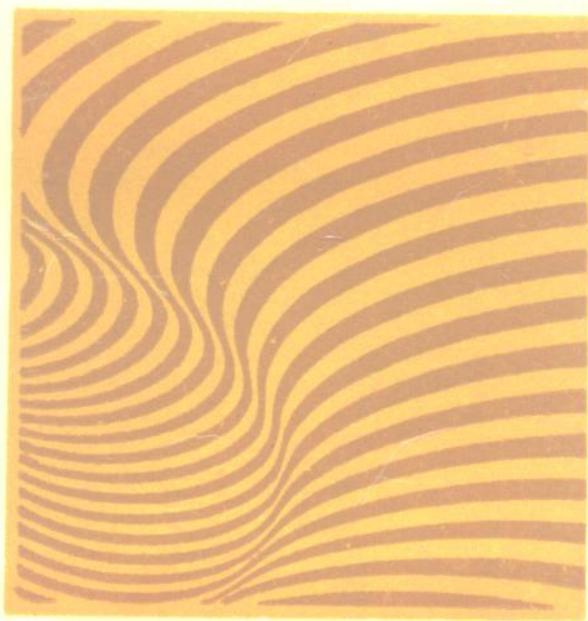


流动及燃烧的 模型与计算

范维澄 万跃鹏 编著



中国科学技术大学出版社

330

国家教委工程热物理专业教材委员会推荐教材

流动及燃烧的模式与计算

范维澄 万跃鹏 编著

(ZK460/15)

ZK445/09

中国科学技术大学出版社



(皖)新登字08号

流动及燃烧的模型与计算

范维澄 万跃鹏 编著

*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号, 邮编230026)

安徽省金寨县印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

*

开本: 850×1168/32 印张: 13 字数: 334千

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数: 1—2000册

ISBN7-312-00332-X/O·105 定价: 8.50 元

内 容 简 介

本书系统地介绍流体流动及燃烧过程的数值计算中所涉及的数学模型，并着重讲述计算中被普遍采用的有限差分方法。

全书共分八章。前三章是预备性知识，包括流动与燃烧的基本方程以及层流燃烧现象的求解过程；第四章至第六章是数学模型部分，其中有工程中使用较为广泛的湍流流动模型，湍流燃烧模型及辐射换热模型；第七章集中讨论数值计算方法中的有限差分方法；最后一章是前述模型与方法的应用说明。

本书可供教学、科研和工业部门从事传热、传质、流体流动及燃烧等有关过程工作的教师、工程技术人员与科研人员参考，也可用作大专院校有关专业的研究生与高年级本科生的教材。

前 言

本书系国家教委工程热物理专业教材委员会的推荐教材，主要教学对象是高年级本科生、硕士和博士研究生。

流体流动、传热传质和燃烧过程广泛存在于自然界和人们制造的装置之中，这些过程常常共存并相互影响，例如，没有哪一种燃烧过程不伴随着流体流动和传热传质。然而，每一种过程又都有它的特色和规律。基于这样一种认识，本教材着重阐述流体流动和燃烧过程的理论和计算，同时也涉及燃烧过程数值计算中无法回避的传热模型和计算。这正是近十年来在我国兴起的计算燃烧学的主要内容。在本书的叙述中，将不区分“计算燃烧学”和“流动及燃烧过程的理论和计算”。

计算燃烧学是在燃烧理论、计算机技术和数值方法等学科的交叉点上生长起来的一门应用基础科学，它的中心内容是论述对燃烧过程进行计算机模拟的思想、理论和方法。从它出现至今的20多年的研究实践表明，计算燃烧学促进了燃烧学和邻近学科的繁荣，促进了燃烧装置研究、设计和试验的优化。

开拓学科、传播知识和培养人才是发展科学的重要环节。在我国计算燃烧学开拓前进的10多年时间里，已发表了数本专著和几百篇论文，举办过数次讲习班和研讨会，培养了一批研究人员。这就使得在高等学校工程热物理及其邻近专业普遍开设计算燃烧学课程不但十分必要而且完全可能。这正是本书编写的基础。

计算燃烧学无论在世界还是在我国都仍处在蓬勃发展的旺盛时期。作为一本教材要能反映学科的进展，体现当代科学的水平。但是，教材不同于专著，它侧重于阐述已经在实践中检验过的相对较

2. 4. 9

42540

为成熟的内容，而不过多地介绍目前的学派及各学派争议的细节。

本书重学术思想、概念和方法，在阐述一个模型或方法时，不但要讲是什么和如何做，而且力图揭示为什么这么做和怎么想出来的。

为方便读者，本书在选材上相对完整，使读者不必过多参阅文献就能基本了解该学科的全貌；在叙述上，力求深入浅出，突出主线，使读者能较快逼近学科前沿。

在计算燃烧学的形成和发展过程中，国家自然科学基金委员会、中国工程热物理学会、中国科学技术大学给予了持续不断的鼓励和支持，科学出版社、万国学术出版社和安徽科学技术出版社为计算燃烧学领域中英文专著的出版和传播进行了卓有成效的工作。在本书的编写和出版过程中，得到了中国科学技术大学工程热物理系和火灾科学实验室的葛新石先生、王永堂先生和其他教师的支持，对以上单位和个人，作者在此一并表示衷心的感谢。在此，作者还要深切感谢国家教委工程热物理专业教材委员会对本书的推荐。

本书由范维澄拟定大纲，并编写第一、二、四、五章，第三、七章由范维澄和万跃鹏合写而成，万跃鹏编写第六、八章，并与汪箭一起承担有关全书的事务性工作。

书中错漏之处，恳请批评指正。

范维澄

1991年2月

目 录

前言	(i)
1 绪论	(1)
1.1 计算燃烧学的研究对象和目标	(1)
1.2 计算燃烧学的意义	(3)
1.3 计算燃烧学的发展简史	(6)
1.4 内容梗概	(9)
参考文献	(13)
2 基本方程	(14)
2.1 守恒和平衡方程	(14)
2.2 输运定律	(19)
2.3 源项表达式	(25)
2.4 基本方程组	(33)
参考文献	(35)
3 层流燃烧的计算	(36)
3.1 非定常层流燃烧	(36)
3.1.1 火花点火的数学模型	(37)
3.1.2 求解过程	(41)
3.1.3 计算结果	(43)
3.2 定常层流燃烧	(44)
3.2.1 运动单滴包复火焰的数学模型	(45)
3.2.2 求解过程	(47)
3.2.3 计算结果	(49)
3.3 复杂化学反应系统的数学模型	(51)
3.3.1 基本方程和辅助公式	(52)
3.3.2 求解过程及结果	(59)

参考文献	(66)
4 湍流流动模型	(68)
4.1 引言	(69)
4.1.1 湍流的基本概念	(69)
4.1.2 湍流均流的描述	(70)
4.1.3 湍流模拟的思想观点	(76)
4.2 湍流粘性系数模型	(77)
4.2.1 湍流粘性概念	(77)
4.2.2 混合长度模型	(79)
4.2.3 单方程模型	(85)
4.2.4 双方程模型	(90)
4.3 雷诺应力方程模型	(95)
4.3.1 雷诺应力的微分方程模型 (DSM)	(96)
4.3.2 雷诺应力的代数方程模型 (ASM)	(116)
4.3.3 雷诺应力方程模型与湍流粘性系数模型的关系	(118)
4.3.4 浮力的影响	(119)
4.3.5 标量输运通量方程模型	(120)
4.4 低雷诺数湍流	(123)
4.4.1 低雷诺数湍流的特点	(123)
4.4.2 处理低雷诺数湍流的工程方法	(126)
4.4.3 低雷诺数湍流模型	(128)
4.4.4 壁面函数	(132)
4.5 湍流的其它模化方法	(139)
4.5.1 湍流的直接模化	(139)
4.5.2 湍流的双流体模型	(144)
4.6 小结	(147)
参考文献	(150)
5 湍流燃烧模型	(153)
5.1 引言	(153)
5.1.1 简单化学反应系统	(153)
5.1.2 混合分数	(154)
5.1.3 守恒量之间的线性关系	(157)

5.2	湍流扩散火焰的 $k-\epsilon-g$ 模型	(159)
5.3	湍流预混火焰模型	(166)
5.3.1	旋涡破碎模型	(167)
5.3.2	拉切滑模型	(169)
5.4	几率分布函数的输运方程模型	(175)
5.5	平均反应速率的输运方程模型	(177)
5.6	ESCIMO 湍流燃烧理论	(180)
5.6.1	概述	(180)
5.6.2	“经历”理论	(183)
5.6.3	“统计”理论	(186)
5.6.4	分析湍流射流扩散火焰的 ESCIMO 理论	(188)
5.7	碳黑生成模型	(197)
	参考文献	(199)
6	辐射换热	(202)
6.1	引言	(202)
6.2	辐射传播方程及介质辐射性质	(203)
6.2.1	辐射传播方程	(203)
6.2.2	燃烧产物的辐射性质	(205)
6.3	热通量法	(208)
6.3.1	物理思想及各种热通量法	(208)
6.3.2	多通量模型	(209)
6.4	区域法	(216)
6.4.1	物理思想	(216)
6.4.2	区域法内容	(216)
6.5	蒙特卡洛法	(221)
6.5.1	蒙特卡洛法计算积分值的基本原理	(221)
6.5.2	蒙特卡洛法计算辐射换热	(223)
6.6	离散传播法	(233)
6.6.1	物理思想	(233)
6.6.2	离散传播法理论	(233)
6.6.3	算例	(238)
6.7	几种常用辐射换热计算方法的比较	(239)

参考文献	(243)
7 数值计算方法	(245)
7.1 引言	(245)
7.2 积分区域的网格化	(247)
7.2.1 概述	(247)
7.2.2 网格系统的构造	(250)
7.3 基本方程的离散化	(258)
7.3.1 离散化的方法	(259)
7.3.2 有限差分的一般形式	(260)
7.4 差分方程的建立	(261)
7.4.1 建立差分方程的方法	(262)
7.4.2 瞬变项的离散化	(266)
7.4.3 源项的离散化	(266)
7.4.4 总通量项的离散化	(270)
7.4.5 最终的离散化方程	(277)
7.4.6 二次上风差分格式	(281)
7.5 单个变量代数方程组的解法	(283)
7.5.1 逐点 Jacobi 迭代法	(284)
7.5.2 逐线迭代法及 TDMA 法	(284)
7.5.3 逐面迭代法	(287)
7.5.4 松弛方法	(289)
7.6 多个变量联立方程组的求解	(291)
7.6.1 流场计算的困难	(292)
7.6.2 交错网格的引入	(292)
7.6.3 动量方程和连续方程的离散	(296)
7.6.4 SIVA 算法	(298)
7.6.5 SIMPLE 算法	(299)
7.6.6 SIMPLE 算法的改进	(303)
7.6.7 IPSA 算法	(317)
7.7 边界条件的处理	(319)
7.7.1 边界网格的划分	(320)
7.7.2 几种常见的边界条件	(323)

7.7.3 壁面函数处理壁面边界.....	(329)
7.7.4 空度方法处理不可流通区域.....	(338)
7.8 自由边界流动的处理方法	(341)
7.9 计算机程序的选择和编制	(349)
7.9.1 影响的型式.....	(349)
7.9.2 问题的类型.....	(351)
7.9.3 编制计算机程序.....	(352)
7.9.4 FAC 程序简介	(353)
7.9.5 选择通用程序.....	(355)
参考文献.....	(356)
8 应用举例	(358)
8.1 平面管道内钝体后湍流预混火焰的数值分析	(359)
8.1.1 概况.....	(359)
8.1.2 数学模型.....	(359)
8.1.3 求解过程.....	(366)
8.1.4 计算结果及其与实验的比较.....	(368)
8.2 受浮力影响的湍流模型	(371)
8.2.1 引言.....	(371)
8.2.2 湍流模型.....	(372)
8.2.3 计算结果.....	(377)
8.3 炉内燃烧的辐射换热计算	(380)
8.3.1 问题及数学描述.....	(380)
8.3.2 计算结果.....	(384)
8.4 多孔燃料床非定常燃烧过程的计算	(386)
8.4.1 引言.....	(386)
8.4.2 数学描述.....	(387)
8.4.3 计算结果及讨论.....	(393)
参考文献.....	(396)
符号表.....	(397)

1 绪 论

1.1 计算燃烧学的研究对象和目标

计算燃烧学研究对流体流动、传热传质和燃烧过程进行计算机模拟的基本方程(连续方程、动量方程、能量方程和组分方程)、理论模型(湍流输运、湍流燃烧、辐射换热、多组分化学反应和多相问题)、数值方法(研究体系的网格化、控制方程的离散化和求解方法)、计算机程序(计算程序、绘图程序和仿真程序)及其在科研、工程 and 教学中的应用。

计算燃烧学的研究目标:构造、检验和发展基本方程及理论模型,提高它们的可靠性、准确性和实用性;改进数值方法,在保证计算精度的同时提高计算速度和经济性;改善绘图及仿真软件,提高速度和直观性;提供“使用方便性”强的计算、绘图及仿真软件,使科学家、工程师及教师能从数值计算及编制程序的繁琐细节中解脱出来,集中从事自己感兴趣的工作。

为使计算燃烧学的研究对象及目标具体化和形象化,不妨在外流和内流两个方面各举几个例子。

(1)计算飞行器或地面运输工具周围的流场和压力场,考虑层流到湍流的过渡、边界层的分离、回流、可压缩性、地面的影响及运输工具复杂边界条件(如汽车的轮、窗及反光镜等)的影响;

(2)计算建筑物之间及建筑群周围的流场、压力场和各种成分的浓度场,着重研究流场可能带来的气动力对建筑物及人员活动的影响,研究烟囱排放污染物的分布,研究中考虑气象条件和地形条

件的影响;

(3) 计算森林火灾及城市大火的火行为(火蔓延速度和火强度), 考虑气象因素(风速、风向、气温、湿度)、地形条件、地面可燃物条件及可能采取的扑火措施的影响;

(4) 计算分叉或交联的变截面和变方向管道内的流场和温度场, 考虑壁面阻力、流体与固壁的热交换, 考虑流线曲率对湍流模型的影响;

(5) 计算建筑物内部火灾过程中烟气的运动, 即其速度场、温度场和浓度场, 研究通风和空调设备以及各种消防措施(如正压送风、挡烟装置、水喷淋等)对烟气运动的影响, 研究能适用于受浮力影响的流动过程的湍流模型;

(6) 计算锅炉或燃烧室中的定常流动、传热传质及燃烧过程, 包括运行条件和几何形状对燃烧过程的影响, 包括气体与壁面之间的对流和辐射换热. 若是使用液体或固体燃料, 则还要考虑两相之间的质量、动量和能量的交换以及化学反应, 研究两相流的湍流模型;

(7) 计算内燃机燃烧室中的三维两相非定常燃烧过程, 考虑复杂几何条件、燃料喷射、排气、周期性压缩和膨胀等因素对湍流模型及数值方法的特殊要求.

上述例子有一定的典型性, 它们都已相继被纳入了国际和国内的计算燃烧学的研究范围, 并不同程度地得到了一些结果, 但离实际应用都还有一定距离.

从这些例子可以看出, 计算燃烧学的研究对象来自实际, 实际过程的复杂性和多样性决定了计算燃烧学的研究既是丰富多彩的, 又是相当困难的. 这意味着研究计算燃烧学是要付出代价的, 那么, 人们自然会问, 是否有必要研究计算燃烧学呢? 回答是十分明确的, 完全有必要. 这是因为计算燃烧学具有重要的科学价值和实际意义.

1.2 计算燃烧学的意义

1. 使燃烧学上升到系统理论

在流体力学、反应动力学和数理方程的基础上, Von Karman^[1]在几十年前就提出了化学流体力学的基本方程组。但是, 由于方程的数目多, 相互耦合和非线性, 当代的数学既无能力论证这组方程解的存在性, 也无能力给出一般情况下这组方程的解析解。仅对于极特殊的个别情况, 在作了许多假设, 大大简化了方程之后, 才有可能求出方程的解析解。这使得人们无法在一般条件下通过把体现燃烧理论的那些基本方程的解与实验数据对比去检验和发展理论, 致使燃烧学长期停留在分类综合实验现象和对极个别燃烧现象孤立进行分析的阶段。化学流体力学的基本方程与大量的实际燃烧现象和过程基本上是脱节的。

计算燃烧学提供了一般条件下求解化学流体力学(或燃烧学)基本方程的理论和方法。它一方面可以求出体现各种理论模型的数值解, 通过把该解与相应的实验数据对比, 检验、发展和优化理论模型; 另一方面又可以通过求解方程在不同边界条件和不同物性参数之下的数值解, 深入认识现有燃烧过程和预示新的燃烧现象, 进一步揭示燃烧规律。这样, 就把燃烧理论与错综复杂的燃烧现象有机地联系起来, 使燃烧学科上升到系统理论的高度。

2. 设计、科研和教学的新手段

燃烧装置设计的传统方法主要是依靠试验及由大量试验数据归纳出的经验公式。计算燃烧学的出现正在冲击和改变着传统的设计方法。例如在确定方案阶段, 我们可以先运用计算燃烧学对多个方案进行计算, 比较不同方案的优劣, 对方案进行初选; 在试验阶段, 可以用计算燃烧学指导的数值试验取代一部分模型试验、冷态试验和全尺寸热态试验等等。

计算燃烧学以计算机为桥梁，把燃烧理论、实验和燃烧器研制三者有机地结合起来，开辟了用燃烧理论直接指导实验和设计工作的途径（见图 1-1），把燃烧器的几何形状、结构尺寸、进出口状态、有关的介质和燃料的物理化学性质代入经过检验的计算机程序，便可计算出燃烧器内部介质的速度、温度和组分浓度等参数的分布及其变化，计算出该装置的气动、传热和燃烧性能以及污染物排放水平，在计算机上进行设计方案的初步论证和燃烧器性能的初步调试。显然，这不但有助于深化对基本现象和实际过程的认识，而且使燃烧装置的设计和优化在更大程度上依靠合理的计算，减少试验和设计工作的盲目性和工作量，节约试验和设计过程中消耗的时间、人力、材料和能源。

计算燃烧学的应用对象不限于燃烧装置，上述的观点也不限于燃烧装置的研制。例如建筑物的防排烟设计，就可以通过把建筑物内部的结构、通风参数和可燃物荷载等代入计算机程序，算出烟气的运动及其与待选择参数的关系，归纳经验公式，为设计提供参数和依据。

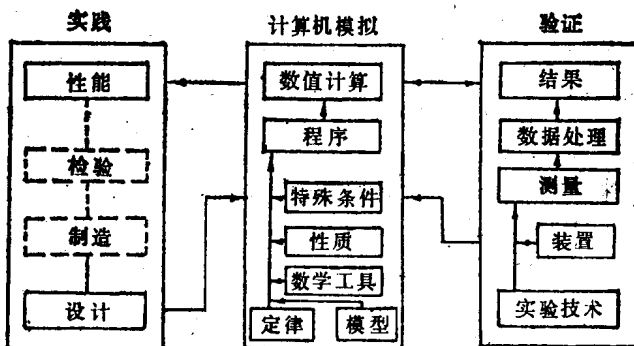


图 1-1 计算机模拟与实验和设计的关系

美国航天航空局（NASA）在 1983 年发表了一篇由权威性专家编制的大型研究报告，其中的一个主要结论是：在航空航天装置的

研制过程中，计算机模拟在 15 年内将成为与模拟实验同样可靠和更为有效的研究手段。世界上和我国计算燃烧学的发展都为这一预言提供了并继续提供着依据。

在科研工作中，为揭示新的现象和规律，常常要进行各种实验，在实验中研究各种几何、物理和化学因素的变化对现象乃至整个过程的影响，实验工作量是巨大的。还不仅如此，有时实验工作十分困难甚至无法进行。例如创造极端条件（高温、高压、高空或无重力影响）就是相当困难或化费巨大的，而核电站或化工厂泄露、水坝崩塌和城市大火等过程的实验则几乎无法进行，这些无疑都影响着实验研究的进行。计算燃烧学为科研提供了新手段，在计算程序中改变几何、物理和化学因素以及改变环境条件都比在实验中改变这些参数要容易得多。这既可以加快研究速度，又可以拓宽研究的参数变化范围，从而有助于增加科研的深度和广度。

在教学工作中，运用计算燃烧学的计算技术、图形和图象技术，可以方便、迅速而形象地再现出教学实验的装置、实验过程和实验结果，教师和学生课堂上都可以自己动手，以计算机为工具进行“实验”。只不过这个实验的进行不是在传统意义上的实验台，而是运用现代化的计算机。这样做，可以使学生在相同时间内获得更多的信息，可以使教师和学生有更多的相互交流，可以形象地再现出原有的或创造出新的实验。这无疑有利于教学的现代化和教学质量的提高。

在论述计算燃烧学对设计、科研和教学的重要影响的同时，有必要明确指出：计算需要实验，实(试)验仍是十分重要的，计算并不能完全取代实(试)验。这是因为从整体上讲，计算机程序中所包含的模型、方法和数据的可靠性和准确性都需要在与实验的不断对比中检验和发展。在发展科学和解决实际问题的实践中，计算机模拟和实验研究是两种相互补充和促进的有效手段。

3. 有助于学科发展和开拓新领域

计算燃烧学是在燃烧理论、流体力学、输运科学、化学动力学、数值方法和计算机技术等学科的交叉点上生长起来的新学科，它的诞生反过来也促进了这些相邻学科的发展。

在对工程燃烧及火灾等过程进行数值计算时，为建立数学上的定解问题，必须设法找到描述湍流输运、湍流与燃烧相互作用以及辐射换热的途径；在多相流体体系中还需找到描述相间作用和凝聚相与气相湍流之间的相互作用的途径。这些都需要与流体力学、化学动力学、输运科学及热物理测量方面的专家配合，开展理论和实验研究，提出新的概念和模型。

计算燃烧学离不开数值计算。通过研究各种理论模型建立起来的数学上的定解问题不一定能有合理的数值解。控制微分方程组是否具有数学上的适定性，是否有唯一解，离散化方程与原微分方程是否相容，离散化方程解的收敛性如何，是否存在和值得探讨普遍适用的最佳求解方法等等，都是值得与数学家一起研究的课题。

计算燃烧学发展的实践表明，通过把采用不同理论模型和不同数值方法得到的数值解与实验数据进行比较和分析，可以迅速而直观地找到各种模型和各种方法之间的差异，检验与发展理论模型和数值方法，并促进邻近学科的发展，促进新领域的开拓和新边缘学科的形成。

1.3 计算燃烧学的发展简史

学会用火是人类走向文明的重要一步。人类用燃烧的方式从自然界获取热能已经有了几千年的历史。然而，这并不意味着燃烧学科已有了千年历史。对一类现象，只有当科学和社会的发展对认识它的规律提出需要并提供可能时，才能逐渐建立起针对这类现象的科学。燃烧学也不例外，它是在本世纪四五十年代，在近代科学理论和实验技术的基础上，为适应发展喷气推进技术的需要，而逐渐形