

The cover features several parallel diagonal lines running from the top-left towards the bottom-right. Along these lines, there are five solid black semi-circles of varying sizes, creating a rhythmic, abstract pattern.

CHUANDI XIANXIANG

传递现象

〔美〕 R.B.伯德 W.E.斯图瓦特 E.N.莱特富特 著

化学工业出版社

出了以“*Physische Transportverschijnselen*”为名的一组讲稿，据我们所知，这是向工科学生讲授传递现象的首次尝试。本书作者之一（R. B. Bird）曾有幸以客座学者身份在H. Kramers教授的研究室工作一个学期，在此期间曾就传递现象的教学进行了讨论，得益殊多。

最后，对参与打字，缮写，整理手稿的人员致谢。

作者

译者说明

传递现象，或称传递过程，已经成为一门重要的技术基础科学。本书出版于六十年代初，从而开风气之先。但它不仅具有里程碑的意义，而且直到三十年后的今天，仍为许多学校用作教材，并为许多专著及文章不断引用。这在科技文献中是罕见的，经得起时间的考验。至于书中概念的清晰，推导的严谨，文字之流畅，就无待赘言了。

我们从作者处得知，作者无意将本书修订再版，实际上在其多次印刷中已作了少量修改。我们翻译本书时，对所有数值都作了SI单位制的换算，并用方括号附于原值之后，其它内容则一仍其旧。限于译者水平，不当之处望读者批评指正

袁 一〔大连理工大学〕

戎顺熙〔浙江大学〕

石炎福〔成都科技大学〕

1988年5月

前 言

本书拟欲作为传递现象的入门，适于工程和应用科学各专业的学生。书中讨论到的课题有：动量传递（粘性流动），能量传递（热传导，对流和辐射）和质量传递（扩散）。发生传递现象的介质在此处理为连续流，而传递过程的分子解释仅稍稍提及。对于工科学生来说，连续流的处理方法显然更为直接，但亦应强调指出，这两种处理方法对于完整地掌握这一学科都是需要的。

在当前的工科教育中，愈来愈倾向于着重基本物理原理的理解，而不是盲目地套用经验结论。我们所研究的对象显然具有充分的基础性质，不止一个传统的系要涉及到它。我们认为，传递现象应当与热力学、力学和电磁学并列，作为几门重点“工程科学”当中的一门。在分析工程问题时，关于质量、动量和能量传递的基本定律的知识即使不算是不可缺少的，至少也是愈来愈显得重要了。此外，本书内容对于从事物理化学，土壤学，气象学以及生物学的人来说亦是有价值的。

因为传递现象这一领域迄今还没有被公认为一门独立的工程学科，在此介绍一下我们组织教材的方法，也许是不无益处的。我们曾经采取过几种不同的作法，在我们系内同事的帮助下，编制出一个如表 1 所示的大纲。它是一个二维数组，每一方格填入一个课题，用以表明该课题与同一行或同一列的课题的关系。不同列上方标有质量、动量和能量，这是一种分类方法，即按所传递的对象来分的。不同的行则是标识另一种分类方法，即按传递类型来分。本图清楚地表明了这门课程有两种不同的组织方法：或逐列进行（按 1、2、3、4、5…各章的顺序），或逐行进行（按 1、8、16、2、9、17、3…各章的顺序）。本书内容的安排，对这两种方法都适用。对于初学者来说，逐列进行较为方便，而对于高层次的学习，逐行进行可能更好一些。

本书各章都备有若干例题，用来说明各种实际应用，或者是对

正文作进一步引伸。每章之后有一些讨论题，其目的是启发学者以不同角度来思考本章的内容。最后，每章还附有若干习题，这些习题又分为四类，用习题号次的右下标示之，这四类是：

第1类：这一类习题是把具体数字代入公式即可解出。

第2类：这类题目要求根据本章内容对于物理现象进行简单分析。

第3类：这类题目需要进行更深入的分析，有时需要用到好几章的内容，或者涉及到本书没有讲到的材料。

第4类：这类问题需要用到的数学分析手段有贝塞耳函数、偏微分方程，拉普拉斯变换、复变函数，以及张量分析。

这四类习题中，前三类适于作为大学三、四年级的传递现象课程，所涉及的数学没有超过常微分方程之上的。

本书的内容显然多于作为一入门课程的份量。为有助于未来的本课教师，在目录中把我们认为适合于3或4学分本科课程的章节打上了星号(*)。本书的其他材料则供教员或研究生参考，同时也是告诫本科生：“课程范围”与“学科范围”是并不重叠的。

表 1 传递现象组织系统图

被传递的对象 传递的类型	动 量	能 量	质 量
分子传递	1 粘度 μ 牛顿粘性定律 μ 与温度、压强、组成的关系 μ 的分子运动论	8 导热系数 k 傅里叶导热定律 k 与温度、压强、组成的关系 k 的分子运动论	16 扩散系数 $\mathcal{D}_{AB}$ 费克扩散定律 $\mathcal{D}_{AB}$ 与温度、压强、组成的关系 $\mathcal{D}_{AB}$ 的分子运动论
层流或固体中的传递，一维	2 薄壳动量衡算 速度侧形 平均速度 表面处的动量通量	9 薄壳能量衡算 温度侧形 平均温度 表面处的能量通量	17 薄壳质量衡算 浓度侧形 平均浓度 表面处的质量通量

续表

被传递的对象 传递的类型	动 量	能 量	质 量
任意连续流中的传递	3 变化方程(等温) 连续性方程 运动方程 能量方程(等温)	10 变化方程(非等温) 连续性方程 运动方程(强制和自然对流) 能量方程(非等温)	18 变化方程(多组份) 连续性方程(各组份) 运动方程(强制和自然对流) 能量方程(多组份)
层流或固体中的传递, 二独立变量	4 动量传递, 二独立变量 非定常态粘性流 二维粘性流 理想二维流动 边界层动量传递	11 能量传递, 二独立变量 非定常态热传导 粘性流中的热传导 固体中的二维热传导 边界层能量传递	19 质量传递, 二独立变量 非定常态扩散 粘性流中的扩散 固体中的二维扩散 边界层质量传递
湍流中的传递	5 湍流动量传递时均化变化方程 涡流粘度 湍流速度侧形	12 湍流能量传递时均化变化方程 涡流导热系数 湍流温度侧形	20 湍流质量传递时均化变化方程 涡流扩散系数 湍流浓度侧形
两相间的传递	6 相际动量传递 摩擦因子 f 无因次关联式	13 相际能量传递 传热系数 h 无因次关联式(强制和自然对流)	21 相际质量传递 传质系数 k_x 无因次关联式(强制和自然对流)
辐射传递		14 辐射能量传递 Planck辐射定律, Stefan-Boltzmann 定律 几何问题 通过吸收介质的辐射	
大流动系统的传递	7 宏观衡算(等温) 质量衡算 动量衡算 机械能衡算(伯努利方程)	15 宏观衡算(非等温) 质量衡算 动量衡算 机械能和总能量衡算	22 宏观衡算(多组份) 质量衡算(各组份) 动量衡算 机械能和总能量衡算

序号表示本书中的章次。

本书既可以逐列学习, 也可以逐行学习。

本书全部采用统一的符号, 附录有符号的说明。本书的符号不可能与所有读者所用的完全一致, 这是一件憾事, 因为本书中的材

料包括几个互相独立发展起来的领域。一般我们所用的符号是物理学和工程界所用的符号的一个折中。

早在1957年，威斯康星大学化工系经认真研究后决定在三年级开设一门传递现象必修课，为时一个学期。当时还没有教科书供用，因此我们为学生准备了一份刻印讲义，并于1958年秋以“*Notes on Transport Phenomena*”一名出版。这份讲义还曾在另外几所大学使用过，这些学校的师生提供的意见使我们得益不少。

这本书是上书经过大量修改后的结果。全文都经过重写，有几章全部是重新组织的，并增加了许多习题和例题。这些改变大都是为使更适于初学者作为教材而采取的。

R. Byron Bird
Warren E. Stewart
Edwin N. Lightfoot

1960年6月

致 谢

有许多人士曾经直接或间接参与了本书的编写，其中特别要提出的有以下诸位先生。

威斯康星大学O. A. Hougen教授和W. R. Marshall, Jr 院长。他们长期对传递现象这一领域表现出浓厚兴趣，并热情支持增加这方面的教学内容。

威斯康星大学化工系主任R. A. Ragatz教授。为把本课程纳入新的化学工程教学计划，他协助我们解决了有关管理问题，并且为我们撰稿安排了额外的时间。

威斯康星大学同仁，其中有R. J. Altpeter, C. C. Watson, W. K. Neill, E. J. Crosby各教授。他们和我们一起开创了传递现象的本科教学，提出了许多有益的建议。

俄克拉荷马大学的J. E. Powers教授和他的本科生班，西北大学J. Dranoff教授和他的研究生班。他们向我们提供了对“*Notes on Transport Phenomena*”一书的详细评论。

E. Weger教授（约翰霍普金斯大学）和K. M. Watson教授（伊利诺斯理工学院）也向我们提出了他们讲授“*Notes on Transport Phenomena*”后的意见。

我们的一些学生阅读了本书手稿的若干章节，使最终定稿更为精确。此外，还有几位学生校对了第1类和第2类所有习题的文字和答案。他们的姓名在此从略。

威斯康星大学J. O. Hirschfelder教授和C. F. Curtiss教授，我们曾和他们二位进行长期愉快的合作。在大约十年以前，他们第一次为我校化工系的研究生引入了传递现象这一课题，在一定意义上本书是他们的工作的延续。

H. Kramers教授（荷兰德耳夫特高等工业学校）在1956年写

目 录

译者说明

前言

致谢

第一篇 动 量 传 递

第一章 粘度和动量传递机理	1
* § 1.1 牛顿粘性定律	1
* 例题1.1-1 动量通量的计算	5
* § 1.2 非牛顿流体	8
* § 1.3 粘度与压强和温度的关系	14
* 例题1.3-1 用临界性质估算粘度	17
* 例题1.3-2 压强对气体粘度的影响	18
§ 1.4 低密度气体粘度理论	19
例题1.4-1 低密度气体粘度的计算	25
例题1.4-2 低密度气体混合物粘度的预测	26
§ 1.5 液体粘度理论	27
例题1.5-1 纯液体粘度估算	30
第二章 层流流动的速度分布	37
* § 2.1 薄壳动量衡算: 边界条件	38
* § 2.2 降膜流动	39
* 例题2.2-1 降膜速度的计算	44
例题2.2-2 具有可变粘度的降膜流动	44
* § 2.3 通过圆管的流动	46
* 例题2.3-1 由毛细管流动数据测定粘度	51
例题2.3-2 圆管中的Bingham型流动	52
* § 2.4 通过环隙的流动	55
§ 2.5 两种互不相溶流体的毗邻流动	58

* § 2.6 绕过一固体球的爬流	61
* 例题2.6-1 由下降球体的终端速度测定粘度	65
第三章 等温系统的变化方程	79
* § 3.1 连续性方程	82
* § 3.2 运动方程	84
§ 3.3 机械能方程	90
* § 3.4 曲线坐标系的变化方程	92
* § 3.5 利用变化方程求解定常态流动问题	93
* 例题3.5-1 牛顿流体的切向环流	102
* 例题3.5-2 旋转液体表面形状	104
例题3.5-3 锥板粘度计的扭矩和速度分布	107
§ 3.6 不可压缩非牛顿流体流动的变化方程	110
例题3.6-1 Bingham塑性流体的切向环隙流	114
例题3.6-2 在两平行圆盘间非牛顿流体径向流动的动量通量张量 的分量	116
* § 3.7 变化方程的因次分析	117
* 例题3.7-1 搅拌釜旋涡深度的预测	119
第四章 多个自变量系统的速度分布	138
* § 4.1 非定常态粘性流	138
* 例题4.1-1 平板突然发生运动时,邻近平板处的流体流动	139
例题4.1-2 圆管中的非定常态层流流动	142
§ 4.2 具有两个非零速度分量的定常态粘性流: 流函数	145
例题4.2-1 围绕一球体的“爬流”	146
§ 4.3 定常态二维势流	150
例题4.3-1 围绕一圆柱体的理想流	153
例题4.3-2 进入矩形通道的流动	155
§ 4.4 边界层理论	157
例题4.4-1 平板突然运动时邻近流体的流动	158
例题4.4-2 靠近平板前沿的流动	160
第五章 湍流流动的速度分布	174
* § 5.1 脉动量和时均量	175
* § 5.2 不可压缩流体变化方程的时均化	179
* § 5.3 雷诺应力的半经验表达式	181

*例题5.3-1 管内流动的对数分布定律的推导 (远离管壁)	183
*例题5.3-2 管内流动的速度分布 (邻近壁面)	185
*例题5.3-3 分子粘度与涡流粘度的相对大小	187
§ 5.4 二阶相关张量及其传播(von Kármán-Howarth方程)	188
例题5.4-1 栅格后方湍流的衰减	197
第六章 等温系统中的相际传递	206
* § 6.1 摩擦因子的定义	207
* § 6.2 管内流动的摩擦因子	209
*例题6.2-1 给定流率下的压降计算	215
*例题6.2-2 给定压降下的流率计算	215
* § 6.3 围绕球体流动的摩擦因子	218
*例题6.3-1 下降球体直径的确定	221
§ 6.4 填料塔的摩擦因子	224
第七章 等温系统的宏观衡算	239
* § 7.1 宏观质量衡算	240
* § 7.2 宏观动量衡算	241
* § 7.3 宏观机械能衡算 (伯努利方程)	242
例题7.3-1 定常态不可压缩流的机械能衡算式的推导	244
* § 7.4 摩擦损失的估算	246
*例题7.4-1 管线流动所需的功率	249
* § 7.5 利用宏观衡算求解定常态流动问题	251
*例题7.5-1 突然扩大的压强升高和摩擦损失	251
*例题7.5-2 液-液喷射器的操作	252
*例题7.5-3 作用于弯管上的反坐力	255
*例题7.5-4 液体通过孔板的等温流动	258
§ 7.6 利用宏观衡算求解非定常态流动问题	260
例题7.6-1 液体从漏斗流出时间	260
例题7.6-2 差压计的阻尼振荡	263

第二篇 能 量 传 递

第八章 导热系数和能量传递机理	277
* § 8.1 傅里叶导热定律	277
*例题8.1-1 导热系数的测量	283

* § 8.2 气体和液体的导热系数与温度和压强的关系	284
* 例题8.2-1 压强对导热系数的影响	287
§ 8.3 低密度气体导热系数理论	288
例题8.3-1 计算低密度单原子气体的导热系数	293
例题8.3-2 估算低密度多原子气体的导热系数	294
例题8.3-3 推算低密度气体混合物的导热系数	295
§ 8.4 液体导热系数理论	296
例题8.4-1 估算液体的导热系数	297
§ 8.5 固体的导热系数	298
第九章 固体和层流流动的温度分布	303
* § 9.1 薄壳能量衡算: 边界条件	304
* § 9.2 具有电热源的导热	305
* 例题9.2-1 电流加热导线至给定温升所需的电压降	309
例题9.2-2 电导率和导热系数随温度变化的电线加热	309
§ 9.3 具有核热源的导热	312
* § 9.4 具有粘性摩擦热源的导热	315
§ 9.5 具有化学热源的导热	318
* § 9.6 通过复合壁的导热: 热阻的加合	323
* 例题9.6-1 复合圆筒壁	325
§ 9.7 在翅片中的导热	328
例题9.7-1 热电偶测温的误差	330
* § 9.8 强制对流	332
* § 9.9 自然对流	338
第十章 非等温系统的变化方程	354
* § 10.1 能量方程	354
* § 10.2 曲线坐标系的能量方程	362
* § 10.3 强制和自然对流的非等温运动方程	365
* § 10.4 变化方程的小结	366
* § 10.5 利用变化方程求解定常态传热问题	368
* 例题10.5-1 产生粘性热的环隙切向流	370
* 例题10.5-2 非等温膜的定常流动	371
* 例题10.5-3 发汗冷却	373
例题10.5-4 垂直平板的自然对流传热	375

例题10.5-5 一维可压缩流: 在稳定激波中的速度、温度和压强 梯度	378
例题10.5-6 理想气体的绝热无摩擦过程	383
* § 10.6 变化方程的因次分析	384
* 例题10.6-1 搅拌槽中的强制对流传热	385
* 例题10.6-2 电加热管的表面温度	387
第十一章 多个自变量系统的温度分布	402
* § 11.1 固体中的非定常态热传导	402
* 例题11.1-1 半无限厚平板的加热	403
* 例题11.1-2 有限厚平板的加热	404
例题11.1-3 与良好搅拌的流体相接触的圆球的冷却	409
§ 11.2 粘性流体层流流动的定常态热传导	412
例题11.2-1 管壁具有恒定热量通量的层流管流	413
例题11.2-2 管壁具有恒定热量通量的层流管流: 对短距离的渐 近解	414
§ 11.3 固体中热量的定常态二维势流	416
例题11.3-1 平壁中的温度分布	418
§ 11.4 边界层理论	419
例题11.4-1 沿加热平板强制对流层流流动中的传热	419
第十二章 湍流流动的温度分布	430
* § 12.1 温度脉动和时均温度	430
* § 12.2 能量方程的时均化	432
* § 12.3 湍流能量通量的半经验表达式	434
* 例题12.3-1 光滑管中的定常态湍流的温度侧形	435
§ 12.4 双重温度相关量及其传播: Corrsin方程	440
例题12.4-1 双重温度相关量的衰减方程	442
第十三章 非等温系统中的相际传递	445
* § 13.1 传热系数的定义	446
* 例题13.1-1 根据实验数据计算传热系数	449
* § 13.2 管内强制对流的传热系数	452
* 例题13.2-1 管式加热器的设计	463
* § 13.3 围绕浸没物体强制对流的传热系数	464
§ 13.4 通过填充床的强制对流的传热系数	468

* § 13.5 自然对流的传热系数	469
*例题13.5-1 水平管自然对流的热损失	472
§ 13.6 在固体表面上纯蒸汽冷凝的传热系数	473
例题13.6-1 在垂直面上的蒸汽冷凝	476
第十四章 辐射能量传递	486
* § 14.1 电磁辐射的波谱	487
* § 14.2 固体表面的吸收和发射	489
* § 14.3 Planck分布定律, Wien位移定律和Stefan-Boltzmann定律...	493
*例题14.3-1 太阳的温度和辐射能的发射	497
* § 14.4 真空中不同温度黑体之间的直接辐射	498
*例题14.4-1 太阳常数的估算	504
*例题14.4-2 两圆盘之间的辐射传热	505
* § 14.5 不同温度非黑体之间的辐射	505
*例题14.5-1 辐射防护屏	507
*例题14.5-2 水平管辐射和自然对流的热损失	509
例题14.5-3 同时辐射和对流	510
§ 14.6 吸收介质中辐射能量的传递	511
例题14.6-1 单色辐射光束的吸收	512
第十五章 非等温系统的宏观衡算	518
* § 15.1 宏观能量衡算	519
* § 15.2 宏观机械能衡算 (伯努利方程)	522
* § 15.3 纯流体宏观衡算小结	525
* § 15.4 利用宏观衡算解定常态问题	526
*例题15.4-1 理想气体的冷却	526
*例题15.4-2 并流或逆流换热器	528
*例题15.4-3 泵送可压缩流体通过长管所需功率	530
例题15.4-4 二理想气体流的混合	533
*例题15.4-5 可压缩流体通过压差流量计的流动	535
§ 15.5 利用宏观衡算解非定常态问题	537
例题15.5-1 在搅拌槽中加热液体	537
例题15.5-2 简单的温度控制器的操作	541
例题15.5-3 可压缩流体的自由间歇膨胀	545

第三篇 质量传递

第十六章 扩散系数和质量传递机理	562
* § 16.1 浓度、速度和质量通量的定义	563
例题16.1-1 各种摩尔通量的关系	568
* § 16.2 费克扩散定律	568
* § 16.3 质量扩散系数与温度和压强的关系	572
*例题16.3-1 低密度气体质量扩散系数的估算	573
*例题16.3-2 高密度气体质量扩散系数的估算	575
§ 16.4 低密度气体普通扩散理论	576
例题16.4-1 低密度下质量扩散系数的计算	581
§ 16.5 液体普通扩散理论	582
例题16.5-1 二元液体混合物质量扩散系数的推算	585
第十七章 固体和层流流动的浓度分布	590
* § 17.1 薄壳质量衡算：边界条件	592
* § 17.2 通过静止气膜的扩散	593
*例题17.2-1 扩散系数的测定	597
例题17.2-2 通过非等温球状膜的扩散	597
* § 17.3 伴有多相化学反应的扩散	599
*例题17.3-1 伴有慢速多相反应的扩散	602
* § 17.4 伴有均相化学反应的扩散	603
*例题17.4-1 搅拌槽中伴有化学反应的气体吸收	605
* § 17.5 下降液膜的扩散：强制对流传质	608
*例题17.5-1 上升气泡的气体吸收	612
§ 17.6 多孔催化剂内的扩散和化学反应：效率因子	613
第十八章 多组份系统的变化方程	627
* § 18.1 二元混合物的连续性方程	627
* § 18.2 曲线坐标系的 A 的连续性方程	631
§ 18.3 用通量表示的多组份变化方程	632
§ 18.4 用传递性质表示的多组份通量	637
§ 18.5 利用变化方程求解扩散问题	647
例题18.5-1 同时传热传质	647
例题18.5-2 热扩散	649

例题18.5-3 压力扩散	651
例题18.5-4 强制扩散	652
例题18.5-5 伴有非均相化学反应的三组份普通扩散	654
* § 18.6 二元等温流体混合物变化方程的因次分析	655
*例题18.6-1 互溶流体的混和	657
第十九章 多个自变量系统的浓度分布	670
§ 19.1 非定常态扩散	671
例题19.1-1 非定常态蒸发	671
例题19.1-2 伴有一级反应的非定常态扩散	676
例题19.1-3 伴有瞬时化学反应的气体吸收	677
§ 19.2 边界层理论: von Kármán近似方法	680
例题19.2-1 多组份混合物中的非定常态蒸发	681
例题19.2-2 沿可溶解平板的等温层流流动的扩散和化学反应 ...	685
§ 19.3 边界层理论: 热量、质量、动量同时传递的精确解	689
例题 19.3-1 传质速率计算	700
第二十章 湍流流动的浓度分布	710
* § 20.1 浓度脉动和时均浓度	710
* § 20.2 物质 A 连续性方程的时均化	711
§ 20.3 湍流质量通量的半经验表达式	712
例题20.3-1 光滑圆管湍流流动的浓度侧形	713
例题20.3-2 湿壁塔内氨的蒸发	714
§ 20.4 双重浓度相关量及其传播: Corrsin方程	717
第二十一章 多组份系统中的相际传递	721
* § 21.1 单相二元传质系数的定义	722
* § 21.2 低传质速率下单相二元传质系数的关联	727
*例题21.2-1 自由下降液滴的蒸发	733
*例题21.2-2 湿球和干球温度计	735
* § 21.3 低传质速率下两相二元传质系数的定义	738
* § 21.4 高传质速率下传递系数的定义	742
§ 21.5 高传质速率下的传递系数: 膜理论	744
例题21.5-1 纯液体的快速蒸发	754
例题21.5-2 液滴蒸发中校正因子的应用	754
例题21.5-3 高传质速率下的湿球温度	755

§ 21.6 高传质速率下的传质系数: 渗透理论	757
§ 21.7 高传质速率下的传递系数: 边界层理论	761
例题21.7-1 平板表面上的快速蒸发	765
§ 21.8 多组份系统的传递系数	766
例题21.8-1 固定床催化反应器中的传质	768
第二十二章 多组份系统的宏观衡算	777
* § 22.1 宏观质量衡算	778
* § 22.2 宏观动量衡算	780
* § 22.3 宏观能量衡算	780
* § 22.4 宏观机械能衡算	781
* § 22.5 利用宏观衡算解定常态问题	782
* 例题22.5-1 二氧化硫转化器的能量衡算	782
* 例题22.5-2 填料吸收塔高度	784
例题22.5-3 反应性气体混合物通过一个无摩擦绝热喷嘴的膨胀	790
§ 22.6 利用宏观衡算解非定常态问题	793
例题22.6-1 化学反应釜的开工	794
例题22.6-2 填料塔的非定常态操作	796
后言	808
附录A 矢量和张量表示方法提要	810
§ A.1 矢量运算的几何表示	811
§ A.2 矢量运算的解析表示	813
例题A.2-1 一个矢量恒等式的证明	817
§ A.3 矢量微分运算	817
§ A.4 二阶张量	822
例题A.4-1 一个张量恒等式的证明	827
§ A.5 矢量和张量积分运算	827
§ A.6 曲线坐标系中矢量和张量的分量	828
§ A.7 曲线坐标系中微分运算	833
例题A.7-1 圆柱坐标系下的微分运算	836
例题A.7-2 球坐标系下的微分运算	837
附录B 传递性质推算用表	843
表B.1 分子间力参数和临界性质	843
表B.2 推算低密度气体传递性质所用参数	846