



国外优秀科技著作出版专项基金资助

国外名校名著



传递现象

Transport Phenomena

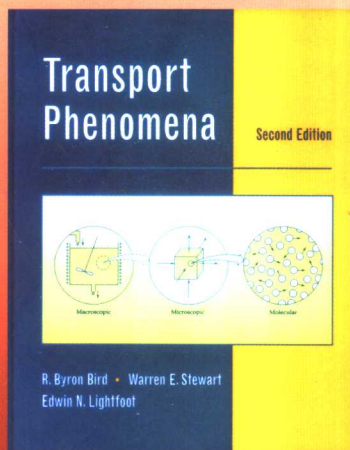
(原著第二版)

R. B. 博德

[美] W. E. 斯图沃特 著

E. N. 莱特富特

戴干策 戎顺熙 石炎福 译



化学工业出版社

国外优秀科技著作出版专项基金资助
国外名校名著

传递现象

(原著第二版)

R. B. 博德

[美] W. E. 斯图沃特 著

E. N. 莱特富特

戴干策 戎顺熙 石炎福 译

 化学工业出版社

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

传递现象/[美]博德(Bird, R. B.), [美]斯图沃特(Steuart, W. E.), [美]莱特富特(Lightfoot, E. N.)著; 戴干策, 戎顺熙, 石炎福译. —北京: 化学工业出版社, 2004. 10

(国外名校名著)

书名原文: Transport Phenomena

ISBN 7-5025-5756-3

I. 传… II. ①博…②斯…③莱…④戴…⑤戎…
⑥石… III. 传递-研究 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 059538 号

TRANSPORT PHENOMENA, Second Edition/by R. Byron Bird

ISBN 0-471-41077-2

Copyright ©2002 by 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 出版公司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。

本书封面贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2003-2854

国外名校名著

传递现象

(原著第二版)

R. B. 博德

[美] W. E. 斯图沃特 著

E. N. 莱特富特

戴干策 戎顺熙 石炎福 译

责任编辑 何 丽

文字编辑 魏 婷

责任校对: 蒋 予

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话 (010) 64982530

http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 53 字数 1322 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5756-3/G·1526

定 价: 96.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

原著前言

动量、热量和质量传递作为经典物理学的分支各自独立地发展,已有很长时间,可是,对它们的统一研究已使其具有基本工程科学之一的地位。这种发展还不到半个世纪,仍在持续发展,并在生物技术、微电子、纳米技术和聚合物科学等诸多新领域中获得应用。

传递现象进展得如此迅速,范围宽广,要做到完整无缺的阐述是不可能的。虽然本书已经包括许多代表性的实例,但主要还只能侧重本学科的基本方面。而且,在与同事们的讨论中发现,传递现象教学有多种方式和不同层次。本书已经包括足够的内容,可用于两门课程:传递导论和高等传递原理。而基本课程则又可分为一门动量传递课程和另一门热量和质量传递课程,从而得以有更多的机会表明这些内容在实际中的应用。有些节标以($^{\circ}$)表示选修课程,而另外一些节标($^{\bullet}$)表示高等部分,这样标明对学生和教师都是有益的。

长期以来,传递现象似乎被认为是数学学科,其实是因其物理意义而显得最为重要。这一学科的实质是,仔细而简洁地结合通量表达式论述守恒原理,并强调三种传递过程间的类似与差别。对特定问题,仔细考察边界条件以及物理性质,常常可以费力最少而获得有益的理解。可是传递现象的语言是数学,在本书中我们设想,读者已熟悉常微分方程和基本矢量分析。我们使用了偏微分方程,并做了充分的解释,使有兴趣的学生可以掌握这些内容。数值技术尽管很重要还是暂时搁置,以便集中于基本原理的理解。

全书特别关注对文献的引用,既是为了将传递现象放在适当的历史位置,也是为了引导读者进一步拓宽基础和加强应用。我们特别渴望介绍那些使我们获益良多的先驱,我们仍能从他们那里获得有益的启示。这些人起初与我们并无太多差别,这样或许能使某些读者受到启示而做出类似的贡献。

显然,自从40多年前写出第一版以来,不仅读者的需求而且可资他们利用的工具已经大大改变。我们已经在篇幅和能力所及的条件下,做出重大的努力以使本书拥有最新资料,我们一直力图能有进一步的发展。与第一版相比,主要的变化包括:

- 两相系统的传递性质
- 用组合通量建立薄壳衡算和变化方程
- 角动量守恒及其推论
- 机械能衡算的完整推导
- 扩展论述边界层理论
- 泰勒离散
- 改进湍流传递的讨论
- 高 Pr 和 Sc 时湍流传递的 Fourier 分析
- 加强传热、传质系数的论述
- 增强量纲分析及比例法的讨论
- 多组分质量传递的矩阵方法
- 离子系统、膜分离与多孔介质

• Boltzman 方程与连续介质方程之间的关系

• 能量讨论中使用“ $Q+W$ ”惯例，与物理和物理化学方面主要的教科书一致

但是，最年轻一代的专家们对未来的观察总是最为清楚的，并且必定会在不完善的基础上继续创造。

尽管有待继续进行大量研究，但是可以期待，传递现象的应用是增加而非减少的。有趣的是，在我们周围正在发展的每种现有新技术，细究起来，都是由守恒定律、通量表达式以及传递系数的信息所支配。适宜于新领域问题的构建及解题技巧，无疑将使工程师们花费大量时间，而我们只是希望提供有益的基础作为起点。

每本新书的成功不仅取决于封面署名的作者，而是受益于更多人们的参与。最明显的是得益于勤奋而有天赋的学生，他们集体教育我们，远超过我们教育他们。此外，许多教授评阅手稿，提出有深刻见解的评论和指正，应该特别感谢他们，其中有 Yu-ling Cheng (多伦多大学)，Michael D. Graham (威斯康星大学)，Susan J. Muller (加州大学-伯克利)，William B. Russel (普林斯顿大学)，Jay D. Schieber (伊利诺伊工学院) 和 John F. Wendt (冯·卡门流体动力学研究所)。但是，在更深的层次上，我们得益于麦迪逊 (Madison) 先辈所造就的化工系的结构和传统。他们中最突出的是 Olaf Andreas Hougen。谨奉献本书新版，作为对他的怀念。

R. B. B

W. E. S

E. N. L

向我们的中国读者致意

本书作者们为《传递现象》(第二版)中文版的出版感到特别高兴。60多年来,许多中国学生进入我们系学习化学工程,他们认真、勤奋好学。我们以他们作为校友而感到骄傲。

1979年,威斯康星大学校长 Irving shain 应中国科学院邀请,率科学家代表团在中国访问一个月。本书作者之一(R. B. Bird)参加了这次访问,有机会熟悉中国的教育体制。几年后又应邀在华东理工大学讲学一个月。本书另一作者(E. N. Sutter),参加了1982年和2000年在北京举行的第一、第三次中美化学工程会议。他发现两次会议不仅是有益的学术交流,而且对会议期间遇见的学者和学生的热情留下了深刻印象。

本书第一版是传递现象的第一本基本教材,它使工程类教师讲授单元操作、化学反应器操作更为有效;为理解流体动力学、传热和传质的物理原理,提供了完善的基础。本书也适用于机械工程、核物理、航空工程、土壤学、气象学及化学等系。同样的物理原理对理解这些学科起关键作用。本书(英语)第一版在1960~2002年间共印刷64次,被翻译成西班牙语、意大利语、捷克语、俄语和汉语。

因为本书的主题实质上是应用物理,不可避免用到数学,主要涉及常微分方程和矢量运算。这些专题通常在工程学课程中讲授。本书在附录(A, B, C)中做了总结。对传递现象教师十分重要的是,强调物理概念、方程的物理解释以及所得结果在物理上的合理性,数学应该是理解物理本质的工具。本书所需的数学,也适用于许多其他学科,例如,过程控制、弹性理论、电磁学、量子力学、流变学和相对论。

本书的作者深知翻译任务的艰巨,非常感谢将本书从英语翻译成汉语的译者,他们的努力将会使本书拥有更多的读者。

R. Byron Bird 博德 教授

美国威斯康星大学化学与生物工程系

2004年1月27日

译者说明

传递现象作为化学工程发展的标志，其代表作，也是世界第一本著作，即是 Bird, Stewart, Lightfoot 三位教授所著传递现象。此书最早出版于 20 世纪 60 年代初。此书的出版具有里程碑意义。现在传递现象已成为一门重要的技术基础科学。它在化学工程、机械工程、航空工程、生物工程、材料工程、化学、农学、土壤学和气象学等许多方面已得到广泛的应用。本书第一版的中文译本在 1988 年出版。曾被许多学校用作教材，并为许多专著和文章引用。对我国的教学和科研起到了一定的促进作用。

本书自第一版出版以来，40 多年间，由于科技发展和读者要求发生了很大变化，所以 2002 年出版第二版。与第一版相比，第二版在保持原有框架系统和主要特点的基础上，有了很大变化，不仅增加了许多新的内容，而且在许多方面更深入阐述传递现象的物理概念和计算方程的物理意义，提供了更多的解题方法，应用论述更为广泛具体，含原理、方法的应用，系统装置的设计，仪表的原理、性能；工程、自然、生理等多方面的实例和不同难度的习题。信息丰富，从历史到前沿，经典论文到最新学术著作，含大量文献资料。所以翻译和出版本书的第二版中文译本，将对我国高等教育教材建设的现代化、提高教学和科研质量等方面起到一定的作用。读者从本书不仅可以学到知识，更能学到方法和技巧，还可从学科的历史发展受到启发和鼓励。

本版译者根据作者提供的勘误已对原著中一些错误之处做了订正。

本书出版过程中得到化学工业出版社的支持和帮助，特此感谢。

限于译者水平，不当之处望读者批评指正。

译者

2004 年 5 月

目 录

传递现象学科.....	1
0.1 什么是传递现象?	1
0.2 在三个层次上研究传递现象	1
0.3 守恒定律: 实例	3
0.4 结束语	5

第1篇 动量传递

第1章 黏度和动量传递机理.....	7
1.1 牛顿黏性定律(分子动量传递)	7
例题 1.1-1 动量通量的计算	10
1.2 广义牛顿黏性定律.....	12
1.3 黏度与压强、温度的关系.....	16
例题 1.3-1 用临界性质估算黏度	18
1.4 低密度气体黏度分子理论.....	18
例题 1.4-1 低密度纯气体黏度的计算	23
例题 1.4-2 低密度气体混合物黏度的预测	23
1.5 液体黏度的分子理论.....	24
例题 1.5-1 纯液体黏度的估算	27
1.6 悬浮液和乳浊液的黏度.....	27
1.7 对流动量传递.....	29
第2章 薄壳动量衡算和层流流动的速度分布	36
2.1 薄壳动量衡算和边界条件.....	37
2.2 降膜流动.....	37
例题 2.2-1 降膜速度计算	42
例题 2.2-2 具有可变黏度的降膜流动	42
2.3 通过圆管的流动.....	43
例题 2.3-1 由毛细管流动数据测定黏度	46
例题 2.3-2 水平圆管内的可压缩流动	47
2.4 通过环隙的流动.....	47
2.5 两种互不相溶毗邻流体的流动.....	49
2.6 绕过球体的爬流.....	51
例题 2.6-1 由落球的终端速度测定黏度	54
第3章 等温系统的变化方程	64
3.1 连续性方程.....	65

例题 3.1-1 不可压缩牛顿流体在固体表面的法向应力	66
3.2 运动方程	66
3.3 机械能方程	68
3.4 角动量方程	70
3.5 以随体导数表示的变化方程	70
例题 3.5-1 无黏性流体定常流动的伯努利方程	73
3.6 利用变化方程求解流动问题	73
例题 3.6-1 长圆管中的定常流动	75
例题 3.6-2 变黏度降膜	76
例题 3.6-3 Couette 黏度计的工作原理	76
例题 3.6-4 旋转液体表面的形状	80
例题 3.6-5 慢速旋转球体附近的流动	82
3.7 变化方程的量纲分析	83
例题 3.7-1 绕圆柱的横向流	85
例题 3.7-2 搅拌罐中的定态流动	87
例题 3.7-3 填充管内爬流流动的压降	90
第 4 章 多个自变量系统的速度分布	103
4.1 时间相关的牛顿流体的流动	103
例题 4.1-1 突然运动的壁面附近的流体流动	104
例题 4.1-2 两平行板间的非定常层流	106
例题 4.1-3 振荡平板附近的非定常层流	109
4.2 利用流函数求流动问题	110
例题 4.2-1 绕过球体的爬流	112
4.3 利用速度势求无黏性流体流动	114
例题 4.3-1 绕过圆柱体的势流	116
例题 4.3-2 进入矩形通道的流动	118
例题 4.3-3 拐角附近的流动	119
4.4 利用边界层理论研究固体壁面附近的流动	121
例题 4.4-1 沿平板的层流流动 (近似解)	123
例题 4.4-2 沿平板的层流流动 (准确解)	124
例题 4.4-3 拐角附近的流动	126
第 5 章 湍流的速度分布	138
5.1 层流流动与湍流流动的比较	139
5.2 不可压缩流体的时均变化方程	141
5.3 近壁处时均速度分布	143
5.4 湍流动量通量的经验表达式	146
例题 5.4-1 近壁处雷诺应力表达式的推导	147
5.5 管内湍流	148
例题 5.5-1 圆管中平均速度的估算	149
例题 5.5-2 普朗特混合长公式在圆管湍流中的应用	150

例题 5.5-3 黏度与涡流黏度的相对量级	150
5.6 射流湍流	151
例题 5.6-1 壁面圆射流的时均速度分布	151
第 6 章 等温系统中的相际传递	160
6.1 摩擦因子的定义	160
6.2 管内流动的摩擦因子	162
例题 6.2-1 给定流率下的压降计算	165
例题 6.2-2 给定压降下的流率计算	166
6.3 绕过球体流动的摩擦因子	167
例题 6.3-1 落球直径的确定	170
6.4 填料塔的摩擦因子	171
第 7 章 等温流动系统的宏观衡算	180
7.1 宏观质量衡算	181
例题 7.1-1 球形贮罐的出料	182
7.2 宏观动量衡算	183
例题 7.2-1 射流施加的作用力 (a 部分)	183
7.3 宏观角动量衡算	184
例题 7.3-1 施加于混合器的力矩	185
7.4 宏观机械能衡算	185
例题 7.4-1 射流施加的作用力 (b 部分)	187
7.5 黏滞损失的估算	188
例题 7.5-1 管线流动所需的功率	189
7.6 利用宏观衡算求解定常态流动问题	191
例题 7.6-1 突然扩大的压强升高和摩擦损失	191
例题 7.6-2 液-液喷射器的性能	192
例题 7.6-3 作用于弯管上的反推力	193
例题 7.6-4 撞击射流	196
例题 7.6-5 液体通过孔板的等温流动	197
7.7 利用宏观衡算求解非定常态流动问题	198
例题 7.7-1 从圆柱形容器中流出的非定常流的加速效应	199
例题 7.7-2 差压计的阻尼振荡	201
7.8 宏观机械能衡算的推导	203
第 8 章 聚合液体	211
8.1 聚合液体流动行为示例	212
8.2 流变测量学与物质函数	215
8.3 非牛顿黏度与广义牛顿模型	218
例题 8.3-1 圆管中不可压缩幂律流体的层流流动	220
例题 8.3-2 幂律流体在狭缝中的流动	221
例题 8.3-3 幂律流体的切向环隙流	221
8.4 弹性与线性黏弹模型	222

例题 8.4-1 小幅振荡运动	224
例题 8.4-2 振荡平板附近的非定常黏弹性流动	225
8.5 共旋转导数与非线性黏弹性模型	226
例题 8.5-1 Oldroyd 6 常数模型的物质函数	228
8.6 聚合液体的分子理论	230
例题 8.6-1 FENE-P 模型的物质函数	232

第2篇 能量传递

第9章 热导率和能量传递机理	239
9.1 傅里叶导热定律(分子能量传递)	239
例题 9.1-1 热导率的测量	243
9.2 热导率与温度和压强的关系	244
例题 9.2-1 压强对热导率的影响	245
9.3 低密度气体热导率理论	246
例题 9.3-1 计算低密度单原子气体的热导率	249
例题 9.3-2 估算低密度多原子气体的热导率	250
例题 9.3-3 推算低密度气体混合物的热导率	250
9.4 液体热导率理论	251
例题 9.4-1 推算液体的热导率	252
9.5 固体热导率	252
9.6 复合固体的有效热导率	253
9.7 能量的对流传递	255
9.8 分子运动产生的功	256
第10章 薄壳能量衡算, 固体和层流流动的温度分布	263
10.1 薄壳能量衡算; 边界条件	263
10.2 电热源的热传导	264
例题 10.2-1 电热丝给定温升所需的电压降	267
例题 10.2-2 给定传热系数和环境温度下电热丝的升温	267
10.3 核热源的热传导	268
10.4 黏性摩擦热源的热传导	270
10.5 化学热源的热传导	271
10.6 通过复合壁的热传导	274
例题 10.6-1 复合圆筒壁	276
10.7 散热翅片中的热传导	278
例题 10.7-1 热电偶测温的误差	279
10.8 强制对流	281
10.9 自然对流	285
第11章 非等温系统的变化方程	300
11.1 能量方程	300
11.2 能量方程的特殊形式	302

11.3 强制对流和自然对流的 Boussinesq 运动方程	304
11.4 利用变化方程求解定态传热问题	305
例题 11.4-1 圆管层流流动的定常态强制对流传热	307
例题 11.4-2 产生黏性摩擦热的环隙切向流	308
例题 11.4-3 非等温膜的定常流动	309
例题 11.4-4 发汗冷却	310
例题 11.4-5 垂直平板的自然对流传热	311
例题 11.4-6 理想气体的绝热无摩擦过程	314
例题 11.4-7 一维可压缩流: 在静止激波中的速度、温度和压强分布	315
11.5 非等温系统变化方程的量纲分析	318
例题 11.5-1 长圆筒周围的温度分布	320
例题 11.5-2 水平流体层中的自然对流: Bénard 蜂窝的形成	322
例题 11.5-3 电热蛇管的表面温度	324
第 12 章 多个自变量系统的温度分布	336
12.1 固体中的非定常态热传导	336
例题 12.1-1 半无限厚平板的加热	336
例题 12.1-2 有限厚平板的加热	337
例题 12.1-3 具有正弦波热通量的近壁面非定常态热传导	340
例题 12.1-4 与充分搅拌的流体相接触的圆球的冷却	341
12.2 不可压缩层流流动中的定常态热传导	343
例题 12.2-1 管壁具有恒定热量通量的层流管流	344
例题 12.2-2 管壁具有恒定热量通量的层流管流: 入口段的渐近解	345
12.3 固体中热量的定常态势流	346
例题 12.3-1 平壁中的温度分布	347
12.4 非等温流动的边界层理论	348
例题 12.4-1 沿加热平板层流强制对流的传热 (von Kármán 积分方法)	349
例题 12.4-2 沿加热平板层流强制对流的传热 (大 Pr 的渐近解)	351
例题 12.4-3 高 Pr 定常态三维强制对流	353
第 13 章 湍流流动的温度分布	366
13.1 不可压缩非等温流动的时均变化方程	366
13.2 近壁处的时均化温度分布	368
13.3 湍流热量通量的经验表达式	368
例题 13.3-1 管内湍流壁面热量通量的近似关系	369
13.4 管内湍流的温度分布	370
13.5 射流中湍流的温度分布	373
13.6 管内大 Pr 数流动能量传递的傅里叶分析	375
第 14 章 非等温系统中的相际传递	381
14.1 传热系数的定义	382
例题 14.1-1 根据实验数据计算传热系数	384
14.2 管内和狭缝中强制对流传热系数的解析计算	386

14.3 管内强制对流的传热系数	391
例题 14.3-1 管式加热器的设计	395
14.4 围绕浸没物体强制对流的传热系数	395
14.5 通过填充床强制对流的传热系数	398
14.6 自然对流和混合对流的传热系数	399
例题 14.6-1 水平管自然对流的热损失	402
14.7 固体表面上纯蒸汽冷凝的传热系数	403
例题 14.7-1 垂直面上蒸汽的冷凝	405
第 15 章 非等温系统的宏观衡算	412
15.1 宏观能量衡算	413
15.2 宏观机械能衡算	414
15.3 利用宏观衡算解具有平坦速度分布的定常态问题	415
例题 15.3-1 理想气体的冷却	416
例题 15.3-2 两理想气流的混合	417
15.4 d 形式的宏观衡算	418
例题 15.4-1 并流或逆流换热器	419
例题 15.4-2 长管输送可压缩流体所需功率	420
15.5 利用宏观衡算解非定常态问题和非平坦速度分布问题	422
例题 15.5-1 在搅拌槽中加热液体	423
例题 15.5-2 简单温度控制器的操作	425
例题 15.5-3 可压缩流体通过差压流量计的流动	427
例题 15.5-4 分批操作条件下可压缩流体的自由膨胀	428
第 16 章 辐射能量传递	440
16.1 电磁辐射的波谱	441
16.2 固体表面的吸收和发射	442
16.3 Planck 分布定律、Wien 位移定律和 Stefan-Boltzmann 定律	445
例题 16.3-1 太阳的温度和辐射能的发射	447
16.4 真空中不同温度黑体之间的直接辐射	448
例题 16.4-1 太阳常数的估算	451
例题 16.4-2 两圆盘之间的辐射传热	452
16.5 不同温度非黑体之间的辐射	452
例题 16.5-1 辐射防护屏	454
例题 16.5-2 水平管辐射和自然对流的热损失	455
例题 16.5-3 联合辐射和对流	455
16.6 吸收介质中辐射能量的传递	456
例题 16.6-1 单色辐射光束的吸收	457

第 3 篇 质量传递

第 17 章 扩散系数和质量传递机理	461
17.1 费克二元扩散定律 (分子质量传递)	462

例题 17.1-1 氮通过 Pyrex 玻璃的扩散	466
例题 17.1-2 D_{AB} 和 D_{BA} 相等	467
17.2 扩散系数与温度和压强的依从关系	468
例题 17.2-1 低密度下扩散系数的估算	469
例题 17.2-2 高密度下自扩散系数的估算	470
例题 17.2-3 高密度下二元扩散系数的估算	471
17.3 低密度气体的扩散理论	472
例题 17.3-1 低密度单原子气体扩散系数的计算	475
17.4 二元液体的扩散理论	475
例题 17.4-1 液体扩散系数的估算	478
17.5 胶粒悬浮液的扩散理论	478
17.6 聚合物的扩散理论	479
17.7 对流质量传递和摩尔传递	480
17.8 质量和摩尔通量概要	483
17.9 低密度气体中 Maxwell-Stefan 多组分扩散方程	484
第 18 章 固体和层流流动中的浓度分布	490
18.1 薄壳质量衡算; 边界条件	491
18.2 通过静止气膜的扩散	492
例题 18.2-1 移动界面的扩散	494
例题 18.2-2 扩散系数的测定	495
例题 18.2-3 通过非等温球状膜的扩散	496
18.3 伴有多相化学反应的扩散	497
例题 18.3-1 伴有慢速多相反应的扩散	498
18.4 伴有均相化学反应的扩散	499
例题 18.4-1 搅拌槽中伴有化学反应的气体吸收	501
18.5 下降液膜中的扩散 (气体吸收)	502
例题 18.5-1 上升气泡的气体吸收	505
18.6 下降液膜中的扩散 (固体溶解)	506
18.7 多孔催化剂内的扩散和化学反应	507
18.8 三组分气体系统的扩散	510
第 19 章 多组分系统的变化方程	524
19.1 多组分混合物的连续性方程	524
例题 19.1-1 扩散、对流和化学反应	527
19.2 多组分变化方程概要	527
19.3 多组分通量概要	530
例题 19.3-1 偏摩尔焓	532
19.4 混合物变化方程的应用	533
例题 19.4-1 同时传热传质	533
例题 19.4-2 管式反应器中的浓度分布	535
例题 19.4-3 一氧化碳的催化氧化	537

例题 19.4-4 多原子气体的热导率	538
19.5 非反应二元混合物变化方程的量纲分析	539
例题 19.5-1 长圆柱体周围的浓度分布	541
例题 19.5-2 空气除湿时雾的生成	542
例题 19.5-3 互溶液体的混合	544
第 20 章 多个自变量系统的浓度分布	551
20.1 时变性扩散	552
例题 20.1-1 液体非定常态蒸发 (“Arnold” 问题)	552
例题 20.1-2 有快速反应的气体吸收	555
例题 20.1-3 伴有一级均相反应的非定常态扩散	557
例题 20.1-4 界面变化对界面质量传递的影响	559
20.2 二元边界层中的定常态传递	562
例题 20.2-1 沿可溶性平板的等温流动的扩散和化学反应	563
例题 20.2-2 高质量传递速率下沿平板的强制对流	565
例题 20.2-3 低质量传递速率下平板传递的近似类比	571
20.3 围绕物体流动的定常态边界层理论	571
例题 20.3-1 绕气泡做爬流流动的质量传递	574
20.4 有复杂界面运动的边界层质量传递	575
例题 20.4-1 有不均匀形变界面的质量传递	580
例题 20.4-2 伴有快速反应和界面形变的气体吸收	580
20.5 管内层流的泰勒离散	581
第 21 章 湍流流动的浓度分布	595
21.1 浓度脉动和时均浓度	595
21.2 物质 A 的连续性方程的时均化	595
21.3 湍流质量通量的半经验表达式	597
21.4 湍流中一级反应对质量传递的强化	597
21.5 伴有二级反应的湍流混合和湍流流动	601
第 22 章 非等温混合物中的相际传递	609
22.1 单相传递系数的定义	610
22.2 质量传递系数的解析表达式	613
22.3 单相二元传递系数的关联	616
例题 22.3-1 自由下降液滴的蒸发	620
例题 22.3-2 湿球和干球温度计	621
例题 22.3-3 通过填充床的爬流质量传递	623
例题 22.3-4 对液滴和气泡的质量传递	624
22.4 两相传递系数的定义	625
例题 22.4-1 控制阻力的确定	627
例题 22.4-2 两相阻力的相互作用	628
例题 22.4-3 按面积平均	630
22.5 质量传递和化学反应	631

例题 22.5-1 填料塔中界面面积的估算	631
例题 22.5-2 体积质量传递系数的估算	632
例题 22.5-3 有快速反应吸收的模型不敏感性关联式	633
22.6 自然对流的联合热量和质量传递	634
例题 22.6-1 Grashof 数的加和性	635
例题 22.6-2 作为强制对流质量传递源的自然对流热量传递	635
22.7 界面力对热量传递和质量传递的影响	636
例题 22.7-1 上升气泡中循环的消除	638
例题 22.7-2 降膜的 Marangoni 不稳定性	638
22.8 高净质量传递速率下的传递系数	639
例题 22.8-1 流体自平表面的快速蒸发	646
例题 22.8-2 液滴蒸发的校正因子	646
例题 22.8-3 质量传递校正后的湿球行为	647
例题 22.8-4 长管中非定常态蒸发膜模型与渗透模型的比较	648
例题 22.8-5 超滤中的浓度极化	649
22.9 多组分质量传递的矩阵近似方法	652
第 23 章 多组分系统的宏观衡算	661
23.1 宏观质量衡算	662
例题 23.1-1 非稳态废物的处置	663
例题 23.1-2 二元分离器	664
例题 23.1-3 宏观衡算与 Dirac “分离能力”及“价值函数”	666
例题 23.1-4 分室分析 (compartmental analysis)	668
例题 23.1-5 时间常数与模型的不敏感性	671
23.2 宏观动量与角动量衡算	672
23.3 宏观能量衡算	672
23.4 宏观机械能衡算	673
23.5 利用宏观衡算求解定常态问题	673
例题 23.5-1 二氧化硫转化器的能量衡算	674
例题 23.5-2 填料吸收塔的高度	676
例题 23.5-3 线性多级串联设备	679
例题 23.5-4 反应性气体混合物通过一个无摩擦绝热喷嘴的膨胀	682
23.6 利用宏观衡算求解非定常态问题	685
例题 23.6-1 化学反应器的开工	685
例题 23.6-2 填料塔的非定常态操作	686
例题 23.6-3 低阶矩的应用	688
第 24 章 质量传递的其他机理	696
24.1 熵的变化方程	696
24.2 热量与质量通量的表达式	698
例题 24.2-1 热扩散与 Clusius-Dickel 塔	702
例题 24.2-2 加压扩散与超速离心机	703

24.3 浓度扩散与推动力	704
24.4 广义 Maxwell-Stefan 方程的应用	705
例题 24.4-1 蛋白质的离心分离	706
例题 24.4-2 蛋白质作为流体动力颗粒处理	709
例题 24.4-3 水溶液中盐的扩散	710
例题 24.4-4 局部电中性的偏离: 电渗透	712
例题 24.4-5 另外一些质量传递推动力	714
24.5 通过选择性渗透膜的质量传递	715
例题 24.5-1 两主体相之间的浓度扩散	717
例题 24.5-2 超滤与反渗透	718
例题 24.5-3 带电膜与 Donnan 排斥	721
24.6 多孔介质中的质量传递	722
例题 24.6-1 Knudsen 扩散	724
例题 24.6-2 源自外部二元溶液的传递	726
结束语	733
附录 A 矢量和张量的表示方法	735
A.1 矢量运算的几何表示	736
A.2 以分量表示的矢量运算	738
例题 A.2-1 一个矢量恒等式的证明	741
A.3 以分量表示的张量运算	742
A.4 矢量和张量的微分运算	746
例题 A.4-1 一个张量恒等式的证明	748
A.5 矢量和张量的积分理论	750
A.6 曲线坐标系中的矢量和张量代数	751
A.7 曲线坐标系中的微分运算	754
例题 A.7-1 圆柱坐标系下的微分运算	757
例题 A.7-2 球坐标下的微分运算	758
A.8 曲线坐标系中的积分运算	762
A.9 矢量和张量表示方法的进一步评述	764
附录 B 通量和变化方程	766
B.1 牛顿黏性定律	766
B.2 Fourier 热传导定律	767
B.3 费克二元扩散 (第一) 定律	768
B.4 连续性方程	769
B.5 以 τ 写出的运动方程	769
B.6 ρ 和 μ 为常数的牛顿流体的运动方程	770
B.7 牛顿流体的耗散函数 Φ_v [参见式 (3.3-3)]	771
B.8 以 q 表示的能量方程	772
B.9 ρ 和 k 为常数的牛顿流体的能量方程	772
B.10 以 j_α 给出的物种 α 的连续性方程	773