因此,正确认识物理学与医学的关系,端正学习物理学的态度,是学好物理学的关键。

三、物理学的研究方法及其科学思维

物理学理论非常完善,其技术应用也日渐广泛,已成为人类知识宝库中较为系统、成熟的学科之一。学习物理学的研究方法和科学思维,不仅有助于学生对物理学和其他学科的学习和能

力的培养,而且可以启发学生积极思维,激发学生的探索和创新意识,培养学生的创新精神和科学态度。

自然科学的基本任务是认识物质的属性、研究物质运动的规律,其研究方法是“实践—理论—实践”的认识论。物理学研究方法主要有:演绎法、归纳法、定性和半定量方法。具体地讲,物理学在研究物质运动规律时,一般都要采用如下的研究方法和认识过程:首先在不改变自然条件的情况下对某一自然现象加以认真、仔细的观察,再人为地创造条件使所研究的自然现象在人工控制下加以重现,即为实验。根据实验结果,对实验数据进行分析、归纳进而提出假说,即假定该自然现象中的某些物理量之间存在着一定的数量关系,遵循着某一发展变化规律,然后再把假说返回实践加以验证,用以证明假说的正确性,并对错误部分进行修改、完善,最终提出正确的物理定律和理论。所以,物理学的基本研究方法包括现象观察、实验演绎、提出推论或假设、综合分析、归纳总结、建立基本理论(定理、定律、原理)等各个方面。简单地讲,物理学研究方法也就是理论联系实践的科学方法。

大量事实表明,物理思想与方法不仅对物理学本身有价值,而且对整个自然科学,乃至社会科学的发展都有着重要的贡献。有人统计过,自20世纪中叶以来,在诺贝尔化学奖、生理学及医学奖,甚至经济学奖的获奖者中,有很多人具有物理学的背景;这意味着他们从物理学中汲取了智能,转而在非物理领域里获得了成功。反过来,却从未发现有非物理专业出身的科学家问鼎诺贝尔物理学奖的事例。这就是物理学科学思维价值所在。物理学知识的高度科学性、逻辑性、系统性和准确性常常以数学形式描述,使物理学处于现代科学知识的领先地位。在现代自然科学体系中,物理学形成的科学风格、提供的科学准则,就是人们特别重视物理学的研究方法和科学思维的原因。

(李宾中)

第 1 章 力学基础

运动是物质世界基本的存在方式。机械运动(mechanical motion)是最基本的运动形式,是其他运动的基础。

第一节 运动的描述

在经典物理中,空间是均匀、各向同性的,时间是均匀、单向流逝的,空间和时间在各自独立的变化。机械运动是指宏观物体的空间位置随时间发生改变。任何物体的运动都是在时间空间中进行的。对运动的描述,也是用时间空间变量来表示。自然界中运动是绝对的,而对运动的描述是相对的。描述物体运动时选作标准的物体称为参考系(reference frame)。参考系的选择是任意的。不同的参考系,对研究对象运动的描述是不同的。在选定参考系中,建立适当的时空坐标系(coordinate system),质点运动的描述便可以准确定量。

研究物体运动的一个理想化模型是质点。质点(particle)是指其大小和形状均可以忽略的有质量的点。

一、位置矢量和位移

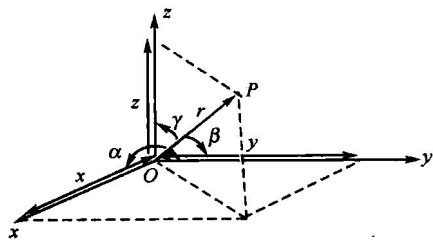


图 1-1 质点位置矢量

为描述质点在 t 时刻的空间位置,首先应在参考系中建立适当的坐标系。在如图 1-1 的直角坐标系中,从坐标系原点 O 到 t 时刻质点位置 P 引出的矢量 r ,称为 P 点的位置矢量(position vector),简称位矢或径矢。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-1)$$

质点的位置可以表示为

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-2)$$

式中: $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 x, y, z 轴向单位矢量。位矢 r 的大

小为

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-3)$$

r 与 x, y, z 三个坐标轴的夹角称为方位角,如图 1-1 中的 α, β, γ ,故 r 的方向可由方位角的余弦(方向余弦)来确定

$$\cos\alpha = \frac{x}{|\mathbf{r}|}, \cos\beta = \frac{y}{|\mathbf{r}|}, \cos\gamma = \frac{z}{|\mathbf{r}|} \quad (1-4)$$

当质点在一段时间内,位置的改变称为位移(displacement)。如图 1-2 所示,在时刻 t_1 ,质点的位矢为 r_A ;在时刻 t_2 ,质点的位矢为 r_B 。于是,质点位移由矢量 Δr 来表示,有

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1-5)$$

Δr 称为位移。它是位矢 r 的增量。 Δr 与参考点 O 的选择无关。

位移不代表质点在该段时间内的实际路程,因此位移

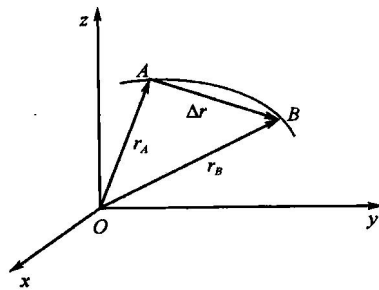


图 1-2 质点的位移

和路程是两个完全不同的概念。

二、速度和速率

若质点在 Δt 时间内,完成了位移 $\Delta \boldsymbol{r}$,那么为了说明质点位置改变的快慢和方向,需考查质点的位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 与经过的时间 Δt 的比值 $\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$ 。定义质点的位矢在 Δt 时间内的平均变化率为平均速度 $\bar{\boldsymbol{v}}$,即

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \quad (1-6)$$

平均速度是矢量,其方向与位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 方向一致。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,得到瞬时速度,简称速度(velocity),表示为

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \quad (1-7)$$

速度 \boldsymbol{v} 是位矢 \boldsymbol{r} 的时间变化率,是既有大小又有方向的矢量,即速度 \boldsymbol{v} 等于位矢 \boldsymbol{r} 对时间的一阶导数;速度的方向为 $\Delta t \rightarrow 0$ 时位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向,即沿运动轨道的切线方向指向运动的前方,如图 1-3 所示。

在直角坐标系中,质点的速度 \boldsymbol{v} 可以表示为

$$\boldsymbol{v} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k} \quad (1-8)$$

即

$$\boldsymbol{v} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \quad (1-9)$$

速度的大小为

$$|\boldsymbol{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-10)$$

在国际单位制(SI)中,速度的单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

常用速率(speed)描述质点运动的快慢,速率为一个标量,定义为单位时间内质点所经历的路程

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1-11)$$

速率 v 等于路程 s 对时间的一阶导数。在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的情况下,路程 Δs 的元路程 $ds = |d\boldsymbol{r}|$,于是速率为速度的大小,即

$$v = |\boldsymbol{v}| = \frac{ds}{dt} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

三、加速度

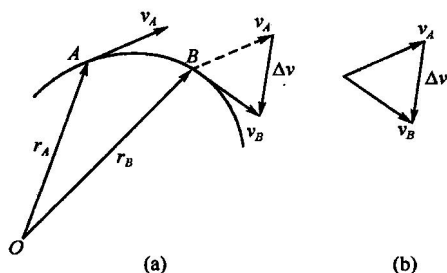


图 1-4 质点的速度的改变

质点做曲线运动的过程中,速度的大小和方向随时间在改变,速度的变化情况用加速度(acceleration)表示。如图 1-4 所示,时刻 t ,质点在 A 处,其速度为 \boldsymbol{v}_A ;时刻 $t + \Delta t$,质点运动到 B 处,其速度为 \boldsymbol{v}_B ,速度矢量的变化为 $\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A$ 。那么,质点在时间间隔 Δt 内,速度的平均变化率为平均加速度,即

$$\boldsymbol{a} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \quad (1-12)$$

在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均加速度的极限为质点在时刻 t 或某位置的瞬时加速度,描述质点在任意时刻(或位置)的速度变化率,等于速度 \boldsymbol{v} 对时间的一阶导数:

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} \quad (1-13)$$

或等于位矢 \boldsymbol{r} 对时间的二阶导数:

$$\boldsymbol{a} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1-14)$$

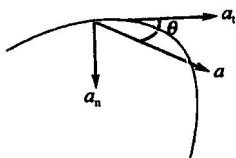


图 1-5 切向加速度和法向加速度

质点曲线运动时,如图 1-5 所示,加速度以法向加速度和切向加速度表示为

$$\boldsymbol{a} = \frac{dv}{dt}\boldsymbol{e}_t + \frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{e}_n = a_t\boldsymbol{e}_t + a_n\boldsymbol{e}_n \quad (1-15)$$

a_t 的大小为速率随时间的变化率,方向沿轨迹切向,反映速度大小的变化; a_n 的方向沿法向,反映速度方向的变化, ρ 为曲线所在处的曲率半径,质点圆周运动时, ρ 即半径 R 。则加速度的大小为

$$a = |\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} \quad (1-16)$$

$$\tan\theta = \frac{a_n}{a_t} \quad (1-17)$$

θ 表示加速度与速度(轨道切线方向)的夹角。

第二节 牛顿运动定律

一、牛顿运动定律

在日常生活物体之间存在各种不同的作用。力作用的效果表现在改变物体的运动状态或物体的形状。牛顿继承和发扬了伽利略的思想,总结出了牛顿运动定律。

1. 牛顿第一定律

第一定律又称为惯性定律,其表述为:任何物体都将保持静止或匀速直线运动的状态,除非作用在它上面的力迫使它改变这种状态。

牛顿第一定律揭示了物体的固有性质——惯性,同时定义了物体的惯性运动状态和惯性参考系(inertial system),提出了力的概念,力即为物体与物体之间的相互作用,其效果是改变受力物体的运动状态。

2. 牛顿第二定律

牛顿第二定律的表述为:物体受到外力作用时,物体运动的变化与合外力的大小成正比,与物体的质量成反比,运动改变发生在合外力的方向。

定律中表述的“运动”定义为质点的动量(momentum),表示为 $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$,作为物体的运动量的一种量度。于是牛顿第二定律表示为

$$\boldsymbol{F} = \frac{d(m\boldsymbol{v})}{dt} \quad (1-18)$$

在经典力学中,质量是一个不变的量,有

$$\boldsymbol{F} = m \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = m\boldsymbol{a} \quad (1-19)$$

牛顿第二定律说明力的效果是产生加速度,物体获得的加速度与其所受外力成正比,物体

获得的加速度与其质量成反比。牛顿第二定律方程所给出的关系是某一时刻物体受力与加速度之间的瞬时关系。

在国际单位制(SI)中,力的单位为牛,符号为 N, $1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

3. 牛顿第三定律

牛顿第三定律的表述为:两物体之间的作用力 F_1 和反作用力 F_2 ,彼此方向相反且大小相等。

$$F_1 = -F_2 \quad (1-20)$$

二力是分别作用于两物体上的同种性质的力,同时存在、同时消失,没有主次之分。牛顿第三定律也是实验总结概括出来的,受到实践范围的限制。

在一切惯性系中,牛顿定律都成立,具有相同的形式。牛顿运动定律是质点在惯性参照系中的力学规律。

力学的研究系统往往是由具有相互作用的若干质点组成的系统,简称为质点系。质点系内各质点间的相互作用力称为内力,质点系以外其他物体对质点系中任一质点的作用力,称为外力。内力满足牛顿第三定律,它是施加在一对质点上的作用力与反作用力, $F_{ij}^{\text{内}} + F_{ji}^{\text{内}} = 0$,系统内力的矢量和总是为零。

二、单位制与量纲

物理学是实验科学,所以对物理量必须进行测量。测量需要一个同类的量作为标准,该标准的量就称为单位。物理学量分基本量和导出量两类。

1. 单位制 国际单位制

单位改变时,联系各物理量的方程式也会改变,基本量的单位称为基本单位。导出量的单位由该物理量与基本量之间的关系导出,称为导出单位。如长度以 m 为单位,时间以 s 为单位时,速度的单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,密度的单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (千克·米⁻³)。

1960年,第11届国际计量大会通过了国际单位制(international system units, SI)为国际标准。国际单位制(SI)有七个基本量:长度、质量、时间、电流强度、热力学温度、物质的量、发光强度。规定基本单位分别为:m(米)、kg(千克)、s(秒)、A(安培)、K(开尔文)、mol(摩尔)、cd(坎德拉)。

国际单位制中,平面角的单位 rad(弧度)和立体角的单位 sr(球面度)为辅助单位,可参与构成导出单位(如角速度的单位为 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)。

2. 时间、长度的计量基准

1967年,第13届国际计量大会决定用铯原子钟作为时间计量基准,定义 1s(秒)等于铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射周期的 9192631770 倍。

1983年,第17届国际计量大会通过,定义 1m(米)是光在真空中 $(1/299792458)\text{s}$ 的时间间隔内传播的长度。

1889年,第1届国际计量大会决定,1kg(千克)质量的实物标准是保存在法国国际计量局中的一个直径为 39mm 的铂铱合金圆柱体,称为国际千克原器。

3. 量纲式

导出单位与基本单位的关系式称为该导出量的量纲式。如在 SI 中,力学基本量为长度、质

量和时间,以 L、M、T 表示它们的量纲,则可以对每个力学量[Q]写出其量纲式

$$[Q]=L^\alpha M^\beta T^\gamma$$

式中: α 、 β 、 γ 称为量纲指数, $L^\alpha M^\beta T^\gamma$ 称为物理量 Q 的量纲 $\dim Q$,记作[Q]。例如速度[v]= LT^{-1} ,加速度[a]= LT^{-2} ,密度[ρ]= $L^{-3}M$,力[F]= LMT^{-2} 等等。

量纲式可定性地反映物理量与基本量之间的关系。物理学中常根据量纲作定性分析。

第三节 运动定理与守恒

一、冲量 动量定理

牛顿定律表明,力可以使受力物体获得加速度,这是一种瞬时关系。实际上力对物体的作用总要持续一段时间,因而有必要研究力对物体持续作用的时间积累效应。本节主要讨论质点发生的动量变化与力的时间累积——冲量的关系。

1. 力的时间积累效应——冲量

力的冲量(impulse)的概念是与动量密切相关的。质点受合外力 $F(t)$ 的作用,经过 dt 时间,定义作用于质点的元冲量为

$$dI=F(t)dt \quad (1-21)$$

dI 表示力 $F(t)$ 在 dt 时间内的积累量。力的作用要积累一定的时间才会产生冲量。只有当 F 的方向恒定不变时, I 才与 F 同方向。在 t_1 到 t_2 的有限时间内,质点受到的合外力的冲量为

$$I=\int_{t_1}^{t_2} F(t)dt \quad (1-22)$$

或作用于质点的合力的冲量 I 等于作用于质点的各个力 $F_i(t)$ 的冲量 I_i 的矢量和。

2. 质点的动量定理

根据牛顿第二定律有 $F(t)dt=d(mv)$,于是

$$dI=d(mv)=dP \quad (1-23)$$

经历一段时间间隔 $\Delta t=t_2-t_1$, $F(t)$ 作用于物体的冲量等于物体在该时间内的动量改变,即

$$I=\int_{t_1}^{t_2} F(t)dt=\int_{P_1}^{P_2} dP=P_2-P_1 \quad (1-24)$$

式中: P_1 是物体在 t_1 时刻的动量, P_2 是 t_2 时刻的动量,此式为动量定理。它表明质点运动过程中所受合外力的冲量,等于该质点动量的增量。

冲量和动量都是矢量,动量定理具有矢量性。对各坐标分量式仍然成立,表明物体沿某方向的动量改变,取决于该方向上所受外力的冲量。

在诸如质点的碰撞和被冲击等过程中,质点受到的作用力往往非常复杂,不易测量,通常引入平均冲力 \bar{F} 。利用动量定律,可通过测量质点的动量变化,估算相互作用过程中质点受到的平均冲力 \bar{F} ,为

$$\bar{F}=\frac{\int_{t_1}^{t_2} F(t)dt}{t_2-t_1}=\frac{P_2-P_1}{t_2-t_1} \quad (1-25)$$

质点系的动量可表示为

$$P=\sum_i m_i v_i \quad (1-26)$$

由于质点系的内力为零,从式(1-23)可知,质点系的动量定理的微分形式为

$$d\mathbf{P} = \mathbf{F} dt \quad (1-27)$$

表明质点系所受合外力 $\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i$ 在 dt 时间内的元冲量等于质点系总动量的元增量。在 dt 时间内, 质点系总动量的变化是各个质点动量变化的矢量和, 即 $d\mathbf{P} = \sum_i d(m_i \mathbf{v}_i)$ 。

对于 $t \rightarrow t'$ 的一段有限的时间过程, 有

$$\mathbf{P} - \mathbf{P}_0 = \mathbf{I} \quad (1-28)$$

上式为质点系动量定理的积分形式, 式中 $\mathbf{P}_0 = \sum_i m_i \mathbf{v}_{i0}$ 、 $\mathbf{P} = \sum_i m_i \mathbf{v}_i$ 分别为质点系初、末状态的动量, \mathbf{v}_{i0} 、 \mathbf{v}_i 分别为第 i 个质点的初、末速度, \mathbf{I} 为合外力在 $t \rightarrow t'$ 时间内对质点系的总冲量, 等于在相同时间内各外力冲量的矢量和, 即 $\mathbf{I} = \sum_i \mathbf{I}_i$, 表明在一段时间内, 质点系总动量的增量等于质点系所受外力的总冲量。

当合外力为零时, 质点系动量守恒, 即

$$\sum_i m_i \mathbf{v}_i = \text{恒量} \quad (1-29)$$

自然界中不受外力作用的系统常称为孤立系统, 孤立系统总动量守恒。若质点系在某方向不受外力, 或合外力在某一方向上的分量为零, 则沿该方向动量守恒。

二、功 功率 动能定理 势能

1. 功、功率

力 \mathbf{F} 作用下质点在经过 $d\mathbf{r}$ 元位移的过程中, 力所做的功(work)为 $dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$, 称为力作用于质点的元功, 它是力 \mathbf{F} 与元位移 $d\mathbf{r}$ 的标积:

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F |d\mathbf{r}| \cos\theta \quad (1-30)$$

式中, θ 为力 \mathbf{F} 和元位移 $d\mathbf{r}$ 之间的夹角。功是标量, 有正负之分。当 $\theta = \pi/2$ 时, $dA = 0$, 力 \mathbf{F} 对质点不做功。

元功 $dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ 为力 \mathbf{F} 在质点空间位移 $d\mathbf{r}$ 上的积累量。对于一段有限的运动路径, 力 \mathbf{F} 所做的功为该路径上各段元功的和, 表示为

$$A = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \quad (1-31)$$

式中: a 是路径的起点, b 是路径的终点。功是一个过程量, 其值与质点沿一定的具体路径相关。始末点相同而路径不同, 同样的作用力对质点做的功不一定相同。由于质点的位移与参考系有关, 则功依赖于参考系的选取, 不同的参考系对功的描述是不同的。

在国际单位制(SI)中, 功的单位为焦耳, 符号为 J, $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ 。

功对时间的变化率称为瞬时功率, 简称功率(power), 表示为

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \quad (1-32)$$

它等于力与速度的标积, 是力对质点在单位时间中所做的功, 表明了做功的快慢, 功率越大, 做同样的功所花费的时间越少, 做功的效率越高。在国际单位制(SI)中, 功率的单位是瓦特, 符号为 W, $1\text{W} = 1\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2. 动能定理

力 \mathbf{F} 在质点运动过程的某元位移 $d\mathbf{r}$ 段所做的元功为 $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$, 根据牛顿第二定律, 有

$$\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \cdot d\mathbf{r} = m \frac{d\mathbf{r}}{dt} \cdot d\mathbf{v} = m \mathbf{v} \cdot d\mathbf{v}$$

