

高超声速飞行器系列丛书

高超声速 飞行器概论

冯志高 关成启 张红文 编著



AN INTRODUCTION TO
HYPERSONIC AIRCRAFT



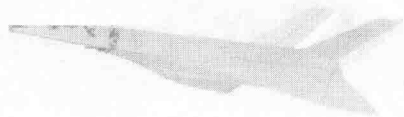
北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高超声速飞行器系列丛书

高超声速 飞行器概论

冯志高 关成启 张红文 编著



AN INTRODUCTION TO
HYPERSONIC AIRCRAFT

AN INTRODUCTION TO
HYPERSONIC AIRCRAFT

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

高超声速飞行器概论 / 冯志高, 关成启, 张红文编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5682-1650-0

I. ①高… II. ①冯… ②关… ③张… III. ①高超音速飞行器 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 307100 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 22.75

字 数 / 410 千字

版 次 / 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

定 价 / 72.00 元

责任编辑 / 封 雪

李炳泉

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

序

科学地描述人类的活动离不开空间和时间的概念，空间概念和时间概念既可以相互表达，又可以联合表达另一个概念——速度。自从人类在 20 世纪 40 年代发现声障（俗称音障）现象后，人们把声波在介质中传播的速度定义为马赫（以奥地利物理学家恩斯特·马赫命名）。当介质的密度不同时，声波传播的速度各不相同。因为“马赫”所对应的声波传播速度不是一个恒定的数，所以马赫不能作为一个速度单位来使用，如果一定要把它作为一个速度单位来使用，那么就必须注明标注传播声波的介质密度。自 20 世纪初人类首次实现空中飞行以来，人们对于飞行速度的追求就没有停止过，从亚声速、超声速到高超声速，飞得更快是人类永恒的追求，许多国家的专家学者为此开展了大量卓有成效的研究工作。通常情况下，人们把近地空间（海拔高度 100 km 以下）飞行速度达到或超过马赫数 5 的有控飞行器称为高超声速飞行器（地球引力作用下的近地空间自由落体不属于有控飞行器范畴）。

近地空间中的高超声速飞行器可分为两大类：有动力高超声速飞行器和无动力高超声速飞行器（俗称重力滑翔飞行器），其中有动力高超声速飞行器又可分为吸气式和非吸气式两小类。本书重点介绍吸气式高超声速飞行器的基本原理与工程实现相关内容。

无论从哪个方面讲，在各类飞行器理论研究与工程实践中，吸气式高超声速飞行器都属于前沿领域。由于对超声速燃烧、高超声速飞行器设计与制造以及高超声速机体/推进一体化气动和飞行控制技术的相关理论与工程实践研究还处于探索阶段，因此高超声速飞行器的研究活动常有在“伸手不见五指”的黑暗中摸索前行的感觉，一些重要的物理现象也不得不用普通人感到“高深莫测”的理论进行描述。相信随着工程实践活动的深入，一些理论得到验证，一些试验基础设施得到运用，一些地面试验与飞行试验数据得到积累，未来的高超声速飞行器研制与发展会比现在顺畅得多，对相关现象的认识也会深刻、简化得多。

本书的作者是从事这个前沿领域理论研究与工程实践方面的专家，他们的探索成果以及国外这方面的研究初步成果比较集中地反映在这部著作之中，相

信本书将为我国未来的高超声速飞行器理论研究与工程实践活动起到抛砖引玉的作用，值得有志于在这个领域有所建树的专家、学者、工程师以及项目组织者研读。

是为序。



2015年10月12日

前言

天下武功，无坚不破，唯快不破。战争博弈双方也在追求速度，孙子兵法中谓之“兵贵神速”，人类对更高速度的追求永无止境。通常人们把大气层中飞行速度大于5倍声速以上的飞行器称为高超声速飞行器，相关的高超声速流动理论研究始于20世纪40年代后期，我国著名科学家钱学森先生和郭永怀先生都是高超声速概念的最早倡导者和推动者。

高超声速飞行器兼有航天器和航空器的优点，融合了人类诸多航空航天领域的新技术，是未来飞行器的重要发展方向，既可应用于军事领域，也可造福于民用行业。随着高超声速飞行器技术的发展，人类进入太空的方式也将发生巨大改变，人类自由进出空间实现太空旅行不再是梦想。因此高超声速飞行器技术具有重要的战略意义和极高的应用价值，成为21世纪航空航天领域的研究热点，得到世界范围的广泛关注。

本书是近年来较为系统、全面论述、分析吸气式高超声速飞行器的著作，系统地阐述了高超声速飞行器总体设计、机体推进一体化气动布局、超燃冲压发动机、机体结构、制导控制等专业的耦合关系、基本原理、关键技术、实现途径和试验验证等内容，系统梳理了国内外在此领域的发展方向和研究进展。

本书在编著过程中贯彻了“关键、精简、系统、实用”的原则，突出了航空航天特色，具有较强的针对性。“关键”是指着重介绍高超声速飞行器必须掌握的关键知识和抓住不放的关键环节，对与其他飞行器相同或类似的专业则不涉及或简单说明；“精简”是指高超声速飞行器涉及的专业、学科较多，不能一一详述，本着“精简”的原则，尽量用精练、通俗的语言来描写，让大家容易理解接受；“系统”就是突出高超声速飞行器的系统性，不仅使读者掌握重点和要点，而且对整个飞行器有全面的把握；“实用”就是在前述基础上，告诉读者如何设计高超声速飞行器，有哪些技术关键，要考虑哪些因素。

全书共分为9章，第1章绪论由宁国栋、王轶鹏、胡一繁编著，第2章高超声速飞行器飞行的基本原理由王晓峰、王章磊、谷晓辉编著，第3章高超声速飞行器系统设计由高广林、柴雪、黄凯编著，第4章高超声速飞行器气动设计由朱国祥、王磊、王立宁编著，第5章高超声速飞行器机体结构由王战、陈平编著，

第6章超燃冲压发动机由项林、马会民、叶中元、罗春钦、张义宁、雷鸣、张雅凤、任鑫、陆晋丽、费立森、李大进、李斌、覃正、张波、王琴、郭雪莲、艾莉、赵天爽、董建明、戚磊编著，第7章高超声速飞行器制导控制由彭寿勇、黄振宇、罗钦钦、柳青、尤伟帅、姜丽敏、赵景朝、杨胜江编著，第8章其他系统的设计由刘杰、谷晓辉编著。关成启对全书进行了统校和编审，最后由冯志高、关成启、张红文对本书进行了审校和定稿。

本书编著过程中，中国航天科工集团高红卫董事长给予了大力支持并为本书作序，罗金玲研究员、李俊研究员、汤龙生研究员审阅了部分章节并提出了宝贵意见，柴雪、高广林、龙双丽对本书文字、图表部分进行了加工完善，周舜华、张鸣戈、王晓昱、王珺给予了热情帮助，在此对各位领导、专家、学者的大力支持表示衷心的感谢。本书参考和借鉴了国内外许多学者的研究成果，在每章参考文献中已列出，对每位作者表示诚挚的谢意。

本书既可以作为高等院校研究生的参考书，也可供从事高超声速技术研究的工程师等专业人士学习参考。由于作者水平有限，难免存在缺点和不足，欢迎读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 高超声速飞行器定义及分类	1
1.3 高超声速技术发展史	3
1.4 高超声速飞行器的主要学科	12
1.5 高超声速飞行器主要技术问题	13
1.6 高超声速技术发展现状和趋势	19
参考文献	24
第 2 章 高超声速飞行器飞行的基本原理	27
2.1 概述	27
2.2 高超声速飞行环境	27
2.3 飞行器运动学与动力学	33
2.4 飞行性能与飞行包线	45
2.5 飞行器稳定和操纵	49
参考文献	59
第 3 章 高超声速飞行器系统设计	61
3.1 概述	61
3.2 系统设计方法	62
3.3 总体设计的基本原则	68
3.4 系统设计过程	69
3.5 系统试验	96
3.6 飞行器用设备	100
参考文献	101

第4章 高超声速飞行器气动设计	103
4.1 概述	103
4.2 高超声速流动现象	104
4.3 高超声速气动布局设计	121
4.4 高超声速气动特性数值分析	153
4.5 高超声速风洞试验	164
参考文献	175
第5章 高超声速飞行器机体结构	177
5.1 概述	177
5.2 高超声速飞行器可用材料	178
5.3 高超声速飞行器典型机体结构	186
5.4 高超声速飞行器机体结构设计	207
5.5 结构与热防护系统地面试验	219
参考文献	222
第6章 超燃冲压发动机	225
6.1 引言	225
6.2 基本概念	225
6.3 工作原理	233
6.4 推力性能	239
6.5 结构热防护	248
6.6 燃油供给与控制系统	256
6.7 地面试验	259
6.8 基于超燃冲压发动机的组合循环动力概念	267
参考文献	275
第7章 高超声速飞行器制导控制	279
7.1 概述	279
7.2 高超声速飞行器制导控制系统面临的主要技术问题	280
7.3 制导控制系统设计	281
7.4 制导控制系统设备	303
7.5 制导控制系统试验	321

参考文献	325
第 8 章 其他系统的设计	327
8.1 电气系统	327
8.2 测控系统	337
8.3 燃油系统	344
参考文献	350
第 9 章 高超声速飞行器发展展望	351

1

第1章 绪论

1.1 概述

“高超声速”(Hypersonic)一词由我国著名科学家钱学森于1964年首次提出,实际上高超声速飞行器技术的发展起步于20世纪50年代的超声速燃烧及超声速燃烧冲压发动机(简称超燃冲压发动机)的研究,至今已经历了近70年的历史。2013年5月美国X-51A第四次飞行试验,实现了以碳氢燃料超燃冲压发动机为动力的临近空间飞行器飞行速度和飞行距离的历史性突破,以吸气式高超声速飞行器为代表的临近空间和空天飞行器技术再次成为航空航天领域的热点,其技术难度极高,机遇和挑战并存。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和应用。

本章首先给出高超声速、高超声速飞行器等相关定义、特征和分类,然后,系统梳理、总结世界高超声速技术发展史,最后,对高超声速飞行器涉及的主要学科进行描述,并分析高超声速技术发展现状和趋势。

1.2 高超声速飞行器定义及分类

1.2.1 定义

高超声速是指马赫数大于等于5的速度,可以通过助推火箭、吸气式推进系统或者从轨道再入大气层等方式实现。早期,通过发射弹道导弹、卫星等方式已经实现了高超声速飞行;X-15实现了空基发射、以火箭为动力的首次高超声速飞行;ASALM(先进战略空射导弹)和X-43A分别实现了以冲压发动机、超燃冲

压发动机为动力的高超声速飞行。

高超声速飞行器是指最大飞行速度大于等于 5 倍声速、在大气层内或跨大气层长时间机动飞行的飞行器，其主要应用形式包括高超声速巡航导弹、高超声速滑翔飞行器、高超声速飞行平台（包括有人/无人高超声速飞机等）以及空天飞行器等具有战略威慑作用的武器装备和具有广泛用途的航天空间飞行器。

高超声速巡航导弹是指以超燃冲压发动机为主动力、高超声速飞行的巡航导弹，可配备在陆基、海基和空基等多种发射平台上，具备敏捷快速区域打击能力，可对敌方陆上、海上和空中高价值目标、时间敏感目标等进行高超声速毁伤和打击，涵盖了高超声速飞行器的主要技术特征。

高超声速滑翔飞行器是指从大气层外或临近空间机动再入、在大气层内无动力长时间高超声速机动滑翔飞行的飞行器。

高超声速飞行平台主要包括有人和无人高超声速飞机，是指以超燃冲压发动机（简称超燃冲压发动机）或其组合发动机为主动力、高超声速飞行并可作为平台进行远程武器投放、执行快速实时情报监视和侦察任务、实施全球兵力投送兼具远程精确打击能力的飞行器。

空天飞行器是一种可重复使用、长期在轨并能够进行轨道机动的飞行器，可完成未来空间运送、监视和侦察、太空作战、空间控制卫星及快速体系补充等多方面的空间任务。

吸气式高超声速飞行器是指以超燃冲压发动机或其组合发动机为动力、能在大气层或跨大气层长时间以高超声速飞行的飞行器。吸气式高超声速飞行器有诸多有别于传统动力飞行器的优点，近半个世纪以来，成为高超声速技术领域研究的热点，习惯上高超声速飞行器特指吸气式高超声速飞行器。与采用火箭发动机为动力的飞行器相比，无须携带氧化剂，具有更高的比冲性能，航程与有效载荷显著增加；与采用航空涡轮发动机等传统动力的飞行器相比，飞行速度更快、飞行高度更高，大大扩展了飞行空域。

1.2.2 特征

高超声速飞行器技术的突破，将成为人类航空航天科学技术史上继发明飞机、突破“声障”之后的第三个划时代的里程碑，将对国际战略格局、军事力量对比、科学技术和经济社会发展等产生重大与深远的影响。

(1) 技术特征：高超声速飞行器技术作为航天和航空技术的结合点，涉及高超声速空气动力学、计算流体力学、高温气体热力学、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。

(2) 战略特征: 高超声速飞行器技术是 21 世纪航空航天技术新的制高点, 具有“高风险、高回报”特征, 是典型的军民两用技术, 具有战略性、前瞻性、标志性和带动性, 是世界航空航天史上的一颗璀璨明珠, 具有广阔的军事和民用价值。

(3) 军事应用特征: 与传统的亚声速或超声速飞行器相比, 高超声速飞行器飞行速度更快、突防能力更强, 大幅度提高了飞行速度和高度, 扩展了飞行空域, 在未来战争中, 可作为新型常规快速精确打击武器或平台, 实现防区外对时间敏感目标的精确打击和全球兵力快速投送与物资补给。

1.2.3 分类

高超声速飞行器因技术发展方向、作用与用途、有/无动力、弹道形式等的不同, 可分为不同的类型。

(1) 按照高超声速技术发展分类。高超声速飞行器可随着技术进展逐步发展为高超声速导弹、高超声速飞行平台和空天飞行器。高超声速导弹可进一步分为高超声速巡航导弹、高超声速滑翔导弹等, 高超声速飞行平台可进一步分为有人和无人高超声速飞机等, 空天飞行器可分为单级入轨 (SSTO) 空天飞行器和两级入轨 (TSTO) 空天飞行器两类。

(2) 按照作用与用途分类, 可以分为高超声速打击武器、高超声速飞行平台等。

(3) 按照飞行器主级有/无动力分类, 可分为高超声速有动力飞行器 (例如 X-51A, 巡航级为主级, 动力装置采用超燃冲压发动机) 和高超声速无动力飞行器 (例如 HTV-2, 滑翔体为主级, 无动力滑翔飞行) 等。

(4) 按照弹道形式分类, 可分为高超声速巡航飞行器、高超声速滑翔飞行器、高超声速弹道/巡航/滑翔组合飞行器和轨道再入高超声速飞行器等。

1.3 高超声速技术发展史

自 20 世纪 60 年代以来, 以火箭为动力的高超声速技术已广泛应用于各类导弹和空间飞行器。吸气式高超声速技术的发展始于 20 世纪 50 年代, 以其航程更远、结构质量更小、性能更优越等潜在能力备受关注, 经过几十年的发展, 已经从概念和原理探索阶段进入以高超声速巡航导弹、高超声速飞行平台和空天飞行器三个层次为应用背景的先期技术开发阶段。

世界上主要的航天大国都涉足高超声速技术研究领域, 美国、俄罗斯、法国、日本、印度和澳大利亚等国均在此领域积极推进。

1.3.1 概念探索和地面试验为主的高超声速研究阶段（20世纪50年代—90年代）

高超声速飞行器技术的发展起步于超声速燃烧（简称超燃，指一种燃料在超声速气流中混合与燃烧的物理化学过程）及超燃冲压发动机的研究，研究主要分为以超燃冲压发动机为主动力的高超声速飞行器和以火箭发动机为动力的高超声速飞行器两个方向。

概念探索和地面试验为主的高超声速研究阶段，主要分为以下四个时期。

（1）20世纪50年代，着重于超燃的概念性、基础性问题研究。

20世纪50年代初，涡轮喷气发动机已成为航空飞行器的主要动力装置，同时以亚声速燃烧超燃冲压发动机为动力的马赫数3导弹也已经开始研制，然而在继续提高飞行器飞行高度、飞行速度过程中，上述两种吸气式动力装置性能都严重下降，高速飞行受到限制。在这种情况下，美籍意大利空气动力学家安东尼奥·费里提出了超声速燃烧理论，标志高超声速技术研究的开始。1958年，安东尼奥·费里用试验证明了在马赫数3超声速流中能够实现无强激波的稳定燃烧，掀起了超燃研究的热潮，使得超燃机理研究与模型发动机的研制工作得以广泛开展。

（2）20世纪50年代中期—70年代中期，着重以高超声速试验飞行器为应用背景的超燃冲压发动机研究和“太空竞赛”推动的以火箭为动力的高超声速技术发展。

50年代中期，霍普金斯大学应用物理试验室开始进行超声速燃烧研究，在马赫数5的试验中，超声速燃烧产生了推力，分析研究与试验结果表明其效率很低，但在超声速燃烧中维持稳定燃烧这一事实仍激励着科技人员探索超燃冲压发动机实际应用的可行性。长时间的试验研究证明了在高超声速条件下净推力的存在，并指出当飞行速度大于马赫数7时，其他类型的发动机会遇到难以克服的困难，而超燃冲压发动机及其组合发动机（TBCC和RBCC）具有明显的潜在优势，如图1.1所示。

以高超声速试验飞行器为应用背景的超燃冲压发动机研究具有代表性的项目，包括美国的Aerospace Plane（空天飞机计划，图1.2）、SCRAM（超声速燃烧冲压发动机导弹）和HRE（高超声速研究用发动机）计划。为了争夺空间资源，美国空军在NACA（国家航空咨询委员会，NASA前身）超燃冲压发动机研究工作的基础上，于1955年发起空天飞机计划，分别提出了SSTO（单级入轨）和TSTO（两级入轨）进入空间飞行器方案，由于技术问题和费用超支，1968年该项目终止。美国从1961年开始了以超燃冲压发动机为动力装置的超声速燃烧冲压发动机

导弹 (Supersonic Combustion Ramjet Missile, SCRAM) 方案设计 (图 1.3), 作为美国海军舰队防空系统研制的导弹拦截武器, 完成了马赫数 5~7.2 状态下的超燃冲压发动机自由射流试验, 证明了碳氢燃料超燃冲压发动机的实用性, 因当时水平限制, 项目于 1978 年终止。1964 年, 美国推出了高超声速研究用发动机 (Hypersonic Research Engine, HRE) 计划 (图 1.4), 由美国著名的飞行器地面试验中心——兰利研究中心牵头, 重点研究马赫数 4~8 超燃冲压发动机推力性能, 对两个直径为 457 mm 的轴对称全尺寸发动机模型进行了地面试验, 该计划用 X-15 高超声速飞行试验机进行挂载试验, 后因 X-15 计划取消, 导致 HRE 项目只进行了地面试验。

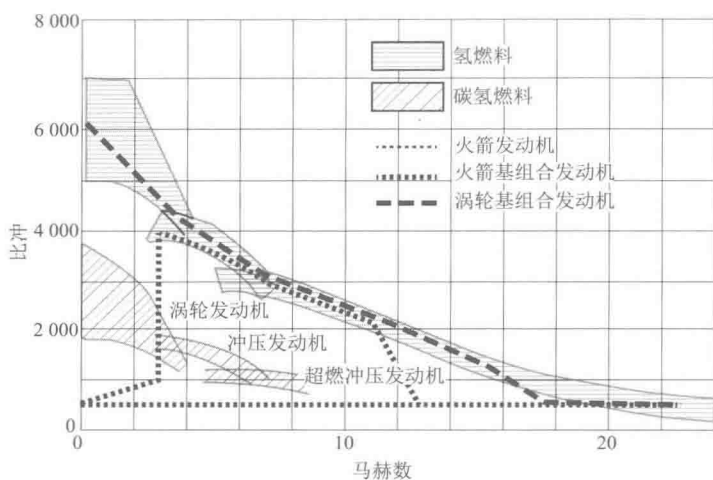


图 1.1 航空航天发动机性能随马赫数变化曲线

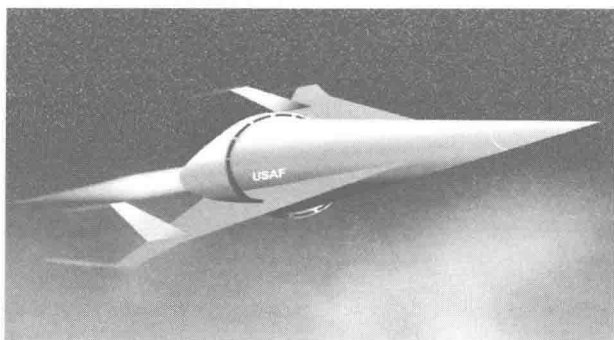


图 1.2 1963 年的空天飞机计划

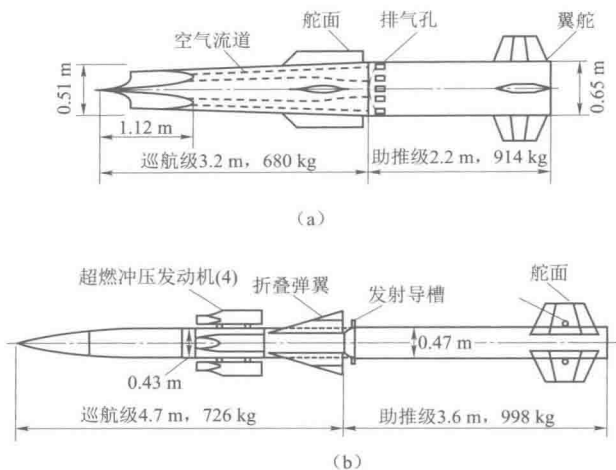
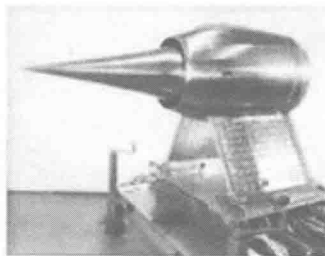
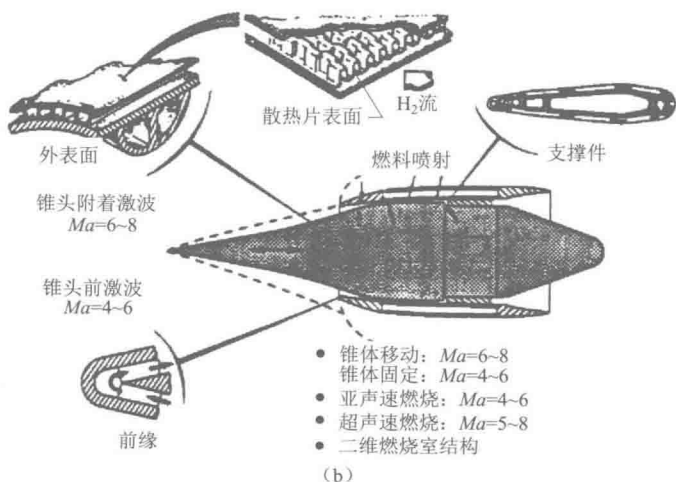


图 1.3 SCRAM 项目两种导弹构型方案

(a) 方案 1 (双发超燃冲压发动机); (b) 方案 2 (四发超燃冲压发动机并联)



(a)



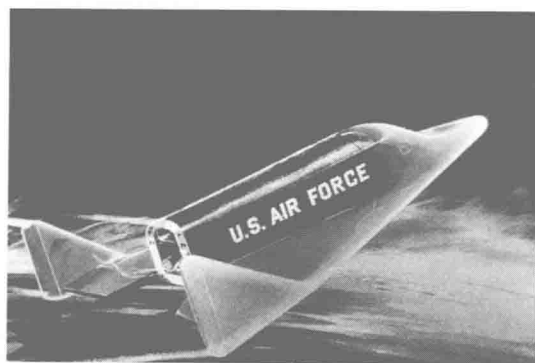
(b)

图 1.4 HRE 项目方案及飞行用发动机设计特征

与此同时, 1957—1975年, 在第二次世界大战后火箭技术成熟基础上, 美国和苏联展开了人造卫星、载人航天和人类登月等空间探索领域和洲际弹道导弹、高超声速飞行试验机 X-15、X-20 Dyna-Soar 有人驾驶航天飞机等军事领域的“太空竞赛”, 有力地推动了以火箭为动力的高超声速技术发展。X-15 高超声速项目 [图 1.5 (a)] 由 NASA 牵头, 联合美国空军、海军和北美航空公司共同进行。先后创造了马赫数 6.7 的速度, 高度 108 km 的升限, 它的试验飞行计划几乎涉及了有人驾驶高超声速飞行的所有领域, 并为美国后来水星、双子座、阿波罗有人太空飞行计划和航天飞机的发展提供了极其重要的试验数据。X-20 Dyna-Soar 技术是美国在“二战”时期德国的一种亚轨道滑跳远程轰炸机技术基础上, 采用了“用助推滑翔弹道代替亚轨道滑跳弹道”来缓解飞行器气动加热的创新理念, 整合了 RoBo (火箭轰炸机)、HYWARDS (高超声速武器研究)、Brass Bell 等项目, 于 1957 年提出的 [图 1.5 (b)] 旨在研发一种具备侦察、轰炸、空间营救和破坏敌人卫星的助推滑翔式高超声速飞行器, 由于技术难度和政策两方面原因, 项目于 1963 年终止。



(a)



(b)

图 1.5 以助推火箭为动力的高超声速飞行器

(a) X-15 空射高超声速飞行试验机; (b) X-20 Dyna-Soar 高超声速助推滑翔空天飞机