



高等学校 21 世纪规划教材

大学物理

上册

杨庆芬 张 闪 李同锴 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校 21 世纪规划教材

大学物理

上册

杨庆芬 张 闪 李同锴 主编

中国铁道出版社

内 容 提 要

本书是大学工科物理的基础教学用书。全书分上、下两册,上册内容包括力学、热学、电磁学;下册内容包括振动和波动、波动光学、近代物理基础。本书既是多年工科物理教学实践的一次总结,也是教学改革的一次尝试。

全书内容精练,难易适度,力图在有限的课时内完成大学物理基本内容的传授,同时又能扩大知识面,培养学生的创新能力。本书每章均附有阅读材料,在近代物理基础篇中加入了选学内容:原子核物理和粒子物理简介、广义相对论和宇宙学简介、高新技术物理基础。另外,为了能在传授知识的同时培养学生的科学素养,还选编了部分科学家简介。

本书适合作为高等院校理工科非物理类专业大学物理课程的教材,也可作为高校人文类专业的物理课程教材或参考书,亦可作为高校自学考试、函授教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.上册/杨庆芬主编;张闪,李同锴编著.

北京:中国铁道出版社,2006.11

高等学校 21 世纪规划教材

ISBN 978-7-113-07727-3

I. 大... II. ①杨...②张...③李... III. 物理学

- 高等学校 - 教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 142333 号

书 名:大学物理·上册

作 者:杨庆芬 张 闪 李同锴 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)

策划编辑:李小军

责任编辑:李小军 徐盼欣 编辑部电话:010-83550579

封面设计:路 瑶

印 刷:北京市彩桥印刷有限责任公司

开 本:730×988 1/16 印张:22.5 字数:456 千

版 本:2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~5000 册

书 号:ISBN 978-7-113-07727-3/O·155

定 价:28.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社计算机图书批销部调换。

前 言

本书内容符合国家教育部关于“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的基本要求,是编者总结多年的教学实践经验,参照原国家教委颁发的《高等学校工科本科物理课程教学基本要求(1995 年修订版)》,为高等工科院校各专业而编写的大学物理课程教材。

本书在编写过程中,力求突出以下特点:

1. 教材体系合理完整,重点突出,内容全面.在力学部分,为了提高起点,精简了部分内容,并及早地把矢量、微积分知识应用到物理中,培养学生用高等数学分析和解决物理问题的能力.本书还对教学内容做了适当调整:振动和波动内容放在波动光学之前讲,从而使位相概念得到很好的衔接;狭义相对论内容放在了近代物理基础一篇中讲,这样更加符合物理学发展的时间顺序,突出了相对论和量子力学在近代物理中的两大理论支柱作用。

2. 在系统阐述基本概念、基本规律、基本方法的同时,加强了物理学思想方法的讲授,引导和培养科学的科学创新意识和科学素养.本书在基本教学内容之外,在一些章节后面还附加了科学家简介和阅读材料,介绍了重要的物理学家的生平和主要科学贡献,以及一些科普知识,希望学生在扩大知识面的同时,在科学素养和思想境界方面也能获得教益。

3. 内容现代化.在确保经典物理内容的同时,加大了近代物理部分的内容.在第六篇中,除去需要讲授的狭义相对论和量子物理基础内容之外,还加入了选学内容:原子核物理和粒子物理简介、广义相对论和宇宙学简介、高新技术物理基础.在编排这些选学内容时,为了突出物理图像的建立,剔除了繁琐的数学推导,力求做到浅显易懂,旨在扩大学生的知识面和激发求知欲.另外,在附加的阅读材料内容中,还介绍了如混沌、孤子、磁悬浮、液晶等现代热点内容。

本教材分为上、下两册,共 21 章.上册内容为力学、热学、电磁学,下册内容为振动与波动、波动光学、近代物理学.本书由杨庆芬、张闪、李同锴主编,参加本书编写工作的有:杨庆芬、张闪、李同锴、乔治、吴文旺、张彦立、闫宗林、史严、崔建坡、王振彪、刘虎、赵秋宇。

江南大学李果华教授对全书进行了严格的审阅,提出了许多宝贵意见.在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,参考和借鉴了一些国内外的同类优秀教材,使本书编者受益匪浅,在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有许多错误和疏漏,恳求读者批评指正。

编 者

2006.8

目 录

绪 论	1
-----------	---

第一篇 力学基础

第一章 质点运动学	5
§ 1-1 参考系与坐标系 质点	5
§ 1-2 运动的描述	6
§ 1-3 曲线运动的描述	14
§ 1-4 相对运动	21
思 考 题	22
习 题	23
科学家简介 伽利略	25
阅读材料 A 全球定位系统和质点运动学	27
第二章 质点动力学	30
§ 2-1 牛顿运动定律	30
§ 2-2 惯性系与非惯性系 惯性力	39
§ 2-3 动量 动量守恒定律	42
§ 2-4 功 动能 动能定理	52
§ 2-5 保守力的功 势能	56
§ 2-6 功能原理 机械能守恒定律	61
§ 2-7 碰 撞	66
思 考 题	70
习 题	70
科学家简介 牛 顿	74
阅读材料 B 行星与人造地球卫星	75
第三章 刚体的转动	79
§ 3-1 刚体运动的描述	79
§ 3-2 力矩 转动定律 转动惯量	81
§ 3-3 角动量 角动量守恒定律	88
§ 3-4 刚体绕定轴转动的动能定理	94
思 考 题	99
习 题	100

科学家简介 开普勒	103
阅读材料 C 旋进与导航	105

第二篇 热 学

第四章 气体动理论	108
§ 4-1 平衡态 温度 理想气体状态方程	108
§ 4-2 气体动理论的压强公式	111
§ 4-3 理想气体的温度公式	113
§ 4-4 能量均分定理 理想气体的内能	115
§ 4-5 麦克斯韦气体分子速率分布律	119
§ 4-6 玻耳兹曼密度分布	123
§ 4-7 分子平均碰撞次数和平均自由程	125
* § 4-8 非平衡态下的迁移现象	128
思考题	131
习 题	131
科学家简介 玻耳兹曼	133
阅读材料 D 大气与生物圈	135
第五章 热力学基础	138
§ 5-1 准静态过程 功 热量 内能	138
§ 5-2 热力学第一定律及其在理想气体等值过程中的应用	141
§ 5-3 气体的摩尔热容	145
§ 5-4 理想气体的绝热过程 * 多方过程	147
§ 5-5 循环过程 卡诺循环	152
§ 5-6 热力学第二定律和卡诺定理	158
§ 5-7 热力学第二定律的统计意义 熵	162
思考题	164
习 题	165
科学家简介 克劳修斯	168
阅读材料 E 熵与能源 熵与信息	169

第三篇 电 磁 学

第六章 真空中的静电场	173
§ 6-1 电荷 库仑定律	173
§ 6-2 静电场 电场强度	177
§ 6-3 电场线 高斯定理	186
§ 6-4 静电场的环路定理 电势	195

§ 6-5 等势面 场强与电势的微分关系	202
§ 6-6 带电粒子在电场中的受力及其运动	205
思考题	208
习 题	209
科学家简介 库 仑	210
阅读材料 F 电子的发现和电子电荷量的测定	212
第七章 静电场中的导体和电介质	214
§ 7-1 静电场中的导体	214
§ 7-2 电介质的极化	223
§ 7-3 有电介质时的高斯定理	227
§ 7-4 电容 电容器	230
§ 7-5 静电场的能量	236
思考题	239
习 题	240
科学家简介 欧 姆	241
阅读材料 G 新型智能材料——电流变液	243
第八章 电流与磁场	245
§ 8-1 电流 电源电动势	245
§ 8-2 电流的磁场	249
§ 8-3 磁场的性质	260
思考题	268
习 题	268
科学家简介 奥斯特	272
第九章 磁场对电流的作用	274
§ 9-1 磁场对载流导线的作用	274
§ 9-2 磁力的功	280
§ 9-3 带电粒子在磁场中的运动	282
思考题	289
习 题	290
科学家简介 电学中的“牛顿”——安培	292
阅读材料 H 电磁轨道炮	293
第十章 磁场中的磁介质	295
§ 10-1 磁介质的磁化 磁化强度矢量	295
§ 10-2 有磁介质时磁场的基本规律	299
§ 10-3 铁磁质	301
思考题	304

习 题	304
科学家简介 从学徒工到科学家——法拉第及其对电磁学的贡献	305
阅读材料 I 地磁场	306
第十一章 变化的电磁场	309
§ 11-1 法拉第电磁感应定律	309
§ 11-2 动生电动势	314
§ 11-3 感生电动势 感生电场	318
§ 11-4 自感和互感	325
§ 11-5 磁场的能量	331
§ 11-6 电磁场的理论基础	334
思 考 题	339
习 题	340
科学家简介 麦克斯韦	343
阅读材料 J 磁悬浮列车	344
习题答案	347

绪 论

物理学是研究物质结构、物质相互作用和运动形态的一门学科。物理学的研究目的在于认识物质运动的基本性质和相互转化规律,揭示物质不同层次的内部结构。物理学作为一门自然科学,在科学技术发展中发挥着极其重要的作用;物理学也是一门理论与实践高度结合的科学,它有一套全面系统的科学研究方法。因此,学好物理学,对每个将要从事科学技术工作的人来说都是非常重要的。

一、物理学的发展

16 世纪以前,人们对物理学的知识还只是零碎的,物理学还未能形成一门独立学科。进入 16 世纪以后,随着数学的进步和新的实验手段的出现,物理学得到迅速发展,成为一门独立的学科。之后,物理学的发展经历了以下的历程:

1. 1619 年,开普勒的行星三定律(即轨道定律、面积定律和周期定律)建立。启示人们必须对观测数据进行理论分析,才能找到事物运动的内在规律。

2. 1638 年,伽利略的《两门新科学的对话》出版,其中讨论了惯性原理、自由落体运动、斜面上物体的运动、抛射体的运动等问题。创立了对物理现象进行实验研究并把实验方法与数学方法和逻辑论证相结合的科学方法,有力地促进了物理学的发展。

3. 1687 年,牛顿出版《自然哲学的数学原理》。牛顿在书中系统总结了万有引力定律和牛顿运动三定律,并运用发明的微积分建立了经典力学完整而严密的优美体系,这是物理学史上第一次大的知识综合,标志着经典力学体系的建立。

4. 到 19 世纪 50 年代,在对蒸汽机效率的深入研究过程中,建立了热力学第一和第二定律,从而奠定了经典热力学的基础。同时,经典统计热力学把热运动的宏观现象和微观机制联系起来,在力学规律的基础上揭示了新的统计规律,这是经典物理学的又一次大综合。

5. 19 世纪是人类的电磁学世纪。库仑、奥斯特、安培、法拉第等人在电、磁及电磁相互作用等方面的重大发现奠定了现代电工学的基础;麦克斯韦总结了电磁现象的基本规律,建立了经典电磁场理论,揭示了电、磁、光现象的统一性,完成了经典物理学的第三次大综合。

6. 20 世纪初,量子论和相对论相继建立,物理学在微观领域和高速领域的研究全面展开,进入了近代物理的新纪元。

今天,物理学的研究范围迅速扩大,并且仍在不断深入,人们在粒子物理学、原子核物理学、凝聚态物理学、原子分子物理学、光学、等离子体物理学、生物物理学、宇宙学和各个交叉学科中,都在不断地取得令人瞩目的成就。

二、物理学与科学技术

在过去的几百年中,物理学研究的重大突破直接导致了科学技术的飞跃发展. 17 世纪,由于力学和热学理论的发展和不断完善,以蒸汽机为代表的各种动力设备相继问世,极大地促进了生产力的发展,被称为第一次技术革命;19 世纪,电磁理论的发展直接促成了以电力和无线通信为标志的第二次技术革命,把人类带入了电气时代;20 世纪,半导体、计算机、核磁共振、激光等技术的发明则是量子力学微观理论的直接成果,被称为信息革命的第三次技术革命正在对人类的生产生活产生着巨大影响.

当然,科学技术的进步也反过来推动着物理学的发展. 例如,蒸汽机发明之后,人们在对其效率的研究中总结出了热力学第二定律,从而使热学理论进一步完善;计算机的飞速发展,使计算物理异军突起,成为与理论物理、实验物理鼎足而立的一个分支;没有加速器和碰撞机技术的不断研发,也就没有粒子物理的深入研究.

应当指出的是,迄今的大多数工程技术,包括航空航天技术,仍然以经典物理学为基础;而 20 世纪 30 年代以来,磁性材料、超导体、电子显微镜、激光、核能、纳米材料等方面的技术已密切依赖于以相对论和量子物理为基石的近代物理学了. 因此,对于将来的工程技术人员,要掌握现代生产技术就必须具备一定的物理知识.

三、物理学研究方法

在物理学的发展过程中,还积累了十分有效的研究方法,这些研究方法对人类认识世界的贡献甚至不亚于物理知识本身.

深入观察现象,抓住主要因素进行实验;对观测结果进行分析,提出假设,建立模型;在模型基础上应用数学工具形成理论;在实践中检验和修正理论,这就是物理学的研究方法. 这也是人们公认的科学研究的-般方法,在其他科学领域和工程实际中,这种研究方法常常起到理论指导作用.

在物理学研究中,还经常用到演绎法、归纳法、定性和半定量分析甚至直觉和想像力. 无论采用何种手段和方法,有一点是不变的,这就是实践是检验真理的唯一标准. 实验是物理学理论之源,也是检验理论的最终标准. 实验是指把自然界和生产实践中的物理现象在人工控制的条件下有选择、有控制地再现,以便掌握其中规律性的联系. 实验结论可以用数学定量描述,实验过程可以由任何人重新实现,这是物理实验的显著特点,也是物理理论令人信服的力量所在.

在物理学研究中,物理模型起着非常重要的作用. 物理模型是以客观原型为依据,突出反映原型中对所研究问题起决定作用的因素,忽略其他因素而建立的理论模型. 物理模型具有广泛的适用性;另一方面,物理模型是对客观原型的近似描写,有一定的适用条件和适用范围. 在学习中,这一点必须充分理解.

物理学始终贯彻实事求是的精神,在它的发展过程中,总是不断根据新的观测事实对物理学理论进行修正,甚至重新建立新的理论. 因此,物理学是一门充满活力和

不断创新的学科。

学习物理,不但要学习知识,还要学习物理学中的科学态度和研究方法,正确的态度和方法可以使人受益终身。正如结构生物学家米歇尔所说:“对我影响最大的是我的物理老师,她教我如何思考问题,避免走弯路,使我的思想具有逻辑性。”

四、学习物理的几点建议

物理学是大学理工科各专业的一门重要的基础课,应该牢固掌握物理学的基本理论知识和基本研究方法,为专业知识的学习打下必要的理论基础。为此提出如下建议:

1. 在学习物理知识的同时,要注意物理思想和方法的学习。物理学中用来解决问题的方法和手段,不仅对处理物理学本身的问题有用,而且对处理相关学科的问题也具有指导意义。

2. 注意培养学习能力和创新能力。在科学技术飞速发展的今天,新技术、新产品层出不穷,日新月异,要想与时俱进,就要终身学习。而终身学习不可能都在学校里完成,也不可能都有老师指导,所以必须学会自主学习,增强自学能力,同时运用物理学的思想和方法,增强分析问题、解决问题的能力,增强创新能力,从而在今后的学习和工作中立于不败之地。

3. 注意培养科学素养,确立正确的人生态度。在学习物理的过程中,物理学家们实事求是、不断探索、为科学献身的崇高思想和高尚品德也应该是我们学习的内容。只有确立终身为科学技术事业而奋斗的人生信念,并且不断探索和攀登,才有希望到达光辉的顶点。

让我们以1999年3月召开的第23届国际纯粹与应用物理联合会(IUPAP)代表大会通过的决议作为结束语。

1. 物理学是一项激动人心的智力探险活动,它鼓舞着年轻人,并扩展着我们关于大自然知识的疆界。

2. 物理学发展着未来技术进步所需的基本知识,而技术进步将持续驱动着世界经济发动机的运转。

3. 物理学有助于技术的基本建设,它为科学进步和发明的利用,提供所需训练有素的人才。

4. 物理学在培养化学家、工程师、计算机科学家以及其他物理科学和生物医学科学工作者的教育中,是一个重要的组成部分。

5. 物理学扩展和提高我们对其他学科的理解,诸如空间科学、地球科学、农业科学、化学、生物学、环境科学以及天文学和宇宙学(这些学科对世界上所有民族都是至关重要的)。

6. 物理学提供发展应用于医学的新设备和新技术所需的基本知识,如计算机层析术(CT)、磁共振成像、正电子发射层析术、超声波成像和激光手术等,改善了我们的生活质量。

第一篇 力学基础

力学是物理学的一个分支,物理学的建立就是从力学开始的.以牛顿定律为基础的经典力学是整个物理学的理论基础,经典力学的创立对其他学科的发展影响深远.近代物理中的相对论力学和量子力学的形成都受到经典力学的影响,它们的许多概念和思想都是经典力学概念和思想的发展与改造.不仅如此,经典力学的基础研究不断深化和丰富了人类对基本自然规律的认识,不断为其他学科的发展提供认识工具.目前,经典力学的物理内容仍在深化,经典力学在与其他学科的前沿交叉处迅速发展,形成了多种新的力学分支学科.

经典力学不仅具有很强的基础性,同时又具有广泛的应用性.在一般的工程技术领域,诸如机械工程、土建与水利工程、爆炸工程、抗震工程、航空与航天技术以及航海技术等,经典力学仍保持着充沛的活力,它的实用性也是我们学习经典力学的一个重要原因.

力学的研究对象是物体的机械运动.经典力学研究的是弱引力场中宏观物体的低速运动.通常把经典力学分为运动学和动力学.运动学只研究物体运动的规律,不涉及运动状态变化的原因.动力学则研究物体间的相互作用及其对物体运动的影响.本书经典力学的内容包括质点运动学、质点动力学和刚体力学三部分.

第一章 质点运动学

机械运动是指物体的位置随时间的改变。机械运动是最简单、最基本的运动。研究物体机械运动的规律首先要知道如何描述机械运动。本章主要阐述三个问题：一是如何描述质点的运动状态，强调矢量描述方法，介绍不同坐标系中运动的描述；二是运动方程问题，这是运动学的核心问题，着重讲解应用运动方程处理运动学问题的物理思想和方法；三是运动描述的相对性问题，介绍经典力学的坐标变换、速度变换和加速度变换，了解经典力学的时空观。

§ 1-1 参考系与坐标系 质点

一、参考系与坐标系

宇宙中的任何物体都处于永恒的运动中，绝对静止的物体是不存在的。运动是绝对的，但运动的描述却是相对的。同一个物体相对于不同的参考标准可能具有不同的运动状态，因此，要描述物体的运动状态，需要先说明选取的参考标准才有意义。例如，坐在行进中列车上的人相对于车厢来说是静止的，但相对于地面来说却是运动的。为描述一个物体的运动而选择的参考标准叫做参考系。

同一物体的运动，由于所选的参考系不同，对其运动的描述就会不同。从地面上看来铅直下落的雨点，在行驶着的火车车厢里的旅客看来却是向后倾斜的。因此，当我们研究某一物体的运动时，必须明确指出这种运动是相对于哪一个参考系来说的，否则就无法确定物体的运动情况。

从运动的描述来说，参考系的选择主要取决于问题的性质和研究的方便，是完全任意的。在研究地面上物体的运动时，若不作特别说明，都选地面或相对地面静止的物体作为参考系。若要研究宇宙飞船绕太阳的运动，则应选太阳作为参考系。

参考系选定后，要想定量地描述物体的位置及其随时间的变化，就必须在参考系上建立适当的坐标系。在力学中常用的是直角坐标系，根据需要，我们也可以选用极坐标系、自然坐标系、球坐标系等。一般把坐标系的原点和轴固定在参考系上，运动物体的位置就由它在坐标系中的坐标值决定。这样，物体相对坐标系的运动也就是相对于参考系的运动。当参考系选定后，物体运动的性质、轨道形状等也就确定了，且不会因为坐标系的选择不同而有所不同。坐标系选择得当，可以使计算简化。

二、质点

任何物体均有形状及大小，但在有些问题中，物体的形状及大小对问题的讨论影

响不大,可以忽略.这时便可将物体抽象成为一个只有质量而无形状大小的几何点,这样的点称为质点.由两个或两个以上质点所组成的系统称为质点系.

一个物体能否被看作质点须视研究问题的性质而定.一般而言,当物体的尺度远小于它运动的空间范围时,物体上的每一点的运动情况均可视为相同,就可以把这个物体看作一个质点.又如所研究的问题不涉及物体的转动及形变,这时也可将物体视为一个质点.什么样的物体可以视为质点,要由所研究问题的具体条件来定.例如,当研究地球绕太阳公转规律时,由于地球直径($1.28 \times 10^4 \text{ km}$)比地球到太阳的距离($1.50 \times 10^8 \text{ km}$)小得多,因而可以忽略地球的线度和形状,这时可将地球视为质点;但若研究地球的自转时,显然就不能将地球视为质点了,必须把它视为球体.

质点只是在几何上作为一个点来处理,但它并不是一个纯粹的点,它仍然是一个物体,具有质量、动量、能量等各种物理属性,只是由于它在几何上被视为一个点,这些量不是分布在有限的体积范围内而是集中在一个点上.

如果物体在所研究的问题中不能被视为质点,则可设法将它划分成许多个线度极小的质量元,质量元中每一点的运动均可认为相同,这时质量元便可视为质点;而整个物体则可视作质点系.也就是说,质量连续分布的物体可以当作质点系来处理.

质点是一个理想化模型.在物理中常常用理想模型来代替实际研究的对象,以突出主要因素,这在一定条件下简化了问题的处理,突出了主要矛盾.这是物理学中常用的研究方法.

§ 1-2 运动的描述

一、位置矢量

为了表示运动质点的位置,首先应该选取一个参考系,然后在参考系上选定坐标系的原点和坐标轴,参看图 1-1.

设某时刻质点在 P 点,则 P 在直角坐标系中的位置可由 P 所在点的三个坐标 x 、 y 、 z 来确定;或者用从原点 O 到 P 点的有向线段 $\overrightarrow{OP} = \boldsymbol{r}$ 来表示,矢量 $\boldsymbol{r}$ 叫做位置矢量,简称位矢.相应地,坐标 x 、 y 、 z 也就是位矢 $\boldsymbol{r}$ 在坐标轴上的三个分量.

在直角坐标系中,位矢 $\boldsymbol{r}$ 可以表示成

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

式中, $\boldsymbol{i}$ 、 $\boldsymbol{j}$ 、 $\boldsymbol{k}$ 分别表示沿 x 、 y 、 z 三个坐标轴的单位矢量.位矢的大小 r 由下式决定

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

位矢 $\boldsymbol{r}$ 的方向由下述方向余弦决定

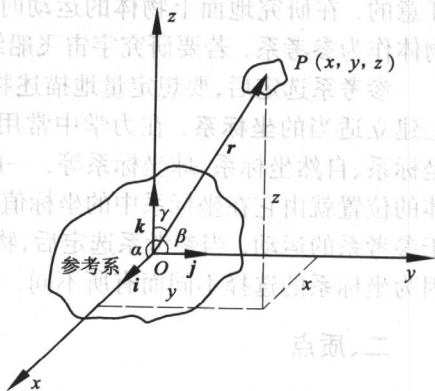


图 1-1 直角坐标系中物体的位置

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

式中, α, β, γ 分别表示位矢 r 与 x, y, z 三个坐标轴的夹角。

二、运动方程

质点的机械运动是质点的空间位置随时间而变化的过程, 这时质点的位矢 r 是时间 t 的函数。表示运动过程的函数式称为运动方程, 可以写作

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-3a)$$

在直角坐标系中, 运动方程表示为

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1-3b)$$

运动方程包含有质点如何运动的全部信息。已知质点的运动方程, 就可以求出质点在任意时刻的位置, 确定质点在任意时刻的速度和加速度, 还可以由各时刻的坐标值描述出质点在空间的运动路线。我们把运动质点在空间所经过的路径称为轨道。从运动方程中消去 t 即可得到轨道方程。

由上可知, 运动方程表明 r 与 t 的函数关系, 而轨道方程则是位置坐标 x, y, z 之间的关系式, 两者是不同的。

例如, 已知某质点的运动方程为

$$x = \sin \frac{\pi}{3} t, \quad y = \cos \frac{\pi}{3} t, \quad z = 0$$

式中, t 以 s 计, x, y, z 以 m 计。从 x, y 两式中消去 t 后得轨道方程

$$x^2 + y^2 = 1, \quad z = 0$$

以上两式表示质点在 $z = 0$ 的平面内做以原点为中心、半径为 1 m 的圆周运动。

三、位移

要研究质点的运动, 不仅要知道它的位置, 更重要的是要知道它的位置变化。设质点沿图 1-2 所示的曲线 AB 运动, 在时刻 t , 质点位于 A 点, 位置矢量为 r_A , 在时刻 $t + \Delta t$, 质点运动到 B 点, 位置矢量为 r_B 。在 Δt 时间间隔内质点的位置变化可用由 A 到 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示, 称为质点在时间 Δt 内的位移矢量, 简称位移, 即

$$\overrightarrow{AB} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = \Delta \mathbf{r} \quad (1-4)$$

上式说明, 质点在某一时间内的位移等于同一时间内位置矢量的增量。位移是描述物体位置变化大小和方向的物理量, 它是矢量, 它的运算遵守矢量加法的平行四边形法则。

必须注意, 位移仅表示质点在一段时间内位置变化的总效果, 它并不代表质点实际所通过的路程。在图 1-2 中, 位移是有向线段 $\overrightarrow{AB}$, 是矢量, 它的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 为割线 AB

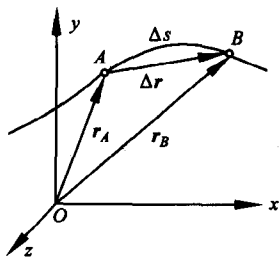


图 1-2 曲线运动中的位移

的长度;路程是标量,即曲线 AB 的长度 Δs . 一般说来, $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta s$, 仅在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 才有 $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta s$. 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 点又折回到 A 点, 显然该质点所经过的路程为 A 与 B 间距离的两倍, 而位移却为零. 只有质点做单向直线运动时, 才有 $\Delta s = |\Delta \mathbf{r}|$.

在直角坐标系中, 位移的表达式为

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1-5)$$

位移的模为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1-6)$$

位置矢量和位移在量值上都表示长度, 国际单位制(SI)中单位为米, 符号 m .

四、速度

为了描述质点的运动, 不仅要知道质点的位移, 还需知道质点运动的快慢程度和方向, 为此我们引入速度这一物理量.

如图 1-2 所示, 在时刻 t 到 $t + \Delta t$ 的这段时间内, 质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$. $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值称为质点在 Δt 时间内的平均速度, 即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\overrightarrow{AB}}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-7)$$

平均速度是矢量, 其方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同, 大小为 $\frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t}$.

显然, 用平均速度描述物体的运动是比较粗糙的, 因为在 Δt 时间内, 质点各个时刻的运动情况不一定相同, 质点运动的快慢和方向也是可以不断变化的, 而平均速度所反映的只是一段时间内位移的平均变化.

为了精确地描述质点在某一时刻或某一位置的运动情况, 我们可将 Δt 无限地减小, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 将趋近于一个确定的极限矢量, 这个极限矢量确切地描述了质点在某时刻或某一位置时质点运动的快慢程度和方向. 我们定义质点在 t 时刻的瞬时速度(以下简称速度)为

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-8)$$

瞬时速度等于当时间趋近于零时平均速度的极限值, 即速度等于位置矢量对时间的一阶导数.

速度的方向就是在 t 时刻质点的运动方向, 当 Δt 趋近于零时, 由位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向确定, 即沿质点所在处轨道的切线方向, 并指向质点前进的一方.

速度是矢量, 具有大小和方向. 描述质点运动时, 我们也常采用一个叫做速率的物理量. 速率是标量, 等于质点在单位时间内所行经的路程, 而不考虑质点运动的方向. 如图 1-2 所示, 在 Δt 时间内质点所行经的路程为曲线 AB , 其长度为 Δs , 那么, Δs 与 Δt 的比值就称为在时间 Δt 内质点的平均速率, 即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-9)$$

平均速率与平均速度是两个不同的物理量,平均速度的量值与平均速率也不一定相等.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,平均速度为零,而质点的平均速率则不等于零.但在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限条件下,曲线 AB 的长度 Δs 与直线 AB 的长度 $|\Delta \mathbf{r}|$ 相等,即在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $ds = |d\mathbf{r}|$,所以瞬时速率

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

即瞬时速度的大小即为瞬时速率.

在直角坐标系中,由于

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

所以,速度 $\mathbf{v}$ 可表示为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1-11)$$

式中

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt}$$

是速度在 x 、 y 、 z 轴的分量.可见,速度 $\mathbf{v}$ 在三个坐标轴上的分量等于相应坐标对时间的一阶导数.速度的大小也可以表示为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-12)$$

速度的方向由下述方向余弦确定

$$\cos\alpha = \frac{v_x}{|\mathbf{v}|}, \quad \cos\beta = \frac{v_y}{|\mathbf{v}|}, \quad \cos\gamma = \frac{v_z}{|\mathbf{v}|}$$

式中, α 、 β 、 γ 分别表示速度 $\mathbf{v}$ 与 x 、 y 、 z 三个坐标轴的夹角.

在国际单位制(SI)中速度的单位是米每秒,符号 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

五、加速度

在一般情况下,质点的运动速度是经常改变的,可以是速度的大小在改变,也可以是速度的方向在改变,还可以是速度的大小和方向同时在改变.为了描述质点的速度变化情况,我们引入加速度这个物理量.

如图 1-3 所示,设在 t 时刻,质点在 A 点,速度为 $\mathbf{v}_A$,在 $t + \Delta t$ 时刻,质点到达 B 点,速度为 $\mathbf{v}_B$,则在时间 Δt

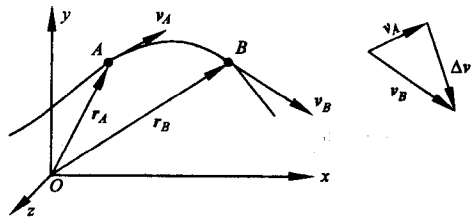


图 1-3 速度的增量