

原著者: (美)弗兰克·P·英克鲁佩勒
(美)戴维·P·戴威特

译者: 葛新石
王义方
郭宽良

传热的基本原理

安徽教育出版社

传热的基本原理

原著者：(美)弗兰克·P·英克鲁佩勒

(美)戴 维·P·戴 威 特

译 者：葛新石 王义方 郭宽良

000,000 (或平 12 磅) 81/1 5801×587 本长

安 徽 教 育 出 版 社

京28.2 价五 195·0737 84年4月 王义方 郭宽良

中国科学院力学研究所图书馆藏 1995.6

责任编辑 王宏金

傅佩兰·P·英克鲁佩勒(美) 著

戴维·P·戴威特(美) 著

葛新石 王义方 郭宽良 译

传热的基本原理

原著者：(美) 弗兰克·P·英克鲁佩勒

(美) 戴维·P·戴威特

译者：葛新石 王义方 郭宽良

安徽教育出版社出版

(合肥市跃进路1号)

安徽省新华书店发行 芜湖新华印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：31 字数：500,000

1985年12月第1版 1985年12月第1次印刷

印数：3,800

统一书号：7276·261 定价：5.85元

译者的话

传热是自然界和几乎所有工业部门中最常见的物理现象。在能源、化工、冶金、建筑、宇航、电工和电子，材料以及国防等工程技术领域，经常会遇到一系列在特定条件下的传热问题。成功地解决这些问题，对装置和设备的技术经济性和安全可靠，热能的有效利用，工艺和生产过程的优化，以及可用能的回收和综合利用等都有重要的作用；对某些新技术和新工艺的采用和发展甚至起决定性作用。因此，在国内、外高等院校中，传热学早已列为许多工程系科的必修课程。

美国出版了为数众多的各种传热学教科书，其中也不乏比较成功的优秀教材，本书以清晰的物理概念，严密的逻辑性，简捷的解题方法和附以内容丰富且具有权威性的热物性资料而独树一帜，赢得了传热学界的一致好评。

扼要说来，本书的主要特点是：

一、对各类传热方式，首先清晰地叙述其物理概念，接着对有关的物理现象作透彻的剖析和讨论，在此基础上再建立物理模型。这样做很有长处，学生对所论现象的物理本质有较深的理解，并易于接受描述物理模型的控制微分方程。

二、通过大量典型的例题，既使读者认识所论传热方式的应用背景，又使读者熟悉解题的步骤和方法，并逐步掌握解决实际问题的能力。本书不仅例题多，且推导严格；在每个例题末了，还对要点加以总结和说明。教学实践证明，这种通过大量典型例题使读者加深对物理本质的认识和正确掌握解题方法的教学方法是很有成效的。

三、在重视经典分析的同时，介绍了适用于电子计算机计算的某些常用数值方法。

四、采用了当今通用的国际单位制。

本书作者长期执教于美国著名的普渡大学，该校在热科学领域的教学和科研工作方面具有悠久的历史；近三十年来，该校热物性研究中心（现改名为热物性和电性质情报分析中心）编纂的十多卷热物性手册更在国际上享有很高的声誉。本书附录精选了各种重要物质的热物性（输运性质和热力学性质）表，内容丰富而实用。

译者曾以本书为传热学教材在中国科学技术大学工程热物理系试用了两年，效果是满意的。译者认为，本书不仅是一本优秀的教科书，也是各工业部门从事涉及传热问题的广大工程科技人员的有益参考书。限于译者的水平，译文中难免有误译和不妥之处，是望读者批评指正。

葛新石 王义方 郭宽良

于中国科学技术大学能源传热研究室 1985.6.

序 言

传热过程一直是我们周围环境中不可分割的部分。随着岁月的流逝，它变得与技术越来越密切相关。为解决涉及这种传热过程的许多传统性的或是新出现的问题，必须满足两个要求：理解过程的物理特性；找到定量表述这些过程的方法。本教材有两个最主要的目标：

1. 向学生逐步传授对于支配传热现象的物理作用的鉴识能力。
2. 使学生掌握解决形形色色的实际问题的方法。

第一个目标包含着这样的意思，即学生在面临一个问题时，应该有能力判断其中是否有传热问题，如果确实存在传热问题，学生应有能力弄清它的特性。例如，导热现象是否重要？如果重要的话，能不能假设其特性为一维的、稳定的热传导问题，或者是多维的、不稳定的热传导问题？又如，是否存在辐射现象？如果是的话，比起可能同时存在的对流作用来它是否重要？本课程的一个主要目的，就是要使学生能够对这类问题逐个进行分析。

第二个目标意味着，学生应能判断可以作哪些恰当的简化假定，判明哪些是应变量，哪些是独立变量，并能选取或建立计算这些应变量的适当表达式。简而言之，学生必须能做工程分析。这种分析虽不总是精确的，却常能对一个特定系统（或过程）的设计或估计其性能提供有用的资料。

这本书就是按上述指导思想来写的，同时也是作为传热学的基本教程来写的。内容方面的轻重缓急也根据这样的考虑来安排。例如，虽然对于支配边界层特性的物理过程给了相当的关注，但并不那么强调边界层的详细解法，而是把重点放在解决涉及对流传热传质的实际问题所需的经验结果方面。

我们假定，上这门课的学生已经学过热力学课程，已经学过或正在上单设的流体力学课。因此，本书并不综合地从头论述对流传热和动量传输（流体力学），而是在学生已有的流体力学知识基础上进行深化。再者，本教科书通过对守恒原理的论述，特别是对热力学第一定律的论述，以加强学生在热力学方面的知识。通用的能量守恒所要求的表述，虽说是简单的，但在本书一开头就提出了，而且作为以后处理所有应用问题的基础。当然，有时是对一个微元控制体，有时则是对一个有限的控制体应用能量守恒的要求。通过大量的例题和习题，牢固地确认了第一定律对于传热学分析的重要性。

应该解释一下关于数值方法将讲述到什么程度的问题。由于数值方法常常是得到热传导问题精确解的唯一办法，本书对于可用有限差分方程或是其他数值方法求解的问题给予相当的重视。但是，我们并没有把任何求解这些问题的计算机程序或是子程序都收罗在本书内，因为在大多数计算机实验室中可方便地得到这类软件，再说学生们自己也很容易编写这些程序。

虽然本书主要是一本传热学的教材，但也包括了一些传质方面的内容，而不仅仅是对传质问题及其影响偶而作一些描述。自然，传质是一门很复杂的学科，在一本导论性的教科书中不可能对它深涉。但是，由于传质与传热之间有很强的类似点，所以我们认为，从这一点考虑，本书对它作一些介绍是合适的。正因为如此，对传质效应讨论的深度仅限于当它可看作与传热相类比的情况。

处理传质问题的方式，随传质模式的不同而异。因为靠扩散传质的工程应用问题是有限

的, 对于与这类传质模式有关的问题, 单独进行了论述并在本书末尾单列一章。因此, 若有讲授者想略去这些问题就很容易。与此相反, 涉及对流传质的工程应用问题是很多的, 而且在汽—液分界面上传质过程对于总的能量交换有很大影响, 所以对流传质是和对流换热结合起来论述的。由于对流传热和传质作用之间有很强的类似性, 把两者综合起来论述也很方便。

本书各部分的内容如下: 第一章建立了传导、对流和辐射传热的物理基础, 而且强调了能量守恒定律的重要作用。通过仔细挑选的例题和习题, 可以培养学生在各种各样实际情况下鉴别有关传热过程的能力。第二章对热传导过程作了详细介绍, 讨论了傅里叶定律的本质和由来, 建立了导热方程的一般形式, 突出了方程中各项物理意义, 也提出了常作的那些简化的本质。第三、四、五章是按通常的习惯安排的, 分别介绍求解一维、二维和不稳定热传导问题的方法。

第六章介绍了对流传热和传质, 讲述了与此有关的主要物理概念, 建立了速度、热和浓度边界层的概念, 推导了相应的守恒方程, 突出了方程中各项的物理意义, 以及它们与壁面上的剪应力及边界层上热量和质量传递之间的关系。通过对守恒方程的无量纲化, 得到各种相似准则, 而且揭示了它们在归纳传热和传质的实验结果时的重要作用。无量纲形式的守恒方程, 还用来推断一些重要的边界层类比关系。最后, 也考虑到对流传输时湍流的影响。

从许多方面来说, 第六章可以说是关于对流传热论述的基础。在向学生介绍进行工程计算的各种方法之前, 它使学生能有扎实的概念方面的根底。虽然不学第六章也可以学以下各章, 但是我们建议不要这样做。作为基础扎实的工程教育, 不能撇开物理原理去建立解决工程问题的方法。

随后各章是关于特定的对流问题。第七、八章分别叙述外部和内部流动中对流传热和传质独有的特征, 强调应用计算机解决问题。第九、十章分别是自然对流和相变下的传热。第十一章则是换热设备。

辐射传热的基础在第十二章中介绍。这一章讨论了表面发射、吸收和反射的物理基础, 建立了相关参数之间的表达式, 讨论了波长和方向的影响, 并建立起黑体和漫射灰表面的概念。在写这一章的时候, 我们强烈地受到这种信念的支配: 不认识 and 讨论辐射的方向特性, 辐射这门学科就不可能正确地发展。正因为如此, 在这一章的开头就引入了辐射强度的概念, 而且由此导出表面发射、辐照和辐射特性都是有方向性的量。这种讲述方法的困难之处, 是要求学生从一开始就作出重大努力, 但其显著的好处在于我们得以对表面辐射过程进行全面而真实的描述。在第十三章中, 我们把重点放在表面之间具有不参与辐射换热的介质时的辐射换热, 同时我们对吸收—发射介质的容积效应也给予一定的注意。

第十四章专门论述多种传热形式的综合作用。列举了各种与工业和环境问题有关的例题, 以此说明如何把以前各章建立的方法综合起来, 以便有效地解决问题。着重点放在那些工程问题上。为此, 学生必须明确解题的目标, 作出适当的假设, 并找出能最好地实现这些目标的解。这一章的内容将大大有助于学生树立使用传热分析工具的自信心。我们极力主张讲课者把这一点列入课程的要求之中。

本书虽然用于具体的传热学课程, 其讲授的安排在很大程度上取决于有多少学时可供使用, 也取决于讲授者本人的偏爱。这里, 我们还提出如下建议: 如果这门课程限制在10周(30学时), 要想妥善地处理本书涉及的全部问题是不大可能的。下述分配可看作一个合理的课程大纲: 第一章为2学时, 第二章为1学时, 第三章为4学时, 第五章一至六节为3学

时,第六章为2学时,第七、八章为5学时,第十一章为2学时,第十二章为5学时,第十三章一至三节为3学时,还有三个学时留作考试或作为机动,上述讲授范围没有包括二维热传导(第四章)、解决非稳态热传导的有限差分法(第五章第七节)、自然对流(第九章)、有相变时的对流(第十章)、容积辐射现象(第十三章第四节)、多种传热形式的综合作用(第十四章)以及扩散传质(第十五章)。

如果本课程有15周(45学时),上述的许多专题都可以包括进去了。例如,第四章和第五章第七节就可以列进去;对于解热传导问题的数值方法就可以给予较多的关注;第九、第十章,还有第十三章第四节以及第十四章也都可以讲授了。对于20周(60学时)的传热量课程,就有更多的时间以致可以讲授前面列出的所有专题,再加上扩散传质(第十五章)、热传导问题的分析解法(附录C)、还有边界层问题(附录D和E)。

本书中的例题和习题,可以分成两大类:第一类属于例行的传热量问题,当然也介绍一些新的素材。它们可以使熟悉计算程序以及有关变量的单位和量级。第二类包括更多的题目,它们对于实现本书的目标也更为重要。这些题目中有许多包含有实际的工程系统,通过展示传输现象与当代科学技术问题的联系,激发学生的学习兴趣。有些问题与工业生产过程、能量生产和转换以及环境控制和保护有关。有些问题的解决方法并不是一目了然的,所以要求学生周密而系统地掌握本课程中的各种方法。事实上,许多习题是为训练学生作决定和培养判断能力而设计的。

说到解题,我们强调这样的方法:要求在动手解题之前作认真的思考;它的物理过程应该用一个示意图描述出来;在图上,相关的各个过程应该区分清楚;所作的假设应清楚地予以说明;守恒定律和能量传输速率方程必须正确地运用。

国际单位制(SI制)正在迅速地取代英制,因此本书采用国际单位制。

本书是多年讲授传热学的结果。在编写过程中,我们力求牢记学生在学习中的需要和困难,并谨慎地、自始至终地力争实现我们为本书定下的目标。在许多方面,本书反映了长期以来在普渡(Purdue)大学形成的在传热学科上的观点。我们感激那些对形成这些观点作出贡献的同事们。特别感激利莱(P. E. Liley)教授,他为使本书得到那些可靠的热物性参数值做了许多工作。还有福克斯(R. W. Fox)教授,承他热心地两次审阅手稿,提出了许多珍贵的建议,而且始终如一地鼓励我们。

最后,我们要对许多学生表示感谢,在本书试用期间,他们曾提出过建设性的批评意见。

弗兰克·P·英克鲁佩勒
(Frank·P·Incropera)

戴维·P·戴威特
(David·P·Dewitt)

于西拉法耶蒂,印第安纳
(West Lafayette, Indiana)

符 号

A	面积, m^2
A_c	横截面积, m^2
A_s	表面积, m^2
a	加速度, m/s^2
Bi	毕奥数
C	摩尔浓度, $kmol/m^3$; 热容速率, W/K
C_D	阻力系数
C_f	摩擦系数
C_t	热容量, J/kg
c	比热, $J/kg \cdot K$; 光速 m/s
c_p	定压比热, $J/kg \cdot K$
c_v	定容比热, $J/kg \cdot K$
D	直径, m
D_{AB}	二元质量扩散系数, m^2/s
D_h	水力直径, m
E	内热(显)能, J ; 电势, V ; 发射功率, W/m^2
Ec	埃克特数
$\dot{E}_g$	能量产生速率或发热率, W
$\dot{E}_{in}$	传入控制容积的能量速率, W
$\dot{E}_{out}$	传出控制容积的能量速率, W
$\dot{E}_{st}$	贮存在控制容积中的能量增加速率, W
e	单位质量的内热能, J/kg ; 表面粗糙度, m
F	力, N ; 换热器修正系数; 在一个波长范围内黑体辐射的份额; 视角系数
F_0	傅里叶数
f	摩擦系数; 相似变量
G	投射辐射密度, 辐照密度, W/m^2
Gr	葛拉晓夫数
Gz	格赖兹数
g	重力加速度, m/s^2
g_c	重力常数, $1kg \cdot m/N \cdot s^2$ 或 $32.17ft \cdot lbm/lbf \cdot s^2$
h	对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$; 普朗克常数
h_{fg}	蒸发潜热, J/kg
h_m	对流传质系数, m/s
h_{rad}	辐射换热系数, $W/m^2 \cdot K$
I	电流, A ; 辐射强度, $W/m^2 \cdot sr$
i	电流密度, A/m^2 ; 单位质量的焓, J/kg

J	有效辐射密度, W/m^2
J_i^*	组分 <i>i</i> 相对于混合物摩尔平均速度的扩散摩尔流密度, $kmol/s \cdot m^2$
j_i	组分 <i>i</i> 相对于混合物质量平均速度的扩散质量流密度, $kg/s \cdot m^2$
j_H	传热的科尔伯恩 <i>j</i> 因子
j_m	传质的科尔伯恩 <i>j</i> 因子
k	导热系数, $W/m \cdot K$; 波尔兹曼常数
k_0	零阶各向同性反应速率常数, $kmol/s \cdot m^3$
k_1	一阶各向同性反应速率常数, $1/s$
k_1''	一阶各向同性反应速率常数, m/s
L	特征长度, m
Le	刘易斯数
M	质量, kg ; 热流图上的传热通道数; 有限差分解中傅里叶数的倒数
$\dot{M}_i$	组分 <i>i</i> 的质量传输速率, kg/s
$\dot{M}_{i,g}$	由于化学反应引起的组分 <i>i</i> 的质量增加速率, kg/s
$\dot{M}_{in}$	进入控制体积的质量流率, kg/s
$\dot{M}_{out}$	离开控制体积的质量流率, kg/s
$\dot{M}_{st}$	贮存在控制体积内的质量增加速率, kg/s
μ_i	组分 <i>i</i> 的分子量, $kg/kmol$
m	质量, kg
$\dot{m}$	质量流率, kg/s
m_i	组分 <i>i</i> 的质量比数, P_i/P
N	热流图中的温度增量数; 管簇排数; 腔体内的表面数
Nu	努赛尔数
NTU	传热单元数
N_i	组分 <i>i</i> 相对于固定坐标系的摩尔传递速率, $kmol/s$
N_i''	组分 <i>i</i> 相对于固定坐标系的摩尔流密度, $kmol/s \cdot m^2$
$\dot{N}_i$	由于化学反应引起的单位体积中组分 <i>i</i> 的摩尔增加速率, $kmol/s \cdot m^3$
$\dot{N}_i''$	组分 <i>i</i> 的表面反应速率, $kmol/s \cdot m^2$
n_i''	相对于固定坐标系组分 <i>i</i> 的质量流密度, $kg/s \cdot m^2$
$\dot{n}_i$	由于化学反应引起的单位体积中组分 <i>i</i> 的质量增加速率, $kg/s \cdot m^3$
$P_{L,PT}$	管簇的无量纲纵向、横向间距
P	周长, m ; 通用的流体物性符号
Pe	贝克列数($RePr$)
Pr	普朗特数
p	压强, N/m^2
Q	传热量, J
q	传热速率, W
$\dot{q}$	单位体积中的能量产生速率或发热率, W/m^3
q'	单位长度上的传热速率, W/m

q''	热流密度, W/m^2
R	圆柱体半径, m
R	通用气体常数
Ra	雷利数
Re	雷诺数
R_c	接触热阻, K/W
R_e	电阻, Ω
R_f	污垢系数, $m^2 \cdot K/W$
R_m	传质阻力, s/m^3
$R_{m,n}$	m, n 节点的余
R_t	热阻, K/W
r_o	圆柱体或球的半径, m
r, ϕ, z	圆柱坐标
r, θ, ϕ	球坐标
S	溶解率, $kmol/m^3 \cdot atm$; 二维扩散的形状因子, m
S_c	太阳常数
Sc	施密特数
Sh	舍伍德数
St	斯坦顿数
S_D, S_L, S_T	管簇的对角、纵向、横向间距
T	温度, K
t	时间, S
U	总传热系数, $W/m^2 \cdot K$
u, v, w	按质量平均的流体速度分量, m/s
u^*, v^*, w^*	按摩尔平均的速度分量, m/s
V	容积, m^3 ; 流体速度, m/s
v	比容, m^3/kg
$\dot{W}$	做功速率, W
X, Y, Z	单位容积的体积力分量, N/m^3
x, y, z	直角坐标, m
x_c	过渡到湍流的临界位置, m
$x_{fd,c}$	浓度入口段长度, m
$x_{fd,h}$	水力入口段长度, m
$x_{fd,t}$	热入口段长度, m
x_i	组分 i 的摩尔比数, C_i/C

希腊字母

α	热扩散率(导温系数), m^2/s ; 吸收率
β	容积热膨胀系数, $1/K$
Γ	膜状凝结时单位宽度上的质量流率, $kg/s \cdot m$
δ	水力边界层厚度, m

δ_c	浓度边界层厚度, m
δ_t	热边界层厚度, m
ε	发射率; 堆积床的孔隙率; 换热器有效度 (也称效率)
ε_f	肋片有效度
ε_H	传热的湍流扩散系数, m^2/s
ε_M	动量交换的湍流扩散系数, m^2/s
ε_m	传质的湍流扩散系数, m^2/s
η	相似变量
η_f	肋片效率
θ	天顶角, rad; 温度差, K
κ	吸收系数, $1/\text{m}$
λ	波长, μm
μ	粘度, $\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}$
ν	运动粘度, m^2/s ; 幅射频率, $1/\text{s}$
ρ	质量密度, kg/m^3 ; 反射率
σ	斯蒂芬-波尔兹曼常数; 电导率, $1/\Omega \cdot \text{m}$; 法向粘性应力, N/m^2 ; 表面张力, N/m
Φ	粘性耗散函数, $1/\text{s}^2$
ϕ	方位角, rad
ψ	流函数, m^2/s
τ	切应力, N/m^2 ; 透过率
ω	立体角, sr

下标

A, B	二元混合物内的组分
abs	被吸收的
am	算术平均
b	伸展表面的基; 黑体
c	横截面上的; 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; 发射
evap	蒸发
f	流体物性; 肋片条件; 饱和液体条件
fd	充分开展了的条件
g	饱和蒸气条件
H	传热条件

h	水力的；热流体
i	通用组分符号；环套内表面；初始条件；管子入口条件；投射辐射
L	基于特征长度的
l	饱和液体条件
lm	对数平均条件
M	动量传输条件
m	传质条件；管子横截面上的平均值
max	流体最大速度
o	中心或中心面条件；管子出口条件；外界
R	再辐射表面
r,ref	反射辐射
rad	辐射
S	太阳条件
s	表面条件；固体物性
sat	饱和条件
sky	天空条件
sur	环境
t	热
tr	透过的
v	饱和蒸汽条件
x	表面上的局部条件
λ	光谱的
∞	自由流条件

上标

$'$	波动量
$\bullet$	摩尔平均；无因次量

横线

$-$	表面平均条件；时间平均
-----	-------------

目 录

符 号

第一章 绪论	1
1.1 何谓传热及如何传热	1
1.2 传热的物理机理和能量传输速率方程	1
1.2.1 传导	2
1.2.2 对流	3
1.2.3 辐射	5
1.2.4 与热力学的关系	7
1.3 能量的守恒要求	7
1.3.1 控制体积中的能量守恒	7
1.3.2 表面能量平衡	9
1.3.3 能量守恒定律的应用方法	10
1.4 传热问题的分析方法	10
1.5 传热学的重要性	11
1.6 单位和量纲	11
1.7 小结	13
习题	14
第二章 热传导引论	18
2.1 热传导速率方程	18
2.2 材料的热物性	20
2.2.1 导热系数	20
2.2.2 其它有关参数	22
2.3 热扩散方程	23
2.4 边界条件和初始条件	28
2.5 小结	30
参考文献	30
习题	31
第三章 一维稳态热传导	35
3.1 平壁	35
3.1.1 温度分布	35
3.1.2 热阻	36
3.1.3 复合壁	37
3.1.4 接触热阻	38
3.2 导热分析的另一种方法	40
3.3 径向系统	42

3.3.1 圆柱体	42
3.3.2 球体	45
3.4 具有内热源时的热扩散	47
3.4.1 平壁	47
3.4.2 径向系统	50
3.4.3 热阻概念的应用	53
3.5 延伸表面上的传热	53
3.5.1 延伸表面导热的一般分析	54
3.5.2 均匀横截面的肋片	55
3.5.3 肋片性能	58
3.6 小结	61
参考文献	61
习题	62
第四章 二维稳态热传导	71
4.1 可供选择的几种方法	71
4.2 图解法	72
4.2.1 画通量图的方法	72
4.2.2 传热速率的确定	73
4.2.3 热传导形状因子	73
4.3 电模拟	76
4.4 有限差分方程	77
4.4.1 节点网格	77
4.4.2 导热方程的有限差分形式	78
4.4.3 能量平衡法	78
4.5 有限差分的解	81
4.5.1 松弛法	81
4.5.2 高斯-塞德尔迭代法	84
4.5.3 矩阵求逆法	86
4.6 小结	87
参考文献	88
习题	88
第五章 瞬态热传导	95
5.1 集总热容法	95
5.2 集总热容法成立的条件	97
5.3 一般的求解方法	99
5.4 有对流表面条件的一维系统	100
5.5 半无限大固体	106
5.6 多维的影响	108
5.7 有限差分法	112
5.7.1 导热方程的离散化	112
5.7.2 能量平衡法	113
5.7.3 进一步的讨论	114

5.8	电模拟法	120
5.9	小结	122
	参考文献	122
	习题	123
第六章	对流引论	130
6.1	对流换热问题	130
6.2	对流边界层	133
6.2.1	速度边界层	133
6.2.2	热边界层	134
6.2.3	浓度边界层	135
6.2.4	边界层的重要意义	136
6.3	层流和湍流流动	137
6.4	对流传递方程	138
6.4.1	速度边界层	138
6.4.2	热边界层	141
6.4.3	浓度边界层	142
6.5	近似和特殊条件	146
6.6	边界层相似: 无量纲化的对流传递方程	148
6.6.1	边界层相似参数	148
6.6.2	解的函数形式	149
6.7	无量纲参数的物理意义	153
6.8	边界层类比	155
6.8.1	传热和传质的类比	155
6.8.2	蒸发冷却	158
6.8.3	雷诺类比	159
6.9	湍流的影响	160
6.10	对流系数	162
6.11	小结	162
	参考文献	163
	习题	163
第七章	外部流动	170
7.1	经验关系式的性质	170
7.2	平行流中的平板	172
7.2.1	层流流动	172
7.2.2	湍流流动	173
7.2.3	混合边界层条件	174
7.3	对流计算的方法	175
7.4	横向流动中的圆柱体	180
7.4.1	流动条件	180
7.4.2	对流传热和传质	181
7.5	圆球	186
7.6	横向流过管簇	187

7.7	堆积床	193
7.8	小结	193
	参考文献	195
	习题	196
第八章 内部流动		202
8.1	流体动力学的问题	202
8.1.1	流动条件	202
8.1.2	平均速度	203
8.1.3	充分开展区的速度分布	203
8.1.4	充分开展流动的压力梯度和摩擦因子	204
8.2	热的问题	206
8.2.1	平均温度	207
8.2.2	牛顿冷却定律	207
8.2.3	充分开展的条件	207
8.3	能量平衡	210
8.3.1	一般的讨论	210
8.3.2	等表面热流密度	212
8.3.3	等表面温度	214
8.4	对流关系式: 圆管内的层流流动	215
8.4.1	充分开展区	215
8.4.2	入口段	218
8.5	对流关系式: 圆管内的湍流流动	219
8.6	对流关系式: 非圆形管	222
8.7	同心管套	222
8.8	对流传质	224
8.9	小结	225
	参考文献	227
	习题	227
第九章 自然对流		233
9.1	物理机理的讨论	233
9.2	控制方程	235
9.3	相似性的讨论	236
9.4	垂直表面上的层流自然对流	237
9.5	湍流的影响	239
9.6	经验关系式: 外部的自然对流流动	240
9.6.1	竖板	241
9.6.2	水平板	242
9.6.3	倾斜平板	244
9.6.4	长的水平圆柱	244
9.6.5	圆球	245
9.7	经验关系式: 封闭空间	246
9.7.1	矩形腔体	246

9.7.2	同心的圆柱	248
9.7.3	同心的圆球	248
9.8	混合的自然对流和强迫对流	250
9.8.1	垂直平板和水平平板	250
9.8.2	水平的圆柱和圆球	250
9.8.3	管内流动	250
9.9	对流传质	251
9.10	小结	251
	参考文献	251
	习题	253
第十章	沸腾和凝结	257
10.1	沸腾的物理机理	257
10.2	沸腾关系式	260
10.2.1	核态池内沸腾	260
10.2.2	核态池内沸腾的临界热流密度	261
10.2.3	膜态池内沸腾	263
10.2.4	强迫对流沸腾	264
10.3	凝结的物理机理	265
10.4	垂直板上的层流膜状凝结	266
10.5	湍流膜状凝结	269
10.6	水平管和水平管簇上的膜状凝结	271
10.7	水平管内的膜状凝结	272
10.8	小结	272
	参考文献	273
	习题	274
第十一章	换热器	276
11.1	换热器的类型	276
11.2	总传热系数	278
11.3	换热器分析: 利用对数平均温差	279
11.3.1	顺流换热器	280
11.3.2	逆流换热器	281
11.3.3	特定的运行条件	282
11.3.4	多流程和叉流换热器	282
11.4	换热器分析: 有效度-NTU法	288
11.4.1	定义	288
11.4.2	有效度-NTU之间的关系	289
11.5	换热器计算的方法	292
11.6	小结	295
	参考文献	296
	习题	296
第十二章	辐射: 过程和性质	299
12.1	基本概念	299