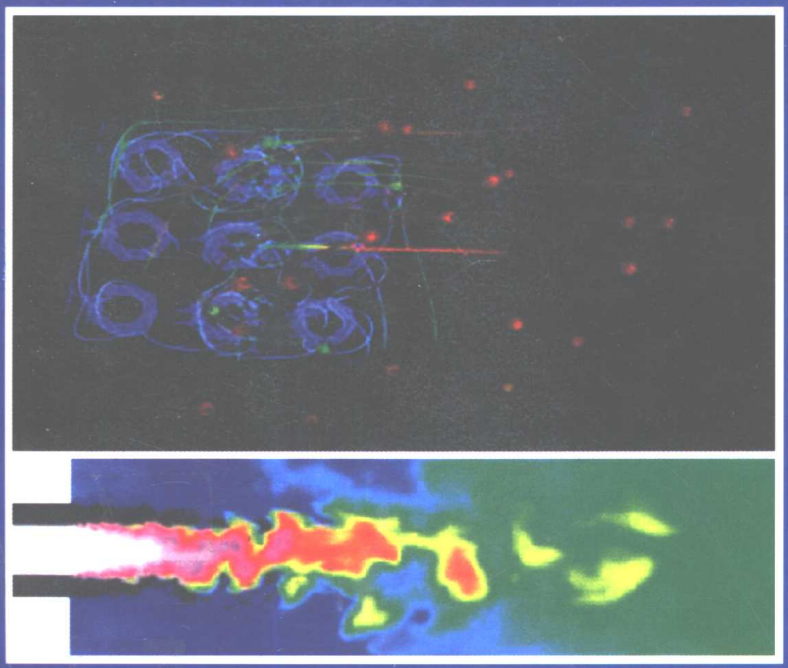
《近代空气动力学丛书》

多相湍流反应流体力学

Dynamics of Multiphase Turbulent Reacting Fluid Flows

周力行 著



国防工业出版社

近代空气动力学丛书

多相湍流反应流体力学

Dynamics of Multiphase Turbulent Reacting Fluid Flows

周力行 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

多相湍流反应流体力学/周力行著.—北京:国防工业出版社,2002.1
(近代空气动力学丛书)
ISBN 7-118-02660-3

Ⅰ.多… Ⅱ.周… Ⅲ.湍流-多相流体力学-研究 Ⅳ.V211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 069728 号

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)
(邮政编码 100044)
腾飞胶印厂印刷
新华书店经售
*
开本 850×1168 1/32 印张 10⅛ 252 千字
2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷
印数:1-1500 册 定价:22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，原国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 在国防科学技术领域中，学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著；密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由总装备部国防工业出版社列选出版。

44539

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，原国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金

评审委员会

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

国防科技图书出版基金
第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模				
主任委员	黄　宁				
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾　铎	
秘书长	崔士义				
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成	
（以姓氏笔划为序）	刘　仁	朱森元	朵英贤	宋家树	
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟	
	何新贵	张立同	张汝果	张均武	
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安	
	侯正明	莫梧生	崔尔杰		

序

有书应有序，序者必须说明为什么要写书，写书有什么意义。

近代空气动力学丛书是1994年开始酝酿的，等书出齐肯定是下一世纪了。这是一套跨世纪的丛书，当然我们希望它能有跨世纪的意义。20世纪初始有飞机出现，莱特(W.Wright, O.Wright)兄弟于1903年发明了飞机。到30年代，低速飞机的设计已日趋成熟，而空气动力学的研究为此做出了突出的贡献。1934年开始由美国戈根海姆基金会支持、由杜朗(W.F.Durand)主编并成为航空发展基石的六卷本的空气动力学理论(Aerodynamic Theory)丛书就是很好的佐证。著名的力学家普朗特(L.Prandtl)、泰勒(G.T.Taylor)及卡门(T.von Karman)等均为该丛书撰写了重要章节。我国学者钱学森在40年代末曾称丛书中泰勒所写的可压缩性流体力学为此领域当时最佳的著作。杜朗的这一套书并不是直接为设计用的，它强调的是一个一个专题的理论基础，是为飞机设计者的技术创新服务的。第二次世界大战后，人类很快进入了超声速时代，卡门和钱学森等人在40年代末提出要编写一套现代化的空气动力学丛书，这就是由查雷(J.Charyk)做主编的由普林斯顿大学出版的高速空气动力学与喷气推进(High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion)丛书，这套丛书直到50年代后期才出齐。著名空气动力学学者钱学森、林家翘、郭永怀都是该丛书的主要作者。

进入50年代，洲际核导弹的研制成为苏美两国武器竞赛的关键项目。苏联在1957年10月4日发射了世界上第一颗人造地球卫星，显示了苏联有发射洲际导弹的能力；1961年4月12日，世界上第一位航天员加加林(Ю.А.Гагарин)乘“东方”1号飞船实现了绕地球的轨道飞行。美国提出了“阿波罗”登月计划，并于1969年

7月20日实现了两名航天员登上了月球,并顺利地返回;1981年4月12日美国"哥伦比亚"号航天飞机从地面起飞,绕地球36圈以后成功地降落在爱德华兹空军基地。另一方面,气动性能先进的苏-27和F-22等也相继出现。这些大大促进了航空航天事业的发展。作为航空航天事业的基础,近代空气动力学不仅涉及低速、跨声速、超声速,而且包括高超声速和超高速范围,此时空气中已产生离解、电离和其他化学反应。空气动力学已不再仅仅是30年代以机翼理论为代表的传统的学科,它的发展引发了多学科之间相互渗透,大大丰富了空气动力学的内涵。

过去近50年的航空航天事业的迅速发展,拉动了空气动力学各方面的研究工作,使空气动力学作为一个重要学科,全方位突出于航空航天科学的前沿。特别是半个世纪以来计算机及计算理论和技术的发展使计算流体力学(计算空气动力学)成为一个主要的分支学科;电子技术、控制技术及传感器技术的迅猛发展使气动实验技术日新月异,从以前宏观的测力测压,发展到精细流场的测量;非线性动力学的发展和拓扑分析提供了新的理论武器。在这半个世纪内虽然有空气动力学专著出版,但是没有看到30年代、50年代那样高品位的空气动力学丛书。因此,在1994年的一次有国内部分空气动力学工作者参加的座谈会上,张涵信等同志就倡议由中国的空气动力学工作者发挥集体智慧来编著一套跨世纪的近代空气动力学丛书,并很快得到原国防科工委的赞同,成立了编委会,编委会的日常管理工作挂靠在中国空气动力研究与发展中心,并在国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社的支持下开展工作。

前面这两套丛书都是世界级权威写的。30年代的丛书是世界性的,主要的作者包括了世界性的科学家普朗特、泰勒和卡门。50年代普林斯顿大学的那套丛书,主要的作者都是当时在美国的第一流科学家。我们的丛书要继承和发扬前两套丛书的优点,显然,编著工作是十分艰巨的。

新中国成立后,在自力更生的方针指引下,由于国内空气动力

学部门和全国有关单位的大力协同，以及气动力学工作者的努力奋斗，在钱学森和郭永怀的率领下，不仅继承了普朗特、卡门学派的优良传统，而且在钱学森发展的系统工程思想的指导下，抓住空气动力学总体，促进各学科之间的交叉，使我国的空气动力学在过去40多年的时间里得到了迅速的发展，可以说从无到有接近和达到国际先进水平，并积累了十分宝贵的经验。我们不能妄自菲薄，应该很好地加以总结，使这套丛书能充分反映新中国空气动力学工作者的重要成就。

我们并不认为这套丛书是经典性的、完美无缺的，但是是认真朝这个方向努力的。我们希望这套丛书的出版不仅能够促进中国航空航天事业在21世纪的发展，并且对世界航空航天事业也有所贡献。

庄逢甘

1999年9月9日

前　言

空气动力学是研究空气和其他气体的运动以及与物体相互作用的科学，是航空航天技术最重要的理论基础之一。飞机和航天器的外形不断改进，性能不断提高，无不与空气动力学的发展密切相关。在新型飞行器设计中，空气动力学将起到愈发重要的作用。

我国的航空航天事业取得了举世瞩目的成就，广大空气动力学工作者为发展航空航天事业和空气动力学科学做出了突出贡献。为了促进空气动力学的进一步发展，迎接新世纪挑战，总结经验，培养人才，更好地为航空航天事业和国民经济服务，特组织编著出版近代空气动力学丛书。

近代空气动力学丛书由20多种单本专著组成，分理论和实验两部分。理论部分包括：跨声速空气动力学理论，无黏性高超声速空气动力学理论，稀薄气体动力学，计算流体力学——差分方法的原理与应用，计算流体力学谱方法，流体力学的有限元方法，高速气流传热与烧蚀热防护，多相湍流反应流体力学，高温非平衡空气绕流，湍流，旋涡与分离流动结构的分析，风工程与工业空气动力学，飞机设计空气动力学，发射气体动力学等。实验部分包括：风洞实验，风洞天平，风洞实验干扰与修正，脉冲风洞，近代流动显示技术等，丛书的编著坚持“五性”原则。即桥梁性：丛书是基础空气动力学到空气动力学前沿过渡的桥梁。专题性：丛书分成若干单本，每一单本仅涉及一个专门领域，是专著性丛书。近代性：丛书不仅重视学科已有的成就，而且重视近代的发展。系统性：每一单本专著，均有系统地介绍该领域的知识和发展。配套性：丛书的各单本专著联合在一起，基本覆盖了近代空气动力学各领域。为了组织和推动丛书的编著，组成了以庄逢甘院士为主任委员的编辑

委员会，负责制定丛书编写计划、选定编著者、审查书稿以及向国防科技图书出版基金评审委员会推荐申请资助等。中国空气动力研究与发展中心对编辑委员会的工作在人员和经费方面都给予了支持。丛书的各单本专著系通过申请国防科技图书出版基金获得资助后，由国防工业出版社列选出版。

本书从多相流体力学、湍流模型理论和反应流体力学相结合的角度，阐述了多相（气体－颗粒/液雾，液体－颗粒/气泡，液体－液体等）湍流反应（包括燃烧）流动的基本理论、基本现象、数学模型、数值模拟结果及其应用。全书分成8章，包括颗粒群基本性质和颗粒动力学；层流和湍流多相反应流动的基本方程组；两相湍流的若干实验现象；单相湍流的封闭模型；两相湍流相互作用及其封闭模型；湍流和化学反应的相互作用及其封闭模型；多相湍流反应流动的数值解法；多相湍流反应流体力学在各种装置内流动和反应过程中若干应用示例。和作者过去出版的中英文专著的显著不同之处是，本书具有更完善的多相湍流反应流体力学的体系，删去了有关燃烧基础理论的分析解，层流两相流动的分析解等内容，丰富了多相湍流和湍流反应流的内容，突出地引入和总结了1993年至今作者本人和国际上取得的最新研究成果。

本书主要针对流体力学、热能和工程热物理、航空和航天、化工和冶金、石油、核能、水利等领域从事多相反应流动研究的研究和技术人员，高校教师和研究生，作为科研、设计、教学和学习的参考用书。

本书作者感谢“近代空气动力学丛书”主编和副主编，中国空气动力研究发展中心庄逢甘院士和张涵信院士支持本书的出版和提出的方针性意见。感谢中国科学院力学研究所吴承康院士，国防科学技术大学王承尧教授和方丁酉教授对本书内容的评审和宝贵意见。他们的意见对提高本书的水平起了重要作用。感谢跟本书内容有关的作者的同事和学生：林文漪教授，李荣先教授，张健教授，黄晓晴博士，洪涛博士，廖昌明博士，罗伟炜博士，周彪博士，孙凯梅女士，郭印诚副教授，李勇博士，陈涛博士，徐一博

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

士，罗刚博士，杨玟博士，李力博士，古红霞博士，陈兴隆博士等。正是由于他们和作者的合作以及所付出的辛勤劳动，取得的研究成果，充实了本书的内容。作者感谢本书责任编辑，国防工业出版社吴芝萍编审为本书的编辑和出版所作出的巨大努力。

希望广大同行专家和读者在阅读本书后能提出批评和宝贵意见。

周 力 行

2001 年 2 月于北京清华园

近代空气动力学丛书编辑委员会
组成人员

主任委员　庄逢甘

副主任委员　张涵信　崔尔杰　贺德馨　张仁杰

委　　员　（按姓氏笔画为序）

王承尧　王政礼　邓学蓥　田　震

乔志德　邬华谟　刘官德　安复兴

杨其德　杨岐生　李椿萱　吴芝萍

吴望一　沈　青　沈孟育　苗瑞生

范洁川　俞鸿儒　蒋　范　程厚梅

舒　玮　童秉纲

目　录

主要符号表 …… 1
绪论 …… 3
第 1 章　颗粒群基本性质和颗粒动力学 …… 10
1.1　颗粒群/液雾的基本性质 …… 10
1.2　颗粒/液滴阻力和传热传质 …… 11
1.3　颗粒动力学 …… 12
第 2 章　层流和湍流多相流动基本方程组 …… 17
2.1　多相流动系统的控制体 …… 17
2.2　体积平均概念及其关系式 …… 18
2.3　各相内“细观”守恒方程组 …… 19
2.4　层流/瞬态多相流动体积平均守恒方程组 …… 20
2.5　稀疏湍流多相反应流动雷诺时平均方程组 …… 25
2.6　湍流气液固三相流动质量加权平均方程组 …… 27
2.7　湍流两相流动的 PDF 方程和统计平均方程组 …… 31
2.8　两相雷诺应力和标量输运方程组 …… 34
第 3 章　湍流气粒两相流动的若干实验现象 …… 42
3.1　湍流气粒两相流动的测量 …… 42
3.2　湍流两相射流 …… 43
3.3　湍流突扩两相流动 …… 46
3.4　湍流旋流两相流动 …… 52
3.5　回流 – 旋流两相流动 …… 66
第 4 章　单相湍流的封闭模型 …… 74
4.1　单相湍流动能方程的封闭 …… 75
4.2　$k-\varepsilon$ 双方程模型及其应用 …… 77

4.3 单相湍流的二阶矩封闭 …… 81
4.4 雷诺应力和热流输运方程模型 …… 84
4.5 代数应力和热流模型——扩展的 $k-\varepsilon$ 模型 …… 87
4.6 DSM，ASM 模型的应用及其和其他模型的比较 …… 89
第 5 章 两相湍流及其相互作用的封闭模型 …… 102
5.1 颗粒湍流脉动的 Hinze – Tchen 代数模型 …… 104
5.2 统一二阶矩两相湍流模型 …… 105
5.3 $k-\varepsilon-k_p$ 和 $k-\varepsilon-A_p$ 两相湍流模型 …… 111
5.4 USM，$k-\varepsilon-k_p$ 和 $k-\varepsilon-A_p$ 两相湍流模型的应用和检验 …… 113
5.5 改进的二阶矩两相湍流模型 …… 124
5.6 质量加权平均的二阶矩两相湍流模型 …… 130
5.7 $k-\varepsilon$ – PDF 与 DSM – PDF 两相湍流模型 …… 139
5.8 颗粒湍流的 Monte – Carlo 模拟 …… 151
5.9 两相湍流的非线性 $k-\varepsilon-k_p$ 模型 …… 157
5.10 颗粒相的拉格朗日(轨道)模拟 …… 165
5.11 湍流两相流动的单流体模型 …… 170
5.12 湍流两相流动的直接模拟和大涡模拟 …… 171
5.13 气泡 – 液体两相湍流的二阶矩模拟 …… 174
第 6 章 湍流和化学反应相互作用及其封闭模型 …… 181
6.1 时均反应率 …… 181
6.2 湍流反应的 EBU – Arrhenius 模型 …… 182
6.3 湍流反应的二阶矩模型 …… 185
6.4 湍流反应的简化 PDF – 快速反应和局部瞬时平衡模型 …… 200
6.5 湍流反应的简化 PDF – 有限反应率模型 …… 209
6.6 湍流反应的 PDF 输运方程模型 …… 216
6.7 湍流燃烧的直接模拟和大涡模拟 …… 218
6.8 湍流两相燃烧的双流体模型 …… 221
第 7 章 多相湍流反应流动的数值解法 …… 225

7.1 多相湍流流动 E－L 模型的 PSIC 算法 …… 225
7.2 多相湍流反应流动 E－E－L 模型的 LEAGAP 算法 …… 229
7.3 多相湍流反应流动 E－E 模型的 PERT 算法 …… 231
7.4 多相湍流反应流动 E－E 模型的 IPSA 算法 …… 232
第 8 章 多相湍流反应流体力学的应用示例 …… 235
8.1 油水旋流分离器内流动和分离 …… 235
8.2 旋流煤粉燃烧器内两相流动 …… 240
8.3 大速差射流燃烧室内两相流动和煤粉燃烧 …… 246
8.4 四角喷燃炉内三维两相流动和煤粉燃烧 …… 253
8.5 旋风除尘器内湍流流动 …… 261
8.6 涡旋炉内煤粉燃烧 …… 263
8.7 固排渣旋风炉内两相流动和煤燃烧 …… 265
8.8 结束语 …… 269
附录 层流多组分反应气体基本方程组 …… 271
参考文献 …… 283
主题词索引 …… 295

CONTENTS

Nomenclature 1
Introduction 3
Chapter 1 Basic Properties of Particle Cloud and Particle Dynamics 10
1.1 Basic Properties of Particle Cloud/Liquid Spray 10
1.2 Particle/droplet Drag, Heat and Mass Transfer 11
1.3 Particle Dynamics 12
Chapter 2 Basic Equations of Laminar and Turbulent Multiphase Flows 17
2.1 The Control Volume in a Multiphase - Flow System 17
2.2 The Concept and Relationships of Volume Averaging 18
2.3 "Microscopic" Conservation Equations inside Each Phase 19
2.4 Volume - Averaged Equations of Laminar (Instantaneous) Multiphase Flows 20
2.5 Reynolds Time - Averaged Equations of Dilute Turbulent Multiphase Reacting Flows 25
2.6 Mass - weighed Averaged Instantaneous Equations of Turbulent Gas - Liquid - Solid Flows 27
2.7 The PDF Transport Equation and Statistically Averaged Equations 31
2.8 The Two - Phase Reynolds Stress and Scalor Transport Equations 34
Chapter 3 Some Experimental Facts of Turbulent

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com