

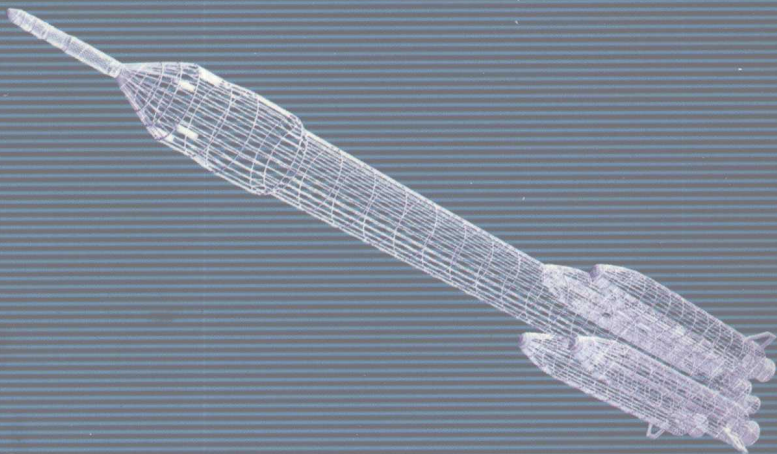
兵器科学与技术



国防科工委『十五』规划专著

火箭燃气射流动力学

张福祥 编著



哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社



国防科工委“十五”规划专著

火箭燃气射流动力学

张福祥 编著



哈尔滨工程大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 北京航空航天大学出版社

内容简介

本书系统地阐述了火箭(导弹)燃气射流流动及其对发射装置冲击所遵循的基本规律,燃气射流对发射装置和发射扰动的影响,以及在火箭(导弹)-发射系统设计中的应用。书中着重讨论火箭燃气射流动力学的基本物理概念,该动力学问题的建立过程、数学处理方法和实验研究方法,以及诸多的工程应用问题。本书为设计性能良好的火箭(导弹)发射系统、研究新型发射技术提供了必要的燃气射流动力学方面的知识。全书共分十章。

图书在版编目(CIP)数据

火箭燃气射流动力学/张福祥编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2004

ISBN 7-81073-621-3

I.火… II.张… III.火箭-气体动力学:射流-动力学 IV.V437

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 095886 号

火箭燃气射流动力学

张福祥 编著

责任编辑 宋旭东

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南通大街 145 号 哈工程大学 11 号楼

发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001

新华书店经销

黑龙江省教育厅印刷厂印刷

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:17.25 字数:450 千字

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷 印数:1—2 000 册

ISBN 7-81073-621-3/TH·20 定价:35.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:陈一坚 屠森林

编 委:王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春

总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天器为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改



改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相



关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科



技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

随着火箭、导弹、航空与航天技术的迅猛发展,各国有关研究单位和高等院校越来越重视火箭燃气射流问题的理论和实验研究。火箭燃气射流动力学是一门新兴的交叉学科,其内容广泛,涉及高温高速气体动力学、紊流力学、辐射气体动力学、化学动力学、燃烧学、火箭发动机气体动力学以及火箭飞行力学等方面的知识。理论分析、实验研究和数值模拟相结合与渗透,不仅推动了火箭燃气射流动力学的发展,而且大大加强了该学科的工程应用。编著本书旨在系统论述该学科内容,反映国内外当前具有代表性的先进研究成果以及我们所做的科研工作和成果。

本书主要讲述从火箭喷管喷入静止大气或伴随流的燃气射流流动与燃气射流对外界环境和实体(如武器、运载体、设备、人员……)冲击流动的一般理论和计算方法,及其在火箭(导弹)-发射装置武器系统设计中的应用、讨论火箭燃气射流动力学的基本物理概念、燃气射流动力学问题的建模过程、数学处理和实验研究方法、以及在实际工程应用中遇到的复杂燃气射流问题的处理方法等。我们希望本书既实用,又能阐明燃气射流动力学问题



的物理概念。当前计算流体力学及其相应的 CFD 数值计算软件发展迅速,但是书中无论介绍何种计算方法,都是基于解释和分析物理现象、机理与规律,这也是本书的侧重点。

全书共分 10 章:第 1,2 章概述火箭(导弹)发射装置发射时的燃气射流理论与火箭燃气射流的基本属性;第 3 章介绍超音速燃气射流混合和传质的一般理论和计算方法;第 4 章叙述超音速欠膨胀燃气射流近场激波系的若干理论、近似计算和实验确定;第 5 章介绍火箭非设计状态的超音速燃气射流数学模型与计算分析;第 6 章应用小扰动理论研究低度欠膨胀超音速射流问题;第 7 章研究火箭燃气射流流场的数值方法;第 8 章阐述燃气射流的冲击效应;第 9 章讨论发射管内的冲击流场和二次流特性及其所引起的发射扰动;第 10 章综述火箭燃气射流及其对发射器冲击的实验研究方法 with 结果。

本书充实了火箭燃气射流的数值计算方法——国际先进的有限体积 TVD 格式,利用这一方法可形象地显示火箭燃气射流及其冲击流场波系,甚至可预估当前实验仍无法显示的真实火箭燃气射流流场的某些非定常发展波系。书中进一步充实了真实火箭燃气射流流场的实验研究内容。高温、高速、多相真实火箭燃气射流测试与实验历来都是难点,这里利用摩尔干涉仪及相关电测技术,测试与分析真实火箭燃气射流激波结构及相应参数,论



述实验研究方法。此外,本书还分别介绍了车载、舰载、机载火箭(导弹)武器系统设计时遇到的火箭燃气射流问题,并且列出了众多实例。总之,本书从理论、计算、实验及应用上反映了国内外包括我们单位的科研成果,尽可能反映本学科领域前沿的内容,使读者充分获得清晰的物理概念以及理论与实验研究方法。

火箭燃气射流动力学是从事火箭(导弹)发射技术与发射设备设计工作者的必备知识。本书除了可供从事火箭(导弹)技术和射流技术方面的科研与设计工程技术人员参考之外,还可为研究生在学习了有关基础理论之后提供一本火箭燃气射流运动及其对发射装置冲击和发射扰动影响的书籍。如果删去书中部分章节,本书还可以作为选学本课程的武器专业高年级大学生的教材。

编入本书的科研成果包含了我们实验室、科研组和研究生的辛勤劳动。以编写章节为序,李军博士编写 7.5 节和 7.6 节,李开明博士编写 10.1.6 节和 10.4.7 节,徐强博士编写 10.1.7 节。在本书第 4,8,9 章中列出了编著者结合科研与型号产品应用 CFD 软件仿真的 13 幅流谱图例,另有 2 幅图例分别取自于廉闻宇博士、杨勇博士论文。书中参考了国内外诸多学者的论著,在此一并致以谢忱。

编 者

2004 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 火箭(导弹)发射时的燃气射流动力学问题	1
1.2 基本概念与基本方程	7
第 2 章 火箭燃气射流的物理属性	11
2.1 燃气射流结构	11
2.2 燃气自由射流中的自模性	12
2.3 燃气射流湍流特性的描述	19
2.4 燃气射流数学模型	24
第 3 章 超音速燃气射流的混合与传质	30
3.1 可压缩湍流射流混合的数学描述	30
3.2 湍流附加应力的物理模型	42
3.3 平面与轴对称射流普遍偏微分方程式和边界条件	47
3.4 自由射流中的积分守恒条件	48
3.5 燃气自由射流中的混合与传质	54
3.6 多喷管射流组的混合	75
第 4 章 欠膨胀超音速燃气射流的近场激波系	82
4.1 超音速射流中的激波	82
4.2 火箭欠膨胀燃气射流的核心激波系结构	86
4.3 从高度欠膨胀喷管喷入静止空气的无粘射流结构	98
4.4 Eastman-Radtke(简称 ER)法则	113
4.5 欠膨胀超音速射流结构的相关模型	115
4.6 欠膨胀射流马赫盘位置的精确确定	125
4.7 关于三波交点-马赫盘问题的各种理论和 方法综述与比较	141
4.8 欠膨胀射流激波结构的近似计算	145
4.9 火箭燃气射流初始超音速流态规律	152



第5章 火箭非设计状态超音速燃气射流物理 - 数学模型	171
5.1 简捷估算火箭欠膨胀超音速燃气射流特性参数的方法	173
5.2 超音速燃气自由射流动量均化特性模型	181
* 5.3 Гинзбург 高度欠膨胀和过膨胀超音速燃气射流的 近似物理 - 数学模型	198
5.4 固体火箭欠膨胀喷管单股与多股强干扰燃气自由射流的 气动力分析与模型	221
5.5 低空火箭燃气射流 - 维模型	235
第6章 超音速射流的小扰动理论	253
6.1 二维(平面及轴对称)射流的线性化理论	253
6.2 膨胀扇形区的非线性奇异摄动近似解	260
6.3 可压缩流的伴随流湍流射流的混合和传质理论	267
第7章 火箭燃气射流流场的数值解	273
7.1 二维定常流方程及数值计算中的几个概念	273
7.2 有限差分法	278
7.3 轴对称、无粘、真实气体、非等能、高温射流的 特征线法数值解	282
7.4 特征 - 差分法	302
7.5 二维(含轴对称)燃气射流流场计算的 TVD 有限体积法	305
7.6 三维燃气射流流场计算的 TVD 有限体积法	312
第8章 射流冲击及发射扰动	319
8.1 欠膨胀射流近场对垂直平板的冲击	320
8.2 自由射流远场对地面垂直冲击的 相似理论	328
8.3 欠膨胀、轴对称射流对平板的斜冲击问题	332
8.4 欠膨胀射流对近似平行的平板冲击	339
8.5 超音速射流中楔形体承载经验式	341
8.6 欠膨胀射流对各类基本模型冲击的表面静压分布的比较	344
8.7 火箭燃气射流对多管联装发射装置的冲击流场机理	347
8.8 多管发射装置迎气正面压力分布	353
8.9 多管发射装置脉冲发射时承受的燃气流动载	356



8.10 燃气射流冲击形态对起始扰动的影响(脉冲发射效应)	363
8.11 反溅流对火箭弹的作用(中间扰动)	370
8.12 火箭燃气射流和自由来流对航空发射装置气动力干扰 引起的发射扰动	372
8.13 定向器后喷燃气射流对地面/舰艇甲板的冲击流场	377
8.14 火箭发射管尾流冲击波对邻近武器装备反射压力的计算	391
8.15 火箭射流冲击下的级间分离及弹-炮与弹-翼气动干扰	394
第9章 火箭(导弹)发射管流场	400
9.1 圆形发射管内的燃气射流	400
9.2 发射管流场的数值计算	406
9.3 发射管内二次流	413
9.4 管射火箭(导弹)系统的二次流分析	422
9.5 方形发射管内被引射流对火箭起始扰动的影响	428
9.6 若干特种发射管流场模拟显示	432
第10章 火箭燃气射流的实验研究	440
10.1 实验研究设备与测试系统和方法	441
10.2 燃气射流实验特性参数的处理方法	460
10.3 燃气射流工程模拟实验的相似分析	473
10.4 欠膨胀射流激波结构尺寸的实验确定	476
10.5 欠膨胀燃气射流的衰减特性以及影响超音速流区的诸因素	493
10.6 亚音速射流与中度、高度欠膨胀射流的内特性比较	496
10.7 实验确定燃气自由射流流场的工程模型	508
10.8 实验与数字模拟技术相结合	514
附录	517
符号说明	519
参考文献	524

第 1 章 绪 论

在许多军事与民用工程技术领域,诸如火箭与导弹、航空与航天、枪炮武器、涡轮机、锅炉、燃烧室以及化工冶金设备等,都会遇到大量的燃气射流运动和冲击问题。就火箭工程技术来说,发动机内部火药燃烧产生的高温($2\,000\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$)气体经由拉瓦尔喷管以超音速(马赫数为 $2 \sim 4$)射入静止介质或流动(亚音速流动或超音速流动)介质的空间中,使气流脱离了原来限制它流通的喷管壁面而在大气空间中复燃扩散流动,我们把这种燃烧气体的流动称为火箭燃气射流。研究火箭燃气射流运动及其对发射系统和环境冲击的学科称为火箭燃气射流动力学。

1.1 火箭(导弹)发射时的燃气射流动力学问题

在火箭(导弹)发射状态下,必须研究火箭弹在发射装置内滑行时燃气射流对管壁和弹体的干扰,在火箭(导弹)滑离定向器时发射装置迎气面承受燃气射流的冲击以及发射装置后方燃气射流对环境的冲击等(图 1-1)。从火箭弹点火开始到燃气射流对发射装置冲击干扰结束的全过程,称为火箭(导弹)“发射阶段”。在这个阶段,火箭燃气自由射流和冲击射流存在着不同的流场。

火箭(导弹)喷入静止空气的射流称为燃气自由射流,在火箭发射初期即属于这种情况。喷入运动空气的燃气射流称为伴随流燃气射流,火箭在空中飞行时后喷燃气射流即属于图 1-1 火箭(导弹)发射时的燃气冲击流场这种情形。这两种燃气射流的一般结构如图 1-2 所示。锥形喷管排入内径稍大于喷口直径的发射管的高度欠膨胀,超音速燃气射流是以图 1-3 所示的管射火箭流场

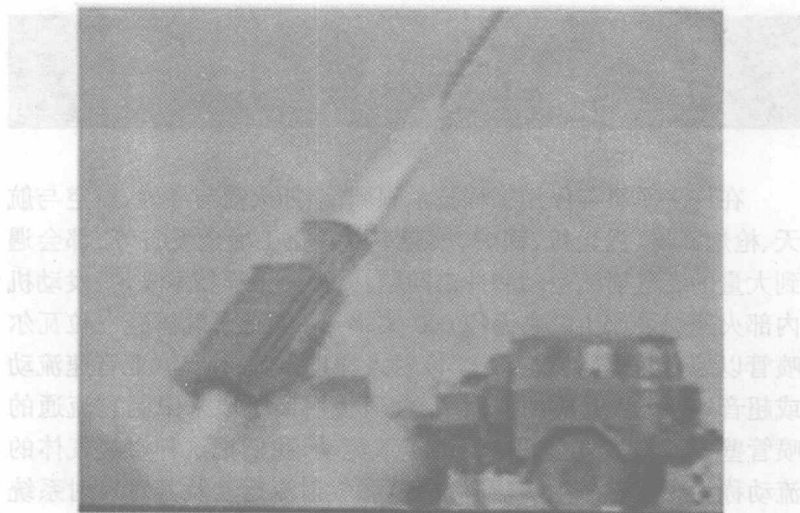


图 1-1 火箭(导弹)发射时的燃气冲击流场

的典型模型为特征的。当火箭弹定心部与发射管内壁之间有相当大的环形间隙时,加速射出喷管的欠膨胀燃气射流卷入了环形间隙中的空气,形成了“被引射流”。当火箭燃烧室的滞止压力较高时,还会使部分燃气流倒流入环形区,形成“旁泄流”。火箭燃气射流冲击发射装置迎气面和地面的复杂流场如图 1-4 所示。图中表示了火箭点火发射时(时刻 t_1) 所产生的非定常燃气流和冲击流场,之后流场很快为湍流所淹没,即图中时刻 t_1 的无粘结构为时刻 t_2 的湍流云所覆盖。至于多喷管所产生的上述各类流场则含有三维条件下的激波干扰,其流动结构更为复杂。

目前,由于工程技术领域广泛使用数字计算机,火箭燃气射流动力学问题的数值模拟技术水平不断提高,使火箭燃气射流动力学获得迅速发展。图 1-5 为导弹发射时的复杂排气导管模拟流场。

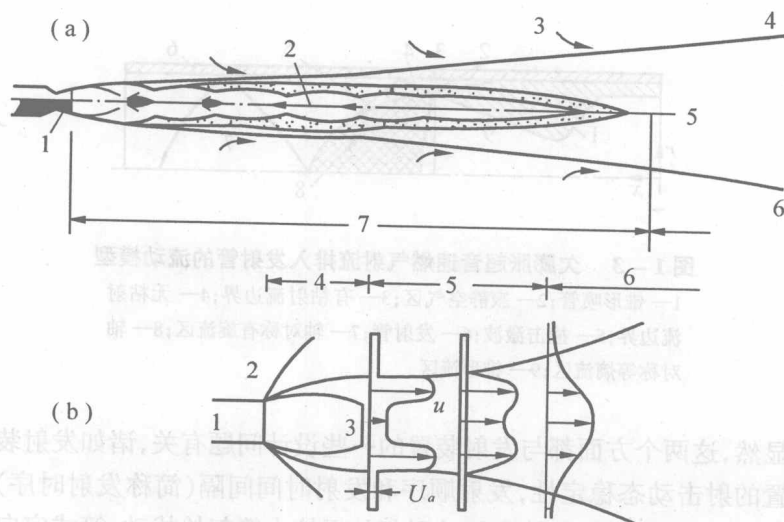


图 1-2 燃气射流的一般结构

(a) 燃气自由射流 1—喷管;2—燃气起始核心;3—卷吸空气;4—空气燃气混合;5—射流轴线;6—亚音速区;7—超音速区

(b) 伴随流燃气射流 1—喷管;2—外激波;3—马赫盘;4—起始段;5—湍流过渡段;6—完全发展段

近一二十年来,无控火箭武器迅速发展,各国都为进一步提高火箭武器系统的射击密集度、火力密度和机动性进行深入研究。要获得良好的射击密集度,就发射装置来说,实质上是采取多种措施限制“发射阶段”的散布(角偏差)根源。其中,特别需要考虑二个根源,一个是火箭弹沿定向器滑行时燃气射流对火箭弹体的干扰;另一个是多管火箭发射装置在前发火箭弹飞离定向器后且在发射架感受到燃气射流影响的范围内所承受的燃气动力干扰(这时火箭发射装置将承受最大最主要的冲击作用,在连射情况下火箭发射装置则产生“脉冲发射效应”),以及无控火箭刚飞离定向器时燃气射流冲击火箭发射装置所引起的“反溅流”对弹尾的二次干扰。