

大学物理教程

DAXUE WULI JIAOCHENG

韩志嵘 薄茂林 王 超 / 主编



大学物理教程

DAXUE WULI JIAOCHENG

韩志嵘 薄茂林 王 超 / 主编



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理教程 / 韩志嵘, 薄茂林, 王超主编. — 成

都: 电子科技大学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-5647-5919-3

I. ①大… II. ①韩…②薄…③王… III. ①物理学
—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 053540 号

大学物理教程

韩志嵘 薄茂林 王 超 主编

策划编辑 罗 雅

责任编辑 唐祖琴

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编: 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 成都市火炬印务有限公司

成品尺寸 185mm×260mm

印 张 12

字 数 308 千字

版 次 2018 年 3 月第一版

印 次 2018 年 3 月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5919-3

定 价 38.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

物理学是研究物质基本结构、物质之间相互作用、物质最基本和最普遍的运动形式及其相互转化规律的学科。物理学的基本原理渗透在物质世界的方方面面,渗透在自然科学的所有学科,应用于工程技术的各个领域。可以说,物理学是其他自然科学的基础。学习物理的过程是培养学生实用技能的过程,能够为大学生更好地学习其他学科知识打下坚实的基础,有助于培养大学生的逻辑思维能力,逐渐形成科学态度和科学精神。因此,大学物理的教学目标是对学生进行素质教育,提高学生分析问题和解决问题的能力,提升学生的科技创新能力,成为创新型人才。

近年来,为了提高学生的科技创新能力,大学物理课程教学进行了不断地改革。为了更好地适应教学改革的需要,也更好地为后续课程服务。因此,在教材内容的安排上,对教学内容进行了合理的修改以适应不同专业学生的需要,同时结合教学的实际,调整和完善物理学的知识体系。所以我们不仅要循序渐进地学习和掌握物理学的基本知识,而且还应该关心和了解物理学的前沿和进展。本教材具有体系完整、简明扼要,难度适中、课程设置较少的特点,力求贯彻理论联系实际的原则,培养学生的科学思辨能力和解决实际问题的能力。

虽然我们力求广泛地听取各种意见和建议,尽量采取正确新颖的方式来阐述有关知识点和知识点之间的关系,但是可以预料书中一定还存在许多缺点和错误,教学内容和表述方式也有待教学实践过程的反馈意见才能不断完善。我们真诚地希望能够得到读者慷慨的批评和指正。

目 录

第一篇 力 学

第1章 质点运动学	(3)
1.1 时间与空间	(3)
1.2 质点和参考系	(7)
1.3 位置矢量和运动方程	(8)
1.4 速度 加速度	(10)
1.5 自然坐标系 切向加速度和法向加速度	(12)
1.6 质点的平面曲线运动	(16)
1.7 相对运动	(21)
第2章 质点动力学	(23)
2.1 生活中常见的力和基本自然力	(23)
2.2 牛顿运动定律	(27)
2.3 物理量的单位和量纲	(30)
2.4 牛顿运动定律的应用	(31)
2.5 伽利略相对性原理 非惯性参考系	(33)
2.6 惯性力	(35)
第3章 刚体力学	(37)
3.1 刚体运动学	(37)
3.2 刚体的定轴转动	(38)
3.3 刚体定轴转动中的功和能	(40)
3.4 角动量 角动量守恒定律	(42)
3.5 回转运动	(47)

第二篇 电磁学

第4章 静 电 场	(53)
4.1 静电场 电场强度	(53)
4.2 静电场中的高斯定理	(56)
4.3 电势及其与电场强度的关系	(62)
4.4 静电场中的导体	(68)
4.5 电容和电容器	(71)
4.6 静电场中的电介质	(75)
4.7 静电场的能量	(78)

第 5 章 恒定磁场	(80)
5.1 恒定电流条件和导电规律	(80)
5.2 磁场和磁感应强度	(87)
5.3 毕奥—萨伐尔定律	(90)
5.4 磁场的高斯定理 安培环路定理	(94)
5.5 磁场对电流的作用	(97)
5.6 带电粒子在磁场中的运动	(100)
5.7 磁介质的磁化	(106)
5.8 铁磁性	(108)
第 6 章 电磁感应与电磁场	(110)
6.1 电磁感应定律	(110)
6.2 动生电动势和感生电动势	(113)
6.3 自感和互感	(115)
6.4 RL 电路	(117)
6.5 磁场的能量	(119)
6.6 位移电流 麦克斯韦方程组积分形式	(120)

第三篇 热 学

第 7 章 气体动理论	(125)
7.1 气体动理论的基本概念	(125)
7.2 气体分子的统计规律	(129)
7.3 气体分子的平均自由程	(135)
7.4 麦克斯韦速率分布律	(137)
7.5 气体分子的平均自由程	(139)
7.6 气体内的输运过程	(141)
第 8 章 热力学基础	(148)
8.1 热力学第一定律	(148)
8.2 理想气体的典型热力学过程	(153)
8.3 卡诺循环	(157)
8.4 热力学第二定律	(158)
8.5 熵的微观实质与统计学意义	(161)
8.6 熵增加原理	(164)

第四篇 近代物理专题

第 9 章 激光 半导体 超导电性	(169)
9.1 激光	(169)
9.2 半导体	(174)
9.3 超导电性	(181)
参考文献	(185)

第一篇 力学

力学是研究物质机械运动规律的一门学科。机械运动是描述物体的位置变化和形状变化(简称位变与形变)。根据此定义可知:在日常生活和工作中碰到的很多物体的形式都是机械运动,其运动规律就是力学的内容。大学物理中只研究物体位置变化的规律,而不对物体形变规律进行研究。

与其他科学研究一样,力学对机械运动规律的研究也划分为两个阶段:对机械运动的描述和得到机械运动的本质规律。根据阶段的不同,力学又可划分为运动学和动力学。其中,运动学是研究如何描述物体的运动,告诉人们物体是怎样运动的;而动力学是关于运动本质规律的学问,告诉人们物体为什么是这样运动的。

而根据对物体(研究对象)所做的理想模型(质点和刚体)的不同可将力学划分为:质点运动学、质点动力学以及刚体绕固定轴的转动。

第 1 章 质点运动学

1.1 时间与空间

时空概念起源于运动,宇宙万物无不在运动变化中,我们的先辈们正是在对自然现象和天体运动的观察和感悟中,逐步形成了时间和空间的概念。随时间在空间变化的现象都被称为运动,常言道:日月如梭、光阴似箭、斗转星移、一晃五十年、如白驹过隙等。由此可见,与运动图像相比,空间概念较为抽象,而时间概念就更抽象了。人们通常用具体形象的运动空间来形容时间。一旦形成了时空概念,时间与空间便超脱于运动,而成为两个独立的物理量,用来描述物体的运动。将人们对运动的认识从最初直观的、唯象的水平,提高到定量的、可分析的、清晰的境界。若用简练的语言定义时间和空间,则可以表述为:时间与空间表示事物之间的次序。其中,时间描述事物之间的先后顺序;而空间描述物体的位形,表示物体分布的顺序。

研究物体的位置随时间的变化,离不开长度和时间的度量及其公认的单位 and 标准。时间量度装置大多利用某种自然现象中的一致性和重复性,如脉搏、太阳的运行、季节、时钟、放射性源、晶体的振荡器等。人们不断追求这种测量最高程度上的一致性和重复性的最终结果就得到长度和时间计量的公认标准。

1.1.1 时间的计量

采用能够重复的周期现象计量时间。古代,人们通过日圭(日晷)观测日影的变化,或用“刻漏”中水位的变化来计量时间。随着科技的进步,近代科学家发明了摆钟及石英振荡器,利用摆钟或石英晶体的振荡周期进行计时。但上述计时方式受环境、温度、材质、电磁场甚至观测者观测角度的影响,稳定度不高,需由天体(地球自转、公转,月球公转)周期进行校正。

物理学中,时间是通过物理过程来定义的,首先在一个参考系(要求是惯性系,或者是非惯性系,但过程发生的空间范围无穷小)中,取定一个物理过程,设其为时间单位,然后将这个过程和其他过程相比较,以测定时间。例如,月球绕地球周期、地球绕太阳周期、地球自转周期、原子振荡周期等。时间的基本单位是秒(s)。

1960 年以前,国际计量大会(CGPM)以地球自转为基础,定义平均太阳日的 $1/86400$ 为 1 秒,其稳定度在 $1/10000000$ 左右,但由于地球自转受潮汐摩擦等因素的影响而变慢。又于 1960 年选择地球公转计时,规定公元 1900 年回归年的 $1/31556925.9747$ 为 1 秒,其稳定度约为一亿分之一。

20 世纪中叶,随着量子力学的发展,出现了光谱超精细结构、光磁共振、分子束磁共振等实验及研究,量子频率标准取代以天体运动为标准的天体时而成为计时标准。1967 年,第十三届国际计量大会决定采用铯原子钟作为新的时间计量基准,定义 1 秒为位于海平面上的铯 133 原子(Cs^{133})基态的两个超精细能级之间在零磁场中跃迁所对应的 9192631770 个辐射周期所持续的时间,此秒定义一直使用至今。铯原子钟的精度由 1955 年的 10^{-9}s 提高到 1975 年的 10^{-10}s ,现在已达到 10^{-14}s 。

1.1.2 长度的计量

空间两点间的距离为长度,任何长度的计量都是通过与某一长度基准的比较而进行的。长度的米制标准是 18 世纪后叶由法国引入的。1790 年,法国人大特兰提出以经过巴黎的地球子午线自北极至赤道这一段弧长的 $1/10000000$ 为 1 米(m)。法国科学家组成专门委员会对米的定义进行研究,建议把地球子午线长度的四千万分之一作为米的定义。1799 年,法国巴黎档案局收存了米的实物基准“档案米”,但其后人们发现“档案米”所体现的量值与地球实际测量的量值有差异。1889 年,第一届国际计量大会决定将米定义为:米的长度等于米原器在水冰点温度时两端刻线间的距离,并批准用新的“国际米原器”代替“档案米”。1927 年第七届国际计量大会将米的定义完善为:米的长度等于在 0°C 及标准大气压条件下,米原器轴线方向上两端线间的距离。1960 年第十一届国际计量大会决定采用新的米定义,即 1 米等于氪 86 原子(Kr^{86})的 2P_{10} 和 5D_5 能级间跃迁辐射真空波长的 1650763.73 倍的长度。该定义的复现不确定度为 4×10^{-9} ,精度误差仅十亿分之四。1972 年美国国家标准局测定甲烷稳频激光的频率,得到真空光速值为 $299792458\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。1975 年第十五届国际计量大会批准了这个数值。1983 年第十七届国际计量大会决定采用新的米定义,即 1 米是真空中光在 $1/299792458\text{s}$ 时间间隔内所经路径的长度,这就是现行的米定义。

1.1.3 物质世界的层次和数量级

物理科学涉及的范围极广,不仅研究人们身旁发生的物理现象,研究宇宙天体的运动及结构,而且研究微观领域中的物质运动规律。物理学是一门定量的学科,学习物理学需要对各种事物做粗略的数量级估计,留心查看尺度变化所产生的物理效应,从而对各类物理量和数量级有所了解。下面概括介绍物质世界空间、时间和质量的尺度,以便读者在后续学习中胸中有数(数量级)。

1. 空间尺度

从物理学研究对象所涉及的空间尺度来看,相差很大。现代天文学观察表明,银河外星普遍存在光谱红移现象,说明宇宙处在膨胀过程中。从宇宙诞生到现在,宇宙延展了 10^{10}l.y. (光年),即 10^{26}m 以上,此乃宇宙之大的下限。从整个宇宙来看,太阳系只是宇宙中的沧海一粟。从物质小到什么程度看,物质世界可以向小的方向无限分割,现代物理学研究发现:宏观物体是由各种原子组成,原子的大小是 10^{-10}m 量级。原子是由原子核和核外电子组成的,原子核又是由质子和中子组成的,每个质子、中子线度大小的量级约为 10^{-15}m ,而质子

和中子是由更为基本的粒子夸克所组成。用间接的方法得知,夸克和电子的大小都小于 10^{-18}m 。物质世界中实物的空间尺度从 10^{-18}m 到 10^{-26}m ,相差 44 个数量级。表 1-1 中列出了物质世界中各实物空间尺度的数量级。

表 1-1 物质世界中的各实物空间尺度

研究对象	空间尺度/m
珠穆朗玛峰高度	8.84×10^3
人类高度	$(1.5\sim2.3)\times10^0$
大肠杆菌 DNA 长度	1×10^{-3}
血液红细胞平均直径	7.5×10^{-6}
可见光波长	$(4.0\sim7.6)\times10^{-7}$
氢原子直径	1×10^{-10}
原子核直径	1×10^{-14}
质子直径	1×10^{-15}
电子和夸克	1×10^{-18}

2. 时间尺度

从物理学研究对象所涉及的时间尺度来看,相差也很大。众所周知宇宙的寿命约为 200 亿年,即 $5\times10^{17}\text{s}$ 。牛顿力学所涉及的时间尺度是 $10^{-3}\sim10^{15}\text{s}$,而粒子物理实验表明有一类基本粒子的寿命为 10^{-25}s ,两者相差 43 个数量级。表 1-2 中列出了物质世界中各实物时间尺度的数量级。

表 1-2 物质世界的时间尺度

研究对象	时间尺度/s
宇宙年龄	5×10^{17}
地月年龄	1.5×10^{17}
太阳绕银河系中心运动的周期	10^{16}
哈雷彗星绕太阳运动的周期	10^9
人类年龄	1×10^{14}
人的寿命	$(2\sim3)\times10^9$
免疫病细胞平均寿命	3×10^6
波音 747 自北京至上海的时间	7×10^3
中子寿命	9.3×10^2
人相邻两次心跳的时间间隔	8.0×10^{-1}
μ 子的寿命	2.2×10^{-6}
中性 π 介子的寿命	0.83×10^{-16}
核碰撞的时间间隔	1×10^{-22}
共振态的寿命	$10^{-24}\sim10^{-23}$

3. 质量范围

17 世纪牛顿时代,质量曾用于表示“物质之量”。而物质之量在今天是用于表示原子数

目的多少,其单位为摩尔(mol),并在 1971 年被正式确认为国际单位制的七个基本单位之一。而质量的概念要复杂得多,有引力质量和惯性质量之分。现代物理学中,物质的质量与其自身的运动状态有关,并与能量相联系。

质量的基本单位为千克(kg)。现代物理学所涉及的物质质量跨越的范围更大,参见表 1-3。按照现代物理学观点,光子和所有以光速运动的粒子其静止质量都为零。这无疑是质量范围的下限,质量的上限应是宇宙的总质量。目前,根据星体发光的光度学理论得到的宇宙总质量要比动力学理论的结果小 1~2 个数量级,由此人们推测,宇宙中还存在所谓的暗物质。在现有理论中,暗物质的存在与否具有特殊意义,可以给出宇宙是有限还是无限的理论判断。因此,物理学和天文学都极为关心寻找暗物质。有意思的是,暗物质的存在可能与中微子——这种极微小的粒子的静止质量是否不为零有关,也就是说,对尺度极小的微观粒子的研究结果可能决定着大尺度宇宙的图像,也许还是关于宇宙是有限还是无限的关键性问题! 这似乎也说明,整个物质世界是既具有许多层次,又属于一个和谐统一的整体。

表 1-3 质量范围举例

研究对象	质量/kg	研究对象	质量/kg
银河系	2.2×10^{41}	葡萄	10^{-3}
太阳	2.0×10^{30}	灰尘	10^{-10}
地球	6.0×10^{24}	烟草花叶病毒	2.3×10^{-13}
月亮	7.4×10^{22}	青霉素分子	5.0×10^{-17}
地球上的海洋	1.4×10^{21}	铀原子	4.0×10^{-26}
远洋轮船	10^8	质子	1.7×10^{-27}
大象	10^3	电子	9.1×10^{-31}
人	6.0×10^1	中微子	$< 2.0 \times 10^{-35}$

物理世界在时空尺度上跨越了如此大的范围,描述时,也要将其分为许多层次。在每个层次里,物质的结构和运动规律将表现出不同的特点。物理上,把原子尺度范围内的系统称为微观系统,将在人体尺度大小之上的几个数量级系统称为宏观系统。如果把物理现象按空间尺度划分,可分为三个区域:量子物理学、经典物理学、宇宙物理学。凡是速度 v 接近光速(c)的物理现象称为高速物理现象,而将 $v \ll c$ 的物理现象称为低速物理现象。

时间、空间、物质和运动是相互联系的。从当代物理认识来看,宇宙创生于“无”。伴随着宇宙的创生,才有物质存在和运动,也才有时间和空间。时间和空间本身也是物质的,没有物质存在就没有空间,空间是一种特殊形态的物质。而物质运动具有规律性,即运动过程中各种状态存在因果关系,这种因果序列构成了时间和空间的不同。时间是一维单向的,物质运动的单向性和周期性是认识和计量时间的基础。

时空概念的存在是有条件的,理论上,时间和空间存在的最小极限值 $t_p = 5.4 \times 10^{-43} \sim 10^{-42}$ s 和 $l_p = 1.6 \times 10^{-35} \sim 10^{-30}$ m 分别称为普朗克时间和普朗克长度。在时间尺度 $t < t_p$, 空间尺度 $l < l_p$ 的情况下,时空就会失去原来的含义,即没有过去、现在和未来,也没有上下、左右、前后,自然因果律失效,即时间和长度的概念可能就不再适用。

1.2 质点和参考系

1.2.1 质点

力学中的质点没有体积和形状,是只具有一定质量的理想物体。质点是力学中一个十分重要的概念。我们知道,任何实际物体,大至宇宙中的天体,小至原子、原子核、电子以及其他微观粒子,都具有一定的体积和形状。如果在研究问题中,物体的体积和形状是无关紧要的,就可以把该物体看作为质点。例如,地球相对于太阳的运动,由于地球既公转又自转,地球上各点相对于太阳的运动是各不相同的,但是,考虑到地球到太阳的距离约为地球直径的1万多倍,因此在研究地球公转时可以忽略地球的大小和形状对这种运动的影响,认为地球上各点的运动情形基本相同,这时可以把地球看作为一个质点。

对于同一个物体,由于研究问题的不同,有时可以将其看作为一个质点,有时则不能。不过,在不能将物体看作为质点时,却总可以把这个物体看作为是由许多质点组成的,对其中的每一个质点都可以运用质点运动的结论,将其叠加起来就可以得到整个物体的运动规律。可见,质点力学是整个力学的基础。

质点力学的普遍意义是基于质点模型而建立的质点力学,其普遍性价值在于以下方面。①相对于远距离的观察者,物体很小,可以忽略其形状和大小对力学性质的影响。②虽然物体不是很小,但是其形状、大小等因素在特定的力学问题中却不起作用,如刚体的平动问题等。③即使在物体的形状、大小等因素有影响的情况下,质点力学仍不失价值,可将物体看成“点集”或质点组,将质点力学规律进行推广,进而发展成为质点组力学、刚体力学、弹性体力学、流体力学等。这一演绎方法形成了经典力学理论体系的基本概貌,又借助于几乎同时出现的笛卡尔几何学和微积分学而得以实现。

1.2.2 参考系

力学范围内所说的运动是指物体位置的变更。宇宙中的一切物体都处于永恒的运动之中,绝对静止的物体是不存在的。显然,一个物体的位置及其变更,总是相对于其他物体而言的,这便是机械运动的相对性。因此,为了描述一个物体的运动情形,必须选择另一个运动物体或几个相互间保持静止的物体群作为参考物。只有先确定了参考物,才能明确地表示被研究物体的运动情形。研究物体运动时,被选作参考物的物体或物体群称为参考系。例如:研究地球相对于太阳的运动,常选择太阳作参考系;研究人造地球卫星的运动,常选择地球作参考系;研究河水的流动,常选择地面作参考系等。

描述质点如何运动的问题中,也仅在这样的問題中,原则上参考系是可以任意选择的。对于物体的同一个运动,选择不同的参考系,对运动的描述是不同的。例如,人造地球卫星的运动,若以地球为参考系,运动轨道是圆或椭圆;若以太阳为参考系,运动轨道是以地球公转轨道为轴线的螺旋线。那么,在研究物体运动时,究竟应该选择哪个物体或物体群作为参考系呢?这要根据问题的性质,以及问题的计算和处理的方便进行决定。在上述人造地球

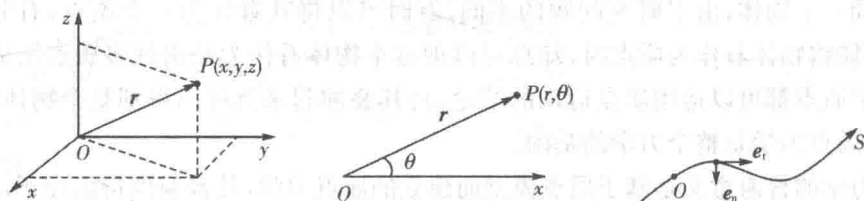
卫星的运动举例中,显然选择地球中心作参考系比选择太阳作参考系要方便得多,结论也要简洁得多。因此,在题意和问题性质允许的情况下,应选择使问题的处理尽量简化的参考系。

1.2.3 坐标系

选择合适的参考系后,在参考物上任意选定一个参考点 O ,并设置一个以 O 为原点的坐标系,就可以把物体在各个时刻相对于参考系的位置定量地用坐标表示出来。

如图 1-1(a)所示,在三维空间中构成一个直角坐标系 $O-xyz$ 。在此坐标系中,用 3 个坐标 (x, y, z) 便可单独确定质点 P 在某时的位置。坐标 (x, y, z) 的大小是长度,可用配置在坐标系中的刻度来测量。在二维空间中选择平面极坐标系,如图 1-1(b)所示。在已知质点运动轨迹的情况下,可以以质点运动轨迹为坐标轴构成自然坐标系,如图 1-1(c)所示。

在处理实际问题时,应根据问题的性质和解决问题方便的原则选择坐标系。



(a) 直角坐标系; (b) 平面极坐标系; (c) 自然坐标系

图 1-1 坐标系

1.3 位置矢量和运动方程

1.3.1 位置矢量

图 1-2 中的点 P 代表所讨论的质点,点 O 代表参考系上的一个固定点,以后建立坐标系时坐标原点就取在这里。点 P 在任意时刻的位置,可用从点 O 到点 P 所引的有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 表示, $\overrightarrow{OP}$ 可用一个矢量 $\boldsymbol{r}$ 代表,这个矢量 $\boldsymbol{r}$ 就称为质点 P 的位置矢量,简称位矢。位置矢量既然是矢量,它就包含了质点位置的两方面信息:一是质点 P 相对参考系中固定点 O 的方位;二是质点 P 相对参考系中固定点 O 的距离大小。这正是矢量所具有的两个基本特征。

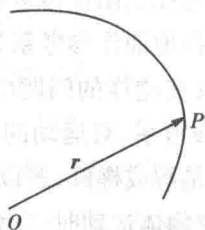


图 1-2 位置矢量

由于质点在运动,位置在变化,因此质点的位置矢量 $\mathbf{r}$ 必定随时间在改变。也就是说,位置矢量 $\mathbf{r}$ 是时间 t 的函数,即

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

(1-1)式称为质点的运动学方程,它不仅给出质点运动的轨迹,而且给出质点在任意时刻所处的位置。

位置矢量可用直角坐标系中的分量形式表示。在参考系上取一固定点作为坐标原点 O ,过点 O 画三条相互垂直的带有刻度的坐标轴,即 x 轴、 y 轴和 z 轴,就构成了直角坐标系 $O-xyz$ 。

如果图 1-3 中的点 $P(x, y, z)$ 代表所讨论的质点在某时刻的位置,那么从坐标原点 O 向点 P 所引的有向线段就是质点在该时刻的位置矢量 $\mathbf{r}$ 。显然,位置矢量 $\mathbf{r}$ 可以表示为

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

式中, $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ 和 $\mathbf{k}$ 分别是 x , y 和 z 轴方向的单位矢量。

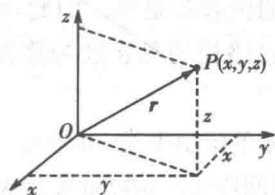


图 1-3 直角坐标系

位置矢量 $\mathbf{r}$ 的大小为

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

位置矢量 $\mathbf{r}$ 的方向可用方向角的余弦表示

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

式中, α, β, γ 分别表示 $\mathbf{r}$ 与 x, y, z 轴之间的夹角。

这三个方向角的余弦存在以下关系: $\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$ 。

质点运动的轨道参照式(1-1)可以写成分量形式

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1-5)$$

即质点运动方程在直角坐标系中的分量形式。原则上,从式(1-5)都可以消去参变量 t ,得到质点运动的轨道曲线的方程式

$$f(x, y, z) = 0 \quad (1-6)$$

(1-6)式即为质点运动的轨迹方程。

1.3.2 位移和路程

设质点沿图 1-4 所示的任意曲线运动。质点在 t 时刻处于点 A ,其位置矢量为 $\mathbf{r}_A$,经过 Δt 时间,质点到达点 B ,位置矢量为 $\mathbf{r}_B$ 。在此过程中,质点位置的变更可以用从点 A 到点 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 表示,或写成 $\Delta\mathbf{r}$,称之为质点由 A 到 B 的位移。位移 $\Delta\mathbf{r}$ 是矢量,它既表示质点位置变更的大小(点 A 与点 B 之间的距离),又表示这种变更的方向(点 B 相对于点 A 的方位)。

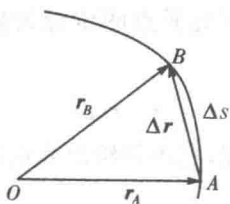


图 1-4 质点沿任意曲线运动

由图 1-4 可以看出

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1-7)$$

式(1-7)表示:质点从点 A 到点 B 所完成的位移 $\Delta \mathbf{r}$, 等于点 B 的位置矢量 $\mathbf{r}_B$ 与点 A 的位置矢量 $\mathbf{r}_A$ 之差。

位移描述质点在一段时间内位置变动的总效果。一个有趣的例子, 运动员在 400 m 跑道上跑了 2 圈, 但他在这段时间内的位移却是零。因此, 引入路程描述质点沿轨迹的运动, 在一段时间内, 质点在其轨迹上经过路径的总长度为路程, 记为 Δs , 路程是标量。显然, 路程 Δs 与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是不同的。

位移和路程的单位相同, 在国际单位制中为 m(米)。

如果将产生位移和路程的时间间隔 Δt 不断缩短, $|\Delta \mathbf{r}|$ 和 Δs 将逐渐接近, 在极限情况下, 两者相等。即

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \mathbf{r}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s$$

1.4 速度 加速度

描述质点运动快慢和运动方向的物理量是速度 $\mathbf{v}$ 。质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和发生这段位移所经历的时间 Δt 的比, 称为质点在这段时间内的平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$, 即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-8)$$

平均速度是矢量, 它的方向与位移的方向一致。平均速度只是质点在 Δt 时间内位置的平均变化率。为了反映质点在某一瞬时的运动情况, 还需引入瞬时速度的概念。瞬时速度 $\mathbf{v}$ 定义为

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-9)$$

速度也是一个矢量。用 Δs 表示质点在时间 Δt 内沿轨迹所经过的路程, 那么当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|\Delta \mathbf{r}|$ 和 Δs 趋于一致。于是有

$$v = |\mathbf{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-10)$$

即速率等于质点所经过路程对时间的变化率。质点运动经过的路程 s , 可通过速率对时间的积分得到, 即

$$s = \int_0^t v dt \quad (1-11)$$

在一般情况下,质点的速度也是随时间变化的,为了描述速度的变化情况,需要引入加速度的概念。设质点在时刻 t 和 $t + \Delta t$ 的速度分别为 v_A 和 v_B ,在 Δt 时间内的速度增量为

$$\Delta v = v_B - v_A$$

则定义在这段时间内的平均加速度为

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

同理,质点在时刻 t 的瞬时加速度(简称加速度) a 定义为

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (1-13)$$

加速度是描述速度变化的物理量,也是一个矢量。如果速度的大小和方向都保持不变,则加速度为零;反之,不论速度大小或方向有变化,加速度就不为零。

在讨论质点的曲线运动时,常将加速度 a 分解成两个分量,一个沿曲线的切线方向,称为切向加速度 a_τ ,一个沿曲线的法向方向,称为法向加速度 a_n ,即

$$a = a_\tau + a_n \quad (1-14)$$

因而有

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} \quad (1-15)$$

切向加速度 a_τ 的作用是改变速度的大小,而法向加速度 a_n 的作用是改变速度的方向。显然,在 $a_n = 0$,而 $a_\tau \neq 0$ 时,质点作变速直线运动;在 $a_\tau = 0$,而 $a_n \neq 0$ 时,质点作匀速率曲线运动。

可以证明, a_τ 和 a_n 的数值为

$$\left. \begin{aligned} a_\tau &= \frac{dv}{dt} \\ a_n &= \frac{v^2}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

式中, ρ 为质点所在点曲线的曲率半径。

在国际单位制(SI)中,速度的单位为米/秒($m \cdot s^{-1}$),加速度的单位为米/秒²($m \cdot s^{-2}$)。

如果质点做匀速直线运动,质点速率 v 为常量,则由式(1-11)可得

$$s = vt \quad (1-17)$$

如果质点做匀变速直线运动,质点加速度 a 为常量,则对式(1-13)积分可得

$$v = v_0 + at \quad (1-18)$$

将上式代入式(1-11),并积分得

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (1-19)$$

由以上二式消去参数 t , 可得

$$v^2 - v_0^2 = 2as \quad (1-20)$$