

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

高超声速科学与技术丛书

超燃冲压发动机控制

Scramjet Engine Control

于达仁 常军涛 曹瑞峰 杨晟博 唐井峰 鲍文 著

国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

高超声速科学与技术丛书

超燃冲压发动机控制

于达仁　常军涛　曹瑞峰　杨晟博　唐井峰　鲍文　著

国防工业出版社

·北京·

内容简介

本书以超燃冲压发动机为研究对象，从发动机基本控制问题出发并结合已有飞行试验经验给出了一种超燃冲压发动机基本控制方案，讨论了发动机控制模型维数和反馈变量选择原则并介绍了发动机推力闭环控制系统设计方法，探讨了超燃冲压发动机燃烧模态转换特性及其转换控制方法，介绍了高超声速进气道起动/不起动监测方法及其稳定裕度控制方法，同时给出了超燃冲压发动机推力调节/进气道保护切换控制方法，研究了超燃冲压发动机燃烧室释热分布最优控制问题，最后从飞/推一体化视角介绍了高超声速飞行器轨道优化问题。

本书内容新颖，适合于从事航空航天推进系统设计、分析、教学与生产的科技人员，特别是从事高超声速推进技术、航空航天发动机技术的科研人员阅读，也可以作为航空航天推进技术专业和工程热物理专业的高年级本科生及硕士研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超燃冲压发动机控制 / 于达仁等著. —北京 : 国防工业出版社, 2019.3
(高超声速科学与技术丛书)
ISBN 978-7-118-11639-7

Ⅰ. ①超… Ⅱ. ①于… Ⅲ. ①冲压喷气发动机-控制 Ⅳ. ①V235.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 166649 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 100048)
天津嘉恒印务有限公司印刷
新华书店经售
*
开本 710×1000　1/16　印张 19¾　字数 350 千字
2019 年 3 月第 1 版第 1 次印刷　印数 1—1500 册　定价 128.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010)88540777　　发行邮购：(010)88540776
发行传真：(010)88540755　　发行业务：(010)88540717

丛书编委会

顾 问 委 员　乐嘉陵　刘大响

编委会主任　于达仁

编委会委员(按姓氏笔画排序)

刘小勇　刘卫东　刘伟雄　杨基明

何国强　张堃元　张新宇　金　捷

周伟星　郑日恒　秦　飞　秦　江

桂业伟　徐惊雷　常军涛　鲍　文

序

高超声速飞行器是指在大气层内或跨大气层以马赫数 5 以上的速度远程巡航的飞行器，其巡航飞行速度、高度数倍于现有的飞机。以超燃冲压发动机为主的高超声速飞行器，其燃料比冲高于传统火箭发动机，能实现水平起降与重复使用，从而大大降低空间运输成本。高超声速飞行器技术将催生高超声速巡航导弹、高超声速飞机和空天飞机等新型飞行器的出现，成为人类继发明飞机、突破音障、进入太空之后又一个划时代的里程碑。

在国家空天安全战略需求牵引下，国家自然科学基金委员会分别于 2002 年、2007 年启动了“空天飞行器的若干重大基础问题”“近空间飞行器的关键基础科学问题”两个重大研究计划，同时我国通过其他计划（如 863 计划、重大专项等），重点在高超声速技术领域的气动、推进、材料、控制等方面进行前瞻布局，加强中国航天航空科技基础研究，增强高超声速科学技术研究的源头创新能力，这些工作对我国高超声速技术的发展起到了巨大的推动和支撑作用。

由于航空航天技术涉及国防安全，美国航空航天学会（American Institute of Aeronautics and Astronautics，AIAA）每年举办的近 30 场系列国际会议大都仅限于美国本土举办。近年来，随着我国高超声速技术的崛起，全球高超声速业界都将目光聚焦中国。2017 年 3 月，第 21 届国际航天飞机和高超声速系统与技术大会首次在中国厦门举办，这也标志着我国已成为高超声速科学与技术领域的一支重要力量，受到国际同行高度关注。

高超声速技术作为航空和航天技术的结合点，涉及高超声速空气动力学、计算流体力学、高温气动热力学、化学反应动力学、导航与控制、电子信息、材料结构、工艺制造等多门学科，是高超声速推进、机体/推进一体化设计、超声速燃烧、热防护、控制技术、高超声速地面模拟和飞行试验等多项前沿技术的高度综合。高超声速飞行器是当今航空航天领域的前沿技术，是各航空航天强国激烈竞争的热点领域。近年来国内相关科研院所、高校等研究机构广泛开展了高超声速相关技术的研究，

取得了一大批基础理论和工程技术研究成果，推动了我国高超声速科学技术的蓬勃发展。

在当前国际重要航空航天强国都在全面急速推进高超声速打击武器实用化发展的时代背景下，我国在老中青几代科研工作者的传承和发展下，形成了具有我国自主特色的高超声速科学技术体系，取得了举世瞩目的成果。从知识传承、人才培养和科技成果展示的视角，急需总结提炼我国在该领域取得的研究成果，“高超声速科学与技术丛书”的诞生恰逢其时。本套丛书的作者均为我国高超声速技术领域的核心专家学者，丛书系统地总结了我国近 20 年高超声速科学技术领域的理论和实践成果，主要包括进排气设计、结构热防护、发动机控制、碳氢燃料、地面试验、组合发动机等主题。

相信该丛书的出版可为广大从事高超声速技术理论和实践研究的科技人员提供重要参考，能够对我国的高超声速科研和教学工作起到较大的促进作用。

“高超声速科学与技术丛书”编委会

2018 年 4 月

前言

发动机控制是超燃冲压发动机研究的五大关键技术之一。与航空发动机和亚燃冲压发动机相比，超燃冲压发动机由于在更高马赫数下飞行带来了特殊问题。受到飞行包线的影响，与低马赫数飞行相比，高马赫数飞行导致用于飞行器加速的净推力减小。随着飞行马赫数的增加，在加速工况下，经常需要工作在进气道边界附近，气动稳定裕度小，容易出现流动失稳现象，需要研究流动失稳监测和控制问题。在从低马赫数向高马赫数加速的过程中，发动机匹配不同的燃烧模态才能在宽马赫数范围下获得较好的性能参数，需要研究燃烧模态转换控制问题。飞行马赫数的增加导致飞行器/发动机（飞/发）一体化耦合程度增强，如何基于开展飞/发一体化控制系统设计是值得研究的问题。基于这些认识，围绕发动机工作过程中的核心矛盾和关键技术问题，提出了具体的解决方案，具体阐述如下：

第1章介绍了历史上仅有的几次高超声速飞行试验，分析了飞行试验中暴露的控制问题。对超燃冲压发动机控制面临的基本问题进行了讨论，主要包括推力控制、进气道不起动状态监测及其保护控制、燃烧模态转换控制等。

第2章从双模态超燃冲压发动机工作的原理出发，对发动机工作过程的特殊性进行了讨论。

第3章讨论了美国X-51A飞行过程中的控制问题，在此基础上结合发动机的具体需求提出了双模态冲压发动机推力调节/安全保护的控制框架。

第4章通过对双模态超燃冲压发动机分布参数特性分析并对比不同维数数学模型的优缺点，指出一维模型在控制问题研究中的必要性和可操作性，论证双模态超燃冲压发动机控制时间尺度后可利用频域分析与频域截断技术将控制问题简化。

第5章讨论了双模态超燃冲压发动机推力与燃烧室壁面压力积分之间的关系，论证了壁面压力积分作为发动机推力控制回路反馈变量的合理性和可行性。设计了发动机推力回路控制系统，并开展了地面试验验证。

第6章讨论了燃烧模态转换马赫数的选择准则并对燃烧模态转换边界及影响

因素进行了分析，提出了转换过程中的突变与滞环问题，通过对燃烧模态转换控制的任务分析，设计了转换控制方案并进行了仿真研究。

第7章将高超声速进气道不起动监测问题转化为起动/不起动模式分类问题，获得了用于进气道模式分类的特征约简方法和识别准则的构建方法，在此基础上讨论了最优分类准则的优化方法。为了降低测量噪声和外界干扰对分类精度的影响，引入了多分类器融合决策方法以提高其分类精度。

第8章讨论了高超声速进气道不起动边界的影响因素，分析了不起动边界随这些影响因素的变化规律；在此基础上定义了进气道稳定裕度，并构建了进气道稳定裕度保护控制回路，利用仿真平台验证了稳定裕度保护控制系统的正确性。

第9章针对单点燃油喷射下的发动机推力调节/进气道保护切换控制研究，重点讨论了基于Min规则和积分重置的两种切换控制策略，分析了不同切换控制策略的设计参数及其影响规律。在此基础上，讨论了两点燃油喷射下的发动机燃油优化分配方案，设计了两点燃油喷射下的发动机推力调节/进气道保护切换控制系统，并利用地面试验验证了控制系统的有效性。

第10章主要讨论了超声速燃烧室最优释热规律设计及控制，提出了超声速燃烧释热规律最优控制问题，提出了一种考虑释热速率约束的释热分布一维建模方法，在考虑超温边界和不起动边界的约束下求解燃烧室内型线与释热分布最优控制问题，给出最优的超声速燃烧室设计和控制方法。

第11章主要讨论了以冲压发动机推进的飞/推一体化的最优加速轨迹问题。考虑飞行过程中的进气道不起动约束和飞行动压约束，构造了最小油耗轨迹的最优控制问题，得到了最小油耗轨迹下的各参数分布曲线及其性能和边界参数的分布曲线。研究了飞/推系统性能与各种工作边界对最优加速轨迹结果的影响，分析了动压限制对飞/推系统加速过程的影响，最后讨论了基于冲压发动机推进的飞/推一体化的最优加速轨迹。

本书内容新颖，适合于从事航空航天推进系统设计、分析、教学与生产的科技人员，特别适合从事高超声速推进技术、航空航天发动机技术的科研人员阅读，也可以作为大学航空航天推进技术专业和工程热物理专业的高年级本科生及硕士研究生的教学参考书。

作者要感谢国家自然科学杰出青年基金（No. 50925625）、国家自然科学基金重点项目（No. 90816028）、国家自然科学基金委创新研究群体科学基金（No. 51121004）、国家自然科学基金面上项目（No. 11372092）和国家自然科学青年基金（No. 10902033）的资助，特别感谢博士生马继承的文档整理和校稿工作。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2018年5月

目 录

常用符号表 …… 1

第1章 绪论 …… 3

1.1 双模态超燃冲压发动机的典型飞行试验 …… 4

1.2 双模态超燃冲压发动机控制研究现状分析 …… 7

1.2.1 飞行试验中发动机控制现状分析 …… 8

1.2.2 进气道不起动监测及保护控制现状分析 …… 9

1.2.3 燃烧模态转换控制现状分析 …… 14

1.2.4 吸气式飞/推系统轨迹优化研究现状分析 …… 17

1.3 双模态超燃冲压发动机推力控制问题分析 …… 23

1.4 双模态超燃冲压发动机不起动监测与控制问题 …… 25

1.4.1 高超声速进气道不起动监测 …… 25

1.4.2 高超声速进气道不起动保护控制 …… 26

1.5 双模态超燃冲压发动机燃烧模态转换控制问题 …… 27

1.5.1 燃烧模态转换特性 …… 27

1.5.2 燃烧模态转换控制 …… 30

1.6 冲压发动机飞/推系统设计与控制面临的主要问题 …… 31

1.6.1 考虑飞/推系统强耦合特性的最优轨迹问题 … 31

1.6.2 复杂热力系统多变量多约束最优控制问题 …… 32

1.7 小结 …… 33

参考文献 …… 33

第2章 双模态超燃冲压发动机工作原理 …… 42

2.1 双模态超燃冲压发动机的流动特点与模态定义 …… 42

2.2 双模态超燃冲压发动机热力循环及性能指标 …… 43
2.2.1 发动机的热力循环过程 …… 44
2.2.2 发动机的能量转换过程 …… 46
2.2.3 性能指标 …… 47
2.3 双模态超燃冲压发动机进气道 …… 49
2.3.1 进气道性能参数 …… 49
2.3.2 进气道典型工作状态 …… 50
2.3.3 进气道起动/不起动 …… 51
2.4 双模态超燃冲压发动机燃烧室 …… 54
2.4.1 若干基本概念 …… 55
2.4.2 燃烧室性能分析方法 …… 56
2.5 双模态超燃冲压发动机尾喷管 …… 56
2.6 双模态超燃冲压发动机工作过程的特殊性 …… 57
2.6.1 强分布参数特性 …… 57
2.6.2 多模态优化选择 …… 58
2.7 小结 …… 58
参考文献 …… 59
第3章 双模态超燃冲压发动机控制问题分析和控制方案 …… 60
3.1 双模态超燃冲压发动机控制问题分析 …… 60
3.1.1 推力回路控制问题分析 …… 60
3.1.2 进气道不起动保护控制问题分析 …… 61
3.1.3 超温保护控制问题分析 …… 62
3.1.4 燃烧室贫/富油熄火限制 …… 62
3.2 双模态超燃冲压发动机控制方案 …… 63
3.2.1 美国 X-51A 控制方案分析 …… 63
3.2.2 推力调节/安全保护切换控制方案提出 …… 63
3.2.3 控制回路组成及分析 …… 66
3.3 小结 …… 69
参考文献 …… 69
第4章 双模态超燃冲压发动机控制模型 …… 71
4.1 双模态超燃冲压发动机稳态数学模型 …… 71
4.1.1 数学模型的维数选择 …… 72
4.1.2 发动机一维模型 …… 73

4.2 双模态超燃冲压发动机控制模型时间尺度分析 …… 77
4.3 双模态超燃冲压发动机被控变量选择 …… 79
4.3.1 燃烧室最大压比 …… 79
4.3.2 燃烧室壁面压力积分 …… 81
4.4 小结 …… 82
参考文献 …… 83
第5章 双模态超燃冲压发动机推力闭环控制方法 …… 84
5.1 双模态超燃冲压发动机推力表征 …… 84
5.1.1 地面直连式试验条件下的推力定义 …… 85
5.1.2 推力增量与压力积分的定义 …… 87
5.1.3 基于燃烧室壁面压力积分的推力增量表征 …… 87
5.2 双模态超燃冲压发动机推力闭环控制系统设计 …… 89
5.2.1 控制对象特性分析及建模 …… 89
5.2.2 控制性能要求分析与控制器设计 …… 90
5.3 控制系统鲁棒性能分析 …… 91
5.3.1 增益摄动时的鲁棒性 …… 91
5.3.2 动态摄动时的鲁棒性 …… 92
5.4 推力闭环控制地面试验验证 …… 92
5.5 小结 …… 93
参考文献 …… 94
第6章 双模态超燃冲压发动机燃烧模态转换及其控制 …… 95
6.1 燃烧模态转换马赫数的选择准则 …… 96
6.1.1 宽马赫数范围发动机性能分析 …… 96
6.1.2 最大推力需求下的燃烧模态转换马赫数选择 …… 99
6.1.3 最大比冲需求下的燃烧模态转换马赫数选择 …… 101
6.2 燃烧模态转换边界及其影响因素分析 …… 103
6.2.1 燃烧模态转换边界空间描述 …… 103
6.2.2 模态转换边界影响因素分析 …… 104
6.3 燃烧模态转换中的突变与滞环问题 …… 109
6.4 燃烧模态转换过程分析 …… 113
6.4.1 转换路径的影响 …… 114
6.4.2 突变特性的影响 …… 115
6.4.3 滞环特性的影响 …… 115

6.5 双模态超燃冲压发动机燃烧模态转换控制 …… 118
6.5.1 燃烧模态表征与监测 …… 118
6.5.2 燃烧模态转换控制基本方案 …… 119
6.5.3 控制方案仿真 …… 120
6.6 小结 …… 125
参考文献 …… 125
第7章 高超声速进气道不起动监测方法研究 …… 127
7.1 进气道起动/不起动模式分类数据准备 …… 128
7.1.1 进气道物理模型 …… 128
7.1.2 进气道不起动数据组成及分析 …… 128
7.2 基于支持向量机的高超声速进气道起动/不起动模式分类 …… 130
7.2.1 支持向量机的基本理论和方法 …… 130
7.2.2 基于支持向量机的特征选择算法 …… 132
7.2.3 基于支持向量机的进气道起动/不起动特征选择 …… 133
7.2.4 进气道起动/不起动分类结果及验证分析 …… 134
7.2.5 分类方法的对比分析 …… 135
7.3 基于 FLD 分析的进气道起动/不起动最优分类准则研究 …… 136
7.3.1 FLD 相关的基本知识 …… 136
7.3.2 进气道起动/不起动最优分类准则 …… 139
7.3.3 分类准则的物理意义 …… 140
7.3.4 分类准则中隔离带的作用 …… 140
7.4 多传感器融合的进气道起动/不起动分类方法研究 …… 142
7.4.1 概率输出支持向量机 …… 142
7.4.2 多传感器分组和融合 …… 144
7.4.3 多传感器融合结果分析 …… 145
7.5 小结 …… 147
参考文献 …… 148
第8章 高超声速进气道不起动边界及稳定裕度控制 …… 150
8.1 高超声速进气道不起动边界的无量纲分析 …… 150
8.1.1 进气道前体压缩压比的无量纲表示 …… 151
8.1.2 隔离段压比的无量纲表示 …… 155
8.1.3 进气道压缩压比的无量纲表示 …… 158

8.2 高超声速进气道稳定裕度控制方法研究 …… 161
8.2.1 高超声速进气道稳定裕度的表示方法 …… 161
8.2.2 高超声速进气道不起动控制策略分析 …… 162
8.2.3 高超声速进气道等裕度增益调度控制 …… 164
8.3 进气道稳定裕度控制闭环仿真验证 …… 171
8.4 小结 …… 173
参考文献 …… 173
第9章 双模态超燃冲压发动机推力调节/进气道保护切换控制 …… 175
9.1 基于 Min 规则的发动机推力调节/进气道保护切换控制方法 …… 176
9.1.1 切换逻辑及切换规则 …… 176
9.1.2 控制器积分上限参数对切换过程的影响分析 …… 177
9.1.3 基于 Min 规则发动机推力调节/进气道保护切换控制地面试验验证 …… 181
9.2 基于积分重置的发动机推力调节/进气道保护无扰切换控制 …… 183
9.2.1 切换逻辑及切换规则 …… 185
9.2.2 切换逻辑半实物仿真及参数给定分析 …… 187
9.2.3 发动机推力调节/进气道保护切换控制地面试验验证 …… 189
9.3 双模态超燃冲压发动机两点燃油分配方案 …… 191
9.3.1 两点燃油喷射下的发动机特性仿真分析 …… 192
9.3.2 两点燃油喷射下的发动机地面试验结果分析 …… 197
9.3.3 双模态超燃冲压发动机两点燃油分配方案评估 …… 198
9.4 考虑两点燃油喷射的发动机推力调节/进气道安全保护控制 …… 200
9.4.1 双模态超燃冲压发动机特性分析及建模 …… 201
9.4.2 双回路控制系统设计 …… 205
9.4.3 控制系统数值仿真验证 …… 206
9.4.4 控制系统地面试验验证 …… 206
9.5 小结 …… 209
参考文献 …… 210
第10章 超声速燃烧室释热分布最优控制 …… 211
10.1 超声速燃烧释热最优控制问题与求解方法 …… 212
10.1.1 理想超声速燃烧释热最优控制问题 …… 214
10.1.2 间接法求解释热规律最优控制问题 …… 218

10.2 扩张型燃烧室的超声速燃烧释热最优控制 …… 221
10.3 超声速燃烧最优释热规律特性分析 …… 224
10.4 内型线与释热分布耦合最优控制 …… 225
10.5 小结 …… 237
参考文献 …… 237
第11章 吸气式高超声速飞行器的轨道优化问题 …… 239
11.1 考虑发动机推进机理的飞/推系统最优轨迹问题 …… 240
11.1.1 面向轨迹优化控制的飞/推系统建模方法 …… 240
11.1.2 飞/推系统加速段轨迹最优控制问题的一般形式 …… 247
11.2 求解轨迹最优控制问题的一般方法 …… 250
11.2.1 间接法求解轨迹最优控制问题 …… 250
11.2.2 直接法求解轨迹最优控制问题 …… 252
11.2.3 间接法与直接法的等效关系 …… 254
11.3 冲压发动机推进的飞/推系统加速段最小油耗轨迹 …… 254
11.4 飞/推系统起飞质量对最小油耗轨迹的影响 …… 259
11.5 飞/推系统性能指标对最优轨迹的影响 …… 261
11.5.1 最小油耗轨迹与最小时间轨迹 …… 261
11.5.2 飞/推系统最优轨迹实时效率分析 …… 263
11.6 飞/推系统发动机性能对最优轨迹的影响 …… 265
11.6.1 尾喷管喉道可控对最优轨迹的影响 …… 265
11.6.2 基于超声速燃烧推进的轨迹优化问题 …… 266
11.7 飞/推系统约束对最优轨迹的影响 …… 271
11.7.1 超温约束与不起动约束对最优轨迹的影响 …… 271
11.7.2 等动压约束对最优加速轨迹的影响 …… 276
11.8 小结 …… 279
参考文献 …… 280

常用符号表

英文字母

A	面积
C	系数
c_p	定压比热容
De	水力直径
E	动能
F	推力
f	摩擦系数
G	重力
g	重力加速度
H	高度;哈密顿函数
h	焓
I_{sp}	比冲
k	定熵指数
L	长度
l	航程
M	质量
Ma	马赫数
$\dot{m}$	质量流量
p	压力;动压
Q	总吸热量或放热量
q	单位质量吸热量或放热量
Re	雷诺数
r	半径
S	飞行器特征截面面积
s	熵
T	温度
t	时间
v	速度
W	总功
w	单位质量功
Y	质量分数

希腊字母

α	攻角
β	偏航角
γ	航迹角
θ	加热比
η_{th}	循环热效率
η_p	推进效率
η_0	发动机总效率
σ	总压恢复系数
φ	流量捕获系数
ρ	密度
ϕ	当量比
ψ	温升比
π	压升比
τ	摩擦应力

上角标

*	发动机流路截面总参数

下角标

0	自由来流参数;初值
a	空气
D	阻力
c	燃烧室
cyc	循环过程
f	燃料;终值
t	发动机流道截面总参数;喉部
i	第 *i* 种组分
i	入口
L	升力

第1章 绪 论

为满足未来军事斗争对武器系统的要求，以及人类对高超声速远程飞行的梦想，吸气式高超声速推进技术作为实现空天飞行与高超声速武器系统的重要技术支撑长久以来被寄予厚望。

当要求飞行器在大气层内以高超声速远程飞行时，作为吸气式推进装置的超燃冲压发动机，其在比冲、单位迎面推力、耗油率、航程等方面具有较大优越性。美国的X-43A、X-51A等成功飞行，表明以超燃冲压发动机为动力的高超声速飞行已成为可能，超燃冲压发动机研究也是目前世界大国研究的热点之一。

自从超声速燃烧的概念提出以来，超燃冲压发动机研制工作经历了理论分析、数值模拟、地面试验等阶段，近年来，随着研究工作的日益深入，超燃冲压发动机研制技术已步入飞行试验验证阶段。围绕着HyShot[1-3]、X-43A[4-7]、X-51A[8,9]、HIFiRE[10,11]等高超声速研究计划已开展了数十次飞行试验，在超燃冲压发动机的性能分析、控制系统研制、燃烧组织等多方面都积累了大量的经验。

双模态超燃冲压发动机是一种崭新的发动机，尚没有成熟的控制方法用于此种发动机[12]。而发动机总体技术发展离不开其控制系统的发展，控制系统决定了发动机的可靠性和性能，所以对其控制系统的研究应同步于甚至提前于发动机其他方面技术的发展步伐。图1-1为不同类型推进系统的性能比较。几十年来，在控制系统方面，从事双模态超燃冲压发动机技术研究的主要国家都相继展开了多项研究计划。本书就是在这样的背景下，针对双模态超燃冲压发动机在建模与控制方面面临的一系列挑战，对一些关键技术做了系统的阐述。