

# 高超声速 飞行器技术

蔡国飙 徐大军 编著



科学出版社

# 高超声速飞行器技术

蔡国飙 徐大军 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地分析高超声速飞行器的关键技术,阐述各项关键技术的主要研究内容与研究方法,并归纳总结了国外各国高超声速飞行器技术的发展历程及取得的主要研究成果。全书分上、下两篇,总计16章,上篇(第1~8章)阐述高超声速飞行器的关键技术,下篇(第9~16章)介绍各国高超声速飞行器技术的发展,并给出研究总结与展望。

本书可作为高超声速飞行器、可重复使用航天运载器领域从事相关研究的工程技术人员以及高等院校相关专业的师生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高超声速飞行器技术/蔡国飙,徐大军编著. —北京:科学出版社,2012.1  
ISBN 978-7-03-033062-8

I. ①高… II. ①蔡… ②徐… III. ①高超声速飞行器 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 264958 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2012年1月第一次印刷 印张:30 1/4 插页:4

字数:700 000

定价:100.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 前 言

追求更快的飞行速度,是飞行器发展历程中一个重要的特征。速度的提高所能带来的实际益处是显而易见的:在相同运输距离上使得所需时间大大的缩短;信息化战争中速度高的一方有着更大的主动性和快速反应的能力,速度的提高增强了导弹武器的作战效能与攻击能力;速度的提高使得入轨飞行器有了摆脱地球引力的基本能力。在大气层内实现能够高超声速飞行的飞行器正是人类许久以来的梦想,而这个梦想正在逐步地走向现实。

高超声速飞行器是指飞行马赫数大于5、以吸气式发动机或其组合发动机为主要动力、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巡航导弹、高超声速有人/无人飞机、空天飞机和空天导弹等多种飞行器。

高超声速飞行器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、吸热型碳氢燃料、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,是各航空航天大国竞相开展研究的热点领域。近年来国内不少科研院所、高校等研究机构也广泛开展了高超声速飞行器相关技术的研究,取得了很大的研究进展。高超声速飞行器除了具有相当大的技术难度外,也有其独特的特点,如机身与推进的一体化设计、多学科的高度耦合,这些特点使得其研究方式、方法,以及研制的技术途径不同于传统飞行器研制过程。

本书编撰的目的在于让从事高超声速飞行器技术研究的科研工作人员,从整个高超声速飞行器的总体以及国外技术的发展历程的高度和广度上对高超声速飞行器技术体系有个全面宏观的认识,使其在科研工作中不局限于自己的专业分工,同时兼顾其他学科专业的内在要求,从而更好地把握高超声速飞行器技术发展的关键所在。鉴于目前国内外尚无一本全面介绍高超声速飞行器技术的著作,编撰本书的另一个目的就是希望本书能够成为从事高超声速飞行器技术研究的科研人员的初级读本,成为迈向高超声速飞行器技术领域的一份地图。因此本书在各相应章节给出了与关键技术相关的一些基本概念的定义,基本参数的描述,以及基本方法的介绍,读者通过本书的阅读能够初步掌握一些基础知识,再进一步查阅、详读相应的参考文献,相信能够较快

地步入高超声速飞行器技术研究的殿堂。

本书分上下两篇,上篇系统全面地介绍了高超声速飞行器的若干关键技术,包括超燃冲压发动机技术、组合推进系统技术、总体与一体化设计技术、结构与热防护技术、导航制导控制技术,以及风洞试验技术等;下篇则对美国、俄罗斯、法国、德国、日本、澳大利亚、英国、印度等国在高超声速飞行器技术领域的研究历程作了较为全面的归纳总结。本书的编撰参阅了大量的国内外技术与学术文献资料,并尽可能地在书中各相应位置作了标注,但文献数量之多,学科专业跨越之大,唯恐有遗漏和不足之处,敬请读者及原文作者谅解。另外,由于作者专业领域所限,难以在较短的时间内消化和掌握非自己研究领域的学科专业知识及研究进展,在编撰过程中较多地参阅了相应学科的综述性文献,以及国内博士和硕士论文的研究综述部分,引述文字相应的参考文献在本书中标注并罗列于各章的参考文献中。

本书的编撰得到了解放军总装备部科技委陶平委员、电子信息基础部新技术局赵同凯局长、刘志伟副局长、朱文峰主任,航天科技集团一院王珏研究员,航天科工集团三院黄瑞松院士、魏毅寅、史新兴、汤龙生、赵文胜、谢海波研究员等多位领导专家的关心和大力支持,在此表示衷心的感谢。对各研究院所、高校的同行业专家的帮助表示感谢。我校宇航学院多年来从事高超声速飞行器技术研究的推进系徐旭教授、孙冰教授,航天导航制导与控制系李惠峰副教授为本书的编写提供了大量的资料素材,在此也表示诚挚的感谢。著名空气动力学专家庄逢甘院士和飞航导弹动力专家刘兴洲院士也一直关心本书的进展情况,但此书未能在他们生前出版是一个不小的遗憾。

由于本书作者专业水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指教,在此不甚感激。

蔡国飙 徐大军

2011年12月

# 目 录

## 前言

## 上篇 高超声速飞行器技术

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....              | 3  |
| 1.1 高超声速飞行器 .....                  | 3  |
| 1.2 国外高超声速飞行器总体方案研究 .....          | 4  |
| 1.2.1 可重复使用航天运载器 .....             | 5  |
| 1.2.2 高超声速飞机 .....                 | 11 |
| 1.2.3 高超声速巡航导弹 .....               | 13 |
| 1.3 国外高超声速飞行器技术发展历程 .....          | 15 |
| 1.3.1 国外高超声速飞行器技术发展简史 .....        | 15 |
| 1.3.2 国外高超声速飞行器技术飞行试验发展动态 .....    | 16 |
| 1.3.3 其他高超声速飞行器技术发展计划 .....        | 24 |
| 1.4 本书主要内容 .....                   | 27 |
| 参考文献 .....                         | 28 |
| <b>第 2 章 高超声速飞行器关键技术分解研究</b> ..... | 30 |
| 2.1 高超声速飞行器关键技术分解 .....            | 30 |
| 2.1.1 技术层面与技术分类 .....              | 30 |
| 2.1.2 基于技术分类的关键技术分解 .....          | 31 |
| 2.2 发展战略研究中定量分析的必要性 .....          | 33 |
| 2.3 高超声速飞行器技术关键度分析 .....           | 34 |
| 2.4 高超声速飞行器技术成熟度分析 .....           | 45 |
| 2.4.1 技术成熟度分析模型 .....              | 45 |
| 2.4.2 技术成熟度在可重复使用航天运载器上的应用分析 ..... | 47 |
| 2.5 高超声速飞行器技术发展路径 .....            | 48 |
| 参考文献 .....                         | 52 |
| <b>第 3 章 超燃冲压发动机技术</b> .....       | 53 |
| 3.1 引言 .....                       | 53 |
| 3.2 超声速燃烧概念及关键技术 .....             | 54 |
| 3.2.1 超声速燃烧问题的提出及概念 .....          | 54 |
| 3.2.2 超声速燃烧关键技术 .....              | 54 |
| 3.3 超燃冲压发动机部件技术 .....              | 60 |
| 3.3.1 进气道 .....                    | 60 |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 3.3.2      | 隔离段                       | 72         |
| 3.3.3      | 燃烧室                       | 77         |
| 3.3.4      | 尾喷管                       | 97         |
| 3.4        | 超燃冲压发动机总性能评估指标            | 103        |
| 3.4.1      | 燃烧效率                      | 104        |
| 3.4.2      | 内推力                       | 104        |
| 3.4.3      | 净推力                       | 105        |
| 3.4.4      | 推力增益                      | 107        |
| 3.4.5      | 性能指标的选择                   | 107        |
| 3.5        | 超燃冲压发动机的燃料技术              | 108        |
| 3.6        | 超燃冲压发动机地面试验技术             | 110        |
| 3.6.1      | 地面试验系统                    | 110        |
| 3.6.2      | 直连式试验                     | 113        |
| 3.6.3      | 自由射流试验                    | 113        |
| 3.6.4      | 试验气流参数对发动机性能的影响           | 114        |
|            | 参考文献                      | 115        |
| <b>第4章</b> | <b>高超声速飞行器组合推进系统技术</b>    | <b>123</b> |
| 4.1        | 火箭基组合循环发动机推进系统            | 123        |
| 4.1.1      | RBCC 基本概念及工作原理            | 123        |
| 4.1.2      | 支板引射 RBCC 结构与原理           | 127        |
| 4.1.3      | 引射火箭工作性能的影响因素             | 128        |
| 4.1.4      | RBCC 发动机性能分析模型研究          | 130        |
| 4.1.5      | RBCC 系统循环方案               | 133        |
| 4.2        | 涡轮基组合循环发动机推进系统            | 135        |
| 4.2.1      | TBCC 系统方案                 | 135        |
| 4.2.2      | TBCC 涡轮发动机数学模型            | 137        |
| 4.2.3      | TBCC 进排气系统                | 138        |
| 4.2.4      | TBCC 推进系统与高超声速飞行器机身的一体化   | 139        |
| 4.3        | 其他类型的组合循环发动机              | 143        |
| 4.3.1      | 预冷却涡轮基组合循环发动机             | 143        |
| 4.3.2      | 深冷涡喷火箭组合循环发动机             | 146        |
| 4.3.3      | 液化空气组合循环发动机               | 147        |
|            | 参考文献                      | 150        |
| <b>第5章</b> | <b>高超声速飞行器机身推进一体化设计技术</b> | <b>152</b> |
| 5.1        | 高超声速空气动力学                 | 152        |
| 5.1.1      | 高超声速流动                    | 152        |
| 5.1.2      | 高超声速气动力工程计算方法             | 156        |
| 5.1.3      | 高超声速流动的数值模拟技术             | 157        |

|              |                               |            |
|--------------|-------------------------------|------------|
| 5.2          | 高超声速飞行器“乘波体”气动外形设计 .....      | 158        |
| 5.2.1        | “乘波体”气动外形的概念与气动特性 .....       | 158        |
| 5.2.2        | “乘波体”气动的生成 .....              | 160        |
| 5.2.3        | “乘波体”飞行器设计 .....              | 166        |
| 5.3          | 高超声速飞行器机身与推进一体化设计 .....       | 168        |
| 5.3.1        | 高超声速飞行器机身推进一体化算力体系 .....      | 168        |
| 5.3.2        | 高超声速飞行器前体进气道一体化设计 .....       | 172        |
| 5.3.3        | 高超声速飞行器后体喷管一体化设计 .....        | 184        |
| 5.3.4        | 高超声速飞行器气动推进一体化数值计算 .....      | 191        |
| 5.3.5        | 高超声速飞行器一体化几何外形的参数化建模方法 .....  | 194        |
| 5.4          | 高超声速飞行器一体化气动特性分析 .....        | 202        |
| 5.4.1        | 一体化气动特性计算建模 .....             | 202        |
| 5.4.2        | 发动机工作状态对一体化气动特性的影响 .....      | 204        |
| 5.4.3        | 发动机工作状态对飞行器稳定性和配平特性的影响 .....  | 207        |
| 5.4.4        | 后体喷管设计对一体化气动特性的影响 .....       | 208        |
| 5.5          | 超燃冲压发动机与“乘波体”气动外形的一体化 .....   | 210        |
| 5.5.1        | 主要问题 .....                    | 210        |
| 5.5.2        | 考虑进气道入口条件的“乘波体”气动外形设计 .....   | 211        |
| 5.5.3        | “乘波体”气动外形尾喷管的设计 .....         | 214        |
| 5.6          | “圆截面”推进系统与高超声速飞行器机身的一体化 ..... | 215        |
| 5.6.1        | 推进系统“圆-二维-圆”的演化 .....         | 215        |
| 5.6.2        | “圆截面”推进系统与高超声速飞行器机身的一体化 ..... | 219        |
|              | 参考文献 .....                    | 222        |
| <b>第 6 章</b> | <b>高超声速飞行器热防护技术 .....</b>     | <b>225</b> |
| 6.1          | 高超声速飞行器热环境与热走廊 .....          | 225        |
| 6.1.1        | 高超声速飞行器热环境 .....              | 225        |
| 6.1.2        | 高超声速飞行器热走廊 .....              | 226        |
| 6.1.3        | 高超声速气动热环境工程预测方法 .....         | 228        |
| 6.2          | 高超声速气动-热-弹性力学基础研究问题 .....     | 234        |
| 6.2.1        | 高温反应气体的热化学反应机制 .....          | 234        |
| 6.2.2        | 高超声速边界层转捩 .....               | 235        |
| 6.2.3        | 高超声速流动的激波/激波相互作用 .....        | 236        |
| 6.2.4        | 高超声速热环境下的气动弹性 .....           | 236        |
| 6.3          | 航天热防护技术与典型热防护系统方案 .....       | 237        |
| 6.3.1        | 航天热防护技术 .....                 | 237        |
| 6.3.2        | 典型航天/空天飞机热防护系统方案 .....        | 242        |
| 6.4          | 可重复使用航天运载器金属热防护系统 .....       | 243        |
| 6.4.1        | 可重复使用航天运载器对热防护系统的要求 .....     | 243        |



|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 6.4.2      | 金属热防护系统                 | 244        |
| 6.4.3      | 金属热防护系统的隔热材料            | 251        |
| 6.4.4      | 金属热防护系统热分析方法            | 252        |
| 6.4.5      | 热防护系统健康监测技术             | 254        |
| 6.5        | 吸气式高超声速飞行器热防护系统与结构部件    | 257        |
| 6.5.1      | 热结构的技术难点                | 257        |
| 6.5.2      | 前缘                      | 259        |
| 6.5.3      | 控制面板                    | 269        |
|            | 参考文献                    | 272        |
| <b>第7章</b> | <b>高超声速飞行器导航制导与控制技术</b> | <b>274</b> |
| 7.1        | 高超声速飞行器导航系统技术           | 274        |
| 7.1.1      | 导航系统的作用与意义              | 274        |
| 7.1.2      | 组合导航技术                  | 275        |
| 7.1.3      | 导引头等任务设备在导航系统中的应用       | 277        |
| 7.2        | 高超声速飞行器动力学建模技术          | 278        |
| 7.2.1      | 轴对称飞行器动力学建模             | 278        |
| 7.2.2      | 高超声速飞行器机身推进一体化动力学建模     | 279        |
| 7.2.3      | 基于参数化外形的高超声速飞行器控制建模     | 279        |
| 7.2.4      | 高超声速飞行器气动推进/气动耦合问题      | 279        |
| 7.3        | 高超声速飞行器操控与姿态测量技术        | 280        |
| 7.3.1      | 操控技术                    | 280        |
| 7.3.2      | 嵌入式大气数据传感系统             | 282        |
| 7.4        | 高超声速飞行器制导与控制技术          | 286        |
| 7.4.1      | 主要问题                    | 286        |
| 7.4.2      | 飞行控制方法                  | 287        |
| 7.5        | 可重复使用航天运载器的飞行控制技术       | 290        |
| 7.5.1      | 可重复使用航天运载器飞控系统特点        | 290        |
| 7.5.2      | 可重复使用的飞控系统设计要求          | 290        |
| 7.5.3      | 可重复使用的飞控系统关键技术          | 291        |
|            | 参考文献                    | 291        |
| <b>第8章</b> | <b>高超声速飞行器风洞试验技术</b>    | <b>294</b> |
| 8.1        | 高超声速飞行器风洞试验的任务与要求       | 294        |
| 8.1.1      | 高超声速飞行器风洞试验的任务          | 294        |
| 8.1.2      | 高超声速飞行器风洞试验的要求          | 296        |
| 8.2        | 高超声速风洞设备种类              | 298        |
| 8.2.1      | 风洞设备概况                  | 298        |
| 8.2.2      | 高超声速风洞设备种类              | 298        |
| 8.3        | 高超声速风洞试验形式              | 302        |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 8.3.1 | 全模测力试验                 | 302 |
| 8.3.2 | 压力分布测量试验               | 303 |
| 8.3.3 | 喷流干扰试验                 | 303 |
| 8.3.4 | 高超声速进气道试验              | 303 |
| 8.3.5 | 铰链力矩试验                 | 304 |
| 8.3.6 | 级间分离及多体分离试验            | 304 |
| 8.4   | 国外高超声速试验风洞情况           | 305 |
| 8.4.1 | 国外高超声速风洞概况             | 305 |
| 8.4.2 | 美国 LENS 系列激波风洞         | 307 |
| 8.4.3 | 俄罗斯 ITAM 高超声速风洞 AT-303 | 308 |
| 8.4.4 | 法国 S4 高超声速风洞           | 309 |
| 8.4.5 | 日本 JAXA 高超声速风洞         | 309 |
|       | 参考文献                   | 311 |

## 下篇 各国高超声速飞行器技术发展

|              |                           |     |
|--------------|---------------------------|-----|
| <b>第 9 章</b> | <b>美国高超声速飞行器技术研究</b>      | 315 |
| 9.1          | 超燃冲压发动机的兴起(20 世纪 50 年代)   | 315 |
| 9.2          | 超燃冲压发动机初期的研究(20 世纪 60 年代) | 316 |
| 9.3          | SCRAM 导弹计划(1961~1977)     | 317 |
| 9.4          | 高超声速研究发动机计划(1964~1974)    | 319 |
| 9.5          | 国家空天飞机计划(1986~1995)       | 320 |
| 9.5.1        | NASP 计划的提出                | 320 |
| 9.5.2        | NASP X-30 试验飞行器的概念设计      | 322 |
| 9.5.3        | NASP 计划中的关键技术研究           | 323 |
| 9.5.4        | NASP 计划的调整                | 324 |
| 9.5.5        | NASP 计划的结束                | 325 |
| 9.6          | 高超声速技术计划(1995~2003)       | 325 |
| 9.6.1        | HyTech 计划概览               | 325 |
| 9.6.2        | 技术的挑战                     | 326 |
| 9.6.3        | 主要研究成果                    | 328 |
| 9.7          | ARRMD 计划(1998~2001)       | 331 |
| 9.7.1        | 战场对快速响应导弹的需求              | 331 |
| 9.7.2        | 设计要求与概念方案                 | 332 |
| 9.7.3        | 技术的挑战                     | 335 |
| 9.7.4        | ARRMD 计划的后续发展             | 338 |
| 9.8          | Hyper-X 计划与 X-43A 飞行试验    | 338 |
| 9.8.1        | Hyper-X 计划概览              | 338 |
| 9.8.2        | X-43A 试验飞行器总体设计           | 339 |

|               |                             |            |
|---------------|-----------------------------|------------|
| 9.8.3         | X-43A 设计与制造上的挑战 .....       | 342        |
| 9.8.4         | X-43A 飞行试验 .....            | 346        |
| 9.9           | NASA 先进空天运输高超声速计划 .....     | 349        |
| 9.9.1         | ASTP 计划 .....               | 349        |
| 9.9.2         | 技术途径 .....                  | 349        |
| 9.9.3         | 系统分析项目 .....                | 351        |
| 9.9.4         | 推进技术项目 .....                | 351        |
| 9.9.5         | 机身技术项目 .....                | 353        |
| 9.9.6         | 飞行演示项目 .....                | 355        |
| 9.10          | HyFly 计划 .....              | 359        |
| 9.10.1        | 飞行器的概念/结构 .....             | 360        |
| 9.10.2        | 飞行试验过程和试验目标 .....           | 361        |
| 9.10.3        | 面临的技术挑战 .....               | 362        |
| 9.11          | X-51A 飞行试验计划(2005~ ) .....  | 363        |
| 9.11.1        | 战略背景 .....                  | 363        |
| 9.11.2        | 计划由来 .....                  | 365        |
| 9.11.3        | 研究团队 .....                  | 366        |
| 9.11.4        | 计划路径 .....                  | 367        |
| 9.11.5        | 试验飞行器系统组成 .....             | 368        |
| 9.11.6        | 发动机研制与试验 .....              | 373        |
| 9.11.7        | 飞行试验计划安排 .....              | 377        |
| 9.11.8        | 飞行试验的开展情况 .....             | 379        |
| 9.12          | Falcon 计划 .....             | 381        |
| 9.12.1        | 计划背景 .....                  | 381        |
| 9.12.2        | 涡轮基组合循环推进系统 .....           | 383        |
| 9.12.3        | TBCC 相关技术的发展 .....          | 384        |
| 9.12.4        | HTV-2 飞行试验 .....            | 386        |
|               | 参考文献 .....                  | 387        |
| <b>第 10 章</b> | <b>俄罗斯高超声速飞行器技术研究 .....</b> | <b>388</b> |
| 10.1          | “冷”计划 .....                 | 388        |
| 10.1.1        | 轴对称亚/超燃冲压发动机试验模型 .....      | 388        |
| 10.1.2        | 试飞器 .....                   | 389        |
| 10.1.3        | 飞行试验 .....                  | 390        |
| 10.2          | “鹰”计划 .....                 | 394        |
| 10.2.1        | “鹰”试验飞行器 .....              | 394        |
| 10.2.2        | 超燃冲压发动机试验模型 .....           | 396        |
| 10.2.3        | “鹰”试验运载器 .....              | 396        |
| 10.2.4        | “鹰”试验 .....                 | 397        |

|  |            |
|--|------------|
| 10.3 彩虹-D2 计划 .....                    | 398        |
| 10.3.1 彩虹-D2 试飞器 .....                 | 398        |
| 10.3.2 实验型超燃冲压发动机模型 .....              | 399        |
| 10.3.3 飞行试验 .....                      | 401        |
| 10.4 “鹰-31”计划 .....                    | 401        |
| 10.4.1 试飞器 .....                       | 402        |
| 10.4.2 亚/超燃冲压发动机试验模型 .....             | 403        |
| 10.4.3 飞行试验 .....                      | 404        |
| 10.5 高超声速飞机“图 2000”的研究 .....           | 405        |
| 参考文献 .....                             | 406        |
| <b>第 11 章 法国高超声速飞行器技术研究 .....</b>      | <b>407</b> |
| 11.1 PREPHA 计划(1992~1998) .....        | 407        |
| 11.1.1 PREPHA 计划简介 .....               | 407        |
| 11.1.2 试验装置的建立 .....                   | 407        |
| 11.1.3 CFD 数值计算研究 .....                | 410        |
| 11.1.4 超燃冲压发动机部件研究 .....               | 410        |
| 11.1.5 材料与冷却结构研究 .....                 | 413        |
| 11.1.6 高超声速飞行器总体系统研究 .....             | 413        |
| 11.2 JAPHAR 计划(1997~2002) .....        | 414        |
| 11.2.1 JAPHAR 计划简介 .....               | 414        |
| 11.2.2 JAPHAR 计划的研究途径 .....            | 415        |
| 11.2.3 双模态超燃冲压发动机研究 .....              | 416        |
| 11.2.4 超声速燃烧基础研究 .....                 | 419        |
| 11.3 PROMETHEE 计划(1999~2002) .....     | 419        |
| 11.3.1 PROMETHEE 计划简介 .....            | 419        |
| 11.3.2 PROMETHEE 计划的主要目标 .....         | 420        |
| 11.3.3 PROMETHEE 计划的技术途径 .....         | 421        |
| 11.4 LEA 飞行试验计划(2003~ ) .....          | 422        |
| 11.4.1 LEA 飞行试验计划的背景 .....             | 422        |
| 11.4.2 LEA 飞行试验计划的试验原理 .....           | 423        |
| 11.4.3 LEA 飞行器研发状况 .....               | 424        |
| 参考文献 .....                             | 427        |
| <b>第 12 章 德国高超声速飞行器技术研究 .....</b>      | <b>429</b> |
| 12.1 Sänger 计划(1988~1995) .....        | 429        |
| 12.2 FESTIP TSTO 方案研究(1994~1998) ..... | 430        |
| 12.3 SHEFEX I 飞行试验(2005) .....         | 432        |
| 12.4 SHEFEX II 飞行试验(2008) .....        | 435        |
| 12.4.1 研制背景 .....                      | 435        |

|               |                              |     |
|---------------|------------------------------|-----|
| 12.4.2        | 试飞器介绍 .....                  | 435 |
| 12.4.3        | 分系统介绍 .....                  | 436 |
| 12.4.4        | 气动力学问题 .....                 | 440 |
|               | 参考文献 .....                   | 442 |
| <b>第 13 章</b> | <b>日本高超声速飞行器技术研究</b> .....   | 443 |
| 13.1          | 日本的超燃冲压发动机研究 .....           | 443 |
| 13.2          | 空天飞机方案研究 .....               | 444 |
| 13.3          | HOPE 飞行试验研究计划 .....          | 446 |
| 13.3.1        | OREX 轨道再入试验 .....            | 447 |
| 13.3.2        | HFLEX 高超声速飞行试验 .....         | 448 |
| 13.3.3        | ALFLEX 自动着陆试验 .....          | 449 |
| 13.3.4        | HSPD 高速飞行演示试验 .....          | 449 |
| 13.4          | 高超声速试验设备与研究机构 .....          | 451 |
| 13.4.1        | 冲压发动机自由射流试车台 .....           | 451 |
| 13.4.2        | 自由活塞式激波风洞 .....              | 454 |
| 13.4.3        | 相关研究机构 .....                 | 454 |
|               | 参考文献 .....                   | 456 |
| <b>第 14 章</b> | <b>澳大利亚高超声速飞行器技术研究</b> ..... | 457 |
| 14.1          | HyShot 计划 .....              | 457 |
| 14.2          | HyCAUSE 飞行试验 .....           | 459 |
| 14.3          | HIFiRE 飞行试验计划 .....          | 460 |
|               | 参考文献 .....                   | 461 |
| <b>第 15 章</b> | <b>其他国家高超声速飞行器技术研究</b> ..... | 462 |
| 15.1          | 英国高超声速飞行器技术研究概况 .....        | 462 |
| 15.1.1        | HOTOL 计划 .....               | 462 |
| 15.1.2        | SHyFE 飞行试验计划 .....           | 463 |
| 15.1.3        | SKYLON 可重复使用运载器 .....        | 464 |
| 15.1.4        | 高超声速客机 .....                 | 465 |
| 15.2          | 意大利高超声速飞行器技术研究概况 .....       | 466 |
| 15.3          | 印度高超声速飞行器技术研究概况 .....        | 467 |
| 15.3.1        | HSTDV 飞行器结构与组成 .....         | 467 |
| 15.3.2        | 印度高超声速试验设备 .....             | 468 |
|               | 参考文献 .....                   | 469 |
| <b>第 16 章</b> | <b>总结与展望</b> .....           | 470 |
| 16.1          | 高超声速飞行器技术的研究总结 .....         | 470 |
| 16.2          | 高超声速飞行器技术的发展趋势 .....         | 471 |

# 上篇 高超声速飞行器技术



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 高超声速飞行器

作为高科技领域之一的航空航天技术是体现一个国家科技实力与工业基础的重要标志,同时也是一个国家的政治地位与军事力量的有力象征,在国际舞台上,是一个国家综合国力的重要组成部分。21 世纪国与国之间的竞争是综合国力的竞争,世界各大国都在航空航天领域展开了激烈的竞争,力图在该领域取得一席之地,以此确立本国在国际上的政治、军事乃至经济的地位。回眸航空航天技术的百年发展历程,人类“飞天”的梦想在无数科学家、工程技术人员的手里变成了现实。20 世纪初,在莱特兄弟的“飞行者”飞行器诞生之后,航空技术就以不可阻挡之势迅猛发展;与此同时,齐奥尔科夫斯基等航天先驱们创立的火箭动力理论也在日渐成熟,人类终于有了摆脱地球引力的强大力量。

追求飞行器更高的速度,并非是充满想象力的科学工作者求新求异的追求,而是速度的提高所能带来的实际益处所决定的。速度的提高在相同运输距离上使得所需时间大大缩短;空战中速度高的一方有更大的主动性,速度的提高增强了导弹武器的作战效能与攻击能力;速度的提高使得入轨飞行器有摆脱地球引力的基本能力。在大气层内实现能够高超声速飞行的飞行器正是人类许久以来的梦想,而这个梦想正在逐步走向现实。

高超声速飞行器是指飞行马赫数大于 5、以吸气式发动机或其组合发动机为主要动力、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巡航导弹、高超声速有人/无人飞机、空天飞机和空天导弹等多种飞行器。

高超声速飞行器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、吸热型碳氢燃料、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。

高超声速飞行器技术的发展始自 20 世纪 50 年代提出的超声速燃烧的概念,这一概念的提出,使得飞行器在大气层内飞行获得可以飞得更快的动力方式,即超燃冲压发动机(Scramjet)<sup>[1]</sup>。从理论上分析,氢燃料的超燃冲压发动机可工作到飞行马赫数 12~16,碳氢燃料的超燃冲压发动机可工作到马赫数 9~10(图 1-1)<sup>[2]</sup>。超燃冲压发动机技术与火箭发动机、涡轮喷气发动机技术相结合构成了多种形式的组合发动机,使得采用超燃冲压发动机推进的飞行器能够从低速工作到高速,从而更具有实用的价值。以超燃冲压发动机及其组合发动机为基础的高超声速吸气式推进技术,大大扩展了飞行器的飞行速度范围,因此高超声速飞行器有着广阔的应用前景。

虽然由于高超声速飞行器技术难度大,这一设想还未得到实现,但从未来人类航天技术的发展来看,这是一条必然的发展道路,而且其相关关键技术也正在逐步成熟中。高超



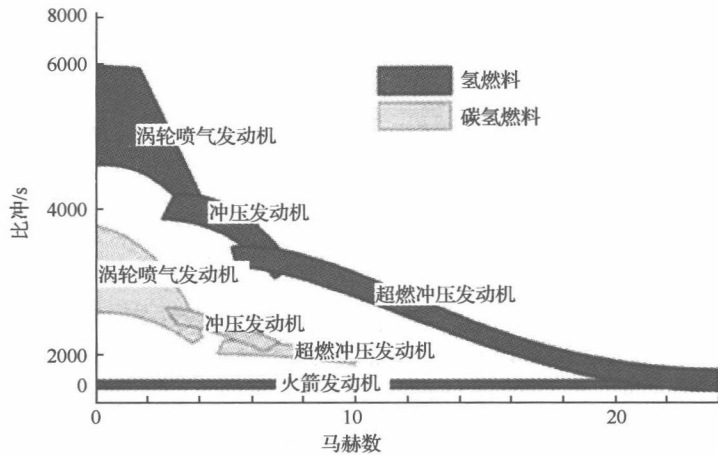


图 1-1 各种发动机推动的飞行器飞行马赫数范围

声速飞行器技术在过去半个世纪发展历程中是缓慢的,但近年来呈现出加速发展的趋势,各国多次飞行试验的成功开展,一方面标志着超燃冲压发动机作为高超声速飞行动力方式的可行性,另一方面也标志着高超声速飞行器的技术正在逐步成熟。

高超声速飞行器在今后相当长的时间里将是航空航天技术发展的最前沿。近期(10~15年)可发展形成快速反应的导弹武器,将极大地改变战场模式,改变军事力量的对比;在中远期可发展形成可重复使用的航天运载器,即空天飞机,可降低进入太空的成本,从而使人类更有效快捷地利用太空,具有极大的军事和经济意义;还可以形成高超声速飞机的应用,用于军事侦察、火力投放,甚至用于民用航空,以缩短旅行和货物运输的时间。

## 1.2 国外高超声速飞行器总体方案研究

高超声速飞行器技术的发展最终是要实现高超声速飞行器的飞行与应用,因此高超声速飞行器总体方案在整个研究发展过程中起到两个方面的作用,一是描述当前分系统技术研究的应用前景;二是技术发展最终所要实现的目标,是综合各项技术之后要研究的对象。

超燃冲压发动机概念的提出使得飞行器在大气层内实现高超声速飞行成为可能,但要实现高超声速飞行器还需要综合集成其他相关技术,其中一部分技术是与其他飞行器通用的技术,而另一部分技术则是和超燃冲压发动机技术一样,是关键技术,需要有针对性地开展技术研究才能解决。从超燃冲压发动机概念提出之初,高超声速飞行器总体方案的研究就已经开始,总体方案的研究在整个高超声速飞行器技术发展的过程中就扮演描述技术应用前景、界定技术研究内容、牵引技术研究发展的作用。

世界各航空航天大国,总体方案是国家级高超声速飞行器应用研究发展计划的核心部分,是其计划最终要实现的目标。典型的代表是20世纪80年代,美国的NASP计划和德国的Sänger计划,其计划的目标就是要实现空天飞机,因此通过具体的总体方案来引领和组织各项技术研究的开展。