



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理教程

(上册)

第二版

上海交通大学物理教研室 组编

胡盘新 主审



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理教程

(上册)

第二版

上海交通大学物理教研室 组编

胡盘新 主审



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书分上、下两册,适合 120 学时使用。上册包括 9 章:力和运动、时空理论、功与能量、动量与角动量、刚体力学基础、机械振动、机械波、平衡态与热力学基础等。每章后面均配有适量的习题和思考题,书后附参考答案。

本书为非物理专业的大学物理教程,可作为高等院校工科各专业的大学物理教科书,也可作为综合性大学和师范院校非物理专业的教材或参考书。

读者联系邮箱: science@press.sjtu.edu.cn

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程. 上册 / 上海交通大学物理教研室组
编. —2 版. —上海: 上海交通大学出版社, 2017
新核心理工基础教材
ISBN 978-7-313-16520-6

I. ①大… II. ①上… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 312627 号

大学物理教程(上册)第二版

组 编: 上海交通大学物理教研室

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 郑益慧

印 制: 常熟市文化印刷有限公司

开 本: 787mm×960mm 1/16

字 数: 365 千字

版 次: 2014 年 1 月第 1 版 2017 年 4 月第 2 版

书 号: ISBN 978-7-313-16520-6/O

定 价: 48.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 19.5

印 次: 2017 年 4 月第 2 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-52219025

常用基本物理常量

(2002 年国际推荐值)

物 理 量	符号	数 值	一般计算取用值	单 位
真空中光速	c	$2.997\,924\,58 \times 10^8$	3.00×10^8	m/s
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	$4\pi \times 10^{-7}$	N/A ²
真空介电常数	ϵ_0	$8.854\,187\,817 \times 10^{-12}$	8.85×10^{-12}	C ² /(N·m ²)
万有引力常量	G	$6.672\,42(10) \times 10^{-11}$	6.67×10^{-11}	N/(m ² ·kg ²)
普朗克常数	h	$6.626\,069\,3(11) \times 10^{-34}$	6.63×10^{-34}	J·s
元电荷	e	$1.602\,176\,53(14) \times 10^{-19}$	1.60×10^{-19}	C
里德伯常数	R_∞	10 973 731.568 525(73)	10 973 731	m ⁻¹
电子质量	m_e	$9.109\,382\,6(16) \times 10^{-31}$	9.11×10^{-31}	kg
康普顿波长	λ_C	$2.426\,310\,238(16) \times 10^{-12}$	2.43×10^{-12}	m
质子质量	m_p	$1.672\,621\,71(29) \times 10^{-27}$	1.67×10^{-27}	kg
中子质量	m_n	$1.674\,927\,28(29) \times 10^{-27}$	1.67×10^{-27}	kg
阿伏伽德罗常数	N_A	$6.022\,141\,5(10) \times 10^{23}$	6.02×10^{23}	mol ⁻¹
普适气体恒量	R	8.314 472(15)	8.31	J/(mol·K)
玻耳兹曼常数	k_B	$1.380\,650\,5(24) \times 10^{-23}$	1.38×10^{-23}	J/K
斯特藩-玻耳兹曼常数	σ	$5.670\,400(40) \times 10^{-8}$	5.67×10^{-8}	W/(m ² ·K ⁴)
维恩位移定律常数	b	$2.897\,768\,5(51) \times 10^{-3}$	2.90×10^{-3}	m·K
玻尔半径	a_0	$0.529\,177\,210\,8(18) \times 10^{-10}$	0.529×10^{-10}	m

本书中物理量的名称、符号和单位

量的名称	符 号	单位名称	单位符号
时间	t	秒	s
长度	l, s	米	m
位移	Δr	米	m
速度	v, u	米每秒	m/s
加速度	a	米每二次方秒	m/s ²
角位移	θ	弧度	rad
角速度	ω	弧度每秒	rad/s
角加速度	β	弧度每二次方秒	rad/s ²
质量	m	千克	kg
力	F	牛顿	N
重力	G	牛顿	N
摩擦因数	μ	—	—
功	A	焦耳	J
功率	P	瓦特	W
能量	$E, (W)$	焦耳	J
动能	E_k	焦耳	J
势能	E_p	焦耳	J
动量	p	千克米每秒	kg · m/s
冲量	I	牛顿秒	N · s
力矩	M	牛顿米	N · m
角动量	L	千克平方米每秒	kg · m ² /s
转动惯量	J	千克平方米	kg · m ²
劲度系数	k	牛顿每米	N/m
周期	T	秒	s
频率	ν	赫兹	Hz
圆频率	ω	弧度每秒	rad/s
波长	λ	米	m
声强	I	瓦特每平方米	W/m ²

(续表)

量的名称	符 号	单位名称	单位符号
热力学温度	T	开尔文	K
压强	p	帕斯卡	Pa
物质的量	ν, n	摩尔	mol
摩尔质量	M	千克每摩尔	kg/mol
内能	E	焦耳	J
热量	Q	焦耳	J
比热容	c	焦耳每千克开尔文	J/(kg · K)
摩尔定容热容	$C_{V, m}$	焦耳每摩尔开尔文	J/(mol · K)
摩尔定压热容	$C_{p, m}$	焦耳每摩尔开尔文	J/(mol · K)
比热容比	γ	—	—
热机效率	η	—	—
制冷系数	w	—	—

前 言

根据 2010 年教育部颁发的“非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求”,为了适应物理学和科学技术的发展,结合多年的教学实践,我们编写了这套大学物理教材。在编写过程中,我们借鉴了部分国内外新版优秀教材,力求贯彻理论体系的少而精、理论联系实际的原则,在做到加强理论基础的叙述、加强对学生分析与实际问题能力培养的同时,增加对近现代物理知识和观点的介绍。在教材编写过程中,我们注重把培养学生具有科学的思维能力、辩证分析的能力和科学的研究方法作为目标。同时,我们还注重加强工科大学生的科学素养的培养,拓宽学生的科学视野。

全书采用国际单位制,书中物理量的名称和表示符号尽量采用国家现行标准。

全书分为上、下两册。上册包括 9 章:力和运动、时空理论、功与能量、动量与角动量、刚体力学基础、机械振动、机械波、平衡态与热力学基础等。下册包括 10 章:真空中的静电场、静电场与物质的相互作用、真空中的磁场、磁场与物质的相互作用、电磁感应、电磁场与电磁波、光学、量子力学基础、固体量子理论简介、原子核物理和粒子物理简介等。本书另配有一套完整的电子教案,与主教材内容对应。电子教案提供 PowerPoint 格式的文件,在此基础上,可以进行二次开发并形成教师具有个人特色的电子教案。

本书内容全部讲授大约需要 120 学时,教师可以根据学时要求选讲其中部分内容。

本书由高景主编,参加编写工作的有:袁晓忠(第 1~5 章),高景(第 6,7,15 章),董占海(第 8,9,16,17 章),李铜忠(第 10~14 章和第 18 章)。

由于编者水平所限,对书中存在的错误之处,衷心希望广大读者提出宝贵意见。

目 录

1 力和运动	1
1.1 质点运动学	1
1.1.1 质点运动的描述	2
1.1.2 质点的位矢和运动方程	6
1.1.3 位移和速度	8
1.1.4 加速度	15
1.1.5 运动学的两类问题	20
1.2 质点动力学	23
1.2.1 牛顿运动定律	23
1.2.2 相互作用力	27
1.2.3 牛顿运动定律的应用	32
1.2.4 非惯性系 惯性力	36
习题 1	40
思考题 1	42
2 时空理论	46
2.1 牛顿时空观	46
2.1.1 伽利略变换和牛顿绝对时空观	46
2.1.2 力学相对性原理	48
2.2 狭义相对论时空观	50
2.2.1 狭义相对论的基本假设	50
2.2.2 狭义相对论的时空观	54
2.2.3 洛伦兹坐标变换	59
2.2.4 洛伦兹速度变换公式	63
习题 2	65
思考题 2	66

3 功与能量	68
3.1 功 动能定理	68
3.1.1 功	68
3.1.2 动能定理	73
3.2 保守力做功与势能	77
3.2.1 几种力的功	77
3.2.2 势能	82
3.3 机械能守恒定律	89
3.3.1 质点系动能定理	89
3.3.2 功能原理	90
3.3.3 能量转换和守恒定律	92
3.3.4 机械能守恒定律	93
习题 3	94
思考题 3	95
4 动量与角动量	97
4.1 动量和冲量	97
4.2 动量定理	98
4.2.1 质点动量定理	98
4.2.2 质点系的动量定理	101
4.3 动量守恒定律	102
4.4 质心和质心运动定理	105
4.4.1 质心	105
4.4.2 质心运动定理	107
4.4.3 质心坐标系	109
4.5 碰撞问题	110
4.5.1 碰撞过程	110
4.5.2 碰撞理论	110
4.6 相对论能量和动量	113
4.6.1 相对论动量和质量	114
4.6.2 相对论动力学方程	116

4.6.3	相对论动能	117
4.6.4	相对论总能量	119
4.6.5	相对论的动量能量关系式	119
4.7	质点的角动量 角动量守恒定律	121
4.7.1	力矩的定义	121
4.7.2	质点的角动量和角动量定理	121
4.7.3	质点角动量守恒定律	123
4.8	质点系的角动量定理与角动量守恒定律	125
4.8.1	质点系的角动量定理	125
4.8.2	质点系的角动量守恒定律	126
习题 4		127
思考题 4		130
5	刚体力学基础	131
5.1	刚体运动学	131
5.1.1	刚体运动的基本形式	131
5.1.2	刚体定轴转动的运动学描述	133
5.2	定轴转动	134
5.2.1	刚体定轴转动定理	135
5.2.2	刚体转动惯量的计算	140
5.2.3	定轴转动角动量守恒定律	144
5.2.4	定轴转动中的功能关系	147
习题 5		151
思考题 5		153
6	机械振动	154
6.1	简谐振动	154
6.1.1	简谐振动的判据	154
6.1.2	描述简谐振动的物理量	156
6.1.3	简谐振动的速度、加速度	158
6.1.4	简谐振动的能量	159
6.1.5	简谐振动的几何表示	160

6.2 微振动近似	165
6.2.1 单摆和复摆	165
6.2.2 微振动近似	167
6.3 阻尼振动 受迫振动	169
6.3.1 阻尼振动	169
6.3.2 受迫振动	172
6.4 振动的叠加与分解	173
6.4.1 同方向同频率振动的叠加	173
6.4.2 两个同方向不同频率振动的叠加 拍	175
6.4.3 相互垂直振动的叠加	176
习题 6	178
思考题 6	181
7 机械波	182
7.1 机械波的产生与传播	182
7.1.1 机械波的产生条件	182
7.1.2 机械波的传播特点	183
7.1.3 波长、频率和波速	185
7.1.4 波的几何描述	186
7.2 简谐波	186
7.2.1 一维平面简谐波的表达式	186
7.2.2 行波表达式的意义	188
7.3 简谐波的能量	190
7.3.1 有平面简谐波传播介质中质元的能量	191
7.3.2 能流和能流密度	192
7.3.3 声强 声强级	193
7.4 波的传播与叠加	194
7.4.1 惠更斯原理	194
7.4.2 波的干涉	195
7.4.3 驻波	197
7.4.4 简正模式	199
7.4.5 半波损失	200

7.5 多普勒效应	202
7.5.1 波源静止, 观察者运动	202
7.5.2 波源运动, 观察者静止	202
7.5.3 波源和观察者都运动	203
习题 7	204
思考题 7	207
8 平衡态	208
8.1 平衡态	209
8.1.1 平衡态	209
8.1.2 热力学第零定律	210
8.1.3 温标	211
8.1.4 状态方程	214
8.1.5 范德瓦耳斯方程	215
8.2 热力学系统的微观模型	220
8.2.1 物质的结构	220
8.2.2 分子作用力模型	221
8.3 速率分布函数与速度分布函数	223
8.3.1 分子速率分布函数	223
8.3.2 分子速度分布函数	225
8.4 麦克斯韦速度分布律和速率分布律	228
8.4.1 麦克斯韦速度分布律	228
8.4.2 麦克斯韦速率分布律	230
8.4.3 麦克斯韦速率分布律的实验验证	232
8.4.4 分子自由程和碰撞频率	233
8.5 玻耳兹曼能量分布	235
8.5.1 玻耳兹曼能量分布	235
8.5.2 重力场中的气体分子	236
8.5.3 能量按自由度均分定理	237
8.5.4 理想气体的内能	240
习题 8	240
思考题 8	242

9 热力学基础	245
9.1 热力学第一定律	245
9.1.1 准静态过程	245
9.1.2 功、内能和热量	246
9.1.3 热力学第一定律	250
9.2 热力学第一定律的应用	250
9.2.1 等体过程	251
9.2.2 等压过程	252
9.2.3 等温过程	254
9.2.4 绝热过程	254
9.2.5 多方过程	256
9.2.6 循环过程和热机的效率	257
9.3 热力学第二定律	262
9.3.1 热力学第二定律	263
9.3.2 可逆过程和不可逆过程	265
9.3.3 卡诺定理	267
9.4 熵	270
9.4.1 熵的定义	270
9.4.2 熵的计算	271
9.4.3 能量退化原理	274
9.4.4 温熵图	275
9.5 熵增加原理	277
9.5.1 熵增加原理	277
9.5.2 熵流和熵产生	278
9.5.3 玻耳兹曼关系	279
习题 9	283
思考题 9	286
参考答案	290

1 力和运动

自然界中的物质都处于不停的运动和变化之中。物质的运动形式多种多样,主要包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和其他微观粒子的运动等等,其中最为简单的是物质的机械运动。牛顿力学(经典力学)就是研究物质机械运动的学科。

经典力学的理论基础是牛顿的三个运动定律,并由此引入了力、力矩、动量、冲量、角动量、功和能等概念,得到了动量、角动量和机械能等的守恒定律。经典力学只适用于物体做低速(与光速相比)运动的情形。当物体的速度接近于光速时,经典力学就失效了。此时需要用相对论力学来作研究,经典力学只是相对论力学在低速时的近似。

考虑到物体的实际形状和大小时,对物体运动的描述将是相当复杂的,因为我们需要同时考虑物体的大小和形状的变化,还要考虑物体的整体平移和整体转动。物理学中一个非常重要的方法就是对于实际系统,需要找出问题的主要方面,把实际问题进行简化,建立一定的理想模型,在理想模型的基础上研究问题,这是物理学研究问题的基本方法,即从复杂到简单的方法。

当物体大小和形变可以忽略,且只有平动时,物体上所有点的运动都是相同的,我们就可以用其中一个点的运动来替代对物体整体运动的描述,这就是质点这个理想模型的物理基础。研究物体的运动时,可以把物体看成是所有质量都集中在一个几何点上。而对真实的物体,可以通过数学上的无穷切割方法,把它分成无穷多个小的质量元,每一个质量元可以看成一个质点,从而可以把一个真实的物体看成由无穷多个质点组成的质点系。因此,真实物体的运动可以看成是该质点系的运动。这种方法即所谓从简单到复杂的方法。

刚体和质点一样,是物理学中的一个理想模型,在任何情况下,其形状和大小都不会发生变化。实际物体的大小和形状在运动过程中或多或少会有变化,物体内部的各个部分的运动情况往往不同,这就使问题变得相当复杂,令人无法下手。但是在很多情况下物体形变非常小,形变对物体运动规律的影响可以忽略不计。因此,对这些物体,我们就可以用刚体这个理想化的模型来替代。

1.1 质点运动学

力学研究的是物体机械运动的规律,机械运动是自然界中物质运动最简单

和最常见的运动形式,其主要特征是一个物体相对另一个物体或物体的一部分相对另一部分位置随时间有相对变化。

对于有形状和大小的实际物体而言,其一般的运动非常复杂。因为我们需要同时考虑物体的大小和形状的变化,还要考虑物体的整体平移和整体转动。为了简化问题,可以先不考虑物体的形变和转动,将其看成一个形状和大小都可以忽略不计但具有一定质量的物体,这样的物体称为质点。

对于机械运动的研究,通常可分为两个方面。一是单纯地关注如何描述物体的运动状态,对于质点而言,主要研究如何描述其在空间的位置、运动轨道、运动速度、加速度等,称为运动学。二是考虑物体间的相互作用,以及由此引起物体运动状态变化的规律,称为动力学。本节我们将首先讨论对物体运动的基本描述,引入描述物体运动的基本物理思想和方法,讨论质点的运动学问题。下一节我们讨论物体间相互作用规律以及运动状态的变化与物体间相互作用的关系,即牛顿运动定律。

1.1.1 质点运动的描述

1.1.1.1 参考系

为了描述一个物体的运动而选作参考的另一个物体或一组相对静止的物体称为参考系,又称为参考物。就运动学的角度而言,参考系的选取具有任意性,任何物体都可以被选作参考系来研究其他物体的运动。在一个具体问题中,到底选择哪个物体作为参考系,这要由问题的性质和研究的方便来决定。比如火箭发射卫星上太空,发射阶段通常以地面为参考系来研究火箭的运动;如果最终火箭将卫星送入绕太阳运行的轨道,成为一颗人造行星,则选择太阳为参考系就比较方便了。

这里还要明确这样一个事实,即运动描述的相对性和运动的绝对性。研究和描述同一物体的运动,取不同的参考系,结果往往是不同的。比如,相对于地面做匀速直线运动的车厢里,有一个自由下落的物体,若以车厢为参考系,物体的运动是直线运动。如果以地面为参考系,物体的运动就是曲线运动。所以,要方便地描述一个物体的运动,需要选择一个合适的参考系,使我们对该物体运动的描述尽量简单。这正是建立在物体运动描述的相对性这个事实的基础上的。另一方面,一切物质均处于永恒不息的运动之中,运动的这种普遍性和永恒性又称为运动的绝对性。大到日月星辰,小到微观粒子,世界万物无时无刻不在做不同形式的运动,运动是绝对的,静止是相对的。

1.1.1.2 坐标系

为了定量地描述一个物体相对某参考系的位置,还必须在参考系上固定一组坐标轴,建立所谓的坐标系。最常见的坐标系有直角坐标系,相应的坐标为

x, y, z , 如图 1-1 所示; 平面极坐标系, 相应的坐标为 r, θ , 如图 1-2 所示; 还有球坐标系和柱坐标系等。物体的运动状态完全由参考系决定, 与坐标系的选取无关。对于不同的坐标系, 只是描述运动的变量不同而已, 对应物体的运动状态不会因坐标系的选择不同而有所不同。

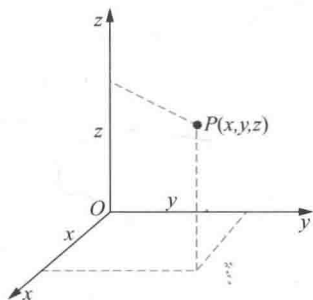


图 1-1

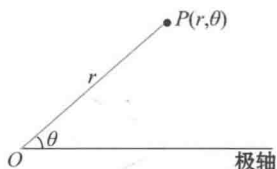


图 1-2

1.1.1.3 空间和时间

要在一定的参考系中定量地描述物质的运动, 需用时间和空间两个物理量。

人们对时间和空间的认识是从对周围物质世界和物质运动的感知开始的, 时间反映物质运动的持续性和顺序性, 持续性是指物质运动经历的或长或短的过程, 顺序性是指物质运动过程中的不同事物或现象出现的先后顺序, 时间是不可逆的, 一维的。空间反映了物质的广延性, 是与物体的体积和物体位置的变化联系在一起的。随着科学的进步, 人们的时空观经历了从牛顿的绝对时空观到爱因斯坦的相对论时空观的转变, 从时空的有限与无限的哲学思辨到可以用科学的手段来探索时空的阶段。在牛顿的时代人们认为, 空间和时间是独立于物质和物质运动的客观存在; 而现今人们已经认识到, 空间和时间与物质及物质的运动是密切相关的。我们不能想象离开了物质来谈论空间和时间的存在。

人们通常采用能够重复的周期现象来计量时间, 目前时间单位“秒”是 1967 年 10 月第 13 届国际计量大会上定义的: “1 秒(s) 是铯-133 原子基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间。”而长度单位“米”是 1983 年 10 月第 17 届国际计量大会上定义的: “1 米(m) 是光在真空中 $(1/299\,792\,485)\text{s}$ 时间间隔内所经路径的长度。”对于微小的长度, 常用微米(μm , 10^{-6}m)、纳米(nm , 10^{-9}m) 和埃($\text{\AA}$, 10^{-10}m) 作单位。天文上对于很长的距离, 常用光年作单位。光年是光在 1 年中行进的距离, 常用符号 l. y. 表示, 约合 $9.46 \times 10^{12}\text{km}$ 。

目前, 人们可量度的空间范围, 从宇宙范围的尺度 10^{27}m 到微观粒子的尺度 10^{-28}m , 从宇宙的年龄 10^{18}s 到微观粒子的最短寿命 10^{-24}s 。根据已知的物理理

论,极端的时间和空间间隔为普朗克时间 10^{-43} s 和普朗克长度 10^{-35} m 。也就是说,小于普朗克时空间隔时,空间和时间的概念就不再适用了。表 1-1 和表 1-2 分别列出了各种典型物理现象的空间和时间尺度,即物理学研究所涉及的空间和时间范围。

表 1-1 一些典型物理现象的空间尺度

单位: m

已观测到的宇宙范围	10^{26}
星系团半径	10^{23}
星系间距离	2×10^{22}
银河系半径	7.6×10^{22}
太阳到最近恒星的距离	4×10^{16}
太阳到冥王星的距离	10^{12}
日地距离	1.5×10^{11}
地球半径	10^6
无线电中波波长	10^3
核动力航空母舰长	3×10^2
小孩高度	1
尘埃	10^{-3}
人类红血球细胞直径	10^{-6}
细菌线度	10^{-9}
原子线度	10^{-10}
核的线度	10^{-15}
普朗克长度	10^{-35}

表 1-2 一些典型物理现象的时间尺度

单位: s

宇宙年龄	10^{18}
太阳系年龄	1.4×10^{17}
原始人	10^{13}
最早文字记录	1.6×10^{11}
人的平均寿命	10^9