

◀ 热辐射经典译丛 ▶

Nano/Microscale Heat Transfer

微纳尺度传热

[美] Zhuomin M. Zhang 著
程强 王志超 张险 周怀春 译

清华大学出版社

〈 热辐射经典译丛 〉

Nano/Microscale Heat Transfer

微纳尺度传热

[美] Zhuomin M. Zhang 著
程强 王志超 张险 周怀春 译

清华大学出版社
北京

Zhuomin M. Zhang
Nano/Microscale Heat Transfer
ISBN: 978-0071436748

Copyright © 2007 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press Limited. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2007 by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press Limited.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和清华大学出版社有限公司合作出版。此版本经授权仅限于中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)销售发行。

版权© 2007 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与清华大学出版社有限公司所有。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2013-5957

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

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

微纳尺度传热/(美)张卓敏著;程强等译.--北京:清华大学出版社,2016
(热辐射经典译丛)

书名原文: Nano/Microscale Heat Transfer

ISBN 978-7-302-41875-7

I. ①微… II. ①张… ②程… III. ①传热学—研究 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 256989 号

责任编辑: 杨倩 洪英

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 刘玉霞

责任印制: 何芊

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

印装者: 清华大学印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 26.75 字 数: 643 千字

版 次: 2016 年 1 月第 1 版 印 次: 2016 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 68.00 元

产品编号: 047785-01

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方法的需求仍然十分迫切。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传输机制也变得越来越重要。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对该问题的学习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”集中翻译出版了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.

该丛书的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,后两部主要论述微纳米尺度辐射热传递及能量转化等世界前沿的热点科学问题。这四部著作的作者包括了俄罗斯科学院外籍院士、美国国家工程院院士等国际热辐射领域权威专家。John Howell教授是美国得克萨斯大学奥斯汀分校机械工程的荣誉退休教授,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(特别是蒙特卡罗方法),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。

Robert Siegel 教授是传热领域的资深科学家。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》第 5 版在 2010 年由 Taylor and Francis 集团 CRC 出版社出版,该书的前四版均由 Robert Siegel 教授担任第一作者。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理论的专著。该书自第 1 版出版以来,已经连续出版了 5 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由曹玉璋、黄素逸、陆大有、陶文铨、朱芙英、胡桂林翻译的该书的第 2 版。与前 4 版相比,第 5 版新增加了辐射反问题、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。

M. Pinar Mengüç 教授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—2009 年担任国际学术期刊《Journal of Heat Transfer》副主编。

Michael F. Modest 教授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),担任过 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 教授所著的《Radiative Heat Transfer》第 1 版正式出版,2003 年该书第 2 版出版,2013 年该书第 3 版正式出版。《Radiative Heat Transfer》的第 2 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。

Gang Chen (陈刚) 教授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电能量转换研究中心主任。陈刚教授的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,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、热电传输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,并有 30 多个正在进行的专利申请。在他指导过的 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。陈刚教授曾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 (ASME Fellow)、美国科学促进会资深会员 (AAAS Fellow)、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 年出版的陈刚教授所著的《Nanoscale Energy Transport and Conversion: A Parallel Treatment of Electrons, Molecules, Phonons, and Photons》为该领域的第一部著作。

Zhuomin Zhang(张卓敏)教授现任美国佐治亚理工学院教授,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。目前他已发表 150 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 6 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。他还曾担任《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。Zhuomin Zhang 教授所著的《Nano/Microscale Heat Transfer》在国际上被广泛引用和采纳,该书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”,目的是为本科高年级学生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,希望该丛书能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

2015 年 2 月

这本书已出版八年了,被世界各地许多大学采用作为教材或参考书,我也因此应邀到许多国家和地区做报告、讲座,以及讲授短期课程,尤其是在中国大陆的许多高校。很多学生和老教师常常问起这本书有没有中文翻译版,希望用母语阅读,以有更直观和更深入的理解。我非常高兴这本书被选入“热辐射经典译丛”并与其他两部经典的辐射换热教材及另一部著名的微纳米能量传递专著一起被翻译成中文。我对周怀春教授发起组织并完成了这套书的翻译表示热烈的祝贺,也要感谢程强等人为翻译这本书所付出的辛勤劳动。

在小尺度、短时间条件下,传统热分析中的连续性假设及局部平衡方法可能不再适用。理解微小尺度及时间条件下传热的机理、掌握微纳传热的分析方法需要多学科的背景知识,如统计热力学、量子力学、固态物理学、电磁波理论。正如英文版序中所述,写这本书的基本理念是以一种相对容易理解的方式把热能工程和热物理中的传统知识与近年来发展起来的理论进行整合,本书附有大量的例题和课后习题。本书的第一个特点就是以读者为主,每章都尽量采用合乎思维逻辑的、循序渐进的方法导入并展开,尽量把基础理论解释清楚,并给出具体的适用条件、计算方法与表达式。本书的另一个特点是在第4章之后每章的最后几节都用许多近年来发表的文献来介绍这个领域里的最新研究结果。虽然已时过8年,微纳米传热这个领域的研究已有了很大的突破与发展,但本书中所述的基本理论与所引用的参考文献仍然可以作为了解并进入微纳米传热领域的出发点。

本书真正的亮点是在第8章之后,因为这部分内容是我与学生这些年研究工作的焦点。近十多年来,微纳米尺度下的热辐射已经在理论及实验研究方面有了迅速的发展,成为一个跨学科的研究领域。微纳米尺度下的热辐射包括用微、纳米结构改变固体和液体的光谱和定向辐射特性以及超近距物体在真空中通过电磁波的近场辐射传热。本书的最后三章从电磁波的基本知识及宏观热辐射入手,比较全面地讲述了各种材料的电介质性质,包括超导材料及具有特异性能的超材料,描述了薄膜和多层膜的干涉效应、光子晶体的能带结构、光栅的衍射、粗糙表面的散射,以及这些现象对于热辐射的影响。第10章介绍了近场能量传递中的衰减波和耦合现象,光子隧道效应及其在能源利用中的应用。

我非常愿意与读者交流、一起探讨学术问题,希望读者多提宝贵意见。有兴趣的读者也可以访问我们纳米热辐射实验室的网页(<http://zhang-nano.gatech.edu>)。

美国佐治亚理工学院 张卓敏

2015年3月

张卓敏教授简介

张卓敏现任美国佐治亚理工学院教授。从1978年至1985年就读于中国科学技术大学，于1982年在工程热物理系(现热科学和能源工程系)大学毕业获理学学士学位，之后在葛新石和王义方两位教授的指导下读研并于1985年获工学硕士学位。1989年他被美国麻省理工学院录取攻博并于1992年在机械工程系获得博士学位。他的博士后研究是在美国国家标准与技术研究院和马里兰大学完成的。从1995年至2002年任教于美国佛罗里达大学。



张卓敏教授是国际知名的微纳米尺度传热的主要专家之一，美国机械工程师学会资深会员、美国物理学会资深会员及美国科学促进会资深会员，主要从事微纳米传热学基础、微纳米辐射传热、辐射测温、微纳米结构的热物理特性、超材料等方面的前沿研究。他在以下方面做了开创性的研究：对掺杂硅及硅锗在高温下近场热辐射，负折射率材料的光子隧道效应，近场热光伏，表面粗糙度对辐射性能及高温热加工中辐射测温的影响，超材料在近场热辐射下的应用，利用微纳结构来改变热辐射特性等。他的研究成果对于能量转换、热力学测量、光电子、半导体制造等方面的应用具有广泛的意义。他已发表150余篇论文，获得两项美国专利，著书一本，合编专著一本，另在6部著作中撰写章节。曾多次主持举办国际会议及应邀作会议主题报告，还应邀作过150多次研讨和讲座报告，以及多达160次的学术报告。

张卓敏教授曾多次荣获优秀教师和科研成果奖，包括1997年Pi Tau Sigma最佳教师奖，1999年Sigma Xi青年教师科研奖，1999年美国青年科学家和工程师总统奖，2000年美国机械工程师学会传热分会最佳论文奖，2005年美国航空航天学会热物理学最佳论文奖，2010年国际传热传质中心哈奈特-欧文奖，2015年美国机械工程师学会传热学纪念奖。他的学生曾多次获得最佳博士、硕士论文奖，学术会议上的最佳海报奖；并在中国大陆和台湾地区及韩国、美国等著名大学任教。张卓敏教授担任过美国机械工程师学会《Journal of Heat Transfer》、《Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer》和《International Journal of Thermophysics》的副主编，并任《能源前沿》、《新兴材料研究》等杂志的编委，以及《中国航空学报》(英文版)的国际编委。

张卓敏教授于1962年出生于河南省嵩县，与妻子王灵运育有两个女儿和一个儿子，现定居于美国佐治亚州。

张卓敏先生谨将此书
献给他心爱的妻子
王灵运女士！

在过去的二十多年里,微电子学、微加工技术、MEMS(微机电系统)、NEMS(纳米机电系统)、量子结构(如超晶格、纳米线、纳米管、纳米颗粒)、光电和激光,其中包括超快激光和分子到原子水平的成像技术(如高分辨率电子显微镜、扫描隧道显微镜、原子力显微镜、近场光学显微镜和扫描热显微镜)等方面已经有了巨大的发展。在新的千年,这个领域正在向规模扩大化和系统工程方面迅速转变,以便探索纳米科学和纳米工程在重组技术上的无限可能性。当特征长度和机械长度尺寸相当的时候,传统热分析中的连续性假设可能被打破。类似地,当特征时间和机械时间尺度相当的时候,传统的平衡方法可能不再适合现在的状况。理解小尺寸和短时间尺度的能量传输机制对未来纳米技术的发展是至关重要的。近年来在热物理工程方面,越来越多的有关微纳尺度的研究论文不断涌现。及时传播当前最新的研究成果对于培养新一代的科学家和工程师有着十分重要的意义。因此,越来越多的大学已开设了与微尺度相关的课程。一本针对工科学生的独立完整的教材是十分必要的。一些早期毕业的执业工程师都很想知道这个迷人的领域有的一些什么样的发展,但是由于缺乏全面理解最新文献的深厚背景知识而经常受挫。本书非常实用,它不需要读者在统计力学、量子力学、固态物理学或电动力学方面有太多的预备知识。换句话说就是,本书在一定程度上已经涵盖所有这些学科在该领域所需的基础知识。

本书是写给那些工科高年级本科生、研究生、执业工程师以及学者,他们可能还没有广泛接触纳米科学,但是想要获得发生在小长度尺度和短时间尺度内热现象中扎实的背景知识。本书的基本理念是以一种相对容易理解的方式从逻辑上把热能工程和物理中的传统知识与一些近年来发展起来的理论进行整合,并且附有大量的例题和课后习题。从1999年开始,本书中的素材已经在我所教授的两所大学的研究生课程和本科生选修课中被多次使用。虽然本书可以用作高年级大学生的选修课或者研究生的入门基础课教材,但是由于内容丰富,不要期望一个学期的课程覆盖书中所有的内容。因此,授课老师可以根据学生的知识背景和兴趣从本书中灵活地选取相应的内容进行教学。本书中的一些章节也可以与传统的热科学课程相结合,从而用具有纳米技术的内容来更新本科生和研究生的课程。本书的内容包括了微观的描述和方法,以及它们在热科学和工程方面的应用,重点讲述了气体和固体中通过传导(扩散)、辐射(有或没有介质)和微纳米流体中对流作用所进行的能量传输过程。在第1章的导论之后,在第2章深入介绍了宏观热力学、传热学和流体力学的基础概论。第3章总结了行之有效的统计力学理论,包括经典和量子统计学;文中还在宏观热力学背景下介绍了理想气体的热性质,紧接着给出了量子力学的简明介绍。第4章侧重于微流体,并引入了玻耳兹曼输运方程,还介绍了从连续流到自由分子流的热传递和微观流动区域。本

书的第5~7章重点讨论了固体纳米结构中的热传递过程。第5章介绍了经典和量子尺寸效应对比热容和热导率的影响,但本章中没有涉及详细的固态理论,这部分内容将在随后的第6章中介绍,这样更有利于直观地把握知识脉络。第7章重点介绍了纳米结构中瞬态和非稳态的能量传输过程。接下来的三章介绍了在纳米尺度的热辐射。第8章讲述了电磁波的基本知识和各种材料的电介质性质。在介绍了辐射熵概念的同时,还介绍了几种最近已证实具有特异性能的超材料。第9章描述了薄膜和多层膜的干涉效应、光子晶体的能带结构、从表面起伏的光栅的衍射,以及从粗糙表面的散射。第10章探讨了近场能量传递中的消逝波和耦合现象,并总结了纳米光子学和纳米尺度辐射热传递的最新进展。本书中一直强调波粒二象性并用来解释能量的载体,如理想气体中的分子、金属中的电子、电介质晶体材料中的声子和辐射中的光子。

在20世纪90年代早期,我很有幸在马库斯·费力克(Markus Flik)教授的指导下完成了关于高温超导薄膜(低至10nm)红外光谱研究的博士论文,该研究用于微加工的高灵敏度辐射探测器,同时还帮助他在麻省理工学院开设了关于微尺度传热的夏季短期课程。当我还做博士后的时候,时任加州大学伯克利分校校长的田长霖先生(已故),曾经邀请我于1991年1月在伯克利分校机械工程系作了一个学术报告;后来他也一直支持我,包括本书的孕育过程。我最后一次与他通信是在2000年匹兹堡的美国国家传热会议的前几周,在生病之前他在那次会议上作了一个大会报告。在他2000年8月10日的来信中,田教授热情地赞同我写一本微尺度方面的教科书的计划,并鼓励增加有关纳米方面的内容。他写道:“在此向你表达我对你的计划的最强烈的支持;然而,我建议你拓展书的某些方面内容,并以‘微纳尺度热……’作为书名的开头,覆盖一些纳米方面的内容。”田教授的建议开拓了我的视野,随后我花费了几年的时间完成了本书,并且目前本书中更多地强调了纳米尺度热科学和工程。

从与传热和热物理界大量同行的讨论中收到的不胜枚举的鼓励和评论使我受益匪浅。我非常感谢在佛罗里达大学(UF)和佐治亚理工学院的同事和朋友们给予我的帮助。我尤其要感谢时任佛罗里达大学机械工程系主任的威廉·泰德曼(William Tiederman)教授对我的支持和他对于我早期独立开展研究和教学工作的指导。还要感谢佛罗里达大学物理系的大卫·坦纳(David Tanner)教授,感谢他对于我学习固态物理学的帮助以及从1995年以来和他的愉快合作。多年以来,美国国家标准与技术研究院(NIST)教务处前处长夏劲戈(Jack Hsia)博士曾给予我很多关于人生和学术上的指导,他是我在NIST的许多良师中的一位,我曾经在那里从事博士后研究,之后又在那里工作过几个暑期。值得强调的是,如果没有我的研究生的辛勤工作和杰出贡献,本书就不可能完成。他们中的大部分人都听过我的这门课,并校对了不同版本的手稿。本书最后几章中的一些素材就是来自于他们的研究论文。许多听过我的课或者在纳米尺度热辐射实验室(Nanoscale Thermal Radiation Lab)工作过的本科生和研究生都曾对本书提出过建设性的意见。我非常喜欢跟这些学生一起工作。尤其要感谢的是出版社主编肯·麦克库姆(Ken McCombs),在过去的几年中他催促我继续本书的写作,也感谢整个出版团队细心地校对手稿,并编辑完成了本书的最后版本。作为我在美国青年科学家和工程师总统奖(CAREER/PECASE)项目中教学计划的一部分,

著作本书曾得到了美国国家科学基金会的部分资助。同时,我个人愿意为书中出现的任何疏忽或者错误承担全部责任。

最后,我要感谢我的家人对于我整个写作过程的理解和支持。我的三个孩子,艾米(Emmy)、安吉(Angie)和小虎(Bryan),给了我莫大的幸福,使我的生活有了意义。本书也要献给我的妻子灵运(Lingyun),感谢她对我和孩子们的无条件的爱和无私的关怀!

张卓敏

Zhuomin M. Zhang

A	面积, m^2 ; 亥姆霍兹自由能, J
A_c	横截面面积, m^2
A'_λ	半透明材料的方向光谱吸收率
a	加速度, m/s^2
a	晶格常数, m; 加速度的大小, m/s^2
a_0	玻尔半径, 0.0529nm
a_λ	吸收系数, m^{-1}
B	磁感应强度或磁通密度, T(特斯拉)或者 Wb/m^2
C	容积热容量(ρc_p), $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
c	电磁波的相速度, m/s
c_0	真空中的光速, $2.998 \times 10^8 \text{m}/\text{s}$
c_V 或 \bar{c}_V	质量定容热容或摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
c_p 或 \bar{c}_p	质量定压热容或摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
D	动态矩阵; 电位移, C/m^2
D	态密度, m^{-3} ; 直径, m
D_{AB}	二元扩散系数, m^2/s
d	直径或薄膜厚度, m
E	电场矢量, N/C 或 V/m
E	能量, J; 电场的大小, V/m
E_F	费米能级, J
E_g	带隙能量, J
e	电荷(绝对值), $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
e_b	黑体辐射能量, W/m^2
F, F	力, N
F	归一化分布函数
f	分布函数(有时为归一化的)
G	倒晶格矢量, m^{-1} ; 并矢格林函数
G	吉布斯自由能, J; 电子-声子耦合常数, $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
\bar{g}	摩尔比吉布斯自由能, J/kmol
g	退化
H	磁场矢量, A/m 或 $\text{C}/(\text{m} \cdot \text{s})$

H	焓, J; 磁场强度, A/m 或 C/(m · s)
h	质量比焓, J/kg; 对流换热系数, W/(m ² · K); 普朗克常数, 6.626 × 10 ⁻³⁴ J · s
h_m	对流传质系数, m/s
\hbar	普朗克常数除以 2π, $h/2\pi$
\bar{h}	摩尔比焓, J/kmol
\mathbf{I}	单位矩阵; 单位并矢式
\bar{I}	转动惯量, kg · m ² ; 强度或亮度, W/(m ² · μm · sr); 电流, A
i	$\sqrt{-1}$
i, j, k	系列中用的指数
\mathbf{J} 或 J	通量矢量或大小(每单位面积单位时间传递的量)
\mathbf{J}, J_e	电流密度(也叫电荷通量), A/m ²
J_E	能量通量, W/m ²
J_m	质量流量, kg/(s · m ²)
J_N	粒子通量, m ⁻²
J_p	动量通量, Pa(N/m ²)
K	弹簧常数, N/m; 汤姆逊系数, V/K; 布洛赫波矢, m ⁻¹
\mathbf{k}	波矢, m ⁻¹
k	波矢的大小, m ⁻¹
k_B	玻耳兹曼常数, 1.381 × 10 ⁻²³ J/K
L	特征长度, m
L_0	分子或原子之间的平均距离, m
L_λ	辐射熵强度, W/(K · m ² · μm · sr)
l	长度, m
l, m, n	指数
M	分子量, kg/kmol
m	一个系统或单个粒子的质量, kg
m_r	折算质量, kg
m^*	有效质量, kg
\dot{m}	质量流量或传质速率, kg/s
N	粒子数; 声子振子数
N_A	阿伏加德罗常数, 6.022 × 10 ²⁶ kmol ⁻¹ ; 受主浓度, m ⁻³
N_D	施主浓度, m ⁻³
\dot{N}	粒子流量, s ⁻¹
n	数密度, m ⁻³ ; 量子数; 折射率的实部或折射率
\bar{n}	物质的量, kmol
\tilde{n}	复折射率
\mathbf{P}	传播矩阵; 单位体积极化矢量或偶极矩, C/m ³
p	压力, Pa(N/m ²)

P_{ij}	动量通量分量, Pa
p	动量矢量($m\mathbf{v}$ 或 $\hbar \mathbf{k}$), $\text{kg} \cdot \text{m/s}$
\dot{p}	动量($m\mathbf{v}$ 或 $\hbar \mathbf{k}$), $\text{kg} \cdot \text{m/s}$
p, q	指数
Q	热, J; 品质因子
\dot{Q}	热负荷, W
q	共存的相数; 每分子的原子数
\dot{q}	热生成率, W/m^3
\mathbf{q}''	热通量矢量, W/m^2
q''	热通量, W/m^2
R	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 电阻, Ω 或 V/A
R'	方向半球反射率
R_b''	边界热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
R_t''	热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
\bar{R}	通用气体常数, $8314.5 \text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
r	距离或半径, m; 菲涅尔反射系数
r_e	电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$
\bar{r}	复菲涅尔反射系数
S	坡印廷矢量, W/m^2
S	熵, J/K
S_j	第 j 个声子振子的强度
\dot{S}	熵传输速率, W/K
\dot{S}_{gen}	熵产生率, W/K
s 或 \bar{s}	比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
\dot{s}_{gen}	测定体积的熵产生率, $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
s''	熵流, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
T	温度, K
T'	方向半球透射率
t	时间, s; 菲涅尔透射系数
\bar{t}	复菲涅尔透射系数
U	内部能量, J; 周期电势; J
u_d	漂移速度, m/s
u 或 \bar{u}	比内热能: 质量比, J/kg ; 体积比(如能量密度), J/m^3 ; 摩尔比, J/kmol
V	体积, m^3 ; 电压, V
v	速度, m/s
v_B	全体速度, 或平均速度, m/s
v_R	随机或热速度, m/s
v	比体积, m^3/kg ; 速度, m/s

v_a	音速或声子的平均速度, m/s
v_F	费米速度, m/s
v_R	群速度的大小($d\omega/dk$), m/s
v_l, v_t	纵向、横向声子速度, m/s
v_p	相速度(ω/k), m/s
v_x, v_y, v_z	速度分量, m/s
\bar{v}	摩尔比体积, $m^3/kmol$; 平均速度, m/s
W	功, J; 宽度, m
x, y, z	坐标, m
Z	分区函数

无量纲参数

Kn	克努森数, Λ/L
Le	路易斯数, $D_{AB}/\alpha = Pr/Sc$
Lz	洛伦兹数, $\kappa/\sigma T$
Ma	马赫数, v/v_a
Nu	努塞尔数, hL/κ
Pe	贝克来数, $Re \cdot Pr = v_\infty L/\alpha$
Pr	普朗特数, v/α
Re	雷诺数, $\rho v_\infty L/\mu$
Sc	施密特数, v/D_{AB}
ZT	热电优点的无量纲图

希腊字母

α	热扩散率, m^2/s ; 其他常数
α 和 β	拉格朗日乘数
α_T	热调节系数
α_v	(切向)动量调节系数
α_v'	垂直动量调节系数
α'_i	方向光谱吸收率
β	相位移, rad; 各种系数
β_p	等压热膨胀系数, K^{-1}
β_T	$2\gamma(2-\alpha_T)Kn/[\alpha_T(\gamma+1)Pr]$
β_v	$(2-\alpha_v)Kn/\alpha_v$
Γ_{ij}	声子从介质 i 到介质 j 的半球透射率
Γ_S	塞贝克系数, V/K
γ	比热比(c_p/c_v); 散射率($1/\tau$), rad/s
γ_s	索末非常数, $J/(kg \cdot K^2)$
δ	微分小量; 边界层厚度, m
δ_λ	辐射穿透深度, m

ϵ	质点能量, J; 介电常数, $C^2/(N \cdot m^2)$; 物体的介电常数与真空中的介电常数的比值; 发射率
$\tilde{\epsilon}$	复介电函数, 如物体的介电常数与真空中的介电常数的比值
ϵ'_λ	定向光谱发射率
η_H	霍尔系数 $E_y/J_x B, m^3/C$
Θ	特征温度, K
Θ_D	德拜温度, K
θ	天顶角, rad
θ_B	布儒斯特角, rad
θ_c	临界角, rad
κ	导热系数, $W/(m \cdot K)$; 消光系数(折射率的虚部)
κ_T	等温可压缩性, Pa^{-1}
Λ	平均自由程, m; 光栅或光子晶体周期, m
Λ_n	碰撞的平均距离, m
λ	波长, m
μ	粘度, $N \cdot s/m^2$; 化学势, J; 电子或空穴迁移率, $m^2/(V \cdot s)$; 磁导率, N/A^2 ; 物体磁导率与真空磁导率的比值
μ_F	费米能级, J
ν	运动粘度, m/s ; 频率, Hz
$\bar{\nu}$	波数, cm^{-1}
Π	帕耳帖系数, V
ρ	密度, kg/m^3
ρ_e	电荷密度, C/m^3
ρ'	定向半球反射率
σ	电导率, $(\Omega \cdot m)^{-1}$; 标准偏差
σ_{rms}	表面均方根粗糙度, m
σ_{SB}	斯特藩-玻耳兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$
σ'_{SB}	声子斯特藩-玻耳兹曼常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$
τ	弛豫时间, s; 剪切应力, Pa;
τ'	方向半球透射率
τ_{12}	传递系数
Φ	散射相函数; 粘性耗散函数; 势函数
ϕ	自由度的数量; 方位角, rad; 分子间势能
Ψ	薛定谔的波函数; 各种函数
ψ	分子量; 波函数; 功函数, J
Ω	立体角, sr; 热力学概率
ω	角频率, rad/s
ω_p	等离子体频率, rad/s
$\tilde{\omega}$	速度空间, $d\tilde{\omega} = dv_x dv_y dv_z$