

上册

# 大学物理学 (第2版)

主编 袁艳红

Physics

清华大学出版社

主编 袁艳红

# 大学物理学

(第2版) 上册

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书参照了教育部物理基础课程教学指导分委员会制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》，涵盖了基本要求中的核心内容。在内容选取上采用压缩经典、简化近代；削枝强干，突出重点；简化理论论证，适度增加应用等方法，以适应不同院校和专业对大学物理的要求。同时考虑到技术应用型院校的特点和实际情况，在保证必要的基本训练的基础上，适度降低了例题和习题的难度，而且吸收了国内外优秀教材的精髓，充实了大量物理学史和最新科技进展后编写而成。

本书不仅融入了作者多年教学经历所积累的成功经验，而且考虑到学生和教师教学的新特点，还配备了习题解答、学习指导和电子教案等教学资源。全书分上、下两册，上册内容包括力学、机械振动、机械波、光学和热学，下册内容包括电磁学、狭义相对论和量子物理。

本书可作为技术应用型高等院校工科类各专业大学物理课程的教材，也可作为非物理专业大学物理课程的教材或参考书，还可供文理科相关专业选用和社会读者阅读。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 上册/袁艳红主编.--2版.--北京：清华大学出版社，2016

ISBN 978-7-302-42982-1

I. ①大… II. ①袁… 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(2016)第 030461 号

责任编辑：佟丽霞 赵从棉

封面设计：常雪影

责任校对：王淑云

责任印制：杨 艳

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈：010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者：北京亿浓世纪彩色印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：18.25 字 数：444 千字

版 次：2010 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 2 版 印 次：2016 年 8 月第 1 次印刷

印 数：19001~22000

定 价：59.00 元

产品编号：065388-01

# 序

## F O R E W O R D

物理学是研究物质结构、性质、运动和相互作用基本规律的科学，也是一门与实践紧密结合的科学，是自然科学和技术科学的基础之一。物理学的教学不仅传授本学科的基本知识，更重要的是使学生掌握科学的认识论、方法论，培养学生的思维方法，提高学生的思辨能力。因此，大学物理不仅是一门重要的基础课，也是大学生素质教育的重要内容。这就是目前非物理的理工类专业均开设大学物理课的原因。然而要写好既满足理工科不同专业的要求而又有别于物理专业的教科书，并非易事。

袁艳红教授主编的《大学物理学》是一本适合技术应用型高等院校非物理专业使用的教材。本书不仅渗透了编者的教学经验，而且还体现了她在教学改革方面的一些创新思路。整套教材较全面地介绍了物理学的基本内容，体现了一定的时代性、应用性。本书注重物理概念阐述，避免复杂的数学推导；内容由浅入深、由易到难、由具体到抽象，图文并茂，文字流畅，并重视趣味性和直观性，通俗易懂，便于自学。书中除介绍大学本科学士生所必需的物理基本知识外，还适当地向学生介绍一些现代物理前沿知识，有利于学生开阔眼界、启迪思维、丰富想象，培养创新能力。此外，对于物理知识在高新技术中的某些应用，如量子信息技术、纳米技术、激光技术、声悬浮技术、磁悬浮技术、全息技术等，结合教学作了一些介绍并留有感兴趣者进一步学习具体技术的“接口”，这有利于培养学生分析问题、解决问题，理论联系实际的能力。在资源建设上借助了现代信息技术，在书中某些章节增加动画、二维码视频等多媒体教学资源，并配以数字课程教学平台，增加了学生学习物理学的情趣。本教材内容在深度和广度上，符合教育部规定的有关大学物理教学的基本要求，例题和习题选配得当，难易程度适中，适合技术应用型高等院校工科类各专业用作大学物理课程的教材，也可供其他非物理专业用作大学物理课程的教材或参考书，还可供社会读者阅读。

作为高等教育教学改革和教材建设的一项成果，该书具有一定的创新性。编著这套“大学物理”教材对高等教育教材的建设做出了贡献，对技术应用型工科院校大学物理教育大有裨益。

作为一位年轻教授，肯花时间和精力编出这样一本教材实属难能可贵，特为之序。

中国科学院院士 侯洵

2010年6月16日

物理学是研究物质基本结构、基本运动形式及相互作用规律的科学。物理学最初是主要研究力学运动规律，后来又研究热现象、电磁现象、光现象以及辐射的规律。到19世纪末，物理学已经形成了一个完整的体系，称为经典物理学。在20世纪初的30年里，物理学经历了一场伟大的革命，诞生了相对论和量子力学，形成了近代物理学。相对论和量子力学是近代物理学的两大理论支柱，它直接导致了现代科学技术的革命。超大规模的集成电路、人工设计的新型材料、激光技术的应用和发展、低温与超导、新能源的开发和应用等，究其根源，无不以现代物理学基本原理为基础。

以经典物理学、近代物理学和现代科学技术中的物理基础为主要内容的大学物理，是高等院校非物理专业学生一门重要的课程。该课程在培养学生综合素质、丰富科学知识、提高技术能力方面发挥着重要的作用。

针对培养技术应用型人才的高等学校，为了满足大学物理课程改革和实际教学的要求，在多年教学实践的基础上，我们编写了本书。编写的主要思路如下：

(1) 基本内容：为了适应技术应用型人才培养的大学物理教学，本书内容包括基本知识、拓展内容和阅读材料三大板块。基本知识内容以《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》为根据，构成了本书的核心。同时选取少量的拓展内容，作为知识的扩展和延伸，这部分内容以“\*”号标出。教师授课时，删去带“\*”的内容，并不影响全书的系统性和连贯性。书中还安排了一定数量的阅读材料，这些阅读材料与教材内容相匹配，主要是一些基本原理的应用。增加这些内容目的是使学生掌握基础性物理学的知识，了解物理学的前瞻性发展，同时让学生感受到物理学与人们日常生活的密切相关性，增强学习趣味、拓宽学生视野、提高创新意识。

(2) 叙述特点：考虑到技术应用型人才的特点和物理学自身的特点，本书在论述方式上重视物理概念的准确性、物理推论的逻辑性和物理内容的基础性。由浅入深、由易到难、由具体到抽象、由特殊到一般，尽可能避免复杂的数学推证，力求通俗易懂、便于学习。对现代物理学内容的介绍深入浅出，力争不让学生感到过分抽象和复杂。

(3) 内容衔接：为了避免与中学物理内容重复，本书以中学物理为基础，以应用型工科院校为特色编写。在内容衔接点上，综合考虑了不同地区、不同专业大学物理教学的情况，适度地降低了部分内容的衔接点，企盼绝大多数学生都能较好地与中学物理基础相衔接。同时也注意到与大学后续课程的衔接。

(4) 习题安排：为了使学生对所学内容加以巩固，书中安排了一定量的例题和习题。习题和例题涵盖基础、应用两个方面。有些题目与实际联系较密切，且物理原

# 前言

## P R E F A C E

理清楚，有较强的实际应用意义和一定的趣味性。习题内容和数量选择与教材内容相配合，类型有填空题、选择题和计算题。难度由浅到深，有较好的适用性。

(5) 版式格式：版式采用了与国际接轨的彩色印制；在编排上注重版面设计、图文并茂；在内容叙述上保留了原教材的基本特色，即力求做到生动形象、通俗易懂，强调了物理图像和物理思想，使学生在欣赏的过程中体验并学习物理学知识；在资源建设上借助现代信息技术，在书中某些章节增加动画、二维码视频等多媒体教学资源，并配以数字课程教学平台，期望突破书中知识难点，增加学生学习物理学的情趣。由纸质教材、纸质辅助教材、电子教案和网络课程等组成了立体化系列教材。

全书采用国际(SI)单位制，书后有矢量运算、物理量的名称、符号及单位、常用物理常量表、习题参考答案及参考文献。

本书是上海市“十二五”规划教材，并作为核心成果获得了上海市第十一届教育科学研究优秀成果一等奖，其分为上、下两册，分别介绍了力学、机械振动、机械波、光学、热学、电磁学、狭义相对论和量子物理，由袁艳红教授编写。书中的彩图由陈锐绘画，演示实验视频由柯磊、赵润宁、杨党强拍摄，动画资源由贾鑫、杨俊伟设计，黄才杰校稿。

在本书的编写过程中，参考了国内外大量的文献资料。此外，也从网络上搜集了大量的有关资料和图片，在此向原作者表示感谢。在本书的编写和修改过程中，得到了苗润才、杨若凡、孙振武和朱泰英等教授的关心和帮助，在此谨向他们表示诚挚的感谢。

由于编者学识和教学经验有限，可能对基本要求理解不深，处理不当，书中缺点和错误在所难免，真诚企盼使用本书的读者批评指正。

编者

2016年4月

第 1 章 质点运动学 .....	1
1.1 参考系 坐标系 质点 / 2	
1.1.1 参考系和坐标系 / 2	
1.1.2 质点 / 3	
1.2 描述质点运动的物理量 / 3	
1.2.1 位置矢量 运动方程 位移和路程 / 3	
1.2.2 速度 / 6	
1.2.3 加速度 / 8	
原理应用 洲际导弹及其射程 / 12	
1.3 圆周运动及其描述 / 14	
1.3.1 平面极坐标系 / 14	
1.3.2 匀速率圆周运动 / 14	
1.3.3 变速圆周运动 / 15	
1.3.4 圆周运动的角量描述 / 16	
1.4 相对运动 / 19	
原理应用 全球定位系统和应用 / 22	
内容提要 / 25	
习题 / 25	



第 2 章 质点动力学 .....	28
2.1 牛顿运动定律 / 29	
2.1.1 牛顿第一定律 / 30	
2.1.2 牛顿第二定律 / 30	
2.1.3 牛顿第三定律 / 32	
2.1.4 几种常见的力 / 32	
2.1.5 牛顿运动定律的应用 / 35	
原理应用 同步卫星的发射 / 39	
2.2 动量 动量守恒定律 / 41	
2.2.1 质点的动量及动量定理 / 41	
2.2.2 质点系的动量定理 / 43	
2.2.3 动量守恒定律及其意义 / 45	
2.3 能量守恒定律 / 47	
2.3.1 功和功率 / 47	
2.3.2 质点的动能定理 / 50	
2.3.3 保守力与非保守力 势能 / 51	
2.3.4 机械能守恒定律 / 54	



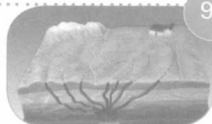
# 目 录

# C O N T E N T S

2.3.5	碰撞 / 59
* 2.4	理想流体的性质和伯努利方程 / 60
2.4.1	理想流体 / 60
2.4.2	连续性方程 / 61
2.4.3	伯努利方程 / 62
原理应用	分析“哥伦比亚”号失事的原因 / 64
内容提要	/ 65
习题	/ 67
<b>第 3 章</b>	<b>刚体的定轴转动</b> .....
3.1	刚体的运动 / 74
3.1.1	刚体的基本运动 / 74
3.1.2	刚体的定轴转动 / 75
3.2	力矩 转动定律 转动惯量 / 77
3.2.1	力矩 / 77
3.2.2	转动定律 / 78
3.2.3	转动惯量 / 79
3.3	角动量 角动量守恒定律 / 82
3.3.1	质点的角动量和刚体的角动量 / 83
3.3.2	刚体绕定轴转动的角动量定理 / 84
3.3.3	刚体绕定轴转动的角动量守恒定律 / 85
3.4	力矩做功 刚体绕定轴转动的动能定理 / 87
3.4.1	力矩做功 / 87
3.4.2	转动动能 / 87
3.4.3	刚体绕定轴转动的动能定理 / 88
原理应用	力学新进展——对称性的破缺 / 90
内容提要	/ 92
习题	/ 93
<b>第 4 章</b>	<b>机械振动</b> .....
4.1	简谐振动的描述 / 97
4.1.1	简谐振动 / 97
4.1.2	描述简谐振动的基本物理量 / 100
4.2	简谐振动的旋转矢量表示法 / 103
4.3	简谐振动的能量 / 107
4.4	同方向同频率简谐振动的合成 / 109



73



96



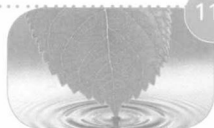
原理应用 混沌 / 113

内容提要 / 115

习题 / 116

## 第 5 章 机械波

- 5.1 机械波的产生和传播 / 120
  - 5.1.1 机械波的形成 / 120
  - 5.1.2 横波和纵波 / 121
  - 5.1.3 波长 周期和频率 波速 / 122
  - 5.1.4 波面 波前 波线 / 123
- 5.2 平面简谐波 / 124
  - 5.2.1 平面简谐波的波函数 / 124
  - 5.2.2 波函数的物理意义 / 125
- 5.3 波的能量 波的能量密度 / 129
  - 5.3.1 波的能量 / 129
  - 5.3.2 波的能量密度 / 130
  - 5.3.3 波的平均能流密度 / 130



119

原理应用 孤子波 / 131

- 5.4 惠更斯原理 波的衍射 / 133
  - 5.4.1 惠更斯原理 / 133
  - 5.4.2 波的衍射 / 134
- 5.5 波的叠加原理 波的干涉 驻波 / 135
  - 5.5.1 波的叠加原理 / 135
  - 5.5.2 波的干涉 / 135
  - \* 5.5.3 驻波 / 138

原理应用 消声器及其控制噪声的原理 / 140

### \* 5.6 超声波简介 / 142

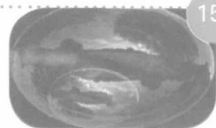
原理应用 声悬浮技术及其应用 / 144

内容提要 / 145

习题 / 146

## 第 6 章 光学

- \* 6.1 几何光学的基本原理 / 151
  - 6.1.1 光的直线传播定律 / 152
  - 6.1.2 光的反射和折射定律 / 152
  - 6.1.3 全反射 / 153



150

# 目 录

## C O N T E N T S

- \* 6.2 光在平面和球面上的成像以及薄透镜成像规律 / 154
  - 6.2.1 光在平面上的反射、折射成像 / 155
  - 6.2.2 光在球面上的折射和反射成像 / 156
  - 6.2.3 薄透镜 / 157
- \* 6.3 光学仪器 / 160
  - 6.3.1 照相机 / 161
  - 6.3.2 显微镜 / 161
  - 6.3.3 望远镜 / 162
- 6.4 相干光 / 163
  - 6.4.1 光的相干性 / 163
  - 6.4.2 普通光源的发光机制 / 164
  - 6.4.3 相干光的获得 / 165
- 6.5 杨氏双缝干涉 劳埃德镜 / 166
  - 6.5.1 杨氏双缝干涉实验 / 166
  - 6.5.2 劳埃德镜实验 / 168
- 6.6 光程 薄膜干涉 / 170
  - 6.6.1 光程 / 170
  - 6.6.2 薄膜干涉 / 172
- 原理应用 激光干涉仪 / 176
- 6.7 光的衍射 单缝衍射 / 177
  - 6.7.1 光的衍射现象 / 177
  - 6.7.2 惠更斯-菲涅耳原理 / 178
  - 6.7.3 单缝衍射 / 179
- 6.8 光栅 光栅衍射 / 182
  - 6.8.1 光栅 / 183
  - 6.8.2 光栅衍射 / 183
- 6.9 光的偏振 / 186
  - 6.9.1 光的偏振 线偏振光和自然光 / 186
  - 6.9.2 偏振片 起偏和检偏 / 188
  - 6.9.3 马吕斯定律 / 189
  - 6.9.4 反射光和折射光的偏振 / 190
- \* 6.10 激光简介 / 192
  - 6.10.1 激光的基本原理 / 192
  - 6.10.2 氦氖激光器 / 195
  - 6.10.3 激光的特点及应用 / 196
- 原理应用 全息摄影 / 197

内容提要 / 198

习题 / 200

## 第 7 章 气体动理论 .....

- 7.1 平衡态 理想气体的物态方程 / 204
    - 7.1.1 分子运动的基本观点 / 204
    - 7.1.2 热力学平衡态 气体的状态参量 / 206
    - 7.1.3 理想气体的物态方程 / 207
  - 7.2 理想气体的微观模型及其压强公式 / 209
    - 7.2.1 理想气体的微观模型 / 209
    - 7.2.2 气体动理论的统计性假设 / 209
    - 7.2.3 理想气体的压强公式 / 210
  - 7.3 理想气体的温度公式 / 212
  - 7.4 能量均分定理 理想气体的内能 / 213
    - 7.4.1 自由度 / 213
    - 7.4.2 能量均分定理 / 214
    - 7.4.3 理想气体的内能 / 214
  - 7.5 麦克斯韦速率分布定律 / 216
    - 7.5.1 速率分布概念 / 217
    - 7.5.2 麦克斯韦气体分子速率分布定律 / 218
    - 7.5.3 温度对速率分布曲线的影响 / 218
    - 7.5.4 分子运动的三种统计速率 / 219
  - 7.6 气体分子平均碰撞次数和平均自由程 / 221
- 原理应用 真空的获得以及真空度的估算 / 223
- 内容提要 / 225
- 习题 / 226

203



## 第 8 章 热力学基础 .....

- 8.1 准静态过程 功 热量 / 230
  - 8.1.1 准静态过程 / 230
  - 8.1.2 功 / 231
  - 8.1.3 热量 / 232
  - 8.1.4 摩尔热容 热量的计算 / 233
- 8.2 内能 热力学第一定律 / 234
  - 8.2.1 内能 / 234
  - 8.2.2 热力学第一定律 / 235

229

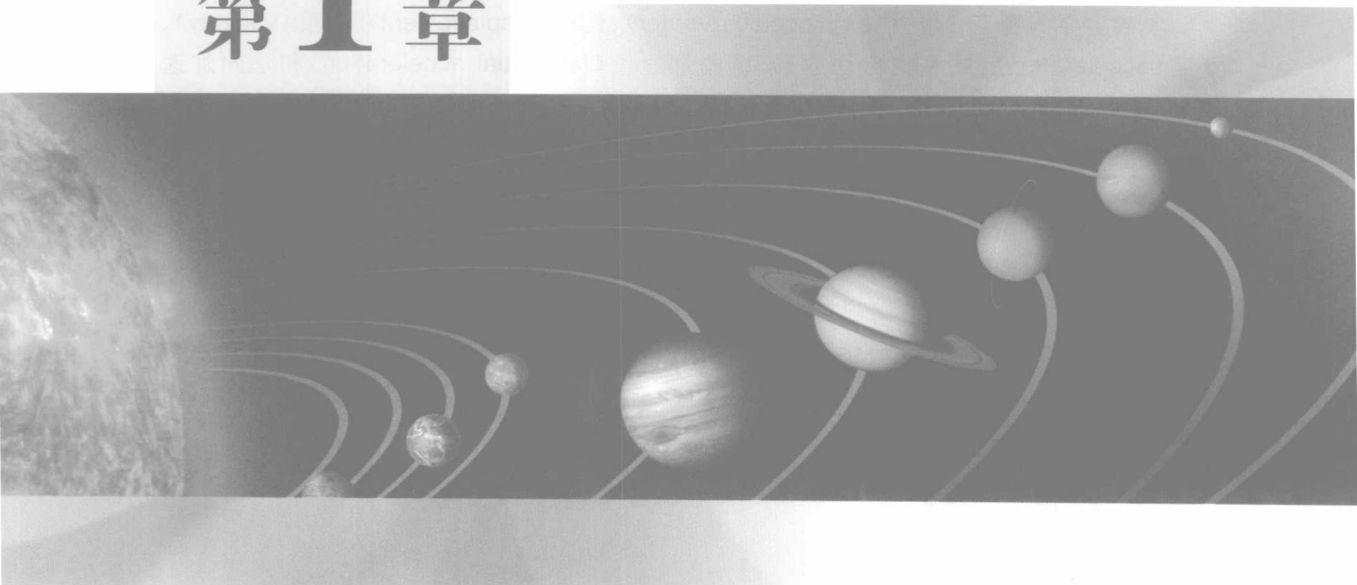


# 目 录

# C O N T E N T S

8.3 理想气体的等体过程和等压过程 / 236	
8.3.1 理想气体的等体过程 / 236	
8.3.2 理想气体的等压过程 / 237	
8.4 理想气体的等温过程和绝热过程 / 240	
8.4.1 理想气体的等温过程 / 240	
8.4.2 理想气体的绝热过程 / 241	
原理应用 喷气发动机的燃料及其选择 / 243	
8.5 循环过程 / 244	
8.5.1 热力学循环过程 / 244	
8.5.2 热机循环 循环效率 / 245	
8.5.3 制冷机 制冷系数 / 246	
8.5.4 卡诺循环 / 248	
8.6 热力学第二定律 卡诺定理 / 250	
8.6.1 自然过程的方向性 / 250	
8.6.2 热力学第二定律 / 251	
8.6.3 热力学第二定律的微观含义 / 252	
8.6.4 卡诺定理 / 253	
原理应用 提高热机效率的一种方法 / 253	
* 8.7 熵 / 254	
8.7.1 熵 熵增加原理 / 254	
8.7.2 熵增加原理与热力学第二定律 / 256	
原理应用 耗散结构 / 256	
内容提要 / 258	
习题 / 260	
附录 .....	263
附录 A 矢量 .....	263
附录 B 我国法定计量单位和国际单位制(SI)单位 .....	268
附录 C 空气、水、地球、太阳系的一些常用数据 .....	271
附录 D 部分常用数学公式 .....	271
附录 E 力学、机械振动、机械波、光学和热学的量和单位 .....	274
附录 F 一些基本物理常数 .....	275
习题参考答案 .....	276
参考文献 .....	280

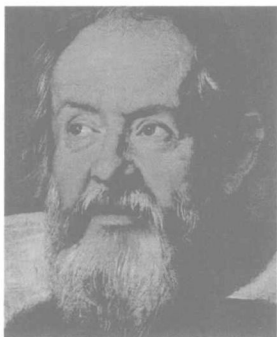
# 第1章



# 质点运动学

物理学是研究物质最普遍、最基本的运动形式及其基本规律的一门学科,这些运动形式包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核运动以及其他微观粒子的运动等。物体之间或物体各部分之间相对位置的变动称为**机械运动(mechanical motion)**。机械运动是这些运动中最简单、最基本的运动形式,例如地球的自转、河水的流动、车辆的行驶,都是机械运动。物理学中把研究机械运动的规律及其应用的学科称为**力学**。机械运动的基本形式有平动和转动。在平动过程中,若物体各点的位置没有相对变化,那么各点的运动路径完全相同,可用物体上的任一点的运动来代替整个物体的运动。在力学中,研究物体的位置随时间而变化的内容称为**质点运动学(particle kinematics)**。

本章主要内容有:位置矢量(position vector)、位移(displacement)、速度(velocity)、加速度(acceleration)、质点的运动方程、切向加速度(tangential acceleration)和法向加速度(normal acceleration)、相对运动(relative motion)等。



伽利略·伽利雷(Galileo Galilei, 1564—1642年),意大利著名数学家、物理学家、天文学家、哲学家,近代实验科学的先驱者。1590年,伽利略在比萨斜塔上做了“两个球同时落地”的著名实验,从此推翻了亚里士多德“物体下落速度和重量成比例”的学说。伽利略的著作有《星际使者》、《关于太阳黑子的书信》、《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》和《关于两门新科学的谈话和数学证明》。

## 1.1 参考系 坐标系 质点

### 1.1.1 参考系和坐标系

单纯从运动学的观点看,任何运动的描述都是相对的,即一切运动都是相对的,绝对静止的物体是没有的,这就是说任何物体的运动总是相对于其他物体或物体系来确定的。这个其他的物体或物体系就叫做参照物或参考系,简言之:**被选作参考标准的物体或相对位置不变的物体组合称为参考系(reference frame)**。同一物体的运动,由于所选取的参考系不同,对它的运动描述就不同。例如,行驶车厢中自由下落的物体相对于车厢参考系的运动是自由落体运动,而相对于地面参考系,则是沿抛物线运动,这就是运动的相对性。因此,在描述某一物体的运动状态时,必须指明是对哪个参考系而言。一般约定,如果采用的是地面参考系可以不必特别指出。

参考系的选取是任意的,一般主要由问题的性质和视研究问题的方便而定,例如,如果要研究物体在地面上的运动,最方便的是选取地球为参考系;一个宇宙飞船在火箭刚发射时,主要研究它相对于地面的运动,所以就选地面作为参考系;当飞船绕地球运行时,则选取地球为参考系,而当飞船脱离地球,绕太阳运行时,则应选太阳为参考系。

选取某个参考系后,为了定量地确定物体的位置,就需要在参考系上建立适当的**坐标系**(**coordinates system**)。常用的坐标系有笛卡儿的直角坐标系、极坐标系、自然坐标系、柱面坐标系和球面坐标系等。选取什么样的坐标系,要视问题的性质和研究问题的方便而定。

参考系是具体的物体,而坐标系是参考系的一个数学抽象。

### 1.1.2 质点

自然界的一切客观物体都有大小和形状。一般来说,物体运动时各部分的位置变化是不同的。因此,要精确描述物体各部分的运动状态不是一件容易的事。根据问题的性质,在某些情况下,往往可以忽略物体的大小和形状,把物体看成一个具有一定质量的点,这样抽象化后的理想模型称为**质点**(**mass point, particle**)。例如,在研究地球绕太阳运动的公转时,由于地球的直径不到平均日地距离的万分之一,直径与此距离相比要小得多,因此,地球上和各点相对于太阳的运动可认为是相同的,也就是说可以忽略地球的线度和形状,把地球当作一个质点。另外,当物体作平移运动时,物体上各点的运动情况都一样,物体各点都作同等的运动,因而任一点的运动都能代表整体运动,物体的形状大小就可以不加考虑。因此,平动的物体都可以简化为一个质点。

能否把一个物体抽象成质点,不是决定于物体的大小,而是取决于问题的性质,同一个物体在一问题中可以当作是质点,在另外一个问题中可能就不能当作质点。例如,在研究地球的自转运动时,就不能把地球当作质点了。一般地,当物体间的距离远大于物体本身的线度时,物体可抽象为质点。

质点运动是研究物体运动的基础。在不能把物体当作质点时,可把整个物体视为由许多质点组成,弄清这些质点的运动,就可以了解整个物体的运动。

在本书有关力学的各章中,除刚体一章外,都是把物体当作质点来处理的。

在物理学中有大量的理想化模型,它们都是对实际研究对象的一种抽象。在力学中有质点模型、刚体模型等。建立理想化的模型是物理学中一个十分重要的科学研究方法,它往往根据所研究的问题的性质,去寻找事物的主要矛盾,忽略一些次要因素,使研究对象和问题得以简化,便于作比较精确的描述。在学习大学物理学时,应该高度注意这一点。

## 1.2 描述质点运动的物理量

为了全面掌握物体的运动状况,必须要获知它在每一时刻的空间位置、运动的快慢和方向以及运动快慢的变化情况,例如飞机指挥中心就必须时刻了解飞行中飞机的整个运动情况。以下将介绍描述质点运动的这三个方面的物理量。

### 1.2.1 位置矢量 运动方程 位移和路程

#### 1. 位置矢量

在描述质点的运动时,首先必须知道质点的位置,例如跑步运动员的位置随时间变化,

如图 1-1 所示。质点在空间的位置可以用一个矢量  $\boldsymbol{r}$  来表示。如图 1-2 所示, 设质点在时刻  $t$  处于位置  $P$ , 我们从坐标原点  $O$  向此点引一条有向线段  $OP$ , 并记作矢量  $\boldsymbol{r}$ ,  $\boldsymbol{r}$  的方向确定了  $P$  点相对于坐标轴的方位,  $\boldsymbol{r}$  的大小就是  $P$  点到原点的距离。方位和距离都确定了,  $P$  点的位置也就完全确定了。用来确定质点位置的这一矢量  $\boldsymbol{r}$  叫做**质点的位置矢量**(position vector), 简称**位矢**。

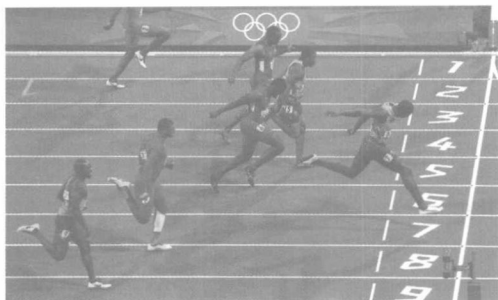


图 1-1 跑步运动员的位置随时间变化

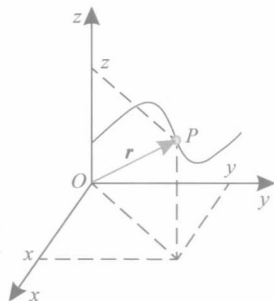


图 1-2 位置矢量

在直角坐标系中, 质点的位置  $P$  也可以用它在  $x, y, z$  轴的坐标来表示, 位矢  $\boldsymbol{r}$  可以写为

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

式中,  $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$  分别表示沿  $x, y, z$  轴正方向的单位矢量。单位矢量是大小为 1 的长度单位的矢量, 在直角坐标系中,  $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$  都是大小和方向均不变的常矢量。 $\boldsymbol{r}$  的大小为

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

位矢  $\boldsymbol{r}$  的方向余弦由下式确定:

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

式中,  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为  $\boldsymbol{r}$  与  $Ox$  轴、 $Oy$  轴和  $Oz$  轴之间的夹角。

位矢具有以下特征: ①矢量性:  $\boldsymbol{r}$  是矢量, 有大小和方向; ②瞬时性: 质点在运动时, 不同时刻其位矢不同; ③相对性: 位矢  $\boldsymbol{r}$  依赖于坐标系的选取。

## 2. 运动方程

当质点运动时, 它相对坐标原点  $O$  的位矢  $\boldsymbol{r}$  是随时间  $t$  变化的, 因此,  $\boldsymbol{r}$  是时间的函数, 即

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

这给出了任意时刻质点在空间的位置, 也称为**质点的运动方程**(equation of motion), 质点的运动方程反映了质点运动的全部情况。式(1-2)中的坐标值  $x, y, z$  一般都是随时间变化的, 是时间  $t$  的函数。

在直角坐标系中, 质点的运动方程式(1-2)也可以写成坐标分量的形式

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-3)$$

坐标分量形式的运动方程可以看作是质点在坐标轴方向同时进行的三个分运动, 或者



说,我们可以把一个质点的运动分解为各个坐标轴方向上的独立分运动;反过来说, $r$  是各个分运动叠加的结果。

从式(1-3)中消去参数  $t$  便得到质点的轨迹方程,所以式(1-3)也是运动轨迹的参数方程,质点运动学的重要任务之一就是找出质点运动所遵循的运动方程。

### 【例题 1-1】

一质点在平面上的运动方程为  $r=(t+1)\mathbf{i}+(t^2+2)\mathbf{j}$ , 式中  $r$  的单位是 m, 时间  $t$  的单位是 s, 试求该质点的运动轨迹。

**解** 质点在  $x, y$  坐标轴上的分运动方程分别为

$$x = t + 1$$

$$y = t^2 + 2$$

将上面两式消去  $t$  后, 便得到质点的轨迹方程为

$$y = (x - 1)^2 + 2 \quad (\text{m})$$

显然, 质点的运动轨迹是抛物线。

### 3. 位移和路程

要了解质点的运动, 不仅要知道它的位置, 还要知道它的位置变化情况。如图 1-3 所示, 设质点在  $t_1$  时刻处于位置  $P_1$  点, 质点在  $t_2$  时刻处于位置  $P_2$  点,  $P_1$  和  $P_2$  的位矢分别为  $r(t_1)$  和  $r(t_2)$ , 则质点在  $t_1 \sim t_2$  时间间隔内位矢的增量为

$$\Delta r = r(t_2) - r(t_1) \quad (1-4)$$

$\Delta r$  称为质点在  $t_1 \sim t_2$  时间内的 **位移矢量 (displacement vector)**, 简称 **位移**。位移是描述质点空间位置变化的物理量, 它是从质点初始时刻位置指向终点时刻位置的有向线段。

在直角坐标系中, 设质点在  $t_1$  时刻的坐标为  $x_1, y_1, z_1$ , 在  $t_2$  时刻的坐标为  $x_2, y_2, z_2$ , 则这段时间内, 质点的位移为

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

式中,  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  分别为质点在  $t_1 \sim t_2$  时间间隔内各坐标分量的增量。与位矢一样, 位移也具有矢量性、瞬时性和相对性等特性。

质点运动的实际路径是图 1-3 中的曲线段  $\Delta s$ , 其长度叫做 **路程 (path)**, 特别需要注意的是位移  $\Delta r$  和路程  $\Delta s$  的区别: 首先  $\Delta r$  是矢量, 仅与质点的始、末位置矢量  $r(t_1)$  和  $r(t_2)$  有关, 而与中间过程无关,  $\Delta s$  是 **标量 (scalar)**, 与过程有关, 它是质点运动轨迹的长度; 其次, 一般情况下路程并不等于位移的大小, 即  $\Delta s \neq |\Delta r|$ , 例如, 当质点经一闭合路径回到起始位置时, 其位移为零, 而路程则不为零, 只有当时间间隔  $\Delta t$  取无穷小的极限情况下, 位移大小  $|\mathrm{d}r|$  才等于路程  $\mathrm{d}s$ 。

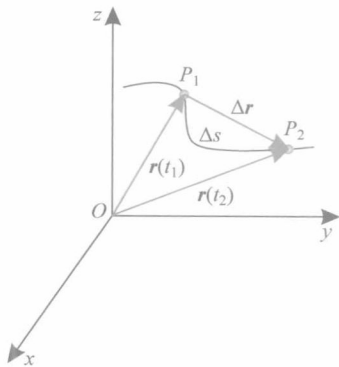


图 1-3 位移与路程