



“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版工程

高超声速出版工程

临近空间高超声速飞行器 计算空气动力学

艾邦成 著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版工程

高超声速出版工程

临近空间高超声速飞行器 计算空气动力学

艾邦成 著

贵州师范学院内部使用

科学出版社

北京

内 容 简 介

临近空间高超声速飞行器的研制具有十分重大的战略意义,本书以典型复杂外形高超声速飞行器为背景,采用计算空气动力学方法研究相关空气动力问题。本书共分为8章:第1章为绪论,介绍了临近空间与临近空间飞行器的基本概念及其流动特征;第2章为计算空气动力学数值模拟基础;第3章为高超声速飞行器动态特性计算方法;第4章为反作用控制系统喷流干扰计算方法;第5章为高超声速飞行器热环境计算方法;第6章为高温气体效应计算方法;第7章为高超声速稀薄气体效应及其计算技术;第8章为高温边界层流场与烧蚀耦合计算方法。

本书可供从事高超声速流体力学的研究人员阅读,也可作为航空航天气动、防热等相关领域工程设计人员的工具书和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

临近空间高超声速飞行器计算空气动力学 / 艾邦成著.
—北京: 科学出版社, 2020.1

“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版
工程 高超声速出版工程 国家出版基金项目

ISBN 978-7-03-062273-0

I. ①临… II. ①艾… III. ①高超声速飞行器—计算
空气动力学 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 201938 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

*

2020 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)
2020 年 1 月第一次印刷 印张: 17 1/2 插页: 7
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大幕;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,

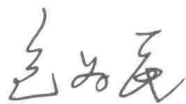
意义深远。

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

序

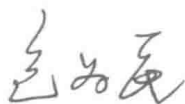
临近空间是地球大气层中距海平面 20 千米至数百千米之间的一段广泛的空域。通常,临近空间高超声速飞行器滑翔与机动飞行的空域介于 20 千米和 80 千米之间,不仅类似于常规飞行器能够充分利用空气动力,而且还具有更好的隐蔽性、更强的突防能力等优势。因此,在国防安全中,研制临近空间高超声速飞行器的战略意义十分重大。

作为在大气层中飞行的新型飞行器,临近空间高超声速飞行器同样面临着复杂的空气动力学问题。一方面,激波、分离、旋涡,以及转捩与湍流等一般性流体动力学过程依然存在;另一方面,还会出现剧烈的离解、电离、烧蚀等高温真实气体现象和显著的由空气稀薄引起的低密度、低雷诺数效应。许多时候,这些因素会相互耦合,呈现出非定常、非稳定、非线性、非平衡、多物理、强干扰的特征,对其进行预测与分析极其困难。尽管如此,为了实现临近空间高超声速飞行器的精细设计与有效控制,对其面临的复杂空气动力学问题进行准确的预测与分析是非常迫切和必要的。其中,计算空气动力学发挥着越来越突出的作用。

临近空间高超声速飞行器计算空气动力学面临的挑战是多方面的。首先是适用性,传统数值方法与模型需要重新评估,向临近空间极端条件进行有效推广;其次是创新性,基于对临近空间飞行环境物理及化学动力学机制的全新认识,发展新的数值技术与分析方法;然后是可靠性,破解计算结果亟待对比验证与临近空间地面实验及飞行试验数据不完整之间的矛盾;最后且最为重要的是应用性,既要根据实际设计需求准确地提出并解决关键科学问题,又要具有处理和攻克现有及未来临近空间高超声速飞行器工程应用难点的能力。尽管国内外相关研究已持续开展多年,但是大多较为粗浅和分散,远未成熟。

艾邦成研究员从博士研究生阶段开始,就一直以先进航空航天飞行器为主要应用背景,致力于高超声速空气动力学与气动热防护的研究,承担完成了多个国家基础研究项目及重要工程型号课题,持之以恒,成绩斐然。这本学术专著阐述了临近空间高超声速飞行器计算空气动力学概念,是他及其研究团队长期从事相关研究所取得的系列成果的一次难得的全面总结与系统论述。本书的研究内容均为临近空间高超声速飞行器计算空气动力学的热点问题,将理论与应用有机地结合到了一起,主要包括数值方法、物理模型,以及飞行动态特性、反作用喷流控制、复杂干扰热环境、高温气体与稀薄气体效应、高温烧蚀与流固耦合等,具有很强的启发性和参考性。

希望本书的编撰出版能够推进临近空间高超声速飞行器计算空气动力学的发展与完善,并对相关理论分析和实验研究起到有益的借鉴作用。



2019年6月

前 言

临近空间是近年来得到广泛关注并利用的一段特殊空域,因在其高度范围内空气从大气层稠密区逐渐过渡到近地轨道稀薄区,使得在这一空间长时间飞行的高超声速飞行器有着显著不同的特征。临近空间高超声速飞行器一般采用以高升阻比为代表的先进气动外形,追求精细化低冗余度设计,从而对空气动力研究提出了很多富有挑战性的课题,如激波/边界层干扰、湍流/转捩、非定常效应以及多物理场耦合等。同时,高超声速飞行还会带来包括高温化学反应、壁面催化、气体辐射和材料烧蚀等诸多复杂物理现象。在研究这一类飞行器的流动特性并开展设计过程中,受制于地面试验条件,计算空气动力学发挥着巨大的作用。

计算空气动力学的发展已经超过了半个世纪。在数学模型方面,求解的控制方程由简化的位势流方程、边界层方程逐渐发展为可描述复杂流动的 Euler 方程、Navier-Stokes 方程以及 Boltzmann 方程。在求解方法方面,也从早期的保角变换、面元叠加、小扰动线化等简化方法逐渐发展到目前的有限差分、有限体积、有限元等高精度数值方法。近年来,伴随着模型算法的不断成熟和高性能计算机的快速发展,计算空气动力学技术已成为型号研制过程中不可或缺的关键工具之一。

本书以典型复杂外形高超声速飞行器为背景,采用计算空气动力学方法研究相关的空气动力问题,涉及数值模拟方法、动导数与分离特性、喷流特性、热环境特性、高温物理效应、稀薄气体效应、边界层与烧蚀等技术专题。本书的核心内容来源于我国大量型号研制过程中实际面临的不同空气动力学问题,在总结不同解决途径的基础上进一步凝练和升华,因此具有较高的学术价值与应用价

值。同时,书中各章节基本涵盖了高超声速飞行器设计所关心的各种力热环境问题,因此本书也是一本难得的工程设计人员参考书籍。需要指出的是,在学习本书前应该具备一定的计算流体力学(特别是计算空气动力学)的相关知识,限于篇幅,书中对数值算法基础并未做过多的介绍,对此方面有需求的读者可参阅相关技术专著。

参与本书编写的人员较多,他们大都在这一领域有着丰富的工程应用经验。包括:杨武兵、张亮、杨云军、刘耀峰、苗文博、黄飞、俞继军等。在本书编写过程中,也得到了马汉东、董新德、王强、程晓丽和陈伟芳的悉心指导,得到了包为民院士、王晓军秘书长的大力帮助与关心。正因为大家的齐心协力,本书才得以完善和出版,对上述人员的贡献和帮助,我们一并表示衷心的感谢和崇高的敬意。

作 者

2019年7月于北京云岗

高超声速出版工程

目 录

丛书序

序

前言

第1章 绪 论

1

- 1.1 临近空间与临近空间飞行器 / 1
 - 1.1.1 吸气式高超声速巡航飞行器 / 2
 - 1.1.2 滑翔再入高超声速飞行器 / 3
 - 1.1.3 低轨再入飞行器 / 5
 - 1.1.4 离地入轨飞行器 / 6
 - 1.1.5 空天飞机与高超声速飞机 / 7
- 1.2 临近空间高超声速飞行器流动特征 / 8
 - 1.2.1 强压缩高温流动 / 8
 - 1.2.2 高空低密度流动 / 12
 - 1.2.3 流动/材料烧蚀耦合 / 13
- 参考文献 / 15

第2章 计算空气动力学数值模拟基础

18

- 2.1 流动控制方程 / 18

- 2.2 数值离散方法 / 20
 - 2.2.1 有限体积离散 / 20
 - 2.2.2 对流通量计算 / 21
 - 2.2.3 变量重构和限制器 / 28
 - 2.2.4 黏性通量计算 / 33
 - 2.2.5 时间推进求解 / 34
 - 2.2.6 边界条件 / 41
- 2.3 湍流模型 / 43
 - 2.3.1 Spalart-Allmaras 湍流模型 / 46
 - 2.3.2 剪切应力输运模型 / 47
 - 2.3.3 显式代数雷诺应力模型 / 48
- 参考文献 / 51

第3章 高超声速飞行器动态特性计算方法

56

- 3.1 动导数计算 / 57
 - 3.1.1 强迫振动 / 58
 - 3.1.2 自由振动 / 58
 - 3.1.3 准定常旋转法 / 60
 - 3.1.4 动导数典型算例 / 60
- 3.2 多体分离仿真 / 63
 - 3.2.1 抛罩分离 / 65
 - 3.2.2 级间分离 / 73
- 3.3 小结 / 78
- 参考文献 / 78

第4章 反作用控制系统喷流干扰计算方法

80

- 4.1 RCS 喷流干扰数值计算方法 / 83
 - 4.1.1 RCS 定常冷喷干扰数值计算方法 / 83
 - 4.1.2 脉冲喷流干扰非定常数值计算方法 / 85
 - 4.1.3 燃气热喷干扰数值计算方法 / 91

- 4.1.4 RCS 喷流干扰网格生成技术 / 93
- 4.2 高超声速复杂外形 RCS 喷流干扰特性 / 97
 - 4.2.1 单喷流干扰特性 / 97
 - 4.2.2 多喷流干扰特性 / 98
 - 4.2.3 喷流/舵面耦合干扰特性 / 100
- 4.3 小结 / 101
- 参考文献 / 102

第5章 高超声速飞行器热环境计算方法

104

- 5.1 热环境预测中的关键数值模拟技术 / 106
 - 5.1.1 计算网格 / 106
 - 5.1.2 空间离散格式 / 112
 - 5.1.3 湍流模型 / 116
- 5.2 典型临近空间高超声速飞行器热环境特性 / 124
 - 5.2.1 简单流动区域高热流分布特征 / 124
 - 5.2.2 复杂流动干扰区域高热流分布特征 / 126
- 5.3 典型高超声速飞行器热环境数值模拟 / 128
- 5.4 小结 / 131
- 参考文献 / 132

第6章 高温气体效应计算方法

134

- 6.1 物理模型与计算方法 / 135
 - 6.1.1 数学物理模型 / 136
 - 6.1.2 化学反应模型适用性 / 146
- 6.2 高温气体效应作用机制 / 151
 - 6.2.1 气动特性高温气体效应作用机理 / 151
 - 6.2.2 气体电离辐射影响机理 / 163
- 6.3 典型临近空间高超声速飞行器高温气体效应 / 166
 - 6.3.1 高温气体效应对气动特性的影响 / 166
 - 6.3.2 高温气体效应对气动热的影响 / 167

- 6.3.3 等离子体流场分布特性 / 168
- 6.4 小结 / 169
- 参考文献 / 169

第7章 高超声速稀薄气体效应及其计算技术

171

- 7.1 Knudsen 层与滑移边界条件 / 172
 - 7.1.1 Knudsen 层的流动机理 / 172
 - 7.1.2 滑移边界条件和滑移模型 / 173
 - 7.1.3 滑移模型的适应性分析 / 175
 - 7.1.4 梯形翼临近空间气动特性的计算分析 / 180
 - 7.1.5 热化学非平衡滑移效应 / 183
- 7.2 过渡流区的计算方法 / 187
 - 7.2.1 引言 / 187
 - 7.2.2 DSMC 方法 / 188
 - 7.2.3 粒子模拟混合算法 / 205
- 7.3 自由分子流区的 TPMC 方法 / 211
 - 7.3.1 引言 / 211
 - 7.3.2 TPMC 模拟的主要步骤 / 212
 - 7.3.3 主要关键技术 / 214
 - 7.3.4 航天器典型构件的多次反射效应分析 / 218
- 7.4 典型临近空间高超声速飞行器稀薄气体效应 / 220
- 7.5 小结 / 223
- 参考文献 / 223

第8章 高温边界层流场与烧蚀耦合计算方法

226

- 8.1 材料高温烧蚀基本理论与模拟方法 / 227
 - 8.1.1 烧蚀的基本现象及其对流场的影响 / 227
 - 8.1.2 材料烧蚀工程计算的理论基础 / 228
- 8.2 新型材料烧蚀特性与计算方法 / 231
 - 8.2.1 碳/碳化硅材料烧蚀特性计算方法 / 232

8.2.2	涂层抗氧化碳/碳材料烧蚀特性与局部流动分析 / 237
8.3	烧蚀影响飞行器绕流流场特性 / 247
8.3.1	烧蚀引射物面边界模型 / 248
8.3.2	烧蚀引射对气动加热影响 / 249
8.3.3	烧蚀对等离子体流场影响 / 253
8.4	边界层流动与烧蚀耦合计算方法 / 254
8.4.1	烧蚀外形计算方法 / 255
8.4.2	CFD 与烧蚀形变的耦合模拟 / 259
8.5	小结 / 261
	参考文献 / 262

彩 图

第 1 章

绪 论

1.1 临近空间与临近空间飞行器

在众所周知的常规飞机和低轨卫星运行区之间有一毗邻空间的区域,可称为临近空间。临近空间的空域有多种设定,美国军方将其设定在距海平面 20~300 km^[1],国际航空联盟将其设定在距海平面 20~100 km,国内普遍采用第二种设定。

相应地,将可在临近空间进行长久持续飞行的大气飞行器统称为临近空间飞行器。临近空间飞行器具有广阔的民用前景,它在科学探索、国土与海洋监测、防灾减灾、中继通信、洲际客运和航天运载等领域能够发挥重要作用。不言而喻,军事应用是研发这类飞行器的重要推动力。同低空大气飞行平台相比,临近空间飞行器的高超声速飞行提高了武器的生存能力;同自由空间航行平台相比,临近空间飞行器更灵活便捷、反应迅速、费效比低,易于定点投放和回收维护,执行任务更为有效。因此,临近空间武器日益受到军方的青睐。2005年,美国空军太空司令部(Air Force Space Command)在其 Schriever III 系列太空军事演习中,首次考虑了临近空间平台。目前,用于侦察、监视、通信、打击的临近空间飞行器已成为作战体系中的重要组成部分,成员也日益宽泛,包括气球、飞艇、无人机和高超声速飞行器,目前的研究热点主要在高超声速飞行。

目前,主要的临近空间高超声速飞行器包括吸气式高超声速巡航飞行器(如美国的 X-43A^[2])、滑翔再入高超声速飞行器(如美国的 HTV^[3-7])、低轨再入飞行器(如美国的 X-37B^[8-11])、离地入轨飞行器(如英国的“云霄塔^[12-15]”)及空天飞机与高超声速飞机。这些飞行器在临近空间长时间驻留,其设计必然要受临近空间中压力和密度等环境因素^[16]的约束。临近空间大气压力随高度的增加而快速下降,20 km 处最大压力约为海平面的 7.2%,在 20~35 km 的高度上,