

新形态高等学校理工类课程系列教材

# 大学物理学 (简明版)

*Physics*

上册

毛骏健 主编

高等教育出版社

新形态高等学校理工类课程系列教材

# 大学物理学 (简明版)

# Physics

上册

DAXUE WULIXUE

毛骏健 主编  
吴天刚 宋志怀 参编  
倪忠强 绘图



高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书是在“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《大学物理学》基础上编写而成的简明版教材,目的是为适应一些物理课程学时数比较少的高校的教学需求。根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),简明版教材内容基本涵盖了“基本要求”中的A类内容,并根据编者的长期教学经验适当选择了部分B类内容。本书保留了原教材的基本特色,内容结构清晰、表述精练,充分借鉴了国外优秀物理教材的特点,理论与实际结合紧密、重物理思想和物理图像,内容表述通俗易懂。全书分为上、下两册,内容包括力学、电磁学、热学、光学、振动与波动以及部分现代物理学。

本书可作为普通高等学校非物理类理、工、农、医各专业的大学物理基础课程的教材,也可供社会读者阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学:简明版.上册/毛骏健主编.——北京:高等教育出版社,2014.6  
ISBN 978-7-04-039614-0

I. ①大… II. ①毛… 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(2014)第073542号

策划编辑 王 硕  
责任校对 李大鹏

责任编辑 缪可可  
责任印制 朱学忠

封面设计 姜 磊

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印 刷 高教社(天津)印务有限公司  
开 本 850 mm×1168 mm 1/16  
印 张 13.75  
字 数 400千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版 次 2014年6月第1版  
印 次 2014年6月第1次印刷  
定 价 29.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 39614-00



# 与本书配套的数字课程资源使用说明

与本书配套的数字课程资源发布在高等教育出版社易课程网站，请登录网站后开始课程学习。

## 一、网站登录

1. 访问 <http://abook.hep.com.cn/1245824/>
2. 输入数字课程账号（见封底明码）、密码、验证码
3. 点击“进入课程”
4. 开始课程学习

账号自登录之日起一年内有效，过期作废。  
使用本账号如有任何问题，  
请发邮件至：[ecourse@hep.com.cn](mailto:ecourse@hep.com.cn)。



The screenshot shows the user interface of the digital course website. At the top left is the '易课程 e-course' logo. The main header features the title '大学物理学' (University Physics) and the author '主编 毛骏健' (Editor-in-Chief: Mao Junjian). Below the header is a login section with input fields for '用户名' (Username), '密码' (Password), and '验证码' (Verification Code), followed by a '9 3 2 0' code and a red '进入课程' (Enter Course) button. A navigation menu includes '数字课程介绍' (Digital Course Introduction), '纸质教材' (Paper Textbook), '版权信息' (Copyright Information), and '联系方式' (Contact Information). The '纸质教材' section is active, displaying two book covers with their respective details:

Book Cover	书名	作者	ISBN	出版商	出版日期	定价
	《大学物理学（简明版）（上册）》	毛骏健	978-7-04-039614-0	高等教育出版社	2014年5月	29.90元
	《大学物理学（简明版）（下册）》	毛骏健				

On the right side, a '系列教材' (Series Textbook) section lists four books with globe icons:


- 大学物理学（第二版）（上册） 毛骏健 编
- 大学物理学（第二版）（下册） 毛骏健 编
- 大学物理学（简明版）（上册） 毛骏健 编
- 大学物理学（简明版）（下册） 毛骏健 编

<http://abook.hep.com.cn/1245824/>

## 二、资源使用

本书配套的数字资源包括 5 种类型：动画、演示实验视频、习题答案、补充习题及答案、拓展阅读材料。

### 动画：

在部分章以及拓展资源中，配套了动画资源，书中的特定图标是 ，您登录易课程网站后，可以通过点击按钮或者输入参数，观看相应的物理现象的演示。

### 演示实验视频：

在部分章以及拓展资源中，配套了演示实验视频，您可以通过扫描二维码或者登录易课程网站观看，直观了解各类物理现象。

### 习题答案：

在每一章都配套了该章习题的答案，供您作业时参考。

### 补充习题及答案：

在拓展资源中配套了补充习题及答案，补充习题的答案包含详细的解题步骤，供您进一步练习，巩固物理概念和知识。

### 拓展阅读材料：

在拓展资源中配套了拓展阅读材料，对书中未涉及的物理概念、物理学名人轶事进行了补充。

# 序言

本书是根据国内部分高校大学物理课程学时数比较少的现状而编写的一部简明版(少学时)《大学物理学》教材,是在“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《大学物理学》(毛骏健、顾牡编写,高等教育出版社出版)的基础上进行压缩、改编而成。编写之前,作者曾有两种不同的考虑:一是保留原书中的所有章节和内容,只是在内容叙述上进行简化和压缩,但是这样做可能会出现一个问题,即对一些需要重点掌握的内容讲不透、讲不深,造成学生的一知半解;二是干脆删除原书中的几个章节,对保留章节的内容进行适当的精简和压缩。为此,作者做了充分的调研,发现物理课时数相对比较少的高校大多不是研究型高校,而是以工程应用和技术类学科专业为主体的应用型学校。这些高校之所以把物理学作为一门基础课程,是为学生进一步学习专业课程打基础、做铺垫的。因此在物理教学中,这些学校往往比较注重力学、电磁学、热学、光学等一些经典物理学内容,而选择性地介绍一些现代物理学内容也只是为了让学生了解一些现代物理学的思想,并不要求学生掌握多少现代物理学知识。经过慎重考虑,作者采用了第二套方案,在原完整版教材的基础上删去了广义相对论、原子核物理、粒子物理简介、固体物理简介等一些现代物理学内容,对所保留的经典物理学内容和量子物理学内容进行了适当的改编。改编的原则是:在确保内容知识完整性和系统性的基础上进行削枝强干,使文字叙述更精练、更通俗。考虑到简明版教材上下册内容的均衡分配以及一些学校教学上的要求,我们对部分章节的次序进行了调整,将振动与波动内容调整到下册,放在光学的前面,这样有助于学生在学习和掌握了机械波的一般性质后进一步学习波动光学的知识。本书对全部例题和习题进行了梳理,排除繁琐和复杂的习题,优选简单且概念性强的题目。

本书完全保留了原教材的基本特色,继承了国内传统教材内容结构清晰、表述精练的特色;同时在书的内容体例、写作风格、图片和图示设计等方面又充分借鉴了国外优秀物理教材的特点。全书采用彩色印刷,图文并茂,给人以赏心悦目的感觉,使读者在阅读时产生一种友好和亲切感。在写作风格上,也有别于传统教材,本书语言朴实流畅,通俗易懂。尤其是在各章节的开头,常以一个有趣的物理现象、生活常识或一段科学史话为引子,逐渐过渡到对具体知识内容的描述,由此可以引发读者的兴趣或好奇心,催动读者的求知欲去阅读各章节的具体内容。



突出物理学知识与科学技术相结合,与生活实际相结合,与自然现象相结合,是本书的又一个重要特点。我们汲取了国外许多教材有益的经验。知识点与实际应用的结合不仅体现在正文中,而且较多地出现在例题和习题中。我们的目的是要让读者在学完物理学后产生一种自信和满足,对许许多多生活中的或是自然界的现象都可以道出其所以然;对有些高新技术不会感到惊讶和不可理解,发现洞悉其核心原理是那么简单,从而使读者感到学习物理学对自己是有益的,并能在今后的工作实践中以所学的物理学知识为基础,进一步深造,并有所创新和发明。

对读者而言,学会科学的思维和方法比获取物理学知识本身更为重要。因此在本书的编写过程中我们十分注意选材,发掘那些对学生的科学思维和方法有启迪的典型内容,尽可能地提供一些科学伟人对某一问题的思想方法的素材以及把物理学方法论中所涉及的一些基本原理:简单性原理、守恒原理、对应原理、互补原理……介绍给读者。这一方面可以使读者对科学家的思维方式有所了解,对物理学的方法论有所认识;另一方面也可以提高读者的学习兴趣。

考虑到物理演示实验在物理教学中的重要作用,本教材借助现代信息技术在书中的某些章节插入了二维码标识,读者可以通过自己的智能手机或 iPad 观看相关知识点的物理演示实验的视频录像,以帮助读者更好地理解 and 掌握所学知识,增加学习物理学的情趣。

参与本次教材修订工作的人员还有同济大学的吴天刚老师、鲍鸿吉老师、宋志怀老师和倪忠强老师。在此特别要感谢倪忠强老师,花费了大量精力对书中的全部图片重新进行了精心绘制,使这部教材更精美。高等教育出版社物理分社对本书的出版也给予了大力支持,在此谨致以衷心的感谢。

限于编者的学术水平,书中难免存在不妥之处,希望广大师生在使用过程中多提宝贵意见,使我们的教材在使用中不断完善。

毛骏健于同济大学

2014年3月1日

# 目录



## 第1章 质点运动学

1

1-1 质点、参考系、坐标系	2
1-1-1 质点	2
1-1-2 参考系和坐标系	2
1-2 描述质点运动的物理量	3
1-2-1 位置矢量与运动方程	3
1-2-2 位移与路程	4
1-2-3 速度	5
1-2-4 加速度	6
1-2-5 自然坐标系下的速度和加速度	10
1-2-6 圆周运动及其角量描述	11
1-3 相对运动	14
思考题	16
习题	17

## 第2章 动力学基本定律

19

2-1 牛顿定律	20
2-1-1 牛顿定律	20
2-1-2 力学中常见的几种力	22
2-1-3 牛顿定律的应用	26
2-1-4 惯性系与非惯性系	29

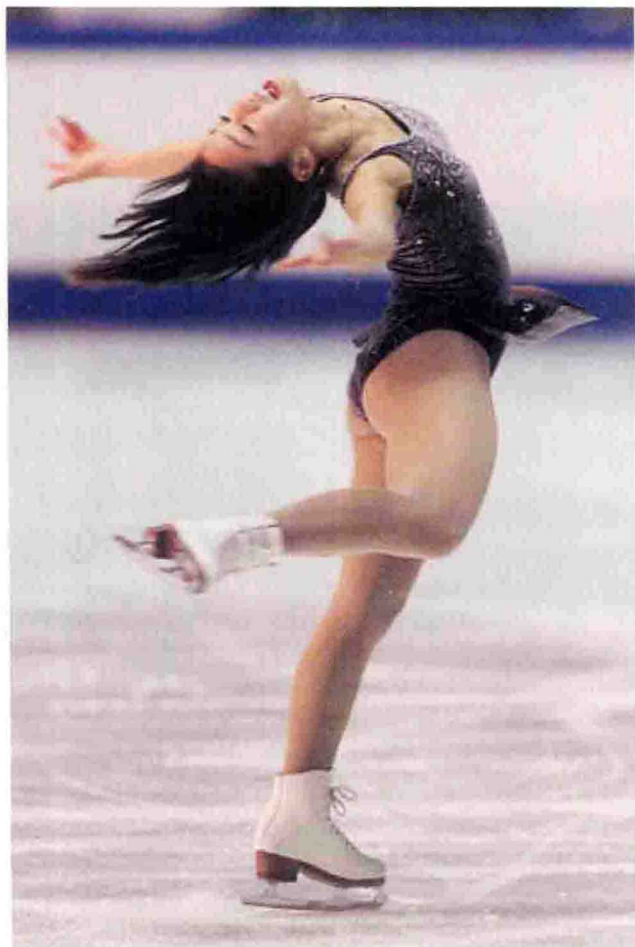
2-2 动量守恒定律	31
2-2-1 动量	31
2-2-2 动量定理	32
2-2-3 动量守恒定律	36
★2-2-4 火箭飞行原理	38
★2-2-5 质心与质心运动定理	39
2-3 角动量守恒定律	42
2-3-1 质点的角动量	42
2-3-2 力矩	43
2-3-3 角动量定理 角动量守恒定律	44
2-4 能量守恒定律	47
2-4-1 功和功率	48
2-4-2 动能和动能定理	50
2-4-3 保守力与非保守力 势能	53
2-4-4 机械能守恒定律	55
2-4-5 碰撞	56
思考题	60
习题	62

## 第3章 刚体的动力学基础

67

3-1 刚体的基本运动	68
3-2 刚体的角动量和转动定律	69





3-2-1 刚体对定轴的角动量 .....	69
3-2-2 刚体对定轴的角动量定理和转动定律 .....	73
3-2-3 刚体对定轴的角动量守恒定律 .....	75
3-3 力矩的功和刚体的转动动能 .....	77
3-3-1 力矩的功 .....	77
3-3-2 刚体的定轴转动动能和动能定理 .....	78
思考题 .....	80

习题 .....	81
----------	----

## 第4章 静电场 85

4-1 电荷 库仑定律 .....	86
4-1-1 电荷 .....	86
4-1-2 库仑定律 .....	87
4-2 电场 电场强度 .....	88
4-2-1 电场 .....	88
4-2-2 电场强度 .....	89



4-2-3 电场强度的计算 .....	90
4-3 高斯定理及应用 .....	94
4-3-1 电场线 .....	94
4-3-2 $E$ 通量 .....	95
4-3-3 高斯定理 .....	96
4-3-4 高斯定理的应用 .....	97
4-4 静电场的环路定理 电势 .....	100
4-4-1 静电场的环路定理 .....	101
4-4-2 电势能 .....	102
4-4-3 电势和电势差 .....	103
4-4-4 电势的计算 .....	104
4-5 等势面 电势梯度 .....	106
4-5-1 等势面 .....	106
4-5-2 电场强度与电势梯度的关系 .....	107
思考题 .....	108
习题 .....	109

## 第5章 静电场中的导体和电介质 113

5-1 导体的静电平衡性质 .....	114
---------------------	-----





5-1-1 导体的静电平衡条件 .....	114	6-2-2 磁场和磁感应强度 .....	142
5-1-2 静电平衡时导体上的电荷分布 .....	115	6-2-3 磁感应线 .....	143
5-1-3 空腔导体 .....	116	6-3 毕奥-萨伐尔定律 .....	143
5-1-4 静电屏蔽 .....	117	6-3-1 毕奥-萨伐尔定律 .....	144
5-2 静电场中的电介质 .....	119	6-3-2 毕奥-萨伐尔定律的应用 .....	144
5-2-1 电介质的极化 .....	120	6-3-3 运动电荷的磁场 .....	149
5-2-2 极化强度 .....	121	6-4 磁场中的高斯定理 .....	150
5-2-3 有介质时的高斯定理 .....	122	6-4-1 $B$ 通量 .....	150
5-3 电容和电容器 .....	124	6-4-2 磁场中的高斯定理 .....	151
5-3-1 孤立导体的电容 .....	124	6-5 安培环路定理 .....	151
5-3-2 电容器 .....	125	6-5-1 安培环路定理 .....	151
5-3-3 电容器的连接 .....	127	6-5-2 安培环路定理的应用 .....	153
5-4 静电场的能量 .....	130	6-6 磁场对运动电荷的作用 .....	156
5-4-1 点电荷系的电能 .....	130	6-6-1 带电粒子在磁场中的运动 .....	156
5-4-2 电容器的能量 .....	131	6-6-2 电磁场控制带电粒子运动的实例 .....	158
5-4-3 电场的能量 .....	132	6-7 磁场对载流导线的作用 .....	160
思考题 .....	133	6-7-1 载流导线在磁场中受的力 .....	160
习题 .....	135	6-7-2 载流线圈在磁场中所受的磁力矩 .....	163
<b>第6章 恒定磁场</b> .....	<b>137</b>	6-8 磁介质 .....	166
6-1 恒定电流 电动势 .....	138	6-8-1 物质的磁性 .....	166
6-1-1 恒定电流和恒定电场 .....	138	6-8-2 磁化强度与磁化电流 .....	168
6-1-2 电源和电动势 .....	139	6-8-3 磁介质中的磁场 磁场强度 .....	169
6-2 磁场 磁感应强度 .....	140	6-8-4 铁磁质 .....	172
6-2-1 磁的基本现象 .....	140	思考题 .....	174
6-2-2 磁场和磁感应强度 .....	142	习题 .....	175
6-2-3 磁感应线 .....	143	<b>第7章 变化的电磁场</b> .....	<b>179</b>
6-3 毕奥-萨伐尔定律 .....	143	7-1 电磁感应定律 .....	180
6-3-1 毕奥-萨伐尔定律 .....	144	7-1-1 法拉第电磁感应定律 .....	180
6-3-2 毕奥-萨伐尔定律的应用 .....	144	7-1-2 楞次定律 .....	181
6-3-3 运动电荷的磁场 .....	149	7-2 动生电动势 感生电动势 .....	183
6-4 磁场中的高斯定理 .....	150	7-2-1 动生电动势 .....	183
6-4-1 $B$ 通量 .....	150	7-2-2 感生电动势和感生电场 .....	186
6-4-2 磁场中的高斯定理 .....	151	7-2-3 涡电流 .....	188
6-5 安培环路定理 .....	151	7-3 自感和互感 .....	189
6-5-1 安培环路定理 .....	151		
6-5-2 安培环路定理的应用 .....	153		
6-6 磁场对运动电荷的作用 .....	156		
6-6-1 带电粒子在磁场中的运动 .....	156		
6-6-2 电磁场控制带电粒子运动的实例 .....	158		
6-7 磁场对载流导线的作用 .....	160		
6-7-1 载流导线在磁场中受的力 .....	160		
6-7-2 载流线圈在磁场中所受的磁力矩 .....	163		
6-8 磁介质 .....	166		
6-8-1 物质的磁性 .....	166		
6-8-2 磁化强度与磁化电流 .....	168		
6-8-3 磁介质中的磁场 磁场强度 .....	169		
6-8-4 铁磁质 .....	172		
思考题 .....	174		
习题 .....	175		

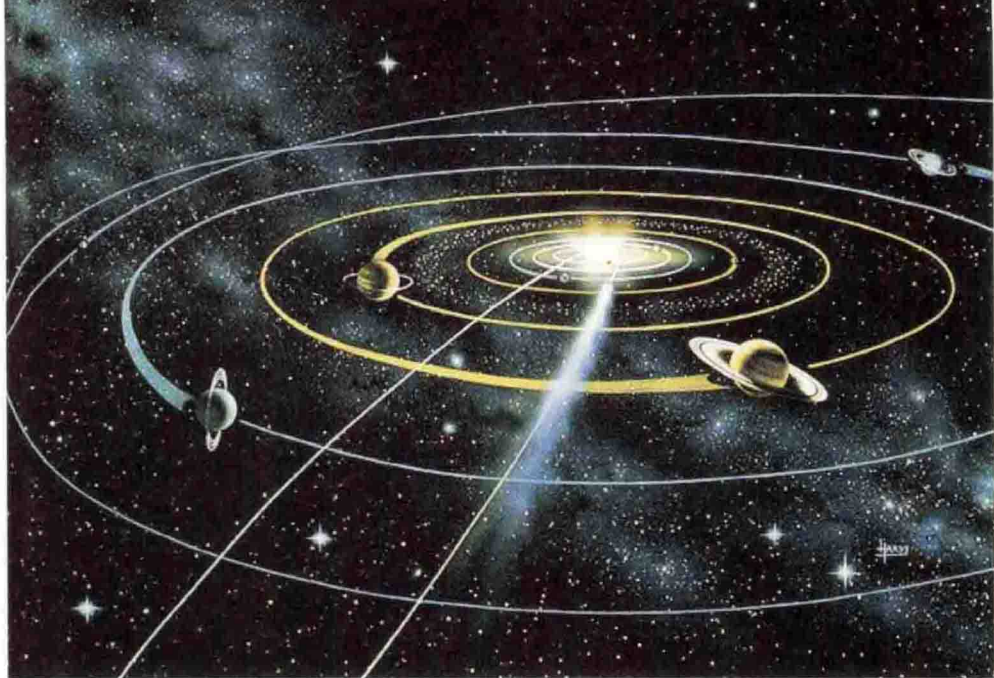


7-3-1 自感 .....	189
7-3-2 互感 .....	192
7-4 磁场的能量 .....	193

7-4-1 自感磁能 .....	193
7-4-2 磁场的能量 .....	194
7-5 位移电流 .....	195
7-5-1 位移电流 .....	196
7-5-2 全电流安培环路定理 .....	197
7-6 麦克斯韦方程组 电磁波 .....	198
7-6-1 麦克斯韦方程组 .....	199
7-6-2 电磁波 .....	200
7-6-3 电磁波谱 .....	201
思考题 .....	203
习题 .....	204



行星绕太阳的运转是一种机械运动。



## 第 1 章

# 质点运动学

## 世

界是物质的. 一切物质都在永恒不息地运动着, 这便是运动的绝对性. 日月经天, 江河行地, 风雨雷电, 变幻的大气……自然界中万象纷呈, 溯本求源, 皆归因于物质运动的不同形态与规律. 法国科学家笛卡儿 (R. Descartes, 1596—1650) 曾说过: “给我物质和运动, 我就能创造宇宙.”

物质和运动是不可分割的两个概念, 运动是物质存在的形式. 物质的运动形式多种多样, 这里所指的“运动”是个广义的概念, 它包括宇宙间所发生的一切变化和过程. 各种不同的物质运动形式既服从普遍的规律, 又具有自身独特的规律. 在物质的各种运动形式中, 最普遍而又最基本的一种运动形式是一个物体相对于另一个物体的空间位置 (或者一个物体的某一部分相对于其另一部分的位置) 随时间而发生变化的运动, 这种运动形式称为**机械运动** (mechanical motion), 例如行星绕恒星的运转、地球的自转、河水的流动、车辆的行驶等, 都是机械运动.

研究物体机械运动及其规律的学科称为**力学** (mechanics). 一般可以把力学分为运动学、静力学和动力学三部分. 静力学在工程中应用较多. 在一些工程类力学书中有详细的介绍, 本书不作讨论. 我们仅就运动学和动力学问题作一般介绍. **运动学** (kinematics) 的任务就是描述物体的运动状态随时间变化的规律, 而并不涉及运动变化的原因. 由于客观物体的多样性和物体运动形式的复杂性, 给描述物体的运动带来不少困难. 因此在一定的条件下, 建立一些理想化的物理模型可使主要规律凸显, 也可使处理问题得以简化. 本章将首先介绍力学中一个最简单的物理模型——质点, 引入描述质点运动的相应物理量, 继而阐述运动的相对性.

# 1-1 质点、参考系、坐标系

## 1-1-1 质点

自然界的一切客观物体都有一定的大小和形状. 一般, 当物体作机械运动时, 其运动状况是十分复杂的. 例如地球的运动, 地球除了绕太阳公转以外, 本身还有自转; 地球上的各个不同部分在运动过程中具有不同的轨道, 且任何一个瞬间不同部分的运动快慢以及这种快慢的变化也都是不同的. 这样, 描述地球的运动就比较困难. 但是, 如果只是研究地球绕太阳的公转, 而不去关心地球的自转, 那么, 由于地球到太阳的距离远大于地球本身的大小(约  $10^4$  倍), 地球上的各点相对于太阳的运动可以认为是近似相同的, 因此可以用一个具有地球质量的点来代表整个地球, 于是地球绕太阳的运动便可简化为这个点绕太阳的转动. 一般情况下, 在描述物体的运动时, 如果物体的形状和大小对所研究的问题影响不大而可以忽略, 或者物体上各部分具有相同的运动规律, 那么就可以把该物体当成一个具有一定质量的几何点, 这样的几何点称为**质点**(particle).

在物理学中处理一些较为复杂的问题时, 为了突出要研究的主题, 且使问题的处理简单起见, 我们往往根据所研究问题的性质, 去寻找事物的主要矛盾, 忽略一些次要因素, 建立一个理想化的**模型**(model)来代替实际的研究对象, 从而使问题大大地简化, 这是一种常用的科学研究方法. 质点是描述物体机械运动的最简单的物理模型. 值得注意的是: 在实际问题中, 一个物体能否被抽象为质点, 关键不在于物体的大小, 而在于所研究问题的性质. 例如: 地球的半径约为  $6\,370\text{ km}$ , 显然是一个庞然大物, 但是在讨论地球绕太阳的公转时, 可以把它抽象为一个质点, 如图 1-1 所示; 而乒乓球的直径仅为  $40\text{ mm}$ , 但是当研究其旋转性质和运动规律时, 却不能够把它当成质点来看待.

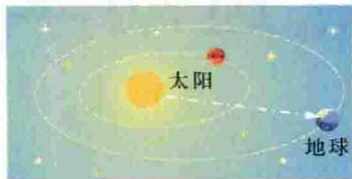


图 1-1 地球的半径约为  $6\,370\text{ km}$ , 而地球到太阳的距离约为  $1.5 \times 10^8\text{ km}$ , 因此在讨论地球绕太阳的公转时, 可以将地球抽象为一个质点



动画: 地球绕日运动



图 1-2 在不同的参考系下, 对同一物体运动的描述是不同的. 伫立在站台上的人看来, 火车在前进; 而静坐在车厢里的乘客看来, 火车没有运动



动画: 运动的相对性

## 1-1-2 参考系和坐标系

宇宙中任何物体都处于永恒不息的运动之中, 绝对静止的物体是没有的, 运动的绝对性已被科学发展史所证实而成为今天人们的科学常识. 运动虽然具有绝对性, 但对一个物体运动的描述却具有相对性. 同一个物体相对于不同的观察者来说, 具有不同的运动状况. 例如, 当一列火车通过车站时, 伫立在站台上的人看来, 火车在前行; 而静坐在车厢里的乘客看来, 火车相对于他并没有运动, 而站台上的人却在向后退去, 如图 1-2 所示. 因此描述一个物体的运动, 首先要指明运动是相对哪个参考物体而言的. 这个被选定的参考物体称为**参考系**(reference system).



在运动学中,对参考系的选择完全是任意的,这取决于问题的性质和研究的方便.例如,研究地面上物体的运动,通常选取地面或地面上静止的物体作为参考系,而在研究行星绕太阳的运动时,可以取太阳作为参考系.

参考系选定以后,为了能够定量地描述物体的位置及其随时间的改变,还必须在参考系上建立一个适当的**坐标系**(coordinate system).运动物体的位置就可由它在坐标系中的坐标表明.在具体问题中,如果指明了坐标系,就意味着已经选定了参考系,或者说,坐标系是参考系作定量描述时的替身.我们可以根据具体问题的需要,选定合适的坐标系.常用的坐标系有直角坐标系、自然坐标系、极坐标系和球坐标系等.

## 1-2 描述质点运动的物理量

设想一幅运动场景:一个不明飞行物突然进入了雷达监控区域.为了全面掌握它的运动状况,必须获知它在每一时刻的空间位置、运动快慢和方向以及运动快慢的变化程度.这样,也就能够全面掌握该不明飞行物的整个运动状况.以下我们将就描述质点运动的这三个方面引入相应的物理量.

### 1-2-1 位置矢量与运动方程

每年的夏末秋初,我国沿海城市的居民常会在气象预报的广播中听到热带风暴的消息.例如,一则热带风暴警报是这样说的:“今年第5号热带风暴,今天凌晨在上海东南大约1200 km的洋面上生成.”这则消息给了我们有关风暴的两个信息:①以上海为参考点的东南方向;②距离上海1200 km.根据这两个信息,我们就可以知道热带风暴在凌晨时刻所在的位置.由此看来,在选定了坐标系以后,可以以坐标系的原点 $O$ 作为参考点,画一条有向线段来表示运动质点在空间的位置.这条有向线段称为**位置矢量**(position vector),简称**位矢**,用 $\boldsymbol{r}$ 表示<sup>①</sup>.在国际单位制中,位置矢量的单位是米(m).

图1-3给出了运动质点(飞机)在某一时刻的位矢 $\boldsymbol{r}$ ,在直角坐标系 $Oxyz$ 中,其矢量式可表示为

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

其中的 $\boldsymbol{i}$ 、 $\boldsymbol{j}$ 、 $\boldsymbol{k}$ 分别是沿坐标轴 $Ox$ 、 $Oy$ 、 $Oz$ 正方向的单位矢量,式中的 $x\boldsymbol{i}$ 、 $y\boldsymbol{j}$ 、 $z\boldsymbol{k}$ 分别是位矢 $\boldsymbol{r}$ 在三个坐标轴方向的分矢量.位矢大小的表达式为

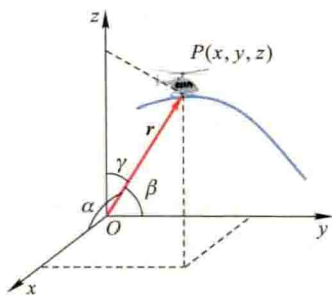


图1-3 飞机的位置矢量 $\boldsymbol{r}$

① 在印刷品中,矢量都用黑体字母表示;在书写中,一般写成 $\vec{r}$ 。



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

位矢的方向由下式确定:

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r} \quad (1-3)$$

式中的  $\alpha, \beta, \gamma$  分别是位矢  $\mathbf{r}$  与  $Ox$  轴、 $Oy$  轴、 $Oz$  轴之间的夹角。

质点在运动时,其位矢  $\mathbf{r}$  随时间  $t$  变化,  $\mathbf{r}$  是时间  $t$  的函数,即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-4)$$

上式称为质点的运动方程(equation of motion)。

质点在运动中,其位置坐标是时间  $t$  的函数,因此运动方程也可以用时间  $t$  作为参量,表示成分量式,即

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-5)$$

在上述分量形式中消去时间参量  $t$ , 就可以得到运动质点的轨道方程。

## 1-2-2 位移与路程

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. 设飞机(可视为质点)沿图 1-4 所示的曲线运动,在  $t$  时刻,飞机位于  $A$  点,其位矢为  $\mathbf{r}_A$ ; 经过  $\Delta t$  时间后,飞机到达  $B$  点,其位矢为  $\mathbf{r}_B$ . 在此过程中,飞机的位置变化量可用由  $A$  点指向  $B$  点的矢量  $\Delta \mathbf{r}$  表示.  $\Delta \mathbf{r}$  称为飞机由位置  $A$  到位置  $B$  的位移矢量,简称位移(displacement vector). 从图 1-4 中可以看出

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1-6)$$

在直角坐标系  $Oxyz$  中,位移  $\Delta \mathbf{r}$  可表示为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} + (z_B - z_A)\mathbf{k} \\ &= \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \end{aligned}$$

式中,  $\Delta x = x_B - x_A$ ,  $\Delta y = y_B - y_A$ ,  $\Delta z = z_B - z_A$ . 位移大小的表达式为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (1-7)$$

飞机在  $\Delta t$  时间内,沿其飞行轨道上所经过的曲线长度称为路程(path),如图 1-4 中的曲线  $AB$  的长度,记作  $\Delta s$ . 值得注意,位移和路程是两个不同的概念,位移是矢量,它的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$  为  $A, B$  两点的直线距离,路程则是标量,它是  $A, B$  两点之间的弧长  $\Delta s$ . 在一般情况下,  $|\Delta \mathbf{r}| \leq \Delta s$ , 当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,有  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s =$

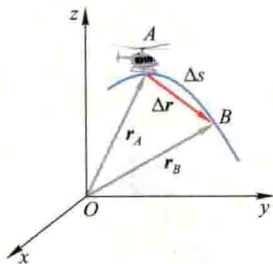


图 1-4  $\Delta \mathbf{r}$  称为飞机由位置  $A$  到位置  $B$  的位移矢量



动画:位移和路程

$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \mathbf{r}|$ , 即  $ds = |d\mathbf{r}|$ .

### 1-2-3 速度

速度是描述质点运动快慢和运动方向的物理量. 设质点在  $t$  到  $t + \Delta t$  这段时间内, 完成了位移  $\Delta \mathbf{r}$ . 为了表征质点在这段时间内运动的快慢和方向, 我们把质点发生的位移  $\Delta \mathbf{r}$  与所经历的时间  $\Delta t$  之比, 定义为质点在这段时间内的平均速度  $\bar{\mathbf{v}}$  (average velocity), 即

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

平均速度是一个矢量, 其方向与位移  $\Delta \mathbf{r}$  的方向相同. 平均速度的大小等于质点在  $\Delta t$  时间内位置矢量的平均变化率, 显然它只能粗略地反映在有限时间  $\Delta t$  内质点位置变化的快慢和方向.

为了了解质点每一时刻或者说每一瞬时的速度, 将时间间隔  $\Delta t$  取得很小, 从图 1-4 可知, 在  $A$  点附近, 时间间隔  $\Delta t$  取得越小, 质点的平均速度就越是接近于  $t$  时刻它在  $A$  点的速度. 当时间间隔  $\Delta t$  趋近于零时, 质点平均速度的极限称为瞬时速度 (instantaneous velocity), 简称速度, 用  $\mathbf{v}$  表示, 可写作

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

上式表明, 质点在  $t$  时刻的瞬时速度等于其位置矢量  $\mathbf{r}$  对时间  $t$  的一阶导数, 它仍是一个矢量. 所以速度是矢量, 其大小为  $|\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = \frac{|d\mathbf{r}|}{dt}$ ; 其方向是当  $\Delta t$  趋近于零时平均速度或位移  $\Delta \mathbf{r}$  的极限方向. 由图 1-5 可以看出, 当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,  $B$  点无限趋近于  $A$  点, 此时位移的方向趋近于曲线上  $A$  点的切线方向. 这样, 质点沿曲线运动时, 在某一点处的运动方向可用该质点的速度方向表征, 而该质点的速度方向沿该点处曲线的切线, 并指向质点运动前进的一方. 在国际单位制中, 速度的单位是米每秒 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

同样的, 我们把把在  $\Delta t$  时间内飞机所经过的路程  $\Delta s$  与时间间隔  $\Delta t$  之比值定义为  $\Delta t$  时间内质点的平均速率 (average speed), 用  $\bar{v}$  表示, 即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-10)$$

当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 平均速率的极限值即为质点在  $t$  时刻的瞬时速率  $v$ , 即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-11)$$

显然, 当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,  $ds = |d\mathbf{r}|$ , 因此有  $v = |\mathbf{v}|$ . 这表明速率就等于速度的大小, 它反映了质点运动的快慢程度.

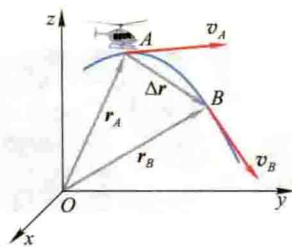


图 1-5 飞机在运动曲线上某点的速度方向就是沿着曲线在该点的切线, 并指向质点运动前进的方向



动画: 曲线运动

在直角坐标系  $Oxyz$  中,速度矢量可表示为

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = v_x \boldsymbol{i} + v_y \boldsymbol{j} + v_z \boldsymbol{k} = \frac{dx}{dt} \boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt} \boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt} \boldsymbol{k} \quad (1-12)$$

速度的大小为

$$v = |\boldsymbol{v}| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (1-13)$$

速度的方向可由其方向余弦表示[参照式(1-3)的形式].

## 1-2-4 加速度

加速度是反映质点的速度矢量随时间变化的物理量. 设质点在  $\Delta t$  时间内, 沿图 1-6 所示的某一轨道由  $A$  点运动至  $B$  点, 速度由  $\boldsymbol{v}_A$  变为  $\boldsymbol{v}_B$ , 速度的增量为  $\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A$ . 在  $\Delta t$  时间内, 质点的平均加速度(average acceleration)定义为

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

平均加速度只能粗略地反映  $\Delta t$  时间内质点速度的变化情况. 与讨论速度的情况相仿, 当我们把时间间隔取得足够小时 ( $\Delta t \rightarrow 0$ ), 取平均加速度的极限, 即为瞬时加速度(instantaneous acceleration), 简称加速度, 即

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

加速度等于速度  $\boldsymbol{v}$  对时间  $t$  的一阶导数, 或位置矢量  $\boldsymbol{r}$  对时间  $t$  的二阶导数, 加速度仍是一个矢量. 其方向是当  $\Delta t \rightarrow 0$  时速度增量  $\Delta \boldsymbol{v}$  的极限方向. 质点作一般曲线运动时, 加速度的方向总是指向轨道曲线凹的一侧, 如图 1-7 所示. 在国际单位制中, 加速度的单位是米每二次方秒 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

在直角坐标系  $Oxyz$  中, 加速度可表示为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{a} &= a_x \boldsymbol{i} + a_y \boldsymbol{j} + a_z \boldsymbol{k} \\ &= \frac{dv_x}{dt} \boldsymbol{i} + \frac{dv_y}{dt} \boldsymbol{j} + \frac{dv_z}{dt} \boldsymbol{k} \\ &= \frac{d^2 x}{dt^2} \boldsymbol{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \boldsymbol{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \boldsymbol{k} \end{aligned} \quad (1-16)$$

加速度的大小为

$$a = |\boldsymbol{a}| = \sqrt{\left(\frac{d^2 x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 z}{dt^2}\right)^2} \quad (1-17)$$

加速度的方向也可由其方向余弦表示.

从位置矢量  $\boldsymbol{r}$ 、速度  $\boldsymbol{v}$  以及加速度  $\boldsymbol{a}$  在直角坐标系  $Oxyz$  中的矢量表达式可以

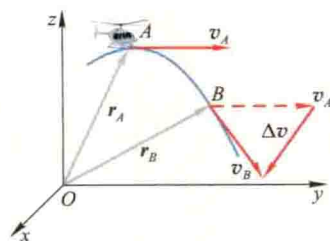


图 1-6 平均加速度的方向为速度增量  $\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A$  的方向



图 1-7 小车作一般曲线运动时, 其加速度的方向总是指向轨道曲线凹的一侧