

对流传热与传质

[美] W. M. 凯斯 M. E. 克拉福特 著

陈 熙 程殿春 译

1986

内 容 简 介

这是一本系统地论述对流传热与传质的解析与数值研究结果的专著。全书共十九章，分别论述层流与湍流外部边界层与管内的流动与传热、变物性传热、高速流传热、自由对流传热、对流传质的简化理论、守恒性质方程的求解以及传质驱动势的计算。

本书可供能源、化工、航天航空、机械制造、交通运输、冶金、建筑、核反应堆工程、电子、电工等工业部门中关心对流传热与传质问题的科技人员参考，也可作为工程热物理及相近专业的研究生及高年级大学生课程的教科书或教学参考书。

中译本自第十章开始的后半部分由翟殿春翻译，前半部分由陈熙翻译。

W. M. Kays and M. E. Crawford
CONVECTIVE HEAT AND MASS TRANSFER
(Second Edition)
McGraw-Hill Book Company, 1980

对流传热与传质

[美] W. M. 凯斯 M. E. 克拉福特 著

陈熙 翟殿春 译

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年3月第一版 开本：787×1092 1/32

1986年3月第一次印刷 印张：16 7/8

印数：0001—4,000 字数：370,000

统一书号：15031·706

本社书号：4368·15-10

定价：3.95 元

第 二 版 序

在六十年代初准备出版本书的第一版时，对流传热技术与科学正进入可以称之为第二阶段的时期。第一阶段几乎完全是靠把有关的变量化为对所有的传热工程师都很熟习的无量纲组合数来得出总体传热性能的实验关联式。第二阶段中，先建立基本现象的数学模型，然后再通过数学推理导出体系的传热性能，这方面的研究日益增多，这种研究大大扩大了分析人员与设计工作者处理新的复杂应用问题的能力，同时也增进了对于所涉及的现象的了解。本书第一版的主要目的是把这些分析方法与研究结果中的一部分收集在一起，以促进传热工程师们的日常使用，也许还为了促进以稍微不同的观点培训传热工程师的工作。

自本书第一版 1966 年出版以来，对流传热方面的两个相互紧密联系的发展正产生着重大的影响。大容量数字计算机，和新的更好的有限差分技术一起，已大大地排除了处理边界层型流动时的数学方面的困难，在湍流流动情形下，这一点特别有意义。在不再需要作数学方面的简化处理的情况下，人们可以集中注意力于输运过程的基本机理，从而使我们关于基本机理的知识和模拟它的能力得到大大改进。现在对各种各样的不同条件，以颇高的精度对层流与湍流两类边界层以及管流作常规计算，已经是可能而切实可行的了。

现在的问题是，较老的解析解法以及在特定边界条件下的经典解，还有对于更一般的边界条件它的许多近似解法是否还有什么作用？对于这个问题作者有两点答复。基于用计

计算机的方法的恰当使用,要求了解基本过程(至少以一般的方式)和在特定边界条件组合时的结果. 如果只靠计算机,难以得到这样的了解. 同样重要的事实是,很高百分比的工程传热问题并不要求能从计算机解中得到的那样高的精度与仔细程度,而是这样一些问题,其中要紧的是能得出快速而低花销的答案. 对于这样一些问题,基于使用计算机的有限差分解尽管精巧,但是过分费事. 出现过分费事的原因正在为研究者们不断地从经典的数值计算方法中排除,但在本书作者看来,要走的路程仍然很远,并且在任何情况下该路程大大随当地条件变化. 这是一个工程性判断的问题;一个工程师不但必须使正在设计的系统优化,而且必须对他或她自己的时间花费做出合适的选择.

在此第二版中,作者保持本书第一版的目的不变,同时使其反映现在的状况,在适当的地方则转移论述的重点;不过作者也试图提供有限差分方法的理论框架,推导有关的微分方程,并讨论适用于有限差解法的简单的湍流输运模型. 由于在计算机程序与模型发展方面的文献很多,作者在讨论时试图主要引用综述性文章.

象前一版一样,不可能什么内容都包括. 选择的问题和问题讨论的深度,反映了对于机械、航空或核工程领域的大约为五年级的学生什么最为重要的作者个人判断. 这一版中添加了关于自由对流的一章,同时关于表面粗糙度影响的讨论已大大扩充. 组织了几章以使关于层流与湍流流动的讨论完全分开,而关于湍流输运过程的处理已大大修改. 由于高阶湍流封闭模型仍在不断演化之中,本书中未加讨论. 最后应该强调指出,本书只处理二维边界层流动,并且只考虑单相体系.

最后,本书的第二作者 M. E. Crawford 要向 Kays 教授

表示感谢，他给了我很大荣誉，让我作为第二版的合作者。Kays 教授在教室里和其它地方教学的风格，以及他对传热学问题的处理途径使我永难忘怀。我也要感谢 Stanford 大学的 R. J. Moffat 教授，他教了我有关实验传热学以及如何作口头报告与写文章方面所知道的一切。最后，我还要对另外两位同事，即 Stanford 大学的 A. L. London 教授与 Massachusetts 理工学院的 J. L. Smith, Jr. 教授表示感谢，是他们教了我与传热学密切有关的热力学与解决工程问题的一般方法论的。

W. M. Kays

M. E. Crawford

第一版序

第二次世界大战以前，对流传热与传质很大程度上是一门经验性的科学，工程设计几乎完全靠用量纲分析在某种程度上予以通用化了的实验数据来加以完成。到目前为止的这二十年中，在发展对流分析的解析方法方面已经有了长足的进展，以致今天实验更多地起着检验理论模型的适用性的经典作用。这并不是说，直接的实验数据在工程设计上不再具有极其重要的作用，不过毫无疑问的是，完全依赖直接的实验数据的领域已大为缩小。随着这一变化，我们对于对流现象的了解已大为深入，以致今天我们能满怀信心地处理实验做起来既费时间又耗费金钱的问题。本书正是为反映这一发展趋势而撰写的。

大家公认，工程方面的学生必须学会从最基本的原理出发进行论述，以使她或他在面对新问题时不至茫然失措。但是如果解已经有了，还花费时间从最基本的原理出发来解决复杂的问题，那是时间的浪费。对流问题的解析解本身时常有长而难的趋向。因此，熟悉并理解某些最重要的、已有的对流解析解，应该是传热工程师的基础知识的一个重要的部分。本书的目的之一是以容易应用的形式，把许多边界层方程的解中的某一些收集在一起。虽然这些解可以在传文学文献中得到，它们并不总是容易为从事实际工作的工程师们所看到，因为对于他们说来时间是项重要的考虑因素。

作者感到，以合乎逻辑的顺序来研究这些解，也会给学生提供加深对于对流传热与传质的了解的最好途径。因此希

望,这本书既能作为课堂上的教科书,又能成为工程师们有用的参考书。

过去十年里,作者为补充给一年级研究生开设的为期一年的传热学课程的“对流”部分的教材写了一系列讲义,本书就是根据它们写成的。听这门课的研究生大多已经是机械、核工程和航空工程方面的工程师,他们对与热动力系统 & 热环境控制有关的问题感兴趣。

讲授时认为学生们已经具有应用热力学、流体力学与传热学方面的大学程度的典型的基础知识。虽然并非强制性的,传热学通常对于引导学生的思想与建立对问题作更深入研究的要求的意识方面有相当大的帮助。特别是,讲授时认为学生已对通常采用的计算对流传热率的经验方法有一定程度的熟悉,但只需使学生知道传热系数的有用性和对于对流过程的基本物理过程有某种程度的了解就够了。

论题材料的选择忠实地反映了作者自己的兴趣,而每一题目所讨论的深度则兼顾到在大约一学期(或二学季)内可能实际完成方面的考虑。读者将会发现,动量边界层方面的材料已大大压缩,只提供了为传热与传质章节讨论所需要的材料。希望主攻边界层理论的学生无疑将要修单独的粘性流体力学方面的课程,已经有该课程方面的教科书。确实还有比本书所提供的多得多的对流传热与传质方面的材料,不只在本书所考察的论题方面,还有许多论题本书甚至没有提到。属于这没有提及的论题的,读者可能会想到自然对流、换热器理论、旋转表面、非定常流动、两相流动、沸腾与凝结、非牛顿流体、内部产生辐射的气体、稀薄气体、磁流体动力学流动以及传热与传质之间的耦合这样一些论题。不过这只是说明,为什么书的第二版通常总是比第一版来得厚。

最后,我要感谢我的一些同事,没有他们自觉或不自觉的

帮助,本书决不可能写成。首先, A. L. London 教授教了我关于教学所知道的一切,引导我进入传热学领域,并且是经常的帮助与鼓励的来源。W. C. Reynolds 教授和我一起完成了综述于本书内的某些研究,其中相当大的部分是他单独工作的成果。在伦敦的帝国学院与 D. B. Spalding 教授一起所度过的几个月对作者是难得的幸运,他的影响在本书中到处可以找到,但最特别值得提到的是, Spalding 的对于对流传质问题的普遍化处理办法,构成了本书后三章的完整基础。虽然这一处理能在 Spalding 的许多文章中找到,但作者希望,本书收入这些内容能促进它的更广泛的应用。最后我要感谢 R. J. Moffat 先生,他读了手稿并提出了许多有益的建议。

W.M. Kays

致使用本书的教员

关于学习大学高年级或研究生水平课程的学生应该做的家庭作业的类型以及习题的叙述方式，本书作者有颇为强烈的感受。做各种各样的习题是熟悉工程分析的有效途径，这一思想是无需怀疑的。但是实际的工程问题本身并不表现为一系列简洁组织起来并很好加以说明了的练习题。在某个时候，并且愈早愈好，学生必须面对这样一些问题的分析，它们可能需要相当多的时间，可能超出了学习的范围，并且它们未完全叙述或未完全说明，从而必须运用个人的判断。尤其重要的是，学生必须抛弃这样的思想习惯，即工程分析的最后结果仅仅是一个正确或不正确的数字答案。

在工程课程中采用长而综合性习题的困难在于学生的时间有限，只能留较少的习题，从而通常不可能用这一类练习方式包括论题的许多方面。如果想以习题作为其它学习方法的有意义的补充，则教员必须在选择习题时极为小心。

进一步的困难在于，如果要使习题充分发挥其作用，必须对这些习题加以阅读和给予建设性的批评。对教员说来，这就要比仅仅检查答案做更多的工作。

许多章节的末尾选列了习题，以提供给学生较短的练习或是给长得多的作业的选择余地，这些长作业中的许多个看作是研究题目而不是习题可能更为适当。大多数习题作者都在班级里采用过，不过在任何一个班级里都只采用其中的一部分。较长的和较短的习题类型作者都选用了，其中某些反映工程应用，而另一些则为基本分析类型，借以加深对课文中

所描述的各种推导的了解。两种情形下都应该鼓励学生的主动性，鼓励他们改变习题的参量，采用与讲授时建议的不相同的方法，以及通过参考期刊上的文章与研究报告来对作业加以补充。

许多习题需要用数值积分或图解积分，或迭代计算方法。这些方法带来的心理上的障碍应尽早铲除。虽然所有情形下手算是完全可行的，但工科大学生在他们教育的这一阶段已学习过如何使用计算机；如果他们已接触过计算机，他们应该逐渐养成在完成习题时使用它的习惯。实际上可编程序的手动计算器对任何一道习题都已十分合适。

工程分析如果要能有用的话，不只必须回答某些特殊的问题，而且必须以清楚的方式告诉读者得出答案所遵循的思路以及推导过程中所作的抉择，并且必须考虑答案的适用性与实际意义。复杂问题分析的细心而简洁又有条理的叙述，有助于发展清楚的思维。含混不清或粗浅的思想在必须向读者进行透彻的解释时会突出地表现出来。作者坚持他们的学生必须以可称为“技术论文”的格式来写他们的习题解答，这要满足如下的规则：

(1) 叙述该题的目的，以简洁的方式但要包括所有有关的资料。

(2) 如果的确是在分析一个实际体系，则要画出系统图。

(3) 从所述的基本原理、定义、假说或假定出发，或从专门命名的基本方程出发，进行分析。

(4) 对分析附加语言描述性材料，以使每一步都容易懂，但省去所有的算术运算及明显的代数运算。

(5) 以讨论及某些特殊结论作为分析的结束。

对于只习惯于作数字练习的工科学生说来，开始时第(5)

项通常有显得贫乏的倾向。但在几次尝试后，习题的这一部分无论在质量或数量方面都会有令人惊奇的长进，特别是在学生因有意义的讨论而得到充分褒奖时情况更是如此。工科大学生中语言能力的明显不足，很大程度上是由于缺少实践，也由于在一个他们能胜任工作的领域中、在他们的想法可为分析中所产生的事实与数字所替代时人们很少要求他们写什么的缘故。写讨论以及预先知道必须把分析过程写出来，能使整个推导过程得到渲染，也能对改变习题参量、研究其它解法以及查阅期刊文献与补充材料的能动性的发挥提供推动。最终结果可能增加许多工作量，但在处理适当时，这一类解题经验的效益可能是极大的，特别是如果采用综合性的、可扩展的习题时，存在着多种多样的选择与发挥能动性的机会，情况就更是如此。这时达到的理解深度，是做做数字练习以及为应付考试而读书所难以达到的，同时其影响会带入到实验室报告、毕业论文，并有希望带人他们将来的工程实践中去。

W. M. Kays

M. E. Crawford

目 录

第二版序	ix
第一版序	xii
致使用本书的教员	xv
符号表	xviii
单位换算表	xxvi
第一章 导论	1
第二章 守恒原理	5
§ 2.1 控制体	5
§ 2.2 质量守恒原理	5
§ 2.3 动量定理	6
§ 2.4 能量守恒原理	7
第三章 流体应力与通量定律	10
§ 3.1 粘性流体应力	10
§ 3.2 傅里叶热传导定律	12
§ 3.3 费克扩散定律	14
§ 3.4 输运性质的无量纲组合	17
§ 3.5 湍流输运系数	18
参考文献	18
第四章 边界层的微分方程	20
§ 4.1 边界层概念	20
§ 4.2 连续方程	22
§ 4.3 动量方程	25
§ 4.4 质量扩散方程	29
§ 4.5 能量方程	34

§ 4.6 湍流边界层的方程	45
习题	51
参考文献	52
第五章 边界层的积分方程	53
§ 5.1 动量积分方程	53
§ 5.2 排量厚度与动量厚度	56
§ 5.3 动量积分方程的其它形式	58
§ 5.4 能量积分方程	60
§ 5.5 焓厚度与传导厚度	62
§ 5.6 能量积分方程的其它形式	63
习题	65
参考文献	66
第六章 动量传递: 管内层流流动	67
§ 6.1 圆管内充分发展的层流流动	67
§ 6.2 其它横截面形状的管内充分发展的层流流动	71
§ 6.3 层流水力进口段长度	76
习题	78
参考文献	79
第七章 动量传递: 外部层流边界层	80
§ 7.1 相似性解: 常物性和恒定自由流速度时的层流不可 压缩边界层	80
§ 7.2 $\mu_0 = Cx^m$ 时的层流不可压缩边界层的相似性解	88
§ 7.3 $\nu_0 \approx 0$ 时的层流不可压缩边界层的相似性解	90
§ 7.4 非相似动量边界层	92
§ 7.5 由动量积分方程导得的恒定自由流速度时的层流边 界层近似解	93
§ 7.6 旋成体上自由流速度任意变化时的层流边界层近似 解	95
习题	98
参考文献	99

第八章 传热：管内层流流动	101
§ 8.1 关于通过圆管流动的能量微分方程	102
§ 8.2 具有充分发展的速度与温度剖面的圆管	103
§ 8.3 具有充分发展的速度与温度剖面的非对称加热的同心圆管套	113
§ 8.4 具有充分发展的速度与温度剖面的非圆形横截面管的解	117
§ 8.5 圆管的热进口段长度解	121
§ 8.6 矩形截面管与同心管套的热进口段长度解	131
§ 8.7 表面温度轴向变化的影响	134
§ 8.8 热通量轴向变化的影响	143
§ 8.9 组合水力进口段与热进口段长度	146
习题	149
参考文献	154
第九章 传热：外部层流边界层	155
§ 9.1 沿定温半无限大平板的恒定自由流速度的流动	156
§ 9.2 沿定温半无限大平板的 $u_{\infty} = Cx^m$ 流动.....	162
§ 9.3 沿具有吹出或吸入的定温半无限大平板的流动	165
§ 9.4 非相似热边界层	167
§ 9.5 沿具有未加热起始长度的半无限大平板的恒定自由流速度的流动	168
§ 9.6 沿具有任意指定的表面温度的半无限大平板的恒定自由流速度的流动	172
§ 9.7 沿具有任意指定的表面热通量的半无限大平板的恒定自由流速度的流动	175
§ 9.8 任意形状的定温物体上的流动	177
§ 9.9 任意形状且具有任意指定的表面温度的物体上的流动	181
§ 9.10 具有边界层分离的物体上的流动.....	182
习题	184

参考文献	187
第十章 动量传递：湍流动量边界层	189
§ 10.1 层流边界层向湍流边界层的过渡	189
§ 10.2 湍流边界层的定性结构	192
§ 10.3 湍流扩散率的概念与湍流粘性系数	194
§ 10.4 普朗特混合长度理论	195
§ 10.5 壁面附近切应力分布	199
§ 10.6 关于 $p^+ = 0.0$ 与 $v^+ = 0.0$ 情况下的壁面定律	200
§ 10.7 动量边界层的近似解	204
§ 10.8 平衡湍流边界层	207
§ 10.9 散逸湍流边界层	211
§ 10.10 连续壁面定律：Van Driest 模型	214
§ 10.11 完全混合长度理论的概述	217
§ 10.12 表面粗糙度的影响	219
§ 10.13 轴向压力梯度的影响	222
§ 10.14 高级湍流模型	223
习题	225
参考文献	229
第十一章 动量传递：管内湍流流动	231
§ 11.1 圆管内充分发展的流动	231
§ 11.2 其它横截面形状管内的流动	235
§ 11.3 表面粗糙度的影响	236
习题	238
参考文献	239
第十二章 传热：湍流边界层	240
§ 12.1 传热的湍流扩散率概念与湍流传导系数	240
§ 12.2 雷诺比拟	241
§ 12.3 热边界层的壁面定律	243
§ 12.4 恒定自由流速度与定壁温时沿半无限大平板的传热 解	248

§ 12.5	沿具有未加热起始长度的半无限大平板的恒定自由 流速度的流动·····	250
§ 12.6	沿具有任意指定的表面温度的半无限大平板的恒定 自由流速度的流动·····	254
§ 12.7	沿具有任意指定的表面热通量的半无限大平板的恒 定自由流速度的流动·····	254
§ 12.8	具有任意变化的自由流速度和表面温度的轴对称物 体·····	255
§ 12.9	散逸湍流边界层·····	259
§ 12.10	膜冷却·····	263
§ 12.11	湍流普朗特数·····	265
§ 12.12	完全混合长度理论的概述·····	270
§ 12.13	表面粗糙度的影响·····	271
	习题·····	273
	参考文献·····	277

第十三章 传热：管内湍流流动····· 279

§ 13.1	具有充分发展的速度剖面与温度剖面、定热流率、普 朗特数为 1.00 左右的圆管内湍流流动·····	281
§ 13.2	具有充分发展流动与较高普朗特数的圆管·····	288
§ 13.3	很低普朗特数时的传热与液态金属·····	289
§ 13.4	具有充分发展的速度剖面与温度剖面及定表面温度 的圆管·····	293
§ 13.5	周向热通量变化的影响·····	295
§ 13.6	平行平板之间和同心管套中的充分发展湍流流动··	297
§ 13.7	其它几何形状管子中的充分发展湍流流动·····	304
§ 13.8	管内流动的经验关系·····	307
§ 13.9	圆管内湍流流动的热进口段长度·····	308
§ 13.10	平行平板间湍流流动的热进口段长度·····	314
§ 13.11	表面温度与(或)热通量轴向变化的影响·····	315
§ 13.12	圆管内水力与热的组合进口段长度·····	317

§ 13.13 表面粗糙度的影响	320
习题	321
参考文献	324
第十四章 流体物性依赖于温度时的影响	326
§ 14.1 管内层流流动: 液体情形	329
§ 14.2 管内层流流动: 气体情形	330
§ 14.3 管内湍流流动: 液体情形	331
§ 14.4 管内湍流流动: 气体情形	332
§ 14.5 外部层流边界层: 气体情形	334
§ 14.6 外部湍流边界层: 气体情形	339
习题	340
参考文献	340
第十五章 高速对流传热	342
§ 15.1 滞止焓方程	345
§ 15.2 对于 $Pr = 1$ 的流体的高速热边界层	348
§ 15.3 对于 $Pr \neq 1$ 情形的常物性层流边界层	351
§ 15.4 对于变物性气体的层流边界层	355
§ 15.5 参考物性对高速层流边界层计算的应用	360
§ 15.6 对于变物性气体的湍流边界层	362
§ 15.7 高速湍流边界层计算用的参考物性	366
§ 15.8 可变自由流速度与可变温差的马赫数与大温差校正	366
习题	367
参考文献	370
第十六章 自由对流边界层	371
§ 16.1 自由对流的边界层方程	372
§ 16.2 相似性解: 定温半无限大垂直平板上的层流流动 ..	373
§ 16.3 变表面温度时的相似性解	378
§ 16.4 壁面有吸入或吹出时的相似性解	379
§ 16.5 近似积分解: 定温半无限大垂直平板上的层流流动	