



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版工程

高超声速出版工程

史记·高超声速飞行

闵昌万 付秋军 焦子涵 等编著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版工程

高超声速出版工程

史记·高超声速飞行

闵昌万 付秋军 焦子涵 等编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以高超声速飞行器为主线,系统总结和梳理了高超声速技术的发展,向读者展现了高超声速技术跌宕起伏的发展历史,重点介绍与高超声速相关的 X 系列飞行器、返回式飞船、航天飞机、再入机动弹头、吸气式高超声速飞行器和助推-滑翔飞行器等内容,涵盖了高超声速飞行器典型项目和历史背景,以及材料、气动等关键技术与学科的发展历程,并辅以与之相关的杰出历史人物与影响深远的大事记。

本书既具有高超声速飞行器技术的科普性,又不失历史人物与事件的趣味性,可供从事高超声速技术研究的科研人员、工程技术人员和广大航空航天爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

史记·高超声速飞行 / 闵昌万等编著. — 北京:
科学出版社, 2019.8
(高超声速出版工程)
“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版
工程 国家出版基金项目
ISBN 978-7-03-061980-8

I. ①史… II. ①闵… III. ①高超音速飞行器—技术
史—世界 IV. ①V47-091

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 158427 号

责任编辑:徐杨峰 / 责任校对:谭宏宇
责任印制:黄晓鸣 / 封面设计:殷 靓

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>

南京展望文化发展有限公司排版

苏州市越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2019 年 8 月第一次印刷 印张: 20

字数: 350 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

高超声速出版工程 专家委员会

顾 问

王礼恒 张履谦

主任委员

包为民

副主任委员

杜善义 吕跃广

委 员

(按姓名汉语拼音排序)

艾邦成	包为民	陈连忠	陈伟芳	陈小前
邓小刚	杜善义	李小平	李仲平	吕跃广
孟松鹤	闵昌万	沈 清	谭永华	汤国建
王晓军	尤延铖	张正平	朱广生	朱恒伟

高超声速出版工程·高超声速研究历程系列

编写委员会

主 编

闵昌万

副主编

陈 政 付秋军

编 委

(按姓名汉语拼音排序)

安复兴	陈 政	初洪宇	段 毅	付秋军
黄兴李	焦子涵	李贵根	闵昌万	宋 巍
汤龙生	汪 雷	王友利	吴小宁	夏 强
于明星	张 璐			

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,上面级飞行速度超越马赫数5,实现人类历史上第一次高超声速飞行。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的时候,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,共同致力于推动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最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,

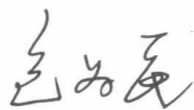
意义深远。

以一套丛书,将高超声速基础研究和工程技术方面取得阶段性成果和宝贵经验固化下来,建立基础研究与高超声速技术应用的桥梁,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,确保了丛书的系统性、前瞻性、原创性、专业性、学术性、实用性和创新性。

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,既可为相关专业人员提供学习和参考,又可作为工具指导书。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

更高、更快和更远一直是人类飞行历史发展的主旋律。从古至今,人类对速度和空域的探索从未停止过。距1903年12月17日莱特兄弟发明有动力、可操纵、重于空气的飞行器不到半个世纪,人类就相继突破了“声障”“热障”和“黑障”,实现了真正意义上的高超声速飞行,人类迅速由航空时代发展到航天时代。如果说飞机的发明将人类由航海时代发展到航空时代,那么高超声速飞行的来临无疑与飞机的发明一样具有划时代意义。人类的活动空域相继由陆地延伸到海洋,再延伸到天空直至冲出大气层,飞行速域也由亚声速拓展至超声速乃至高超声速。高超声速技术的发展进一步缩小了人类交流的时空障碍,促进了人类科技的进步,改变了人类的生活方式,也加速了人类文明的融合,影响深远,意义重大。

高超声速技术起源于军事应用,在第二次世界大战时萌芽,并在冷战时期得到迅速发展,到今天依然方兴未艾。其应用背景也逐渐由最初的军用发展为军民两用。一方面,高超声速技术的发展对人类现代战争产生了深远的影响,甚至彻底改变了战争的游戏规则;另一方面,高超声速技术向民用领域的转变,不仅有力地促进了高超声速技术自身的发展,也为人类社会和科技带来了翻天覆地的变化。

在古今中外的战争史上,速度一直是影响战争胜负的关键因素甚至是决定因素。从我国春秋末期《孙子兵法》的“兵贵神速”到现代战争理念的“先敌发现、先敌打击”,无不包含对“快”的追求。高超声速技术正是在战争对速度的迫切需求下应运而生的。从冷兵器时代的短兵相接到热兵器时代的近距射杀,再到高超声速时代的隔空打击、实时攻击,甚至发现即摧毁,人类的战争形式发生

了深远的变化。高超声速武器加快了战争的节奏,扩大了战争的空间,同时改变了攻防对抗的模式。决定战争胜负的因素逐渐由战略战术转向了高超声速科技实力,战争的焦点也由制地权、制海权,逐步扩展到制空权甚至制天权。

1947年10月14日,试飞员 Charles E. Yeager 驾驶 Bell XS-1 在 13.1 km 的高空飞出了马赫数 1.06 的速度,从而迈出了人类超声速飞行的第一步,这是人类第一次冲破“声障”的限制;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,在试验飞行过程中,其上面级的飞行速度超过了马赫数 5,人类飞行历史上第一次实现了高超声速飞行;随着动力和材料等一系列技术的突破,“热障”的问题也得到了解决,1961年4月12日,苏联设计的“东方一号”发射升空,成功地将人类首次送入地球轨道,尤里·加加林成为进入外太空的第一人,同时是进入地球轨道的第一人;美国不甘示弱,1969年7月16日,随着“阿波罗 11 号”飞船的升空,阿姆斯特朗的一小步成为人类的一大步,人类第一次突破第一宇宙速度,冲出地球,以此为标志,美国再次牢固地建立起全球科技与军事优势,迄今也没有其他国家对其地位提出实质性的挑战;继登月计划成功之后,1981年4月12日,“哥伦比亚号”航天飞机成功实现了首次试飞,首次实现了天地往返运输工具的部分可重复使用,这是迄今人类建造的规模最庞大、系统最复杂、科技含量最高的飞行器。航天飞机在 30 年间共成功完成 133 次飞行任务,完成了涵盖地球、天文、生物和材料科学等学科的 2 000 多项科学实验,其中包括国际空间站的建设和哈勃空间望远镜的发射及其在轨维护等一系列任务。航天飞机退役之后,美国并未放弃对可重复使用天地往返飞行器的研究,提出了以 X-37B 作为航天飞机的后续主要发展型号。此外,美国通过技术支持的方式,支持了部分民营航天企业,为可重复使用运载器的发展注入了新的活力。

探索宇宙是人类与生俱来的永恒梦想,高超声速技术是人类实现梦想的阶梯。从肯尼迪总统当年支持人类登月计划所说“我们选择登月,不是因为它轻而易举,而是因为它困难重重”,到布什总统说“我们再次选择登月,是因为我们必须知道它对我们来说到底是容易还是充满挑战”,再到奥巴马总统说“我们不选择登月,不是因为它困难,而是因为它对我们来说并不费力”,今天的美国人说“我们选择和艺术家一起登月,与难易无关”,人类的高超声速技术已今非昔比。然而,月球只是人类探索的热点,而不是终点。对地球轨道附近和月球的探索显然还不能满足人类的好奇心,火星作为人类宜居的地外行星之一,早已成为人类争相探索的对象。1965年7月14日,美国“水手 4 号”探测器从距离火星不到 10 km 的轨道高度飞越火星,完成了人类第一次近距离火星探测。1976 年

7月20日,“海盗1号”探测器在火星表面成功着陆,使得人类对于火星探测领域的发展更进一步。此后,越来越多的国家开始了对地外行星的深空探测活动,这不仅是一项庞大的系统工程,更是一个国家综合国力的象征。

高超声速技术融合了人类航空航天领域的高新前沿技术,是空天融合时代的核心技术,同时是高新技术发展的引擎。在高超声速技术的牵引下,人类相继突破了制约高超声速飞行的动力、材料、通信、结构与控制等一系列科技前沿问题,获得了极大的军事、科技、经济和社会效益。这些探索研究也极大地拓展了人类科技和文明的边界,衍生出一系列科技发明,不仅颠覆了人类的生活方式,也有力地促进了人类社会、经济、科技和文化的发展。可以说,高超声速技术既是维护国家安全的战略基石,也是推动人类科技进步、服务经济社会发展的重要力量,具有重要的军事战略意义和极高的社会应用价值,世界各经济 and 军事强国均对高超声速技术进行了不遗余力的探索与研究。

“以史为鉴,可以知兴替”。高超声速技术的发展跌宕起伏,充满了曲折和挑战,是人类文明不可分割的一部分。系统总结高超声速技术的发展历史,梳理其技术脉络,对于今天开展高超声速技术的研究工作具有深远意义。本书以高超声速飞行器为载体,在广泛调研国内外大量资料的基础上,进行了综合、归纳、分析与加工,系统总结了高超声速技术的发展脉络,为读者全面深入了解高超声速技术发展历史提供了参考。全书共分六章,第1章介绍高超声速概念的提出、面临的挑战以及主要特点;第2章介绍人类第一次实现高超声速飞行的情况以及返回式飞船,同时介绍相关学科的发展;第3章介绍高超声速技术的早期应用,主要包括航天飞机的研制和再入机动弹头的发展,并分析气动和高温防隔热技术的发展;第4章系统介绍吸气式高超声速飞行器的发展,同时分析超声速燃烧、气动/推进一体化设计和高温防隔热技术的发展与应用;第5章详细介绍高超声速助推-滑翔飞行器的研制历程,针对高超声速助推-滑翔飞行器的主要技术难点,介绍全复合材料防热/承力一体化热结构设计、高升阻比气动外形设计与高精度气动特性预示技术和高超声速导航、制导与控制技术的发展;第6章是对未来高超声速技术发展的展望。全书既有对飞行器项目发展历史的深入总结与分析,又有对主要支撑学科发展的归纳整理,可为从事高超声速技术研究的相关专家、学者提供有益的参考与借鉴。

本书前言、第1章由闵昌万执笔;第2章由付秋军、宋巍执笔;第3章由焦子涵、付秋军执笔;第4章由闵昌万、夏强执笔;第5章由闵昌万、初洪宇执笔;第6章由张璐执笔;最后由闵昌万统稿。本书在编写过程中,得到了北京航天长征科

技信息研究所王友利研究员和中国人民解放军军事科学院国防科技创新研究院李贵根助理研究员等的大力支持,在此表示衷心感谢。此外,也衷心感谢本书参考文献的作者,虽然本书列出了各章的主要参考文献,但难免有偏颇之处,如有疑问,欢迎与我们联系。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

闵昌万

2019年6月

高超声速出版工程

目 录

丛书序

前言

第 1 章 高超声速飞行的萌芽

1

- 1.1 高超声速基本概念的提出 / 1
- 1.2 高超声速飞行所带来的挑战 / 5
 - 1.2.1 气动 / 5
 - 1.2.2 材料 / 7
 - 1.2.3 动力 / 7
- 1.3 高超声速的典型特点 / 9
 - 1.3.1 薄激波层 / 9
 - 1.3.2 熵层 / 10
 - 1.3.3 黏性干扰效应 / 10
 - 1.3.4 高温效应 / 10
 - 1.3.5 低密度效应 / 11
- 1.4 大事记·风云人物 / 11
 - 1.4.1 Sanger / 11
 - 1.4.2 Braun / 13
 - 1.4.3 Navier / 16
 - 1.4.4 Stokes / 17

1.4.5 Prandtl / 18

1.4.6 钱学森 / 20

参考文献 / 22

第2章 高超声速首航

24

2.1 早期高超声速飞行器的探索 / 27

2.1.1 突破音障——X-1 / 28

2.1.2 跨越马赫数 2——D-558-2 / 36

2.1.3 X-2 / 41

2.2 第一次高超声速飞行 / 43

2.2.1 高超声速 X-15 / 43

2.2.2 历史意义 / 52

2.3 返回式飞船 / 54

2.3.1 “东方号”飞船：加加林飞离地球 / 54

2.3.2 “阿波罗 11 号”：阿姆斯特朗登上月球 / 57

2.3.3 神舟飞船 / 59

2.4 高超声速空气动力学的发展与支撑作用 / 60

2.5 高温防隔热技术的发展与支撑作用 / 61

2.5.1 高超声速飞行“热障”问题 / 61

2.5.2 热沉式防热系统：耐高温合金的充分发展 / 62

2.5.3 X-15 结构/防隔热设计 / 65

2.5.4 X-15 飞机探索热问题取得的成就 / 69

2.6 风云人物·大事记 / 70

2.6.1 阿姆斯特朗 / 70

2.6.2 从研究小组到研究中心 / 73

参考文献 / 75

第3章 高超声速飞行的早期应用

76

3.1 天地往返——航天飞机 / 76

3.1.1 早期探索 / 78

- 3.1.2 研制历程 / 85
- 3.1.3 后续发展 / 91
- 3.1.4 历史意义 / 97
- 3.2 再入飞行器的兴起 / 98
 - 3.2.1 早期探索 / 101
 - 3.2.2 蓬勃发展 / 105
 - 3.2.3 发展方向 / 112
- 3.3 高超声速空气动力学的发展与支撑作用 / 116
- 3.4 高温防隔热技术的发展与支撑作用 / 117
 - 3.4.1 发展需求 / 117
 - 3.4.2 发展概况 / 117
 - 3.4.3 航天飞机结构/防隔热设计 / 121
 - 3.4.4 X-37B 结构/防隔热设计 / 125
 - 3.4.5 IXV 结构/防隔热设计 / 129
 - 3.4.6 借鉴与启示 / 133
- 3.5 风云人物·大事记(发射大事记) / 133
 - 3.5.1 “挑战者号”失事事件及其影响 / 133
 - 3.5.2 “哥伦比亚号”失事事件及其影响 / 134
 - 3.5.3 X-37B 发射试验 / 136
 - 3.5.4 潘兴Ⅱ的销毁 / 138
 - 3.5.5 IXV 飞行试验 / 142
- 参考文献 / 143

第4章 持久经济的吸气式高超声速飞行

146

- 4.1 吸气式高超声速飞行首次突破——X-43A / 157
 - 4.1.1 早期探索 / 157
 - 4.1.2 研制历程 / 157
 - 4.1.3 后续发展 / 172
 - 4.1.4 历史意义 / 172
- 4.2 吸气式高超声速飞行持续 240 s——X-51A / 172
 - 4.2.1 早期探索 / 172

- 4.2.2 研制历程 / 174
- 4.2.3 后续发展 / 180
- 4.2.4 历史意义 / 181
- 4.3 超声速燃烧技术的发展与支撑作用 / 181
 - 4.3.1 发展需求 / 181
 - 4.3.2 发展概况 / 181
 - 4.3.3 X-43A 超燃冲压发动机设计方案分析 / 186
 - 4.3.4 X-51A 超燃冲压发动机设计方案分析 / 187
- 4.4 气动/推进一体化技术的发展与支撑作用 / 187
 - 4.4.1 发展需求 / 187
 - 4.4.2 发展概况 / 188
 - 4.4.3 X-43A 气动/推进一体化设计方案分析 / 194
 - 4.4.4 X-51A 气动/推进一体化设计方案分析 / 194
- 4.5 高温防隔热技术的发展与支撑作用 / 195
 - 4.5.1 发展需求 / 195
 - 4.5.2 发展概况: 集热结构、隔热、主动冷却于一体 / 197
 - 4.5.3 X-43A 结构/防隔热设计 / 202
 - 4.5.4 X-51A 结构/防隔热设计 / 205
 - 4.5.5 借鉴与启示 / 207
- 4.6 风云人物·大事记(冲压发动机狂人: Reine Leduc) / 208
- 参考文献 / 210

第5章 机动灵活的高超声速助推-滑翔飞行

212

- 5.1 突破大气层内马赫数 20 滑翔飞行——HTV-2 / 218
 - 5.1.1 早期探索 / 218
 - 5.1.2 研制历程 / 222
 - 5.1.3 后续发展 / 228
 - 5.1.4 历史意义 / 231
- 5.2 高潮迭起的高超声速滑翔飞行研究 / 233
 - 5.2.1 另辟蹊径——AHW / 233
 - 5.2.2 脱颖而出——TBG / 239

- 5.2.3 讳莫如深——Yu-71 / 240
- 5.3 全机身全复合材料防热/承力一体化热结构的设计与制造 / 242
 - 5.3.1 发展需求 / 243
 - 5.3.2 发展概况：防热/承力一体化气动外壳的发展 / 245
 - 5.3.3 借鉴与启示 / 257
- 5.4 高升阻比气动外形与高精度气动特性预示技术的发展 / 257
 - 5.4.1 发展需求 / 257
 - 5.4.2 发展概况 / 258
 - 5.4.3 借鉴与启示 / 273
- 5.5 风云人物·大事记 / 274
- 参考文献 / 275

第6章 民用高超声速航空展望

276

- 6.1 超声速客机 / 276
 - 6.1.1 图波列夫图-144 飞机 / 276
 - 6.1.2 “协和号”飞机 / 278
- 6.2 德国航空航天中心航天班机 / 280
- 6.3 Space X 高超声速客机设想 / 282

附表

284

第 1 章

高超声速飞行的萌芽

人类对飞行的梦想伴随着人类的文明诞生。自古以来,人类就非常羡慕飞鸟在天空自由地翱翔,希望自己也能像飞鸟一样俯视大地,但那时候,人类只能爬到一定高度,享受风吹过自己的感觉。人类早期的飞行愿望全部寄托在对鸟类的飞行模仿上,从达·芬奇新奇的扑翼概念飞行器到法国小说家 Jules Verne 的离奇故事,多年来人类一直希望有一种设备能圆了人类的飞行梦,但是都以失败而告终。直到近代,这个梦想才得以实现。首先, Montgolfier 发明了热气球 (1783);接着, George Cayley 颠覆了传统扑翼机的概念,首次提出了固定翼飞行器布局 (1804);不久, Otto Lilienthal 发明了滑翔机 (1891);此后, Samuel Pierpont Langley 对汽油发动机作动力的飞机进行了两次失败的勇敢尝试 (1903)。但是,直到莱特兄弟实现了人类历史上首次重于空气的飞行器的有动力载人飞行 (1903),以及后来像他们一样的先驱们不断探索,人类对飞行的认识才有了长足的进步^[1]。

更高、更快、更远一直是航空航天飞行器发展的主旋律。事实上,距离第一架飞机成功飞行不到 46 年的时间,人类就已经实现了一般意义上的高超声速飞行 (1949),在此后的半个多世纪,人类迅速将活动空间由天空向太空延伸,登月球、探火星,实现了真正意义上的星际航行,大大拓展了人类的文明。从本质上讲,高超声速飞行不仅把天空和太空两个人类活动空间紧密地联系在一起,也把航空和航天两个综合学科不断融合,形成了航空航天一体化的完美技术集成。

1.1 高超声速基本概念的提出

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟驾驶自己制造的飞机从北卡罗来纳州基