



“十三五”国家重点图书出版规划项目·重大出版工程

高超声速出版工程

高超声速流动 数值模拟方法及应用

陈坚强 张益荣 郭勇颜 万钊 著



科学出版社



“十三五”国家重点图书出版规划项目·重大出版工程

高超声速出版工程

高超声速流动 数值模拟方法及应用

陈坚强 张益荣 郭勇颜 万 钊 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要以作者及研究团队多年来围绕高超声速流动数值模拟及解决典型关键问题的相关工作为主要内容编写而成的,所选问题大多是当前乃及今后高超声速技术研究中必须关注的热点问题。全书分为三部分,共六章:第一部分为研究背景及计算方法、物理模型等方面的介绍,由第一、二章组成,其中第一章为绪论,主要介绍高超声速流动基本特征、研究进展及存在的技术挑战;第二章主要介绍 CFD 的基本要素,包括控制方程、物理模型、数值计算格式等,以保持书稿的完整性;第二部分是关于 CFD 数据的精度、误差及不确定度分析等内容,由第三章组成,主要讨论 CFD 的验证与确认问题,并结合典型问题给出了 CFD 验证与确认的完整过程;第三部分是典型高超声速问题研究,由第四、五、六章组成,其中第四章介绍 CFD 在喷流干扰及喷流/舵面复合控制研究中的应用;第五章介绍典型飞行器/发动机内外流一体化复杂流动模拟的一些关键技术和典型结果;第六章为高超声速气动力特性天地相关性的研究分析。

本书可供从事高超声速空气动力学研究人员,高校及研究所流体力学、飞行器设计等相关专业的研究生阅读,也可作为航空航天相关领域工程技术人员的工具书和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高超声速流动数值模拟方法及应用 / 陈坚强等著.

—北京:科学出版社,2019.7

高超声速出版工程 国家出版基金项目 “十三五”

国家重点出版物出版规划项目·重大出版工程

ISBN 978-7-03-061138-3

I. ①高… II. ①陈… III. ①高超音速流动—数值模拟—研究 IV. ①O354.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 083612 号

责任编辑:徐杨峰 / 责任校对:谭宏宇

责任印制:黄晓鸣 / 封面设计:殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

南京展望文化发展有限公司排版

苏州市越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2019 年 7 月第一次印刷 印张: 17 3/4 彩插 4

字数: 320 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

高超声速出版工程
专家委员会

顾 问

王礼恒 张履谦

主任委员

包为民

副主任委员

杜善义 吕跃广

委 员

(按姓名汉语拼音排序)

艾邦成 包为民 陈连忠 陈伟芳 陈小前
邓小刚 杜善义 李小平 李仲平 吕跃广
孟松鹤 闵昌万 沈 清 谭永华 汤国建
王晓军 尤延铖 张正平 朱广生 朱恒伟

高超声速出版工程·高超声速空气动力学系列

编写委员会

主 编

沈 清

副主编

艾邦成 陈伟芳 闵昌万

编 委

(按姓名汉语拼音排序)

艾邦成 曹 伟 陈坚强 陈伟芳 方 明

符 松 柳 军 罗金玲 罗振兵 闵昌万

沈 清 杨基明 叶友达 余永亮 周 禹

丛书序

飞得更快一直是人类飞行发展的主旋律。

1903年12月17日,莱特兄弟发明的飞机腾空而起,虽然飞得摇摇晃晃犹如蹒跚学步的婴儿,但拉开了人类翱翔天空的华丽序幕;1949年2月24日,Bumper-WAC从美国新墨西哥州白沙发射场发射升空,上面级飞行速度超越马赫数5,实现人类历史上第一次高超声速飞行。从学会飞行,到跨入高超声速,人类用了不到五十年,蹒跚学步的婴儿似乎长成了大人,但实际上,迄今人类还没有实现真正意义的商业高超声速飞行,我们还不得不忍受洲际旅行需要十多个小时甚至更长飞行时间的煎熬。试想一下,如果我们将来可以在两小时内抵达全球任意城市的时候,这个世界将会变成什么样?这并不是遥不可及的梦!

今天,人类进入高超声速领域已经快70年了,无数科研人员为之奋斗了终生。从空气动力学、控制、材料、防隔热到动力、测控、系统集成等众多与高超声速飞行相关的学术和工程领域内,一代又一代科研和工程技术人员传承创新,为人类的进步努力奋斗,共同致力于推动人类飞得更快这一目标。量变导致质变,仿佛是天亮前的那一瞬,又好像是蝶即将破茧而出,几代人的奋斗把高超声速推到了嬗变前的临界点上,相信高超声速飞行的商业应用已为期不远!

高超声速飞行的应用和普及必将颠覆人类现在的生活方式,极大地拓展人类文明,并有力地促进人类社会、经济、科技和文化的发展。这一伟大的事业,需要更多的同行者和参与者!

书是人类进步的阶梯。

实现可靠的长时间高超声速飞行堪称人类在求知探索的路上最为艰苦卓绝的一次前行,将披荆斩棘走过的路夯实、巩固成阶梯,以便于后来者跟进、攀登,

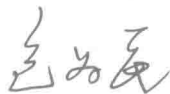
意义深远。

以一套丛书,将高超声速基础研究和工程技术方面取得阶段性成果和宝贵经验固化下来,建立基础研究与高超声速技术应用的桥梁,为广大研究人员和工程技术人员提供一套科学、系统、全面的高超声速技术参考书,可以起到为人类文明探索、前进构建阶梯的作用。

2016年,科学出版社就精心策划并着手启动了“高超声速出版工程”这一非常符合时宜的事业。我们围绕“高超声速”这一主题,邀请国内优势高校和主要科研院所,组织国内各领域知名专家,结合基础研究的学术成果和工程研究实践,系统梳理和总结,共同编写了“高超声速出版工程”丛书,丛书突出高超声速特色,体现学科交叉融合,确保了丛书的系统性、前瞻性、原创性、专业性、学术性、实用性和创新性。

丛书记载和传承了我国半个多世纪尤其是近十几年高超声速技术发展的科技成果,凝结了航天航空领域众多专家学者的智慧,既可为相关专业人员提供学习和参考,又可作为工具指导书。期望本套丛书能够为高超声速领域的人才培养、工程研制和基础研究提供有益的指导和帮助,更期望本套丛书能够吸引更多的新生力量关注高超声速技术的发展,并投身于这一领域,为我国高超声速事业的蓬勃发展做出力所能及的贡献。

是为序!



2017年10月

前 言

高超声速技术发展日新月异,各军事强国都在争先恐后地开展研究,建设各自相应的地面试验设施,安排相关的试验研究计划,试图在该领域抢占制高点。在研究计划方面,如 2007 年发起的美国国家高超声速基础研究计划 2010~2030、2012 年提出的高速打击武器演示验证计划和集成高超声速计划,以及 2016 年提出的高超声速飞行试验平台等;在武器研制方面,如 2003 年美国提出的高超声速技术飞行器计划和高超声速巡航飞行器计划,以及最近几年迅速发展起来的 X-37B 和 X-51A 等。我国也正在开展具有中国特色的高超声速技术研究。

随着飞行马赫数的增加,相比常规航空领域,高超声速流动更为复杂,不仅要考虑高温真实气体效应、黏性干扰效应和稀薄气体效应等特殊效应的影响,同时还要考虑它们相互间的耦合作用及复杂的气动力/热环境及热防护问题。因此,高超声速领域的研究工作十分具有挑战性。

1989 年,从中国科学技术大学近代力学系(该系首任主任正是我国高超声速技术的奠基人钱学森先生)毕业后,我来到中国空气动力研究与发展中心跟随张涵信先生攻读硕士学位。正逢世界范围内吸气式高超声速飞行器研究的又一次复兴,在庄逢甘先生的建议下,我开始了高超声速燃烧数值模拟方面的研究工作,这也是我第一次真正接触高超声速这一领域。当时的研究工作一切都是从零开始,就连最基本的考虑真实气体效应的特征方程分解及特征值的表达式都没有现成的公式,全部需要自己推导,而且可借鉴的资料也少得可怜。1992

年,我硕士毕业后继续跟随张先生攻读博士学位,从事高超声速燃烧流动数值模拟这一领域的研究,直至1996年博士毕业。虽然由于工作调整,后期没有把工作重心放在这一方向上,但这项工作始终是领我进入高超声速研究领域的敲门砖。更荣幸的是,现在许多正在从事高超声速燃烧研究的同志每次碰到我都说,我当时的博士论文是他们开始这一专业研究的最重要的参考资料。

从2000年起我有幸参与了我国绝大部分与高超声速研究相关的试验研究计划,如国家自然科学基金“近空间飞行器的关键基础科学问题”重大研究计划、973项目、863项目、国家重大工程专项、国家重点研发计划等,相继在高超声速流动数值模拟计算方法、高超声速多物理效应及其相互间的耦合、RCS喷流干扰、高超声速飞行器动态特性、气动力天地相关性、飞行器/发动机内外流一体化流动模拟,以及与数据精度相关的CFD验证与确认等方面取得了一些成绩,同时也积累了丰富的工程实际经验。2013年时我就有一个想法(或者说是一种冲动),希望将自己及团队这些年所做的工作、所取得的成功经验或失败的教训写出来,供从事这方面研究的同志参考,但由于种种原因,一直没有静下心来好好整理,虽然写作提纲已在自己的计算机中躺了若干年。从去年开始,我组织团队整理相关素材,通过一年多的努力,才最终形成这个书稿。待我放下手中的键盘,看着行行文字,条条曲线,与团队十多年一起工作的情景历历在目。

本书主要以本人及研究团队多年来围绕高超声速流动数值模拟及解决典型关键问题的相关工作为主要内容组织而成,所选问题大都是当前乃至今后高超声速技术研究中必须关注的热点问题。全书分为三部分。第一部分为研究背景及计算方法、物理模型等方面的介绍,由第一章和第二章组成,其中第一章为绪论,主要介绍高超声速基本特征、研究进展及存在的技术挑战;第二章主要介绍CFD的基本要素,包括控制方程、物理模型、数值计算格式等,以保证整个书稿的完整性。第二部分是关于CFD数据的精度、误差及不确定度分析等内容,由第三章组成,主要讨论CFD的验证与确认问题,并结合典型问题给出了CFD验证与确认的完整过程。第三部分是典型高超声速问题研究,由第四章至第六章组成,其中第四章介绍CFD在喷流干扰及喷流/舵面复合控制研究中的应用;第五章介绍典型飞行器/发动机内外流一体化复杂流动模拟的一些关键技术和典型结果;第六章为高超声速气动力特性天地相关性的研究分析。

本书的出版首先要感谢张涵信院士,是他老人家将我领入了高超声速这一神秘的领域,我和我的研究团队始终秉承他提出的“创新是灵魂,应用是归宿”的宗旨,以解决工程问题为己任,坚持创新发展之路。感谢高树椿研究员,他一直是我学生时代的副导师,也是我工作和生活中的良师,不仅传授我知识,更教我如何为人、如何脚踏实地地做科研。其次也要感谢与我们一起共同工作、战斗过的邓小刚院士,正是在他的领导下,团队开发出了我国第一款具有自主知识产权的高超声速软件平台(CHANT),为我们的后续研究打下了坚实的技术基础,本书中绝大部分工作都是基于该平台完成的。同时也要感谢我的合作伙伴、学生、研究团队的成员们,正是他们的辛勤劳动,才能攻克一个又一个难关,正是他们的无私奉献,才有团队今天的成功。本书的写作过程中,涂国华参与了第一章的写作,郭勇颜、燕振国参与了第二章的写作,张益荣参与了第三章的写作,万钊、陈琦和江定武参与了第四章的写作,郭勇颜参与了第五章的写作,张益荣、万钊参与了第六章的写作。另外,在本书的写作过程中,毛枚良提出了一些有益的建议,并参与了部分章节的校对工作,郭勇颜和施文奎完成了后期的校对和排版工作。本书中文献及图的引用,我们尽可能注明出处,如果仍存在遗漏、疏忽,也请原作者谅解。此外,还要感谢国家自然科学基金、国家重大工程专项、国家重点研发计划(编号:2016YFA0401200)以及其他各类项目的资助,书中很大部分工作、成果都与这些项目有着千丝万缕的联系,感谢他们给我们施展才华的舞台。感谢科学出版社的大力帮助与支持。由于作者水平有限,书中的不足之处在所难免,希望同行专家与广大读者批评指正。

最后,也要感谢我们的家人与各级领导们,正是他们所提供的全方位的支持和保障,激励我们不断攀登新的高峰。



二〇一八年四月二十日于四川绵阳

高超声速出版工程

目 录

丛书序

前言

第一章 绪 论

1

- 1.1 基本概念 / 2
 - 1.1.1 高超声速流动的典型特征 / 2
 - 1.1.2 高超声速流动数值模拟的研究范畴 / 5
 - 1.1.3 高超声速流动数值模拟的作用 / 12
- 1.2 高超声速流动数值模拟技术的发展现状 / 13
 - 1.2.1 更准确——物理模型的研究进展 / 13
 - 1.2.2 更精确——空间离散算法的研究进展 / 15
 - 1.2.3 更高效——时间推进方法的研究进展 / 19
 - 1.2.4 数值模拟准度与精度的正确评价 / 19
- 1.3 本书的写作目的与内容 / 21
- 参考文献 / 22

第二章 高超声速流动数值模拟方法

26

- 2.1 引言 / 26
- 2.2 控制方程 / 26

- 2.2.1 三维流动的动力学方程 / 26
- 2.2.2 坐标变换 / 29
- 2.2.3 热力学方程 / 30
- 2.2.4 输运系数 / 31
- 2.2.5 化学反应模型及生成源项 / 32
- 2.3 数值方法 / 33
 - 2.3.1 控制方程的离散 / 34
 - 2.3.2 时间离散 / 35
 - 2.3.3 无黏项离散 / 39
 - 2.3.4 黏性项离散 / 48
- 2.4 边界条件 / 50
- 2.5 湍流模型 / 52
 - 2.5.1 SA 湍流模型 / 52
 - 2.5.2 Menter SST 模型 / 54
 - 2.5.3 可压缩性修正方法 / 56
 - 2.5.4 湍流模型方程的统一形式 / 57
 - 2.5.5 湍流模型方程的离散 / 58
 - 2.5.6 湍流模型的边界条件 / 58
 - 2.5.7 湍流模型离散方程的求解 / 59
- 2.6 静态气动力计算公式 / 59
- 附表 / 61
- 参考文献 / 70

第三章 高超声速流动数值模拟的验证与确认

74

- 3.1 引言 / 74
- 3.2 国内外的研究进展 / 75
- 3.3 基本概念与方法 / 77
 - 3.3.1 验证的定义 / 78
 - 3.3.2 确认的定义 / 79
 - 3.3.3 实验中的误差和不确定度 / 79
 - 3.3.4 CFD 中的误差和不确定度 / 81

- 3.4 验证过程 / 86
 - 3.4.1 迭代收敛误差 / 87
 - 3.4.2 空间离散误差 / 89
- 3.5 确认过程 / 92
 - 3.5.1 确认的方法学 / 92
 - 3.5.2 实验数据处理 / 95
 - 3.5.3 计算数据确认 / 95
- 3.6 不确定度量化 / 97
 - 3.6.1 非概率方法 / 97
 - 3.6.2 概率方法 / 101
- 3.7 典型问题的验证与确认 / 103
 - 3.7.1 简单轴对称体单元问题的验证与确认研究 / 103
 - 3.7.2 复杂流动基准问题的验证与确认研究 / 114
 - 3.7.3 简单翼身组合体的验证与确认研究 / 130
- 参考文献 / 142

第四章 喷流干扰及喷流/舵面复合控制研究

147

- 4.1 引言 / 147
- 4.2 国内外研究进展 / 149
- 4.3 喷流模拟方法研究 / 152
 - 4.3.1 喷流相似准则研究 / 152
 - 4.3.2 喷流介质模型研究 / 155
- 4.4 喷流干扰复杂流动机理及气动特性研究 / 158
 - 4.4.1 喷流干扰流场的拓扑结构 / 158
 - 4.4.2 来流参数和喷口几何特征对喷流干扰气动特性的影响 / 165
- 4.5 RCS/舵面相互干扰的影响研究 / 172
 - 4.5.1 模型、网格以及喷流参数 / 173
 - 4.5.2 脉冲喷流相互干扰影响的研究 / 175
 - 4.5.3 舵面对喷流控制效果影响的研究 / 178
 - 4.5.4 喷流对舵面控制效果影响的研究 / 181

参考文献 / 185

第五章 内外流一体化复杂流动模拟

188

- 5.1 引言 / 188
- 5.2 数值方法验证与确认 / 190
 - 5.2.1 典型问题的方法验证 / 190
 - 5.2.2 复杂飞行器内外流一体化的数值计算 / 201
- 5.3 轴对称飞行器内外流一体化研究 / 206
 - 5.3.1 流场特性分析 / 207
 - 5.3.2 侧压板变化的影响 / 209
 - 5.3.3 溢流槽几何尺寸的影响 / 210
- 5.4 升力体飞行器内外流一体化研究 / 213
 - 5.4.1 流场特性分析 / 213
 - 5.4.2 气动特性分析 / 215
 - 5.4.3 支架干扰修正 / 218
- 参考文献 / 219

第六章 高超声速气动力特性天地相关性

222

- 6.1 引言 / 222
- 6.2 国内外研究进展 / 225
 - 6.2.1 国外高超声速气动力天地相关性的研究情况 / 226
 - 6.2.2 国内高超声速气动力天地相关性的研究情况 / 234
- 6.3 气动力数据天地关联方法的研究 / 235
 - 6.3.1 黏性干扰参数考察研究 / 236
 - 6.3.2 黏性干扰数学模型研究 / 242
 - 6.3.3 考虑多物理效应的天地相关性研究 / 243
- 6.4 典型的高超声速飞行器气动力相关性研究 / 244
 - 6.4.1 数值计算方法和研究对象 / 244
 - 6.4.2 单物理效应对气动力特性的影响规律 / 245
 - 6.4.3 多物理耦合效应对气动力特性的影响规律 / 254

- 6.4.4 黏性干扰的数学模型研究 / 259
- 6.4.5 模型预测结果误差分析 / 262
- 6.4.6 考虑真实气体和稀薄气体效应的影响 / 263
- 参考文献 / 267

彩 图

269

第一章

绪 论

高超声速流动通常指当飞行器的速度远远大于周围介质的声速时产生的流动,通常将马赫数超过 5 的流动称为高超声速流动。自从我国科学家钱学森于 1946 年在《论高超声速相似律》^[1]一文中使用“高超声速”(hypersonic)术语后,高超声速的概念在学术界和工程界得到了迅速传播。由于高超声速飞行器具有特殊的军事意义、经济及科技价值,所以世界各国纷纷将高超声速飞行器的研制列入重点发展计划。以美国为例,其技术发展水平和人员、资金投入力度等方面都走在世界最前列,先后提出了一系列高超声速发展计划,包括 20 世纪 60 年代的 X-15 验证机、1986 年的国家空天飞机计划(national aerospace plane, NASP)、2001 年提出的航空航天倡议(national aerospace initiative, NAI)、2002 年提出的高超声速飞行演示计划(hypersonic flight demonstration program, HyFly),以及 2003 年提出的高超声速技术飞行器计划(hypersonic technology vehicle, HTV)和高超声速巡航飞行器计划(hypersonic cruise vehicle, HCV),最近几年迅速发展起来的 X-37B 和 X-51A(图 1.1),2007 年发起的美国国家高超声速基础研究计划(national hypersonic fundamental research plan, NHFRP)2010~2030、2012 年提出的高速打击武器(high speed strike weapon, HSSW)演示验证计划和集成高超声速计划(integrated hypersonics, IH),以及 2016 年提出的高超声速飞行试验平台(HyRAX)等,其在高超声速气动外形设计、吸气式发动机、物理化学建模、热防护以及数据再利用等方面积累了丰富的技术储备和经验,在诸多领域取得了举世瞩目的成就。

高超声速流动数值模拟是计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的重要分支,是获取高超声速飞行器气动力和气动热数据、开展高超声速流动基础科学问题研究的三大手段之一。与另外两大手段,即风洞试验和飞行试验相比,数值模拟具有成本低、效率高、风险小、获得的流场信息全面等优点。

但是,高超声速流动数值模拟面临多种挑战,其中包括高温真实气体效应、黏性干扰效应、稀薄气体效应、湍流与转捩、高空气动热环境、反作用控制系统(reaction control system, RCS)与流场的相互干扰等问题。由于风洞试验和飞行试验研究高超声速流动的能力有限,高超声速流动模拟虽然极具挑战性,但仍然具有不可替代的作用。通过 30 多年的努力,目前在高精度数值计算方法、真实气体效应、黏性干扰效应、稀薄气体效应、喷流干扰、内外流一体化模拟、CFD 验证与确认等方面都取得了系列研究成果,这些研究成果对促进我国高超声速事业的发展起到了至关重要的作用。

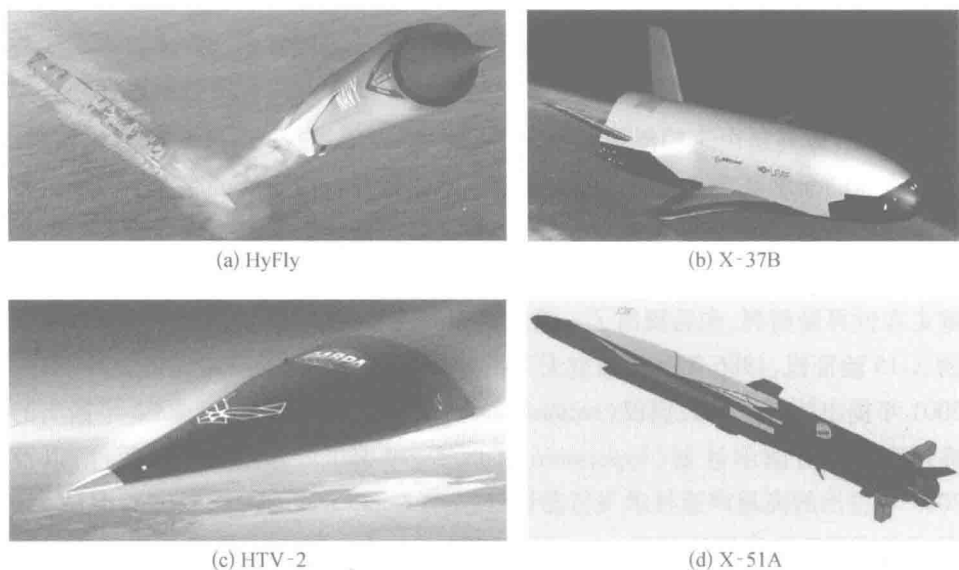


图 1.1 典型高超声速飞行器

1.1 基本概念

1.1.1 高超声速流动的典型特征

高超声速流动包含许多复杂的物理现象,使其呈现出不同于低速流动的特点。Hirschel^[2]给出了四类高超声速飞行器的主要气动力/热问题(图 1.2),这四类飞行器为:①再入飞行器(RV),如航天飞机和 X-37B;②巡航和加速飞行器(CAV),如 HTV2;③入轨和再入飞行器(ARV),如弹道导弹和返回式卫星等;