

〈 热辐射经典译丛 〉

Nanoscale Energy Transport and Conversion:
A Parallel Treatment of Electrons, Molecules, Phonons, and Photons

纳米尺度能量输运和转换： 对电子、分子、声子和光子的统一处理

[美] Gang Chen 著
周怀春 李水清 黄志锋 刘华波 译

清华大学出版社

〈 热辐射经典译丛 〉

Nanoscale Energy Transport and Conversion:
A Parallel Treatment of Electrons, Molecules, Phonons, and Photons

纳米尺度能量输运和转换：

对电子、分子、声子和光子的统一处理

[美] Gang Chen 著
周怀春 李水清 黄志锋 刘华波 译

清华大学出版社
北 京

版权声明

Nanoscale Energy Transport and Conversion: A Parallel Treatment of Electrons, Molecules, Phonons, and Photons

Gang Chen

ISBN: 978-0195159424

Copyright © <2005> by Oxford University Press, Inc. All rights reserved.

内容简介

电子工业、生物科技、航空工业和能源工业等领域开发出的材料、设备的特征尺寸越来越小,步入纳米级,主导其运行的物理原理正发生着巨大的变化。本书旨在对基本热载流子,包括电子、声子、光子和分子的能量输运过程,建立统一的微观表述,主要内容包括:基于量子力学和统计力学的能量载流子的能态;用波和粒子的概念来分析热能传递;基于玻尔兹曼方程的粒子能量输运,并通过玻尔兹曼方程推导适用于宏观状态的经典定律;经典尺寸效应;不同能量载流子间的能量输运;液体及其界面;分子动力学模拟等。

本书可作为本科和研究生的教材,同时也可供研究者提供参考。让读者不但能够解决在纳米尺度的热传递及能量转化问题,同时能够与其他领域的工程师及专家一起解决他们所遇到的问题,共同迎接未来对跨学科理论知识要求的挑战。

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

纳米尺度能量输运和转换:对电子、分子、声子和光子的统一处理/(美)陈刚著;周怀春等译.--北京:清华大学出版社,2014

(热辐射经典译丛)

书名原文:Nanoscale energy transport and conversion;a parallel treatment of electrons,molecules,phonons,and photons

ISBN 978-7-302-35537-3

I. ①纳… II. ①陈… ②周… III. ①能量传递—研究 ②能量转换—研究 IV. ①TK124 ②TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 034953 号

责任编辑:杨倩

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:王静怡

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:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明印装厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:26

字 数:631 千字

版 次:2014 年 4 月第 1 版

印 次:2014 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:68.00 元



《热辐射经典译丛》丛书 序言

Preface

随着传统能源动力技术及新能源、航空航天、光电子等领域现代高新技术的发展,对定量分析含复杂辐射特性介质、复杂壁面条件、非等温多维宏观系统内辐射传热问题的理论和需求仍然十分迫切。而随着微尺度和纳米尺度电动机械系统(MEMS和NEMS)、能量直接转换技术、微流体和纳米流体、量子结构和元件、光子学和光电子学、分子传感和生物医学诊断的纳米材料以及扫描探针显微技术的发展,探讨能量在微纳尺度内的运输机制显得越来越重要。在动力工程及工程热物理一级学科领域,辐射传热属于理论性较强的一门课程,其理论基础涉及量子力学、电磁学等,学习门槛较高,容易使人望而生畏。本科阶段在传热学课程中学习的辐射换热知识比较浅显,主要考虑表面之间的辐射换热,对空间充满辐射参与性介质的辐射问题仅仅做了一般性介绍,研究生阶段才可能安排学习较为深入的知识,而只有少数以热辐射为主要研究内容的博士生才能达到较高的程度。

为了推动国内热辐射领域的人才培养和科技进步,“热辐射经典译丛”将集中翻译出版过去十年内国际热辐射领域出版的有重要影响的四部著作,包括:

1. John R. Howell, Robert Siegel, M. Pinar Mengüç, Thermal Radiation Heat Transfer, Fifth Edition, CRC Press, September 28, 2010;
2. Michael F. Modest, Radiative Heat Transfer, Third Edition, Academic Press, February 1, 2013;
3. Gang Chen, Nanoscale Energy Transport and Conversion: A Parallel Treatment of Electrons, Molecules, Phonons, and Photons, MIT-Pappalardo Series in Mechanical Engineering, Oxford University Press, March 3, 2005;
4. Zhuomin Zhang, Nano/Microscale Heat Transfer, McGraw-Hill Nanoscience and Technology, McGraw-Hill Professional, April 19, 2007.

该丛书前两部主要涵盖传统热辐射及其传递过程的基本概念、原理及最新研究成果,后两部主要论述纳米尺度辐射热传递及能量转化等世界前沿热点科学问题。四部著作的作者包括俄罗斯科学院外籍院士、美国国家工程院院士等在内的国际热辐射领域权威专家。Prof. John Howell 是美国得克萨斯大学奥斯汀分校机械工程系的荣誉退休教授, ASME (American Society of Mechanical Engineers) Life Fellow (美国机械工程师学会终生资深会员)(注: Fellow 一词在陈刚教授给的资料中译为“资深会员”,这里统一采用该译法)、AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) Fellow (美国航空航天学会资深会员),并于 1999 年当选为俄罗斯科学院外籍院士,于 2005 年当选为美国国家工程院院士。他的研究致力于发展参与性介质中辐射传递的求解方法(特别是蒙特卡洛方法),求解高度非线性复合传热问题,以及具有复合(非线性)传热模式的热系统中的逆设计和控制。

Prof. Robert Siegel 是传热领域的资深顾问科学家。退休前他担任美国国家航空航天局(NASA)Lewis 研究中心的高级研究科学家,在那里他从事了近 50 年的传热研究。他是美国机械工程师学会资深会员(ASME Fellow)、美国航空航天学会资深会员(AIAA Fellow)。他与 John R. Howell 教授、M. Pinar Mengüç 教授合著的《Thermal Radiation Heat Transfer》在 2010 年由 Taylor and Francis 集团 CRC 出版社发行第五版,该书的前四版均由 Prof. Robert Siegel 担任第一作者。该书系统而全面地论述了热辐射原理和分析方法,是迄今为止较为详尽地论述热辐射传热的理论专著。该书第一版出版以来,已经连续出版五版,并被翻译成多国语言,是辐射传热领域较早的经典教材,已在 SCI 获得数千次他引记录。1990 年科学出版社出版了曹玉璋、黄素逸、陆大有、陶文铨、朱芙英、胡槐林翻译的该书第二版。与前四版相比,第五版新加了辐射反问题、电磁波理论、颗粒的散射与吸收和近场辐射传递等最新内容。

Prof. M. Pinar Mengüç 是美国肯塔基大学机械工程系荣誉退休教授,又被土耳其安兹耶因大学聘为能源、环境及经济研究中心主任。他在热辐射传热领域,特别是多维几何空间中辐射传递建模、逆辐射问题、燃烧系统的激光诊断等方面做出了杰出贡献。他是美国机械工程师学会资深会员(ASME Fellow)、美国航空航天学会资深会员(AIAA Fellow),国际学术期刊 Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer(JQSRT)主编,还于 2007 至 2009 年担任国际学术期刊 Journal of Heat Transfer 副主编。

Prof. Michael F. Modest 曾师从已故国际著名华裔热物理科学家田长霖教授,作为教授及特聘教授先后就职于宾州州立大学和加州大学美熹德分校。他是美国机械工程师学会资深会员(ASME Fellow,1988),担任 JQSRT 等多个国际期刊的编辑,迄今共发表各类有影响力的文章 250 余篇,参与出版过 11 本著作。1993 年 Michael F. Modest 教授所著《Radiative Heat Transfer》第一版正式出版,2003 年该书第二版出版,2013 年该书第三版正式出版。《Radiative Heat Transfer》的第二版 SCI 他引次数超过 2780 次,已经成为辐射传热领域世界范围内有影响力的权威专业书籍。

Prof. Gang Chen(陈刚)也曾师从时任加州大学伯克利分校校长的田长霖教授,现任美国麻省理工学院机械工程系系主任,Carl Richard Soderberg 讲席教授,美国能源部前沿能源研究计划支持的固体太阳能热能能量转换研究中心主任。陈刚教授研究领域包括热能传递、纳米技术和能源转换,他率先研究量子结构中的热传导,推动了纳米结构热电材料的研发。至 2013 年,他发表了约 300 篇有关纳米结构中的热传导、热电输运理论以及热辐射方面的期刊论文,在 370 多个国际会议和国际研究组织中发表了主题演讲和特邀演讲,拥有 10 多项授权专利和 30 多个正在进行的专利申请。在他指导的 50 多名博士生和博士后中,有近 30 多名在世界各地著名大学任教。陈刚教授获得美国机械工程师学会热传递纪念奖、研究与发展 100 奖,多个国际会议的优秀论文奖,麻省理工 McDonald 育人奖。他是美国国家自然科学基金委杰出青年基金获得者、古根海姆资深会员、美国机械工程师学会资深会员,美国科学进步学会资深会员,美国物理学会资深会员。他曾担任美国机械工程师学会纳米技术学会顾问委员会主席。陈刚教授于 2010 年当选美国工程院院士。2005 年他所出版的题为《Nanoscale Energy Transport and Conversion: A Parallel Treatment of Electrons, Molecules, Phonons, and Photons》为该领域的第一部著作。

Prof. Zhuomin Zhang(张卓敏)现任美国乔治亚理工大学教授,美国机械工程学会资深

会员(ASME Fellow),美国科学促进会资深会员(AAAS Fellow)。主要从事微纳米热辐射的前沿研究。目前已发表 130 余篇期刊论文并获得两项美国专利,著书一本,合编专著一本,另在六部著作中发表章节。荣获 1999 年美国青年科学家总统奖(the Presidential Early Career Award for Scientists and Engineers, PECASE),并曾多次获得最佳论文奖和教学科研奖。担任 Journal of Heat Transfer, JQSRT, International Journal of Thermophysics 和 Journal of Thermophysics and Heat Transfer 的副主编,Frontiers in Energy 和 Emerging Materials Research 的编委。Prof. Zhuomin Zhang 所著《Nano/Microscale Heat Transfer》在国际上被广泛引用和采纳,对微纳尺度下的辐射换热有比较详细的介绍,特别适合那些没有在微纳尺度领域深入探索过,但却想了解出现在微纳尺度和微纳时间内的传热现象的工科高年级本科生和研究生、工程师以及研究人员阅读。

翻译出版这套热辐射经典译丛,目的是为本科生高年级学生就能开始进一步深入系统学习辐射传热知识创造更好的条件,也可作为能源动力、航空航天、新能源、光电技术、大气科学等领域科研人员和工程师的重要参考书,希望为辐射传热知识的普及、应用和人才培养做出贡献,并促进相关领域和行业的科技发展和进步。

周怀春
清华大学热能工程系
2014 年 2 月

此书是我花了五年时间,横跨美国东部和西部之间写成的。原著为英文。看到此书的中文初稿,自己的母语,倍感亲切。

将此书翻译成中文,最开始得归功于清华大学的李水清教授。2008 年我受陈民教授邀请在清华讲学。期间陈民教授专门安排了我和李水清教授与他的学生座谈。从交谈中,我得知李教授在用此书作为教材,并让听课的学生将其中的章节翻译成中文。后来,李水清教授和周怀春教授相继推动此书的翻译工作,得至此书的中文版。我对清华的李水清教授、周怀春教授,武汉大学的黄志锋博士,海军工程大学的刘华波,以及各届对此书翻译工作作出贡献的学生表示衷心的感谢。

在原版的序言中,我已经表达了写此书的初衷。我的本科和硕士教育是在中国的大学系统获得的。到了美国,发现我以前学的知识较窄。在读博士期间,受田长霖教授的熏陶,又慢慢发现了美国机械工程系虽然包括很广,但还是缺乏对微观世界的了解。相对来说,美国的其他的工程学科,比如材料、电力、化工,有更多的微观知识和宏观的交融。欣慰的是,经过 20 多年的多个学者的努力,美国的机械工程领域已经有越来越多的微观知识的渗透。我坚信现在科学和技术的边界越来越模糊。将来的学生和现在的研究者们,应该具有更多交叉学科的知识基础。我希望此书对中国交叉学科研究是个推动。

因为写书要花很多时间,愿意写书的科研人员不多。很欣慰的是,我常常听到学生、科研人员们对此书的称赞。此书不仅在机械及传热领域被用作教科书,还在有些电力系和物理系被用作教科书或者参考书。此书出版已有九年,在这期间,纳米传热和能量转换有很多进展。但我认为,此书的初衷是给没有微观传热和能量转换概念的学生和研究者们的一个浓缩的介绍。此书到现在仍然能满足这个出发点。我经常和来跟我讨论问题的学生和博士后们开玩笑,指出他们应该读我的书中的某一个章节。

对有兴趣的学生和研究者们,现在我按此书讲的课,已发布在麻省理工公开课网站上:
<http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-57-nano-to-macro-transport-processes-spring-2012/index.htm>。视频也可在 Youtube 上找到。希望读者们多提意见。

美国麻省理工学院 陈刚

2014 年 2 月

陈刚教授简介

陈刚教授是美国麻省理工学院机械工程系主任和 Carl Richard Soderberg 讲席教授。他 1980 年从襄阳五中毕业,1984 年 和 1987 年分别获华中理工大学动力系学士和硕士学位,1989 年师从世界著名时任伯克利加州大学校长的田长霖教授,并于 1993 年获得博士学位。1993 年到 1997 年他担任杜克大学助理教授,1997 年到 2001 年担任洛杉矶加州大学副教授,2001 年转聘到麻省理工学院机械工程系,从 2013 年 7 月起担任系主任。



陈刚教授研究领域包括热能传递、纳米技术和能源转换。他率先研究了量子结构中的热传导,他的研究结果推动了纳米结构热电材料的研发。至 2013 年,他发表了约 300 篇有关纳米结构中的热传导、热电输运理论以及热辐射方面的期刊论文,在 370 多个国际会议和国际研究组织中发表了主题演讲和特邀演讲。陈刚教授培养了很多优秀博士生。在他指导的 50 多名博士生和博士后中,有 30 多名在世界各地著名大学任教。陈刚教授也是一个发明者,他拥有 10 多项授权专利和 30 多个正在进行的专利申请。

陈刚教授获得过美国机械工程师学会热传递纪念奖、研究与发展 100 奖,多个国际会议的优秀论文奖,麻省理工 McDonald 育人奖。他是美国国家自然科学基金委杰出青年基金获得者、古根海姆资深会员、美国机械工程师学会资深会员、美国科学进步学会资深会员和美国物理学会资深会员。他曾担任美国机械工程师学会纳米技术学会顾问委员会主席。现任美国能源部前沿能源研究计划支持的固体太阳能热电能量转换研究中心主任。陈刚教授于 2010 年当选美国工程院院士。

陈刚教授 1964 年出生于湖北南漳县城关镇。他与妻子蔡国红育有一儿一女,定居于美国马萨诸塞州。

纪念

Chang-Lin Tien(田长霖)

一位先驱,与灵感之源

随着器件及结构的尺寸逐渐缩小,步入纳米级,主导它们运行的物理原理也正发生着巨大的变化。当电子工业、生物科技和航空工业开发出越来越小的器件,用以提高散热密度和增加通过狭小空间的流量以及能源工业领域利用纳米技术提高能量转换效率时,我们可以预期,未来对纳米尺度传热和能量转换方面的专家需求量是很大的。这种新型的工程师需要具备更丰富的关于电子、声子、光子及分子间传热和能量转换的基本知识。

当我们培养为一个难以预知的新时代工作的学生时,在我们周围世界发生的这些变化正在深刻改变着我们的教学大纲和培养计划。跟我们以前为学生一生的职业生涯而培养学生相比,现在的学生攻读学位时将面临许多对他们知识的新要求——更宽的知识面,更加及时的更新,更少定义模糊的基本理论。

为解决这些问题,美国的各机械工程系一直在开设新课程。正是在这个背景下,由陈刚教授编写的这本教科书《纳米尺度能量输运和转换》作出了宝贵的贡献。该书由 MIT-Pappalardo 机械工程系列丛书资助。此外,美国机械工程协会(ASME)成立了纳米技术协会,旨在为未来的执业机械工程师和将成为下一代实践者的机械工程专业学生提供纳米技术方面的有效的知识基础。此书显然非常有助于实现 ASME 纳米技术协会的愿景。

本书提出了一种关于电子、分子、声子及光子的统一处理方法,并且为那些想进一步提高自己的技能和满足自己兴趣或需要的学生或执业工程师提供了很多算例、参考文献和习题。本书选题不仅让学生能够解决纳米尺度传热和能量转换的相关问题,而且让他们能够与其他领域的工程师及科学家一起解决他们所遇到的问题。纳米科学和纳米技术一般来说涉及许多传统学科的相关知识,包括电气工程、航空航天工程、物理学、化学、生物学及神经科学,因此纳米尺度问题通常需要较强的交叉学科研究方法。本书不仅让学生能够解决其他学科遇到的问题,而且书中的应用实例将帮助学生掌握交叉学科的思维方式,这种思维方式是在交叉学科环境下高效工作、以迎接 21 世纪及以后巨大挑战所必需的。本书在加州大学洛杉矶分校及麻省理工学院成功使用多年,因此我有信心,本书可以提供一个有效的机制,为未来的机械工程师及当前的实践者传授他们所需要的纳米科学和纳米技术领域的基础知识。

Mildred S. Dresselhaus
麻省理工学院

本书旨在提供热能输运以及从纳米连续变化到宏观尺度的能量转换过程的微观图像。能量转换和输运过程在自然界、工程装置及系统中无所不在。热传递的宏观描述以一些唯象定律为基础,例如热传导的傅里叶定律,剪切应力的牛顿定律和对流冷却的牛顿定律,以及热辐射的斯特藩-玻尔兹曼定律。将这些定律与热力学第一定律及第二定律相结合,可以得到决定一个系统的能量转换效率、传热速率及温度场的方程。传统的工程方法很少关注控制宏观能量转换和热量传递现象的微观过程。如果说这种传统的工程方法在过去可以满足大部分技术应用的需要,那么,随着技术的不断发展和新兴技术的出现,尤其是纳米技术、能量直接转换技术、生物技术、微电子学及光子学技术,传统的工程方法显得越来越难以满足需要。

热量传递及能量转换的基本原理包含在多种不同学科的不同专题中,例如量子力学、固体物理、统计力学、动理学及电动力学等。与本书内容最接近的是那些包含动理学理论的著作,它们主要考察的对象是气体。然而,新兴技术需要了解通过其他能量载流子的能量传递:电子、声子、光子和液体分子。我所面临的艰巨任务是把各方面的内容融入到一本书中,并让学生和研究者都能读懂。只要合适,我在本书中对这些能量载流子采用一种统一处理的方式。

采用这种统一处理方法有如下几种目的。首先,从教学角度上来讲,有些读者可能对某种载流子的能量输运过程较熟悉,他可以通过类比的方法明白其他能量载流子的输运过程。例如,机械工程师可能对通过光子的辐射热传递、通过气体分子的热传导,以及声波传播较为熟悉,而具有物理或电气工程背景的读者可能对电子和电磁波更为熟悉。在本书的撰写过程中,我假定大多数读者只是修了大学物理,而没有广泛地接触现代物理学,因为这是典型机械工程学科课程设置的形式。因此,那些已经学习过量子力学和固态物理学的读者更容易读懂本书的内容。其次,统一处理方法反映了我的理念,即让学生针对他们未来交叉学科工作环境的特点而接受交叉学科的培训。通过统一处理方法,读者可以了解到,各种不同的能量载流子具有相同的理论背景,并且常常用相同的公式来描述。同时可以向读者揭示,关于热传导的傅里叶定律、牛顿剪切应力定律、关于电流流动的欧姆定律都可以从玻尔兹曼方程中导出,并且纳米尺度的热传导与宏观尺度的热辐射具有相似性。通过这些例子及本书中很多其他的例子,我希望读者可以意识到,学科间的界线是很容易跨越的。传统学科在20世纪已经被广泛地研究,相较而言在不同学科之间的交叉领域则有更为广阔的发明创新的空间。纳米技术只是一个不同学科交叉的例子。事实上,并没有单一的纳米技术,而是有很多潜在的以纳米为基础的技术等待着读者去发明和发展。

编写本书的一个目的是作为本科毕业班或研究生层次的关于纳米尺度热传递和能量转

换的教科书；另一个目的是为研究者、专家以及初学者提供一本参考书。本书中的内容及详细的数学描述力求在广度与深度、教学与研究的矛盾要求中寻找一个相对平衡。我尽力让具有机械工程背景的读者能够全面掌握书中的推导过程，并能将本书作为他们研究的出发点；但对于研究者而言，需要通过查找原始文献和其他参考书目，以获取更为详细的信息。本书中所引用的文献主要为原始论文，但由于本书所讨论的内容涉及面非常广泛，参考文献不可能包含所有纳米和微尺度传热领域的文献。本书内容的选择主要受作者本人的学习和研究经历的影响。

由于本书涵盖的内容比较广泛，对读者的一大挑战就是包含了不同学科的术语。这有时确实令人生畏。我已经在加州大学洛杉矶分校及麻省理工学院教授了本书的部分内容，包括研究生、本科毕业班学生，甚至一些大三的学生，他们大多数有机械工程背景。学生的反馈是非常积极正面的，但显然也让一部分同学感觉很吃力。我的看法是：没有付出，就没有回报。需要学习的东西很多，但回报也将是巨大的。在阅读过程中，除了阅读纳米尺度传热的文章外，我建议学生要经常浏览最新的学术期刊如 *Science*、*Nature*、*Applied Physics Letters*，以及关于纳米技术的最新期刊，希望同学们可以从开始懂得论文中所讨论的内容中获得乐趣。当然，真正的乐趣来自于你将从书中学到的知识应用到自己的工作实际中，我很乐意与读者分享这种喜悦，包括对本书的批评。

Gang Chen(陈刚)
Carlisle, Massachusetts

我过去一直认为,致谢只是例行公事,直到这本书将近完成我才意识到,致谢是作者公开表达个人感受最好的形式,实际上,它成了我最想写的部分。很少有人参考别人的工作而独立写出一本书,本书也不例外。作者已经以列出参考文献的方式感谢了一部分贡献者,而没列出的其他人的贡献则被视为公共知识。站在个人角度,我要感谢很多朋友:从我在华中科技大学(中国)、加州大学伯克利分校学习时的朋友,到我在杜克大学、加州大学洛杉矶分校,以及目前麻省理工学院工作时的同事。因为篇幅的限制,也担心发生遗漏,我不能列出全部名单。但有两位教授对我而言非常特别,我必须感谢他们。如果没有我的博士论文指导老师,已故的 Chang-Lin Tien(田长霖)教授的指导,我不可能写出这本书,他在中国之行期间亲自挑选了我,并一直指导我,甚至当他担任加州大学伯克利分校校长期间也未间断。他的洞察力和开创性的工作引导了微纳尺度传热领域研究的快速发展,虽然他英年早逝,但是他的精神将继续激励有幸亲身结识或通过其著作认识他的很多人。我还要深深感谢 Mildred S. Dresselhaus 教授,她以其奉献和活力成了我学习的另一个楷模,她也阅读和评论了本书的前几章。在加州大学洛杉矶分校和麻省理工学院选修我这门课时的学生们帮我录入了大量书稿,虽然没有列出名字,但我仍要感谢他们。同时要感谢伦斯勒理工学院的 T. Borca-Tasciuc 教授课上的学生、肯塔基大学 M. P. Mengüç 教授课上的学生,他们对部分章节提供了书面回馈信息。我当前小组里的几个学生帮助完成了校对和绘图工作,他们是: D. Borca-Tasciuc, Z. Chen, J. Cybulski, C. Dames, T. Harris, A. Henry, L. Hu, A. Narayanaswamy, A. Schmidt, A. Shah, 特别是 R. G. Yang 还归纳了学生们的评论。还要感谢以前的几位学生和博士后,他们激励了我,并在所涉领域内丰富了我的知识,包括 T. Borca-Tasciuc 博士, W. L. Liu 博士, D. Song 博士, S. G. Volz 博士, B. Yang 博士和 T. F. Zeng 博士。伊利诺伊大学厄巴纳—香槟分校的 J. B. Freund 教授,弗吉尼亚大学的 P. M. Norris 教授和密歇根大学的 M. Kaviany 教授对本书的一些章节给予了建设性的回馈意见。当然,我要对书中的任何错误负责。我还要感谢在各个职业阶段支持过我的香港王宽诚教育基金会和 Simon-Guggenheim 基金会。如果没有 Neil、Jane Pappalardo 和 MIT-Pappalardo 机械工程丛书编辑 R. Abeyarantne 教授和 N. Suh 教授的慷慨支持,本书不可能包括在该丛书之中。

我要感谢几个基金机构,包括 DOE, DARPA, JPL, NASA, NSF 和 ONR,它们为我在此领域的研究提供了支持。其中,特别是 NSF 年轻研究者奖学金支持了我的早期职业, DOD/ONR 多学科大学研究计划为我的跨学科研究工作提供了机会。从许多方面讲,这本书是教学与研究的结合。我过去几年所写的几篇论文,就是在对不同能量输运载流子进行类比时,受到启发而完成的。

在似乎永无止境的手稿撰写过程中，牛津大学出版社编辑 Danielle Christensen 给了我温和的压力。牛津大学出版社的 Lisa Stallings 和 Barbara Brown 在成书过程中给了我很大帮助。Keyword 出版服务有限公司的 Sue Nicholls 和 Ian Guy 完成了仔细的手稿编辑工作。手稿最终得以付印，我对他们深表感谢。

我要感谢我的父母和岳父母，是他们给予了我精神上的支持和祝愿。我要对我亲爱的妻子 Tracy 和我们的儿子、女儿表达最多的谢意。我曾在某本书的前言里读到，那本书的作者（这个作者我认识）声称，他这本书印出来的每页纸，平均写作时间为 3 小时。即将完成本书时，我才相信了这个说法。我大约在五年前开始撰写本书，当时我们正期待女儿 Karen 的降生，我改变了工作习惯，早晨早起几个小时，以便及时完成本书，打算将其作为女儿出生时的礼物。结果证明，制定这个目标严重低估了完成一本书的时间。现在 Karen 4 岁，儿子 Andrew 10 岁。他们在与 Tracy 一起耐心等待时，也时时问我写到哪一章了。写作本书大约花费 1500 小时，大部分是从他们那里窃取来的，现在快要交付手稿了，我希望这意味着能有更多的时间陪伴他们。

第 1 章 绪论	1
1.1 小尺度大作为	1
1.2 温度和热量的经典定义	5
1.3 宏观传热理论	6
1.3.1 热传导	6
1.3.2 热对流	6
1.3.3 热辐射	9
1.3.4 能量平衡	11
1.3.5 局部平衡	12
1.3.6 宏观理论下的缩放趋势	12
1.4 热载流子及其输运的微观描述	13
1.4.1 热载流子	13
1.4.2 热载流子的容许能级	15
1.4.3 能量载流子的统计分布	16
1.4.4 简单动理学理论	18
1.4.5 平均自由程	19
1.5 微纳尺度输运现象	20
1.5.1 经典尺寸效应	20
1.5.2 量子尺寸效应	21
1.5.3 快速输运现象	21
1.6 本书的结构	23
本章符号表	24
参考文献	25
习题	27
第 2 章 物质波和能量量子化	31
2.1 波的基本特性	31
2.2 物质的波动性	33
2.2.1 光的波粒二象性	33
2.2.2 物质波	34
2.2.3 薛定谔方程	35
2.3 薛定谔方程求解举例	37

2.3.1	自由粒子	37
2.3.2	一维势阱中的粒子	38
2.3.3	电子自旋和泡利不相容原理	41
2.3.4	谐振子	42
2.3.5	刚性转子	45
2.3.6	氢原子的电子能级	46
2.4	本章小结	50
	本章符号表	51
	参考文献	52
	习题	53
第3章	固体中的能态	56
3.1	晶体结构	56
3.1.1	实空间晶格的描述	56
3.1.2	实际晶体	59
3.1.3	晶体结合势	61
3.1.4	倒易格子	63
3.2	晶体中的电子能态	66
3.2.1	一维周期势能(克勒尼希-彭尼模型)	66
3.2.2	实际晶体中电子能带	71
3.3	晶格振动和声子	73
3.3.1	一维单原子晶格链	73
3.3.2	能量量子化和声子	75
3.3.3	一维双原子和多原子晶格链	76
3.3.4	三维晶体中的声子	76
3.4	态密度	77
3.4.1	电子态密度	78
3.4.2	声子态密度	79
3.4.3	光子态密度	80
3.4.4	微分态密度和立体角	80
3.5	人工结构中的能级	81
3.5.1	量子阱、量子线、量子点和碳纳米管	81
3.5.2	人工周期结构	83
3.6	本章小结	85
	本章符号表	86
	参考文献	87
	习题	88
第4章	统计热力学与热能储存	91
4.1	系综和统计分布函数	91

4.1.1 微正则系综和熵	92
4.1.2 正则系综和巨正则系综	93
4.1.3 分子配分函数	96
4.1.4 费米-狄拉克分布、玻色-爱因斯坦分布和玻尔兹曼分布	99
4.2 内能和比热	101
4.2.1 气体	101
4.2.2 晶体中的电子	103
4.2.3 声子	105
4.2.4 光子	107
4.3 内能和比热的尺寸效应	108
4.4 本章小结	110
本章符号表	112
参考文献	113
习题	114
第5章 波的能量传递	117
5.1 平面波	117
5.1.1 平面电子波	118
5.1.2 平面电磁波	118
5.1.3 平面声波	122
5.2 平面波的界面反射和折射	124
5.2.1 电子波	124
5.2.2 电磁波	125
5.2.3 声波	130
5.2.4 边界热阻	132
5.3 波在薄膜中的传播	136
5.3.1 电磁波的传播	136
5.3.2 声子和声波	140
5.3.3 电子波	142
5.4 衰减波和隧穿	142
5.4.1 衰减波	142
5.4.2 隧穿	143
5.5 纳米结构中的能量传递：朗道尔公式	145
5.6 由波过渡到粒子的描述	149
5.6.1 波包和群速度	150
5.6.2 相干性和过渡到粒子描述	152
5.7 本章小结	159
本章符号表	160
参考文献	162
习题	165