

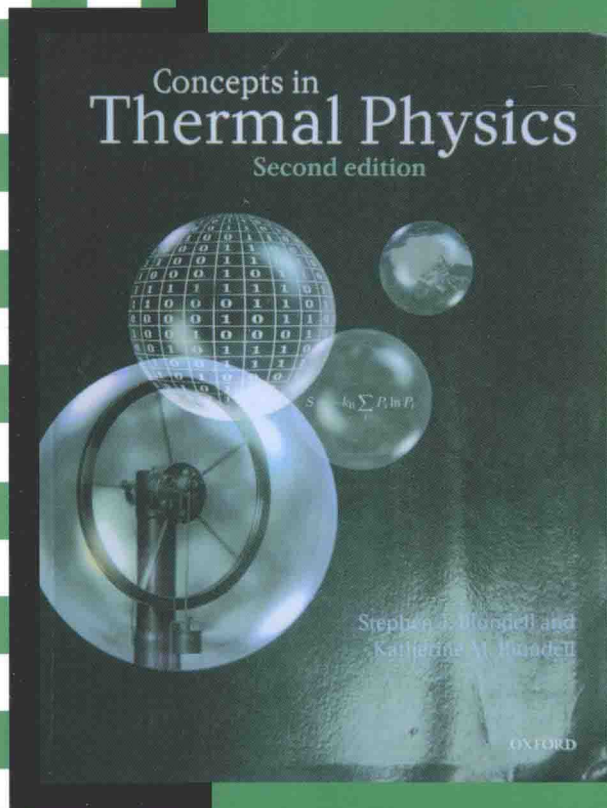
国际著名物理图书——翻译版系列

热物理概念 (第2版)

——热力学与统计物理学

[英] Stephen J. Blundell and Katherine M. Blundell 著

鞠国兴 译



清华大学出版社

热物理概念(第2版)

——热力学与统计物理学

[英] Stephen J.Blundell and Katherine M.Blundell 著

鞠国兴 译

清华大学出版社

北京

北京市版权局著作权合同登记号 图字 01-2014-5490 号

© Stephen J. Blundell and Katherine M. Blundell 2010. "CONCEPTS IN THERMAL PHYSICS, SECOND EDITION" was originally published in English in 2010. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. 原英语书出版于 2010 年. 本翻译版由牛津大学出版社授权出版.

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

热物理概念: 第 2 版: 热力学与统计物理学/(英)布伦德尔 (Blundell, S. J.), (英) 布伦德尔(Blundell, K.M.) 著; 鞠国兴译. --北京: 清华大学出版社, 2015

书名原文: Concepts in Thermal Physics (Second edition)

ISBN 978-7-302-40836-9

I. ①热… II. ①布… ②布… ③鞠… III. ①热力学 ②统计物理学 IV. ①O414

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 164203 号

责任编辑: 朱红莲 洪 英

封面设计: 常雪影

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 宋 林

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

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者: 北京富博印刷有限公司

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 33.25 字 数: 807 千字

版 次: 2015 年 9 月第 1 版 印 次: 2015 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 1~1500

定 价: 79.00 元

译者序^①

本书是一本可用于物理学以及相关专业的热力学与统计物理课程教学的富有新意的高水平的优秀教材,它是斯蒂芬·布伦德尔(S. J. Blundell)教授和凯瑟琳·布伦德尔(K. M. Blundell)教授在牛津大学物理系多年讲授同类课程的基础上编写的.本书于2006年出版,2010年推出第2版,此后多次重印.

与同类教材,特别是国内广泛采用的教材相比,本书具有以下特点.

(1) 教材起点较低,但是达到的深度和广度均强于同类教材.类似于其他教材,其内容也分为热力学和统计物理两个部分,两者的篇幅大致相当.热力学部分包括了国内热学课程中介绍的部分内容(如气体动理学理论、平均自由程等)以及统计物理课程中的热力学内容,补充了课程后面深入讨论中将用到的概率论和统计等数学基本知识.对热力学相关的应用多有扩展,涉及到信息论(其中包含了对量子信息有关问题的简介)等新内容.

统计物理部分完全以系综理论作为出发点,将理论分析和应用置于统一的框架之下.该部分涉及的应用范围非常广泛,除了通常教材中讨论的一些系统(如理想气体、光子气体、声子、电子气体等)之外,还包含了天体物理、大气物理、激光物理等多个学科中与统计物理有关的一系列问题.

应该着重指出的是,作者没有将热力学和统计物理两个部分割裂开来,而是充分注意到了两者之间在概念、方法等方面的有机联系.例如,在热力学部分中讨论与温度有关的问题时,没有采用传统的处理方法,而是将系综的概念贯穿其中,并且给出了正则系综的正则分布的导出过程和结果.将化学势、相关的热力学关系等内容放在统计物理部分讨论,将它们与巨正则系综和巨配分函数等内容联系起来,有助于更深入理解化学势的含义.再如,对光子气体系统的处理也是放在统计物理部分的,但是同时使用了热力学和统计物理两种处理方法,相互印证.

(2) 正如书名所表明的,本书对基本概念进行了非常充分和清晰的讨论.书中包含了许多实例,用以对相关的概念和方法进行说明.为了使主题和重点更加明确,作者对每章的篇幅均作了一定的限制,平均10页左右,其中还包括了本章小结、拓展阅读、练习等内容,本章小结和拓展阅读简明扼要,有利于更好地理解 and 深化所学内容.练习部分除常规问题外,还包含了一些量的数量级的估算问题.

(3) 本书包含了与热力学统计物理相关的物理学家的小传,充分反映了他们各自的贡献.将物理学家的贡献、物理学发展简史等与课程教学结合起来,这是近年来国外出版的许多物理学教材中比较通行的一种做法.通过这些内容可以大体看出物理学发展的一些脉络,进而认识到教科书中讨论的概念和方法是经过许多物理学家的共同努力而积淀下来的,是需要深刻理解的.在这些精心选择的科学家小传中同时也融合了科学文化、科学方法等方面的内容,所以通过本书学到的物理学是鲜活的.

(4) 作者对扩展性的材料进行了精心的选择和安排.书中包含了一些高等的扩展内容,采用加框的方式示出.在讨论热力学和统计物理基本理论的常规应用之外,通过专题的形式讨论了在天体物理、宇宙学、大气物理等其他学科中的应用.此外,还通过多种形式介绍了

^①原为影印版序,略有改动.

物理学的一些新发展,如宇宙背景辐射、任意子等,这些内容极大地丰富了作为基础理论课程的统计物理的内涵.

从篇幅来看,本书的内容多于课堂教学所能讲授的内容.但是,因为概念清晰,处理方法简明,重点突出,许多内容学生完全可以自学.因此,这本教材为学生的学习和教师的教学提供了更多可以选择的余地.

总之,我们认为本书是一本不可多得的优秀教材,可以作为国内热力学与统计物理课程优先选择的教材,借此可以改变国内长期以来教材选择比较单一化、内容体系缺乏多样性的局面^①,它也必将为推进国内该课程的教学改革提供重要的参考、借鉴并发挥促进作用.

南京大学 物理学院 鞠国兴
2012年5月初稿,2014年11月修改

^①朱邦芬.我国物理学本科核心课程教材的使用情况调研和建议.物理,2012,4(5):340.

前 言

太初有道……

(约翰 1:1^①, 公元 1 世纪)

瞧瞧阳光束, 每当太阳的光线投射进来,
斜穿过屋内黑暗的厅堂的时候,
你就会看见许多微粒以许多方式混合着,
恰恰在光线所照亮的那个虚空里面,
像在一场永恒的战斗中, 不停地互相撞击,
一团一团地角斗着, 没有休止,
时而遇合, 时而分开, 被推上推下.

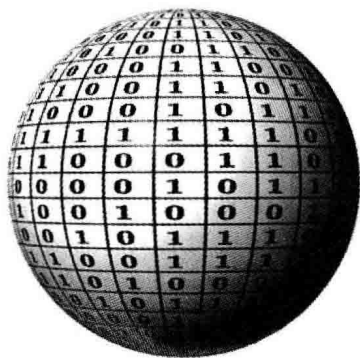
从这个你就可以猜测到:

在那更广大的虚空里面,
有怎样一种不停的原子的运动.

(物性论, C. 卢克莱修^②, 公元前 1 世纪)

…… (我们) 整天劳苦受热

(马太福音 20:12^③, 公元 1 世纪)



热物理是任何本科生物理课程的一个核心部分, 它既包括经典热力学 (主要是在 19 世纪建立的, 并且是由希望理解热机使用中热转化为功这个问题所驱动的) 的基础, 也包括统计力学 (由玻尔兹曼以及吉布斯建立, 它关注系统的基本微观态的统计行为) 的基础. 学生常常发现这些专题是非常难以理解的, 这个问题是与不熟悉数学特别是概率统计中的一些基本概念相关的. 此外, 传统的热力学关注蒸汽机, 而这些对于 21 世纪的学生而言似乎是遥远的, 并且在很大程度上与他们是不相关的. 这是非常遗憾的事情, 因为理解热物理对于几乎全部近代物理以及在 21 世纪中我们所面临的重要技术挑战均是关键的.

本书的目的是介绍热物理中的一些核心概念, 通过来自天体物理、大气物理、激光物理、凝聚态物理以及信息论中的许多近代例子充实这些方面的内容. 对重要的数学原理, 特别是与概率统计相关的原理进行比较详细的讨论, 力图补充一些材料, 而不再自动假定它们已包含在各学校的数学课程之中. 此外, 附录中还包含一些有用的数学, 例如各种积分、数学结果以及恒等式. 遗憾的是, 掌握研究热物理所需的数学并没有捷径, 但是附录中的材料提供了有用的备忘录.

^①《新约·约翰福音》第 1 章第 1 节, 即开篇第一句话. 译文引自《圣经》和合本.——译注

^②卢克莱修 (C. Lucretius), 约公元前 99—前 55 年, 古罗马哲学家. 这里的译文引自《物性论》, 略有改动, 方书春译, 商务印书馆, 1981, 第 67 页; 译林出版社, 2011, 第 66 页.——译注

^③《新约·马太福音》第 20 章第 12 节. 译文引自《圣经》和合本. 这里“苦”和“热”的英文“work”, “heat”在字面上分别相应于热力学与统计物理学中的“功”和“热”, 即与可以改变热力学系统状态的两种方式:“做功”和“传热”相联系.——译注

关于热物理这个学科的许多教程是按照历史发展来讲授的: 先讲授气体动理学理论, 再是经典热力学, 最后是统计力学. 在其他一些教程中, 先由经典热力学原理开始, 然后是统计力学, 直到最后才是动理学理论. 尽管这两种方法各有优缺点, 但是我们着力于一种更为有机统一的处理方法. 例如, 我们用一种直截了当的统计力学观点引进温度, 而不是基于有些抽象的卡诺热机. 然而, 我们确实将对配分函数以及统计力学的详细讨论推迟到介绍了态函数之后, 这使得对配分函数的计算更为方便. 我们相对比较早地介绍气体动理学理论, 因为它提供了一个简单且很好定义的平台, 可以在其上使用概率分布的一些简单概念. 在牛津大学开设的课程中, 这种方法效果良好. 但是在其他一些地方, 因为动理学理论仅在课程的较后阶段才学习, 我们已设计本书的内容安排, 使得省略动理学理论的章节不会引起一些问题, 详情参见第 11 页的图 1.5. 此外, 本书中的某些部分包含一些更为高等的材料 (常常置于方框中, 或者书的最后部分), 在初次阅读时可以跳过这些部分.

本书编排为一系列短而易于消化的章节, 每一章介绍一个新概念或者说明一个重要的应用. 大多数读者可以从示例开始学习, 书中给出了许多有计算过程的实例, 以便于在引入概念时读者可以逐步熟悉这些概念. 每章末都提供了一些练习题, 学生可以由此进行方方面面的实际应用.

在选择要包含哪些专题, 应该达到什么程度时, 我们力求在可教性和严格性之间达到平衡, 通过给出足够多的细节提供一种易理解的方式介绍专题, 满足更为高等的读者的需要. 我们也试图在基本原理和实际应用之间进行平衡. 然而, 本书并不在任何工程学的层次上处理实际的热机, 也不冒险涉及深奥的各态遍历理论. 不过, 我们希望本书对于理解热物理的严密基础已提供了足够的材料, 所推荐的拓展读物也指明可以参考的附加材料. 贯穿本书的一个重要主题是信息的概念以及它与熵的联系. 在前言开头所示出的黑洞, 它的表面覆盖有信息“比特”, 这是一个体现信息、热力学、辐射和宇宙之间深刻联系的图像.

热物理的历史是令人神往的历史, 我们提供了热物理中一些主要开拓者的简短的传略片段. 为确立列入的资格, 选入者必须已做出过一项特别重要的贡献和/或具有特别有趣的生平并且是已过世的! 因此, 人们不应该从已选定的人物名单中断定热物理学这个学科在任何意义上是已完成的, 用相同的观点来写这个学科当前的工作会更难. 传略必定是简短的, 对生平故事仅是略见一斑, 因此应该查询书后参考文献中的更全面的传记列表. 然而, 在主体内容的叙述中穿插一些传略的作用是提供一些轻松的调剂, 并表明科学是一项人类共同努力的事业.

我们非常高兴地表达我们的谢意, 感谢当我们作为剑桥大学本科生时曾为我们讲授这门学科的老师, 特别是 Owen Saxton 和 Peter Scheuer, 感谢我们在牛津大学的朋友, 我们得益于与物理系许多同事的有启发性的讨论、牛津学生聪明的提问, 以及曼斯菲尔德学院和圣约翰学院提供的相互激励的环境. 在本书的写作过程中, 我们受到来自牛津大学出版社 Sönke Adlung 以及他的同事持续不断的鼓励, 特别是 Julie Harris 提供的最高级别的 L^AT_EX 支持^①.

牛津大学以及其他地方的许多朋友和同事非常友好地腾出时间阅读了本书各章的初稿, 他们对书稿进行了许多有益的评论, 这极大地改善了书稿的质量, 这些人包括 Fathallah

^①L^AT_EX 是一种科技排版系统. 所谓支持是指通过宏包或编写代码实现特殊的排版效果. ——译注

Alouani Bibi, James Analytis, David Andrews, Arzhang Ardavan, Tony Beasley, Michael Bowler, Peter Duffy, Paul Goddard, Stephen Justham, Michael Mackey, Philipp Podsiadlowski, Linda Schmidtbreick, John Singleton 以及 Katrien Steenbrugge. 特别感谢 Tom Lancaster, 他两次阅读本书早期的全部手稿, 提出了许多建设性的和富于想象的建议, 也感谢 Harvey Brown 富有激发性的洞察力以及持续不断的鼓励. 对所有这些朋友表示我们最诚挚的谢意. 在本书出版后发现的错误将公布在本书的网站上, 可以在下列网址中找到:

<http://users.ox.ac.uk/~sjb/ctp/>.

我们真诚地希望本书可以使热物理的学习变得愉快和令人神往, 并希望能将我们对这门学科某种程度的热情传达给读者. 此外, 理解热物理学的概念对于人类的未来是至关重要的, 即将面临的能源危机以及气候变化可能产生的潜在后果要求最高层次上的创新和科技革新. 这意味着热物理学是一些未来的精英现在就需要掌握的一个学科.

斯蒂芬·布伦德尔 凯瑟琳·布伦德尔
于牛津大学
2006年6月

第 2 版前言

本书第 2 版保持了与第 1 版相同的结构,但是增加了概率论、贝叶斯 (Bayes) 定理、扩散问题、渗透、伊辛 (Ising) 模型、蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 模拟以及大气物理中的辐射传输等内容. 我们也利用此机会改进了各类专题的处理方法,这包括约束的讨论,费米 - 狄拉克 (Fermi-Dirac) 分布和玻色 - 爱因斯坦 (Bose-Einstein) 分布的表示,以及修改了各类错误. 我们特别感谢下列人员,他们指出了错误或遗漏并进行了高度相关的评述:David Andrews, John Aveson, Ryan Buckingham, Radu Coldea, Merlin Cooper, Peter Coulon, Peter Duffy, Ted Einstein, Joe Fallen, Amy Fok, Felix Flicker, William Frass, Andrew Garner, Paul Hennin, Ben Jones, Stephen Justham, Austen Lamacraft, Peter Liley, Gabriel McManus, Adam Micolich, Robin Moss, Alan O'Neill Wilson Poon, Caity Rice, Andrew Steane, Nicola van Leeuwen, Yan Mei Wang, Peter Watson, Helena Wilding, 以及 Michael Williams. 我们再次得到牛津大学出版社工作人员的支持,特别是我们的编审 Alison Lees, 他特别仔细地审阅了手稿,作了许多重要的改进. Myles Allen, David Andrews 以及 William Ingram 在关于大气物理的处理方面给予了我们非常持久和有教益的评述,他们的奉献是无价的,也感谢 Geoff Brooker, 他与我们分享了他关于自由能性质的深刻见解. 感谢 Tom Lancaster, 他再次提出了许多有益的建议.

斯蒂芬·布伦德尔 凯瑟琳·布伦德尔
于牛津大学
2009 年 8 月

附注 (2013 年元月): 感谢下列各位,他们指出了各种错误,这些错误在本次重印本中已得到纠正:Cassio Amorim, David Andrews, Piotr Boguslawski, Pablo Gregorian, Robert Jeffrey, Olinga Tahzib, 特别感谢 Carl Mungan.

目 录

第 1 部分 准备知识

第 1 章 引言	3
1.1 什么是摩尔?	3
1.2 热力学极限	4
1.3 理想气体	6
1.4 组合问题	8
1.5 本书计划	10
本章小结	12
练习	12
第 2 章 热量	13
2.1 热量的一个定义	13
2.2 热容	14
本章小结	16
练习	16
第 3 章 概率	18
3.1 离散概率分布	18
3.2 连续概率分布	20
3.3 线性变换	21
3.4 方差	21
3.5 线性变换和方差	22
3.6 独立变量	23
3.7 二项式分布	25
本章小结	27
拓展阅读	27
练习	27
第 4 章 温度与玻尔兹曼因子	32
4.1 热平衡	32
4.2 温度计	33
4.3 宏观态与微观态	34
4.4 温度的一个统计定义	36
4.5 系综	37
4.6 正则系综	38
4.7 玻尔兹曼分布的应用	41

本章小结	44
拓展阅读	45
练习	45

第 2 部分 气体动理学理论

第 5 章 麦克斯韦 - 玻尔兹曼分布	49
5.1 速度分布	49
5.2 速率分布	50
5.2.1 $\langle v \rangle$ 和 $\langle v^2 \rangle$	51
5.2.2 一个气体分子的平均动能	52
5.2.3 $f(v)$ 的极大值	52
5.3 实验验证	52
本章小结	55
练习	55
第 6 章 压强	58
6.1 分子的分布	59
6.1.1 立体角	59
6.1.2 在某一方向上以某一速率运动的分子数	59
6.1.3 撞击器壁的分子数	60
6.2 理想气体定律	61
6.3 道尔顿定律	63
本章小结	63
练习	64
第 7 章 分子泻流	67
7.1 通量	67
7.2 泻流	68
本章小结	72
练习	72
第 8 章 平均自由程和碰撞	74
8.1 平均碰撞时间	74
8.2 碰撞截面	75
8.3 平均自由程	77
本章小结	78
练习	78

第 3 部分 输运和热扩散

第 9 章 气体的输运性质	81
9.1 黏性	81
9.2 热传导	86
9.3 扩散	89
9.4 更细致的理论	91
本章小结	93
拓展阅读	93
练习	94
第 10 章 热扩散方程	96
10.1 热扩散方程的推导	96
10.2 一维热扩散方程	97
10.3 稳恒态	99
10.4 球的热扩散方程	100
10.5 牛顿冷却定律	104
10.6 普朗特数	105
10.7 热源	106
10.8 粒子扩散	107
本章小结	107
练习	108

第 4 部分 第一定律

第 11 章 能量	115
11.1 一些定义	115
11.1.1 热平衡系统	115
11.1.2 态函数	115
11.2 热力学第一定律	117
11.3 热容	118
本章小结	121
练习	122
第 12 章 等温和绝热过程	125
12.1 可逆性	125
12.2 理想气体的等温膨胀	126
12.3 理想气体的绝热膨胀	127
12.4 绝热大气	128
本章小结	129
练习	129

第 5 部分 第二定律

第 13 章 热机和第二定律	135
13.1 热力学第二定律	135
13.2 卡诺热机	135
13.3 卡诺定理	138
13.4 克劳修斯表述和开尔文表述的等价性	139
13.5 热机举例	140
13.6 逆向运行的热机	141
13.7 克劳修斯定理	143
本章小结	145
拓展阅读	146
练习	146
第 14 章 熵	149
14.1 熵的定义	149
14.2 不可逆变化	149
14.3 再论热力学第一定律	151
14.4 焦耳膨胀	153
14.5 熵的统计基础	155
14.6 混合熵	156
14.7 麦克斯韦妖	158
14.8 熵和概率	159
本章小结	161
练习	161
第 15 章 信息论	166
15.1 信息和香农熵	166
15.2 信息和热力学	168
15.3 数据压缩	169
15.4 量子信息	170
15.5 条件概率和联合概率	172
15.6 贝叶斯定理	173
本章小结	175
拓展阅读	175
练习	176

第 6 部分 热力学的应用

第 16 章 热力学势	181
16.1 内能 U	181

16.2	焓 H	182
16.3	亥姆霍兹函数 F	183
16.4	吉布斯函数 G	183
16.5	约束	184
16.6	麦克斯韦关系	188
	本章小结	194
	练习	195
第 17 章	细杆, 气泡和磁体	199
17.1	弹性杆	199
17.2	表面张力	201
17.3	电偶极矩与磁偶极矩	203
17.4	顺磁性	204
	本章小结	208
	练习	209
第 18 章	热力学第三定律	211
18.1	热力学第三定律的不同表述	211
18.2	第三定律的一些推论	213
	本章小结	215
	练习	216
第 7 部分 统计力学		
第 19 章	能量均分	219
19.1	能量均分定理	219
19.2	应用	222
19.2.1	单原子气体中的平动	222
19.2.2	双原子气体中的转动	222
19.2.3	双原子气体中的振动	223
19.2.4	固体热容	224
19.3	所作的假设	225
19.4	布朗运动	226
	本章小结	226
	练习	227
第 20 章	配分函数	228
20.1	写出配分函数	228
20.2	得到态函数	230
20.3	一个重要的思想	236

20.4 组合配分函数	236
本章小结	239
练习	239
第 21 章 理想气体的统计力学	241
21.1 态密度	241
21.2 量子密度	243
21.3 可分辨性	244
21.4 理想气体的态函数	246
21.5 吉布斯佯谬	247
21.6 双原子气体的热容	248
本章小结	249
练习	249
第 22 章 化学势	251
22.1 化学势的定义	251
22.2 化学势的内涵	252
22.3 巨配分函数	254
22.4 巨势	255
22.5 作为单粒子吉布斯函数的化学势	257
22.6 多种类型的粒子	257
22.7 粒子数守恒定律	258
22.8 化学势和化学反应	259
22.9 渗透	263
本章小结	267
拓展阅读	267
练习	268
第 23 章 光子	270
23.1 电磁辐射的经典热力学	270
23.2 谱能量密度	272
23.3 基尔霍夫定律	273
23.4 辐射压强	275
23.5 光子气体的统计力学	276
23.6 黑体分布	277
23.7 宇宙微波背景辐射	280
23.8 爱因斯坦系数 A 和 B	281
本章小结	283
拓展阅读	284

练习	284
第 24 章 声子	286
24.1 爱因斯坦模型	286
24.2 德拜模型	287
24.3 声子色散关系	291
本章小结	294
拓展阅读	295
练习	295
第 8 部分 超越理想气体	
第 25 章 相对论性气体	299
25.1 有质量粒子的相对论性色散关系	299
25.2 极端相对论性气体	300
25.3 极端相对论性气体的绝热膨胀	302
本章小结	303
练习	304
第 26 章 实际气体	305
26.1 范德瓦尔斯气体	305
26.2 狄特里奇方程	312
26.3 位力展开	313
26.4 对应态定律	317
本章小结	318
练习	318
第 27 章 冷却真实气体	320
27.1 焦耳膨胀	320
27.2 等温膨胀	321
27.3 焦耳 - 开尔文膨胀	322
27.4 气体的液化	325
本章小结	326
练习	326
第 28 章 相变	328
28.1 潜热	328
28.2 化学势和相变	330
28.3 克劳修斯 - 克拉珀龙方程	331
28.4 稳定性和亚稳定性	335

28.5 吉布斯相律	339
28.6 依数性	340
28.7 相变的分类	341
28.8 伊辛模型	344
本章小结	350
拓展阅读	350
练习	350
第 29 章 玻色 – 爱因斯坦统计和费米 – 狄拉克统计	352
29.1 交换和对称性	352
29.2 全同粒子的波函数	354
29.3 全同粒子的统计	356
本章小结	359
拓展阅读	360
练习	360
第 30 章 量子气体和凝聚	365
30.1 无相互作用的量子流体	365
30.2 费米气体	367
30.3 玻色气体	372
30.4 玻色 – 爱因斯坦凝聚 (BEC)	374
本章小结	378
拓展阅读	379
练习	379

第 9 部分 特殊专题

第 31 章 声波	383
31.1 等温条件下的声波	384
31.2 绝热条件下的声波	384
31.3 声波通常是绝热的还是等温的?	385
31.4 流体中声速的推导	386
本章小结	388
拓展阅读	388
练习	388
第 32 章 激波	390
32.1 马赫数	390
32.2 激波的结构	390
32.3 激波守恒定律	391