

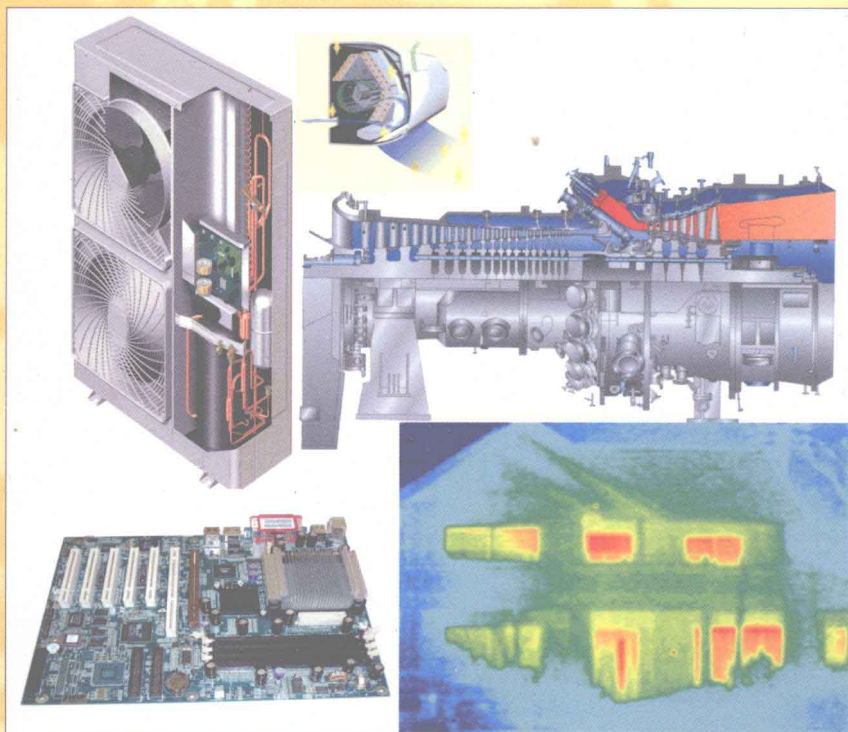


日本機械学会 JSMEテキストシリーズ 伝熱工学
机械工程类专业系列教材

传热学

Heat Transfer

(日) 圆山重直 主编
王世学 张信荣 等编译



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

机械工程类专业系列教材

传 热 学

〔日〕圆山重直 主编
王世学 张信荣 等 编译



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记号 图字：01-2009-2514 号

图书在版编目(CIP)数据

传热学 / (日) 圆山重直主编; 王世学等编译. —北京: 北京大学出版社, 2011.9

(机械工程类专业系列教材)

ISBN 978-7-301-19529-1

I. ①传… II. ①圆…②王… III. ①传热学—高等学校—教材 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 191752 号

©日本機械学会 2005 JSMEテキストシリーズ 伝熱工学

原出版社の文書による許諾なくして、本書の全部または一部を、 photocopy、イメージスキャナ等により複写・複製したり、或いはデータベースへ情報として蓄積し、検索システムを含む電氣的・機械的、その他いかなる手段・形態によっても、複製したり送信したりしてはならない。

©北京大学出版社 2011 JSME 教科书系列 传热学

本书(《JSME 教科书系列 传热学》(2005))经日本机械学会(日本・东京新宿区)的授权, 由北京大学出版社编译出版。

书 名: 传热学

著作责任者: [日] 圆山重直 主编 王世学 张信荣 等 编译

策 划 编 辑: 胡伟晔

责 任 编 辑: 胡伟晔

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-19529-1/TH·0269

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电 子 信 箱: zyjy@pup.cn, huweiye73@sina.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 出版部 62754962 编辑部 62767349

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

889 毫米×1194 毫米 大 16 开本 17.25 印张 518 千字

2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

能量、热量单位换算

kJ	kcal	kgf · m	kW · h	Btu
1	0.2388459	0.101972	1/3 600	0.9478170
4.186 8	1	0.426 936	$1.163\,00\times 10^{-3}$	3.968 320
9.806 65	2.342 28	1	$2.724\,07\times 10^{-3}$	9.294 89
3 600	859.845 2	367.097 8	1	3 412.141
1.055 056	0.2519958	0.107 586	$2.930\,711\times 10^{-4}$	1

1 J = 1 N · m = 1 W · s = 10^7 erg

传热量、功率单位换算

W	kgf · m/s	PS	ft · lbf/s
1	0.1019716	$1.359\,622\times 10^3$	0.737 562 1
9.806 65	1	1/75	7.233 014
735.498 8	75	1	542.476 0
1.355 818	0.138 255 0	$1.843\,399\times 10^{-3}$	1

1 W = 1 J/s = 1 N · m/s

PS: 米制马力

温度单位换算

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$$

$$t_{\text{F}}(^{\circ}\text{F}) = 1.8t(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$t_{\text{F}}(^{\circ}\text{F}) = T_{\text{F}}(^{\circ}\text{R}) - 459.67$$

$$T_{\text{F}}(^{\circ}\text{R}) = 1.8T(\text{K})$$

长度单位换算

m	mm	ft	in
1	1 000	3.280 840	39.370 08
10^{-3}	1	$3.280\,840\times 10^{-3}$	$39.370\,08\times 10^{-2}$
0.304 8	304.8	1	12
0.025 4	25.4	1/12	1

面积单位换算

m^2	cm^2	ft^2	in^2
1	10^4	10.763 91	1 550.003
10^{-4}	1	$1.076\,391\times 10^{-5}$	0.155 000 3
$9.290\,304\times 10^{-2}$	929.030 4	1	144
$6.451\,6\times 10^{-4}$	6.451 6	1/144	1

体积单位换算

m^3	cm^3	ft^3	in^3	L	备 注
1	10^6	35.314 67	$6.102\,374\times 10^4$	1 000	英制加仑:
10^{-6}	1	$3.531\,467\times 10^{-5}$	$6.102\,374\times 10^{-2}$	10^{-3}	1 m^3 = 219.969 2 gal (UK)
$2.831\,685\times 10^{-2}$	$2.831\,685\times 10^4$	1	1 728	28.316 85	米制加仑:
$1.638\,706\times 10^{-5}$	16.387 06	1/1 728	1	$1.638\,706\times 10^{-2}$	1 m^3 = 264.172 0 gal (US)
10^{-3}	10^3	$3.531\,467\times 10^{-2}$	61.023 74	1	

压力单位换算

Pa ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	bar	atm	Torr (mmHg)	$\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$	psi ($\text{lbf} \cdot \text{in}^{-2}$)
1	10^{-5}	$9.869\,23\times 10^{-6}$	$7.500\,62\times 10^{-3}$	$1.019\,72\times 10^{-5}$	$1.450\,38\times 10^{-4}$
10^5	1	0.986 923	750.062	1.019 72	14.503 8
1.01325×10^5	1.013 25	1	760	1.033 23	14.696 0
133.322	$1.333\,22\times 10^{-3}$	$1.315\,79\times 10^{-3}$	1	$1.359\,51\times 10^{-3}$	$1.933\,68\times 10^{-2}$
$9.806\,65\times 10^4$	0.980 665	0.967 841	735.559	1	14.223 4
$6.894\,75\times 10^3$	$6.894\,75\times 10^{-2}$	$6.804\,59\times 10^{-2}$	51.714 9	$7.030\,69\times 10^{-2}$	1

内 容 简 介

本书是日本机械工程学会(JSME)为了提高机械类高校学生的基础知识水平并考虑适应工程技术人员国际教育认定制度而编写的系列教材之一,在日本国内深受欢迎。其内容包括热传导、对流、辐射、物质传递以及换热器等基础知识和最新进展,且编写中充分考虑各类读者的不同需求,读者可根据需要选择其部分或全部内容学习。

本书可作为高等学校机械类的本科生和研究生作为教材或辅助教材使用,也可供相关工程技术人员参考。

《机械工程类专业系列教材》 编译委员会

指导委员:(按姓氏音序排列)

过增元(清华大学)
何雅玲(西安交通大学)
梁新刚(清华大学)
廖 强(重庆大学)
刘 伟(武汉理工大学)
王如竹(上海交通大学)
严俊杰(西安交通大学)
张 兴(清华大学)

出版委员:(按姓氏音序排列)

白 皓(北京科技大学)
戴传山(天津大学)
李凤臣(哈尔滨工业大学)
汪双凤(华南理工大学)
王 迅(天津大学)
王世学(天津大学)
魏进家(西安交通大学)
张 鹏(上海交通大学)
张信荣(北京大学)

《JSME 机械工程类系列教材》

出版委员会

主席	宇高义郎	(横滨国立大学)		
干事	高田一	(横滨国立大学)		
顾问	铃木浩平	(首都大学东京)		
委员	石棉良三	(神奈川工科大学)	西尾茂文	(东京大学)
	远藤顺一	(神奈川工科大学)	花村克悟	(东京工业大学)
	加藤典彦	(三重大学)	原利昭	(新潟大学)
	川田宏之	(早稻田大学)	北条春夫	(东京工业大学)
	喜多村直	(九州工业大学)	松冈信一	(富山县立大学)
	木村康治	(东京工业大学)	松野文俊	(电气通信大学)
	后藤彰	(荏原综合研究所)	圆山重直	(日本东北大学)
	志泽一之	(庆应义塾大学)	三浦秀士	(九州大学)
	清水伸二	(上智大学)	三井公之	(庆应义塾大学)
	新野秀宪	(东京工业大学)	水口义久	(山梨大学)
	杉本浩一	(东京工业大学)	村田良义	(明治大学)
	武田行生	(东京工业大学)	森田信义	(静冈大学)
	陈玳珩	(东京理工大学)	森栋隆昭	(湘南工科大学)
	辻知章	(中央大学)	汤浅荣二	(武藏工业大学)
	中村元	(防卫大学校)	吉泽正绍	(庆应义塾大学)
	中村仁彦	(东京大学)		

JSME 系列教材之《热力学》和《传热学》中文版序

当今世界全球化发展极为迅猛,无论是政治与经济,还是科学技术与文化等国际间的交流日益紧密,与此相伴随的是信息、资金、技术与人才的跨国界流动。尤其是人才的国际化对提高我国的改革开放水平,提升我国的国际竞争力,促进我国国民经济和科学技术的发展无疑是至关重要的。为适应此国际化的需求,我国的一些重点高校已将人才的国际化培养作为一项重要工作列入学校的中长期发展规划。就人才的国际化培养来讲,向国外派遣留学生和接受外国留学生,或者请外籍教师来华授课和派教师到国外讲学仅仅是一种手段或曰形式,其实质是要求我们培养的学生和国际上主要国家的同类学生相比具有同等的知识水平和解决问题的能力。如何认定学生是否具备了这种水平和能力,或者是通过考试(如,美国工程基础能力检定考试(FE)等),或者是考查其所受教育的课程体系与内容。前者主要是针对作为个体的学生,而后者主要是针对作为教育机构的学校。

为应对国际标准的技术人员教育认定制度,日本在 1999 年成立了“日本技术者教育认定机构”(JABEE),其与各类科学技术协会密切合作,进行技术人员教育制度的审查和认定,通过加入华盛顿协议(Washington Accord, 1989.11)实现了与欧美主要国家间的相互承认,为日本的人才走向世界打开了大门。为了配合技术教育认定,日本各高校在课程设置和教材选用上都作了改革。因此需要一套与国际标准接轨,有目的地对大学本科生进行专门教育的教科书。在此背景下,日本机械工程学会编辑和出版了《JSME 系列教材》。教材的编者队伍汇集了日本国内各相关领域的著名学者,实力雄厚。该系列教材可谓集大家之成,出版以来深受欢迎,其《热力学》一书销量已突破 43 000 册,在版本林立的工科专业课教材中堪称奇迹。

这样一套教科书对于正在全面进行工程教育改革,提升国际化水平的我国高等工程教育来说应是极具参考价值的。为此,北京大学出版社与 JSME 协商,组织了本系列教材的中文版出版工作。编译工作由北京大学、天津大学等高校教师完成,编译者均有长期在日工作的经历且在各自专业领域多有建树。非常高兴看到年轻的学者在引进国外优秀教材方面作出积极努力,有理由相信本系列教材中文版的出版一定会有助于我国的工程教育人才的国际化培养,促进我国的高等工程教育的国际化认证工作发展。

以上一点感想聊以为序。

过增元
2011 年 7 月

序 言

《JSME 系列教材》是针对大学本科生的,以机械工程学入门必修课内容为出发点,涵盖机械工程学的基本内容,并涉足技术人员认定制度所发行的教科书。

自 1988 年日本出版事业相关规定修改以后,日本机械工程学会得以直接编辑并出版发行教科书,但系统地囊括机械工程学各个领域的书籍至今未有出版。这是因为已有大量的同类书籍出版,如本会所出版的《机械工程学便览》、《机械实用便览》等在机械学中都可以作为教材、辅助教材来使用。然而,随着全球化的发展,技术人员认证系统的重要性愈加突出,因此与国际标准接轨,有目的地对大学本科生进行专门教育等,本科教育环境急剧变化,与此对应的各个大学进行了教育内容方面的改革,也产生了出版与之相应的教科书的需求。

在这种背景下,我们策划出版了本系列教材,其特点如下。

(1) 此系列教材是日本机械工程学会为在大学中示范机械工程学教育标准而编写的教科书。

(2) 有助于在机械工程学教育中保持从入门到作为必修科目的学习连贯性,提高大学本科生的基础知识能力。

(3) 考虑到应对国际标准的技术人员教育认定制度[日本技术人员教育认定机构(JABEE)]、技术人员认证制度[美国工程基础能力检定考试(FE),技术人员一次性考试等],在各教材中引入相关的技术英语。

此外,在编辑、执笔过程中,为实现上述特点,采取了以下措施。

(1) 采用了较多的编写者共同商议式的策划与实施。

(2) 集结了各领域的全部力量,尽可能地优质低价出版。

(3) 在页面的一侧使用图表、双色印刷等以方便阅读。

(4) 参考美国的 FE 考试[工程学基础能力检定考试(Fundamentals of Engineering Examination)]习题集,设置了英语习题。

(5) 配合各教科书出版了相应的习题集。

本出版分科委员会特别注意致力于编辑、校正工作,努力发行具有学会特色的优质书籍。具体来说,各领域的出版分科委员会以及编写小组都采用集体负责制,实施多数人商议校正制度,在最后由各领域资深校阅者负责校正工作。

经过所有同人的共同努力,本系列教材得以成功出版。在此,向为出版出谋划策的出版事业全会、编撰理事,出版分科委员会的各位委员,承担出版、策划、实施及最终定稿的各领域出版分科委员会的各位委员,特别是在短时间内按照教科书的特点在形式上进行修改直至最终定稿的各位编者,再次表达诚挚的谢意。此外,向本会出版集团积极担当出版业务的各位同人真诚致谢。

本系列教材若能有助于提高机械工程类学生的基础知识与能力,同时被更多的大学作为教材使用,为技术人员教育贡献绵薄之力,将会是我们的荣幸。

社团法人:日本机械工程学会

JSME 系列教材出版分科会

主任:宇高义郎

2002 年 6 月

前 言

“传热学”是一门论述热量传递方式和传递速度的基础科学,它不仅是从事机械工程设计所必需的,也是我们理解身边各种物理现象所需要的一门基础科学。

日本机械工程学会(JSME)为了提高机械类高校学生的基础知识水平,考虑到国际标准的技术工作者教育认定制度(日本 JABEE,美国 FE)的要求,并从学会的角度展示一个机械工程类的大学教育标准,成立了一个由横滨国立大学 Utaka Yoshio 教授为主任的教科书出版委员会,负责组织编写和出版机械工程类本科生用系列教科书,并于 2002 年开始陆续出版了《热力学》《传热学》《流体力学》等。该系列教材的主要特点是:

- (1) 编者众多且皆为在各自研究领域有所成就的专家;
- (2) 内容为众多编者反复讨论而最终成稿;
- (3) 图表配置在相应页的边缘部分并采用双色印刷以便于阅读;
- (4) 主要专业术语均有英文注解并配有颜色突出显示,从而重点突出易于学习;
- (5) 参考美国的 FE 考试(Fundamentals of Engineering Examination),习题集采用了部分英语习题。

该系列已出版的各教材在日本国内广受欢迎,其中《热力学》一书已 6 次印刷,累计发行 43 000 册。

2007 年该系列教科书《热力学》和《传热学》的主编日本东北大学 Shigenao Maruyama 教授同北京大学教授张信荣博士讨论了将《热力学》一书编译成中文版的问题。另外,2008 年初 Yoshio Utaka 教授又向天津大学教授王世学博士建议将该系列教材介绍给中国读者。其后经各方协商决定成立一个编译委员会编译该系列教材并由北京大学出版社统一予以出版。由于原教材是面向日本国内的,为适应中国高校的教学特点和方便中国读者的学习和理解,编译者征得 JSME 的同意在编译过程中对原书的部分内容略做了修订。

本书由张信荣和王世学组织编译及校订。第 1 章由北京大学张信荣,第 2 章由天津大学王迅,第 3 章由哈尔滨工业大学李凤臣,第 4 章由北京科技大学白皓,第 5 章由上海交通大学张鹏,第 6 章由西安交通大学魏进家,第 7 章由天津大学戴传山,第 8 章由华南理工大学汪双凤等翻译。全书由王世学校对。

在本书的编译过程中,日本机械工程学会教科书出版委员会及 Shigenao Maruyama 教授、Yoshio Utaka 教授给予了大力支持和帮助,在此我们表示衷心的感谢。

另外,我们还要感谢北京大学出版社的大力支持和帮助。

编译委员会
2010 年 10 月

《传热学》前言

传热学作为研究热量的传递形态与传递速度的理论,对于学习机械工程学的学生来说是不可或缺的。此外,传热学不仅对于机器设计,而且对于理解身边的常见现象来说也是一门非常实用的学问。

在本书的编写过程中,始终坚持以下方针:

- 以学习机械学的本科学生为主要对象。
- 大量采用简单易懂的图表、机械模式图,方便工程学的学习者理解掌握。
- 网罗传热以及物质移动的所有基本内容,努力成为传热学的教材典范。
- 并不是基本信息的简单罗列,而是可以通过此书加深对传热的基本现象的理解。
- 也可以作为设计实际机器的技术人员和研究生的参考书目使用。

在本书中,有一些内容对于本科生来说较难理解,因此没有必要完全掌握。关于对本科生授课的使用方法,将在 1.2 节中进行叙述。

编写中,本书引入了一些新的尝试。比如,迄今为止传热学教材尚未涉足的对传热现象的微观理解及其与热力学的关联性、基于实际机器的叙述和英语习题等。另外,在第 8 章中,就日本学生以及技术人员不擅长的传热现象模型化与实际机器设计的应用案例进行了论述。

我们努力为读者提供优质服务,在出版后发现的排版错误刊登在了 <http://www.jsme.or.jp/txt-errata.htm>。若对本书内容有任何疑问或意见,请发邮件至 textseries@jsme.or.jp。

在本书编撰过程中,编者们通过多次讨论对内容进行了调整。编撰原稿除了由综合校阅人员对内容进行校正之外,还承蒙多位著名的传热学研究者提供了宝贵意见。编者于百忙之中花费了大量时间与精力进行编写,并且召开了多次编者会议。在此向编写者研究室成员,以及为本书的编写、校正提供帮助的各位友人致以诚挚的感谢。

JSME 系列教材出版分科委员会

《传热学》教材

主编 圆山重直

2005 年 1 月

----- 传热学 编者、出版分科委员会委员 -----		
编者	青木和夫 (长冈技术科学大学)	第 2 章
编者	石塚 胜 (富山县立大学)	第 7 章,第 8 章
编者	佐藤 勋 (东京工业大学)	第 7 章,第 8 章
编者	高田保之 (九州大学)	第 5 章,第 8 章
编者	高松 洋 (九州大学)	第 6 章
编者	中山 显 (静冈大学)	第 3 章
编者・委员	花村克悟 (东京工业大学)	第 4 章,索引
编者・委员	圆山重直 (日本东北大学)	第 1 章,第 2 章,第 8 章
编者	山田雅彦 (北海道大学)	第 5 章
综合校阅者	庄司正弘 (产业技术综合研究所)	

目 录

第 1 章 概论(Introduction)	1
1.1 传热学的意义 (significance of heat transfer)	1
1.2 本书的使用方法 (how to use this book)	4
1.3 传热的定义 (what is heat transfer?)	5
1.4 热量传递及其方式 (thermal energy transport and its modes)	6
1.4.1 传热方式 (modes of thermal energy transport)	6
1.4.2 热传导 (conductive heat transfer)	7
1.4.3 对流换热 (convective heat transfer)	8
1.4.4 辐射换热 (radiative heat transfer)	10
1.5 单位与单位制 (unit and system of units)	11
1.5.1 SI (The International System of Units)	11
1.5.2 SI 之外的单位制 (other system of units)	12
*1.6 传热的微观理解 (microscopic understanding of heat transfer)	14
*1.6.1 内能 (internal energy)	14
*1.6.2 微观能量的传播 (transfer of microscopic energy)	14
1.7 热力学与传热的关系	
(relation between thermodynamics and heat transfer)	15
1.7.1 闭口系统 (closed system)	15
1.7.2 开口系统 (open system)	16
1.7.3 边界面的能量平衡 (energy balance at the boundary surface)	18
*1.7.4 传热与热力学第二定律的关系 (relation	
between the second law of thermodynamics and heat transfer)	19
第 2 章 热传导(Conductive Heat Transfer)	23
2.1 导热基础 (basic of heat conduction)	23
2.1.1 傅里叶定律 (Fourier's law)	23
2.1.2 导热系数 (thermal conductivity)	23
2.1.3 导热方程 (heat conduction equation)	25
2.1.4 边界条件 (boundary condition)	26
2.1.5 导热方程的无量纲化	
(dimensionless form of heat conduction equation)	27
2.2 稳态导热 (steady-state conduction)	28

2.2.1	平板的稳态导热 (steady-state conduction through plane wall)	28
2.2.2	圆筒壁和球壳的稳态导热 (Steady-state conduction through cylinder and sphere)	33
2.2.3	扩展的传热面 (heat transfer from extended surfaces)	35
2.3	非稳态导热 (unsteady-state conduction)	38
2.3.1	瞬态导热 (transient conduction)	38
2.3.2	集总热容法模型 (lumped capacitance model)	39
2.3.3	半无限大物体 (semi-infinite solid)	40
2.3.4	平板 (plane wall)	43
2.3.5	瞬态导热的简化算法 (estimation of transient conduction)	46
2.3.6	使用有限差分法的数值解法 (numerical solution by finite difference method)	48
第3章	对流换热 (Convective Heat Transfer)	55
3.1	对流换热概述 (introduction to convective heat transfer)	55
3.1.1	身边的对流换热 (convective heat transfer around us)	55
3.1.2	层流与湍流 (laminar flow and turbulent flow)	56
3.1.3	传热系数与边界层 (heat transfer coefficient and boundary layer)	56
3.2	对流换热基本方程组 (governing equations for convective heat transfer)	57
*3.2.1	连续性方程 (equation of continuity)	57
*3.2.2	纳维-斯托克斯方程 (Navier-Stokes equation)	58
*3.2.3	能量方程 (energy equation)	59
3.2.4	不可压缩流体的基本方程组 (governing equations for incompressible flow)	61
3.2.5	边界层近似与无量纲数 (boundary layer approximation and dimensionless numbers)	63
3.3	管内流动的层流强迫对流 (laminar forced convection in conduits)	67
3.3.1	充分发展流动 (fully-developed flow)	68
3.3.2	充分发展的温度场 (fully-developed temperature field)	69
3.3.3	等热流密度壁面加热下的充分发展温度场 (fully-developed temperature field for the case of constant wall heat flux)	70
3.3.4	等壁温加热下的充分发展温度场 (fully-developed temperature field for the case of constant wall temperature)	72
3.3.5	温度入口段的对流换热 (convective heat transfer within a thermal entrance region)	73

3.4 物体绕流的层流强迫对流换热 (laminar forced convection from a body)	75
3.4.1 水平平板绕流的层流强迫对流换热 (laminar forced convection from a flat plate at zero incidence)	75
3.4.2 任意形状物体绕流的层流强迫对流换热 (laminar forced convection from a body of arbitrary shape)	77
3.5 湍流对流换热概述 (introduction to turbulent convective heat transfer)	79
3.5.1 湍流的特征 (distinctive features of turbulence)	79
*3.5.2 雷诺平均 (Reynolds averaging)	81
3.6 湍流强迫对流换热 (turbulent forced convective heat transfer)	82
3.6.1 圆管内湍流强迫对流 (turbulent forced convection in a circular tube) ...	82
3.6.2 平板湍流强迫对流 (turbulent forced convection from a flat plate)	84
3.6.3 强迫对流的实验关联式 (correlations for forced convection)	85
3.7 自然对流换热 (natural convective heat transfer)	87
3.7.1 布辛涅斯克近似及基本方程组 (Boussinesq approximation and governing equations)	87
3.7.2 垂直平板附近的层流自然对流 (laminar natural convection from a vertical flat plate)	88
3.7.3 垂直平板附近的湍流自然对流 (turbulent natural convection from a vertical flat plate)	91
3.7.4 自然对流的经验关系式 (empirical correlations for natural convection)	91
第4章 辐射传热 (Radiative Heat Transfer)	99
4.1 辐射传热的基本过程 (fundamentals of radiative heat transfer)	99
4.1.1 传热的三种方式——传导、对流、辐射 (three modes of heat transfer: conduction, convection and radiation) ...	99
4.1.2 何谓辐射 (what is radiation?)	99
*4.1.3 辐射的放射机理 (emission mechanism of radiation)	100
4.1.4 导热和辐射的传热机理 (heat transfer mechanisms of conduction and radiation)	100
4.1.5 辐射的反射、吸收和透过 (reflection, absorption and transmission of radiation)	101
4.2 黑体辐射 (blackbody radiation)	101
4.2.1 普朗克定律 (Planck's law)	102
*4.2.2 普朗克定律的导出 (derivation of Planck's law)	103
4.2.3 维恩位移定律 (Wien's displacement law)	105
4.2.4 斯忒藩-玻尔兹曼定律 (Stefan-Boltzmann's law)	105

4.2.5 黑体辐射比率 (fraction of blackbody emissive power)	106
4.3 真实表面的辐射特性 (radiation properties of real surfaces)	107
4.3.1 放射率和基尔霍夫定律 (emissivity and Kirchhoff's law)	107
4.3.2 黑体、灰体和非灰体 (blackbody, gray body and nongray body)	108
4.3.3 真实表面的发射率 (emissivity of real surfaces)	108
4.3.4 真实表面的全发射率、全吸收率、全反射率和半球发射率 (total and hemispherical emissivity, total absorptivity and total reflectivity of real surfaces)	109
4.4 辐射换热基础 (fundamentals of radiative heat exchange)	110
4.4.1 平行表面间的辐射换热 (radiative heat exchange between parallel surfaces)	110
4.4.2 辐射强度 (radiation intensity)	111
4.4.3 物体表面间的角系数 (view factor between black surfaces)	112
4.5 黑体表面间以及灰体表面间的辐射传热 (radiative heat transfer between black and/or gray surfaces)	114
4.5.1 黑体表面构成的封闭空间内的辐射传热 (radiative heat transfer between enclosed multiple black surfaces)	114
4.5.2 灰体表面构成的封闭空间的辐射传热 (radiative heat transfer between enclosed multiple gray surfaces)	115
4.6 气体辐射 (gaseous radiation)	117
4.6.1 气体辐射的吸收、发射机理 (mechanism of absorption and emission of radiation by gases)	117
4.6.2 气体层的辐射吸收 (比尔定律) (absorption of radiation by gaseous layer; Beer's law)	118
4.6.3 气体辐射及其发射率 (emission of radiation from gaseous layer and emissivity)	118
4.6.4 实际气体的发射率和吸收率 (emittance and absorptance of real gases)	120
4.6.5 含实际气体的辐射传热 (radiative heat exchange including real gases)	120
第5章 相变传热 (Heat Transfer with Phase Change)	123
5.1 相变和传热 (phase change and heat transfer)	123
5.2 相变热力学 (thermodynamics for phase change)	124
5.2.1 物质的相和相平衡 (phase of substance and phase equilibrium)	124
5.2.2 过热度 and 过冷度 (degrees of superheating and subcooling)	125
5.2.3 表面张力 (surface tension)	126

5.3 沸腾换热的特征(characteristic of boiling heat transfer)	128
5.3.1 沸腾的分类(classification of boiling)	128
5.3.2 沸腾曲线(boiling curve)	128
5.3.3 影响沸腾传热的主要因素 (dominant parameters influencing boiling heat transfer)	130
5.4 核态沸腾(nucleate boiling)	130
*5.4.1 气泡的生长与脱离(bubble formation and departure)	130
5.4.2 核态沸腾传热机理(mechanism of nucleate boiling heat transfer)	134
5.4.3 核态沸腾的关联式(correlation of nucleate boiling heat transfer)	135
5.5 池沸腾的临界热流密度(critical heat flux in pool boiling)	137
5.6 膜态沸腾(film boiling)	137
5.7 流动沸腾(flow boiling)	141
5.7.1 气液两相流动形态(two-phase flow pattern)	141
5.7.2 管内沸腾传热(flow boiling heat transfer in tube)	142
5.8 凝结换热(heat transfer with condensation)	143
5.8.1 凝结的分类和机理(classification and mechanism of condensation)	143
5.8.2 层流膜状凝结理论(theory of laminar film-wise condensation)	144
5.8.3 努塞尔理论解析(Nusselt's analysis)	145
5.8.4 水平圆管表面的膜状凝结 (film-wise condensation on a horizontal cooled tube)	149
5.8.5 管束的膜状凝结 (film-wise condensation on a bundle of horizontal cooled tubes)	150
5.8.6 不凝性气体和凝结气体混合的情况(condensation of a mixture of non-condensing gas and condensing gas)	151
5.8.7 滴状凝结(drop-wise condensation)	152
5.8.8 滴状凝结的影响因素(dominant factor to drop-wise condensation)	152
5.9 熔解、凝固传热(heat transfer with melting and solidification)	153
5.10 其他的相变和传热(other phase change and heat transfer)	157
第6章 传质(Mass Transfer)	161
6.1 混合物与传质(mixture and mass transfer)	161
6.1.1 什么是传质(what is mass transfer?)	161
6.1.2 传质物理(physics of mass transfer)	161
6.1.3 浓度的定义(definition of concentrations)	162
6.1.4 速度和流率的定义(definitions of velocities and fluxes)	163
6.2 物质扩散(diffusion mass transfer)	165
6.2.1 费克扩散定律(Fick's law of diffusion)	165

6.2.2 扩散系数 (diffusion coefficient)	166
6.3 传质控制方程 (governing equations of mass transfer)	166
6.3.1 组分守恒 (conservation of species)	166
6.3.2 边界条件 (boundary conditions)	168
6.4 物质扩散举例 (examples of mass diffusion)	169
6.4.1 静止介质中的稳态扩散 (steady-state diffusion in a stationary medium)	169
6.4.2 静止气体中的单向扩散 (diffusion through a stagnant gas column)	171
6.4.3 伴随均质化学反应的扩散 (diffusion with homogeneous chemical reactions)	173
6.4.4 向下降液膜中的扩散 (diffusion into a falling liquid film)	174
6.4.5 非稳态扩散 (transient diffusion)	175
6.5 对流传质 (convective mass transfer)	176
6.5.1 传质系数 (mass transfer coefficient)	176
6.5.2 对流传质中的重要参数 (significant parameters in convective mass transfer)	177
6.6 热质传递的耦合作用 (coupling effect of heat and mass transfer)	180
第7章 传热的应用与换热设备 (Applications of Heat Transfer and Heat Transfer Equipments)	183
7.1 换热器的基本理论 (fundamentals of heat exchangers)	183
7.1.1 总传热系数 (overall heat transfer coefficient)	183
7.1.2 基于热交换的流体温度变化 (temperature change of fluids due to heat exchange)	184
7.1.3 对数平均温差 (logarithmic-mean temperature difference)	185
7.1.4 实际换热器及其特点 (practical heat exchangers and their features) ...	186
7.2 换热器的设计方法 (design of heat exchangers)	188
7.2.1 换热器的性能 (characteristics of heat exchangers)	188
7.2.2 换热器设计 (heat exchanger design)	191
7.2.3 换热器性能的变化 (characteristic change of heat exchangers)	194
7.3 设备的冷却 (cooling of equipments)	195
7.3.1 热设计的必要性 (necessity of thermal design)	195
7.3.2 热阻 (thermal resistance)	195
7.3.3 空冷技术 (air-cooling technology)	197
7.3.4 液体冷却 (liquid cooling)	199
7.4 绝热技术 (insulation technology)	200
7.4.1 绝热材料 (insulation material)	200