



航天科技图书出版基金资助出版

再入飞行器制导律 设计与评估技术

张 冉 李惠峰 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

再入飞行器制导律 设计与评估技术

张 冉 李惠峰 编著



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

再入飞行器制导律设计与评估技术 / 张冉, 李惠峰
编著. --北京: 中国宇航出版社, 2017. 10

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1388 - 9

I. ①再… II. ①张…②李… III. ①再入飞行器-
制导系统-系统设计②再入飞行器-制导系统-评估
IV. ①V475.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 246328 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍

装帧设计 宇星文化

出版
发行 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)60286808 (010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888 (010)68371900
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承印 河北画中国画印刷科技有限公司

版次 2017 年 10 月第 1 版
2017 年 10 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 12.75

字数 310 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1388 - 9

定价 88.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于 2007 年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审 1~2 次,资助 20~30 项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010) 68767205, 68768904

序

1961年4月12日，苏联航天员尤里·加加林乘坐东方号飞船进入地球环绕轨道，成为人类进入太空第一人，标志着人类航天时代的开始。1969年7月20日下午4时17分42秒，美国航天员尼尔·阿姆斯特朗将左脚小心翼翼地踏上了月球表面，这是人类第一次登上月球。随着航天事业的不断发展，相信在不久的将来，人类自由旅行月球和其他星球的梦想终将实现。

再入制导技术是高超声速飞行器返回地球过程中的关键技术之一，是人类安全返回地球的基本保障。2003年2月1日美国东部时间上午9时（北京时间22时），美国哥伦比亚号航天飞机在结束为期16天的太空飞行返回地球着陆前16分钟失控解体，7名航天员罹难，整个世界为之震惊，飞行器安全性、可靠性问题成为航天技术工作者共同关注的问题。在新型高超声速飞行器研制中，对制导与控制方案做出迅速、合理的评价是其中一项重要工作。影响高超声速飞行器制导和控制系统性能的因素种类繁多，对再入制导系统做出全面的性能评估和鉴定，有利于深入认识飞行器的实际飞行特性，设计满足工程研制需求的制导方案，保证飞行器安全飞行。

本书认真总结了国内外在高超声速飞行器制导设计和评估方面的研究成果与丰富经验，在广泛调研国外几种典型高超声速飞行器再入制导律的设计方法和实践经验的基础上，进行了综合、归纳、分析和系统整理，可以让读者全面深入地了解飞行器再入制导的发展历程和测试经验，为奉献于我国未来航天事业的年轻一代提供有价值的信息资料。除此之外，本书还系统介绍了再入制导律设计的理论基础和方法，详细分析了飞行器各研制阶段的评估技术、评估流程和方法，并给出了几种典型的再入制导律评估实例，这也是实际工程研制过程中的关键环节，希望从事飞行器研制的科研人员能结合实际深入开拓，完善飞行器再入制导设计和评估技术，从而满足人类对未来高超声速飞行器的应用需求。

本书从国外典型案例分析开篇，涵盖了再入制导律的理论基础、设计方法，以及制导评估技术和实际工程应用等各个环节的关键技术，内容丰富，思路清晰，立论严谨，特别重视该技术在工程中的应用价值，可为从事航天

制导技术领域的科技工作者提供借鉴，也可作为飞行器制导控制相关专业的学生辅导用书。



中国工程院院士

2017年6月

前 言

高超声速再入飞行器是指飞行马赫数大于 5，从轨道或亚轨道高度再入，主要依靠气动力控制实现机动飞行的飞行器。高超声速技术是当今航空航天领域的前沿技术，是航空航天大国竞相开展研究的热点领域。近年来国内的科研院所和高校等研究机构广泛开展了高超声速飞行器相关技术的研究工作，取得了大量的研究成果。

再入制导技术自 20 世纪 50 年代至今，已持续发展了半个多世纪，其中的航天飞机再入制导律也是迄今比较成熟的、经受了反复工程实践检验的再入制导方法。对制导系统进行全面系统的评估，不仅可以评估各类制导和姿态控制方法的优劣，在深入分析其中原因的基础上，还可以进一步改进和提高制导方案。更重要的是在目前的技术水平上，在对高超声速飞行器实际性能认识较少的情况下，通过综合评估能找出最适合该类飞行器及飞行任务的制导方案，或通过对多种方案的科学整合得到满足工程研制需求的优化方案。

本书作者十多年来全心致力于高超声速飞行器制导和控制的研究工作，在高超声速飞行器建模、轨迹优化、上升及再入段制导和控制、末制导等领域有着丰富的研究经验和工程实践经验，并取得了一系列成果，出版的图书《高超声速飞行器制导和控制》受到本领域科研工作者的广泛认可，多年的工作经验使作者深刻认识到再入制导的设计和评估工作在飞行器研制阶段的重要作用，而目前国内外的参考资料大部分来源于期刊论文，缺乏系统全面介绍制导和评估内容的资料，希望本书能对从事高超声速飞行器技术研究的科研人员具有一定的参考价值，这是作者撰写该书的初衷。

全书内容共 5 章，第 1 章绪论，介绍了高超声速飞行器的发展现状及再入制导和评估技术的作用和关键技术。第 2 章全面系统地总结了包括航天飞机、X33 等在内的几种典型高超声速飞行器再入制导律的设计方法、实践经验，以及再入制导律的性能评估分析。第 3 章主要是根据多年的研究经验，总结再入制导律设计、制导策略和制导方法的基础理论。第 4 章是在前面几章的基础上，系统深入地梳理制导律的评估方案和评估方法。最后一章主要通过示例的形式详细介绍了再入制导律定性评估和定量评估的评估流程、指标体系和评估

方法。全书的编纂参阅了大量的国内外技术资料 and 学术文献，但由于参考文献数量较多，若有遗漏和不足之处，敬请谅解。

本书在编写过程中得到了黄瑞松院士的大力支持，课题组的张蕊讲师、王嘉炜和孙珊同学完成了大量图表的绘制和公式修订工作。同时，本书的顺利出版也得益于航天科技图书出版基金对本书的支持和资助，以及中国宇航出版社为本书出版提供的具体指导，在此一并表示感谢。

本书是作者多年从事航天工程技术研究的经验总结，希望本书能成为航天领域的科研人员、工程师和研究生在科研学习及工作中一本有价值的参考书。但限于作者水平，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正，不胜感激。

张冉、李惠峰
2017年6月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 高超声速飞行器发展现状	1
1.1.1 美国	1
1.1.2 俄罗斯	5
1.1.3 欧洲	6
1.1.4 其他	6
1.2 再入制导与评估技术概述	7
1.2.1 制导与评估技术的关键作用	8
1.2.2 再入制导问题及发展方向	9
1.2.3 制导律设计关键技术	10
1.2.4 制导律评估关键性能	13
1.2.5 影响制导律性能的重要因素	14
1.3 本书的编写特点和内容安排	15
参考文献	17
第 2 章 典型再入制导律的设计与评估概述	19
2.1 双子星再入制导律	19
2.1.1 双子星两种制导律设计	21
2.1.2 双子星两种制导律性能评估	24
2.1.3 双子星再入制导律设计实践经验	25
2.2 阿波罗再入制导律	26
2.2.1 阿波罗制导律设计	27
2.2.2 阿波罗制导律性能评估	32
2.2.3 阿波罗制导律设计实践经验	35
2.3 航天飞机再入制导律	36
2.3.1 航天飞机制导律设计	42
2.3.2 航天飞机制导律性能评估	62
2.3.3 航天飞机制导律设计实践经验	66
2.4 再入研究飞行器再入制导律	68

2.4.1 再入研究飞行器再入制导律设计	71
2.4.2 再入研究飞行器再入制导律性能评估	76
2.4.3 再入研究飞行器再入制导律设计实践经验	83
2.5 X-33 再入制导律	84
2.5.1 X-33 制导律设计	85
2.5.2 X-33 制导律性能评估	86
参考文献	98
第3章 再入制导律设计的理论与方法	100
3.1 再入飞行器质点动力学基础理论	100
3.1.1 标称轨迹的开环稳定性	100
3.1.2 常值升阻比再入轨迹动态	101
3.1.3 轨迹控制量与状态量的动力学关系	103
3.1.4 基于线性化模型的再入制导律设计	104
3.2 再入制导策略	106
3.2.1 显式制导和隐式/摄动制导	107
3.2.2 纵向/横向协调策略	109
3.2.3 过程约束控制策略	112
3.3 再入制导方法	117
3.3.1 轨迹生成与在线更新技术	117
3.3.2 轨迹跟踪技术	122
参考文献	136
第4章 再入制导律评估技术与方法	138
4.1 再入制导律评估总体思路	138
4.1.1 飞行器各研制阶段的评估需求	138
4.1.2 再入制导律评估的设计流程	139
4.2 再入制导律评估技术和方法	140
4.2.1 无动力高超声速飞行器建模	141
4.2.2 蒙特卡洛评估技术	149
参考文献	156
第5章 再入制导律评估设计实例	157
5.1 典型再入制导律定性评估	157
5.1.1 标称轨迹法定性评估	157
5.1.2 预测轨迹法定性评估	158

5.1.3 混合衍生型制导律定性评估	159
5.2 典型再入制导律性能定量评估	160
5.2.1 飞行任务设计	160
5.2.2 定量评估指标体系设计	183
5.2.3 定量评估计分方法	189
参考文献	192

第 1 章 绪 论

1.1 高超声速飞行器发展现状

航天技术是当今世界科技中最为尖端的技术之一，也是一个国家科技水平和综合国力的重要体现^[1]。世界航天大国和工作者高度关注和发展自由进入空间、增强空间控制、实现天地往返等技术，各种先进技术的研究计划、新概念空天飞行器研发已被各航天大国列入发展规划，并取得了重要进展。高超声速飞行器技术是航天技术发展中的重大技术之一。早在半个世纪前，高超声速飞行技术就受到了广泛的关注。从一般飞行器简单外形到航天飞行器复杂外形，从亚声速到高超声速，半个世纪的研究使人类对高超声速技术的认识不断深化，高超声速飞行技术已然是航空航天领域的研究热点之一。

高超声速飞行器一般指飞行马赫数大于 5 的飞行器，其在军事和民用上都具有非常高的应用价值。在军事上，它具有大航程、高超声速、高机动性的特点，是应对未来近太空作战，突破陆、海、空、天“四维一体”防御系统，执行快速全球到达及精确打击任务的重要武器装备，必将是未来武器发展的重要方向；在民用方面，它能够低成本地实现可重复的跨大气层飞行和天地往返，是航天运输系统的重要组成部分。21 世纪初，为了提高本国远程常规快速打击能力，美国国防部正式提出一项新的作战计划，即快速全球打击（Prompt Global Strike, PGS），旨在一小时内对全球任何目标实现可达并实施打击^[2-3]。近年来，美国在其快速全球打击计划的促使下加快了针对高超声速再入飞行器的研究。虽然国际上不断出现禁止太空军事化的呼声，但各军事强国对高超声速再入飞行器的研究热情并没因此而减少，反而更加积极上涨。下面主要分析国外高超声速飞行器的发展现状。

1.1.1 美国

目前，美国对高超声速飞行器的研究和试验进度已经显著领先于其他国家^[4]。这一点可以从美国近年来连续进行高超声速飞行器试飞上体现出来。相比之下，其他国家目前将更多的精力放在基础技术研究和攻关上。2010—2013 年世界高超声速飞行器试飞情况统计如图 1-1 所示。从图 1-1 可见，美国 4 年完成 X-51A、HTV-2 和 AHW 共计 3 个项目 7 次试飞，若将美澳合作的 HIFiRE 项目计入其中，则这一数字可增加至 12 次；加上美国此前曾开展的 X-43A 项目和 HyFly 项目，其试飞数目遥遥领先于世界其他国家。这些试飞是美国政府、军队、科研和工程单位合力的集中体现，不论试验成功与否，均对美国技术的进步和高超声速飞行器向着实用化方向的发展起到了积极的推动作用。

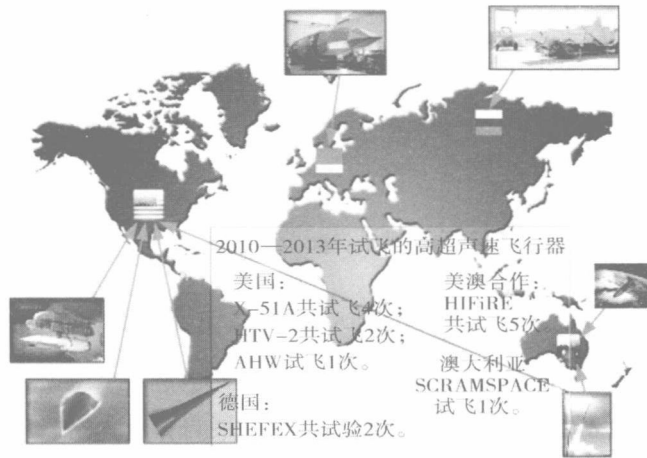


图 1-1 2010—2013 年试飞的高超声速飞行器

迄今为止,美国实施过的研究计划有:国家空天飞机(NASP)计划、高超声速试验(Hyper-X)计划、高超声速飞行(HyFly)计划、X-51A计划、兵力运用与本土发射高超声速飞行器-2(FALCON HTV-2)计划和常规打击导弹(CSM)计划等。

(1) X-51A 计划

2005年7月,美国空军将X-51A计划列入X-Plane系列中,并命名为X-51A超燃冲压发动机演示器-乘波飞行器,又称为乘波者(Wave Rider),如图1-2所示。其中“A”代表X-51系列飞行器中的第一个飞行器设计方案,后续可能采用不同的助推装置或飞行器推进方案,将被命名为X-51B、X-51C等。

X-51A于2010年5月26日、2011年6月1日和2012年8月14日进行了前3次试飞。其中第1次试飞不完全成功,飞行器首先在发动机切换到纯JP-7燃料工作140s后遭遇了进气道不启动问题的困扰,随后位于超燃冲压发动机和机体喷管之间的热密封发生泄漏,致使飞行器最大马赫数仅达到4.87。虽然试验结果并未达到预期,但整个试验还算“完整”。2011年和2012年的两次试飞并没有在首飞的基础上有所突破。首飞暴露的进气道不启动问题反而在第2次试飞中彻底爆发,试验提前告终。2012年8月14日的第3次试飞由于右上控制尾翼的意外解锁而失败。连续的失败并没有使整个项目走向终结,在多方支持下,项目团队重整旗鼓,并终于在2013年的第4次试飞中大获成功。2013年5月2日,X-51A进行了第4次飞行试验,实现了其首次成功飞行试验,此次X-51A飞行试验有动力飞行240s,飞行最大高度为18.288km,最大飞行马赫数为5.1,航程为426km。

尽管X-51A作为一个技术演示验证项目仍处于试验和发展阶段,但从目前发展看,其作为美国研究高超声速飞行器的关键计划之一,是离工程化应用最接近的高超声速飞行器之一,其自由飞行的成功,将使超燃冲压发动机技术向实用化方向迈出重要一步,X-51A的研究成果将被应用到由美国空军研究实验室近期提出的高速打击武器(HSSW)演示验证项目的研究中。X-51+也列入了2015年后规划中的飞行试验中。

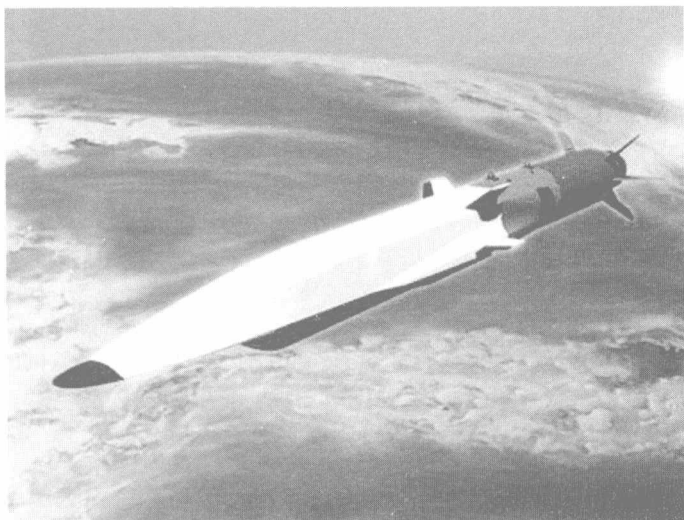


图 1-2 X-51A 飞行假想图

(2) 兵力运用与本土发射计划

美国国防高级研究计划局 (DARPA) 和美国空军于 2002 年推出兵力运用与本土发射 (FALCON) 计划^[5], 其目的是使美军具备能够对全球任何地方进行快速打击和兵力投送的能力。2005 年, 美国国防高级研究计划局和美国空军按照美国国会的意向, 将该计划中的通用航空飞行器 (CAV) 重新命名为高超声速飞行器 (HTV), 包括 HTV-1、HTV-2 和 HTV-3, 通过一系列飞行试验验证高超声速滑翔飞行技术。目前该计划已经进展到 HTV-2 阶段。图 1-3 为 HTV-2 从运载火箭分离。

2009 年, 美国军方授予洛克希德·马丁公司 (简称为“洛马公司”) 一项计划: 改进 HTV-2 的设计, 使之能容纳武器。目前已经完成两架试验用验证机的建造 (HTV-2a 和 HTV-2b)。2010 年 4 月 22 日, HTV-2a 完成了首次高超声速滑翔试验, 实现了马赫数在 20 的情况下的可控飞行。但在飞行 9 min 后该飞行器失控, 据报道可能是再入大气层时温度过高导致飞行失败。未来的设计目标是能滑翔 3 000 s, 纵向滑翔 16 668 km。2011 年 8 月 11 日, HTV-2 进行了第 2 次高超声速滑翔试验, 实现了在马赫数 20 的情况下的可控飞行; 此次试验虽未能实现预期目标, 但飞行时间比第一次有了较大提升。虽然美国目前没有再次制造 HTV-2 的计划, 但 HTV-2 未能完成的关键技术将会在基于高超声速飞行器技术而发展的常规打击导弹计划中得到验证。未来计划是以高超声速滑翔弹头为依托, 继续发展战术助推滑翔 (TGB) 计划, 其目的是在未来五年内验证与高超声速助推滑翔飞行器有关的关键技术。未来还计划开展 X-Plane 计划, 该计划已被列入规划中的飞行试验。目前美国正开展第三架高超声速滑翔弹头集成工作, 已经完成高超声速滑翔弹头质心位置调整。

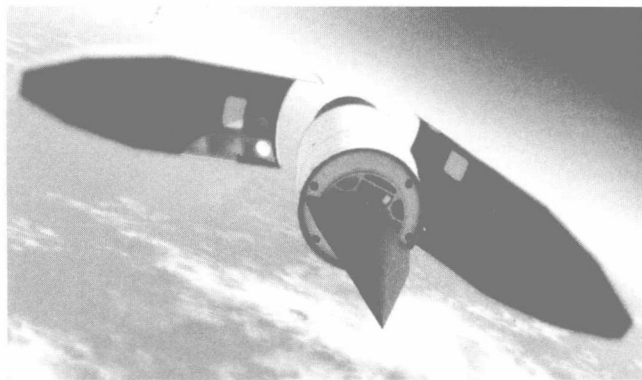


图 1-3 HTV-2 从运载火箭分离

(3) 先进高超声速武器计划

除美国空军外,美国陆军也启动了先进高超声速武器(AHW)计划,用于实现远距离快速投放常规武器实施打击。与 HTV-2 完全不同,在 2011 年 11 月 17 日美国陆军航天与导弹防御司令部/美国陆军战略司令部,成功地完成先进高超声速武器(AHW)(如图 1-4 所示)首次飞行试验以前,几乎无人知道这个项目。AHW 项目由上述两个司令部在亚拉巴马州亨茨维尔建立的项目办公室管理和实施。助推器系统和滑翔飞行器均由位于新墨西哥州阿尔伯克基的桑迪亚国家实验室研制,防热系统由位于亚拉巴马州亨茨维尔的美国陆军航空与导弹开发与工程中心研制。

该飞行器采用美国海军海神弹道导弹的助推级 STARS,并带有精确制导系统。该飞行器采用圆锥体加四个襟翼的构型,并具有较强的机动能力,能够绕过第三方国家实施打击,射程比高超声速滑翔弹头短,能在 35 min 内到达 6 000 km 以外目标,命中精度在 10 km 以内。美国国防部认为陆军的这一计划有助于为降低空军全球快速打击计划的风险提供支持。与 HTV-2 计划相比,先进高超声速武器计划技术风险更低,可更早形成威胁。

美国对该计划进行了 2 次飞行验证试验。2011 年 11 月 17 日,AHW 的首次飞行试验获得成功,试验射程达 4 600 km,2014 年开展了第 2 次飞行试验,但飞行失败。据称,AHW 正在开展 3 900 km、7 000 km、9 000 km 等多种射程的助推级方案论证,还计划研发空基、海基、潜射等多种类型。

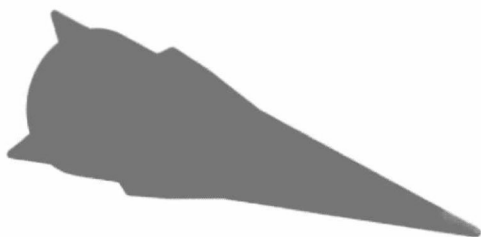


图 1-4 AHW 再入飞行器

(4) 高空高超声速作战飞机

除了战术助推滑翔计划 (TGB) 外, 美国还研发了一款高空高超声速作战飞机, 代号为 SR-72, 它是一款集情报搜集、侦察、监视和打击等多种作战能力于一体的高超声速飞行器。2013 年 11 月, 美国洛马公司臭鼬工厂正式发布 SR-72 战机概念 (如图 1-5 所示), 预计于 2030 年前形成初始作战能力。其飞行高度为 25~40 km, 飞行马赫数达到 6。

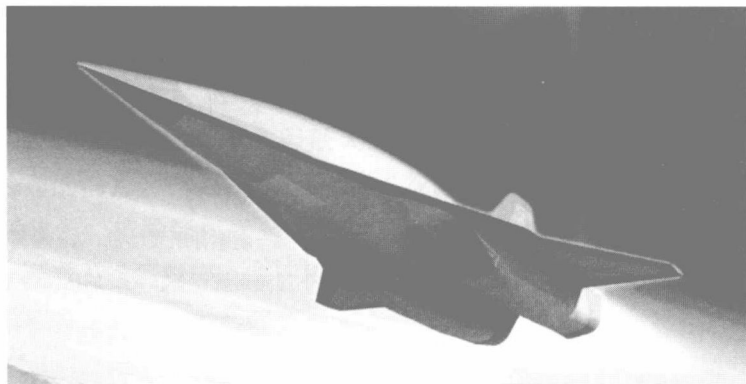


图 1-5 SR-72 高空高超声速作战飞机

1.1.2 俄罗斯

俄罗斯在超燃冲压发动机研究领域一直处于领先地位, 以俄罗斯中央航空发动机研究所为代表的几家研究单位几十年来不间断地进行着超燃冲压发动机研究, 近年来主要实施了冷计划和鹰计划。冷计划高超声速试飞器的亚/超燃冲压发动机试验模型是由俄罗斯中央航空发动机研究院与中央空气流体动力研究院合作研制而成的。冷计划的高超声速试飞器、超燃冲压发动机模型、试飞器发射系统已经成为一套很完善的试验设备。1991—1998 年期间, 冷计划的试飞器采用轴对称氢燃料双模冲压发动机, 进行了 5 次验证性飞行试验, 其中第 1 次试验是俄罗斯单独进行的, 第 2 次、第 3 次试验是与法国合作进行的, 第 4 次、第 5 次试验是与 NASA 合作进行的。通过飞行试验, 俄罗斯获得了大量有价值的全尺寸试验发动机的飞行试验和地面试验数据, 并改进了设计。鹰计划试验飞行器是俄罗斯继冷计划后的又一高超声速试验飞行器, 如图 1-6 所示, 该飞行器采用翼身组合体气动布局, 并在机翼下配置 3 台超燃冲压发动机。鹰计划试飞器采用 SS-19 匕首洲际弹道导弹作为运载器, 鹰计划试飞器安装在 SS-19 弹道导弹的弹头位置。鹰计划试飞器的飞行综合了高超声速再入与吸气式高超声速巡航两种形式的弹道, 具有更强的突防能力。2001 年, 俄罗斯成功试射了一种新型远程导弹, 其最后一级是一种旨在突破美国弹道防御系统的新型高超声速巡航导弹。据美国情报官员分析, 该导弹很有可能是以 SS-25 白杨机动洲际弹道导弹作为运载器的鹰计划试飞器。

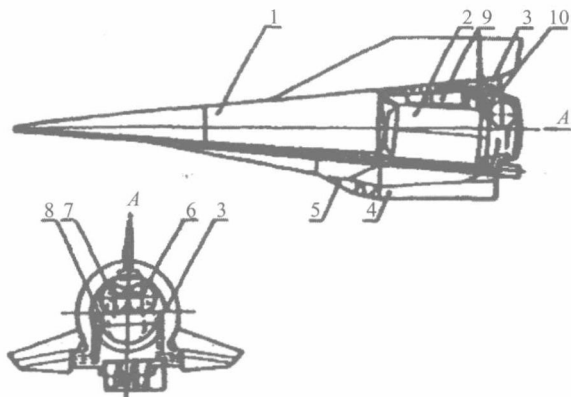


图 1-6 鹰计划高超声速试验飞行器

- 1—高超声速飞行器；2—液氢燃料箱；3—舵组件；4—超燃冲压发动机；5—尾翼；
6—球形氯气瓶；7—球形氢气瓶；8—回收伞包；9—遥测系统设备；10—加压回馈系统

1.1.3 欧洲

法国是欧洲最早发展高超声速技术的国家。20 世纪 90 年代，法国先后进行了大流量氢燃料和大流量碳氢燃料超燃冲压发动机试验，并与俄罗斯、德国进行了多项联合研究计划。当前法国把使用碳氢燃料双模冲压发动机的高超声速导弹作为首选的应用目标。法国航空航天研究院与德国航空航天研究院自 1997 年以来共同实施了旨在验证空气动力学计算模型和液氢燃料双模冲压发动机的 JAPHAR 计划^[6]。法国航空航天研究院和法国航空航天-马特拉公司合作实施了 Promethee 计划，目的是研制一种碳氢燃料双模冲压发动机推进的空对地导弹。自 2003 年以来，该计划成功进行了一系列推进系统的全尺寸模型地面试验^[7]。

德国的高超声速导弹（HFK）计划旨在为用于近程防空和超近程防空作战使用的高超声速导弹奠定广泛的技术基础。1995—2003 年德国进行了多次 HFK 系列（HFK-L1、HFK-L2、HFK-E0、HFK-E1）高超声速导弹试验，最大飞行马赫数达到 6 以上^[7-8]。

1.1.4 其他

日本期望在 2020—2030 年左右研制出高超声速运输机，其高超声速飞行器发展计划主要是高速空间运载器计划。20 世纪 90 年代，日本进行了为期 10 年的超声速/高超声速运输推进系统（HYPR）计划，由日、美、英、法等国的公司参与，重点研制大推力高速度的涡扇/冲压组合循环发动机，目的是为发展飞行马赫数达到 5 的超声速/高超声速运输机的推进系统奠定技术基础^[7,9]。同时期进行的还有高性能材料研究计划，重点开发用于制造高超声速运输机机体或发动机的耐高温复合材料^[7]。

印度近年来一直在大力发展军事航天技术，目前已成功地进行了氢燃料的超燃冲压发动机地面点火试验；印度国防研究与发展组织（DRDO）正在进行超燃冲压发动机的研制，在 2005 年启动了一项为期约 5 年的高超声速导弹试验计划；另外，印度国防研究与