

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中航工业科技与信息化部组织编写

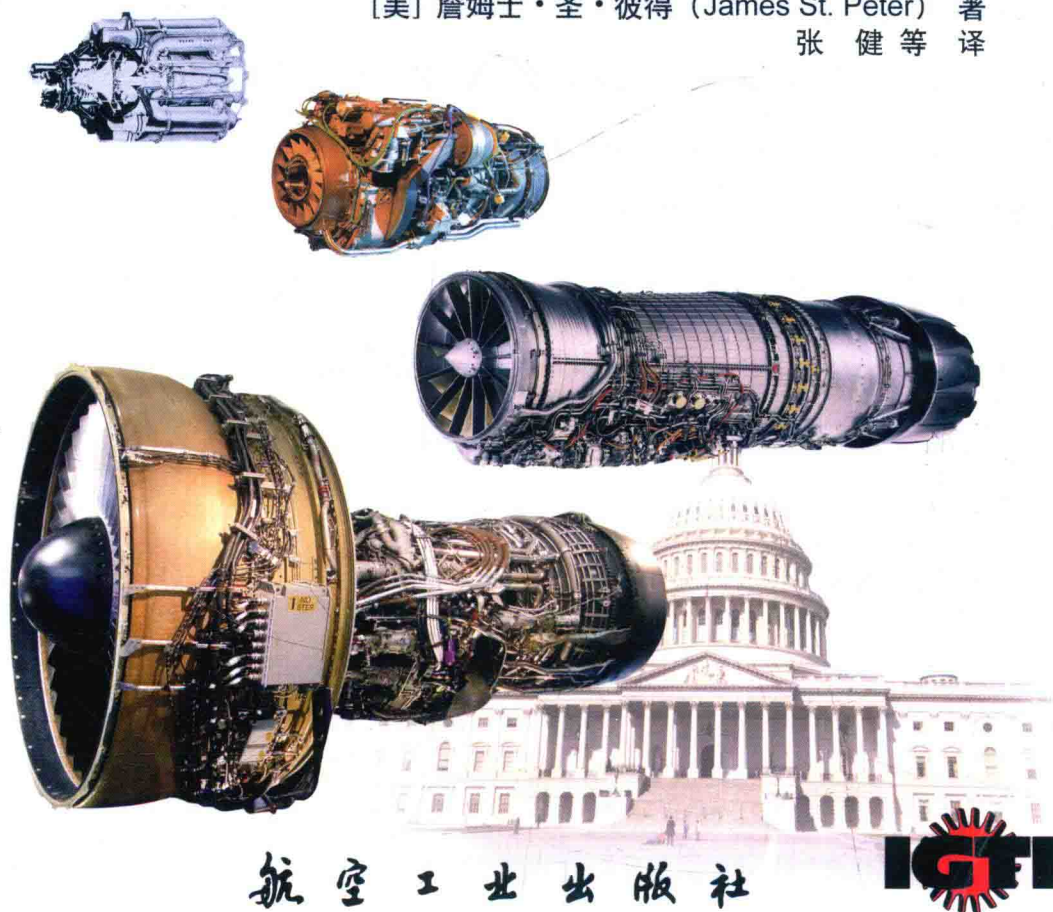


航空发动机出版工程

美国飞机燃气涡轮发动机发展史

The History of Aircraft Gas Turbine Engine
Development in the United States:
A Tradition of Excellence

[美] 詹姆斯·圣·彼得 (James St. Peter) 著
张健等译



航空工业出版社



“十二五”国家重点图书出版规划项目

航空发动机出版工程

美国飞机燃气涡轮 发动机发展史

[美] 詹姆士·圣·彼得 (James St. Peter) 著

张健等译

本书英文版由



美国空军



美国陆军



美国海军



美国国家航空航天局



燃气涡轮研究院 (IGTI)



航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书用讲故事的方式,系统介绍了美国航空燃气涡轮发动机自诞生之日起到20世纪末,50多年的发展历史,对经典飞机用燃气涡轮发动机,包括涡喷发动机、涡扇发动机、涡轴发动机和涡桨发动机及其技术的发展过程进行了详尽的介绍。

本书包括大量历史事件、数据、人物和图片,复现了美国燃气涡轮发动机发展过程中的许多有趣事件,引人入胜,被称为“是一份关于飞机燃气涡轮发动机发展的非常高水平的、经过充分研究的历史资料,对任何一位对燃气涡轮发动机感兴趣的人来说都是一本难得的‘必读书’”。

图书在版编目(CIP)数据

美国飞机燃气涡轮发动机发展史 / (美)彼得
(Peter, J. S.) 著; 张健等译. -- 北京: 航空工业出版社, 2016. 1

书名原文: The History of Aircraft Gas Turbine
Engine Development in the United States: A
Tradition of Excellence

航空发动机出版工程

ISBN 978-7-5165-0936-4

I. ①美… II. ①彼… ②张… III. ①航空发动机—
燃气轮机—历史—美国 IV. ①V235.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第281848号

北京市版权局著作权合同登记
图字: 01-2015-5373

The Chinese edition will include an acknowledgement of ASME as publisher and copyright owner in the work, as follows: Original Edition Copyright 2000 by The American Society of Mechanical Engineers.

美国飞机燃气涡轮发动机发展史
Meiguo Feiji Ranqi Wolun Fadongji Fazhanshi

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016年1月第1版

2016年1月第1次印刷

开本: 710×1000 1/16

印张: 51

字数: 808千字

印数: 1—3000

定价: 128.00元

《航空发动机出版工程》编委会

主 任：林左鸣

常务副主任：谭瑞松

副主任：张新国 李方勇

委 员：陈元先 杨圣军 魏金钟 丁 俊 庞 为
王英杰 王之林 张 健

《航空发动机出版工程》专家委员会

主 任：刘大响

副主任：郭恩明

委 员：陈 浚 唐智明 周晓青 彭友梅 张皖南
张恩和 严成忠 杨士杰 李概奇 怀寿章
殷云浩 吴学仁 江和甫 江义军 马光辉
胡晓煜

编委会办公室

主 任：魏金钟

副主任：陈 刚 焦 鹤 刘 鑫

成 员：王晓文 向 明 潘陆原 王 伟 胡晓煜
彭友梅 姜向禹 石 英 龙明灵 刘 宁
王少雄

总 序

自 1903 年 12 月 17 日人类首次实现有动力飞行以来，航空事业获得了迅猛发展，极大地促进了人类社会文明的进步，对世界各国的政治、经济和军事都产生了深远的影响。航空发动机作为飞机的“心脏”，不仅是飞机飞行的动力，也是促进航空事业发展的重要推动力，人类航空史上的每一次重要变革都与航空发动机的技术进步密不可分。飞机进入喷气时代始于涡轮喷气发动机的发明，飞机突破声障、实现马赫数 2 和马赫数 3 的飞行主要是由于加力式大推力发动机的出现；飞机实现垂直起降则仰仗于可旋转喷管发动机的研制成功；巨型宽体客机的问世更少不了大涵道比、大推力的涡扇发动机；第四代战斗机的超声速巡航和超机动性主要是依靠发动机的高推重比和矢量喷管。

经过百余年的发展，航空发动机已经发展为可靠性极高的成熟产品，正在使用的航空发动机包括涡轮喷气/涡轮风扇发动机、涡轮轴/涡轮螺旋桨发动机、冲压发动机和活塞式发动机等多种类型，不仅作为各种用途的军民用飞机、无人机和巡航导弹动力，而且利用航空发动机派生发展的燃气轮机还广泛用于地面发电、船用动力、移动电站、天然气和石油管线泵站等领域。航空发动机的发展也极大地带动了机械制造、电子、控制、材料和石油化工等相关产业的发展，带来了巨大的收益。目前，

全球飞机发动机及其零部件制造业的收入已占航空制造业总收入的 40% 左右，年收入超过 1000 亿美元，到 2015 年将达到 1220 亿美元，人均年收入 35 万美元，仅美国从事航空发动机及零件制造的公司就有 1000 多家，年收入超过 600 亿美元。

进入 21 世纪，航空发动机正在进一步加速发展，将为人类航空领域带来新的更大变革。目前，传统的航空发动机正在向齿轮传动发动机、变循环发动机、多电发动机、间冷回热发动机和开式转子发动机发展，非传统的脉冲爆震发动机、超燃冲压发动机、涡轮基组合发动机，以及太阳能动力和燃料电池动力等也在不断成熟，这些发动机的发展将使未来的航空器更快、更高、更远、更经济、更可靠，并能够满足更加严格的环保要求，并将使高超声速航空器、跨大气层飞行器和可重复使用的天地往返运输成为现实。

但是，航空发动机的发展绝非易事，作为人类科学技术发展的最高端产品之一，航空发动机被誉为“工业之花”“皇冠上的明珠”，具有技术难度大、风险高、耗资多、周期长等特点，要求在相关的工程技术领域具备雄厚的基础和丰富的实践经验积累，是一个国家工业基础、综合国力和科技水平的集中体现。美国将航空发动机技术描绘为：“它是一个技术精深得使新手难以进入的领域，它需要国家充分保护并稳定利用该领域的成果，长期的专门技能和数据的积累，以及国家大量的投资。”法国将航空发动机工业描绘为：“航空发动机工业是一个与众不同的工业，是当代尖端技术的标志。进入这个竞技场的顶级‘玩家’数量非常有限，其门槛设置得比其他航空专业更高，这意味着竞争者进入的难度更大。”目前，能够独立研制航空发动机的只有美国、英国、俄罗斯、法国和中国等少

数国家。

我国航空发动机工业起步并不晚，在中华民国时期就曾试图建立航空发动机工业，中华人民共和国成立后，我国于1951年开始建立航空发动机修理厂，经过60多年几代航空人的艰苦努力，如今我国已建成比较完整的航空发动机科研、生产体系，研制生产出了6万多台航空发动机，已进入世界少数能够独立研制航空发动机的国家行列。但是，我国航空发动机在技术水平和产品研制方面与先进国家还存在很大差距，学习国外航空发动机的先进发展经验，对我国航空发动机的发展势必起到良好的借鉴作用。

中国航空工业集团公司组织出版《航空发动机出版工程》的目的是为广大读者提供一个全面了解世界航空发动机发展历史、现状和未来的平台，使读者对航空发动机的基本概念和工作原理有更科学、系统的认识，对国外航空发动机的产品发展经验、组织管理方法和技术发展路线有更深刻的理解，对航空发动机发展对国防建设和国民经济发展的必要性有更充分的重视，以唤起广大读者对航空发动机事业的关注和热爱，并积极投身到这项光荣而伟大的事业中来。期望这套丛书能够为中国航空发动机的人才培养，航空发动机的科研、生产和使用提供参考和借鉴，为中国航空发动机事业的更大发展做出贡献！



中国航空工业集团公司董事长

2013年3月

译者序

本书由美国机械工程师协会国际燃气涡轮研究院于 1999 年出版，美国空军研究实验室推进部燃气涡轮发动机分部组织编写，美国空军、陆军、海军和国家航空航天局提供资助。主要作者是詹姆斯·圣·彼得（1956— ）。

本书在编写过程中，查阅了空军博物馆、国家航空航天博物馆、GE 公司档案馆的大量历史档案，对艾利逊、加雷特、普惠、GE、罗罗、莱康明、西屋电气、太阳和其他公司多位专业人士进行了访谈，其中的部分章节由作者与空军研究所、NASA 格林研究中心的专业人士共同完成。

本书以叙述方式详细介绍了美国航空燃气涡轮发动机自诞生之日起到 20 世纪末 50 多年的发展历史，对若干种经典飞机燃气涡轮发动机，包括涡喷发动机、涡扇发动机、涡轴发动机和涡桨发动机及其技术的详尽发展过程。完整讲述了惠特尔和英国早期喷气发动机的发展，非常详细地介绍了这一技术向美国 GE 公司的转移过程，以及 GE 公司和普惠公司的喷气发动机发展，也介绍了早期德国喷气发动机的发展。对西屋电气到 J34 发动机以前的涡轮发动机发展有较详细的介绍，但对于导致西屋电气退出飞机涡轮发动机业务的 J40 和 J46 发动机的发展描述不多。关于涡扇发动机的最初发展也仅在普惠公司一章

中的一节中进行了介绍。

本书包括大量的历史事件、数据、人物和图片，再现了美国喷气发动机发展历程中的许多有趣事件，引人入胜，被称为“是一份关于飞机燃气涡轮发动机发展的非常高水平的、经过充分研究的历史资料，对任何一位对喷气发动机感兴趣的读者来说都是一本难得的‘必读书’”。

本书由中航工业集团公司发动机工程部组织翻译，张健部长提出翻译本书的建议，并对全书译稿进行了认真审校，参与翻译的人员有中航工业集团公司发动机工程部胡晓煜，中航工业 606 所梁春华、刘殿春、李彩玲、姚博、孟令扬、徐秋实、索德军、张世福，中航工业 624 所郭琦、王巍巍、郑天慧、沈虹、陈玉洁、李茜、陈小丽、王乐、钟滔、曾海霞、周军，中航工业 608 所周辉华、吴军华、弓可、石真，中航工业 614 所高秋颖、陈美娟、雷雷，中国空天动力研究院李雅峰、刘奇，航天科工 31 所张雅凤、汤华，北京航空航天大学金捷、刘邓欢。在此，对他们的辛苦工作表示感谢！

译者

谨以本书纪念弗兰克·惠特尔爵士、汉斯·冯·欧海恩博士及所有该领域的伟大先驱，在此对他们致以诚挚的感谢！

前 言

在美国飞机燃气涡轮发动机发展史上，技术进步都可以追溯到某型发动机的衍生。每个经过实践检验的发动机都显示了关键技术的重大进步。尽管以往发展的所有飞机发动机在技术上都存在一些差异，但在作者看来，这种差异都清楚地说明每代发动机在前一代技术上的不断进步。这些美国制造的涡轮喷气发动机比任何我们能够了解到的发动机对美国飞机燃气涡轮发动机的使用产生更大的影响。唯一的例外是本书讨论的4款英国发动机，包括第二次世界大战中从英国引入、后成为GE I-A原型机的惠特尔发动机，引领普惠公司进入喷气发动机行业的英国德温特（Derwent）、泰（Tay）发动机，以及“飞马”（Pegasus）发动机。“飞马”发动机更是唯一的有独立章节进行介绍的非美国发动机。因为它不仅代表了最好的矢量推力技术，并且是美国海军陆战队“鹞”式（Harrier）战斗机的标配发动机。

推进技术一直是航空技术成功发展的关键所在。而推进技术的发展则依赖于空气动力学、热力学以及材料科学的发展。所有这一切将作为航空燃气涡轮发动机技术中的一部分在本书中予以讨论。需要指出的是，尽管“航空燃气涡轮发动机”是用来描述整体技术的一个专有名词，但是像“涡轮喷气发动机”“涡轮螺旋桨发动机”“涡轮轴发动机”“涡扇发动机”

“喷气发动机”也是用来描述这一技术的常用术语。为了帮助理解主题，我们将使用所有这些名词，并在适当的地方区分其差异。

为缩小涉及的许多公司、众多产品相关的技术领域，本书只讨论涡轮喷气发动机、涡轮螺旋桨发动机、涡轴发动机、涡扇发动机。另外，为了呈现更多关于这方面的历史，对本书正文中没有介绍到的大量其他发动机，将在本书相对综合的附录部分介绍。尽管冲压发动机技术的发展历程并不像燃气涡轮发动机那样富有传奇性，但是不能否认在这一推进领域仍然取得了实质性的进步。然而，冲压式喷气发动机发展历程并不在本书的讨论范围内。

也许你会问，为什么要在现在介绍这段历史？罗伯特·施莱弗（Robert Schlaifer）的著作主要介绍1949年前的螺旋桨生产企业，当时，燃气涡轮技术正处于萌芽阶段。需要在其基础上介绍飞机燃气涡轮发动机的历史。随着弗兰克·惠特尔（Frank Whittle）爵士（1907—1996）和汉斯·冯·欧海恩（Hans von Ohain）博士（1911—1998）最近去世，早期的行业开拓者又年事已高，并且由于发动机研制与制造能力的整合，许多档案资料的丢失，接触关键当事人和相关材料的不再可能。本书手稿中的主体部分是一手及二手研究资料的结合，包括一些个人的访谈以及一些口述历史。我们尽可能的去验证这些回忆的真实性，但是仍然有一些情况可能与事实有出入。我们希望我们的工作能为后人抛砖引玉，促进这方面历史研究的进一步发展。

当你回顾喷气发动机过去60年的发展历史时，你会发现，杰出的成功案例要比不幸失败的案例多得多。喷气发动机行业

的容错性很差，这些复杂产品不断增加的设计、研究和制造成本不允许企业出现代价高昂的失误。所以在大多数情况下，工程师和工人们必须实现一次成功，或者接近成功，尽量避免错误的发生。事实上，他们也做到了！因此，航空燃气涡轮发动机过去60年的发展历程实现了卓越的传统。这些卓越的人为这本书的撰写提供了极大的帮助。

我在撰写本书的过程中，得到了很多人的帮助。特别要感谢以下这些人：沃尔特·欧布朗（Walter O'Brien）博士，唐纳德·希尔（Donald Hill），A. 斯图尔特·“平头”·阿特金森（A. Stuart “Butch” Atkinson），汉克·莫罗（Hank Morrow），唐纳德·威德亨耐（Donald Widehuner），斯托里·麦克亚当斯（Stoney MacAdams），唐纳德·C. 伯基（Donald C. Berkey），威廉·特拉弗斯（William Travers），比尔·罗德保夫（Bill Rodenbaugh），哈维·李普因卡特（Harvey Lippincott），罗伯特·迈耶（Robert Meyer），理查德·科尔（Richard Cour），威廉·布朗（William Brown）；GE公司档案部的埃里克·福尔克（Eric Falk）提供了非常重要的帮助；雷·斯坦德哈尔（Ray Standahar），伊凡·布什（Ivan Bush），J. 罗伯特·哈姆（J. Robert Hamm），沃尔特·莫伊（Walter Moe），罗伯特·E. 史密斯（Robert E. Smith），埃德·霍恩（Ed Horn），彼得·特拉姆（Peter Tramm），理查德·阿尔波福（Richard Alpaugh），皮特·斯特朗斯（Pete Stranges），马尔沃·德姆勒（Marv Demler）少将，安塞尔姆·弗朗兹（Anselm Franz）博士，萨姆·威廉姆斯（Sam Williams）博士，那些来自于艾利逊、加雷特、普惠、GE、罗罗、莱康明、西屋电气、太阳以及其他公司善良的、富有合作精神的人们，他们的访谈

对本段历史的编写有很大帮助。感谢汉斯·冯·欧海恩 (Hans von Ohain) 博士对我的指导和鼓励。另外, 感谢理查德·希尔 (Richard Hill) (美国空军研究所) 和卡罗尔·拉索 (Carol Russo) 博士、阿鲁恩·塞荷拉 (Arun Sehra) 博士和丹尼尔·西科斯基 (Daniel Sokolowski) (NASA 格伦研究中心) 的团队在撰写“研究与技术重点”一章时的特殊帮助。还要特别感谢弗雷德·奥利弗 (Fred Oliver), 他在搜集世界上各种航空燃气涡轮发动机最好的剖视图方面做出了巨大贡献。另外, 需要特别指出本书主要的资助者: 美国空军、海军、陆军, NASA 和美国机械工程师协会国际燃气涡轮研究院, 是他们的不断帮助使得本书得以顺利完成。另外我还要感谢那些审阅了本书草稿无数遍的编辑及审稿人: 克维恩·马赫 (Kervyn Mach) 博士, 鲍伯·亨德森 (Bob Henderson), 戴夫·林赛 (Dave Lindsay), 杰伊·欧利尔 (Jay O'Leary), 乔治·赛弗 (George Serovy) 博士, 以及小乔治·奥普德克 (George Opdyke Jr.), 还有一些就不在此一一列举了。我还要特别感谢以下人员以及国际燃气涡轮研究院的工作人员在行政和技术上给予我的支持, 他们是: 帕梅拉·克尼 (Pamela Kearney), 凯瑟琳·格里尼 (Kathleen Greaney), 罗斯·米德拉塔 (Rose Mediratta), 玛丽亚·斯科亨 (Maria Schohn), 凯茜·奥特罗 (Kathy Otero), 安吉拉·阿尔代尼 (Angela Al-Dineh), 杰里卡·布莱克本 (Jessica Blackburn), 威廉·麦卡迪 (William McCuddy), 托尼·德洛克 (Toni DeLoach), 詹尼斯·马赫 (Janice Mach), 莱斯利·施沃姆 (Leslie Schworm) 和丹尼尔·施利德 (Dianne Schread), 没有他们的帮助, 这本书是不可能完成的。我还要感谢美国空军博物馆的

戴夫·梅纳德 (Dave Menard) 以及国家航空航天博物馆所提供的照片。最后，我还要特别感谢马文·史蒂比奇 (Marvin Stibich)，是他带我走进了航空涡轮发动机历史的研究领域，陪伴我经历了撰写本书时遇到的种种困难直到最后完成本书。另外，不得不说马文的耐心真的很好。

詹姆士·圣·彼得

美国机械工程师协会国际燃气涡轮研究院很高兴能够赞助燃气轮机历史书籍出版。我们相信这对燃气轮机历史文档的编制会有很大的帮助。我们对此书给予了最大程度上的关注及时间精力上的投入。我们希望此书能得到读者衷心的感谢。

国际燃气涡轮研究院理事会

简 介

在美国军用和商用/民用航空的发展历史上，政府和企业的关系一直都非常密切。美军一直是飞机及飞机发动机制造商的最大客户，他们的优先级及需求一直在这个行业的产品上得到体现。活塞航空发动机及燃气涡轮航空发动机的演变一直都受政府和企业的关系影响，他们之间稳定的给予和索取的关系促进了航空发动机行业的进步。美国政府根据其军用飞机及其发动机的需求，不断地设定新的行业发展目标。这种政府与行业的相互关系的聚焦点在海、陆、空三个军种的建立。另外，美国国家航空航天局（NASA，1958—）和它的前身国家航空咨询委员会（NACA，1915—1958）的成立对飞机和发动机的发展也有着深远的影响，但主要集中在商业应用上。这一点在飞机和活塞航空发动机发展的初期以及燃气涡轮航空发动机发展的前60年表现得较为明显。今天，美国已经成为全球商用飞机及航空涡轮发动机发展的全球领导者。事实上，这个国家的商业企业在促进商用空中运输行业的飞速发展方面发挥了重要作用。触发这一发展的许多开创性工作，不只是一小部分，主要来自于军方的赞助项目发展而成，这在本书中会详细说明。

NASA/NACA 赞助的研究主要集中在商用技术领域，主要针对非常前沿的航空技术概念以及改善行业设计分析系统。另

外，政府还建造并维护了许多专用的世界仅有的试验设施，包括用以支持飞机及其推进系统技术开发所需的风洞。这样的试验条件无论是对军队还是生产商都大有裨益。

从60年代中期开始，位于俄亥俄州克利夫兰的NASA格林研究中心，即原来的刘易斯研究中心，为开发高效环保的燃气轮机做了大量的工作，并取得了可观的成果。NASA赞助的研究促进了新型涡扇发动机部件、材料、分析方法、低排放燃烧技术以及降噪技术的产生。

军用和商用航空产品开发的环境不同，当军队研制飞机、系统和部件时，这些是完全受控的，因为军方设置了需求，然后，按照设想的方式使用这些装备。相反，NASA向制造商提供一些新的研究成果与技术，希望他们将其应用到产品中。同样，政府的一些其他机构，如环境保护局（EPA）和联邦航空管理局（FAA），会设定一些他们希望制造商能够达到的标准。NASA的职能就在于开发新的技术来帮助制造商达到其他政府机构所制定的标准。

罗伯特·施莱弗在其1949年出版的《飞机发动机的发展》（Development of Aircraft Engines）一书中就很好地阐释了他认为的在航空领域政府与企业的关系。这一发现是在“军工复合体”一词流行起来之前。施莱弗研究了从第一次世界大战（简称一战）前到第二次世界大战（简称二战）前发明涡轮喷气发动机这段时间内的航空发动机的发展历史。他的研究以美国及英国为样本，主要集中在政府与企业的相互作用对航空领域发展的影响。他关于涡轮喷气发动机发展史的研究范围也包括了二战前及二战中的德国。

施莱弗在他的著作中，开篇即提到了他认为美国政府是美