

丛书序

飞得更快一直是人类飞行发展的主旋律。

1903年12月17日,莱特兄弟发明的飞机腾空而起,虽然飞得摇摇晃晃,犹如蹒跚学步的婴儿,但拉开了人类翱翔天空的华丽大幕;1949年2月24日,Bumper-WAC从美国新墨西哥州白沙发射场发射升空,其上面级飞行马赫数超过5,成为人类历史上首次实现高超声速飞行。从学会飞行,到跨入高超声速,人类用了不到五十年,蹒跚学步的婴儿似乎长成了大人,但实际上,迄今人类还没有实现真正意义的商业高超声速飞行,我们还不得不忍受洲际旅行需要十多个小时甚至更长飞行时间的煎熬。试想一下,如果我们将来可以在两小时内抵达全球任意城市,这个世界将会变成什么样?这并不是遥不可及的梦!

今天,人类进入高超声速领域已经快70年了,无数科研人员为之奋斗了终生。从空气动力学、控制、材料、防隔热到动力、测控、系统集成等,在众多与高超声速飞行相关的学术和工程领域内,一代又一代科研和工程技术人员传承创新,为人类的进步努力奋斗,共同致力于达成人类飞得更快这一目标。量变导致质变,仿佛是天亮前的那一瞬,又好像是蝶即将破茧而出,几代人的奋斗把高超声速推到了嬗变前的临界点上,相信高超声速飞行的商业应用已为期不远!

高超声速飞行的应用和普及必将颠覆人类现在的生活方式,极大地拓展人类文明,并有力地促进人类社会、经济、科技和文化的发展。这一伟大的事业,需要更多的同行者和参与者!

书是人类进步的阶梯。

实现可靠的长时间高超声速飞行堪称人类在求知探索的路上极为艰苦卓绝的一次前行,将披荆斩棘走过的路夯实、巩固成阶梯,以便于后来者跟进、攀登,

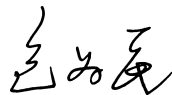
意义深远。

以丛书这样一种出版形式,将高超声速基础研究和工程技术方面取得的阶段性成果和宝贵经验固化下来,有助于建立基础研究与高超声速技术应用之间的桥梁。为广大研究人员和工程技术人员提供一套科学、系统、全面的高超声速技术参考书,可以起到为人类文明探索、前进构建阶梯的作用。

2016年,科学出版社就精心策划并着手启动了“高超声速出版工程”这一非常符合时宜的事业。我们围绕“高超声速”这一主题,邀请国内优势高校和主要科研院所,组织国内各领域知名专家,结合基础研究的学术成果和工程研究实践,系统梳理和总结,共同编写了“高超声速出版工程”丛书,丛书突出高超声速特色,体现学科交叉融合,确保丛书具有系统性、前瞻性、原创性、专业性、学术性、实用性和创新性。

这套丛书记载和传承了我国半个多世纪尤其是近十几年高超声速技术发展的科技成果,凝结了航天航空领域众多专家学者的智慧,既可供相关专业人员学习和参考,又可作为案头工具书。期望本套丛书能够为高超声速领域的人才培养、工程研制和基础研究提供有益的指导和帮助,更期望本套丛书能够吸引更多的新生力量关注高超声速技术的发展,并投身于这一领域,为我国高超声速事业的蓬勃发展做出力所能及的贡献。

是为序!



2017年10月

前 言

临近空间,即位于传统航空与航天之间距地球表面 20~120km 高度范围内的区域,近年来已成为国际航空航天领域的研究热点。开发这一特殊空域对推动科学技术进步、增强国家安全以及促进经济社会发展具有重要意义。高超声速飞行技术的突破更是人类探索速度极限的里程碑,高超声速飞行器以其快速响应和全球到达能力,成为提升国家战略威慑力和安全保障水平的重要工具。临近空间及高超声速技术的开发应用也将催生出新的产业形态,如近地轨道旅游、高速物流配送等。开发临近空间与发展高超声速飞行器对国家科技实力的提升、安全保障的加强以及经济社会的全面发展具有深远而重大的意义。

进入 21 世纪以来,国际上逐渐掀起临近空间高超声速飞行器总体技术、动力推进、防隔热、测控通信等相关领域技术研究的热潮,临近空间特殊的空域环境和高速特性使其测控与通信系统面临恶劣电磁环境的挑战。临近空间高超声速飞行器信道特性研究是高超声速飞行器测控与通信系统研究与设计中必不可少的一项关键技术。一方面,高超声速飞行带来的等离子体鞘套这一新的复杂电磁环境中的电磁波传播效应与常规无线传播环境差异较大,严重衰减和畸变传输信号;另一方面,飞行器在跨空域、高速飞行条件下,等离子体鞘套状态和空间信道环境变化跨度大,信道呈现出强烈的不平稳特性。因此,明确高超声速飞行电磁环境下的电磁波传播效应和机制,建立高超声速飞行器信道模型,明确其信道特性对发展临近空间测控通信技术尤为重要。

本书正是在此背景下撰写而成的,系统阐述了临近空间高超声速飞行器信道特性分析与建模技术,内容涵盖等离子体鞘套中电磁波传播特性、准平稳/非平稳等离子体鞘套信道模型与特性分析、高超声速飞行器综合信道模型与特性

分析、高超声速飞行器适应性通信技术展望等,总结了大量国内科研团队在高超声速飞行器信道特性分析与建模方面的最新研究成果,详细论述了高超声速飞行器信道模型的数学推导及地面模拟探测实验验证结果。本书特色在于:结合重大工程实际需求,从理论建模、数值计算到地面实验验证,全面系统地分析了特殊场景下的信道特性,国际上首次给出了等离子体鞘套信道数学模型,并以典型钝锥体飞行器为例贯穿全书,给出了典型微波段(S-Ka)信道参数。

本书共6章。第1章介绍了临近空间高超声速飞行器的发展概况、测控通信技术挑战及黑障现象和信道建模的重要意义;第2章详细介绍了等离子体鞘套中电磁波传播特性;第3章详细介绍了飞行器再入条件下等离子体鞘套信道建模及特性分析,并给出了对典型测控体制信号的影响;第4章阐述了高超声速飞行器信道综合模型与特性分析,包括上行、下行综合信道统计特性及功率谱密度函数;第5章介绍了等离子体鞘套信道模拟与探测方法,以及多种地面模拟环境下的探测实验;第6章展望了高超声速飞行器适应性通信技术。本书融入了西安电子科技大学石磊教授、姚博副教授、李小平教授、魏海亮博士、刘宗元博士、王依繁博士、潘强博士的学术成果和辛勤汗水,研究内容也得到包为民院士、吕跃广院士和刘彦明教授的指导,在此表示衷心感谢!

本书为国家出版基金项目,并受到西安电子科技大学出版基金资助。本书的研究内容依托于极端环境下装备效能教育部重点实验室和空间物理国防科技重点实验室平台,受973计划课题(No. 2014CB340200)、国家自然科学基金(No. 62371375、No. 62371372)、陕西省创新能力支撑计划科技创新团队(No. 2022TD-37)、陕西省杰出青年科学基金(No. S2025-JC-JQ-0103)的资助,以最新研究成果为主要内容进行阐述,面向国际上重大学术前沿问题,以理论数值分析和地面数据验证为基础,先进性强,对通信与信息系统学科的发展、对无线电磁波与无线信道领域内容的充实具有很强的理论指导和实践意义。

由于作者水平有限,加之临近空间高超声速飞行器和无线信道建模理论快速发展,相关领域众多理论和技术问题有待研究和解决,本书难免有疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2025年10月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 概 述

1

1.1	临近空间开发利用战略意义	/ 1
1.2	临近空间飞行器发展趋势	/ 3
1.2.1	临近空间飞行器	/ 3
1.2.2	高超声速飞行器	/ 5
1.3	临近空间飞行器通信信道环境	/ 14
1.3.1	临近空间测控通信需求	/ 14
1.3.2	临近空间测控信道环境	/ 15
1.3.3	临近空间综合信道链路特性	/ 18
1.4	临近空间高超声速飞行器黑障难题	/ 27
1.4.1	等离子体鞘套黑障现象	/ 27
1.4.2	抗黑障传统技术路径	/ 29
1.5	高超声速飞行器信道特性研究意义	/ 30
	参考文献	/ 31

第2章 等离子体鞘套中电磁波传播特性

34

- 2.1 等离子体的形成机理及关键参数 / 34
 - 2.1.1 等离子体的形成机理和主要过程 / 34
 - 2.1.2 等离子体的关键参数 / 35
 - 2.1.3 等离子体鞘套的参数特征 / 38
- 2.2 等离子体的介质特性 / 38
 - 2.2.1 单粒子模型 / 39
 - 2.2.2 磁流体模型 / 41
 - 2.2.3 动力学模型 / 43
 - 2.2.4 宏观介质模型 / 45
- 2.3 等离子体电磁波传播理论 / 47
 - 2.3.1 等离子体电磁波传播模型 / 47
 - 2.3.2 等离子体电磁波传播特性 / 48
- 2.4 等离子体鞘套电磁波传播计算方法 / 49
 - 2.4.1 解析法 / 50
 - 2.4.2 有限差分时域法 / 51
 - 2.4.3 散射矩阵法 / 55
 - 2.4.4 WKB 方法 / 57
 - 2.4.5 方法对比 / 58
 - 2.4.6 算例分析 / 59
- 2.5 典型飞行器稳态等离子体鞘套中电磁波的传播特性 / 62
 - 2.5.1 等离子体鞘套的参数及特征 / 62
 - 2.5.2 等离子体鞘套中电磁波的传播特性 / 63
- 2.6 小结 / 69
- 参考文献 / 70

第3章 飞行器再入段等离子体鞘套信道建模方法

71

- 3.1 飞行器再入段等离子体鞘套信道概述 / 71
- 3.2 再入段等离子体鞘套多时间尺度介质模型及电磁计算 / 71

3.2.1	等离子体鞘套电子密度多尺度描述方法 / 71
3.2.2	时变等离子体衰减/相移快速计算方法 / 73
3.2.3	再入段时变非平稳等离子体鞘套信道特征 / 76
3.3	基于 HMM 的非平稳信道建模方法 / 80
3.3.1	马尔可夫链及隐马尔可夫模型 / 81
3.3.2	马尔可夫链蒙特卡罗随机采样法 / 85
3.3.3	基于 RJ - MCMC 信道参数估计方法 / 91
3.4	再入段等离子体鞘套多状态非平稳信道模型 / 94
3.5	等离子体鞘套信道的小尺度衰落数学模型 / 99
3.5.1	幅度与相位概率密度函数 / 99
3.5.2	幅度与相位相关系数 / 103
3.5.3	幅度与相位自相关函数 / 106
3.5.4	电平通过率和平均衰落时间 / 108
3.6	等离子体鞘套对典型体制信号的影响 / 113
3.6.1	基于导频校正的 PSK 调制与性能分析 / 113
3.6.2	NC - MASK 最大似然检测方案与性能分析 / 116
3.6.3	NC - MFSK 调制性能分析 / 119
	参考文献 / 123

第 4 章 高超声速飞行器信道综合模型与特性分析

4.1	高超声速飞行器综合信道环境概述 / 126
4.2	高超声速飞行器信道几何-统计模型 / 129
4.2.1	高超声速飞行器三维几何传播模型 / 129
4.2.2	等离子体鞘套信道与高速移动信道耦合关系 / 131
4.3	高超声速飞行器综合信道统计特性 / 133
4.3.1	上行综合信道统计特性 / 133
4.3.2	下行综合信道统计特性 / 138
4.3.3	综合信道的功率谱密度函数 / 139
4.4	高超声速飞行器综合信道仿真验证 / 140
	参考文献 / 147

第5章 等离子体鞘套信道模拟与探测方法

149

- 5.1 等离子体鞘套信道模拟与探测意义 / 149
 - 5.1.1 等离子体鞘套信道模拟意义 / 149
 - 5.1.2 等离子体鞘套信道探测意义 / 150
- 5.2 等离子体鞘套信道物理模拟方法 / 151
 - 5.2.1 托卡马克 / 151
 - 5.2.2 激波风洞 / 154
 - 5.2.3 电弧/射频等离子体风洞 / 156
 - 5.2.4 辉光/射频等离子体源 / 159
 - 5.2.5 电子束高碰撞等离子体发生器 / 160
 - 5.2.6 多模块协同放电等离子体模拟 / 162
- 5.3 等离子体鞘套信道数值模拟 / 163
 - 5.3.1 小尺度信道快速模拟方法 / 163
 - 5.3.2 信道模拟仿真验证 / 165
- 5.4 等离子体鞘套信道探测方法 / 168
 - 5.4.1 常用信道探测方法 / 168
 - 5.4.2 等离子体鞘套信道探测方案 / 169
 - 5.4.3 地面等离子体模拟环境的选取 / 180
 - 5.4.4 基于 DPSE 信道模型实验验证 / 182
 - 5.4.5 基于激波管的信道模型实验验证 / 187
- 参考文献 / 193

第6章 多应用场景下高超声速飞行器信道研究展望

195

- 6.1 短波段/天波/HF 等离子体鞘套信道特性 / 195
- 6.2 太赫兹/激光段等离子体鞘套信道特性 / 199
- 6.3 多源态势感知协同通信技术 / 201
- 参考文献 / 206

第 1 章

概 述

1.1 临近空间开发利用战略意义

临近空间,这一地球大气层中的神秘领域,坐落于航空飞行器与轨道航天器之间的广阔天地,其高度跨度在距地球表面 20~100km,亦被形象地称为“亚太空”、“超高空”“近空间”或“亚轨道”。这片独特的空域,横跨平流层、中间层和热层三大气层,以其空气稀薄、风速强劲、水汽与杂质稀缺、云雨难觅、温度恒定且湿度趋近于零的独特环境,长久以来被视为一片“难以驯服的处女地”。然而,随着航空航天技术的日新月异,一系列专为临近空间设计的飞行器应运而生,如轻盈飘逸的浮空器、动力澎湃的吸气式飞行器,以及速度惊人的超声速与高超声速飞行器,它们如同新时代的探索者,将临近空间的开发利用推向了一个崭新的高度。如今,临近空间已成为各国竞相角逐的战略高地,其军事、经济和科研价值日益凸显。在军事领域,临近空间飞行器如同空中的守护者,为国防安全筑起了一道坚不可摧的防线;在经济领域,它们为高速物流、远程通信等新兴产业提供了无限可能,推动了产业的转型升级与经济的蓬勃发展;在科研领域,则利用这一独特平台,开展大气探测、天文观测等前沿研究,不断解锁自然界的奥秘,为人类的科学探索之旅开辟了新的篇章。

1) 军事与国防应用

临近空间因其特殊的位置成为连接空与天的桥梁,是实现空天一体不可逾越的环节。在战略上,临近空间可达到上可制天,下可制地、制海的特殊效果,是一个独立于航空空间和航天空间之外的新高地,具有独特的军事应用价值和战略地位。

战略情报收集: 临近空间飞行器的留空时间长,非常适用于对固定目标或

特定区域的长时间连续监视,可用于部署高空无人侦察平台、预警雷达等。同时,由于临近空间飞行器运行于航空空间和航天空间之间,因此可以执行对地对天的双重监视任务,既可以用于对地面目标的侦察监视,也可以承担对航天器的持久观测。与卫星相比,临近空间飞行器可以在更低的高度更精确地获取地面情报,且具有更灵活的机动性。

通信与导航:在临近空间部署的通信中继平台能够为地面部队和舰艇提供跨越复杂地形的可靠通信覆盖,且不受电离层反射的影响,接收比卫星更宽频段的通信信号,从而成为天基、空基和陆基通信手段的有效补充。特别是以浮空器为代表的临近空间飞行器具有留空时间超长的优势,很适用于担负战区级广域通信中继任务,增强战术通信能力。在导航领域,临近空间飞行器可以与地面基站、卫星导航系统相结合,形成多源导航网络,能够提供更加稳定、抗干扰、抗欺骗的高精度定位。

导弹预警与防御:临近空间预警平台具有视野广阔、反隐身和探测超低空目标等方面的优势,可以有效克服预警机续航时间有限、预警卫星机动性不足、地面预警雷达作用距离短的缺陷以及卫星在轨道的限制,可预测导弹飞行轨迹与跟踪,为高超声速拦截导弹提供数据支持和制导信息,确保更高效的防御能力。这种灵活性使其能够应对突发的导弹威胁,尤其是在紧张局势下,能够迅速形成有效的导弹预警网络,填补卫星和地面预警系统之间的空白。

高超声速武器的支持平台:临近空间能够为高超声速飞行器提供中途助推或监测平台,使这些新型武器在打击精度和突防能力上更具优势。以飞艇为代表的临近空间飞行器可以用于重型装备和投送物资,甚至可以用于作战部队的大范围、高机动投送。这种能力在战略上具有重要意义,能够迅速增强某一地区的军事力量,实现快速部署和反击。

2) 民用领域应用

通信网络扩展:随着 5G 和未来 6G 网络的快速发展,临近空间平台可以成为重要的通信节点,帮助扩展 5G 基站的覆盖范围和容量,可提供高带宽、低延迟的网络连接,能够满足这些新兴技术的需求。其平台距离地面仅数十公里,比卫星通信的几百到上千公里近得多,因而具有更低的信号传输延迟,对自动驾驶、无人机控制、虚拟现实(virtual reality, VR)等依赖实时数据传输的应用场景至关重要。在人口密集的城市中,临近空间平台能够缓解地面通信网络的拥堵,提升数据传输效率。而在海洋、沙漠等偏远地区,可以实现 5G 网络的无缝覆盖,推动新一代通信技术的广泛应用。

快速全球运输：在民用领域，临近空间技术可能彻底改变全球物流运输格局。通过高超声速飞行器实现全球货物运输，可以显著缩短运输时间，提升跨洲货物运输效率，使同日达或次日达在全球范围内成为可能，为电子商务、供应链管理等领域带来巨大革新。在自然灾害或人道主义危机发生时，快速全球运输技术可以快速将救援物资和救援人员送达灾区，显著提高救援效率。特别是在交通中断或恶劣条件下，临近空间飞行器能够迅速抵达常规飞机难以到达的地区，确保紧急物资及时到达。

气象和环境监测：临近空间平台可以携带高分辨率的传感器，用于大规模地表观测，能够长时间持续在高空中运行，采集大气数据并监测环境变化，尤其是在气象预报、极端天气监控和气候变化研究方面具有重要意义。由于飞行高度较低，其分辨率可显著高于传统的卫星遥感系统。这类数据对农业、能源、灾害防御等领域的经济活动至关重要。此外，通过对地球外层空间的重要过渡地带（临近空间）的观测，科学家可以研究大气层、宇宙射线、地磁场等现象，这些研究对人类未来的太空探索以及应对地球环境变化具有重要意义。

1.2 临近空间飞行器发展趋势

1.2.1 临近空间飞行器

临近空间飞行器在现代军事领域具有重要的战略价值，主要体现在提供持续的通信、侦察和打击能力。由于飞行高度位于大气层与太空之间，临近空间飞行器能够跨越广泛的地理区域，提供稳定的通信信号和实时情报，增强空基与天基平台之间的协同作战能力。同时，临近空间飞行器常常处于敌方防空系统难以触及的高度，具有较强的生存能力和隐蔽性，能够有效规避传统防空武器的威胁。此外，临近空间飞行器还能够有效对抗敌方导弹防御系统，并在未来战术演变中发挥关键作用，支撑信息化、网络化战争的需求。临近空间飞行器按照速度和机动性可分为低动态和高动态两大类，如图 1.1 所示。

临近空间低动态飞行器（nearspace low dynamic vehicle, NLDV）主要指高空气球、高空飞艇、高空长航时无人机等。高空气球、高空飞艇属于浮空器，平台自身具有惯量大、刚度低、响应时延长、可控性弱等特点，驻空高度在距地球表面 20~50km 的平流层中。高空长航时无人机主要指飞行高度在距地球表面 20~30km、飞行时间达几十小时甚至一年的高空战略性无人侦察机、太阳能无人机

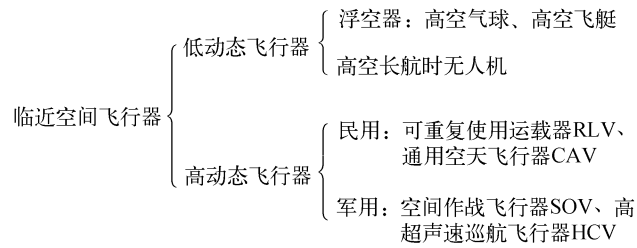


图 1.1 临近空间飞行器分类

等。临近空间高动态飞行器 (nearspace high dynamic vehicle, NHDV) 从广义上讲包括可重复使用运载器 (reusable launch vehicle, RLV)、空间作战飞行器 (space operations vehicle, SOV)、通用空天飞行器 (common aero vehicle, CAV)、高超声速巡航飞行器 (hypersonic cruise vehicle, HCV) 等一系列具有快速灵活跨大气层飞行能力的飞行器。

临近空间低动态飞行器的发展最早可以追溯到 20 世纪初, 气球是最早进入这一领域的飞行器。1901 年, 瑞士科学家奥古斯特·皮卡德 (Auguste Piccard) 利用高空气球进行了临近空间探测实验。在此后数十年里, 气球成为主要的临近空间探测工具, 特别是在气象观测中发挥了关键作用。然而, 这一时期的技术受限于材料和控制技术的发展, 飞行器多为一次性使用, 续航和可控性较差。随着冷战期间对高空侦察的需求增加, 临近空间飞行器逐渐进入军方视野。美国 and 苏联分别研发了高空侦察气球, 用于远距离侦察任务。美国的“侦察气球计划”和“天顶计划”尝试利用气球对苏联进行侦察, 但气球的漂浮特性导致难以控制方向和高度, 技术局限性使这些项目未能大规模发展。20 世纪 80 年代后, 随着材料科学、太阳能技术和飞行控制技术的进步, 临近空间飞行器进入了新的发展阶段。轻质复合材料的应用使飞行器更加轻便, 而太阳能电池技术为长期滞空的无人飞行器提供了持续的动力来源。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 等机构在这一时期进行了多次高空气球实验, 测试了临近空间的飞行环境, 并推动了飞行器在长时间驻空中的应用。21 世纪初, 全球对临近空间的关注再次提升, 特别是在通信、监测和高空侦察等领域。美国开始加大临近空间飞行器的研发力度, 推出了一系列重要项目, 例如, “海神”无人机, 一种由太阳能驱动的高空长航时无人机, 能在临近空间滞空数周甚至数月, 用于通信中继、侦察监测等任务; “全球观察者”飞行器, 一种利用氢气作为燃料的临近空间飞行器, 具备长时间滞空能力, 为军方和民用提供

大范围通信和监测支持。这一时期,临近空间飞行器开始在军事侦察、通信中继、气象监测等领域取得重要进展,并逐步进入商业和民用市场,推动了高空飞艇、无人机等技术的实用化。

临近空间高动态飞行器的发展历程可以追溯到 20 世纪中期,伴随着全球对跨大气层飞行和高超声速技术的探索与进步。1959 年,美国 X-15 计划开启了高超声速和亚轨道飞行的先河,通过多次临近空间的飞行测试,积累了宝贵的飞行数据,为后续跨大气层飞行器打下了技术基础。紧接着,20 世纪 60 年代的 X-20“动力翱翔者”(Dyna-Soar)计划进一步提出了可重复使用空间作战飞行器(SOV)的设想,目标是实现从地球发射到轨道的快速跨大气层飞行,具备核打击和太空作战能力。尽管 X-20 计划因资金和技术困难被取消,但其设计理念影响深远。1981 年,美国航天飞机计划成功实施,标志着可重复使用运载器(RLV)的实际应用。航天飞机在 30 年间完成了数百次任务,展现了跨大气层飞行器在轨道运输、空间站维护等领域的潜力,尽管因高昂的维护成本于 2011 年终止,但它推动了未来 RLV 技术的发展。20 世纪 80 年代末期的 X-30“国家航天飞机”计划旨在开发一款从地面起飞、进入地球轨道的高超声速空天飞机,尽管技术挑战使计划中止,但其在推进系统和耐高温材料领域的研究极大地推动了高超声速技术的发展。进入 21 世纪,随着无人飞行器技术的进步,美国推出了 X-37B 无人空天飞机,成为跨大气层高动态飞行器的代表。X-37B 能够多次发射和回收,并执行长时间轨道任务,标志着小型、无人空间作战飞行器的成熟。在同一时期,美国提出了迅捷全球打击的战略构想,推动了通用空天飞行器(CAV)的研发。CAV 旨在利用高超声速飞行技术实现全球范围内的快速打击,能够在地面和临近空间之间穿梭,具备灵活的打击和部署能力。商业领域也不甘落后,SpaceX、蓝色起源等公司通过猎鹰 9 号(Falcon 9)等,推动了 RLV 技术的商业化。这些火箭能够多次发射和回收,显著降低了进入太空的成本,标志着 RLV 技术的普及进入了新的阶段。

1.2.2 高超声速飞行器

高超声速飞行器正成为全球科技竞争的新焦点。各国竞相投入,力求在这一前沿领域取得突破,以占据未来科技高地。其以超越 5 倍声速的飞行能力,展现出卓越的突防、快速打击和高机动性,重塑了军事力量平衡。更为重要的是,高超声速飞行器的研发推动了新型材料、动力系统、导航与控制技术等多方面的革新。这些技术突破不仅提升了飞行器的性能,更为航空航天领域的持续发展

注入了新活力。高超声速飞行器不仅在高技术竞争中占据核心地位,更是推动航空航天技术进步的重要力量。随着技术不断突破,高超声速飞行器将引领航空航天领域迈向新高度,开启科技探索的新篇章。

1) 美国

美国在高超声速飞行器的研发中始终走在全球前列,多项技术验证项目和武器发展现了其强大的技术储备和多样化的应用前景。

(1) X-37B(轨道试验飞行器)。

X-37B(图 1.2)是美国空军和 NASA 联合开发的一款可重复使用的无人轨道飞行器,在轨道飞行时的速度接近高超声速,具备多用途能力,能够长期在轨飞行,并且可以返回地球进行再次使用。它首次发射于 2010 年,目的是测试未来空间技术的可行性和耐久性,旨在为美国空军展示可靠、可重复使用、无人太空测试平台的技术。X-37B 的主要任务是验证可重复使用航天器技术,并开展可返回地球的在轨操作试验,包括测试航空电子设备、飞行系统、制导和导航、热保护、绝缘、推进和再入系统。



图 1.2 X-37B(轨道试验飞行器)^[1]

(2) X-51A Waverider。

X-51A Waverider(图 1.3)是美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)与美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)联合主持研制的超燃冲压发动机高超声速验证机,它是美国在高超声速冲压发动机技术上迈出的重要一步。该飞行器的目标是验证使用超燃冲压发动机在大气层内飞行的可行性,为吸气式高速超燃冲压发动机

推进中使用碳氢化合物燃料提供了宝贵的经验。X-51A 的测试主要集中在验证发动机性能和飞行控制技术,最终目标是开发高超声速导弹。临近空间高动态飞行器的飞行速度达到马赫数 5 以上,在高超声速飞行中保持了较长时间的稳定性。X-51A Waverider 的成功飞行验证了美国在高超声速超燃冲压发动机技术上的领先地位,并为后续武器开发提供了关键技术支持。X-51A 技术可能被应用于未来高超声速打击武器中,包括高超声速巡航导弹和空射快速反应武器,为未来战场中的远程精确打击提供新途径。



图 1.3 X-51A Waverider^[2]

(3) HTV-2(高超声速技术验证器)。

HTV-2 即第二代“猎鹰”高超声速飞行器(图 1.4),是美国国防部高级研究计划局(DARPA)历时多年研制的高超声速技术验证器,旨在测试并验证能够以飞行速度为马赫数 5 的技术。它是美国探索大气层内高超声速飞行器的一项重要实验项目,其主要任务是验证飞行控制、热管理和材料在高超声速下的表现。2010 年 4 月 22 日,HTV-2 进行了首航,但在飞行约 9min 后失去控制,与地面失去联系。尽管如此,仍收集到了珍贵的高超声速飞行数据。2011 年 8 月 11 日,HTV-2 进行了第二次飞行实验,同样在飞行约 9min 后出现异常,遥测信号丢失。初步迹象表明,飞机在沿计划路径飞行时坠落在太平洋中。虽然 HTV-2 在两次试飞中未能完全成功,但它为未来高超声速滑翔器和导弹的发展积累了宝贵的经验。该飞行器旨在为全球快速打击任务服务,能够在短时间内对全球任何地点实施打击。HTV-2 面临的最大的技术挑战是如何在极端速度和高温下保持飞行稳定性,高温导致的材料变化和空气动力学控制问题成为该项目的关

键难题。尽管如此,HTV-2 的试飞拓展了美国在高超声速飞行中的边界,HTV-2 的试飞验证了高超声速飞行的可行性,为未来高超声速武器的研发奠定了技术基础,通过试飞收集到了大量宝贵的高超声速飞行数据,为未来高超声速飞行器的设计提供了重要参考。



图 1.4 HTV-2(高超声速技术验证器)^[3]

(4) SR-72(“黑鸟Ⅱ”高超声速侦察机)。

SR-72 被称为“黑鸟Ⅱ”高超声速侦察机(图 1.5),是美国洛克希德·马丁公司设计研发的一种无人高超声速战略侦察机概念项目。作为 SR-71“黑鸟”的继任者,SR-72 的设计目标是实现超过马赫数 6(约 7350.48km/h)的飞行速度,这将使其成为全球飞行速度最快的飞机。飞行高度预计超过 30km,最高可达 50km,远高于大多数现役飞行器的最大飞行高度。采用隐身化设计,具备较强的隐身能力,能够躲避敌方雷达探测和导弹拦截。采用涡喷发动机与超燃冲

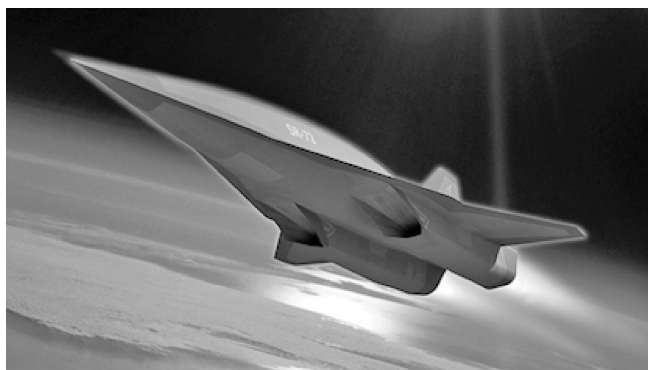


图 1.5 SR-72(“黑鸟Ⅱ”高超声速侦察机)^[4]

压发动机的组合体作为动力,能够在不同飞行阶段提供足够的推力。该项目的核心技术是双模式推进系统,结合涡轮和冲压发动机,具备从亚声速到高超声速的平稳转换,SR-72 标志着美国在未来高超声速侦察和打击平台上的雄心。

2) 俄罗斯

在高超声速飞行器研制领域,俄罗斯紧随美国步伐,已构建起完备且领先的研发体系。俄罗斯正矢志不渝地加速高超声速导弹的试验与部署,陆续启动多款新型号研发项目,力图进一步夯实并拓宽其在该领域的技术领先地位。此举尽显俄罗斯在高超声速技术领域的深厚积累与创新活力,以及强化战略威慑能力的坚定意志。新型导弹集前沿科技于一身,具备卓越突防、高速飞行与精确打击能力,将在未来高超声速作战中扮演核心角色,俄罗斯在此领域的持续进步必将深刻影响其国防实力与国际地位。

(1) 先锋导弹。

先锋导弹(图 1.6)是俄罗斯高超声速武器的代表之一,属于高超声速滑翔飞行器。先锋导弹由 RS-18 弹道导弹发射,能够达到超过马赫数 20 的速度,先锋导弹的射程超过 10000km,使其具备远程打击能力,并具备高机动性,能够突破现有和未来的反导系统。它的滑翔飞行段可以规避敌方的拦截,确保在全球范围内对目标进行打击。先锋导弹的研制是俄罗斯对抗美国导弹防御系统的一部分,旨在确保俄罗斯的战略威慑能力。俄罗斯国防部在近年来多次进行了先锋导弹的试射,验证了其性能和可靠性。其中,首次试射是在 2018 年进行的,导弹成功击中了预定目标。经过多次试射和验证后,先锋导弹于 2019 年 12 月 27 日正式服役于俄罗斯军队,是世界上第一款部署的高超声速滑翔武器,标志着俄罗斯在这一领域的重要成就。

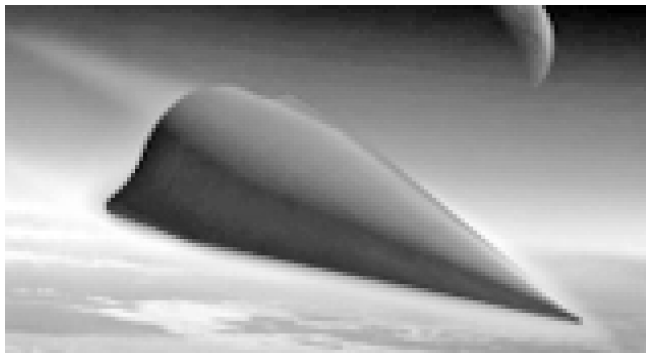


图 1.6 先锋导弹^[5]

(2) 锆石导弹。

锆石导弹(图 1.7)是一种高超声速反舰导弹,主要用于海军舰艇和潜艇。锆石导弹能够以马赫数 8~9 的速度飞行,最大射程超过 1000km,具备突破敌方舰船防御系统的能力。采用世界上最先进、技术难度最大的超燃冲压发动机,结合惯性导航和雷达寻的器,能够在高速飞行中保持对目标的精确定位和追踪。俄罗斯在 2021 年 10 月 4 日首次成功完成从核潜艇上试射锆石导弹,此后又进行了多次成功的试射,包括从护卫舰和潜艇上发射。据报道,锆石导弹已在 2023 年 1 月开始服役。锆石导弹的研制使俄罗斯在海上作战中的优势进一步提升。该导弹能够对航母战斗群和其他高价值海上目标进行快速突袭,具备高度的突防能力和威慑效果。锆石导弹是俄罗斯海军现代化武器库的重要组成部分,其高超声速特性使其难以拦截,提升了海军的打击能力和战略威慑力。



图 1.7 锆石导弹^[6]

(3) 匕首导弹。

匕首导弹(图 1.8)是俄罗斯空军装备的空射型高超声速武器,基于伊斯坎德尔弹道导弹的设计,能够由 MiG-31K 战斗机或 Tu-22M3 轰炸机发射。匕首导弹能够以马赫数 10 的速度飞行,射程达到 2000km 以上,具备打击舰船、地面目标和高价值战略设施的能力。匕首导弹的部署为俄罗斯提供了快速反应的打击手段,尤其在战略要地的防御中具有重要意义。2018 年 3 月 11 日,俄罗斯米格-31 战斗机在俄罗斯南部战区成功试射了一枚匕首高超声速导弹,并成功击中靶标。2022 年 3 月 18 日,匕首导弹首次用于实战,摧毁了乌克兰武装部队的地下武器库。得益于其高超声速飞行和机动能力,匕首导弹能够突破现有防空系统,为俄罗斯空天力量提供了强大的打击力量。