

Fundamentals of Heat and Mass Transfer



传热和传质 基本原理

(原著第六版)

(Sixth Edition)

弗兰克 P. 英克鲁佩勒
F.P.Incropera

大卫 P. 德维特
D.P.DeWitt

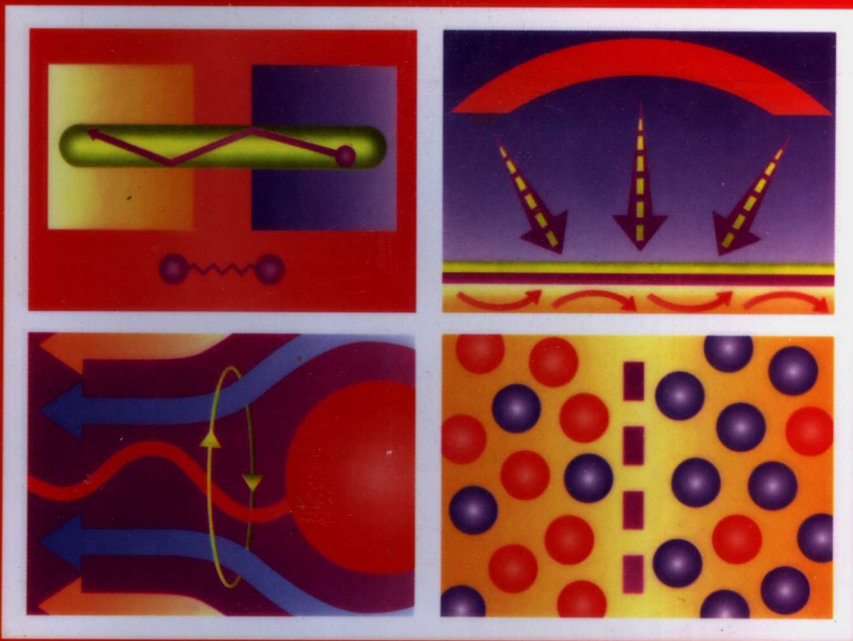
[美]

狄奥多尔 L. 伯格曼
T.L.Bergman

艾德丽安 S. 拉维恩
A.S.Lavine

著

葛新石 叶宏 译



化学工业出版社

Fundamentals of Heat and M

传热和传质 基本原理

(原著第六版)

(Sixth Edition)

弗兰克 P. 英克鲁佩勒

F.P.Incropera

大卫 P. 德维特

D.P.DeWitt

[美]

狄奥多尔 L. 伯格曼

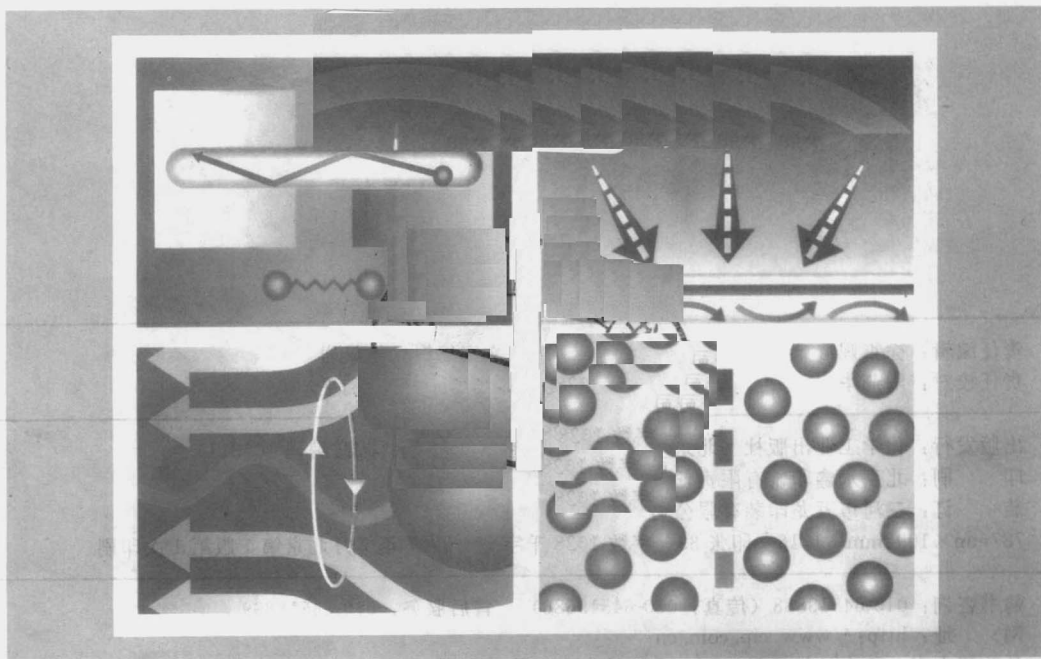
T.L.Bergman

艾德丽安 S. 拉维恩

A.S.Lavine

著

葛新石 叶宏 译



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

传热和传质基本原理：第6版/[美] 英克鲁佩勒
(Incropera, F. P.) 等著；葛新石，叶宏译。—北京：
化学工业出版社，2007.4

书名原文：Fundamentals of Heat and Mass Transfer
ISBN 978-7-122-00200-6

I. 传… II. ①英…②葛…③叶… III. 传热传质学
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 042008 号

Authorized translation from the English Language edition, entitled Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th edition, ISBN 0-471-45728-0 by Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S., Published by John Wiley & Sons, Inc., Copyright © 2007 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, New York, Chichester, Brisbane, Singapore and Toronto. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体字版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权化学工业出版社独家出版发行。未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2006-6464

责任编辑：徐雅妮
责任校对：陶燕华

文字编辑：管景岩
装帧设计：史利平

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装订：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张39 字数1028千字 2007年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：68.00 元

版权所有 违者必究

译者前言

原书第一版自 1981 年问世以来，分别于 1985、1990、1995 和 2002 年修订了五次；本书据第六版译出。

作者在每次编写新版前，一方面基于使用此书的各院校同行的反馈信息进行内容的组织、各章篇幅大小及结构的调整；同时，也随科学技术的发展而不断增添了一些高新技术中与传热和传质过程密切相关的新内容。众所周知，传热和传质过程在国民经济的许多领域中起着重要的作用，这些领域有：发电（常规能源和核能）、化工、航空航天、冶金、蒸馏和精炼、建材和建筑、食品、制冷、机械制造等。第六版增添了在信息、生物、医疗、药物、纳米材料、射流、微尺度内部流动、芯片制造、环保、燃料电池及太阳能利用等领域涉及传热和传质的新内容。在当今的同类教科书中很难见到这么多新内容。

对学习基础性传热学课程的学生应达到什么样水平的问题，作者在第五版的序言中简明扼要地提出了四个目标：

1. 学生必须理解所论主题的有关术语的含义及其与物理原理之间的内在联系；
2. 学生必须能确切地描述涉及传热过程或系统中的输运现象；
3. 学生应能利用必需的输入数据计算传热速率和/或材料的温度；
4. 学生应能构建实际过程和系统的贴切的模型，并通过分析得出所论过程或系统性能的结论。

上述四个目标中，只有实现目标 1 后才能实现其余三个目标。因此，必须强调学好基本原理。基于以上考虑，本书特别重视术语的严格定义和重要基本物理概念的完整、清晰的表述。每章末尾，作者都专门列出一系列问题，让学生测试自己对有关术语、重要概念及基本结论的理解程度。

作者指出，目标 2 和目标 3 是顺序和相互耦合地进行传热分析的两种技能。在着手分析时，首先要确定相关的传热过程和能流，作合适的简化假设。随后，引入相关的速率方程、守恒定律、材料物性及有系数，并完成计算。要求所有修传热课程的学生都达到前三个目标。

作者认为，达到目标 4 的水平，意味着在求解多种传热模式的复杂问题时已具有细致的判断和创造能力。求解方法包括综合和集成各种输入数据，以及建立模型和对结果作解释时的许多判断。获得由简单的、高度理想化的模型过渡到通常为复杂系统的能力，大概只是少数学生在课程学习的最后阶段才能达到。作者形象化地作了比喻：如果目标 1 为建造房屋提供了基石，目标 4 就是房屋的屋顶。

书中的大量习题都来自作者从事科研和咨询工作的丰富积累，以例题为“样本”，作者示范性地以规范化的格式演示了求解问题的全过程。这不仅是为了培养和锻炼学生解决实际问题的能力，也是为了使學生深刻理解所学的相关主题。作者还特意将有些例题扩展，作为习题让学生求解，这将使學生进一步强化对在例题中接触的概念的理解。

第六版共有 98 个例题和 1421 个习题，其中有许多是来自作者积累的科学研究和咨询活动的经验。有大量新颖的例题，如用于汽车的质子交换膜燃料电池在冬季的防冻问题；碳纳米管热导率的测定问题；涉及瞬态导热的利用纳米颗粒治疗恶性肿瘤的问题；用周期性加热法测定新颖纳米结构介电材料的热导率问题；血管中血液的流动和传热问题；微反应芯片中的流动和传热问题；抗生素生物膜的厚度设计问题；用贴片通过皮肤输入药物时确定在给定时间内的药物剂量问题等。这些传热和传质问题初看相当复杂，不知从何着手。但在规范化解题格式的引导下，遇到的一个个问题都迎刃而解，整个解题过程轻松自如。在大量习题中，作者收集了许多既有实用意义，又有很强趣味性和引人入胜的实际问题。相信读者在学习过程中会进一步认识到作为热物理学分支的传热和传质学的十分强大的生命力，传热学将对高新技术的发展不断作出贡献。

作者归纳的许多设计中经常遇到的二维系统的导热形状因子、适用于一些常见几何形状的节点有限差分方程、一些常见几何形状在恒定表面温度和恒定热流密度情况下的精确解和近似分析解、常用的许多对流换热实验关系式以及附录中精选的各种重要常用物质的物性（输运性质和热力学性质）表，内容丰富且实用，使本教材兼有工具书的功能。因此，本书不仅是优秀的教科书，也是有关科研、设计单位及工业部门中从事涉及传热和传质问题的广大科技工作者的有实用价值的参考书。

限于篇幅，中译本只给出了原书约 1/3 的习题。带有求解过程的习题集将另外出版。

本书的翻译分工如下，第 1~5 章、第 12~14 章的正文及第 12~14 章的习题由葛新石翻译，原书序言、第 6~11 章的正文及第 12~14 章以外的习题及附录由叶宏翻译。

由于本书涉及的领域很广，限于译者水平，译文中难免会出现差错，恳请读者批评指正。

中译本的出版得到中国科学技术大学工程科学学院、研究生院和教务处的支持，在此表示感谢。

葛新石 叶宏
于中国科学技术大学
2007 年 1 月

PREFACE TO THE CHINESE TRANSLATION OF *FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER*

6TH EDITION

By

Frank Incropera, David DeWitt, Theodore Bergman and Adrienne Lavine

Shortly after publication of the first edition of *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* more than 25 years ago, my colleague, David DeWitt and I were pleased and honored to learn that our book would be translated into Chinese. At that time, little did we realize the impact that the book would have on heat transfer education in China and the United States. It has been used by hundreds of thousands of students in their study of the subject, as well as by countless practicing engineers in their development of thermal systems.

As net importers of primary energy needed to sustain their economies, both China and the United States are especially motivated to use energy as efficiently as possible. Whether it be in the use of nonrenewable fossil fuels for transportation and power production, or renewable fuels such as solar and geothermal energy for the production of electricity, thermal energy or hydrogen, heat and mass transfer processes are central to the development of efficient systems. In the 21st century, human kind will benefit from the work done by Chinese and U. S. engineers in using their knowledge of heat and mass transfer to develop such systems, as well as to develop innovative processes and systems in other important fields such as biomedicine, manufacturing and material processing.

Knowing the many ways in which heat and mass transfer principles will be used for advancing technology in the 21st century, I was again pleased and honored to learn that there would be a Chinese translation of the 6th edition of *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. I know that David DeWitt, who passed away in 2005, would have shared these feelings. On behalf of our new co-authors, Theodore Bergman and Adrienne Lavine, I would like to wish our Chinese colleagues success in using the book to enhance the learning of their students, and I hope the students will find the subject matter as fascinating and useful as we have found it to be in our careers.

Frank P. Incropera
University of Notre Dame
Notre Dame, Indiana, USA

中译本序言

传热和传质基本原理（第六版）

弗兰克·英克鲁佩勒，大卫·德维特，狄奥多尔·伯格曼 和 艾德丽安·拉维恩

二十五年前，在《传热和传质基本原理》第一版出版不久后，我的同事大卫·德维特和我就高兴且荣幸地得知我们的书将被译成中文。那个时候，我们一点都没期望这本书会在中国和美国对传热学的教学产生影响。目前，已有数十万学习传热学的学生和无数从事热系统研究和开发的工程师用了此书。

作为需要进口初级能源以维持经济持续发展的国家，中国和美国都特别需要致力于尽可能高效地利用能源。不论是在交通运输和发电中利用不可再生的矿物燃料，还是利用太阳能和地热等可再生能源生产电力、热能或氢，传热和传质过程对发展高效率的系统都具有举足轻重的作用。在 21 世纪，中国和美国的工程师将利用传热和传质知识在从事的开发研究工作中取得进展而使人类受益；除了热系统，这些进展还涉及生物医学、制造业和材料工艺等其他重要领域。

认识到传热和传质原理将应用于 21 世纪先进技术中的许多领域，我再次感到高兴且荣幸地获悉《传热和传质基本原理》第六版的中译本将出版，我知道，大卫·德维特（他于 2005 年离开了我们）会分享这种感受。我愿代表我们新的合著者，狄奥多尔·伯格曼和艾德丽安·拉维恩，以我的名义祝愿我们的中国同行在利用此书增加学生的知识时获得成功，我希望学生们将发现，就像我们在自己的职业生涯中感受的那样，这门学科既有引人入胜的魅力，又非常实用。

弗兰克 P. 英克鲁佩勒
圣母玛利亚大学
圣母玛利亚，印第安纳州
(葛新石 译)

纪 念

David P. DeWitt

1934年3月2日—2005年5月17日

2005年，我们失去了 David P. DeWitt 博士，我们亲爱的朋友和同事，他四十五年的职业生涯为传热技术和教学做出了卓越贡献。David 接受的是机械工程师教育，他分别从 Duke 大学、MIT 和 Purdue 大学获得了学士、硕士和博士学位。在 Purdue 完成学业后，他对热物理和辐射计量领域产生了浓厚兴趣，一直从事这些领域的研究，直到疾病使他不能工作为止。在 Purdue 热物性研究中心，David 在建立辐射测量标准方面发挥了作用，最终成为这个中心的代理主管和 Technometrics 公司的主管，该公司主要从事光学和热仪器的设计。1973年，他成为 Purdue 机械工程学院的教授，从事教学和科研，直到 2000 年退休。从 2000 年到 2004 年，他在国家标准和技术研究所的光学技术部门工作。

Dave 是一位出色且严格的教师，一位优秀的研究人员，并且是一个极好的工程师。在我们将近三十年的合作中，他具有的对我形成互补的技能为我们合作的那些著作的成功做出了重要贡献。然而，我对这位特别亲密的同事最美好的记忆更多的是私人，而不是职业方面。

作为合著者，Dave 和我在一起工作了数千小时，通常的时间段为 3~5 小时，内容涉及我们著作的方方面面。在这些时间里，我们常常放下手头的工作，稍作消遣，内容通常为有关我们个人生活的幽默或思考。

Dave 和我各有三个年龄相当的女儿，我们常常共享养育她们的欢乐和挑战。在回忆 Dave 时很难不想到他对他的女儿们 (Karen、Amy 和 Debbie) 的爱和为她们感到的骄傲。1990 年，Dave 的第一任妻子 Jody 因癌症而去世，在他帮助妻子与这个可怕的疾病作斗争的过程中，我直接见证了他的个性和坚强。我还感受了他与第二任妻子 Phyllis 交往中的快乐，他们于 1997 年喜结良缘。

Dave 是一个敏感而和蔼的人，我将永远记住 Dave 以及他的好脾气和慷慨。亲爱的朋友，我们非常地想念你，但我们也为不再痛苦，为你在一个更美好的地方的存在而感到欣慰。

Frank P. Incropera
Notre Dame, Indiana

写在序言之前

在完成《传热和传质基本原理》及《传热学引论》的上一版本之后不久，Dave DeWitt 和我就意识到有必要为我们不再有能力为新的版本增加合适价值的时候做准备。我们特别关注两件事情。首先，我们年事已高，不能忽视健康的衰退或个人离世可能造成的中断。但是，更大程度上是为了保持这些教科书的新鲜和活力，我们还意识到我们正在远离该领域的前沿活动。

2002 年，我们决定主动建立一个后续计划，其中包括增加合著者。对于潜在候选人的特征，我们优先考虑以下几点：具有成功教授传热和传质的记录，积极参与该领域的研究，具有为传热界服务的历史，以及维持有效合作关系的能力。最后一个特征具有很大的权重，因为我们相信，正是这一点对 Dave DeWitt 和我在以前的版本中享受到的成功至关重要。

经过对很多优秀候选人长期和艰难的慎重考虑，Dave 和我邀请 Ted Bergman 和 Adrienne Lavine 成为我们的合著者，他们分别是 Connecticut 大学和 California 大学（洛杉矶）的机械工程教授。我们很感激他们接受了邀请。Ted 和 Adrienne 在本版本中列为第三和第四作者，他们在下一版中将成为第一和第二作者，此后会成为唯一的作者。

Ted 和 Adrienne 为本版本做了极其艰辛的工作，你会见到他们努力做出的大量改进，尤其是在与诸如纳米和生物技术学科有关的现代应用方面。因此，在随后的前言中让 Ted 和 Adrienne 讲述他们的思考是非常合适的。

Frank P. Incropera
Notre Dame, Indiana

序 言

自从上一版本出版以来，关于如何培训工程师，在美国乃至全球范围内均发生了根本性的变化，并提出了有关这种职业的前途问题。未来十年工程实践将如何发展？未来的工程师会因为专家而被看重，还是会因为具有更宽广但不太深入的知识而获得更好的报酬？工程教育者如何应对变化的市场力量？普通学院或大学中工程学科之间的传统界限还会存在吗？

我们相信，由于技术为全人类生活水平的提高提供了基础，工程师职业的前途是光明的。但是，在通才化的外部需求与专才化带来的智能满意度之间的矛盾面前，传热学科如何保持适应性？这个学科未来的价值是什么？传热知识将应用于哪些新的问题？

在准备本版本时，我们尝试确定技术和科学发展中出现的这样一些问题：传热学对这些领域中新产品的实现具有重要作用，如信息技术、生物技术和药理学、替代能源以及纳米技术。这些新的应用以及在能量产生、能量利用和制造业中的传统应用表明，传热学科是充满活力的。此外，当应用于超越传统界限的那些问题时，传热学将是一门至关重要且具有驱动性的未来学科。

我们通过以下途径尽力遵循上一版本中的基本教学方法：保持严格且系统的问题求解方法；纳入可以展现本学科丰富和优美之处的例题和习题；给学生提供实现学习目标的机会。

方法和组织

根据我们的观点，传热学的任何初级课程要实现四个学习目标[●]。

同上一版本一样，我们明确给出了每一章的学习目标，以增加实现它们的手段，并增强评估成绩的方法。各章的小结强调了相应章中阐述的关键术语和概念，并提出了一些问题，用于测试和深化学生的理解程度。

对于涉及复杂模型和/或探索性、假设分析及参数敏感度分析的习题，建议采用基于计算机的方程求解器进行处理。为此，对由 Intellipro 公司 (New Brunswick, New Jersey) 发展的在上一版本中已采用的 Interactive Heat Transfer (IHT) 软件进行了升级。IHT 的技术内容基本上没有变化，但计算能力和界面已大大改观。具体地说，IHT 现在可以同时求解 300 个或更多的方程。用户界面已经升级，包括一个功能完整的工作空间编辑器，它可以控制文本格式、实现复制和粘贴功能；一个方程编辑器；一个新的画图子系统和一个增强的语法检查器。此外，该软件现在有能力对 Microsoft Excel 或以附件的形式输出 IHT 中的特殊函数（如物性和关系式）。第二个软件包 Finite Element Heat Transfer (FEHT) 由 Middleton (Wisconsin) 的 F-Chart Software 软件公司开发，它对求解二维导热问题具有很强的功能。

同上一版本一样，将很多涉及计算机求解的家庭作业以那些可以手算的习题的延伸部分的形式给出。这种方法已经过时间的考验，它使学生可以用手算的结果验证计算机的预测结果。这样，他们就可以进行参数分析，以探索相关的设计和运行条件。在这些习题中，我们

● 见“译者前言”——译者注。

用黑框将那些探索性的部分标出，如**(b)**、**(c)**、**(d)**。这种特征也可使那些希望限制作业中基于计算机求解的习题数的教师受益于这些丰富的习题。那些题号本身被突出标注的习题（如**(1.2)**）需要完全基于计算机求解。

我们知道一些使用本教材的教师没有在他们的课程中采用 IHT。我们鼓励同行们至少要用半个小时到一个小时的时间去演示将 IHT 作为一个工具同时求解多个方程和确定不同材料的热物性。我们已发现，一旦学生了解了它的能力和方便的使用方法，他们会积极主动地利用 IHT 的其他功能。这会使他们更快地求解习题，较少犯数值方面的错误，从而使他们可以关注习题中更为实质性的内容。

第六版中新增的内容

习题调整 本版中包含了相当多的新的或修订后的章后习题，编号已重排。很多新习题需要相对简单的分析，还有很多涉及非传统的科学和技术领域中的应用。

正文改进 正文内容已作了改进，少量材料放进了独立的补充章节中，可以通过相关的网站访问其电子版。如果教师要使用补充章节中的材料，可以很方便地通过 Wiley 网站（见下文）获取。也可以获得与补充章节有关的家庭作业的电子版。

各章内容的变化 为激发读者的兴趣，第 1 章中对传热学的实用性进行了广泛讨论。通过讨论包括燃料电池在内的**能量转化装置**、在**信息技术**以及**生物和生物医学工程**中的应用揭示了本学科的丰富性和相关性。**能量守恒**要求的表述形式已做了修订。

在第 2 章中增加了关于微米和纳米尺度导热的新材料。由于深入讨论这些效应会使大多数学生接受不了，我们通过描述包括声子和电子在内的**能量载流子**来引入并阐明了这些效应。根据物理边界处能量载流子的行为给出并解释了**薄膜有效热导率**的近似表达式。本章中给出了**纳米结构材料**与传统材料的热导率之间的比较，并用于说明近来纳米技术研究的实际应用。解释了**热扩散方程**与微尺度相关的**局限性**。第 3 章中引入了**生物热方程**，指出了它与适用于延伸表面的热方程的相似性，以方便其应用和求解。

在第 4 章中关于适用于多维稳态导热问题的**导热形状因子**的讨论中，增添了涉及**无量纲导热速率**的最新结果。虽然我们已将绘图求解方法放进了补充材料，但我们增强了关于**二维等温线**和**热流线**分布的讨论，以帮助学生建立关于导热过程的概念。无量纲导热速率的应用已扩展至第 5 章中的瞬态情况。在第 5 章中，我们给出了瞬态传热问题统一化的新求解方法；并增加了与一定范围内的几何形状和时间尺度有关的易于使用的**近似解**。最近，我们注意到很少有学生愿意使用一维瞬态导热解的图形表示（海斯勒图）；大多数学生宁愿求解近似的或严格的分析表达式。因此，我们已将图形表示放入了补充材料。由于现在的学生使用计算机求解很方便且非常频繁，涉及多维效应的分析解也已转入补充材料中。我们添加了一小节关于周期性加热的内容，并通过介绍一种用于测量纳米结构材料热物性的现代方法证明了其实用性。

第 6 章中关于对流基本原理的介绍已简化并作了改进。对**湍流**和**向湍流的过渡**的描述已作了更新。强调了**热物性对温度的依赖性的合适处理方法**。对流传递方程的推导过程现已放入补充材料中。

第 7 章中对外部流动的处理方法基本上没有变化。对第 8 章中适用于**内部流动入口区域**的关系式作了更新，关于传热强化的讨论已作了拓展，增加了适用于**弯管**中流动的关系式。给出了**内部流动对流关系式**与微尺度有关的**局限性**。对第 9 章中与腔体内的**自然对流**有关的有效热导率的关系式作了修订，以便更直接地将这些关系式与第 3 章中的导热结果相联系。

第 10 章中关于**沸腾传热**的介绍已作了修改，将沸腾现象的相关内容与前章节中的受

迫对流和自然对流的概念相联系，以增进学生对沸腾曲线的理解。已根据当前的文献对沸腾关系式中使用的常数的值作了修正。删去了对不再使用的制冷剂的引用，增加了替代制冷剂的物性。讨论了内部两相流动关系式与微尺度有关的局限性。并给出了凝结问题的非常简单的求解方法。

在第 11 章中保留了对数平均温差 (LMTD) 法，以用于建立同心管换热器的关系式，但是，由于有效度——NTU 法的适应性很强，基于 LMTD 的对其他类型换热器的分析已放入补充材料中。再次说明，可通过访问相关网站获得补充的章节。第 12 章和第 13 章中对辐射换热的处理基本上没有修订或改进。

我们对第 14 章中关于传质的介绍作了大量修订。我们对该章的内容进行了重组，以便教师既可以讲授所有内容，也可以在不破坏完整性的前提下将注意力集中于静止介质中的传质问题。如果时间有限和/或只对液体或固体中的传质问题感兴趣，则推荐采用后一种方法。第 14 章中的新例题反映了当前的应用。关于传质中不同边界条件的讨论已更加清晰和简单。

致 谢

我们非常感激 Frank Incropera 和 Dave DeWitt 允许我们成为他们的合著者。我们要特别感谢 Frank，为他在编写本版本过程中的耐心、建设性的建议、对我们工作的细致批评和亲切鼓励。

我们还要感谢我们在 Connecticut 大学和 UCLA 的同事，他们在文稿输入方面做了重要工作。还要感谢国家标准和技术研究所的 Eric W. Lemmon，他慷慨地提供了新型制冷剂的物性。

我们永远感激我们美好的妻子和孩子：Tricia、Nate、Tico、Greg、Elias 和 Jacob，为她们的爱、支持和无限的耐心。最后，我们俩都要对 Tricia Bergman 表示感谢，她尽管有很多事务，还是挤出时间熟练并耐心地求解了新的章后习题。

Theodore L. Bergman (tberg@enr. uconn. edu)

Storrs, Connecticut

Adrienne S. Lavine (lavine@seas. ucla. edu)

Los Angeles, California

补充和网站材料

本教材的相关网站为 www.wiley.com/college/incropera。点击“students companion site”链接，学生可以访问家庭作业的答案和本教材的补充章节。

只有教师可以获得的材料包括教师解答手册、用于教师授课的 Powerpoint 幻灯片以及教材中的图的电子版，教师可用它们准备自己的电子课件。教师解答手册是为那些使用本教材教学的教师准备的。在没有获得出版商允许的情况下以任何形式复制或散布整个或部分解答手册将违反版权法。

带有用户指导的 Interactive Heat Transfer v3.0/FEHT 可以通过 Wiley 网站 www.wiley.com 单独购买 CD 及说明手册。这个软件工具具有的建模和计算功能对求解本教材的很多习题很有用，并使学生可以对很多类型的传热问题进行假设分析和探索性分析。要了解详情，请联系当地的 Wiley 代理。

符 号 表

A	面积, m^2	g	重力加速度, m/s^2
A_b	主/基(无肋)表面的面积, m^2	g_c	重力常数, $1kg \cdot m/(N \cdot s^2)$ 或 $32.17ft \cdot lb_m/(lb_f \cdot s^2)$
A_c	横截面积, m^2	H	喷管高度, m ; 亨利常数, bars
A_{fi}	紧凑式换热器芯的自由通流面积(通过芯流动的有效最小横截面积), m^2	h	对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; 普朗克常数
A_{fr}	换热器的迎风面积, m^2	h_{fg}	蒸发潜热, J/kg
A_p	肋片的纵截面积, m^2	h_{st}	熔解潜热, J/kg
A_r	相对喷嘴面积	h_m	对流传质系数, m/s
a	加速度, m/s^2	h_{rad}	辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
Bi	毕渥数	I	电流, A ; 辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr)$
Bo	邦德数	i	电流密度, A/m^2 ; 单位质量的焓, J/kg
C	摩尔浓度, $kmol/m^3$; 热容量流率, W/K	J	有效辐射密度, W/m^2
C_D	阻力系数	Ja	雅各布数
C_f	摩擦系数	J_i'	组分 i 相对于混合物摩尔平均速度的扩散摩尔流密度, $kmol/(s \cdot m^2)$
C_r	热容, J/K	j_i	组分 i 相对于混合物质量平均速度的扩散质量流密度, $kg/(s \cdot m^2)$
Co	肯尼迪门特数	j_H	传热科尔伯恩 j 因子
c	比热容, $J/(kg \cdot K)$; 光速, m/s	j_m	传质科尔伯恩 j 因子
c_p	比定压热容, $J/(kg \cdot K)$	k	热导率, $W/(m \cdot K)$; 波尔兹曼常数
c_v	比定容热容, $J/(kg \cdot K)$	k_0	零阶、均质化学反应速率常数, $kmol/(s \cdot m^3)$
D	直径, m	k_1, k_1''	一阶、均质化学反应速率常数, s^{-1}
D_{AB}	二元质量扩散系数, m^2/s	L	特征长度, m
D_b	气泡直径, m	Le	路易斯数
D_h	水力直径, m	M	质量, kg ; 热流密度图中的传热通道数; 有限差分求解中傅里叶数的倒数
E	热能与机械能之和, J ; 电势, V ; 单位面积发射功率, W/m^2	\dot{M}_i	组分 i 的质量传递速率, kg/s
E^{tot}	总能, J	$\dot{M}_{i,g}$	化学反应导致的组分 i 的质量增加速率, kg/s
Ec	埃克特数	\dot{M}_{in}	进入控制容积的质量速率, kg/s
\dot{E}_g	能量产生速率, W	\dot{M}_{out}	离开控制容积的质量速率, kg/s
\dot{E}_{in}	能量传入控制容积的速率, W	\dot{M}_{st}	控制容积中贮存质量的增加速率, kg/s
\dot{E}_{out}	能量传出控制容积的速率, W	\mathcal{M}_i	组分 i 的相对分子质量, $kg/kmol$
\dot{E}_{st}	控制容积中贮存的能量的增加速率, W	m	质量, kg
e	单位质量的热内能, J/kg ; 表面粗糙度, m	\dot{m}	质量流率, kg/s
F	力, N ; 换热器修正因子; 黑体辐射在一个波段内的比例; 视角系数	m_i	组分 i 的质量分数, ρ_i/ρ
Fo	傅里叶数	N	热流密度图中温度增量的数目; 管簇中的总管数; 封闭腔体中的表面数
Fr	弗鲁德数	N_L, N_T	纵向和横向上的管数
f	摩擦因子; 相似变量	Nu	努塞尔数
G	辐照密度, W/m^2 ; 单位面积质量速率, $kg/(s \cdot m^2)$	NTU	传热单元数
Gr	格拉晓夫数		
Gz	格莱兹数		

N_i 组分 i 相对于固定坐标系的摩尔传递速率, kmol/s
 N_i'' 组分 i 相对于固定坐标系的摩尔流密度, kmol/(s·m²)
 \dot{N}_i 化学反应导致的单位容积内组分 i 增加的摩尔速率, kmol/(s·m³)
 \dot{N}_i'' 组分 i 的表面反应速率, kmol/(s·m²)
 n_i'' 组分 i 相对于固定坐标系的质量流密度, kg/(s·m²)
 \dot{n}_i 化学反应导致的单位容积内组分 i 增加的质量速率, kg/(s·m³)
 P 周长, m; 通用流体物性标记
 P_L, P_T 管簇的无量纲纵向和横向节距
 Pe 贝克来数 ($RePr$)
 Pr 普朗特数
 p 压力, N/m²
 Q 能量传递, J
 q 传热速率, W
 \dot{q} 单位容积中能量产生的速率, W/m³
 q' 单位长度上的传热速率, W/m
 q'' 热流密度, W/m²
 q^* 无量纲导热速率
 R 圆柱半径, m
 R 通用气体常数
 Ra 瑞利数
 Re 雷诺数
 R_e 电阻, Ω
 R_i 污垢系数, m²·K/W
 R_m 传质阻值, s/m³
 $R_{m,n}$ m 、 n 节点的余数
 R_i 热阻, K/W
 $R_{i,c}$ 接触热阻, K/W
 $R_{i,t}$ 肋片热阻, K/W
 $R_{i,o}$ 肋片阵列的热阻, K/W
 r_o 圆柱或球的半径, m
 r, ϕ, z 圆柱坐标
 r, θ, ϕ 球坐标
 S 溶解度, kmol/(m³·atm); 二维导热的形状因子, m; 喷管节距, m; 板间距, m
 S_c 太阳常数
 S_D, S_L, S_T 管簇的对角、纵向和横向节距, m
 Sc 施密特数
 Sh 舍伍德数
 St 斯坦顿数
 T 温度, K
 t 时间, s
 U 总传热系数, W/(m²·K); 内能, J
 u, v, w 质量平均流体速度分量, m/s
 u^*, v^*, w^* 摩尔平均速度分量, m/s
 V 体积, m³; 流体速度, m/s
 v 比容, m³/kg

W 缝式喷管的宽度, m
 \dot{W} 做功的速率, W
 We 韦伯数
 X 蒸气干度
 X, Y, Z 单位体积的物体力的分量, N/m³
 x, y, z 直角坐标, m
 x_c 向湍流过渡的临界位置, m
 $x_{id,c}$ 浓度入口长度, m
 $x_{id,h}$ 水力学入口长度, m
 $x_{id,t}$ 热入口长度, m
 x_i 组分 i 的摩尔分数, C_i/C

希腊字母

α 热扩散系数, m²/s; 单位体积换热器的表面积, m²/m³; 吸收率
 β 容积热膨胀系数, K⁻¹
 Γ 膜状凝结中单位宽度上的质量流率, kg/(s·m)
 δ 水力边界层厚度, m
 δ_c 浓度边界层厚度, m
 δ_p 热穿透深度, m
 δ_i 热边界层厚度, m
 ϵ 发射率; 堆积床的空隙率; 换热器有效度
 ϵ_i 肋片有效度
 η 相似变量
 η_i 肋片效率
 η_o 肋片阵列的总效率
 θ 天顶角, rad; 温差, K
 κ 吸收系数, m⁻¹
 λ 波长, μ m
 λ_{mp} 平均自由路程, nm
 μ 黏度, kg/(s·m)
 ν 运动黏度, m²/s; 辐射频率, s⁻¹
 ρ 质量密度, kg/m³; 反射率
 σ 斯蒂芬-波尔兹曼常数; 电导率, 1/(Ω ·m); 法向黏性应力, N/m²; 表面张力, N/m; 换热器的最小横截面积与迎风面积之比
 Φ 黏性耗散函数, s⁻²
 ϕ 方位角, rad
 ψ 流函数, m²/s
 τ 切应力, N/m²; 透过率
 ω 立体角, sr; 灌注速率, s⁻¹

下标

A, B 二元混合物中的组分
 abs 吸收的
 am 算术平均
 b 扩展表面的基部; 黑体
 c 横截面积; 浓度; 冷流体
 cr 临界隔热厚度
 $cond$ 导热

conv 对流
 CF 逆流
 D 直径；阻力
 dif 扩散
 e 过剩的；发射；电子
 evap 蒸发
 f 流体物性；肋片状态；饱和液体状态
 fc 受迫对流
 fd 充分发展状态
 g 饱和蒸气状态
 H 传热状态
 h 流体动力学的，水力的；热流体；螺旋状的
 i 通用组分标记；环套的内表面；初始条件；管道进口条件；投射辐射
 L 基于特征长度
 l 饱和和液体状态
 lat 潜能
 lm 对数平均
 M 动量传递状态
 m 管道横截面上的平均值
 max 最大流体速度
 mfp 平均自由路程
 o 中心或中心平面状态；管道出口状态；外部的

ph 声子
 R 再辐射表面
 r, ref 反射的辐射
 rad 辐射
 S 太阳条件
 s 表面条件；固体物性
 sat 饱和状态
 sens 显能
 sky 天空条件
 ss 稳态
 sur 周围环境
 t 热的
 tr 透过的
 v 饱和蒸气状态
 x 表面上的局部位置
 λ 光谱的
 ∞ 自由流状态

上 标

' 脉动量
 * 摩尔平均；无量纲量

上横杠

— 表面平均状态；对时间平均

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 何谓传热及如何传热	1
1.2 物理机理和速率方程	1
1.2.1 传导	2
1.2.2 对流	4
1.2.3 辐射	6
1.2.4 与热力学关系	9
1.3 能量的守恒要求	9
1.3.1 控制容积的能量守恒	9
1.3.2 表面的能量平衡	17
1.3.3 守恒定律的应用方法要点	20
1.4 传热问题的分析方法	20
1.5 传热学的重要性	22
1.6 单位和量纲	24
1.7 小结	26
参考文献	28
习题	28
第 2 章 热传导引论	34
2.1 传导速率方程	34
2.2 材料的热物性	36
2.2.1 热导率	36
2.2.2 其他有关物性	41
2.3 热扩散方程	43
2.4 边界和初始条件	49
2.5 小结	51
参考文献	52
习题	52
第 3 章 一维、稳态热传导	58
3.1 平壁	58
3.1.1 温度分布	59
3.1.2 热阻	60
3.1.3 复合壁	61
3.1.4 接触热阻	62
3.2 导热分析的另一种方法	70
3.3 径向系统	73
3.3.1 圆柱体	73
3.3.2 球体	77
3.4 一维导热结果汇总	80
3.5 有内热源时的导热	80
3.5.1 平壁	81
3.5.2 径向系统	85
3.5.3 热阻概念的应用	90
3.6 扩展表面的传热	90
3.6.1 扩展表面导热的一般分析	92
3.6.2 等截面肋片	93
3.6.3 肋片性能	98
3.6.4 非等截面面积肋片	100
3.6.5 表面总效率	101
3.7 生物热方程	109
3.8 小结	112
参考文献	114
习题	114
第 4 章 二维稳态导热	125
4.1 可供选择的处理方法	125
4.2 分离变量法	126
4.3 导热形状因子和无量纲导热速率	129
4.4 有限差分方程	132
4.4.1 节点网格	132
4.4.2 导热方程的有限差分形式	133
4.4.3 能量平衡法	134
4.5 有限差分方程的求解	139
4.5.1 矩阵求逆法	140
4.5.2 高斯-赛德尔迭代法	141
4.5.3 若干需要注意的问题	145
4.6 小结	149
参考文献	149
习题	150

第 5 章 瞬态导热	156
5.1 集总热容法	156
5.2 应用集总热容法的条件	158
5.3 通用集总热容分析	161
5.4 空间效应	166
5.5 有对流条件的平壁	167
5.5.1 严格解	167
5.5.2 近似解	168
5.5.3 总能传输	168
5.5.4 附加的讨论	170
5.6 有对流条件的径向系统	170
5.6.1 严格解	170
5.6.2 近似解	171
5.6.3 总的能量传输	171
5.6.4 附加的讨论	172
5.7 半无限大固体	176
5.8 伴有定表面温度或定表面热流密度的物体	180
5.8.1 定温边界条件	181
5.8.2 定热流密度边界条件	182
5.8.3 近似解	182
5.9 周期性加热	186
5.10 有限差分析	188
5.10.1 导热方程的离散化: 显式法	188
5.10.2 导热方程的离散化: 隐式法	193
5.11 小结	200
参考文献	201
习题	201
第 6 章 对流导论	211
6.1 对流边界层	211
6.1.1 速度边界层	211
6.1.2 热边界层	212
6.1.3 浓度边界层	213
6.1.4 边界层的重要意义	214
6.2 局部和平均对流系数	214
6.2.1 传热	214
6.2.2 传质	215
6.2.3 对流问题	216
6.3 层流和湍流	219
6.3.1 层流和湍流速度边界层	219
6.3.2 层流和湍流状态下的热和组分浓度边界层	221
6.4 边界层方程	223
6.4.1 层流边界层方程	224
6.5 边界层相似: 无量纲边界层方程	226
6.5.1 边界层相似参数	226
6.5.2 解的函数形式	227
6.6 无量纲参数的物理意义	231
6.7 边界层类比	233
6.7.1 传热和传质类比	233
6.7.2 蒸发冷却	236
6.7.3 雷诺类比	238
6.8 对流系数	239
6.9 小结	239
参考文献	240
习题	240
第 7 章 外部流动	245
7.1 实验方法	245
7.2 平行流中的平板	247
7.2.1 等温平板上的层流: 相似解	247
7.2.2 等温平板上的湍流	252
7.2.3 混合边界层状态	252
7.2.4 非加热起始长度	253
7.2.5 具有恒定热流密度的平板	254
7.2.6 使用对流系数的限制	255
7.3 对流计算的方法	255
7.4 横向流动中的圆柱体	261
7.4.1 流动情况	261
7.4.2 对流传热和传质	263
7.5 圆球	269
7.6 横向通过管簇的流动	271
7.7 冲击射流	279
7.7.1 流体力学及几何上的考虑	279
7.7.2 对流传热和传质	280
7.8 堆积床	284
7.9 小结	284
参考文献	286
习题	287
第 8 章 内部流动	297
8.1 流体力学问题	297
8.1.1 流动状态	297
8.1.2 平均速度	298
8.1.3 充分发展区中的速度分布	298