



国家出版基金项目



工业和信息化部“十二五”规划专著

航天发射科学与技术

发射气体动力学

JET GAS DYNAMICS

姜毅 史少岩 牛钰森 于邵祯 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金项目



工业和信息化部“十二五”规划专著

航天发射科学与技术

发射气体动力学

JET GAS DYNAMICS

姜毅 史少岩 牛钰森 于邵祯 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书研究重点主要集中在固体火箭发动机喷管喷出的高温高速燃气射流流动规律及对周围设施和环境的影响,包括:箱式热发射、弹射、引射同心筒发射、车载机动发射和舰载发射等。作者以目前被广泛使用的 CFD 方法为主要研究手段,从不同的角度对燃气射流流场展开研究,以使读者对燃气射流的 CFD 数值计算研究方法有更加具体而深刻的认识。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

发射气体动力学 / 姜毅等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2015. 6
(航天发射科学与技术)

国家出版基金项目 工业和信息化部“十二五”规划专著
ISBN 978 - 7 - 5682 - 0735 - 5

I. ①发… II. ①姜… III. ①航空发动机 - 气体动力学 IV. ①V231.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 133491 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 36.25

字 数 / 700 千字

版 次 / 2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 165.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

航天发射科学与技术

编写委员会

名誉主编：于本水 黄瑞松 刘竹生

主 编：杨树兴 包元吉

副主编：（按姓氏笔画排序）

万 全 王生捷 刘 浩

姜 毅 胡习明 贺卫东

葛令民

编 委：（按姓氏笔画排序）

于殿君 王东锋 邓 科

朱恒强 刘占卿 汤元平

李建冬 李 梅 何家声

赵瑞兴 荣吉利 党海燕

傅德彬 路 峰 谭大成

航天发射科学与技术

学术顾问委员会

(按姓氏笔画排序)

丁旭昶	于 倩	于建平
王 缜	牛养慈	任跃进
刘淑艳	李喜仁	张泽明
陈亚军	陈登高	周凤广
赵长禄	郝志忠	秦 焯
唐胜景	曾智勇	

总序

世界各国为了进一步提高综合国力，都在大力开发空间资源和加强国防建设。作为重要运载器的火箭、导弹，以及相关的发射科学技术，也相应地都得到了广泛的重视。发射科学技术综合了基础科学和其他应用科学领域的最新成就，以及工程技术的最新成果，是科学技术和基础工业紧密结合的产物。同时，发射科学技术也反映了一个国家相关科学技术和基础工业的发展水平。

航天发射科学技术的发展历史漫长，我国古代带火的弓箭便是火箭的雏形。火箭出现后，被迅速用于各种军事行动和民间娱乐。随着现代科学技术的发展和人类需求的增加，美国、俄罗斯、中国、日本、法国、英国等航天大国，投入了大量的人力、物力进行航天发射的研究和开发，并取得了丰硕成果，代表了世界的先进水平。火箭、导弹的发射水平，决定了一个国家航天活动和国防保障区域的范围。因此，各航天大国均把发展先进的发射和运载技术作为保持其领先地位的战略部署之一。无论是空间应用、科学探测、载人航天、国际商业发射与国际合作，还是国防建设，都对发射技术提出了新的要求，促使航天发射科学技术向着更高层次发展。

综上所述，系统归纳、总结发射领域的理论和技术成果，供从事相关领域教学、研发、设计、使用人员学习和参考，具有重要的意义。这对提高教育水平、提升技术能力、推动科学发展和提高航天发射领域的研发水平将会起到十分重要的作用。

航天发射科学技术构成复杂，涉及众多学科，而且内容广泛，系列丛书的编写需要有关领域的专家、学者来共同完成。因此，北京理工大学、北京航天发射技术研究所、北京机械设备研究所、北京特种机械研究所、总装备部工程设计研究院等国内从事相关领域研究的权威单位组建了本丛书的作者队伍，期望将发射科学技术的

重要成果著作成册，帮助读者更深入地了解 and 掌握航天发射领域的知识和技术，推动我国航天事业的发展。

本丛书力求系统性、完整性、实用性和理论性的统一，从发射总体技术、发射装置、地面支持技术、发射场总体设计、发射装置设计、发射控制技术、发射装置试验技术、发射气体动力学、发射动力学、弹射内弹道学等多个相互支撑的学科领域，以发射技术基本理论，火箭、导弹发射相关典型系统和设备为重点，全面介绍国内外的相关技术和设备、设施。

本丛书作者队伍是一个庞大的教育、科研、设计团队，为了编写好本丛书，编写人员辛勤劳动，做出了很大努力。同时，得到了相关学会，以及从事编写的五个单位的领导、专家及工作人员的关心和大力支持，在此深表感谢！由于种种原因，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正！

编写委员会

前言

燃气射流动力学是流体力学的一个分支，CFD（Computational Fluid Dynamics，计算流体力学）是其重要的研究方法，其研究对象是火箭导弹在发射时从火箭发动机喷管喷出的高温高速燃气射流流动规律及其对周围设施和环境的影响等。首先，本书介绍了燃气射流的现象和基本特征，并从工程计算方法上进行了简单的阐述。其次，从燃气射流动力学当前主要的研究方法 CFD 入手，较为全面地介绍了流体力学控制方程和 CFD 的处理过程，为本书的后续章节奠定了理论基础。再次，介绍了自由燃气射流流场 CFD 研究，然后从贮运发射箱、弹射内弹道、引射同心筒、大型运载火箭或弹道及舰载导弹等多个方面介绍了受限燃气射流流场的 CFD 研究。最后，从试验测量的角度介绍了燃气射流的试验研究方法。可以说，本书顺应了当前 CFD 被广泛应用的大形势，从不同的角度对燃气射流展开 CFD 研究，以使读者对燃气射流的 CFD 研究方法有更加具体而深刻的认识。

本书由姜毅教授统筹全稿，在一些章节的编写过程中，学科组的博士研究生参与了相关工作。其中，牛钰森博士参与了第 4、5 章的编写，刘伯伟博士参与了第 5 章的编写，于邵祯博士参与了第 7、8 章的编写，史少岩博士参与了第 3 章的编写和全书的整理工作。

本书作者姜毅教授已从事火箭导弹发射气体动力学方面的研究和教学工作 20 多年，完成过众多有关发射气体动力学方面的研究工作，其中不乏我国一些重大或重点工程和大量的航天工程项目。作者在工作过程中，曾获得国家科技进步二等奖 1 项、部级科技进步一等奖 1 项、部级科技进步二等奖 3 项、部级科技进步三等奖 5 项等。本书总结了作者在发射气体动力学方面的研究成果并介绍了国

内外相关领域的研究成果，可作为研究生教学的教材和工程技术人员的参考资料。

本书在编写过程中参考了大量的国内外资料，在此对原著作者表示深深的谢意！

限于编著者的水平，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬望读者批评指正。

编著者

目录

CONTENTS

第1章 燃气射流动力学基本知识	1
1.1 射流现象	1
1.1.1 射流的基本概念	1
1.1.2 燃气射流的主要特征	2
1.1.3 工程中的射流现象	3
1.2 燃气射流问题的研究方法	6
1.3 亚声速射流流动特点	7
1.3.1 流动特点	7
1.3.2 亚声速射流中速度分布的自模性	8
1.4 超声速射流流动特点	11
1.5 燃气射流的工程计算方法	12
1.5.1 轴对称亚声速等温自由射流的工程计算方法	13
1.5.2 旋转射流计算简介	15
1.5.3 射流对物体作用力的近似确定	19
本章小结	21
第2章 流体力学控制方程及其 CFD 处理过程	22
2.1 流体与流动的基本特性	23
2.1.1 理想流体与黏性流体	23
2.1.2 牛顿流体和非牛顿流体	24
2.1.3 流体热传导及扩散	24

2.1.4	可压流体与不可压流体	25
2.1.5	定常与非定常流动	25
2.1.6	层流与湍流	25
2.2	流体力学控制方程	25
2.2.1	质量守恒方程	26
2.2.2	动量守恒方程	26
2.2.3	能量守恒方程	28
2.2.4	组分质量守恒方程	29
2.2.5	控制方程的通用形式	30
2.3	对控制方程的进一步讨论	31
2.3.1	湍流的控制方程	31
2.3.2	守恒型控制方程	31
2.3.3	非守恒型控制方程	32
2.4	湍流模型	33
2.4.1	雷诺方程(湍流的平均动量方程)	33
2.4.2	“0”方程模型	34
2.4.3	S-A方程模型	34
2.4.4	标准 $k-\varepsilon$ 方程模型	35
2.4.5	RNG $k-\varepsilon$ 方程模型	36
2.4.6	欧拉-欧拉方法的两相流模型	37
2.5	基于有限体积法的控制方程离散	43
2.5.1	离散化概述	43
2.5.2	有限体积法及其网格简介	45
2.5.3	求解一维稳态问题的有限体积法	47
2.5.4	常用的离散格式	50
2.5.5	各种离散格式的性能对比	62
2.5.6	一维瞬态问题的有限体积法	62
2.5.7	二维与三维问题的离散方程	69
2.6	CFD的求解过程	72
2.6.1	总体计算流程	72
2.6.2	建立控制方程	72
2.6.3	确定初始条件与边界条件	73
2.6.4	划分计算网格,生成计算节点	73
2.6.5	建立离散方程	74

2.6.6	离散初始条件和边界条件	74
2.6.7	给定求解控制参数	75
2.6.8	求解离散方程	75
2.6.9	判断解的收敛性	75
2.6.10	显示和输出计算结果	75
	本章小结	76
第3章 自由射流流场 CFD 研究		77
3.1	不同湍流模型下的自由射流流场 CFD 研究	77
3.1.1	三种湍流模型简介	77
3.1.2	三种湍流模型下的自由射流流场	78
3.1.3	最佳湍流模型	80
3.2	不同海拔高度下的伴随射流流场研究	80
3.2.1	研究背景	81
3.2.2	飞行弹道解算	82
3.2.3	CFD 求解过程	84
3.2.4	CFD 计算结果与分析	85
3.3	多组分、多相流、复燃计算模型下的自由射流流场研究	90
3.3.1	概述	90
3.3.2	理论基础	90
3.3.3	CFD 计算结果与分析	96
	本章小结	103
第4章 储运发射箱气体动力学问题		105
4.1	概述	105
4.2	起始冲击波	105
4.2.1	运动正激波的形成机制	106
4.2.2	起始冲击波的形成与传播过程	112
4.2.3	影响冲击波强度的因素	117
4.2.4	易裂后盖开启过程	122
4.3	燃气射流对发射箱的影响	126
4.3.1	导弹出箱前燃气射流对弹体以及发射箱的影响	126
4.3.2	导弹出箱后燃气射流对发射箱的影响	134
	本章小结	136

第5章 弹射内弹道发射气体动力学问题	138
5.1 概述	138
5.1.1 弹射简介	138
5.1.2 弹射装置的结构组成	141
5.1.3 弹射内弹道学的研究对象和任务	144
5.1.4 研究弹射内弹道学的方法	146
5.2 燃气式弹射	146
5.2.1 计算模型介绍	148
5.2.2 动网格技术	150
5.2.3 计算结果分析	153
5.3 燃气-蒸汽式弹射	156
5.3.1 两相流场仿真模型	157
5.3.2 水的汽化模型	158
5.3.3 多相流模型中的附加理论	160
5.3.4 计算模型介绍	161
5.3.5 计算结果分析	162
5.4 提拉杆式弹射	169
5.4.1 弹射装置典型结构	169
5.4.2 计算模型介绍	170
5.4.3 计算结果分析	172
本章小结	174
第6章 引射同心筒发射动力学	175
6.1 标准同心筒发射过程研究	175
6.1.1 标准同心筒结构设计	175
6.1.2 标准同心筒发射过程流场研究	175
6.1.3 标准同心筒发射过程试验研究	178
6.1.4 标准同心筒垂直热发射过程数值模拟	185
6.1.5 标准同心筒水下发射燃气流场研究	200
6.1.6 标准同心筒发射小结	208
6.2 方形同心筒发射过程研究	208
6.2.1 方形同心筒结构设计	208
6.2.2 方形同心筒发射过程流场研究	210
6.2.3 方形同心筒发射小结	211

6.3 湿式同心筒发射过程研究	212
6.3.1 湿式同心筒结构设计	212
6.3.2 湿式同心筒发射过程流场研究	213
6.3.3 湿式同心筒发射过程影响因素研究——内外筒间隙	216
6.3.4 湿式同心筒发射过程影响因素研究——筒底注水量	228
6.3.5 湿式同心筒发射过程影响因素研究——喷管与筒底水面距离	240
6.3.6 湿式同心筒发射小结	251
6.4 引射同心筒概述	251
6.4.1 引射同心筒概念的提出	252
6.4.2 引射同心筒结构设计	253
6.4.3 引射同心筒发射过程流场研究	254
6.4.4 引射同心筒结构优化设计	257
6.4.5 引射同心筒试验研究	312
本章小结	316
第7章 运载火箭/大型地-地导弹发射气体动力学问题	317
7.1 运载火箭喷水降温降噪分析	317
7.1.1 研究背景	317
7.1.2 国内外研究现状	318
7.1.3 研究内容与方法	320
7.2 地下井发射	389
7.2.1 概述	389
7.2.2 排焰环境	390
7.2.3 气动噪声研究方法	393
7.3 机动发射	419
7.3.1 概述	419
7.3.2 双面导流仿真计算	422
7.3.3 单面导流仿真计算	433
7.3.4 单面导流器排导规律研究	444
7.3.5 随形单面导流器导流效果研究	457
本章小结	463
第8章 舰载发射气体动力学	464
8.1 概述	464

8.2 舰载发射技术简介	465
8.2.1 倾斜发射	465
8.2.2 垂直发射	466
8.2.3 燃气流的公共排导	467
8.2.4 舰载发射优劣性	474
8.2.5 舰载导弹发射装置及发展趋势	474
8.3 舰载武器发射气体动力学问题	475
8.3.1 设备承温安全性判别	475
8.3.2 设备承载安全性判别	476
8.3.3 舰载设备倾斜发射燃气流场计算	477
8.3.4 高台布置鱼防武器仿真分析	482
8.3.5 垂直热发射武器系统数值计算	488
8.3.6 垂直冷发射武器系统数值计算	493
本章小结	497
第9章 发动机射流测试技术	499
9.1 概述	499
9.2 发动机羽烟特征及检测	500
9.2.1 分类标准	500
9.2.2 测试评估方法	502
9.2.3 射流流场温度特性研究	505
9.2.4 固体火箭射流的辐射特性概述及测量	516
9.2.5 喷流噪声概述及试验研究	522
9.2.6 粒子流速测量原理	528
9.3 其他信号特征测试方法	529
本章小结	532
主要参考文献	533
索引	534

第 1 章 燃气射流动力学基本知识

燃气射流动力学是流体力学的一个分支，其研究对象是火箭导弹在发射时从火箭发动机喷管喷出的高温高速燃气射流流动规律及其对周围设施和环境的影响等。

在 20 世纪早期，随着喷气推进技术的出现，人们开始对从火箭发动机等喷出的高温高速的燃气射流现象有了直观的认识。首先，它会对直接冲击到的物体产生很大的力，并对周围环境产生一定的影响；其次，会对冲击到的物体产生烧蚀。因此，研究燃气射流的流动规律及其对周围物体、环境产生的影响也就成了人们关心的问题。时至今日，人们主要关心的还是以上两类问题。只是随着科学技术的发展，以及对问题认识程度的深入及研究手段的进步，如今能更加符合实际地模拟真实现象。

如上所述，燃气射流问题主要分为两类：研究燃气射流现象的流动规律；研究燃气射流对环境的影响作用。

早期研究燃气射流问题时（20 世纪 80 年代前），与流体力学的其他分支的研究模式相同，研究方法主要是在总结试验现象的基础上，提出一些经验计算模型和公式。比较适用的方法有射流积分法和射流的自模性概念，这两种方法为早期研究问题提供了一定的依据；研究燃气射流对环境的影响主要采用的是试验方法。

20 世纪 80 年代后，随着计算机技术水平的迅速发展，计算流体力学得到迅猛发展，使人们可以在假设越来越少的条件下从理论上对燃气射流现象进行计算研究。同时，随着测试技术的高速发展，如今可以对燃气射流对周围环境的影响进行可靠的直接测量和间接测量，这为研究燃气射流问题提供了更加有力的手段。

1.1 射流现象

1.1.1 射流的基本概念

水从消防水龙头射出、空气从打气筒中冲出、针剂从注射器的针头中压出以及喷灌农田的水从喷头中射出等，如此这般形式的流体流动统称为“射流”。它们与流体一般流动的不同之处在于它们具有喷射成一束的流动特点。

在《理论流体力学》（L·M·米尔恩-汤姆森著）中这样描述射流：忽略外力，

并假设做二维运动的液体以自由流线 μ_1 、 μ_2 (图 1-1) 为界, 这些流线将流动平面分成 A、B、C 三个区域, 运动的液体占据区域 B。如果 A、C 中没有液体, 则 B 中的流动为射流。同理, 对于气体射流而言, 则是在 A、C 中可以有静止的或异速流动的气体。

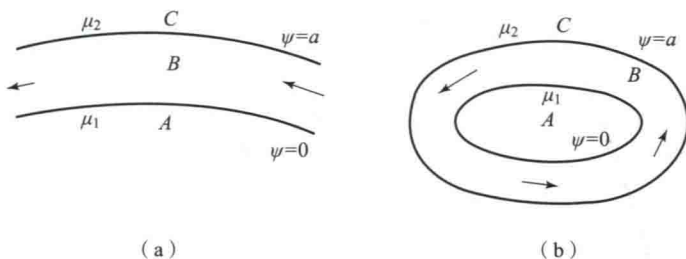


图 1-1 射流的界定

(a) 无限延伸型; (b) 封闭型

ψ —流函数; a —流动速度

综上所述, 射流的一般定义为: 在孔口、管口、喷嘴和缝隙等出路中, 靠压差或外力推动而流出的流体、气体和粉末等流动介质且喷射成束的流动形态。

当射流流出后, 不受固体边界的限制, 而在某一空间中自由扩张的喷射流动称为自由射流。严格地说, 当环境空间中的介质温度、密度与射流介质的温度、密度相同时, 才能称为自由射流。而当空间介质静止不动时, 该射流称为自由淹没射流; 当空间介质非静止时, 则称为自由伴随流射流。

1.1.2 燃气射流的主要特征

通常情况下, 将从火箭发动机或涡轮喷气发动机喷出的高温高速的气体流动称为燃气射流。燃气射流主要有以下几方面的特征:

(1) 气体流动速度高。在大多数情况下为超声速, 对于火箭发动机而言, 出口处的燃气速度多在 $2Ma$ 以上; 对于涡轮喷气发动机, 多数情况也在 $1Ma$ 以上。

(2) 气流温度高。由于火箭发动机或涡轮喷气发动机都是通过化学能的转换产生动力, 因此, 喷出的气体温度非常高。对于火箭发动机, 喷口处温度一般在 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 以上; 而对于涡轮喷气发动机, 一般也在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

(3) 复燃现象。在有些情况下, 由于燃气喷出发动机喷口后, 气体内仍包含一些未燃烧完的可燃成分, 因此, 喷出后还要和周围的氧化成分 (如空气中的氧气等) 进行二次燃烧; 或燃气本身就包括燃烧剂和氧化剂, 在喷出发动机喷口后继续燃烧。

(4) 气-固两相流现象。为了增加发动机的推力, 有些发动机会在推进剂内加入铝粉等, 因此, 在燃气内会含有固体颗粒等。

(5) 非定常现象。如发动机在开始建压阶段, 燃烧室内的压力有一个不稳定过程,