

对·流·换·热

★ V. S. 阿巴兹 P. S. 拉森 著
★ 顾传保 罗棣庵 李心桂 译



高等教育出版社

72.54
284.1

[美] V.S. 阿巴兹 P.S. 拉森

对流换热

顾传保 罗棣庵 李心桂 译

(4. 1. 2)

EK445/10

高等教育出版社

(京) 112号

内 容 提 要

本书系根据美国密歇根大学(University of Michigan)机械工程系教授 V. S. 阿巴兹(Vedat S. Arpaci)和丹麦工业大学(Technical University of Denmark)教授 P. S. 拉森(Poul S. Larsen)所著《对流换热》(*Convection Heat Transfer*)一书1984年版译出。

全书共分四部分,分别讲解:对流换热的数学描述的一般方法;建立积分数学描述和微分数学描述的具体方法,分析平行流动和边界层流动;对流问题的各种解法,包括相似变换、周期性对流及对流换热的数值计算方法;结合湍流模型,利用前面的基础知识,解决工程实际中常见的湍流换热问题。

与目前国内一般传热学教科书相比,本书独具特色,理论性、系统性强,并有大量具有启发性的例题和习题。对当今对流换热研究的一些发展也作了简要的介绍。

全书共 12 章,书末有附录及索引。

本书可作为高等学校热能、化工、航空和核工程等有关专业的研究生传热课程的参考书,也可供有关科技工作者参考。

对 流 换 热

[美] V. S. 阿巴兹 P. S. 拉森

顾传保 罗棣庵 李心桂 译

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

民族印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 21 字数 500 000

1992 年 5 月第 1 版 1992 年 5 月第 1 次印刷

印数 0001—2 115

ISBN7-04-001084-4/TH·170

定价 12.95 元

译 者 序

本书系根据美国密歇根大学 (University of Michigan) 机械工程系教授 V.S. 阿巴兹 (Vedat S. Arpaci) 和丹麦工业大学 (Technical University of Denmark) 教授 P.S. 拉森 (Poul S. Larsen) (原在密歇根大学任教) 所著《对流换热》(Convection Heat Transfer) 一书1984年版译出。

作为一本专门讲述对流换热的教科书, 本书的宗旨是让读者学会数学描述和求解对流换热问题。为达此目的, 作者精心设计了大量的具有启发性的例题和习题。而这正是其它类似的教科书的不足之处。

全书分四部分, 第一部分介绍对流换热的数学描述的一般方法; 第二部分讲解建立积分描述和微分描述的具体方法, 分析平行流动和边界层流动; 第三部分讲对流问题的各种解法, 包括相似变换、周期性对流及对流换热的数值计算方法; 第四部分运用前三部分的基础知识, 结合湍流模型, 解决工程实际中最常见的湍流换热问题。

译者认为, 本书是一本较好的教学参考书, 它可作为热能、化工、航空和核工程等有关专业的大学研究生传热课程的参考书, 也可供这些领域的科技工作者和教师作为进修提高的教材。

本书由顾传保(第一、二、五、六、七和十二章), 罗棣庵(第八、九、十、十一章)和李心桂(第三、四章及附录)共同翻译。限于译者水平, 译文错误不当之处在所难免, 尚祈读者不吝指正。

译 者

1987年10月

43637

前 言

在这本教科书中我们以清晰易懂的方式讲述对流换热，这些都是以往 20 年中我们的学生及同事们在对流换热的教学中共同获得的心得体会。本书的宗旨、基本上和几年前作者之一编写的另一本教科书《热传导》(阿巴兹著, 1966 年)的宗旨一样，是向读者讲述数学描述和求解对流问题的方法。

全书分四部分。第一部分先介绍传热基础和复习必要的力学和热力学概念(第一章)，然后应用普遍原理、局部平衡、本构关系和控制方程推出一个建立数学描述的一般方法(第二章)。这一部分的独到之处在于运用比特性量 b 推导了普遍原理的微分和积分表达形式，并揭示了局部平衡假设的必要性。

在第二部分推出一个由六个步骤组成的建立积分和微分描述的具体方法，并用它分析了平行流动(第三章)和近似平行(即边界层)流动(第四章)。这一部分体现了本书的宗旨。我们认为，对物理现象的透析，并结合一定的分析简化，将提供一条捷径，使我们能直接到达复杂问题的核心，并求得直接而简明的解答——我们不主张采纳那些为了自身的完善而得出的任何复杂形式的解答。第二部分的显著特点是穿透深度和容积增加这两个概念的引入以及它们在许多问题中的应用。我们强调了这样一个事实(不仅在这一部分而且在全书中)，即积分法是解决工程问题的一个重要工具。

第三部分讲解最常用的求解非线性对流问题的解法。第五章讨论相似变换，第六章讨论周期性对流，第七章讲述数值计算方

法。这一部分的不平常之处是把量纲分析应用于相似变换，清楚地阐明周期性扰动的响应的直流分量和交流分量的物理意义，以及有限差分法和有限元法之间的比较。

虽然本书的前三部分讨论的是一般推导和层流流动问题，但是在讲述对流基础和层流问题的复杂的数学分析的同时，我们也无意忽视实际流动都是湍流的这一事实。然而，因为湍流问题的性质复杂，把它和对流的其它方面的问题同时研究是不切实际的。因此，我们应该把前三部分看成是学习基础知识（利用一些简单的，可是在相当大的程度上是并不真实的层流流动问题）的合理阶段，而把第四部分看作是这些基础知识（结合一个湍流模型）对实际流动问题的应用。

第四部分的前两章的目的是加深对湍流的理解。第八章讨论湍流的起源（不稳定性）和湍流的（随机理论或统计理论）基础。无论是稳定性理论还是统计方法都不能彻底地分析湍流问题，因此编写第八章的本意是作为对湍流起源和湍流基础的述评。第九章引入湍流的积分尺度和微小尺度，并运用这些尺度研究动能频谱和热能频谱的平衡范围。第十章讨论流动计算，第十一章讨论传热计算。在这两章中，我们的目的是求得对流问题的速度分布，温度分布以及传热量。最后，第十二章运用量纲分析讨论实验数据的整理，并运用第九章中所讲的尺度解释那些迄今已被采纳的传热经验关联式。

撇开一些为了完整的目的而需要的经典例题，本书所分析的极大多数例题和留作学生家庭作业的习题都是我们自己的创作。总的来说这些例题都被设计成本书正文的补充和延伸。冒着被批评为不完全的风险，而抱着能引导学生今后有所发现的希望，我们在书中加进了一些高级的但不完整的例题和习题。

除了少数例外，读者所需要的工程背景是通常的大学流体力

学,热力学,传热学和高等微积分学课程。由于篇幅的限制,我们有意不用圆柱坐标和球坐标。读者将直角坐标系中的例题改用其它坐标系进行数学描述是不应有什么困难的。

我们本来也想在本书中包括更广泛的论题(如流变学,传质,磁流体力学,分离流动,高速流动和稀薄流动),但是终于没有这样做,因为我们相信把较少的论题讲深讲透比泛泛地、不深入地全面综述要好。

在一本包含许多不同论题的教科书中,在选用术语符号时会有一些麻烦。为了在全书中保持一致的符号我们已作了很大努力。然而,为了照顾一些习惯用法,我们只好用 h 既表示焓又表示换热系数,用 u 既表示 x 方向的速度又表示内能。此外,在运用无量纲数运算时,用了一个字母的符号,而在用关联式计算时,我们用了两个字母的符号①。

本书最初是为密歇根大学机械工程系研究生编写的传热学入门教程,这一版是在它的基础上经过一系列修订以后的结果。多年来,由于这门课程的基础性,它也吸引了许多航空、化学和核能工程系的学生。

本书包含的内容要比一学期的课程所能容纳的多。这样做的目的是为了激发一些学生的求知欲,他们往往对课程最低要求以外的高级内容感兴趣,另一方面也给讲课教师留下选择教材的灵活性。

对于典型的美国的工学院中的对流换热的一学期研究生课程,我们建议采用如下教学大纲:

——省略第一章和第二章。

——集中讲第三章和第四章。省略第三章中讨论三种经典解法的内容(分

① 中译本统一用两个字母符号——译者注。

离变量法,拉普拉斯变换法和变分法);这些方法适用于线性对流问题以及导热问题,但用于非线性对流问题不方便;它们是写给那些对分析解法有更大兴趣的读者的。阅读第 4.6 节;考察这一节的图,了解非平行流动随雷诺数或瑞利数的变化特性。

——学习第五章,学会对流问题的最常用,最经典的解法。

课程的下一部分有两种讲法,第一种包括第六,八,九和第十二章,第二种由第七,第十和第十一章组成。第一种讲法着重定性(直观)分析方法:

——学习第六章,了解摄动法求解湍流问题的局限性。

——阅读第八章,了解湍流的起源和基础。

——集中学习第九章,了解湍流的尺度。

——学习第十二章,运用这些尺度探讨传热关联式的基础。

第二种讲法着重计算方法:

——学习第七章,学会层流问题的数值解法。

——学习第十和第十一章,掌握一方程和二方程湍流模型。

我们非常感谢明尼苏达大学的 E. M. 斯帕罗(E. M. Sparrow)教授的支持,并感谢伊利诺依大学的 M. M. 陈(M. M. Chen)教授和俄亥俄州立大学的 S. 考普拉(S. Korpela)教授对本书初稿所提的建设性意见。

密歇根州安阿伯

丹麦林拜

V. S. 阿巴兹(Vedat S. Arpaci)

P. S. 拉森(Poul S. Larsen)

目 录

第一部分 一般方程的建立	1
第一章 引言和概念	1
1.1 连续介质研究法和粒子研究法	2
1.2 层流对流和湍流对流	3
1.3 流体特性量在某点处的变化率 (三种时间导数)	7
1.4 控制体中流体特性量的时间变化率 (雷诺输运公式)	11
1.5 位移变化率(某点附近的速度)	16
1.6 应力状态(体积力和表面力)	22
参考文献	24
第二章 控制方程的推导	26
2.1 普遍原理	26
2.1.1 统一方法	28
2.1.2 积分数学描写和微分数学描写	31
2.1.3 混合数学描写: 一个例子	41
2.2 热力学关系式	43
2.2.1 吉布斯关系式	44
2.2.2 其它热力学关系式	45
2.2.3 用温度表示的热能平衡方程	46
2.2.4 熵产	48
2.2.5 混合数学描写: 一个例子	48
2.3 本构关系式	50
2.3.1 应力和压力	51
2.3.2 线性粘性流体中的应力	52
2.3.3 热通量	58

2.3.4 状态方程.....	58
2.4 控制方程组.....	59
2.4.1 粘性流动.....	60
2.4.2 自然对流(浮升力驱动 的流动).....	64
2.4.3 涡量输运.....	67
2.4.4 势流.....	72
参考文献和补充读物.....	74
习题.....	78

第二部分 具体问题数学方程的建立(层流)79

第三章 平行流动..... 84

3.1 二维平行流动.....	84
3.2 “容积增加”与“穿透深度”.....	90
3.3 耗散效应.....	112
3.4 浮升力驱动的自由流动.....	114
3.5 热边界层.....	126
3.6 充分发展的对流换热.....	158
参考文献.....	164
习题.....	165

第四章 近似平行(边界层)流动..... 173

4.1 近似平行流动.....	173
4.2 动量边界层.....	184
4.3 动量边界层和热边界层.....	198
4.4 相变.....	219
4.5 准稳态近似和准发达近似.....	234
4.6 非平行(循环)流动.....	252
参考文献.....	257
习题.....	259

第三部分 解法..... 270

第五章 相似变换..... 271

5.1 相似变换的由来.....	271
5.2 相似变换和量纲分析.....	273
5.3 边界层问题的相似解法.....	278

5.4 非相似边界层	309
参考文献	312
习题	313
第六章 周期性的对流	
6.1 方法的由来——线性问题	315
6.2 非线性效应	323
参考文献	332
习题	333
第七章 计算对流	336
7.1 有限差分法和有限元法	337
7.2 常微分方程	356
7.3 抛物型偏微分方程	367
7.4 椭圆型偏微分方程	386
参考文献	415
习题	417
第四部分 湍流	421
第八章 不稳定性与湍流	422
8.1 不稳定性的基础	422
8.2 流动的不稳定性	427
8.3 雷诺应力	432
8.4 雷诺应力的涡流解释	437
8.5 湍流的统计描述	440
8.6 均匀的各向同性的湍流	444
8.7 频谱动力学	448
参考文献	451
习题	452
第九章 运动的和热的尺度及频谱	456
9.1 平均流动和脉动的动能	456
9.2 湍流的尺度	461
9.3 湍流模型	466
9.4 雷诺通量和热尺度	470

9.5 自然对流的尺度·····	480
9.6 运动的和热的平衡频谱·····	485
参考文献·····	493
习题·····	494
第十章 流动的计算 ·····	497
10.1 湍流的一些特性·····	500
10.2 代数模型·····	508
10.3 一方程模型·····	530
10.4 二方程模型·····	539
参考文献·····	547
习题·····	550
第十一章 传热的计算 ·····	553
11.1 热量与动量之间的类比·····	554
11.2 代数模型·····	560
11.3 一方程和二方程模型·····	575
11.4 浮升力驱动的对流·····	580
参考文献·····	588
习题·····	590
第十二章 量纲分析 ·····	592
12.1 量纲分析的基本知识·····	592
12.2 单长度对流问题·····	603
12.3 双长度层流对流问题·····	612
12.4 三长度湍流对流问题·····	619
参考文献·····	623
习题·····	624
附录 ·····	628
附录 A 向量和直角坐标张量的一些计算式·····	628
A.1 记法和基本表示式·····	628
A.2 带有微分算符的表示式·····	629
A.3 其它乘积和运算·····	630
附录 B 流量和通量的表示方法·····	632

附录 C 圆柱坐标和球坐标.....	633
C.1 圆柱坐标.....	633
C.2 球坐标.....	636
附录 D 一些无量纲数.....	638
附录 E 四种流体的热物理性质.....	639
例题索引.....	640
索引.....	644

第一部分 一般方程的建立

第一章 引言和概念

研究热的科学,如传热学或气体动力学,出发点总是力学和热力学,此外还需要工质特性和结构方面的资料。例如,气体动力学除了力学和热力学一般原理之外,还需要气体的状态方程。而传热学还需要另外两个本构关系式,这两个关系式区分着两种基本的传热方式,即热扩散(亦称导热)和辐射。

从现象学的观点看,热扩散现象是热量从介质的高温区传递到邻近低温区的经验验证。从微观观点看,热扩散的机理可看作是或被假设为相邻粒子之间交换能量的一种方式。因此,热扩散是一种局部的,有方向的,不可逆的,而且是只能通过物质发生的现象。辐射现象则是电磁波和电磁波携带能量(传送热量)的经验验证。从微观观点看,辐射的机理是辐射粒子(辐射量子,光子)传递能量。因此,辐射是全方位的,超距作用的,当它通过真空发生时是可逆的(图 1.1)。

从概念上讲,对流不是传热的基本方式,而是运动介质中的热扩散和(或)热辐射。因此,在对流传热研究中流体力学占有重要地位。仅仅是为了遵照习惯,在本书中我们把运动着的(或静止的)刚性介质中的热扩散称为导热,而把运动着的可变形介质中的热扩散和(或)热辐射称为对流。导热问题已由文献[2]论述。本书

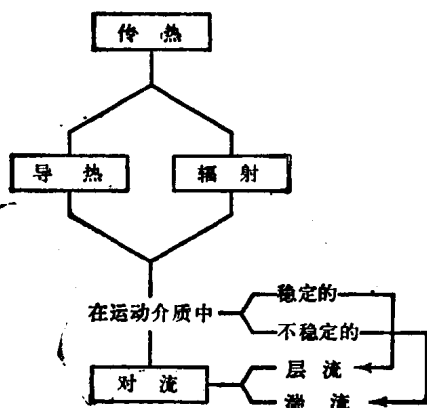


图 1.1 传热的两种方式与对流

专门讨论对流问题,但带有热辐射的对流问题需要单独讨论,本书将不予涉及。

1.1 连续介质研究法和粒子研究法

上一节我们按现象学观点和微观粒子观点描述了传热的基本方式。两种不同的观点产生出有关传热的两种不同的研究方法。按现象学研究法,介质被假设为连续的,即介质粒子的平均自由行程与介质中的其它尺寸相比是很小的,因而采用统计平均(即整体分析)是可能的。在微观研究法即粒子分析法中,假设介质由大量粒子组成,不可能对粒子行为作统计平均,或者即使可能,也没有必要。实际上,对于具有某种空间分布的粒子结构的介质,一个非常一般而合理的描述方法照理应该是列出每个粒子的一般原理表达式。如果在时间和空间上求解这个多粒子系统,然后把所期望的连续概念和粒子行为关联起来,显然也会求得用连续介质方法得

到的结果。

之所以并不经常采用粒子研究法，除了在数学上的困难和分子内力的不确定性之外，主要是因为个别粒子的行为没有什么特别的意义。相反，正如极大多数工程问题那样，要求知道的是介质作为一个整体表现的状态和行为，例如介质的温度和速度的变化情况。对于这些问题，应用连续介质概念显然是很方便的。当然，有些问题采用一种方法可能较之用另一种方法更为便利，但对于大多数问题，两种方法都能方便地使用。至于选择哪一种方法，则取决于以往的经验或研究者个人的信心。从物理意义上讲，这两种方法的唯一差别仅在于对粒子结构的平均过程是在分析之前还是在分析之后进行，也就是说，是先做统计学分析还是先做热力学分析。

本书中我们的兴趣不在于众多粒子的各自行为，而在于它们在时间和空间上的平均效应，也就是说，我们将采用连续介质研究法来分析对流换热问题。

1.2 层流对流和湍流对流

作为运动介质中的热扩散过程，对流换热可以按照著名的雷诺实验分类(图 1.2)。由图 1.2 可见，对流可分为稳定(即层流)和不稳定(即湍流)两种。我们在本书第二部分先通过几个简单的、可能存在的，但在工程上不常见的层流对流问题学习对流换热的基础知识。在第四部分推导湍流对流模型，并利用这些模型研究工程上最常见的湍流对流换热问题。

图 1.3 表明了热科学的各个经典学科的划分和它们各自所研究的运动形式，从中可见对流换热学研究的是粘性不可压缩流体

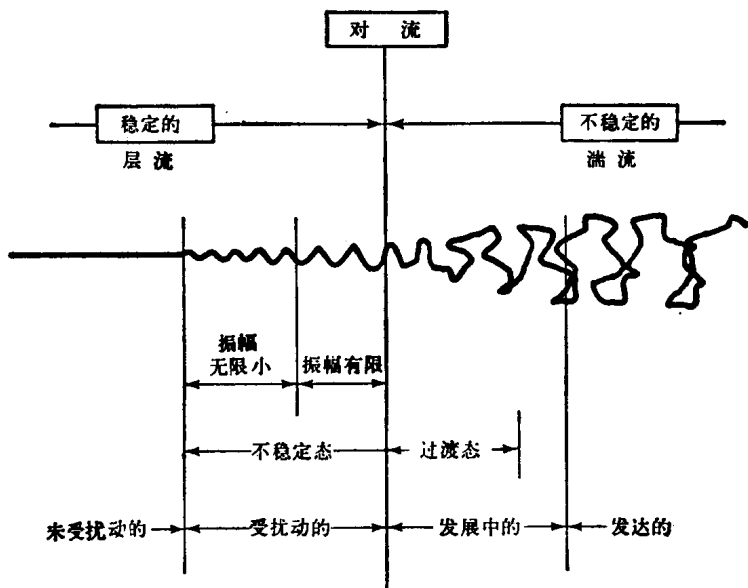


图 1.2 雷诺实验;对流的流形

流动,而气体动力学研究的是无粘性可压缩流体流动。

对流换热通常发生在固体-流体交界面上(图 1.4),因此固体内导热和流体中的对流必定同时发生。但是我们还无力求解这种耦合问题,所以要把它沿交界面人为地分成导热问题和对流问题,然后用较简单的,多少有点人为的边界条件取代真实的交界面边界条件,分别独立地求解每个问题。本书就是讲述实际问题的对流部分。

通过固体-流体交界面的传热量定义为对流换热量。单位面积,单位时间的对流换热量可按牛顿冷却定律用换热系数 h 表示成

$$q_w = h(T_w - T_\infty) \quad (1.2.1)$$

式中 $T_w - T_\infty$ 为交界面温度和流体温度之差,热通量 q_w 也可以用