

周力行 著

湍流两相流动与 燃烧的数值模拟

清华大学出版社

0357.3

Z 82

湍流两相流动与燃烧的 数值模拟

周力行 著

清华大学出版社

0298/08
内 容 提 要

本书以实际工程装置中常见的气体-颗粒湍流两相流动和燃烧为主要对象,阐述湍流流动模拟,湍流两相流动模拟,湍流气相及两相燃烧模拟,以及有关数值解法要点。书中各章内容包括模拟的背景,基本前提,模拟理论的数学推导及解法,应用举例及其评价。最后集中阐述了数值模拟在航空发动机主燃烧室及加力燃烧室,大型煤粉炉及烧煤流化床炉,旋风除尘器,煤粉燃烧室及气化炉等工业装置中的应用现状和前景。

本书可作为工程热物理、热能、流体力学、航天及航空、冶金及化工、核能、水力学及冷却水工程等专业研究生学位论文课程教材,也可作为上述各专业人员及从事流动、传热及燃烧数值模拟和优化设计的研究人员或设计人员的参考用书。

~~湍流~~两相流动与燃烧的

~~数值模拟~~

周力行 著

~~清华大学出版社~~出版

北京 清华园

中国科学院印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 9.5 字数: 246千字

1991年8月第1版 1991年8月第1次印刷

印数: 0001~3000

ISBN 7-302-00845-0/TK·17

定价: 3.20 元

序 言

本书是作者在清华大学工程力学系近十年来为本系、外系及国内工程热物理、流体力学、热能工程、航空、冶金及化工、水力学及冷却水工程等专业的研究生以及研究人员所开设的“流动、传热与燃烧数值模拟”课程的讲授内容,其中包括了作者在西德、美国及苏联十余所高等学校的讲学内容。经过国家教委工程热物理专业教材委员会的推荐,本书将作为在全国推广的研究生教材。

本书与国内外其他有关著作的不同之处是以模拟实际工程装置中常见的气体-颗粒湍流两相流动和燃烧为主要对象。在流体机械、换热器、燃烧室及工业炉中以及水利工程中常见的是气体-颗粒或液体-颗粒两相流动。本书的目的是使读者了解气体-颗粒湍流两相流动与燃烧数值模拟的基本原理、方法及其在优化及放大设计中的应用前景和能力。

为节省篇幅及突出重点,本书仅侧重于阐述与流动过程直接有关的湍流流动模拟,湍流两相流动模拟,湍流气相燃烧和湍流两相燃烧模拟。对于辐射传热及污染物排放模拟,一般性的数值解法与程序编制等,虽然在所开课程中有这方面内容,但本书不加叙述,读者可参阅其他有关书籍。

本书各章的叙述方法是,先指出模拟的背景和模拟的基本前提,再给出模拟理论的数学推导及其数值求解方法,然后举出应用实例,并对其进行评价。书中最后一章集中阐述综合性的应用,并且分析了应用的现状及前景。这样可使读者学会如何选择和应用不同模型,以及了解怎样努力去改善这些模型。

本书主要作为工程热物理、热能工程、流体力学、航天及航空、

冶金及化工、核能、水力学及冷却水工程等有关专业的研究生学位课程教材,也可作为上述各专业教师及从事流动、传热及燃烧数值模拟和优化设计的研究人员或设计人员的参考用书。

作者在撰写本书时要衷心感谢其同事及学生们林文漪、黄晓晴、张健、朱超、洪涛、邱泰庆等同志,他们与作者多年合作,为发展两相流动及燃烧的数值模拟做出了重要的贡献,充实了本书的内容。

作者深深感谢我国流体力学界的老前辈、多相流体力学的倡导者和支持者周光炯教授,周教授于百忙中审阅了本书,并提出了宝贵的意见。

作者还要感谢黄晓晴同志,他为本书的加工与整理化费了大量的时间和精力。袁全超,朱年国和刘卫东同志对本书的清稿和定稿付出了辛勤的努力,并给予作者大力协助,使本书得以及时交付出版。作者在此对他们表示诚挚的谢意。

我们欢迎使用本书的教师、学生和各方面的研究及设计人员对本书提出宝贵的批评意见,以便今后不断加以充实和改进。

作者

1989年6月于清华园

目 录

序言

第一章 导论	1
§ 1.1 湍流两相流动.....	1
§ 1.2 工程设计的任务与方法.....	2
§ 1.3 模拟方法的发展.....	3
§ 1.4 数值模拟.....	5
第二章 湍流流动模拟	9
§ 2.1 问题的背景.....	9
§ 2.2 湍流流动的 Reynolds 时均方程	10
§ 2.3 Reynolds 应力输运方程.....	12
§ 2.4 混合长度模型(零方程模型).....	17
§ 2.5 湍流动能方程模型(单方程模型).....	20
§ 2.6 k - ϵ 双方程模型.....	24
§ 2.7 Reynolds 应力方程模型.....	37
§ 2.8 代数应力(热流)模型——扩展的 k - ϵ 模型.....	45
§ 2.9 双流体模型.....	68
§ 2.10 可压缩流动的湍流模型	74
§ 2.11 关于湍流模型的总评价	79
第三章 湍流两相(多相)流动模拟	81
§ 3.1 问题的背景.....	81
§ 3.2 两相流基本特性及其描述.....	82
§ 3.3 湍流两相流基本守恒方程组.....	92
§ 3.4 单颗粒动力学模型.....	105

§ 3.5	“小滑移”模型	112
§ 3.6	单流体模型(无滑移模型)	129
§ 3.7	颗粒轨道模型	135
§ 3.8	多流体模型(颗粒相拟流体模型)	151
第四章	湍流气相燃烧(反应)及两相燃烧模拟	165
§ 4.1	问题的背景	165
§ 4.2	湍流流动中的时均反应率	165
§ 4.3	涡旋破碎模型 (EBU 模型)	167
§ 4.4	概率密度分布函数 (pdf)	172
§ 4.5	快速反应流(扩散控制反应流)的简化 pdf 模型	178
§ 4.6	有限反应率的简化 pdf 模型	197
§ 4.7	预混反应流(扩散动力控制反应流)的简化 pdf 模型	199
§ 4.8	湍流气相燃烧的脉动关联模拟	203
§ 4.9	湍流两相燃烧的模拟	211
第五章	湍流两相(多相)流动和燃烧数值模拟的应用	221
§ 5.1	液雾两相流动混合与蒸发的模拟	221
§ 5.2	旋风除尘器内气-粉两相流动模拟	234
§ 5.3	液雾燃烧模拟	239
§ 5.4	煤粉-空气两相流动及燃烧模拟	254
§ 5.5	大型炉膛内三维两相流动与煤粉燃烧的模拟	280
§ 5.6	流化床中多相流动和燃烧的模拟	292
§ 5.7	结束语	296

第一章 导 论

§ 1.1 湍流两相流动

自然环境(大气、江河湖海)、生物体和工程装置中常常遇到不同类型的流动问题。就以常见的工程装置而论,可以举出不少例子,如水力渠道或管道中孔板前后的流动,河流中热电厂取排水所产生的流动,换热器、化工反应器、各种锅炉、工业窑炉、冶炼炉、燃烧室、流化床中的流动等。由于工程装置的尺寸、流速条件以及各种障碍的存在,其中的流动绝大部分是湍流,而且还不只限于湍流边界层、湍流射流这类简单流动,往往是极其复杂的流动,如突扩回流、钝体回流、突扩加钝体回流、突扩加射流回流、多股射流回流、旋转流动(包括极强的涡旋流动)、有浮力的回流等等。还要注意,实际情况下极纯而不含杂质的气体或流体是很少见的。工程中的流动常常含有大小不同的颗粒或气泡,诸如排烟除尘,粒料或粉料的输送及加工,锅炉、反应堆、冶炼炉中气液流动、液雾及粉状燃料燃烧、流化床等等都是典型的湍流两相流动。在很多情况下,两相流动中还有传热现象,例如流体与壁的温度不同(换热器中),或温度不同的冷气与热气,冷水与热水发生混合,都会发生热传递。有时流体或气体中还有化学反应发生,反应有放热或吸热效应,如发生在化工反应器中的化学反应,排放含有污染物的水以及燃烧器,燃烧室及炉内的流动等。在湍流两相流中,除各相内部的动量、热量与质量传递外,还有相与相间,如流体与颗粒或流体与气泡间的质量、动量及能量相互作用,而且除流体内部反应外,颗粒与流体,气泡与流体间还可能异相反应。湍流两相流中有

时还会有静电效应(极细粉尘在金属、塑料或有机玻璃管道中运动)或电磁效应(电弧或高频等离子体发生器中或磁流体发电机中含粉尘的两相流)。

由于工程装置几何形状的复杂性,纯粹的平面二维或轴对称流动是少见的。例如柱形燃烧室或柱加锥形旋风除尘器,由于有二次风孔或切向进风口等,流动都是三维的。在实际装置中,由于工程的需要,往往流动在各个方面都是不对称的。因此我们研究的实际对象往往是三维湍流两相流。

由上述工程装置中湍流两相流的特点不难看到,要得到严格的设计计算方法,靠经典的分析解方法是很困难的或几乎不可能的。只有用近代计算流体力学和大型数字计算机为基础的数值模拟理论及方法,亦即建立各种复杂条件下的基本守恒方程组,加以封闭,并不加简化地直接用数值方法求解这些非线性联立偏微分方程组,才能实现。自六十年代末至今的近二十年内,确实已成功地发展了这种理论和方法,目前已开始分阶段用于工程设计中,并且已有可能对极为复杂的情况,例如大型工业炉内三维湍流回流及旋流有反应的两相流动得到与实验大致相符的合理模拟结果。多维湍流两相流数值模拟全面引入到工程设计中已不会是十分遥远的事了。这就是为什么我们要以工程对象为背景来探讨湍流两相流的数值模拟理论及其方法的充分依据。

§ 1.2 工程设计的任务与方法

严格的优化或放大设计,应当不局限于半经验的、直观的猜想或者纯实验结果的归纳,而是以预报真实过程中各种场的分布为基础来预报装置的总体特性。因此工程设计的任务是,对给定的几何形状、尺寸及边界条件,应当通过预报给出:

(1) 流场: 速度及压强分布,湍流强度及尺度分布,回流区尺

寸及形状,压力损失等。

(2) 温度场: 流体内及边壁上。

(3) 组分浓度场: 浓度分布,反应度或燃尽度,污染物排放量等。

(4) 颗粒或气泡的速度,温度场及浓度场,以及其湍流脉动特性。

(5) 热流分布: 流体内及边壁上,热损失,加热率等。

(6) 壁面处颗粒沉积率(积灰、结焦),壁的磨损率。

(7) 电场或磁场强度分布,等离子体外特性等。

进行优化或放大设计的方法在六十年代以前主要靠纯经验,纯实验结果,或者由直观加上小模型实验再加上相似律整理数据的半经验设计方法。例如目前锅炉炉膛设计中通用的热力计算法或者冷却水工程中通用的工程计算法都属于后一种。这类方法在目前,甚至在将来都有重要作用,可以给出定性上有用的判据。然而只靠这类方法显然也有不少缺陷。例如这些方法经验性强,适用范围窄,因而在更广泛的变化条件内预报的准确性就较差了。随着现代数字计算机、数值分析学、计算流体力学、计算传热学及计算燃烧学等学科的产生和发展,自七十年代初至今逐渐形成了“两相流动和燃烧数值模拟”这一分支,这才使工程装置的优化及放大设计有可能拥有一种新手段。应用这一新的设计手段就使我们有可能预报真实的流体机械、换热器、燃烧器、工业炉、等离子体发生器、电弧开关、河流、大气中的全过程,得到设计所需的定量数据,而又能把实验所需人力、物力及财力减到最低限度。因此,不能不认为这是一场设计上的革命。

§ 1.3 模拟方法的发展

对模拟 (*modeling*或*simulation*) 不同人有不同的理解。三十

多年前或者更早些时候,甚至直到现在,不少人把模拟(也叫模化)仅仅理解为按照相似律制造小实验模型的方法,或者也包括不符合相似律的用水流或气流定性显示的实验方法。毫无疑问,这类方法在过去、现在甚至将来也不失其重要作用。但这类模拟法有明显的缺陷。要使模型与原型中极其复杂的过程,例如有反应的湍流两相流完全相似,至少需要维持十几个准则相等。二十多年前本书作者就曾由基本守恒方程出发严格地得到这一结论。然而实际上要维持所有这些准则相等是无法办到的。往往不得不去掉一些假设为次要的准则,只保留少数假设为重要的准则,这就使得实验模型充其量只能在定性上与原型相似,甚至会在定性上失真。

数学模拟的方法有零维模拟、一维模拟或者零维加一维的板块模拟。这些都是简化的或者半经验的数学模拟,严格意义上不能算数值模拟。所谓零维模拟,也叫热力学模拟,就是不考虑流体力学(流动过程),设温度及浓度空间分布均匀,在化工上也叫均匀搅拌反应器(*Well-stirred reactor*, WSR)模型。它只能按热力学原理对给定的初态找出终态,即装置的总体热力学性能,如总体温度、总体组分、传热与燃烧的外部特性与给定条件间的关系等。例如内燃机中目前仍广泛应用的零维模型能给出示功图,即发出的功率与曲柄角度间的关系。但这类模拟无法预报出工程装置内各种变量场的分布细节,因此只能是定性的,或者只能部分地依赖实验给出半经验的外部特性。

一维模拟较之零维模拟前进了一步,可以在一定程度上预报变量场的时空变化。但由于一维模拟假定各变量只在沿轴向或沿过程前进的主要方向上有变化,而在垂直于该方向上假设各变量分布均匀,则这种方法所模拟的仍是简化了的真实流动、传热和燃烧过程,因而仍然不能是定量的。这类模拟有时叫塞状流(*Plug flow reactor*, PFR)模拟。在进一步发展过程中,人们发现有时可以根据半经验处理法,把整个流场分成若干个塞状流部分和搅拌

反应器部分,前者代表前向流动,后者代表回流流动。这就是用零维加一维的模型来模拟反应器或燃烧室,常常叫做板块式模拟(*Modulus modeling*)。显然,无论是一维模拟还是板块式模拟,虽然比零维模拟能给出更多的信息,然而仍不能给出整个流场的定量信息。对于某些装置中接近于简单流动的情况,如边界层或射流型流动,有时采用经验剖面的积分法来模拟,称为积分近似模拟,实质上是“一维半”或“准二维”模拟。

本书所讨论的数值模拟指的是多维模拟,即二维或三维的微分模拟。这种模拟是基于计算流体力学、计算传热学和计算燃烧学的原理,用数值方法不经任何简化直接求解非线性联立的质量、动量、能量及组分守恒偏微分方程组。只有这种模拟才能预报流动、传热及燃烧过程的细节,即给出整个流场中各变量的时空分布。因此,这种模拟已开始成为并将继续成为工程装置优化及放大的定量设计的有力工具。

§ 1.4 数值模拟

经过了多年的探索和研究,数值模拟即多维模拟已取得了成功的经验。大致可分成下列若干步骤:

(1) 建立基本守恒方程组

数值模拟的第一步是由流体力学、热力学、传热传质学、燃烧学及热等离子体等的基本原理出发,建立质量、动量、能量、组分、湍流特性等守恒方程组,如连续方程、扩散方程、湍能方程等等。这些方程所构成的联立非线性偏微分方程组,不能用经典的分析法,而只能用数值方程求解。单相层流流动的基本方程组已经很少有争议了。对湍流,特别是湍流两相流,由不同的模拟理论出发,往往基本守恒方程组也不相同,因此,如何构造基本方程组,首先就成为模拟理论的重要部分。

(2) 确定边界条件

数值模拟的第二步是必须按给定的几何形状及尺寸,由问题的物理特征出发,确定计算域并给定该计算域进出口,轴线(或对称面)及各边壁或自由面处条件。对湍流两相流需分别给出各相的各变量的时均值及脉动值的各边界条件。正确给定边界条件是十分重要的,然而不是轻而易举的事情。边界条件是否合理往往也是数值模拟成败的关键问题之一,而边界条件的给定往往有很大难度。例如,如何正确给定湍流动能或湍流各应力分量在进口、壁面或自由面处的值,如何给定颗粒速度及浓度在壁面处的条件,以及强旋或强回流的有限长度域内出口尚未达到充分发展流时,如何给定出口条件等等。

(3) 建立或选择模型或封闭方法

写出基本方程组后并非已万事大吉,这些方程组往往是不封闭的,特别是湍流两相流更是如此。例如,动量方程中的脉动关联项(湍流应力项),能量方程中湍流导热项及辐射项,扩散方程中的扩散项及湍流反应项以及所有方程中相间相互作用项等都是未知的。解决这一问题,使方程组封闭,就是模拟理论的关键问题。必须由实验事实或物理概念的基本假设出发来构造或选择各个分过程的模型,如湍流流动模型、两相流模型、湍流气相反应模型、辐射换热模型、污染物生成模型等等。本书的重点就是解决这些问题,而且主要针对前三类模型。

(4) 建立离散化方程

用数值法求解偏微分方程组,必须将该方程组离散化,湍流两相流动常用的离散化方法是差分方法。建立差分方程可用 Taylor 级数展开或者在控制单元内积分,这时需选定一定的差分格式,如中心差分、上风差分、乘方定律差分等。当然也可用其他离散法,如有限元或有限分析法等。

(5) 制定求解方法

对单相流动差分方程组已经有各种不同的求解方法。仅以 *Spalding-Patankar* 学派倡议的方法而言,对抛物型问题(边界层、射流、管流等)有 GENMIX 前进积分算法;对椭圆问题(回流流动等)有焓量-流函数算法、压力-速度修正算法(SIMPLE 系列解法)等。后者往往用对三角矩阵法(追赶法)、逐线迭代及低松弛。针对湍流两相流和有反应的流动又有一些更专门的解法,如 PSIC, IPSA, GEMCHIP, PCGC-2, LEAGAP 等等。

(6) 研究计算技巧

除上述基本解法外,还要针对具体问题的特点,研究一些计算方法的细节或称计算技巧。例如对于合理而经济的网格划分与安排,有时要选择随过程的空间或时间而浮动的网格系,以便不抹掉物理特征而又较为经济。又如对不规则形状边界的处理,松弛系数的选择,以及迭代扫描方法等都要研究计算技巧。对湍流两相流必须探讨两相间迭代以及反应和流动间迭代的最佳步骤,颗粒相连续性的校正、轨道积分方法等。

(7) 编写计算程序

下一步是按照一定的程序结构安排,由上述差分方程及求解方法出发,编写主程序及各子程序,使之具有通用性和灵活性,便于应用和作必要的更动。此时需给出变量符号表及使用说明。湍流两相流的程序往往比单相流的标准程序更为复杂得多,子程序要多几倍。

(8) 调试程序

所谓调试 (*Debugging*) 指的是通过初步的上机计算消除程序编制中的各种偶然及系统的错误,包括算法上的错误,使程序能正常运行,给出收敛而初步合理的结果。这就是通常所讲的“把程序调通”。据实践经验可知,总体程序中往往单相流场程序是最关键的部分。程序的调试犹如一台复杂的测量仪器的调试一样,常常是十分艰巨的,也是相当细致而艰苦的工作,需要通过反复的计算

实践,逐步找出各种错误,才能最后调试成功。

(9) 模拟与实验的对比

一旦程序调试成功后,可以对各种工况进行大量的模拟计算,得到一批变量场的预报结果。此后必须将这些模拟预报结果和变量场的量测结果,特别是精确的激光量测结果进行对照,以便评价本模拟理论及方法的优缺点及可靠性。对湍流两相流不仅有流体(气体)场的对照,还应当有颗粒各种场的分布对照。

(10) 改进模型及解法

对现存的模拟理论及方法作出全面评价之后,应根据其不足之处进一步加以改进,或提出新的理论及方法,直到获得相对较为满意的结果为止。当然这不是一朝一夕之功,而要经过多年奋斗和锲而不舍的努力才能达到这一目标。

上面所概括的就是数值模拟的全过程。由此可见,发展数值模拟,特别是湍流两相流的数值模拟,绝非仅仅是计算方法和计算技巧问题(当然此二者也很重要),它包含一整套物理过程的理论基础,也包括深入细致的实验量测,即物理模拟。数值模拟的建立乃是反复的理论设想,计算实践与实验量测三者相互校核的最终结果。这样建立的数值模拟才有足够的可靠性,才能立于不败之地而确有实用价值。

第二章 湍流流动模拟

§ 2.1 问题的背景

上一章中已指出,自然环境和工程装置中的流动常常是湍流流动。模拟任何实际过程首先就遇到湍流问题。湍流本身是流体力学理论上的难题。对某些简单的均匀时均流场,如果湍流脉动是均匀及各向同性的,可以用经典的统计理论进行分析。实际上湍流是不均匀的。多年来对湍流射流使用经验性速度及温度分布为基础的积分近似法,并引入半经验的射流宽度增长率(卷吸律或掺混律),可以回避对湍流特性的处理。在处理环境大水体远场问题中,或者在复杂的炉内或燃烧室流动中,为获得定性的流动特性,往往采取引入不变的湍流粘性系数的处理方法。然而对大多数湍流流动,特别是复杂湍流流动,湍流特性既非均匀,也不服从射流规律,要获得流场的定量数据,必须更严格地处理湍流问题。

对湍流最根本的模拟方法是在湍流尺度的网格尺寸内求解瞬态三维 Navier-Stokes 方程的全模拟,这时无须引入任何模型。然而这是目前计算机容量及速度尚难以解决的,至少在近期尚不易实现。另一种要求稍低的办法是亚网格尺度模拟即大涡模拟(LES),也是由 N-S 方程出发,其网格尺寸比湍流尺度大,可以模拟湍流发展过程的一些细节,但由于计算量仍很大,只能模拟一些简单情况,如弯道等,目前也不能直接用于工程实际。按国内外不少学者的看法,本世纪内可用于工程的现实模拟方法,仍然是由 Reynolds 时均方程出发的模拟方法,这就是目前常说的“湍流模型”或称“湍流模式”。其基本点是利用某些模拟假设,将 Reynolds

时均方程或者湍流特征量的输运方程中高阶的未知关联项用低阶关联项或者时均量来表达,从而使 Reynolds 时均方程封闭。这是因为工程中感兴趣的往往是时均速度场,温度场,湍流脉动时均特性等,并不需要知道湍流产生及发展的细节,因此,并不需要过细的模拟。由下文看出,即使这些满足工程要求的模拟方法由流体力学理论的角度看是很简单的,但就工程应用而言仍是相当复杂的。总之,湍流模型的方法是目前处理工程问题中最有效而且最有希望的方法。

§ 2.2 湍流流动的 Reynolds 时均方程

若以通用变量 φ 表示湍流场中各变量瞬时值,如速度分量 v_i , 温度 T , 密度 ρ , 组分浓度 $Y_i = \rho_i/\rho$ 等的瞬时值, 则其时均值定义为

$$\bar{\varphi} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \varphi dt \quad (2.1)$$

其中 T 大大超过脉动周期,同时又大大小于流动宏观变化周期。脉动值定义为

$$\varphi' = \varphi - \bar{\varphi}$$

最一般情况下,有传热及反应的单相多组分流体瞬时守恒方程组为:

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = 0 \quad (2.2)$$

动量方程 (N-S 方程)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j v_i) \\ & = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \right] \end{aligned}$$