

高超声速技术译丛

Hypersonic Airbreathing Propulsion

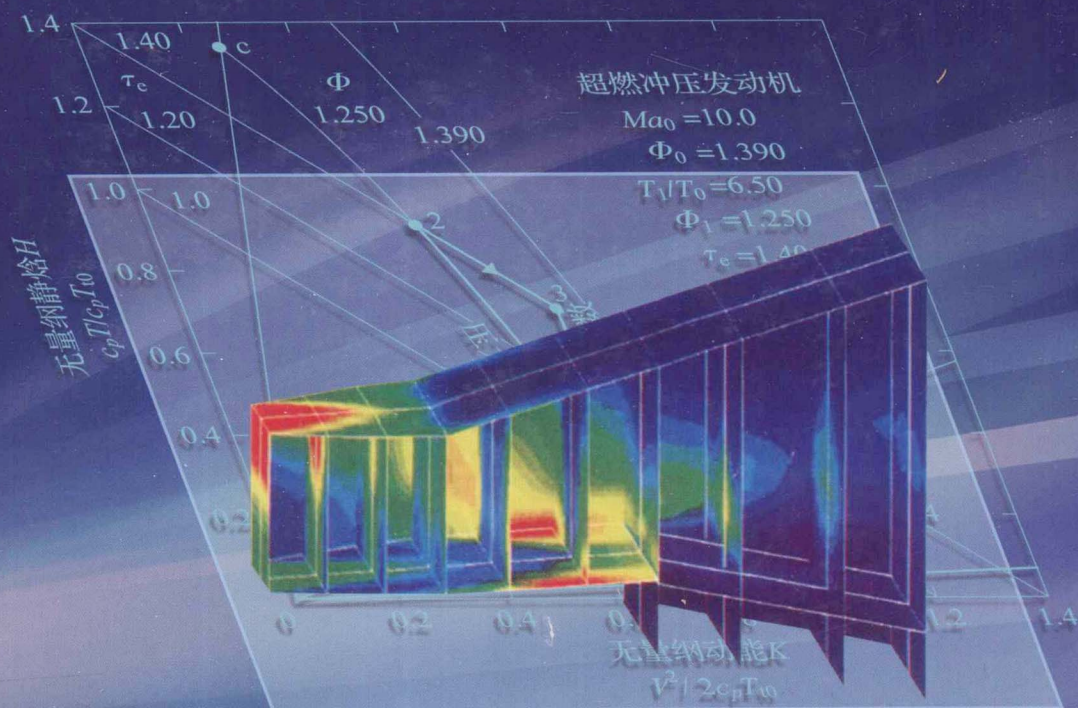
高超声速吸气式推进

(美) 威廉·H. 海泽(William H. Heiser)

戴维·T. 普拉特(David T. Pratt)

著

俞刚译



北京

高超声速技术译丛

高超声速吸气式推进

(美) 威廉·H. 海泽 (William H. Heiser) 著
戴维·T. 普拉特 (David T. Pratt)

俞 刚 译

北 京

内 容 提 要

本书是作者为美国大学高年级学生和研究生的高超声速吸气式推进课程撰写的教科书。全书共分9章，第1章是综合背景，包括高超声速吸气式飞行的历史和现状的简要概述，以及客观的总结。第2章涉及基本概念和定律，特别是对计算流体力学（CFD）和实验流体力学有许多共同的不确定性来源有所分析。第3章是关于高超声速空天飞行器完整的发展和分析，特别强调吸气式推进获得成功的贡献。第4章~第7章分别按压缩系统、燃烧系统和膨胀系统的顺序，讨论冲压发动机和超燃冲压发动机的部件、循环、系统，以及它们的设计和性能估算的方法。第8章是各种高超声速吸气式推进系统性能的评估和方法。第9章是对冲压发动机和超燃冲压发动机设计和研发有特殊意义的有关专题。附录中有标准大气表和单位换算表。此外，本书还提供了便于深入理解每章主题的课外习题和涉及高超声速吸气式推进性能参数计算的通用计算程序 HAP。

本课程的学生至少应具备可压缩流体力学和热力学的基础知识。

高超声速吸气式推进 Gaochaoshengsu Xiqishi Tuijin

2013 年 4 月第 1 次印刷
印张：28

开本：710 × 1000 1/16

插页：4
字数：570 千字

《高超声速技术译丛》编委会

顾问：(按姓氏笔画排序)

王礼恒	史新兴	包为民	乐嘉陵
冯志高	刘永才	杜善义	杨卫
李椿萱	张立同	俞鸿儒	陶文铨
黄伯云	黄瑞松		

主任委员：郑耀

副主任委员：符松 孟华

委员：(按姓氏笔画排序)

王振国	方文军	刘洪	刘卫东
关成启	杨超	李仲平	李存标
李建林	李跃明	何国强	沈清
张天序	张香文	张蒙正	张新宇
陈振乾	林均品	周毅	宗群
桂业伟	高正红	高效伟	韩杰才
程克明	樊菁		

《高超声速技术译丛》序言

飞得更快、更高、更远，是人类永恒的追求。通常人们把大气层中飞行速度达到5倍声速以上的飞行称为高超声速飞行。相关的高超声速流动的理论研究始于20世纪40年代后期，我国的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。

早在20世纪60年代，在突破3倍声速之前，人类就已经开始研究高超声速技术。美国开展的X-43A、X-51A、X-37B和HTV-2（Hypersonic Technology Vehicle 2）“猎鹰”等飞行器的飞行试验在高超声速领域占据了领先地位，并积累了宝贵的技术和经验。受其鼓舞，更是由于其潜在的重要战略意义和极高的应用价值，使得高超声速技术成为21世纪航空航天领域的研究热点之一，得到了世界范围的广泛关注。

我国在高超声速技术领域的研究方兴未艾，相关的科研院所和高等学校取得了令人瞩目的突破和积累，但与美国等航空航天发达国家相比仍有一定差距，亟待汲取其先进的研究经验，并借此能够系统培养相关的科研人员。《高超声速技术译丛》的出版适逢其时，译丛旨在借鉴和总结美国等航空航天领先国家的经验，使其理论化、科学化和系统化，进而结合工程实践，以形成具有我国特色的高超声速技术理论与实践相结合的知识体系。

《高超声速技术译丛》主要涵盖飞行器总体技术、推进技术、气动力与气动热、材料与结构热防护、制导与控制、数值模拟与试验测量技术等专业方向，知识领域覆盖了高超声速飞行器研发设计、制造和试验等关键技术。译丛择优选取了美国航空航天学会等国外机构出版的高超声速及相关技术的经典著作，以飨读者。

本套译丛的出版得到了国内众多方面的大力支持。丛书凝结了高超声速研究领域专家智慧和成果，承担着记载与弘扬科学成就、积累与传播科技知识的使命，具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性，既可以作为实际工作的指导用书，也可以作为相关专业人员的学习参考书。期望这套丛书能够有益于高超声速技术领域人才的培养，有益于高超声速技术的发展，有益于高超声速飞行器的研制工作。同时，希望能够吸引更多的读者来关心、支持和热爱高超声速技术，并投身其中做出贡献。

《高超声速技术译丛》编辑委员会

2012年5月

译者序

高超声速吸气式推进具体指超声速燃烧冲压发动机。顾名思义，这种发动机利用超声速气流经内部收缩通道的冲压作用减速转变为适合燃烧的气流条件，需要的氧气全部从大气中吸取。由于原理科学、结构简单、不需要转动部件，从而可以开发出飞得更高、更快、更省的马赫数 5 以上的新一代高超声速飞行器，在不久的将来有可能发展成更加方便、经济和可靠的天地往返运输系统，提高人类进入和利用空间的能力。

受超声速燃烧冲压发动机独特优点的吸引，各国的科技人员已进行了半个多世纪的努力。然而技术困难过于巨大，至今仍在努力追求之中。仅美国的研究活动就经历过三次大的起伏，如 1986 年提出的国家空天飞机计划 NASP，当时计划用举国的力量建造水平起降一级入轨的空天飞机，7 年后该计划不得不放弃。后来的分析指出，主要还是对巨大的困难估计不足，归因于技术上不成熟。尽管如此，美国及西方国家的科技人员仍然对它锲而不舍。在 NASP 计划的经验教训基础上，美国 2004 年成功进行了氢燃料最高马赫数 10 和 2010 年碳氢燃料马赫数 5 的超燃冲压发动机飞行试验。

本书撰写于 NASP 计划期间并于 1994 年出版。如作者所述得到 NASP 计划的支持，是第一次对“高超声速吸气式推进”主题作基本、全面和综合性的论述。旨在为这个领域的研究提供必备的知识和广泛的基础性的介绍，曾获美国航空航天协会教育系列丛书奖。译者有幸在开始从事这项研究的时候赶上这本书的出版，20 年来受益匪浅，避免了犯低级错误。这本书的材料也许认为有些老，但是直到现在，这仍是仅有的一本高超声速吸气式推进的教科书，应该看到这本书动手写作的时候，超燃冲压发动机的研究已有 40 年两次起伏的经历，技术发展已经成熟到一定的阶段，对它的认识亦积累到相当高的程度，特别是关于基本概念、原理、方法、性能特点、关键技术和挑战，以及一些重要的结论方面，这些知识很宝贵不会过时。而且，它们还在发展，应该起到承上启下的作用。经过作者系统地总结对后来的人们学习和掌握这门复杂高深的学问是个很大的方便。这正是译者希望将这本书介绍给国内读者的原因，对于提高研究工作的起点相信也不无裨益。

本书诚如作者所言是它的系统性，因为内容几乎完全配套，从有关高超声速吸气式飞行的基础知识，超燃冲压发动机的基本原理、性能飞析、研究方法包括地面试验模拟、CFD 数值模拟和飞行试验，直至工程应用循序渐近地引入，而且

还提供了通用的 HAP 计算机程序和便于深化理解每个主题的课外习题，适合于初学者了解高超声速吸气式推进的全貌和特色，对于从事这个领域研究的科学和工程技术人员，也是一本有用的参考读物。

本书是译者退休后练习中文打字的副产品，由于该书的内容几乎涉及工程科学的各种知识面，难免对原文的理解和中文表达有不当之处。为此，译者特别感谢吴承康院士和王柏懿研究员在翻译过程中的帮助。译者还必须感谢课题组范学军研究员和重点实验室主任姜宗林研究员对两年多翻译工作的支持。

俞刚

2013 年 3 月 6 日

中国科学院力学研究所

高温气体动力学国家重点实验室

原 版 前 言

本书和它的姐妹篇《高超声速气动热力学》(Hypersonic—Aerothermodynamics)作者 John J. Bertin、源自 1987 年美国空军学院航空系教职员工的系列讨论。当时,里根总统发布的有人驾驶的高超声速飞行新计划回到公众的视线,该计划提出发展和演示一种能像飞机一样运行的飞行器新技术——从常规跑道起飞,利用吸气式发动机爬升,并加速到足以进入地球轨道的高度和速度。轨道飞行任务结束后,飞行器将返回大气层,并且像飞机一样下降在跑道上着陆。这种构想导致了国家空天飞机计划(NASP)的提出。NASP 设想的一级入轨概念要求国家尽最大的努力集中最优秀人才使它成为现实。

NASP 的出现并不是导致这两本书出版的唯一因素。近期最重要的高超声速载人飞行器计划是航天飞机,它经历了 20 世纪 60 年代的工程研制阶段,到 80 年代末,参与该计划的许多优秀人才已经转向其他领域。然而,学术界、工业界和政府部门都很清楚,高超声速气动热力学、吸气式推进分析和设计原理都需要更新。因此,位于俄亥俄州的莱特-帕特森(Wright-Patterson)空军基地的空军莱特(Air Force Wright)实验室和 NASP 联合计划办公室开始与空军学院航空系合作,为撰写这两本书提供经费,并在技术与编辑方面给予监督和指导。

我们衷心地希望:这两本书对于今后参与高超声速飞行这个激动人心的研究和应用事业的学生、工程师和计划管理人员提供最新的信息和灵感。

G. Keith Richey

首席科学家

Wright 实验室

Robert R. Barthelemy

主任

NASP 联合计划办公室

Edward T. Curran

主任

空气推进和动力理事会

Wright 实验室

Michael L. Smith

教授/主任

美国空军学院航空系教授

原 版 序

正在发生的对高超声速飞行复兴的兴趣和活动，因各种基础科学技术的稳步进展导致对吸气式推进系统性能的显著改进已经触手可及。《高超声速吸气式推进》一书旨在为这个领域的研究、在它的开发和成长期间提供必备的知识和广泛的基础性介绍。就我们所知，这是第一次对这个主题作基本、全面和综合性的论述。

乍看起来，高超声速吸气式推进似乎很神秘且令人生畏，因为它涉及的飞行范围远超越常规的经验 and 直觉。的确，许多陌生的现象（如化学分解、超声速混合和燃烧）都包含在内。不过，向前行进必有斩获，因为高超声速吸气式推进遵从通常的自然规律，一旦这些规律正确地应用到眼前的局势期望的结果就有可能获得。这些结果往往比它们的亚声速或超声速对手更有吸引力和容易理解。因此，这本教科书的课程只是重述和扩展读者对这些基本知识的理解和鉴赏。

我们深信，高级工程教科书应该能教导读者或学生做他们以前不能做的事情。为此，您将发现这部书的内容几乎是完全配套的。首先，几乎每个算例的分析结果都能够利用书中提供的方法重复。其次，几乎对每一主题都布置了课后习题以便深化理解。最后，为了便于进行重复和/或复杂的计算，还提供了一套基于 PC 机的阵列式扩展型、用户友好的计算机程序。这些编程十分通用，以至于实际上其应用已远超出本书范围。

高超声速吸气式推进的一个特殊问题是试验数据非常稀少，因为大多数试验数据或者因军事或者因所有权的原因受到保密的限制。我们试图尽量地从公开文献中挖掘作为弥补外，同时还调整和修改我们的叙述方式以使新的数据能容易纳入。

《高超声速吸气式推进》一书主要为大学生和研究生的吸气式推进课程而写。熟悉 Gordon C. Oates 撰写的《气体涡轮和火箭推进的气动热力学》一书的读者，将发现我们对内容的展开方式与他的很相似，但这并非我们的初衷而是自然形成的结果，很可能不可避免。因为技术的内容和目标的受众都是相同的，而且这种方法获得了无可争议的成功。事实上，对我们而言，这是一次发现之旅。作为结果，甚至最有经验的研究者都将发现通篇都是原始有用的材料。

除了第 2 章涉及基本概念和定律、第 4 章 ~ 第 7 章讨论冲压发动机和超燃冲压发动机的部件、循环、系统，以及它们的变种特性以外，根据我们以往在相关

领域的经验以及内容综合性的考虑，促使我们将其他四个方面的主题也一并归入：第1章是综合背景，包括高超声速吸气式飞行的历史和现状的简要概述及中肯总结；第3章是关于高超声速空天飞行器完整的发展和分析，特别强调吸气式推进获得成功的贡献；第8章是各种高超声速吸气式推进系统性能评估的信息和方法；第9章是对冲压发动机和超燃冲压发动机设计和研发有特殊意义的各种专题。

本课程的学生至少应具备可压缩流体力学和热力学的基础知识，若他们学过边界层理论、平衡化学、热交换和机械，以及材料强度则更好，如果他们还学过燃烧反应和飞机或喷气推进那就最好。

本书的内容足够占用一个学年，但是这些主题相当独立，内容可以适当地选择用于四分之一学年或半个学年。事实上，这种处理方式是欢迎利用书中的某些专题作为单独的研究，或者插入教师特别感兴趣的课题中。

致 谢

《高超声速吸气式推进》继承一种美国航空航天协会教育系列丛书牢固确立的富有成果的传统，像它杰出的先驱《气体涡轮和火箭推进的气动热力学》作者 Gordon C. Oates 和《飞机发动机设计》作者 Jack D. Mattingly、William H. Heiser 和 Daniel H. Daley 同样是由美国空军赞助，而且经过美国空军学院学员的书面和当场的测验。

如此规模的工作没有数量庞大和种类繁多的协助是不可能完成的，下面仅列出其中最主要的：

国家空天飞机联合计划办公室 (NASP JPO) 和美国空军 Wright 实验室、通过办公室主任 Robert R. (Bart) Barthelemy 博士和首席科学家 G. Keith Richey 博士、分别为 4 年的合同慷慨地提供了主要的经费和重要的支持。其他重要的支持和热情协助主要由美国空军学院航空系的系主任 Michael L. Smith 上校提供，并由计划与规划执行主管 Thomas R. Yechout 中校和田纳西大学航天学院安排。

本书从 Richey 博士主持的评估委员会的定期会议中受益匪浅。推进的评审人是 Wright 实验室的航空推进与动力部主任 Edward T. (Tom) Curran 博士和 NASP JPO 的 Edward S. Gravlin 先生。我们感谢他们不仅是因为他们认真负责的委员会工作，而且是因为他们自始至终对这项计划由衷的兴趣和积极参与。

美国空军学院航空系前主任 Brig Den (Ret) Daniel H. Daley 在热力学、推进、教学、写作等方面具有无可比拟的权威，而现在又对基本的物理常数和单位制方面十分熟悉，他耐心地阅读了本书的每个字，提出了不胜枚举的建设性意见和改进。

NASP JPO 计算流体力学 (CFD) 技术支撑团队的前任主管和 NASA Ames 研究中心的研究科学家 Unmeel B. Mehta 博士提供了有关 CFD 章节的内容，该部分对于正确描述现代高超声速吸气式推进技术的特点和功能十分关键。

其他许多人的意见、指点，以及具体的贡献改进了本书最终的文本：他们是（注：同一个单位按字母排序）NASA Langley 研究中心的 Griffin Y. Anderson 先生，J. Philip Drummond 博士，Wayne D. Erickson 博士和 Scott D. Holland 博士；美国空军 Wright 实验室的 Richard L. Balent 先生，John L. Leingang 先生，Donald J. Stava 先生和 Frank D. Stull 先生；Rocketdyne 公司的 Steven L. Barson 先生，Pankaj Goel 博士和 Herbert Lander 博士；约翰霍普金斯大学的 Frederick S. Billig 博士和 David

M. Van Wie 博士；美国海军武器中心的 Howard L. Bowman 先生；华盛顿大学的 Robert E. Breiddenthal 博士和 Kaveh Ghorbanian 先生；美国空军飞行试验中心的 Cheryl Gumm 先生和 James O. Young 先生；美国空军学院的 Thomas M. Graziano 先生和 Robert V. Pieri 中校；昆士兰大学的 Peter Jacobs 博士；MBB 德国航天的 Dietrich E. Koelle 博士和 Heribert Kuczera 博士；Aerojet 公司的 David L. Kors 先生；通用电气公司的 Peter H. Kutschenreuter 博士；美国空军阿诺德工程发展中心的 Marion L. Laster 博士；Allied Signal Aerospace 的 Henry J. Lopez 先生；NASA Lewis 研究中心的 Bonnie J. McBride 博士；三菱重工的 Takashige Mori 先生；桑地亚国家实验室的 William L. Oberkampff 博士；Missouri - Rola 大学的 David Riggins 博士；法国空军的 Gilbert M. Souchet 中校；以及 Sverdrup Technology 的 Sheng - Tao Yu 博士。此外，致谢也包括美国空军学院和华盛顿大学的许多学生，因为在改进我们对这个主题的认识和表述的过程中他们是无辜受害者。

我们非常愉快和鉴赏与桑地亚国家实验室 John Bertin 博士的合作，他是 AIAA 教育丛书的姐妹篇《Hypersonic Aerothermodynamics》的作者。他渊博的知识和对这个领域的洞察力是无与伦比的，他的工作也鼓舞我们竭尽所能地撰写好本书。

还有一些人与本书的出版有关，他们只能称之为是不可或缺的，因为他们决定了最后的出版质量。他们包括空军理工学院的老院长和 AIAA 教育丛书的主编 John S. Przemieniecki 博士，得克萨斯大学的 Jeanie K. Duvall 女士、Timothy Valdez 先生，以及 AIAA 总部的 Jeanne A. Godette 女士、Christine Kalmin 女士和 John A. Newbauer 先生。

撰写教科书特有的回报的奖励是能有机会与那些特别有才能的、乐于助人的、新老朋友共享理念。他们的兴趣和精力创建了有利和有激励性的气氛，可以为事业带来持久不断的乐趣。我们衷心地感谢他们每个人对我们工作所做的贡献。

最后也是最重要的是，我们感谢我们的妻子 Leilani Heiser 和 Marilyn Pratt 对这项艰巨工作前后一贯的、坚定不移地支持和鼓励。无论如何，总有一天我们会回报你们。

高超声速吸气式推进（HAP）计算机程序



Hypersonic Airbreathing Propulsion (HAP) Computer Programs

HAP（空气）

21% 氧和 79% 氮空气成分的平衡热物理性质，正激波和斜激波，滞止条件，等熵压缩和膨胀。

HAP（燃烧室）

燃烧室 - 隔离段系统的量热完全气体的气热动力学设计和分析。

HAP（平衡）

各种碳氢燃料在指定条件下燃烧产物的平衡特性

等熵膨胀的平衡和冻结成分

HAP（气体表）

与传统可压缩流量热完全气体附录的等价

等熵流

等面积有摩擦流（范诺流）

等面积无摩擦流（瑞利流）

正激波

斜激波

多重斜激波

锥形激波

普朗特 - 迈耶流

HAP（性能）

总体和部件性能的气流推力分析和高超声速吸气式发动机关键位置性质

HAP（轨道）

对不同指定条件的标准大气物理性质的绝对值和无量纲比值，包括对量热完全气体的燃烧室进口状态

目 录

第 1 章 总体背景	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 历史概述	(2)
1.2.1 起源	(2)
1.2.2 Nord - Aviation Griffon II 涡轮冲压发动机飞机	(4)
1.2.3 冲压发动机导弹	(6)
1.2.4 NASA 高超声速冲压发动机试验和 X-15 火箭发动机研究 飞机	(9)
1.2.5 俄罗斯缩尺模型飞行试验	(10)
1.2.6 回顾	(11)
1.3 前瞻	(11)
1.3.1 德国 Sänger 航天运输系统	(13)
1.3.2 美国国家空天飞机	(15)
1.4 技术概述	(16)
1.4.1 冲压发动机	(17)
1.4.2 超燃冲压发动机	(17)
1.4.3 发动机与飞行器一体化	(18)
1.4.4 高超声速吸气式推进提出的挑战	(19)
参考文献	(20)
第 2 章 技术背景	(22)
2.1 引言	(22)
2.2 单位	(23)
2.3 大气飞行	(24)
2.4 大气	(25)
2.4.1 大气静温	(25)
2.4.2 空气 [动力] 黏度	(25)
2.4.3 空气热传导	(26)
2.4.4 大气静压	(27)

2.4.5	动压和高超声速飞行器飞行轨迹	(28)
2.4.6	单位面积自由流的质量流量	(30)
2.4.7	自由流雷诺数	(31)
2.4.8	自由流克努森 (Knudsen) 数	(32)
2.4.9	大气性质的代表值	(33)
2.4.10	告诫设计者	(33)
2.5	平衡空气化学	(34)
2.5.1	完全平衡与完全气体假设	(34)
2.5.2	空气平衡行为	(35)
2.6	气动热力学控制方程	(39)
2.6.1	假设	(40)
2.6.2	一般有限元控制体分析	(40)
2.6.3	一般微分控制体分析	(51)
2.6.4	$H-K$ 图	(60)
2.6.5	超燃冲压发动机和冲压发动机气动热力学	(60)
2.7	计算流体动力学	(62)
2.7.1	CFD 在设计和分析中的作用	(64)
2.7.2	关于 CFD 的告诫	(65)
2.7.3	设计可信度	(67)
2.7.4	结束语	(70)
2.8	定义高超声速流	(71)
	参考文献	(73)
	习题	(75)
第 3 章	高超声速航天系统性能	(80)
3.1	引言	(80)
3.2	吸气式发动机性能度量	(80)
3.2.1	比推力	(80)
3.2.2	比燃料消耗	(81)
3.2.3	比冲	(81)
3.2.4	燃料/空气比	(82)
3.2.5	吸气式发动机总体效率	(82)
3.2.6	性能度量间的相互关系	(84)
3.2.7	吸气式发动机性能度量举例	(85)

3.3	火箭性能度量	(86)
3.4	航天系统性能度量	(87)
3.4.1	燃料质量百分数	(88)
3.4.2	空机质量百分数	(96)
3.4.3	初始质量比	(97)
3.4.4	吸气式发动机要求的总体效率	(99)
3.4.5	多级飞行器	(100)
3.5	扼要重述	(104)
	参考文献	(105)
	习题	(105)
第 4 章	高超声速吸气式发动机性能分析	(109)
4.1	引言	(109)
4.2	热力学闭循环分析	(111)
4.2.1	热力学循环效率	(113)
4.2.2	最大可允许压缩温度	(115)
4.2.3	燃烧室入口马赫数的限制	(116)
4.2.4	吸气式发动机性能度量	(117)
4.3	热力学第一定律分析	(119)
4.3.1	热力学过程假设	(120)
4.3.2	热力学过程分析	(120)
4.3.3	第一定律分析结果	(123)
4.4	气流推力分析	(127)
4.4.1	吸气式发动机未装机推力	(127)
4.4.2	部件分析	(129)
4.4.3	气流推力分析结果	(132)
4.4.4	组合超燃冲压发动机案例	(139)
4.5	态势评估	(141)
	参考文献	(142)
	习题	(142)
第 5 章	压缩系统或部件	(145)
5.1	引言	(145)
5.2	压缩部件	(145)

5.3	压缩部件分析概述	(148)
5.4	压缩部件性能度量	(149)
5.4.1	总压比	(150)
5.4.2	动能效率	(151)
5.4.3	无量纲熵增	(153)
5.4.4	压缩部件性能度量小结	(155)
5.5	压缩部件性能	(155)
5.5.1	压缩部件流场分析	(155)
5.5.2	绝热压缩效率	(158)
5.5.3	边界层摩擦的影响	(159)
5.5.4	试验数据	(162)
5.5.5	由总体测量确定压缩效率	(164)
5.5.6	热交换对压缩效率影响	(169)
5.6	燃烧室进口压力	(170)
5.7	压缩部件空气动力现象	(172)
5.7.1	前缘斜激波几何	(172)
5.7.2	激波-边界层分离	(173)
5.7.3	进气道起动过程	(178)
5.7.4	进气道不起动	(183)
5.7.5	进气道隔离段	(183)
5.7.6	最大收缩比	(187)
5.8	压缩部件 CFD 算例	(188)
5.8.1	侧壁压缩进气道研究	(188)
5.8.2	出口气流的化学状态	(191)
5.9	结论	(194)
	参考文献	(194)
	习题	(196)
第6章	燃烧系统过程和部件	(202)
6.1	引言	(202)
6.1.1	燃烧化学计量比	(202)
6.2	燃料和空气混合	(204)
6.2.1	基本概念和定义	(204)
6.2.2	燃料和空气在平行气流中混合	(205)