



教育部高职高专规划教材

普通物理学

► 蔡保平 杜乃珍 主编



化学工业出版社

职业教育教材出版中心

教育部高职高专规划教材

普通物理学

蔡保平 杜乃珍 主编



化学工业出版社
职业教育教材出版中心

· 北 京 ·

本书编写中“以应用为目的，以必需、够用为度”和“以素质为核心、能力为基础、技能为重点”的原则，力求体现理论联系实际，重视物理理论在生产技术中应用知识的介绍，注意培养学生的综合能力、创新意识和基本技能。力求做到内容新颖、结构合理、概念清楚、实用性强、通俗易懂、前后相关课程有较好的衔接。

本教材内容包括绪论、牛顿运动定律、动量守恒和能量守恒、刚体的定轴转动、热力学基础、静电场、稳恒电流的磁场、电磁感应、机械振动、机械波、波动光学、狭义相对论简介、近代物理学基础等内容。

本书可作为高职高专类工科学生基础物理教育的教材使用，也可作高等师范院校、教育学院、高等师范专科学校教师和学生的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

普通物理学/蔡保平, 杜乃珍主编. —北京: 化学工业出版社,

2006. 5

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-8715-2

I. 普… II. ①蔡…②杜… III. 普通物理学-高等学校:
技术学院-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 051811 号

教育部高职高专规划教材

普通物理学

蔡保平 杜乃珍 主编

责任编辑: 张双进

责任校对: 王素芹

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
职业教育教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 294 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8715-2

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

目前, 高职高专教育已作为中国高等教育的重要组成部分, 成为促进就业、经济发展的重要基础和提高国家竞争力的重要途径。从规模上看, 高职高专教育已经成为中国高等教育的“半壁江山”, 从教育的发展现状来看, 高职教育有着广阔的发展空间, 为地方经济建设培养了大批技术应用型和高技能人才。

在当前教材建设特别是基础物理教材建设滞后于高职教育迅速发展的矛盾十分突出的情况下, 编写一本适应高职高专教育培养技术应用型人才要求的、真正具有高职特色的、体系完整的物理教材十分必要而且迫切。为此, 本着“以应用为目的, 以必需、够用为度”和“以素质为核心、能力为基础、技能为重点”的原则, 力求体现理论联系实际, 重视物理理论在生产技术中应用知识的介绍, 注意培养学生的综合能力、创新意识和基本技能, 编写了这本大学物理教材。

在教材的编写过程中力求做到内容新颖、结构合理、概念清楚、实用性强、通俗易懂、前后相关课程有较好的衔接。与本科相关教材相比, 本教材在培养学生的应用技能上更具特色, 具有较强的实用性。

本书共十二章, 由蔡保平、杜乃珍任主编, 各章作者为: 蔡保平编写绪论、第五章、第六章; 杜乃珍编写第一章、第十二章、阅读材料、习题答案及附录; 薛丽丽编写第二章~第四章、第十一章; 白心爱编写第七章~第十章; 各章思考题及习题由各章作者编写完成。

本书可作为高职高专类工科学生基础物理教育的教材使用, 也可作高等职业院校、教育学院、高等师范专科学校教师和学生的参考用书。

由于时间和水平有限, 有不妥之处, 敬请同行和读者批评、指正。

最后, 对本书在编写和出版过程中给予支持和帮助的同志表示衷心的感谢!

编者

2006年6月

目 录

绪论	(1)
第一章 牛顿运动定律	(4)
第一节 参考系和坐标系	(4)
第二节 位移 速度	(6)
第三节 加速度	(8)
第四节 牛顿运动定律	(11)
第五节 牛顿运动定律的应用	(13)
思考题	(15)
习题	(15)
第二章 动量守恒 能量守恒	(17)
第一节 动量定理	(17)
第二节 动量守恒定律	(19)
第三节 功 动能定理	(21)
第四节 保守力的功 势能	(22)
第五节 功能原理 机械能守恒定律	(25)
思考题	(26)
习题	(26)
第三章 刚体的定轴转动	(28)
第一节 刚体定轴转动的描述	(28)
第二节 转动动能定理	(30)
第三节 转动定律	(31)
第四节 角动量守恒定律	(34)
思考题	(36)
习题	(37)
第四章 热力学基础	(39)
第一节 平衡态 理想气体状态方程	(39)
第二节 热力学第一定律	(41)
第三节 热力学第一定律对理想气体的应用	(43)
第四节 循环过程 卡诺循环	(46)

第五节 热力学第二定律	(49)
第六节 熵和熵增加原理	(51)
思考题	(53)
习题	(54)
第五章 静电场	(56)
第一节 电荷 真空中的库仑定律	(56)
第二节 电场 电场强度	(58)
第三节 静电场的环路定理 电势	(64)
第四节 电介质	(68)
第五节 电容器	(70)
第六节 静电场的能量	(72)
思考题	(75)
习题	(76)
第六章 稳恒电流的磁场	(78)
第一节 真空中的稳恒磁场	(78)
第二节 毕奥-萨伐尔定律及其应用	(79)
第三节 磁场力 磁力矩	(83)
第四节 磁介质	(87)
思考题	(89)
习题	(90)
第七章 电磁感应	(92)
第一节 电磁感应现象	(92)
第二节 动生电动势	(94)
第三节 感生电动势	(97)
第四节 自感 磁场能量	(99)
思考题	(102)
习题	(103)
第八章 机械振动	(105)
第一节 简谐振动	(105)
第二节 描述简谐振动的物理量	(106)
第三节 简谐振动的旋转矢量法	(109)
第四节 简谐振动的合成	(110)
第五节 阻尼振动 受迫振动 共振	(111)
思考题	(113)

习题	(114)
第九章 机械波	(115)
第一节 机械波的产生和传播	(115)
第二节 平面简谐波	(117)
第三节 波的能量 能流密度	(119)
第四节 波的干涉	(120)
第五节 驻波	(123)
第六节 多普勒效应	(124)
思考题	(125)
习题	(126)
第十章 波动光学	(128)
第一节 光的电磁理论	(128)
第二节 双缝干涉	(130)
第三节 薄膜干涉	(133)
第四节 光的衍射	(137)
第五节 光的偏振	(141)
思考题	(144)
习题	(145)
第十一章 狭义相对论简介	(147)
第一节 伽利略变换 牛顿的绝对时空观	(147)
第二节 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换	(149)
第三节 狭义相对论的时空相对性	(150)
第四节 狭义相对论的动力学基础	(152)
思考题	(153)
习题	(154)
第十二章 近代物理学基础	(155)
第一节 光的粒子性 康普顿效应	(155)
第二节 实物粒子的波粒二象性	(157)
第三节 不确定关系	(158)
第四节 波函数及统计解释	(160)
第五节 薛定谔方程	(161)
第六节 一维无限深势阱	(162)
第七节 固体的能带	(165)
思考题	(167)

习题.....	(167)
阅读材料 纳米材料简介.....	(168)
附录	(176)
附录一 希腊字母表.....	(176)
附录二 一些常用数字.....	(176)
附录三 几种单位的换算.....	(176)
附录四 基本物理量.....	(177)
附录五 数学公式.....	(177)
附录六 可见光在真空中的波长范围.....	(178)
习题答案	(179)
参考文献	(184)

绪 论

一、物理学的研究对象

人们周围的一切客观实体都是物质，一切物质都在不停地运动着，自然界中的一切现象都是物质不同运动形式的表现。物理学是研究物质运动中最普遍、最基本的运动形式和规律、认识物质世界的基本属性的一门科学。

物质的各种不同运动形式具有各自不同的运动规律，不同的学科就在于它所研究的运动形式和规律不同。物理学所研究的运动形式包括机械运动、分子运动、电磁运动、原子和原子核内部的运动等。

物理学所研究的运动，普遍地存在于其他复杂的高级的运动形式（如化学的、生物等的）之中。因此，物理学所研究的物质运动规律，具有最大的普遍性。例如，宇宙间的一切物体，无论化学成分如何不同，有无生命，都遵从物理学中万有引力定律；一切变化过程，都遵从物理学中所确定的能量转化与守恒定律；任何有限的孤立系统的熵都不会减少，即遵从熵增原理。但是应该懂得，自然界中各类不同的运动形式，具有各自不同的特殊规律，这些规律不可能都归结为物理规律。因此，只用物理规律不能解释所有的自然现象。例如，生命过程和化学过程就不能单纯用物理规律来解释。

由于物理学所研究的物质运动及其规律的普遍性，物理学便成为自然科学和工程技术科学的基础，没有物理学基础，想在其他自然科学和技术领域中取得成功是不可能的。

学习物理学的目的就是要掌握最普遍的自然规律，深入认识物质世界的基本属性，有效地运用物理学知识改造自然，为人类造福。

二、物理学的作用与意义

物理学是自然科学的带头学科。

① 物理学是一门定量的科学，它与数学有着密切的关系；如牛顿、欧拉、高斯到彭加勒、克莱因、希尔伯特等都同时精通物理和数学，近年来关于混沌的研究就是两门学科相互结合的结果。

② 物理学与天文学更是密不可分；最早可追溯到开普勒与牛顿对行星运动的研究，目前物理学为天文学研究提供了各种探测手段，天文观测又为物理学提供了丰富的实验证据。

③ 物理学与化学是唇齿相依、息息相关的；化学中的原子论、分子论的发展为物理学中气体动理论的建立奠定了基础，而物理学中量子理论的发展又从本质上说明了元素性质周期性变化的规律。近年来半导体、超导体、液晶科学、高分子科学和分子膜科学的发展都是物理学家、化学家共同努力的结果。

④ 物理学对生物学的发展起了决定性的作用：一方面是为生物学的研究提供了现代化的实验手段，如电子显微镜、X射线显微镜、核磁共振、扫描隧道显微镜等；另一方面是为生物学提供了许多理论概念和方法，如基因问题的研究。

物理学是现代技术革命的先导。物理学与技术的关系存在两种基本模式：一种是由于生

产实践的需要而创建了技术,如18世纪至19世纪的蒸汽机等热机技术,然后再建立了热力学;另一种是先在实验室中揭示了基本规律,建立比较完整的理论,再应用到生产中,如19世纪的电磁学。在当今世界中,第二种模式的重要性更为显著,物理学已成为现代高技术发展的先导与基础学科。在当前最引人注目的高技术领域,即核能技术、超导技术、信息技术、激光技术和电子技术等,物理学的基础研究所起的指导作用日趋突出。

物理学是科学的世界观和方法论的基础。物理学史告诉人们,每个新的物理概念和物理规律的确立,都是人类认识史上的一个飞跃,如普朗克的量子假设、爱因斯坦的相对论等,同时,物理学是一门理论和实验高度结合的科学,物理学的发展充分体现了理论与实验的辩证关系。

三、物理学研究方法

学习物理学与学习其他自然科学一样,都必须遵循人类对客观世界认识的总法则,即实践—理论—实践的认识法则,观察和实验是实践的重要环节,是认识客观世界的基础,也是进行科学研究的基本方法。观察是就现象在自然界的本来情况进行实地观测和研究。例如,对天体和大气现象就直接采用观察法。实验是在人工控制条件下,对发生的某些运动现象,进行观察研究。实验的特点是人为地创造一个环境把复杂条件简化,突出主要因素,排除或减少次要因素的作用,可使同一现象反复出现,进行多次观察研究。例如,用实验观测匀速直线运动规律或动量守恒定律时,把光滑木板改为气垫导轨就是为了进一步减少摩擦力这一外界因素的作用,提高实验精度。

观察和实验对自然现象只能得到片面的、局部的感性认识或获得粗略的定量关系,不能得出本质的普遍的联系。要得到反映本质的普遍规律还必须将感性或粗略的认识上升到理性认识。完成感性认识向理性认识飞跃的基本手段是对大量实验数据和感性认识进行综合、归纳、分析,通过去粗取精,去伪存真的抽象(通常以理想模型为依托)和概括而得出规律。

所谓抽象就是根据问题的性质和内容,抓住主要因素,忽略次要因素,建立与实际研究对象相近的理想物体(模型),取代实际对象来进行研究,从而获得模型在给定条件下的基本运动规律。这种运动规律难从物体复杂运动的某一侧面反映出自然现象的一种本质联系。例如,质点、刚体、理想气体等都是理想模型。把物体抽象为质点时,质量和点是主要因素,物体的形状和大小是被忽略的次要因素;把物体抽象为刚体时,物体的形状,大小和质量及其分布是主要因素;把实际气体抽象为理想气体时,气体分子间的碰撞和自由运动是主要因素,分子间的引力和重力是被忽略的次要因素。显然,抽象和减少因素是密切相关的,抽象的过程就伴随着减少因素。在物理学的创立和发展过程中,理想模型起着不可缺少的重要作用,研究物体机械运动规律时,就是先从质点运动规律入手,再研究质点组的运动规律和刚体运动规律而逐步深入的;研究气体热性质时,首先根据气体实验定律导出理想气体状态方程,进而深入研究实际气体的性质。

在物理学的创立过程中,假说是另一主要环节,通过认识物质的属性或寻找物理规律,对现象的本质或联系最初是以假说(对现象本质的说明方案或基本论点等)提出。假说还不是被承认的理论,它只是以理想模型为依托的探索性“理论”或“理论”雏型。例如,在一定实验基础上提出来的物质结构的分子原子假说,是分子运动论的理论雏型;近代物理研究中,中国物理工作者提出的层子模型或国外学者提出的夸克模型等就是尚不完备的理论雏型。

理想模型和假说是在一定观察和实验基础上提出来的。在一定条件下通过反复的实验,不断修正这些假说或模型,使其日趋完善,如能反映客观规律和解释现象,便上升为定律或理论。例如,上述的分子、原子假说后来就发展成为分子运动论;量子假说的建立和量子理论的演变,最后发展成为量子力学理论。在科学的理论发展中,假说或理想模型起着理论母体的作用,在一定意义上说没有假说或理想模型就没有物理学乃至整个自然科学。

对同类运动客体在多次同类实验中所体现出的共同规律,一般称为物理定律。物理定律是由实验直接总结概括得出的,通常表明某些物理现象或物理量之间的规律或定量关系。由于这种关系是在一定条件下得出的,因而具有一定的适用范围和局限性。

根据已知的物理学定律,结合某些物理量的定义,通过数学推导,或逻辑演义的方法可以导出某些物理量的定量关系,这些定量关系的数字表达式通常称为物理定理(或原理)。物理定律或定理构成物理理论的骨架,成为一定范围内实践活动的指南。

从物理现象的广泛联系出发,可发现其中最基本的定律,客观存在容纳的物理信息量最多,由它可解答一类物理学问题(如牛顿第二定律可解决整个质点动力学问题);也可把众多定律、定理概括为一个或几个简明的数学表达式,成为某一学科理论的基础,它不但能解释一定范围内的现象,而且还能预言一些问题。例如麦克斯韦方程组,不但能解释各种电磁现象,而且还预言了电磁波的存在和传播速度,并被实验所证实。

实践是检验真理的惟一标准。随着生产的发展和技术的进步,人们的实践和视野都向物质世界的深度和广度进展。在新的实践和实验面前,原来被实践证明是正确的物理规律,可能会出现理论与事实相矛盾的现象,甚至理论与事实完全不符,这时就必须修正原有的理论,寻找与新的实践相符合的理论。例如,20世纪以来,由于在近代物理实验中出现了与牛顿力学相矛盾的现象,促成了相对论力学与量子力学的建立就是很好的例子。再如,热力学理论曾指出导体趋于绝对零度时其电阻才趋于零而成为超导体,而现在中国和世界上其他国家的一些学者在实验室中发现物质在100K附近已出现超导现象,这就使超导材料的制备和应用有了现实意义。这种实践和认识相互促进、不断深入和发展的事实正符合辩证唯物主义的认识法则,即实践、认识、再实践、再认识,这种形式循环往复以至无穷,而实践和认识之每一循环内容,都比较地上升到高一级的程度。近代物理的实验事实一再证明了“基本粒子”并不基本,还有复杂的结构,对宏观世界的认识也是如此。从地心说发展到日心说,再到银河系,在银河系外又发现了河外星系和总星系,总星系外还有天体和物质。人类对物质世界的认识无论是宏观还是微观,都是不可穷尽的,科学的发展是无止境的,一切墨守成规、止步不前的观点都是错误的。

第一章 牛顿运动定律

自然界的一切物体都处于永恒的运动之中，在多种多样的运动形式中，机械运动是最简单又最普遍的运动形式。所谓机械运动是指物体位置的变动。为了研究物体的机械运动，人们需要确定描述物体运动的方法。本章中，首先认识物体运动的相对性和建立质点模型，在此基础上，给出物体运动的位置随时间的变化关系，即运动学方程和阐明描述物体运动的一些物理量——位矢、位移、速度、加速度等。

第一节 参考系和坐标系

一、参考系、坐标系和质点

1. 参考系

宇宙间的万物都在运动，绝对静止的物体不存在，即运动是绝对的。要说明一个物体的位置或描述一个物体的运动，总要指明它是相对哪一个物体而言，也就是必须选择另一个物体作为参考。人们把描述物体运动时被选定为参考的物体称为参考系。显然，选择不同的参考系，对同一物体运动的描述不同。如匀速行驶的船上的人，以运动的船为参考系，观测到船上的物体相对自己是静止的；而岸上的人以地面为参考系，则观测到物体在做匀速直线运动。当选定某一参考系时，其他物体的运动状态就完全确定了，因此要描述物体的运动必须先说明选取哪个物体为参考系。在研究运动学问题时，可以任意选择，依问题而定。

2. 坐标系

为了定量地描述物体的运动，也就是定量地确定物体的位置及其变化，需要在参考系上建立固定的坐标系。一般在参考系上选定一点作为坐标系的原点，取通过原点并标有长度的线作为坐标轴。最常用的是直角坐标系，根据需要，也可以选其他坐标系，如极坐标系、球坐标系等。

3. 质点

有了参考系和坐标系，原则上就可以研究任何物体的机械运动了。实际的物体总有一定的大小和形状，物体上各点的运动情况一般各不相同。但在某些问题中，物体的大小和形状与所研究的问题无关，或者所起的作用甚微。这时可以忽略物体的形状和大小，把物体看成一个点，为此引入质点的概念。

物体的大小和形状可以忽略不计，把物体看成是一个有一定质量的点，这样的点称为质点。必须指出，质点仅在几何描述上看作是一个点，但它不是单纯的几何点，它具有质量、能量、动量等物理属性，所以质点代表的的是一个物体。

一个物体能否看作质点，由问题的具体情况来决定。如研究行星绕太阳运动时，行星与太阳的距离比行星的直径大很多，行星的自转可以忽略，这时行星可以视为质点。但研究行星的自转时，就不能再视为质点。物体做平动时，物体各点具有相似的轨道，相同的速度和加速度。因而只要研究其中一点的轨道、速度和加速度，就足以认识平动物体的全貌。因

此, 这时也可以把平动物体简化为质点。

如果所研究的物体不能视为质点时, 可以把物体无限细分, 小到每一小部分可看作质点, 即物体可以看成是许多质点组成。这些质点的组合称为质点系。如果了解了所有这些质点的运动, 则整个物体的运动也就清楚了。所以, 研究质点的运动是研究物体运动的基础。

二、位置矢量

为了描述质点的运动, 首先应确定质点的位置。在坐标系中, 质点的位置用位置矢量表示, 简称位矢。位矢是从原点指向质点所在位置的有向线段, 用矢量 $\mathbf{r}$ 表示。如图 1-1 所示, 它和该点位置坐标之间的关系是

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

式中, x 、 y 、 z 就是 P 点的位矢 $\mathbf{r}$ 分别在 x 、 y 、 z 轴的分量, $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 分别为直角 x 、 y 、 z 轴的单位矢量。位矢的大小为

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

如果质点在平面上运动, 则确定质点的位矢为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$$

位矢的大小为

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

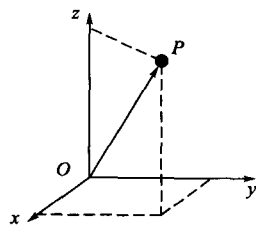


图 1-1 位置矢量

三、运动学方程

当质点相对于参考系运动时, 不同时刻质点的位置不同。因此, 位矢 $\mathbf{r}$ 的大小和方向一般都随时间在变化, 即位矢 $\mathbf{r}$ 是时间的函数。表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-2a)$$

位矢 $\mathbf{r}$ 随时间 t 变化的函数式称为质点的运动学方程。在直角坐标系中, 质点运动学方程在三个坐标轴上的分量式为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-2b)$$

实际上质点在空间的运动可以看成是质点在 x 、 y 、 z 轴上同时参与三个直线运动 $x = x(t)$ 、 $y = y(t)$ 、 $z = z(t)$ 。质点运动学方程的矢量式与分量式是等效的, 都给出了质点的位置随时间的变化规律。如高中物理曾讨论过的匀加速直线运动时, 质点位置随时间的变化关系

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

就是质点匀加速直线运动的运动学方程。如平抛运动, 其运动学方程为

$$\begin{cases} x = v_0 t \\ y = h - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases}$$

式中, v_0 为质点水平抛出的速度, h 为初始时刻距原点的高度, g 为重力加速度, 负号表示加速度的方向与 y 轴正方向相反。

第二节 位移 速度

一、位移

当质点运动时, 位矢随时间变化。设 t 时刻质点位于 A 点, 位矢为 r_A , 在 $t + \Delta t$ 时刻经某一路径运动到 B 点, 位矢为 r_B 。用由 A 指向 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 表示质点在 Δt 时间内位置的变化, 称它为质点的**位移矢量**, 简称**位移**, 用 Δr 表示, 由图 1-2 可见

$$\Delta r = \overrightarrow{AB} = r_B - r_A \quad (1-3)$$

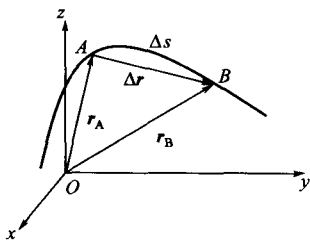


图 1-2 质点运动的位移

必须注意, 位移表示质点位置的改变, 它并不是质点所经历的路程。图 1-2 中, 位移是有向线段, 是一矢量, 它的大小 $|\Delta r|$ 就是割线 AB 的长度; 而路程是一标量, 是曲线的长度 Δs , Δs 和 $|\Delta r|$ 并不相等。只有在时间 Δt 趋近于零时, Δs 与 $|\Delta r|$ 才可看作相等。即使在直线运动中, 位移和路程也是截然不同的两个概念。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, 而位移则为零。

【例题 1】 如图 1-3 所示, 质点从 A 点顺时针沿圆周运动到 B 点, 求质点的路程和位移大小。

解 根据题意可知

$$\text{路程} \quad s = \frac{3}{2} \pi R$$

$$\begin{aligned} \text{位移} \quad \Delta r &= r_B - r_A \\ r_B &= 2Ri + Rj \\ r_A &= Ri \end{aligned}$$

于是有

$$\Delta r = r_B - r_A = Ri + Rj$$

$$\text{位移的大小} \quad |\Delta r| = \sqrt{R^2 + R^2} = \sqrt{2}R$$

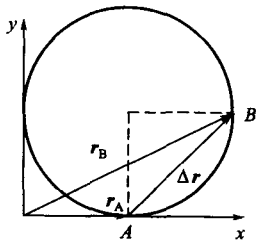


图 1-3 例题 1 附图

二、平均速度和平均速率

当质点在 Δt 时间内, 发生了位移 $|\Delta r|$ 时, 为了表示质点在这段时间内运动的快慢程度, 把质点的位移 Δr 与相应的时间 Δt 的比值, 叫做在质点 Δt 时间内的**平均速度**, 即

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

平均速度是矢量, 其大小等于 $\left| \frac{\Delta r}{\Delta t} \right|$, 方向与 Δr 的方向相同。

在描述质点运动时, 也常采用速率这个物理量。把路程 Δs 与时间 Δt 的比值 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 叫做质点在 Δt 时间内的**平均速率**, 即

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-5)$$

平均速率是一标量, 而平均速度是矢量, 显然二者截然不同。

对于平均速度和速率而言, 所取时刻 t 及 Δt 时间的长短不同, 其值不同。所以必须指明是在哪一时刻起, 所取的是哪段时间内的平均速度或速率。

平均速度和速率只能粗略的描述质点一段时间内运动的快慢程度, 还不足以细致地描述质点在某一时刻 (或相应的某一位置) 的运动情况。

三、瞬时速度和瞬时速率

当所取的时间 Δt 逐渐缩短且趋向于零时, Δr 的大小也逐渐缩短而趋近于零。位移 Δr 的方向以及平均速度的方向也相应地改变, 并逐渐趋向于 A 点的切线方向, 如图 1-4 所示。

于是, 质点在某一时刻 t 的运动情况, 可用 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的平均速度 $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ 的极限来描述, 即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-6)$$

这一极限是位矢对时间的导数, 为矢量导数。它就是质点运动时, 在某时刻或某位置的瞬时速度, 简称速度。速度 $\mathbf{v}_A$ 的方向与 $d\mathbf{r}$ 的方向相同, 沿轨道的切线方向指向质点前进的方向。

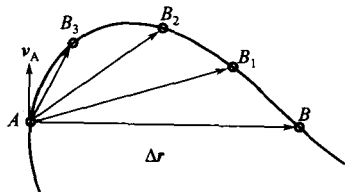


图 1-4 质点在 A 点处的速度

类似地, $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均速率 $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 的极限, 定义为 t 时刻的瞬时速率, 简称速率,

$$\text{即} \quad v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-7)$$

$\Delta t \rightarrow 0$ 位移的大小等于路程, 即 $|d\mathbf{r}| = ds$, 所以

$$|v| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = \frac{|d\mathbf{r}|}{dt} = \frac{ds}{dt} = v \quad (1-8)$$

即质点速度的大小与速率相等。速率是描述质点运动快慢的物理量, 而不涉及质点的运动方向, 它是标量。

速度也可以写成坐标表达式, 对于平面上质点的运动, 在直角坐标系中速度为

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} \quad (1-9a)$$

根据速度的定义可得

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} \quad (1-9b)$$

在直角坐标系中的分量式为

$$v_x = \frac{dx}{dt}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt}$$

速度的大小为

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

速度方向

$$\alpha = \arctan \frac{v_y}{v_x} \quad (1-11)$$

式中, α 为速度 $\mathbf{v}$ 与 x 轴的夹角。

在国际单位制中, 速度的单位是 m/s (米每秒)。

第三节 加 速 度

一、瞬时加速度

一般来说,速度的大小和方向都随时间 t 在变化,故可表示为矢量函数。即

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(t)$$

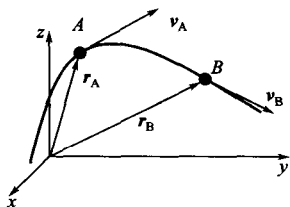
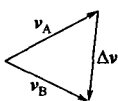


图 1-5 速度的增量



这表示质点做变速运动。在质点的变速运动中,为了描述速度 $\mathbf{v}$ 的变化,引入加速度这一物理量。如图 1-5 所示,质点做曲线运动。在 t 时刻质点位于 A 点,速度为 $\mathbf{v}_A$, $t + \Delta t$ 时刻运动到 B 点,速度为 $\mathbf{v}_B$,则 Δt 时间内质点的速度的增量为 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$ 。速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 与时间 Δt 之比称为质点在这段时间的平均加速度,用 $\bar{\mathbf{a}}$ 来表示

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

平均加速度 $\bar{\mathbf{a}}$ 为一矢量,大小为

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

其方向与 $\Delta \mathbf{v}$ 相同。

为了精确描述质点在每一时刻速度的变化,令 Δt 逐渐缩短而趋于零,取平均加速度的极限,这一极限就称为质点在 t 时刻或相应位置的瞬时加速度,简称为加速度,

$$\text{即} \quad \mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-12a)$$

因为 $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$, 所以上式可改写为

$$\mathbf{a} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-12b)$$

即加速度等于速度对时间的一阶导数,或等于位矢对时间的二阶导数。加速度是一个矢量,其大小为

$$a = |\mathbf{a}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \mathbf{v}|}{\Delta t}$$

其方向是 Δt 趋近于零时 $\Delta \mathbf{v}$ 的极限方向。

【例题 2】 一质点运动轨迹为抛物线 $y = -x^2 - 2x$, 其中 x 、 t 的单位分别为 m 和 s。求: $x = -4$ 时 ($t > 0$) 粒子的速度、速率和加速度。

解 当 $x = -4$ 时, $t = 2$

$$v_x = \frac{dx}{dt} \Big|_{t=2} = -2t \Big|_{t=2} = -4 \text{ m/s}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} \Big|_{t=2} = -4t^3 + 4t \Big|_{t=2} = -24 \text{ m/s}$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(-4)^2 + (-24)^2} = 4\sqrt{37} \text{ m/s}$$