

高超声速飞行器 鲁棒自适应控制

宗 群 田栢苓 董 琦 著
张秀云 张超凡 叶林奇



科学出版社

高超声速飞行器 鲁棒自适应控制

宗 群 田栢苓 董 琦 著
张秀云 张超凡 叶林奇

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在深入分析高超声速飞行器模型特性的基础上,重点对高超声速飞行器巡航段的稳定跟踪控制及再入段的姿态控制问题进行研究。全书以实际工程为背景,所研究问题均来源于实际,如弹性和非最小相位影响下的高超声速飞行器的稳定跟踪控制问题、多约束及不确定影响下的再入轨迹姿态协同控制问题等。通过提炼关键科学问题,本书有针对性地提出了基于滑模控制、反步控制及干扰补偿控制的策略,建立了高超声速飞行器巡航段和再入段控制的一般框架。

本书从飞行器模型特性分析入手,在此基础上,根据不同的研究问题,融合了飞行控制领域的最新研究成果,适合自动化相关专业的本科生及研究生阅读,同时可供对高超声速飞行器感兴趣的高校师生、科研工作者和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

高超声速飞行器鲁棒自适应控制/宗群等著. —北京:科学出版社,2018.9
ISBN 978-7-03-058890-6

I. ①高… II. ①宗… III. ①高超声速飞行器-鲁棒控制-自适应控制-研究 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 216481 号

责任编辑:张海娜 赵微微 / 责任校对:何艳萍

责任印制:师艳茹 / 封面设计:蓝正设计

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>

河北鹏润印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年9月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:287 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



宗群, 1961年生, 教授, 博士生导师。现为天津大学电气自动化与信息工程学院控制理论与控制工程学科带头人; 天津大学无人机联合研究中心主任; 教育部新型飞行器制导与控制中心主任; 教育部新型飞行器联合研究中心副主任; 教育部科学技术委员会国防学部委员, 中国自动化学会控制理论专业委员会委员, 中国航空学会制导、导航与控制委员会委员, 中国自动化学会技术过程故障诊断与安全性专业委员会委员, 中国自动化学会过程控制专业委员会委员, 中国自动化学会数据驱动控制、学习与优化专业委员会委员, 中国人工智能学会智能空天系统专业委员会委员; 天津自动化学会理事; 教育部重大专项专家组副组长, 国家 863 项目专家组专家, 国家自然科学基金评审专家, 教育部科技委国防学部专家组专家; 参与国家重大专项项目论证, 参与制定学校航空航天领域发展规划; 《控制理论与应用》编委, 《哈尔滨工业大学学报》编委, 《宇航学报》编委。在国内外学术刊物发表学术论文 160 多篇, 其中 SCI/EI 检索 100 多篇, ESI 高被引论文 2 篇, 出版相关专著 1 部。获天津市科学技术进步奖二等奖、三等奖各 1 项, 获授权发明专利 20 余项。作为项目负责人先后主持完成科研项目 30 多项, 包括国家重点基金培育项目、国家自然科学基金、教育部重点培育基金、航空航天科研院所项目、天津市自然科学基金重点项目、天津市科技攻关重点项目、民用航天预研项目、军委科技委颠覆性创新项目等。主要研究方向包括飞行器建模、控制与仿真, 高超声速飞行器轨迹优化与姿态协同控制, 多智能体编队协同控制, 无人系统类脑智能规划与控制, 人机智能融合虚拟及实物平台建设等。

前 言

高超声速飞行器是指飞行马赫数大于 5,能在大气层和跨大气层中远程飞行的飞行器,其应用形式包括高超声速导弹、空天飞机、高超声速运输机、可重复使用运载器等多种飞行器。高超声速技术是集航空、航天、材料、气动、优化、控制及计算机为一体的多学科交叉研究领域,是航空航天技术的战略制高点。由于高超声速飞行器既能在大气层内以高超声速巡航飞行,又能穿越大气层进行再入飞行,具有巨大的军事价值和潜在的经济价值,是一种具有广阔开发前景的飞行器。然而,与传统飞行器不同,高超声速飞行器大空域、高机动、宽速域的特点,以及机身—发动机一体化的特殊设计结构,使得高超声速飞行器是一个集多变量、强耦合、非线性、不确定及多约束影响于一体的复杂被控对象,其制导控制系统设计面临巨大挑战,相关技术的研究已经成为当今航空航天领域最前沿的研究课题之一。

高超声速飞行器在实际飞行过程中,由于自身的复杂特性及外界环境干扰的影响,无法对其进行精确建模,如何设计强鲁棒的飞行控制器是高超声速飞行器控制领域亟待解决的核心问题。本书重点利用滑模和反步控制方法,从鲁棒和自适应角度对不确定影响下的高超声速飞行器稳定跟踪控制问题进行研究,探索建立面向高超声速飞行器的控制理论框架,为形成我国高超声速飞行器关键问题的创新理论提供参考依据。

本书作者十余年来一直从事高超声速飞行器建模、轨迹优化、制导控制及仿真的研究工作,先后承担完成了与高超声速飞行器相关的国家重大科技专项、国家高技术研究发展计划(863)项目、教育部科学技术研究重点项目、国家基金重点专项培育项目、国家自然科学基金项目及多项航空科学基金项目,取得了一定的研究成果。本书旨在系统地归纳与总结当前国内外在高超声速飞行器控制领域的最新研究成果,提炼其中的关键科学问题,为从事高超声速飞行器技术研究的科研工作人员提供有益参考。

本书的撰写特点如下:

(1) 在深入分析高超声速飞行器典型模型(如美国空军实验室的巡航段刚体模型、俄亥俄州立大学的巡航段弹性模型及美国 X-33 的再入模型)控制需求的基础上,阐述基于不同控制方法的控制器设计过程,为读者提供有益借鉴。

(2) 本书内容涉及高超声速飞行器巡航段不确定、最小相位、非最小相位及控制饱和和约束等多种复杂特性影响下的稳定跟踪控制问题及再入过程中的轨迹与姿态协同控制问题,研究内容涵盖当前高超声速飞行器控制领域研究的重点和热点,

提出的控制策略具有一定的理论意义和工程应用价值。

全书共 9 章。第 1 章绪论,在介绍高超声速飞行器基本概念的基础上,全面总结各国高超声速飞行器的研究进展,分析提炼与控制相关的关键科学问题,并给出本书的撰写特点和内容安排。第 2 章高超声速飞行器控制方法概述,分别从线性控制和非线性控制的角度,对高超声速飞行器的各种控制方法进行比较分析。第 3 章高超声速飞行器模型描述,重点对巡航段的纵向刚体模型、弹性体模型及六自由度的再入模型进行介绍,为后续控制系统设计提供依据。第 4 章基于典型滑模的高超声速飞行器稳定跟踪控制,在介绍典型滑模基本概念的基础上,重点研究基于积分滑模和终端滑模的高超声速飞行器巡航段稳定跟踪控制策略。第 5 章基于高阶滑模的高超声速飞行器稳定跟踪控制,在介绍高阶滑模基本原理的基础上,重点研究基于自适应高阶滑模和超螺旋滑模的高超声速飞行器跟踪控制策略。第 6 章基于反步控制方法的高超声速飞行器稳定跟踪控制,重点介绍利用反步控制解决高超声速飞行器输入约束情形下的稳定跟踪控制问题。第 7 章具有非最小相位特性的高超声速飞行器稳定跟踪控制,在深入分析非最小相位特性对飞行控制性能影响的基础上,分别给出强、弱两种非最小相位特性影响下高超声速飞行器的稳定跟踪控制策略。第 8 章和第 9 章重点对高超声速飞行器再入段的控制问题进行研究,其中第 8 章提出基于自适应多变量干扰补偿的再入姿态控制策略,第 9 章融合实时最优反馈制导与再入姿态控制,提出实时再入轨迹与姿态协同的控制策略,解决复杂飞行环境下的轨迹重构与姿态协同控制问题。

本书得到了国家自然科学基金项目“复杂环境影响下 RLV 再入轨迹姿态协同控制策略研究”(61673294)及装备预研教育部联合基金青年人才基金项目“高超声速飞行器先进再入制导控制一体化策略研究”(6141A02033311)等的资助。此外,燕山大学的王芳、天津理工大学的吉月辉及河北工业大学的王婕等也参与了本书的撰写工作,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2018 年 3 月于天津大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高超声速飞行器基本概念	1
1.2 高超声速飞行器研究进展	3
1.3 高超声速飞行器控制难点问题	13
1.4 编写特点和内容安排	20
1.5 小结	21
参考文献	22
第 2 章 高超声速飞行器控制方法概述	23
2.1 高超声速飞行器线性控制方法	23
2.1.1 PID 控制	24
2.1.2 极点配置	24
2.1.3 增益调度控制	24
2.1.4 线性二次最优控制	25
2.1.5 经典鲁棒控制	26
2.1.6 模型预测控制	28
2.1.7 内模控制	28
2.1.8 多模型控制	29
2.2 高超声速飞行器非线性控制方法	30
2.2.1 动态逆	30
2.2.2 反步控制	31
2.2.3 滑模控制	32
2.2.4 非线性序列闭环控制	34
2.2.5 轨迹线性化控制	35
2.2.6 L_1 自适应控制	36
2.2.7 浸入与不变	37
2.2.8 预设性能控制	38
2.3 小结	39
参考文献	39

第 3 章 高超声速飞行器模型描述	46
3.1 刚体高超声速飞行器模型描述	46
3.2 弹性高超声速飞行器模型描述	49
3.2.1 俄亥俄州立大学 David 模型	49
3.2.2 俄亥俄州立大学 Lisa 模型	52
3.3 高超声速再入飞行器六自由度模型描述	55
3.3.1 质心平动方程	56
3.3.2 绕质心转动方程	57
3.4 小结	58
参考文献	59
第 4 章 基于典型滑模的高超声速飞行器稳定跟踪控制	62
4.1 滑模控制的基本原理	62
4.1.1 基本概念	62
4.1.2 滑模面和趋近律	63
4.1.3 抖振现象的产生与克服	66
4.2 典型滑模控制方法	66
4.2.1 积分滑模控制方法	66
4.2.2 终端滑模控制方法	67
4.3 基于典型滑模的高超声速飞行器控制器设计	70
4.3.1 基于积分滑模的高超声速飞行器控制器设计	70
4.3.2 积分滑模控制仿真分析	72
4.3.3 基于自适应终端滑模的高超声速飞行器控制器设计	74
4.3.4 终端滑模控制仿真分析	76
4.4 小结	78
参考文献	79
第 5 章 基于高阶滑模的高超声速飞行器稳定跟踪控制	81
5.1 高阶滑模控制方法概述	81
5.1.1 高阶滑模的基本原理	81
5.1.2 任意阶滑模控制方法	84
5.1.3 超螺旋滑模控制方法	86
5.2 基于自适应高阶滑模控制的高超声速飞行器稳定跟踪控制	88
5.2.1 面向控制建模	88
5.2.2 自适应高阶滑模控制器设计	92
5.2.3 仿真分析	97

5.3 基于超螺旋滑模的高超声速飞行器观测器-控制器综合设计	99
5.3.1 基于超螺旋滑模方法的有限时间干扰观测器设计	99
5.3.2 基于干扰观测器的有限时间控制器设计	100
5.3.3 仿真分析	105
5.4 小结	107
参考文献	107
第6章 基于反步控制方法的高超声速飞行器稳定跟踪控制	110
6.1 反步控制方法概述	110
6.1.1 反步控制方法的基本原理	110
6.1.2 反步控制方法的优缺点分析	113
6.2 基于自适应反步控制方法的高超声速飞行器稳定跟踪控制	114
6.2.1 面向控制建模	114
6.2.2 基于自适应反步控制方法的高超声速飞行器控制器设计	115
6.2.3 仿真分析	122
6.3 带有输入约束的高超声速飞行器稳定跟踪控制	125
6.3.1 基础理论	126
6.3.2 带有输入约束的高超声速飞行器控制器设计	129
6.3.3 仿真分析	139
6.4 小结	143
参考文献	143
第7章 具有非最小相位特性的高超声速飞行器稳定跟踪控制	145
7.1 非最小相位的基本概念	145
7.2 高超声速飞行器的非最小相位特性	147
7.2.1 具有非最小相位特性的高超声速飞行器模型	147
7.2.2 非最小相位特性分析	149
7.3 弱非最小相位特性的高超声速飞行器稳定跟踪控制	151
7.3.1 弱非最小相位系统跟踪控制方法	151
7.3.2 高超声速飞行器面向控制建模	152
7.3.3 弱非最小相位的高超声速飞行器控制器设计	154
7.3.4 仿真分析	159
7.4 强非最小相位特性的高超声速飞行器稳定跟踪控制	163
7.4.1 输出重定义方法的基本原理	163
7.4.2 强非最小相位的高超声速飞行器控制器设计	165
7.4.3 仿真分析	168

7.5 小结	173
参考文献	173
第 8 章 基于自适应多变量干扰补偿的再入姿态控制	175
8.1 自适应多变量干扰补偿再入姿态控制器设计	175
8.1.1 面向控制建模	175
8.1.2 再入姿态控制控制器设计过程	176
8.1.3 仿真分析	183
8.2 自适应多变量干扰补偿再入姿态容错控制器设计	188
8.2.1 高超声速飞行器再入故障建模	188
8.2.2 再入姿态容错控制器-观测器综合设计	189
8.2.3 仿真分析	194
8.3 小结	198
参考文献	198
第 9 章 高超声速飞行器实时再入轨迹与姿态协同控制	200
9.1 高超声速飞行器实时再入轨迹与姿态协同控制问题描述	200
9.1.1 再入轨迹与姿态模型	200
9.1.2 问题描述	203
9.2 高超声速飞行器实时再入轨迹与姿态协同控制设计	203
9.2.1 轨迹与姿态协同总体框架	203
9.2.2 基于 Gauss 伪谱法的离线轨迹设计	204
9.2.3 基于自适应 Gauss 伪谱法的实时最优反馈再入制导律设计	207
9.2.4 基于多时间尺度特性的再入姿态控制器-观测器综合设计	210
9.2.5 仿真分析	212
9.3 小结	216
参考文献	216

第 1 章 绪 论

自古以来,在天空自由翱翔就是人类孜孜以求的梦想。自从 1903 年莱特兄弟发明飞机,人类便已实现了飞天的梦想。如今,人们可以乘坐飞机轻松跨越重洋,在空间站俯瞰地球,甚至通过宇宙飞船踏足月球。然而,人类并未停止对天空的征服之路,继续朝着更快、更高、更远的目标前进。在科技高度发达的 21 世纪,人类在航空航天领域有了一个新的追求目标,即高超声速飞行器。

高超声速(hypersonic)这一术语是在 1945 年钱学森先生的论文《论高超声速相似律》中首次提出的^[1]。20 世纪 60 年代,远程弹道导弹的出现、载人飞船的成功返回以及 X-15 验证机飞行速度超越马赫数 6 等系列事件,标志着人类进入高超声速的时代。由于高超声速飞行器所具有的强大的军事和民事应用前景,从 20 世纪 80 年代初开始,美国、俄罗斯、英国、法国、德国、日本、印度等国家就把探索与发展高超声速技术作为航空航天领域的一个重要目标,在世界上掀起了研究和发​​展高超声速飞行器的热潮。

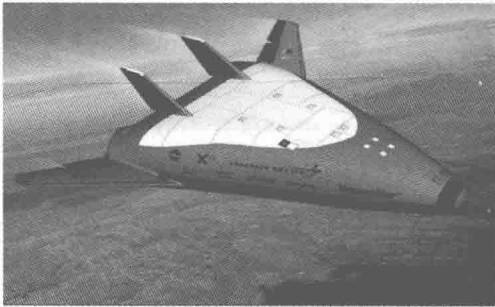
飞行控制系统是高超声速飞行器最重要的组成部分之一,是其安全飞行完成任务使命的保证。受工程青睐的 PID 控制方法最早被应用于高超声速飞行器的控制,美国的高超声速飞行验证机 X-33、X-43A 采用的就是增益调度的经典 PID 控制。这种经典控制方法的鲁棒性、自适应性差,难以适应高超声速飞行器的多飞行任务、复杂飞行环境、特殊飞行模式的需求。本书以高超声速飞行器为背景,对高超声速飞行器的模型进行描述,介绍典型的高超声速飞行器控制方法,依托课题组在高超声速飞行器控制领域所取得的成果,以鲁棒自适应控制方法为基础,针对具有强非线性、强耦合、快时变、不确定性特性的高超声速飞行器控制中的弹性问题、非最小相位问题以及姿态轨迹协调控制问题,提出相应的解决思路和措施。

本章主要内容安排如下:1.1 节介绍高超声速飞行器的基本概念;1.2 节总结高超声速飞行器的研究进展;1.3 节分析高超声速飞行器的控制难点问题;1.4 节介绍本书的编写特点和内容安排;1.5 节对本章进行总结。

1.1 高超声速飞行器基本概念

高超声速飞行器一般是指飞行马赫数大于 5 的有翼或无翼的飞行器。主要包括三类:高超声速巡航导弹、高超声速飞机和航天飞机。高超声速飞行器的关键技术包括推进技术、材料技术、空气动力学技术和飞行控制技术等,是多项前沿技术

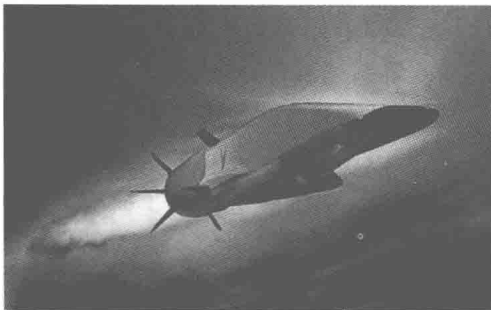
的高度综合。高超声速飞行器的主要特点主要体现在速度、动力和飞行范围上,典型的高超声速飞行器 X-33、X-43、X-51、X-37B 如图 1.1 所示。



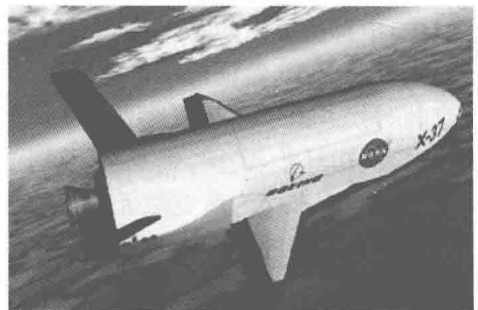
(a) X-33



(b) X-43



(c) X-51



(b) X-37B

图 1.1 典型的高超声速飞行器

1. 速度

高超声速飞行器的马赫数是指飞行速度与当地大气(即一定的高度、温度和大气密度)中的声速之比。一般情况下,将 $5Ma$ 作为超声速与高超声速的分界线。飞行器高超声速飞行时,将出现激波、膨胀波、黏性、湍流和转捩等现象,且由于其采用一体化设计,高速飞行时极易引起低头力矩和抬头力矩,这将对飞行器的飞行状况产生极大影响。目前国际上研究的高超声速飞行器的速度为 $5Ma \sim 20Ma$ 。

2. 动力

高超声速飞行器多采用超然冲压发动机,与涡轮发动机相比,其具有结构简单、质量轻、速度快、推阻比高和成本低等优势,因此成为高超声速飞行器的首选。但是冲压发动机不能在静止的条件下启动,因而常与别的发动机配合使用,成为组合式动力装置,如火箭基组合循环(rocket based combined cycle, RBCC)推进系统、涡轮机组合循环(turbine based combined cycle, TBCC)发动机和协同吸气式

火箭发动机(又称“佩刀发动机”, SABRE)等。组合循环发动机是未来的发展趋势,是实现大气层内高超声速飞行的关键技术。但目前的研究还集中在超燃冲压发动机的可实现性上,尚无法实现全弹道自主飞行。本书的研究也是以采用超燃冲压发动机的高超声速飞行器为背景展开的。

3. 飞行高度

高超声速飞行器能在大气层和跨大气层中远程飞行。其主要飞行高度为20~100km 临近空间,该区域是传统的航空与航天之间的空白区域,是相对独立的“真空”层,高超声速飞行器在该空域飞行并完成特定任务,填补了航空与航天器飞行高度之间的空白,同时具有成本低、时间快的特点。除此之外,高超声速飞行器中的高超声速空天飞行器可以跨大气层飞行,其能够以普通飞机的方式起飞,并且能够直接加速进入地球轨道,完成航空航天任务后再返回大气层,并能水平着陆^[2-4]。它集航空航天技术于一身,兼有航空和航天两种功能,既能完成民用航空航天运输任务,又能执行多种军事航空航天任务,是一种具有广阔发展前景的航空航天飞行器。

高超声速飞行器相比传统飞行器在速度、动力、飞行高度上具有无法比拟的优势,在军用和民用领域都有重要的应用价值,被认为是航空航天发展史上继飞行发明、突破声障的超光速飞行之后的又一划时代和里程碑意义的技术。但是,高超声速飞行器在带来巨大优势的同时也将伴随着前所未有的技术挑战,造成很多新的控制难点,1.3节将进行详细阐述。

1.2 高超声速飞行器研究进展

高超声速飞行器是21世纪世界航空航天事业发展的一个主要方向,在未来的军事、政治和经济中将发挥重要的战略作用。自20世纪80年代以来,美国、俄罗斯、法国、德国、英国、澳大利亚、日本、印度、中国等国家及地区都在进行这方面的研究,并相继进行了地面试验和飞行试验,在高超声速技术方面陆续取得了重大进展,下面详细地介绍各国研究进展。

1. 美国

美国是开展高超声速飞行技术研究最早的国家之一,相继制定实施了NASP、X-33、Hyper-X、HyFly、FALCON等临近空间高超声速飞行器计划,取得了技术上的重大突破,并相继进行了地面试验和飞行试验,引领了世界范围的高超声速飞行器技术研发热潮。美国高超声速技术发展历程如图1.2所示。

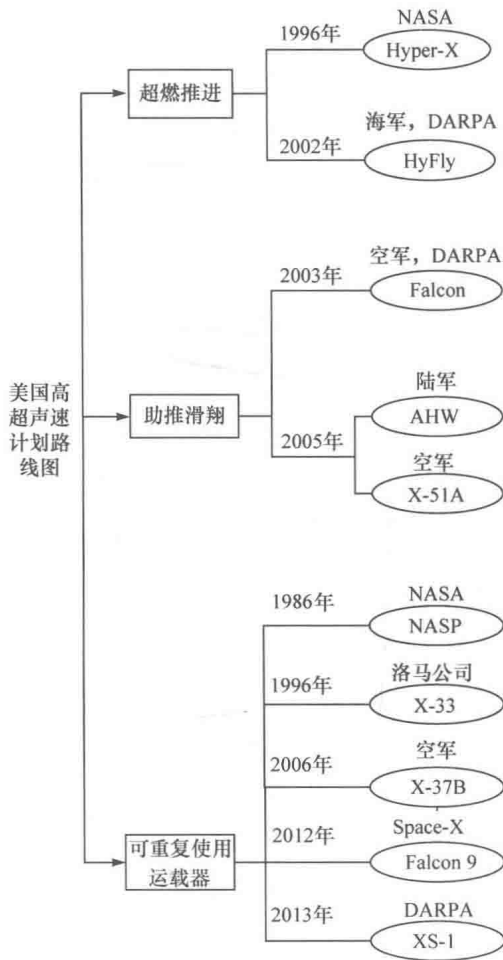


图 1.2 美国高超声速计划路线图

1) NASP 计划

NASP 计划全称“国家空天飞机”(national aerospace plane, NASP)计划,于 1986 年 2 月正式批准,以研制空天飞机 X-30 为目标。NASP 计划的研究重点主要集中在 5 个关键领域:吸气式发动机、轻质耐高温材料、飞行器空气动力学、机身/推进一体化以及各子系统。试验飞行器就是 X-30,是一种具有可操作性、机动性、可维护性和有经济潜力的飞行器。NASP 计划被迫于 1994 年 11 月取消。NASP 计划虽然失败,仍大大推动了高超声速技术的发展,为后续高超声速飞行器的立项和研发打下了技术基础。

2) X-33 计划

X-33 的研制始于 1996 年,技术验证机由洛克希德·马丁空间系统公司(洛马

公司)臭鼬工厂研制,是可重复使用航天运载飞行器冒险星的 1/2 比例原型机。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)原计划于 1999 年 7 月 4 日制造出样机,1999 年 7 月 26 日进行 7Ma 的第一次飞行^[5]。但由于技术难度太大,X-33 技术验证机的研制任务未能如期完成。在经过 5 年的研究,耗资 12.6 亿美元后,2001 年 NASA 宣布取消 X-33 技术验证机的研制计划。

3) Hyper-X 计划

1996 年,在 NASP 计划的基础上,NASA 兰利研究中心及德莱顿飞行研究中心联合提出了高超声速试验计划——Hyper-X 计划。该计划的主要目的是研究并验证高超声速飞机设计技术和可重复使用飞行器与超燃冲压发动机一体化的设计技术,为军用和民用高超声速飞行夯实基础。NASA 指出 Hyper-X 计划的研究核心是 X-43 系列验证机,包括 X-43A、X-43B 和 X-43C 高超声速飞行器。Hyper-X 计划研制时间为 5 年。2004 年 11 月 16 日,X-43A 第三次飞行试验又成功创造了 9.8Ma 的飞行记录,成为世界上速度最快的吸气式飞行器,达到了 X-43A 的预期目的。

4) HyFly 计划

2002 年,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)和海军研究中心开始了高超声速飞行(HyFly)计划,目标在于验证以双燃烧室冲压发动机(dual combustor ramjet, DCR)为动力的高超声速攻击导弹技术。导弹的飞行速度可达到 6Ma,航程达到 740km。该计划分别于 2007 年、2008 年和 2010 年进行了飞行试验,均未能取得成功,三次故障的原因与 DCR 技术并无关联。

5) Falcon 计划

Falcon 计划的全称为“从美国本土运送和应用兵力计划”,也称猎鹰计划。DARPA 于 2003 年启动了 Falcon 计划,该计划的目的是开发和验证能够执行全球任务的高超声速飞行技术,演示成本可负担得起的空间飞行器。该计划分为三个阶段,对小型发射飞行器、高超声速巡航飞行器、通用航空飞行器和高超声速飞行器等进行了多方面的设计和试验。该计划中主要采用成熟、通用、可多次重复使用的高超声速巡航飞行器技术,这些关键通用技术主要包括高升阻比气动构型、主动冷却、弹道选择和自动飞行控制等。

6) X-51A 验证机计划

2005 年 9 月,美国空军批准了 X-51A 验证机计划。X-51A 是美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)与 DARPA 联合主持研制的超燃冲压发动机高超声速验证机(代号:乘波者)。该飞行器由波音公司与普惠公司共同开发,由一台 JP-7 碳氢燃料超燃冲压发动机推动,设计飞行速度为 6Ma~6.5Ma。

这个计划的终极目标是研制在 1h 内攻击地球任意位置目标的新武器。X-51A 相继进行了四次飞行试验。其中 2013 年 5 月 1 日进行的第四次试飞堪称圆满,完成了预计的动力与无动力滑翔过程,发送了大量的遥感数据。

7) AHW 计划

“先进高超声速武器”(advanced hypersonic weapon, AHW)计划是美国陆军提出的一种类似 HTV-2 的快速打击方案,主要目的是验证助推滑翔技术和动能技术,试验重点内容包括空气动力学,导航、制导与控制,热防护等技术。AHW 计划自 2005 年启动以来,由于技术跨度较低,一直得到美国国会和国防部的资金支持,项目研究进展较快。2011 年 11 月完成了先进高超声速武器的首次试飞,飞行距离为 4000km,试验获得成功,从而增加了 AHW 技术用于美国空军常规快速全球打击项目的可行性。

8) X-37B 计划

2006 年 11 月,美国空军宣布在 X-37 的基础上发展 X-37B 验证机,称之为轨道试验飞行器。X-37B 由波音公司作为主承包商负责研制和建造,主要用于空间技术试验与验证,X-37B 计划的目标是对可重复使用的空间飞行器技术进行空间验证、风险降低、运行方案研发。2010 年 4 月 22 日,美国空军利用宇宙神-5 运载火箭将 X-37B 轨道试验飞行器送入近地轨道。X-37B 是继航天飞机后美国发展最成功的跨大气层飞行器,目前已成功完成 3 次飞行试验,3 次试验都超预期和超设计指标。X-37B 演示验证了可重复使用空间飞行器的 20 多项重大技术,包括防热系统、推进系统、电子系统、资助导航与控制、资助返回与着陆及起落架技术等。

9) Falcon 9

2012 年,美国太空探索技术 (SpaceX)公司启动了垂直起降可重复使用运载火箭的飞行测试工作,在开展了多次成功飞行试验后,于 2015 年实施了发射任务,2016 年成功收回,但其在 2016 年 9 月 1 日再次进行发射试验时,发射台发生爆炸。2017 年 1 月 15 日,SpaceX 公司在时隔四个月后,采用 Falcon 9(猎鹰 9 号)运载火箭成功将铱星公司的 10 颗通信卫星送入 625km 高的低地球轨道,并在火箭升空约 8min 后成功地完成了海上回收。2017 年 9 月 7 日,美军 X-37B 验证机首度搭乘 SpaceX 公司的 Falcon 9 火箭,从佛罗里达州肯尼迪太空中心发射升空,执行第五次轨道飞行任务。

10) XS-1 项目

2013 年,DARPA 启动了 XS-1 可重复使用火箭动力运载器的研究项目,XS-1 为可重复使用的第一级助推器,本身并不入轨,每次的发射费用低于 500 万美元,并在 2018 年开始首次飞行试验。XS-1 飞行器应用了美国近 20 年航空航天技术的大量成果,在机体结构、材料、防热系统,尤其是可维护性上将有很大的进步,但它在设计上并不追求过于科幻的高科技和高指标,而是追求尽可能以现有成熟技

术获得更廉价的太空发射能力。

除上述各高超声速飞行器计划之外,2016年,美国又陆续开展了 HyRAX 项目、ETHOS 项目和 TBG 项目等。AFRL 计划通过 HyRAX 项目开发一款可重复使用的试验飞行器,用作高超声速试验平台,来促进多种高超声速技术的成熟和获取科学测量高超声速的方法。HyRAX 飞行器同时将通过高频次飞行验证可重复使用运载器进行高效、经济可承受的飞行,为未来发展可重复使用运载器奠定基础。而 ETHOS 项目,则着重开展包括高速试验科学、高速推进系统、气动结构、建模仿真、飞行器设计和集成等五个技术领域的研究。

2. 俄罗斯

俄罗斯临近空间高超声速技术研究工作在苏联的基础上开展,在超声速飞行器和冲压发动机技术领域,苏联在世界上处于绝对领先地位。茹科夫斯基中央空气流体力学研究院、巴拉诺夫中央航空发动机研究所、图拉耶夫联盟设计局、彩虹设计局、莫斯科航空学院等单位长期致力于高超声速技术基础理论研究,在亚/超燃冲压发动机、C/H 燃料、耐高温材料、CFD 技术及一体化设计技术等方面取得了重大突破。在高空飞行试验中,最先实现超声速燃烧,促进了高超声速技术应用研究的发展。

1) 冷计划

冷计划是 20 世纪 80 年代初苏联制定的高超声速计划,由巴拉诺夫中央航空发动机研究所和茹科夫斯基中央空气流体力学研究院等单位共同实施,试验飞行器采用亚燃/超燃冲压发动机,是俄罗斯最早进行的高超声速技术飞行试验计划。在 1991 年 11 月 27 日进行的首飞试验中,飞行了 180km,飞行时间为 130s,最大飞行高度为 35km,实现了亚声速燃烧向超声速燃烧的转变,并首次实现了超燃冲压发动机的超声速稳定燃烧,这是人类历史上的首次超燃冲压发动机高空高超声速飞行试验,在现代科学史上具有划时代的意义。

2) 鹰计划

巴拉诺夫中央航空发动机研究所军用飞机和天地往返系统为应用背景,在进行冷计划的同时,就与茹科夫斯基中央空气流体力学研究院共同开发了“鹰高超声速发展计划”,简称鹰计划。鹰计划是俄罗斯诸多高超声速计划中最有挑战性的计划,技术先进,试验规模可与美国 Hyper-X 计划比拟。鹰试飞器长为 7.9m,翼展为 3.6m,发射质量为 2200kg,携带的液氢燃料质量为 18kg,速度为 $6Ma \sim 14Ma$,飞行高度为 $0 \sim 80km$,自主飞行时间为 $7 \sim 12min$ 。

3) 彩虹-D2 计划

为了研发出更加接近实际应用的高超声速飞行器,俄罗斯彩虹设计局和巴拉诺夫中央航空发动机研究所共同开展了彩虹-D2 高超声速计划。彩虹-D2 试飞器