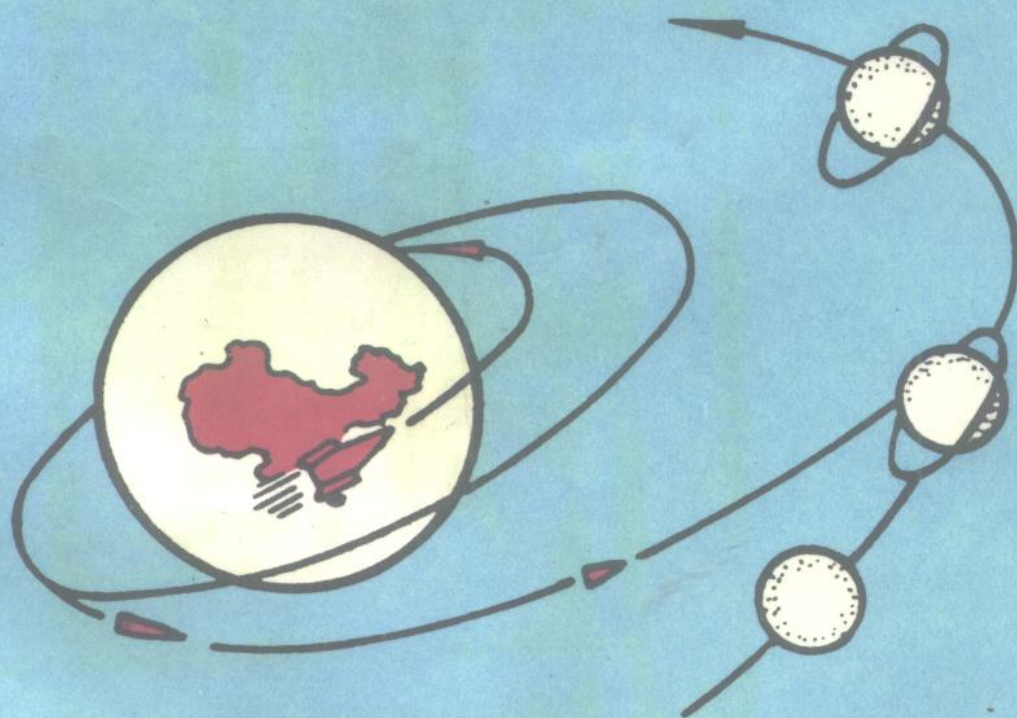


高等学校教材

# 工科大学物理学

上册

韩树东 洪佩智 主编



北京理工大学出版社

# 工科大学物理学

(上册)

韩树东 洪佩智 编  
陈爱民 孙汉宝

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

### 内容简介

本书是作者根据多年积累的教学经验与研究成果并借鉴国内外部分教材编写成的。全书共六篇二十三章,分上、下两册。上册包括力学、狭义相对论、振动和波、气体动理论与热力学基础;下册包括电磁学、波动光学、量子物理基础和现代工程技术物理基础。总学时为 130~150 学时,带 \* 内容未记入学时。

本书在提高大学物理教材的科学性、教学性和内容的现代化方面作了有益探索。除基本内容外,还专题介绍了物理学在工程技术中的应用和 12 位著名科学家的传略,以开阔学生的思路、激发探索和创新精神。

本书内容的选取和讲述的深度是以国家教委制订的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》为依据的,可作为工科大学本、专科的物理课程教材或参考书,也可供各类成人高等院校的相近专业选用。

### 工科大学物理学

上册

韩树东 洪佩智 主编

北京理工大学出版社出版

(北京海淀区白石桥路 7 号 邮政编码:100081)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

沈阳工业学院印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:15.3125 字数:369.72 千字

1995 年 5 月第一版 1995 年 5 月第一次印刷

印数:1—3200 册 定价:11.90 元

ISBN 7-81013-973-8/O · 105

## 出版说明

遵照国务院国发〔1978〕23号文件精神,中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来,在广大教师的积极支持和努力下,在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务,共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革及提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要,特别是国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新及利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、建立质量标准及明确岗位责任,制订了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点,成立了十个专业教学指导委员会,以更好地编制兵工类专业教材建设规划,加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针。兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的,专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查,认为符合兵工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套,为教学质量的提高和培养国防现代化人才,为促进兵工类专业科学技术的发展,都将起到积极的作用。

本教材由东北大学王燕生教授主审,经中国兵器工业总公司兵总教材编审室审定。

限于水平和经验,这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处,希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1994年3月

## 序

由韩树东、洪佩智主编的这套教材是从立项研究开始的。90年秋,编写小组以“工科大学物理合理结构研究”为题,立项研究,经过2年时间,写出了十几万字的“工科大学物理教材纲要”,92年秋,通过了专家组的科研成果鉴定。我阅读过这本“纲要”,如今这套教材的编写工作又完成,即将出版,令人十分高兴。对编者的辛勤劳动和严肃认真的态度感到由衷的钦佩,一套基础课教材,经历了这样的立项、研究、鉴定、编写、修改不断优化的过程,历时4年,最后由兵器部教材编审室组织完成编写出版,这种作法还不多见,很值得提倡。而且,教材的主编和编者都是长期从事第一线教学有较深造诣的教授和副教授,因此,这套教材无疑是教学经验与科学研究结合的硕果,也是集体智慧和辛勤汗水的结晶。

该教材符合国家教委制定的“工科大学物理教学基本要求”;物理量名称、单位和符号都与国家最新标准一致。最值得提及的是这套教材具有下列鲜明的特色:

(1) 教材按物理规律自身的相互联系自然形成体系,按教学逻辑编排内容,结构合理,便于高效率教学。

(2) 根据各章内容的不同特点,确定与之相适应的写法,选取恰当的起点,以便实现既能与中学物理顺利的衔接,又能突出大学物理的本色。使学生能在较短时间内完成从中学到大学思维方式的转变,学好最需要掌握的中心内容、重点内容。

(3) 特别注重物理本质的论述,分析问题深入浅出,思路清晰,语言简练,能使学生思维迅速到位,深入透彻的理解物理含义。

(4) 例题、习题、思考题紧密配合理解教学基本内容,掌握基本方法;而且,新编题较多内容新颖、难易适度、复盖面宽、针对性强,有效地帮助学生消化理解物理内容,提高分析问题解决问题的能力。

(5) 用比较浅显的语言论述了一些现代工程技术中的物理专题,这不仅开扩了学生的知识视野,而且还能激发学生学习物理学的热情。

我希望这套教材早日与广大读者见面,相信它将会为教学改革、提高教学效率作出贡献,显示出它应有价值。

余瑞璜

1995年3月于吉林大学

## 前 言

大学物理是工科大学生必修的一门基础理论课。本书是根据本课程的基本任务和现代科技发展的需要,以国家教委制订的《高等工业学校大学物理课程教学基本要求》为依据,结合编者多年积累的教学经验和研究成果,并借鉴国内外部分教材编写而成。

本书编写的宗旨是:突出基本内容与重点内容,改善结构和叙述,使教材利于提高教学效率,在规定的时间内学好更多的物理知识,培养更强的分析问题和解决问题的能力。

本书力求体现如下特点:

(1) 内容安排不受历史发展过程的限制,从有利于教学出发,按物理规律自身的相互联系所确定的关系——教学逻辑形成体系。

(2) 叙述内容中心明确,思路清晰,语言简练,概念、规律准确,论证注重理解物理内容,不过分追求系统与严密的数学推导。

(3) 提高起点。凡中学大纲列入的内容,本书不作简单的重复;中学能解的习题,除了少数因讲述基本原理、基本方法需要外,一般也不再选用。

(4) 加强例题、思考题、习题的针对性。通过例题讲清基本规律应用的方法和步骤;尽可能地选取最能体现物理内容,运用高等数学计算的典型例题。习题是例题的补充,供学生练习,思考题供学生思考,都以消理解物理内容、训练物理方法为主要目的。

(5) 在教材内容现代化方面作了有益探索。本书尝试用大学物理课程语言讲述现代工程技术中的物理基础专题,内容涉及超导、激光、全息与非线性光学等;还介绍了物理学在现代工程技术中的应用,如卫星的发射、超声波的应用、温度的测量、压电体与铁电体以及磁在信息技术中的应用等;此外还介绍了12位著名科学家的生平,以激发学生的探索、创新和敬业精神。

本书一律采用国际单位制,各物理量的名称、符号也均与国际标准化组织(ISO)规定的国际标准一致。

本书参考总学时为130~150学时,带\*内容未计入学时,可根据需要选用。

本书上册由韩树东教授、洪佩智副教授主编。第1~6章由陈爱民副教授执笔,第7~10章由韩树东执笔,科学家介绍、物理学与技术由孙汉宝副教授执笔;本书下册由洪佩智副教授、韩树东教授主编,第11~12章由楼惠珍副教授执笔,第13~15章由洪佩智执笔,第16~19章由赵学荣副教授执笔,第20~23章由王群善教授执笔。

全书由韩树东、洪佩智统稿,由东北大学物理系王燕生教授主审。王先生对全书原稿进行了仔细的审阅,提出了许多宝贵的指导性意见和建议,对保证本书质量起到重要作用,在此表示衷心感谢。

由于编者的能力、水平有限。编写时间仓促,本书不妥之处在所难免,衷心希望使用者多提出宝贵意见。

编者

1993. 6

# 目 录

## 第一篇 力学的物理基础

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 引言.....                 | 1  |
| 第一章 质点运动学.....          | 1  |
| § 1.1 质点 参照系和坐标系 .....  | 2  |
| § 1.2 位置矢量 速度和加速度 ..... | 2  |
| § 1.3 运动函数的建立 .....     | 3  |
| § 1.4 圆周运动 .....        | 6  |
| § 1.5 相对运动 .....        | 8  |
| 思考题 .....               | 16 |
| 习 题 .....               | 16 |
| 第二章 牛顿运动定律 .....        | 19 |
| § 2.1 牛顿运动定律.....       | 19 |
| § 2.2 几种常见的力.....       | 21 |
| § 2.3 力学单位制和量纲.....     | 23 |
| § 2.4 牛顿运动定律的应用.....    | 24 |
| § 2.5 非惯性参照系和量纲.....    | 29 |
| 思考题 .....               | 32 |
| 习 题 .....               | 32 |
| 第三章 动量和角动量 .....        | 35 |
| § 3.1 动量定理.....         | 35 |
| § 3.2 变质量动力学方程 .....    | 40 |
| § 3.3 质心运动定理 .....      | 41 |
| § 3.4 角动量定理.....        | 45 |
| 思考题 .....               | 50 |
| 习 题 .....               | 50 |
| 第四章 机械功和机械能 .....       | 53 |
| § 4.1 机械功.....          | 53 |
| § 4.2 动能和动能定理.....      | 55 |
| § 4.3 势能和势能定理.....      | 57 |
| § 4.4 功能原理.....         | 61 |
| § 4.5 碰撞.....           | 66 |
| 思考题 .....               | 68 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 习 题 .....                | 69  |
| <b>第五章 刚体力学</b> .....    | 72  |
| § 5.1 转动的描述 .....        | 72  |
| § 5.2 转动惯量 .....         | 73  |
| § 5.3 转动定理 .....         | 78  |
| § 5.4 刚体系的角动量定理 .....    | 81  |
| § 5.5 刚体的机械能 .....       | 83  |
| *§ 5.6 圆轮体的纯滚动 .....     | 87  |
| 思考题 .....                | 91  |
| 习 题 .....                | 92  |
| <b>第六章 狭义相对论</b> .....   | 95  |
| § 6.1 伽利略变换 绝对时空观 .....  | 95  |
| § 6.2 爱因斯坦假设 洛伦兹变换 ..... | 97  |
| § 6.3 狭义相对论时空观 .....     | 100 |
| § 6.4 狭义相对论动力学基础 .....   | 104 |
| 思考题 .....                | 109 |
| 习 题 .....                | 109 |

## 第二篇 机械振动和机械波

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第七章 机械振动</b> .....    | 111 |
| § 7.1 简谐振动的基本方程 .....    | 111 |
| § 7.2 简谐振动的描述 .....      | 114 |
| § 7.3 简谐振动的能量 .....      | 119 |
| § 7.4 振动的合成 .....        | 121 |
| § 7.5 阻尼振动 受迫振动 共振 ..... | 125 |
| 思考题 .....                | 127 |
| 习 题 .....                | 128 |
| <b>第八章 机械波</b> .....     | 133 |
| § 8.1 波动的基本概念 .....      | 133 |
| § 8.2 平面简谐波的表达式 .....    | 138 |
| § 8.3 波的能量 能流密度 .....    | 142 |
| § 8.4 惠更斯原理 .....        | 145 |
| § 8.5 波的干涉 驻波 .....      | 146 |
| § 8.6 多普勒效应 .....        | 151 |
| 思考题 .....                | 152 |
| 习 题 .....                | 153 |

### 第三篇 热学的物理基础

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 引 言                      | 156 |
| 第九章 气体动理论                | 157 |
| § 9.1 气体动理论的基本概念         | 157 |
| § 9.2 气体的宏观状态与微观结构       | 159 |
| § 9.3 麦克斯韦速率分布律          | 162 |
| § 9.4 玻尔兹曼能量分布律          | 166 |
| § 9.5 碰撞 平均自由程           | 169 |
| § 9.6 理想气体的压强            | 171 |
| § 9.7 温度的微观本质            | 173 |
| § 9.8 能量按自由度均分定理 理想气体的内能 | 174 |
| *§ 9.9 输运过程              | 178 |
| *§ 9.10 真实气体             | 181 |
| 思考题                      | 184 |
| 习 题                      | 185 |
| 第十章 热力学基础                | 187 |
| § 10.1 热力学第一定律           | 187 |
| § 10.2 热力学第一定律对理想气体的应用   | 189 |
| § 10.3 循环及其效率            | 198 |
| § 10.4 热力学第二定律           | 203 |
| § 10.5 实际过程的不可逆性         | 205 |
| § 10.6 熵 熵增加原理           | 207 |
| § 10.7 热力学第二定律的统计意义和适用范围 | 209 |
| 思考题                      | 211 |
| 习 题                      | 212 |
| 五位物理学家简介                 | 216 |
| 伽利略                      | 216 |
| 牛 顿                      | 217 |
| 焦 耳                      | 218 |
| 开尔文                      | 219 |
| 爱因斯坦                     | 220 |
| 三篇阅读材料                   | 222 |
| 人造地球卫星                   | 222 |
| 超声波的应用                   | 225 |
| 温度的测量                    | 227 |
| 习题答案                     | 230 |
| 附录                       | 237 |

# 第一篇 力学的物理基础

## 引 言

物体之间或同一物体各部分之间相对位置的变化,称为机械运动(简称运动)。机械运动是自然界最简单、最普遍的一种运动形式。例如,行星围绕太阳的运动,人造卫星环绕地球的运行,车辆、船只和飞机的运动,各种机器的运转,弹簧的伸长和压缩等等。物理学中研究机械运动规律及其应用的部分称为力学。显然,机械运动的内容十分丰富,范围也相当广泛。不过,作为工科大学物理课程,力学通常分为运动学和动力学两大部分。

**运动学** 运用位置矢量、位移、速度、加速度等特征物理量,借助于与坐标密切相关的运动函数(也称运动方程)的方法,对运动进行描述,但描述过程中不涉及引起物体运动状态发生变化的原因。

**动力学** 研究物体所受外力与其运动状态变化之间关系的规律。简而言之动力学是解释和设计运动的,因为在人类社会的生产实践、科学实验中,人们不能满足于仅仅对运动进行描述,尚需要精确地设计和控制物体的运动。如用火箭作为运载工具将人造地球卫星发射上天等;为此,必须研究物体间的相互作用以及它们和物体运动间的关系,找出基本规律,掌握正确运用这些规律的方法,这是动力学的任务,也是力学的核心问题。作为质点动力学基础的是习惯上以牛顿的名字命名的三条运动定律,它不仅是质点运动力学的基础,而且也是研究质点系、刚体、流体、弹性体力学等的基础。本篇第二章阐述牛顿运动定律的内容及其对质点运动的初步运用。

有了牛顿运动定律,原则上讲可以解决所有动力学的问题。然而在许多实际问题中,力往往比较复杂,直接用牛顿定律解决比较困难,必须寻找其它解决问题的方法。为此在本篇的第三章是在讨论力在一段时间积累效果而引入冲量的概念的基础上,进而用动量的变化来表示冲量。而第四章是在讨论力在一段位移上的积累效果且引入功的概念的基础上,进而用动能的变化来表示功。

通过牛顿定律的学习,将会清楚地知道,牛顿定律并非在任何情况下都成立的,它受到常速、宏观两大限制。我们将会知晓适用于高速运动的是相对论力学;而适用于微观运动的是量子力学。

# 第一章 质点运动学

在自然界中,一切物质都在不停地运动和变化着,运动的形式多种多样,其中机械运动是最简单、最基本的运动形式,这种运动是指物体之间或物体内部各部分之间相对位置的变化,力学就是研究机械运动的物理学科,在力学中,只研究物体的位置随时间变化规律的这部分内容叫做运动学。

本章主要讨论描述物体运动状态的位置矢量和速度概念,以及反映运动状态变化的加速度概念。并讨论这些概念的初步应用。

## § 1.1 质点 参照系和坐标系

### 一、质 点

质点是最简单的一种物理模型。大家知道任何物体都有一定的形状和大小,一般说物体的运动都与物体的形状、大小有关;但在有些情况下,物体的形状、大小对所讨论的问题影响却很小,完全可以忽略。研究这类问题时,可以只考虑物体的质量,而不考虑物体的形状和大小,把物体简化为一个有质量的点。这个代表实际物体的一个有质量的点称为质点。

力学中常见的有两种质点。一种是由所研究运动的性质决定的。比如乘汽车旅游。汽车有一定的形状、大小和结构,车轮还要转动,但旅游者关心的却是行车的路线,什么时间到什么地方,运行的快慢如何。这时可把汽车视为质点讨论其运动。研究地球绕太阳公转时,讨论的是地球相对太阳的轨迹和运行快慢,地球的形状、大小和自转对讨论的问题影响很小,可以忽略,就把地球视为质点来讨论;显然要讨论地球上海洋的潮汐现象就不能把地球视为质点了。再比如用枪打鸟,研究的是子弹飞行的轨迹,什么时间到什么位置,能否击中鸟,这时根本不去考虑子弹飞行中的高速旋转,可把子弹视为质点进行研究;而要研究子弹飞行中为什么不翻筋斗,就不能把子弹视为质点了。由以上各例可见,要讨论物体作为一个整体在空间的运动情况,即所说的平动问题时,物体可抽象为质点进行研究。另一种质点,是在研究物体之间相互作用时引出的,比如讨论两个物体间的万有引力作用时,若两物体间相距很远,比两个物体本身的线度大很多很多,这时物体的形状、大小对二者之间引力作用的大小和方向影响很小,可以不考虑,把两物体均为视质点,突出了引力与质量和距离的关系。上述是在两种不同情况下抽象出来的质点概念,可把前者称为运动质点,后者称为作用质点。

根据研究问题的需要,把实际的研究对象抽象为理想的物理模型,是物理学的一个重要方法。以后还将引入“刚体”、“理想气体”、“点电荷”等理想模型。其目的是突出与所研究问题相关的主要因素,忽略次要因素,把问题简化,以便能够找出其基本规律。

### 二、参照系和坐标系

宇宙中一切物体都永恒地运动着。例如我们看到静止在地面上的物体,实际上随同地球相

对太阳运动(公转和自转),其实,太阳也在绕银河系中心运动。现代科学已经证实,银河系也在相对其他星系运动着。由于一切物体都在运动,因此要描写一个物体的运动,必须选择另一物体作为参考物,这个参考物就称为参照系。

显然,选择不同物体作为参照系描述同一物体的运动,所观测的运动状态各不相同。例如,在匀速直线运动的车厢内的自由落体,相对车厢作直线(下落)运动,但相对地面作抛物线(平抛)运动。这显示出运动状态的相对性。因此,描述运动的物理量必然具有相对性。

为了定量描述质点位置的变化,还要在参照系中固定一个坐标系,常用的是直角坐标系。即在参照系上选一点作为坐标原点,通过原点引出三条相互垂直的有向直线为三条坐标轴,即  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴,这就是空间直角坐标系。任一质点  $P$  的位置,可用  $P$  点的坐标  $x, y$  和  $z$  来表示,写成  $P(x, y, z)$ ,如图 1-1 所示。图中的  $i, j, k$  分别是  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴正方向上的单位矢量。

以后主要讨论质点在平面内的运动,即平面运动,所以经常使用含有两条坐标轴,即  $X$  轴和  $Y$  轴的平面直角坐标系。这样, $P$  点的位置表示为  $P(x, y)$ ,如图 1-2 所示。

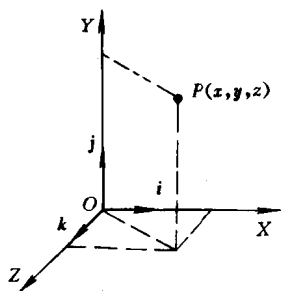


图 1-1 空间直角坐标系

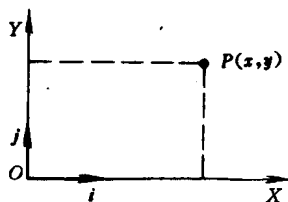


图 1-2 平面直角坐标系

### 三、时间和时刻

物体运动状态的不断变化,决定描述运动的物理量必然是时间的函数。时间是物体运动过程长短的量度,具有单向性。“光阴一去不复返”就说明时间的这一性质,而时刻与物体在运动过程中某一位置相对应,例如,用  $t_1=5\text{ s}$  和  $t_2=8\text{ s}$  表示两个时刻,习惯上表述为“第 5 s 末”和“第 8 s 末”,这两个时刻之差  $\Delta t=t_2-t_1=3\text{ s}$ ,表示一段时间。

## § 1.2 位置矢量 速度和加速度

### 一、位置矢量 运动函数

在图 1-3 所示的平面直角坐标系中质点在某时刻位于  $P$  点,自坐标原点  $O$  指向  $P$  的有向线段  $OP$  称为质点的位置矢量,简称位矢,用  $r$  表示。从图中看出

$$r = xi + yj \quad (1-1)$$

它的大小(模)为

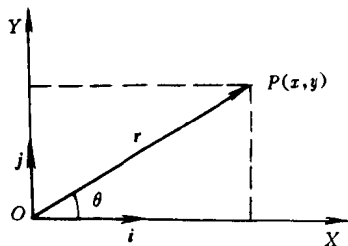


图 1-3 位置矢量

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

$r$  与  $X$  轴的夹角

$$\theta = \arctg(y/x) \quad (1-3)$$

在国际单位制中,  $r$  的单位是“米”, 代号为  $m$ 、 $\theta$  的单位是“弧度”, 代号为  $rad$ 。

由于质点在不断运动, 所以  $r$  的模和方向在不断变化, 即  $r$  是时间  $t$  的函数, 因此应将式 (1-1) 改写为

$$r = r(t) = x(t)i + y(t)j \quad (1-4)$$

称式 (1-4) 为质点的运动函数。

质点在运动过程中所描绘的曲线称为轨道, 联立运动函数中的两个分量式  $x=x(t)$  和  $y=y(t)$ , 消去时间  $t$ , 可得出质点的轨道方程

$$F(x, y) = 0 \quad (1-5)$$

## 二、速 度

位移是描述质点在一段时间内移动方向和距离的物理量。在图 1-4 中, 质点由  $P_1$  移动到  $P_2$ , 相应的位矢由  $r_1$  变为  $r_2$ 。由  $P_1$  至  $P_2$  的有向线段  $\overline{P_1P_2}$  称为位移, 用  $\Delta r$  表示。从图中看出

$$\begin{aligned} \Delta r &= r_2 - r_1 = (x_2i + y_2j) - (x_1i + y_1j) \\ &= (x_2 - x_1)i + (y_2 - y_1)j \end{aligned} \quad (1-6)$$

位移的大小为

$$|\Delta r| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1-7)$$

位移是矢量, 表示质点移动的距离和方向。

质点在运动中所描绘曲线(轨道)的长度称为路程。路程是标量, 用  $\Delta s$  表示。从图中看出,  $P_1$ 、 $P_2$  之间的路程(由线段  $\Delta s = \widehat{P_1P_2}$ )与位移的大小(直线段  $|\Delta r| = \overline{P_1P_2}$ )不相等。

速度是描述质点运动方向和快慢程度的物理量。设质点从  $P_1$  到  $P_2$  所经历的时间为  $\Delta t$ , 那么

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

表示质点在单位时间内的平均位移, 称之为平均速度。显然, 平均速度只能粗略地描述质点在  $\Delta t$  时间内位置变化的情况。

当  $\Delta t$  趋于零时,  $P_2$  趋近于  $P_1$ 。  $\Delta r$  和  $\Delta s$  趋于吻合,  $\Delta r$  的方向趋于质点所在处轨道的切线方向。这时

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

$v$  表示质点的瞬时速度, 通常简称速度, 式 (1-9) 表明, 速度等于位矢对时间的一阶导数。

速度的方向沿轨道的切线, 且指向质点前进的一方, 如图 1-5 所示。

将  $r = xi + yj$  代入式 (1-9), 得速度在平面直角坐标系中的表达式

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j = v_xi + v_yj \quad (1-10)$$

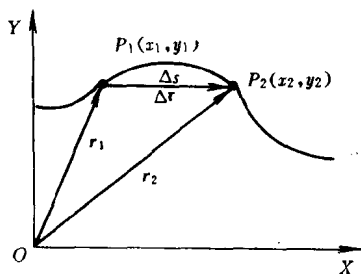


图 1-4 位移和路程

其中  $v_x = \frac{dx}{dt}$ ,  $v_y = \frac{dy}{dt}$  分别表示速度  $v$  在  $X$  轴和  $Y$  轴上的分量。

定义质点经过的路程  $\Delta s$  与经历的时间  $\Delta t$  之比  $\Delta s / \Delta t$  为质点的平均速率，则平均速率表示质点在单位时间内经过的平均路程。用  $\bar{v}$  表示，则

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-11)$$

显然，平均速率是标量。

当  $\Delta t$  趋于零时，平均速率的极限等于瞬时速率，简称速率，用  $v$  表示，即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-12)$$

由于  $dr$  与  $ds$  吻合，所以  $|dr| = ds$ ，于是

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{|dr|}{dt} = \left| \frac{dr}{dt} \right| = |v| \quad (1-13)$$

这表明，瞬时速率与瞬时速度的大小相等。

在国际单位制中，速度和速率的单位是“米/秒”，代号为  $m \cdot s^{-1}$ 。

### 三、加速度

速度是矢量，所以不论它的大小变化，还是方向变化，或二者同时变化，速度都要发生变化。加速度就是表示速度的大小和方向变化快慢程度的物理量。

在图 1-6 中，设质点由  $P_1$  到  $P_2$  所经历的时间为  $\Delta t$ 。用  $v_1$  和  $v_2$  分别表示质点在  $P_1$  和  $P_2$  两点的速度。定义在  $\Delta t$  时间内，质点的平均加速度为

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1-14)$$

平均加速度是矢量，它的方向就是速度的增量  $\Delta v$  的方向。显然，平均加速度只能粗略地反映速度变化的快慢程度。

当  $\Delta t$  趋于零时，平均加速度的极限就是瞬时加速度，简称加速度，用  $a$  表示，则

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dr}{dt} \right) = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (1-15)$$

可见，加速度等于速度对时间的一阶导数，也等于位矢对时间的二阶导数。在平面直角坐标系中，加速度的表达式为

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(v_x i + v_y j) = \frac{dv_x}{dt} i + \frac{dv_y}{dt} j \\ &= \frac{d^2 x}{dt^2} i + \frac{d^2 y}{dt^2} j = a_x i + a_y j \end{aligned} \quad (1-16)$$

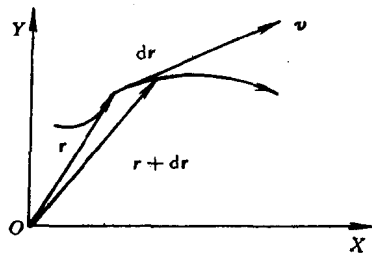


图 1-5 速度的方向

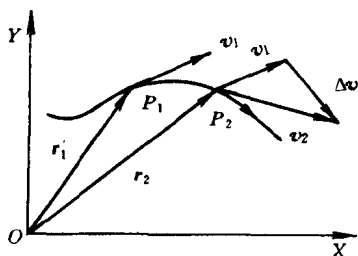


图 1-6 加速度

其中  $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$  和  $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}$  分别是加速度在  $X$  轴和  $Y$  轴上的分量。

在国际单位制中,加速度的单位为“米/秒<sup>2</sup>”,代号为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

必须注意,加速度  $\boldsymbol{a}$  的方向是速度增量  $\Delta \boldsymbol{v}$  的极限方向,即速度的微分  $d\boldsymbol{v}$  的方向,在一般情况下,速度的微分  $d\boldsymbol{v}$  与速度  $\boldsymbol{v}$  的方向不一致,所以加速度  $\boldsymbol{a}$  的方向与速度  $\boldsymbol{v}$  的方向不相同。也就是说,加速度的方向一般不沿轨道的切线方向。

以上讨论了描述质点运动的三个基本物理量,即位矢、速度和加速度。在讨论过程中,可以看出,运动的方向决定这些物理量的矢量性,运动的不断变化决定这些物理量的瞬时性。今后在处理具体问题时,要特别注意这些性质,不要随意使用中学物理的匀速直线运动和匀加(减)速直线运动等特殊的运动公式,而掩盖描述运动的物理量的矢量性和瞬时性。

例 1.2-1 已知质点的运动函数为

$$\boldsymbol{r} = 2t^3\boldsymbol{i} + 3t^2\boldsymbol{j} \quad (\text{m})$$

求 (1) 轨道方程;(2) 第 1 s 末到第 3 s 末的位移;(3) 在这段时间的平均速度;(4) 第 3 s 末的速度和加速度。

[解] 这是已知运动函数求运动状态的问题。

(1) 由运动函数知  $x=2t^3$ ,  $y=3t^2$  联立此二式消去时间  $t$ , 得轨道方程

$$27x^2 - 4y^3 = 0$$

(2) 质点在第 1 s 末的位矢为  $\boldsymbol{r}_1 = 2\boldsymbol{i} + 3\boldsymbol{j}$ , 在第 3 s 末的位矢为  $\boldsymbol{r}_3 = 54\boldsymbol{i} + 27\boldsymbol{j}$ , 则位移

$$\Delta \boldsymbol{r}_{13} = \boldsymbol{r}_3 - \boldsymbol{r}_1 = (54\boldsymbol{i} + 27\boldsymbol{j}) - (2\boldsymbol{i} + 3\boldsymbol{j}) = 52\boldsymbol{i} + 24\boldsymbol{j} \quad (\text{m})$$

(3) 在这段时间内的平均速度

$$\bar{\boldsymbol{v}}_{13} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}_{13}}{\Delta t} = \frac{52\boldsymbol{i} + 24\boldsymbol{j}}{3 - 1} = 26\boldsymbol{i} + 12\boldsymbol{j} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

(4) 由运动函数可得速度  $\boldsymbol{v}$  和加速度  $\boldsymbol{a}$  的表达式

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = 6t^2\boldsymbol{i} + 6t\boldsymbol{j}$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = 12t\boldsymbol{i} + 6\boldsymbol{j}$$

将  $t=3$  代入以上两式, 求出第 3 s 末质点的速度和加速度

$$\boldsymbol{v}_3 = 6 \times 3^2\boldsymbol{i} + 6 \times 3\boldsymbol{j} = 54\boldsymbol{i} + 18\boldsymbol{j} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$\boldsymbol{a}_3 = 12 \times 3\boldsymbol{i} + 6\boldsymbol{j} = 36\boldsymbol{i} + 6\boldsymbol{j} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

### § 1.3 运动函数的建立

从例 1.2-1 看出,如果已知质点的运动函数就可以依次求出质点位移、速度和加速度。反过来,如果已知质点的加速度,怎样求运动函数呢?

假设已知质点的加速度  $\boldsymbol{a}$  随时间的变化关系为  $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}(t)$ , 则由式(1-15)  $\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt}$  得

$$d\boldsymbol{v} = \boldsymbol{a}(t)dt \quad (1-17)$$

将此式对时间从  $t_0 \sim t$  求积分, 得

$$\int_{t_0}^t d\boldsymbol{v} = \int_{t_0}^t \boldsymbol{a}(t)dt$$

即

$$v(t) - v(t_0) = \int_{t_0}^t a(t) dt$$

式中  $v(t_0)$  是质点在初始时刻  $t_0$  的速度, 通常记为  $v_0$ , 这是一个确定的矢量, 这样上式化为

$$v(t) = v_0 + \int_{t_0}^t a(t) dt \quad (1-18)$$

根据式(1-9)  $v = \frac{dr}{dt}$ , 得

$$dr = v dt$$

如果已知速度  $v$  随时间的变化关系  $v = v(t)$ ; 则

$$dr = v(t) dt \quad (1-19)$$

将上式对时间从  $t_0 \sim t$  求积分, 得

$$\int_{t_0}^t dr = \int_{t_0}^t v(t) dt$$

即

$$r(t) - r(t_0) = \int_{t_0}^t v(t) dt$$

式中  $r(t_0)$  表示初始时刻  $t_0$  质点的位矢, 通常记为  $r_0$ , 这是一个确定的矢量, 于是上式化为

$$r(t) = r_0 + \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (1-20)$$

以后称质点在时刻  $t_0$  的位矢  $r_0$  和速度  $v_0$  为初始条件, 从以上讨论中看出, 如果已知质点的加速度(关于时间的函数)和初始条件, 就能求出质点的运动函数。

现在讨论一个重要的特例, 如果质点的加速度  $a$  是一个恒矢量, 且取  $t_0 = 0$ , 则式(1-18)化为

$$v(t) = v_0 + at \quad (1-21)$$

而式(1-20)化为

$$r(t) = r_0 + \int_0^t (v_0 + at) dt = r_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (1-22)$$

在地球表面附近, 若忽略空气阻力, 则抛射物体的运动是典型的加速度为恒矢量的平面曲线运动, 这里, 加速度  $a$  等于重力加速度  $g$ , 抛射的初速度为  $v_0$ , 如果以抛射点  $O$  为坐标原点, 则  $r_0 = 0$ 。这样, 式(1-22)化为

$$r(t) = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (1-23)$$

这就是质点作抛物运动的运动函数。任一时刻的位置矢量  $r(t)$  如图 1-7 所示, 从图中看出, 抛体运动是沿速度  $v_0$  方向的匀速运动和沿竖直(垂直地面向下)方向匀加速(自由落体)运动迭加的结果。

参照图 1-7, 将式(1-23)化为

$$\begin{aligned} r(t) &= (v_0 t \cos \theta) i + (v_0 t \sin \theta) j - \frac{1}{2} g t^2 j \\ &= (v_0 t \cos \theta) i + (v_0 t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2) j \end{aligned}$$

这里

$$x = v_0 t \cos \theta$$

$$y = v_0 t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2$$

联立消去时间  $t$ , 得

$$y = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} x^2 + (\tan \theta) x$$

这就是在地球表面附近, 在忽略空气阻力的条件下, 抛射物体(质点)的轨道方程, 即熟知的抛物线方程。

必须指出, 如果抛射的初速度  $v_0$  很大, 足以使物体远离地球表面, 则重力加速度  $g$  不能视为恒矢量, 因此就得出抛物线方程。另外, 在考虑空气阻力的实际情况下, 抛射物体并不沿抛物线运动, 详见例 2.4-5。

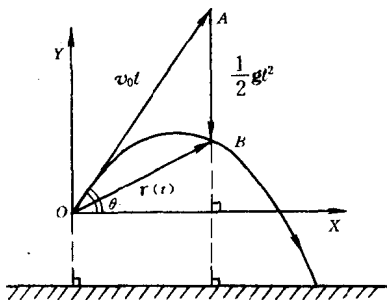


图 1-7 抛体运动的位矢

**例 1.3-1** 一质点由静止开始, 从原点出发作平面曲线运动, 其加速度  $a = 12ti + 6j$ , 试求质点的运动函数。

〔解〕 根据题意,  $t_0 = 0$  时,  $r_0 = 0$ ,  $v_0 = 0$ , 由式(1-18)可得质点的速度

$$v = v_0 + \int_0^t a \, dt = \int_0^t (12ti + 6j) \, dt = 6t^2 i + 6tj$$

由式(1-20)可求出质点的运动函数

$$r = r_0 + \int_0^t v \, dt = \int_0^t (6t^2 i + 6tj) \, dt = 2t^3 i + 3t^2 j$$

其实, 这就是例 1.2-1 中的运动函数。

## § 1.4 圆周运动

圆周运动是曲线运动的一个重要特例, 也是一种常见的曲线运动。掌握了圆周运动的规律, 不仅可以更透彻地认识一般曲线运动, 而且也为研究物体绕定轴转动奠定必备的基础。

### 一、匀速圆周运动

质点作圆周运动时, 如果在任意相等的时间内通过相等的弧长, 就称这种运动为匀速圆周运动。必须注意, 作匀速圆周运动的质点, 其速率是恒定不变的, 但它的速度方向(切线方向)不断变化, 所以这种运动是变速运动。

考虑一质点沿半径为  $r$  的圆周作匀速圆周运动, 如图 1-8 所示。设质点在  $A$ 、 $B$  两点的速度分别为  $v_A$  和  $v_B$ 。从  $A$  点到  $B$  点经历的时间为  $\Delta t$ , 注意,  $v_A$  和  $v_B$  的大小相等。设质点的速率为  $v$ , 则  $v_A = v_B = v$ , 但  $v_A$  和  $v_B$  的方向不同, 分别沿  $A$ 、 $B$  两点的切线方向。所以在  $\Delta t$  时间内, 速度有增量  $\Delta v = v_B - v_A$ , 平均加速度为  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ , 瞬时加速度为

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

从图 1-8 中不难看出,  $\triangle OAB \sim \triangle BCD$ , 因此

$$\frac{|\Delta v|}{v} = \frac{|\Delta r|}{r}$$

两边除以  $\Delta t$ , 有

— 8 —