



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

航空航天科技出版工程

2

# 推进与动力

[英]理查德·布洛克利 (Richard Blockley) [美]史维 (Wei Shyy) ©主编

毛军逵 韩启祥 李世鹏 武志文 谢侃 等©译



**ENCYCLOPEDIA OF  
AEROSPACE ENGINEERING 2  
Propulsion and Power**



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

航空航天科技出版工程

2

# 推进与动力

[英]理查德·布洛克利 (Richard Blockley) [美]史维 (Wei Shyy) ©主编

毛军逵 韩启祥 李世鹏 武志文 谢侃 等◎译

*ENCYCLOPEDIA OF  
AEROSPACE ENGINEERING 2  
Propulsion and Power*

图书在版编目 (CIP) 数据

航空航天科技出版工程. 2, 推进与动力 / (英) 理查德·布洛克利 (Richard Blockley), (美) 史维 (Wei Shyy) 主编; 毛军逵等译. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 6

书名原文: Encyclopedia of aerospace engineering

国家出版基金项目 “十二五” 国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978 - 7 - 5682 - 2455 - 0

I. ①航… II. ①理… ②史… ③毛… III. ①航空工程-动力工程②航天工程-动力工程 IV. ①V

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 133793 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 - 2013 - 1965 号

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Beijing Institute of Technology Press Co., LTD and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

封面图片来源:



源自 ONERA, France



源自 Shutterstock



源自 Shutterstock



源自 EADS Astrium

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 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 889 毫米×1194 毫米 1/16

印 张 / 33.5

字 数 / 974 千字

版 次 / 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 198.00 元

责任编辑 / 梁铜华

文案编辑 / 梁铜华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

# 航空航天科技出版工程

## 译审委员会

主任 杜善义  
副主任 李椿莹 余梦伦 黄瑞松 叶培建 唐长红 甘晓华  
委员 (按姓氏笔画排序)  
才满瑞 刘 莉 杨 超 昂海松 周志成 唐胜景 熊 克

## 翻译委员会

主任 刘 莉  
副主任 朱春玲 赵 宁 江 驹  
委员 (按姓氏笔画排序)  
万志强 马东立 王晓芳 王焕瑾 王锁柱 毛军逵 古兴瑾  
龙 腾 朱程香 向彩霞 刘东旭 齐艳丽 孙康文 孙慧玉  
杜 骞 杜小菁 李 书 李 响 李世鹏 杨春信 肖天航  
吴小胜 吴志刚 宋 晨 宋豪鹏 张景瑞 陈永亮 武志文  
林 海 昂海松 周光明 周建江 周思达 周储伟 郑祥明  
徐 军 徐 明 郭 杰 唐胜景 黄晓鹏 龚 正 韩 潮  
韩启祥 谢 侃 谢长川 雷娟棉 谭慧俊 熊 克 冀四梅

## 审校委员会

主任 林 杰  
副主任 樊红亮 李炳泉  
委员 (按姓氏笔画排序)  
于 勇 王佳蕾 王玲玲 王美丽 尹 晷 白照广 多海鹏  
祁载康 杜春英 李秀梅 杨 侧 张云飞 张海丽 张鑫星  
陈 竑 季路成 周瑞红 孟雯雯 封 雪 钟 博 梁铜华

# 推荐序

---

航空航天是国家的战略产业，其科技水平直接决定着综合国力和国家安全。近年来，我国航空航天科技水平得到显著提升，在若干领域取得了举世瞩目的成就。在建设航空航天强国的进程中，广大科技人员需要学习和借鉴世界航空航天科技的最新成就。《航空航天科技出版工程》是综合反映当今世界范围内航空航天科技发展现状和研究前沿的一套丛书，具有系统性、学术性、前沿性等特点。该丛书的翻译和出版，为我国科技工作者学习和借鉴世界航空航天科技提供了一个良好平台。

《航空航天科技出版工程》英文版由美国 WILEY 出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版。全世界 34 位来自航空航天领域的顶级专家组成丛书顾问团，负责对丛书进行规划指导，来自美国、英国、德国、法国等国家的 600 多位著名专家参与丛书撰写。该丛书是当今世界上最为系统和权威的航空航天科技丛书，共有 9 卷、近 5000 页，涵盖航空航天科技的 43 个领域主题，442 个章节。该丛书对航空航天科技所涉及的重要概念、理论、计算、实验等进行了系统阐述，并配有大量工程实践案例，主要内容包括：流体动力学与空气热力学、推进与动力、结构技术、材料技术、动力学与控制、环境影响与制造、飞行器设计、系统工程等。最难能可贵的是，该丛书对航空航天工程的战略决策、实施路径、技术应用、实践验证和评价等方面进行了系统阐释，对未来二十年面临的挑战和机遇进行了深入分析。

该丛书中有些专题研究在我国尚属起步阶段，不少内容是国内紧缺的文献资料。例如，丛书对高超声速稀薄气体动力学、扑翼空气动力学、高超声速气动热弹性、多运动体协调控制、多种飞行器融合、深空探测、航天系统设计认证等领域的介绍颇有参考价值。丛书内容不仅适用于国防领域，而且适用于民用领域，对我国航空航天科技发展具有指导意义。

北京理工大学是我国首批设立火箭、导弹等专业的高校，曾为我国航天事业的创立和发展做出重要贡献，近年来又在深空探测、制导武器、空间信息处理等领域取得重要进展。该丛书英文版问世不久，北京理工大学出版社敏锐地预判到该丛书对我国航空航天科技发展具有重要借鉴作用，提出翻译这套巨著的设想。北京理工大学航空航天学科的教授们积极投身于翻译丛书的策划中，他们联合我国高校、研究机构中一



批长期从事航空航天科技工作的教师和工程技术人员组成团队，仅用一年多时间就将这套巨著译为中文。我帮助他们邀请到丛书英文版顾问、著名航天结构力学家杜善义院士担任译审委员会主任，邀请到我国航空航天科技领域的多位领军科学家、总设计师共同负责丛书译审，进而确保中文版的科学性、准确性、权威性。

作为长期从事航空航天科技工作的学者，看到这套丛书即将问世由衷高兴。我认为，该丛书将为我国航空航天科技工作者提供一套不可多得的工具书，有利于提升我国航空航天科技水平，有利于促进我国航空航天科技与世界航空航天科技的有效对接，有利于推动我国建设航空航天强国。因此，我郑重向航空航天科技界的同行们推荐这套丛书。

中国科学院院士  
北京理工大学校长

# 译者序

---

航空航天的发展水平体现了一个国家的综合实力。我国高度重视航空航天技术的创新发展，将航空航天产业列入国家战略性新兴产业和优先发展的高技术产业。近年来，国家科技重大专项（如大型飞机、载人航天与探月工程、高分辨率对地观测、航空发动机与燃气轮机等）的实施带动了我国航空航天技术的迅猛发展。

航空航天技术的发展日新月异并呈现出跨学科化和国际化的特征，国内学者需要一套系统全面的丛书，来巩固现有的知识、了解国际前沿发展动态、紧盯航空航天科技前沿。《航空航天科技出版工程》正是这样的一套技术研究丛书。北京理工大学出版社在组织专家对英文版《航空航天科技出版工程》的章节标题及主要内容进行翻译和评审后，发现该丛书内容翔实、信息丰富、学科体系完整，具有较高的前瞻性、探索性、系统性和实用性，是一套对中国航空航天领域有较强学习与借鉴作用的专著。因此，出版社决定引进、出版本套丛书的中文版。

英文版《航空航天科技出版工程》由美国 WILEY 出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版，主编为 Richard Blockley（英国克兰菲尔德大学航空航天顾问、英国 BAE 系统公司前技术总监）和 Wei Shyy（原美国密歇根大学航空航天工程系教授兼系主任），历经多年，完成了 9 卷的出版。各章均由活跃在全球航空航天各专业领域研究一线的专家执笔，集成了编写团队在航空航天科技领域的重要科学研究成果和宝贵的科学试验数据。

《航空航天科技出版工程》从力学、动力及推进技术、制导和控制技术、电子仪表技术、通信技术、计算机科学、系统工程、材料科学、加工和制造技术及空间物理学等多个相互支撑的学科技术领域，全面而系统地阐述航空航天领域所涉及的知识，综合体现了目前航空航天技术的国际水平。9 卷包括《流体动力学与空气热力学》《推进与动力》《结构技术》《材料技术》《动力学与控制》《环境影响与制造》《飞行器设计》《系统工程》《航空航天专业术语》。丛书中文版配有丰富的原版插图、表格以及大量的图片资料，最大程度地保留了原版书的编写风格。该丛书对于国内的科研和技术人员，以及承担着未来航空航天技术开发的年轻人和学生来说，都无疑是一套非常好的参考资料。



北京理工大学出版社依托北京理工大学、南京航空航天大学、北京航空航天大学、中国航天科工集团北京航天长征科技信息研究所、中国航天科技集团空间技术研究院等国内从事航空航天技术研究的高校和科研院所，组建了翻译团队和专家译审团队，对《航空航天科技出版工程》进行翻译。

《航空航天科技出版工程2 推进与动力》包含基本概念、吸气式发动机概述、火箭推进、替代推进4个部分，由毛军逵、韩启祥、李世鹏、武志文、谢侃、高俊、谭慧俊、单勇、黄天坤、张雷、马伟华、杨小龙、颜密、周东谟、苏万兴、迟洪伟、李博、郭常超、苏微、王利和、丁士起、田博、杨磊、马宇、高飞、王司宇、陈明、陈盼翻译。特别感谢出版社引进本书，更感谢各位院士学者们对此书出版的大力支持。译、校者虽在译文、专业内容、名词术语等方面进行了反复斟酌，并向有关专业人员请教，但限于译、校者的水平与对新知识的理解程度，谬误和不当之处恳请读者批评、指正。

翻译委员会



# 英文版序

---

能够受邀介绍这部航空航天丛书，我们和各自代表的学会都感到非常的荣幸和愉快。

毫无疑问，这部丛书体现了英国皇家航空学会和美国航空航天学会最大的期望。我们这两个学会都在寻求推进航空航天知识体系进步的方法，同时也都认识到航空航天领域具有动态、多学科和跨国界的特性。

这部丛书是一个独特的工具。它提供了涉及很多方面的快照，包含：全球共享的知识体系、全球企业共享的观念、共享的技术展望和挑战、共享的发展节奏、新方法和新视野，尤其是共享的对教育和培训重要性的关注——所有这些都是关于一个工业领域和一组学科，是它们塑造了并将继续改变我们所生活的世界。

这个共享的知识体系超出了国家的、商业的、组织的和技术学科的界限。在这个界限中我们进行着日复一日的工作，虽然这些工作必然引起经常的竞争，但也总是激发创新性和建设性的尝试。因此，我们怀着无比激动的心情看到了一项完全专业性工作的开展，它尝试着将这个知识体系的精华以全新的形式整理和出版。

航空航天领域对我们世界的影响是巨大的。早期的空气动力学创立者，从 George Cayley 爵士到 Wright 兄弟，都难以想象航空工业、更不必说太空飞行是如何彻底改变了我们的文明世界：它使我们的星球变成了一个很小的区域、允许瞬时联系全球任何地方、提供大范围的人和物资运输以及可以从外太空独特的视角来观看我们的星球和人类自己。航空航天工程师不仅直接为我们收集的知识体系做出了贡献，还驱动了广大的相关领域的进步，从基础的数学、电子学和材料科学到生物学和人因工程。因此，说这部丛书捕捉到了该领域当下的精华是非常恰当的。

对于内容广泛的航空航天工程技术和研究领域，提取其关键要素形成一个相互关联的框架结构，并不具备明显的可能性，更不要说涉及诸多细节。然而这部丛书正是要雄心勃勃地尝试做到这些，甚至更多。从这点看，这部丛书是一个勇敢的、有远见的、有胆识的计划。

这部丛书勾画出了我们领域最好和最醒目的专门技术，其成果是对发起者和作者们最好的回报，这些人值得我们向他们对航空航天行业做出的贡献表示祝贺。



虽然这部丛书的目标是达到相当的深度，但从实用的角度，这部丛书被设计成非常容易阅读和理解。我们希望读者看到这部丛书并可以广泛地应用，包括作为权威的参考书目、作为学习和专业发展的重要工具，或许可以作为课程作业和技术模块设计跨国界、跨机构可信赖的测试基准。

正值载人动力飞行第二个百年开始，太空的前景似乎正在不断复苏，这部丛书的出版是航空航天工程和科学持续发展的里程碑和标志。

我们非常自豪地、共同地将这部丛书推荐给你们。

**Dr. Mark J. Lewis**

美国航空航天学会主席

马里兰大学帕克分校航空航天工程系主任、教授，马里兰州，美国

**Dr. Mike Steeden**

英国皇家航空学会主席，英国

# 英文版前言

---

航空航天工程的历史可以追溯到早期希腊的哲学家亚里士多德和阿基米德，经哥白尼、伽利略、达·芬奇、牛顿、伯努利和欧拉到 19 世纪伟大的机械师纳威、斯托克顿和雷诺以及许多其他研究者，一直到 1903 年由莱特兄弟第一次成功地起飞了一台比空气重的动力机器。从普朗特、冯·卡门、惠特尔、冯·奥西恩、屈西曼、冯·布劳恩和科罗廖夫（这里只给出了少数的名字）等人开创性的成就，仅仅过去一个世纪的时间，航空器和航天器就以一种让最有远见的现代飞行预见者都震惊的速度得到了发展。超音速飞行（具有代表性的协和号客机、SR71 黑鸟式侦察机）、人类在月球上行走以及航天器向太阳系的远端航行，这些都是顽强不屈的技术探索的见证。

几代哲学家、科学家和工程师的工作使航空航天工程形成一个确定的学科，而且需要持续对新的商业、环境和安全相关因素、科学技术领域其他学科的进展、之前未探索的飞行器设计概念、推进、结构与材料、控制、导航和动力学、通信、航空电子、天基系统与旅行中的技术挑战等做出响应。航空航天工程产品是科学与技术多学科综合的产物，当航空器和航天器中的系统集成变得越来越复杂的时候，前所未有的设计挑战出现了，一个部门就需要借鉴不同领域的专业知识。因此，工程师们不仅需要专注于专门知识，还需要将他们的知识扩展到更广泛的学科领域。

本套书的主要目的是：为本科生、研究生以及学术界、工业界、研究机构和政府部门中的专业人士提供一个随手可得的、涵盖航空航天工程主要学科的专用参考书。本套书阐述了基本科学概念及其在当前工程实践中的应用，并将读者引导到更专业的书籍中。

本套书包含 442 篇文章，划分为 43 个领域主题，围绕科学基础和当前的工业实践，贯穿了航空航天工程的全部。当本套书被确定在同类著作中最先出版时，编辑团队从支撑航空航天科学、工程与技术研究和开发的专家们那里得到了原作稿件的授权。这些稿件包括力学、推进、导航与控制、电子器件和测量仪表、通信、计算机科学、系统工程、材料科学、生产与制造以及物理学。此外，考虑到当前围绕航空的担忧，环境科学、噪声与排放中的一些特定学科也被包含在本套书中。



本套书由热心的、杰出的国际顾问委员会指导编写，委员会由 34 名来自学术界、工业界和研究中心的委员组成。在顾问委员会的指导下，我们确定了一个主要作者团队，由他们来确定每个主题覆盖的范围，并选择了有能力来贡献他们文章的合适的作者。

在本套书的引导章节中，包含了系统思想的概念和在可预见的未来航空航天工程师们将面临的挑战。在顾问委员会和主要作者团队的大力帮助下，我们试图包含有人、无人航空器和航天器领域中所有的主题，然而我们意识到还有一些重要的主题没有涉及，或是因为我们没有及时注意到它们，或是由于作者没能赶上最后的出版期限。我们打算将后续的投稿和最新的进展放在每年的在线更新中。

非常遗憾，我们的一位主题作者 Philip Pugh 于 2009 年 1 月去世了，他为第 37 部分的规划和前期实施做出了难以估量的贡献。我们也非常感谢 David Faddy 继续完成了这一部分的工作。

**Richard Blockley**

克兰菲尔德大学航空航天顾问，克兰菲尔德，英国

BAE 系统公司前技术总监，法恩伯勒，英国

**Wei Shyy**

密歇根大学航空航天工程系，安娜堡，密歇根州，美国

# 目 录



Contents



## 第9部分 基本概念

■ 第71章 基本概念：推进与动力	3
1 引言	3
2 历史	3
3 燃气涡轮发动机	5
3.1 燃气涡轮的历史	5
3.2 燃气涡轮的早期发展	6
3.3 性能	6
3.4 设计中的挑战	6
3.5 燃气涡轮制造商	7
4 未来的挑战	7
4.1 排放	8
4.2 燃料	8
4.3 噪声	9
5 新概念发动机	10
5.1 齿轮传动式涡扇(GTF)发动机	10
5.2 开放转子涡扇发动机	10
5.3 混合式发动机	10
6 结束语	11
参考文献	11
■ 第72章 升力、推力和飞行	12
1 力和运动	12
2 产生升力和推力的方法	13
2.1 自然界生物是怎么做到的(鸟类、昆虫和鱼)	13
2.2 人类是如何做到的(安装在机身上带有螺旋桨或者喷管的发动机)	15
3 关于推力的一些基本方程	17

4 总结	18
参考文献	18
■ 第73章 热力学原理	19
1 引言	19
2 基本定律	19
3 状态方程和状态参数关系	20
3.1 液体和固体	21
3.2 理想气体	22
4 实际过程中的功	22
5 循环	23
6 效率和焓	24
7 非平衡态热力学	25
8 未来趋势	26
参考文献	26
■ 第74章 推进系统循环	27
1 引言	27
2 基本概念	27
3 奥托循环	28
4 狄塞尔循环	30
5 布雷顿循环	31
6 汉弗莱循环	34
7 总结	35
参考文献	35
■ 第75章 化学平衡、动力学与燃烧	36
1 引言	36
2 化学动力学	38
2.1 简化化学反应机理	38
2.2 链式反应、支链反应与链终止反应	39
3 化学反应流	41



3.1 兰金-雨贡纽曲线 .....	42	7 冲压喷气发动机 .....	71
3.2 预混火焰 .....	42	8 超燃冲压发动机 .....	72
3.3 爆轰波 .....	43	9 总结 .....	72
3.4 火焰稳定性 .....	44	参考文献 .....	72
参考文献 .....	44	拓展阅读 .....	72
<b>第 76 章 多相动力学和排放</b> .....	<b>45</b>	<b>第 79 章 燃气涡轮发动机：进气道</b> .....	<b>73</b>
1 液体雾化和喷雾燃烧 .....	45	1 引言 .....	73
1.1 雾化 .....	45	2 几何术语 .....	73
2 扩散 .....	48	3 工作性能 .....	75
3 蒸发 .....	49	3.1 总压恢复 .....	75
4 燃烧 .....	49	3.2 进气阻力 .....	76
4.1 非挥发性燃料的燃烧 .....	50	4 相容性 .....	77
5 燃料和排放 .....	51	4.1 进气道畸变 .....	77
5.1 燃料 .....	51	4.2 流量匹配 .....	78
5.2 排放 .....	51	4.3 不起动和喘振 .....	78
5.3 燃料和工作特性 .....	52	5 进气道/机体一体化 .....	78
6 总结 .....	53	5.1 短舱 .....	78
符号列表 .....	53	5.2 遮挡进气道 .....	78
参考文献 .....	53	5.3 边界层隔道 .....	79
		6 研究动态和趋势 .....	79
		6.1 亚声速民用飞行 .....	79
		6.2 超声速民用飞行 .....	79
		6.3 军事飞行 .....	79
		6.4 高超声速飞行 .....	80
		7 总结 .....	80
		参考文献 .....	80
		<b>第 80 章 燃气涡轮发动机：压气机</b> .....	<b>81</b>
		1 引言 .....	81
		2 压气机的分类 .....	81
		2.1 正位移式压气机 .....	82
		2.2 动能式压气机 .....	83
		3 压气机的气动热力学过程 .....	86
		3.1 流动过程 .....	86
		3.2 热力过程 .....	87
		4 压气机的效率 .....	88
		4.1 等熵效率 .....	88
		4.2 多变效率 .....	88
		4.3 系统效率 .....	89
		5 压气机系统性能 .....	89
		5.1 性能曲线 .....	89
		5.2 比转速 .....	90
		6 结束语 .....	90
<b>第 10 部分 吸气式发动机概述</b>			
<b>第 77 章 容积式航空发动机简史</b> .....	<b>57</b>		
1 引言 .....	57		
2 容积式航空发动机的分类 .....	57		
2.1 直列发动机 .....	59		
2.2 旋转和静态星型发动机 .....	59		
2.3 V 型发动机 .....	60		
2.4 对置气缸发动机 .....	61		
2.5 其他航空发动机 .....	62		
3 一些科学知识 .....	63		
4 总结 .....	64		
符号列表 .....	65		
参考文献 .....	65		
<b>第 78 章 燃气涡轮发动机概述</b> .....	<b>66</b>		
1 引言 .....	66		
2 热力循环和效率的定义 .....	67		
3 涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机与桨扇发动机 .....	68		
4 加大推力——加力燃烧室 .....	70		
5 回热式燃气涡轮发动机 .....	70		
6 联合循环——地面燃气涡轮发动机 .....	71		



符号列表	91	5 总结	111
参考文献	91	符号列表	111
■ 第 81 章 有涵道与无涵道风扇	92	参考文献	111
■ 第 82 章 燃气涡轮发动机: 燃烧室	93	■ 第 84 章 燃气涡轮发动机: 涡轮冷却	113
1 引言	93	1 引言	113
2 通用形式与特性	93	2 气冷涡轮的设计	114
2.1 双壳的概念	93	3 气冷涡轮设计的基本组成	115
2.2 燃烧室的类型	94	4 外部高温燃气带来的涡轮冷却需求	116
2.3 传统燃烧室内部特性——参照图 1 加以说明	94	5 气膜冷却	116
3 燃烧	95	6 涡轮叶片的内部冷却	118
3.1 化学反应	95	7 燃烧室对涡轮冷却的影响	120
3.2 混气比对燃烧温度及反应率的影响	95	8 最终的设计	121
3.3 混合	96	参考文献	121
4 燃烧室工作过程	96	■ 第 85 章 内流空气系统和润滑系统	123
4.1 火焰稳定	96	1 引言	123
4.2 掺混过程	97	2 二次空气系统和润滑系统概述	123
4.3 压力损失	97	2.1 空气流路	124
4.4 混乱的内部流动	97	2.2 润滑流路	125
5 核心部件	97	3 内流空气系统和润滑系统的具体技术	125
5.1 燃料喷嘴	97	3.1 内流空气系统	125
5.2 火焰筒	99	3.2 润滑系统	130
6 现代低排放燃烧室	100	4 总结	131
6.1 RQL 燃烧室	100	参考文献	131
6.2 部分预混贫油燃烧混合燃烧室	101	■ 第 86 章 燃气涡轮发动机: 封严技术	132
7 总结	103	1 引言	132
参考文献	103	2 概述	132
■ 第 83 章 燃气涡轮发动机: 涡轮	104	3 静态封严	134
1 引言	104	3.1 金属封严	134
2 轴流涡轮的基本设计要点	104	3.2 金属布式密封	136
2.1 速度三角形	104	3.3 编织带式和热障涂层式封严	136
2.2 冲动式涡轮和反力式涡轮	105	4 动态封严	136
2.3 损失与效率	106	4.1 叶尖封严	136
2.4 设计方法概述	106	4.2 易磨材料	136
3 轴向涡轮中的三维流动	107	4.3 篦齿封严	138
3.1 二次流现象	107	4.4 刷式封严	139
3.2 叶尖泄漏流	108	4.5 端面密封	140
3.3 转子—静子相互干扰	109	4.6 油封	140
4 涡轮叶片的冷却设计方法	110	4.7 隔离密封	141
4.1 冷却空气射流现象	110	5 先进封严设计	141
4.2 气冷涡轮叶片的常规设计	110	5.1 接触式指尖封严	142
4.3 耦合计算设计技术	110	5.2 非接触式指尖封严	142
		5.3 柔顺片和薄片式封严	142



5.4 混合刷式封严 .....	142	4 减噪技术 .....	157
5.5 吸气式封严 .....	142	5 降噪技术将向什么方向发展? .....	159
5.6 微型凹坑封严 .....	143	6 结论 .....	159
5.7 轴承封严 .....	143	相关章节 .....	159
5.8 箔片气体封严 .....	143	参考文献 .....	159
5.9 防砂设计 .....	143	<b>■ 第 89 章 商用燃气涡轮发动机排放</b> .....	161
5.10 主动间隙控制 .....	143	1 引言 .....	161
6 寿命及极限 .....	143	1.1 EPA 空气质量标准 (AQS) .....	161
7 总结 .....	143	1.2 汽车与工业燃气轮机的减排 .....	162
参考文献 .....	144	2 推进发动机排放 .....	163
拓展阅读 .....	144	2.1 排放标准 .....	163
<b>■ 第 87 章 燃气涡轮发动机: 喷管</b> .....	145	2.2 低排放燃烧技术方案, LEC/RQL .....	163
1 引言 .....	145	2.3 LEC NO <sub>x</sub> 排放 .....	166
1.1 喷管作用 .....	145	2.4 LEC 碳氢排放 .....	167
1.2 收敛和收敛扩张喷管 .....	145	2.5 LEC 的 CO 排放 .....	168
2 喷管性能 .....	146	2.6 LEC 中 NO <sub>x</sub> /HC/CO 的减排均衡 .....	168
2.1 喷管流量 .....	146	2.7 LEC 的黑烟排放 .....	169
2.2 推力系数 .....	146	3 总结 .....	170
2.3 收敛喷管性能 .....	147	符号列表 .....	170
2.4 收敛—扩张 (C—D) 喷管性能 .....	147	参考文献 .....	170
2.5 其他损失机理 .....	148	<b>■ 第 90 章 超燃冲压发动机: 简单循环和组合循环</b> .....	172
2.6 外部阻力 .....	148	1 引言 .....	172
3 喷管分类 .....	148	2 超燃冲压发动机循环 .....	172
3.1 亚声速喷管 .....	148	2.1 理想循环 .....	174
3.2 超声速喷管 .....	149	2.2 性能分析 .....	175
3.3 高超声速喷管 .....	150	2.3 组合循环 .....	175
4 其他功能 .....	150	2.4 与组合循环相关的几个技术问题 .....	177
4.1 反推力装置 .....	151	3 总结 .....	178
4.2 推力矢量技术 .....	151	符号列表 .....	179
4.3 噪声与消声 .....	151	相关章节 .....	179
4.4 红外隐身 .....	151	参考文献 .....	179
5 喷管的设计、分析和测试 .....	152	<b>■ 第 91 章 超声速掺混与燃烧</b> .....	180
5.1 设计 .....	152	1 引言 .....	180
5.2 分析 .....	152	2 燃料—空气掺混 .....	180
5.3 测试 .....	152	2.1 平行、不受限、可压缩流 .....	180
6 总结 .....	153	2.2 有夹角的或横向交叉流的掺混 .....	181
符号列表 .....	153	2.3 掺混加强 .....	182
参考文献 .....	153	3 化学动力学——反应机理 .....	183
<b>■ 第 88 章 商用燃气涡轮发动机噪声</b> .....	154	3.1 氢—空气燃烧的简化机理 .....	183
1 引言 .....	154	3.2 碳氢燃料反应机理 .....	183
2 推进系统噪声源 .....	155		
3 噪声法规 .....	156		





4 总结 .....	184	8 结论 .....	213
符号列表 .....	184	符号列表 .....	213
参考文献 .....	185	参考文献 .....	214
<b>■ 第 92 章 新概念吸气式推进技术 .....</b>	<b>186</b>	<b>■ 第 95 章 固体火箭发动机历史概述与基本原理 .....</b>	<b>215</b>
1 引言 .....	186	1 引言 .....	215
2 亚声速推进 .....	186	2 技术概述 .....	215
3 超声速推进 .....	187	2.1 推进剂/药柱 .....	216
4 高超声速推进 .....	188	2.2 壳体 .....	216
5 关键技术 .....	188	2.3 喷管 .....	216
6 外骨架发动机 (ESE) .....	189	2.4 点火器 .....	216
7 磁流体控制的涡喷发动机 (磁流体能量分流) .....	190	3 固体火箭发动机基本原理 .....	217
8 ATREX 发动机: 最近进展 .....	191	4 现代固体火箭筒史 .....	217
9 组合循环发动机 .....	192	5 总结 .....	221
10 总结 .....	194	注释 .....	221
参考文献 .....	194	延伸阅读 .....	221
<b>■ 第 93 章 冲压加速器 .....</b>	<b>196</b>	<b>■ 第 96 章 固体推进剂 .....</b>	<b>222</b>
1 引言 .....	196	1 引言 .....	222
2 工作原理 .....	198	2 固体推进剂性能和组分 .....	222
3 实验设备与结果 .....	200	2.1 燃料和氧化剂 .....	223
4 带挡板的管式冲压加速器 .....	202	2.2 黏合剂 .....	223
5 计算建模 .....	203	2.3 燃速催化剂 .....	223
6 结论 .....	203	2.4 增塑剂 .....	224
符号列表 .....	204	2.5 固化剂 .....	224
相关章节 .....	204	2.6 其他添加剂 .....	224
参考文献 .....	204	3 固体推进剂的分类 .....	224
		3.1 均质固体推进剂 .....	224
		3.2 异质推进剂 .....	225
		4 固体推进剂的燃烧 .....	226
		4.1 燃烧波的结构 .....	226
		4.2 燃烧特性 .....	227
		4.3 固体推进剂的点火 .....	229
		5 总结 .....	229
		符号列表 .....	229
		参考文献 .....	230
		<b>■ 第 97 章 固体推进: 内弹道建模和设计 .....</b>	<b>231</b>
		1 引言 .....	231
		1.1 固体推进剂 .....	232
		1.2 燃烧室压强 .....	233
		1.3 推进剂形态 .....	233

## 第11部分 火箭推进

<b>■ 第 94 章 火箭推进: 基本概念及简介 ..</b>	<b>209</b>
1 引言 .....	209
2 分类 .....	209
3 基本方程 .....	210
3.1 推力方程 .....	210
3.2 火箭推进性能参数 .....	211
4 热力学关系 .....	211
5 喷管类型 .....	211
6 多级火箭 .....	212
7 其他问题 .....	213
7.1 火箭的稳定性 .....	213
7.2 发动机冷却 .....	213