

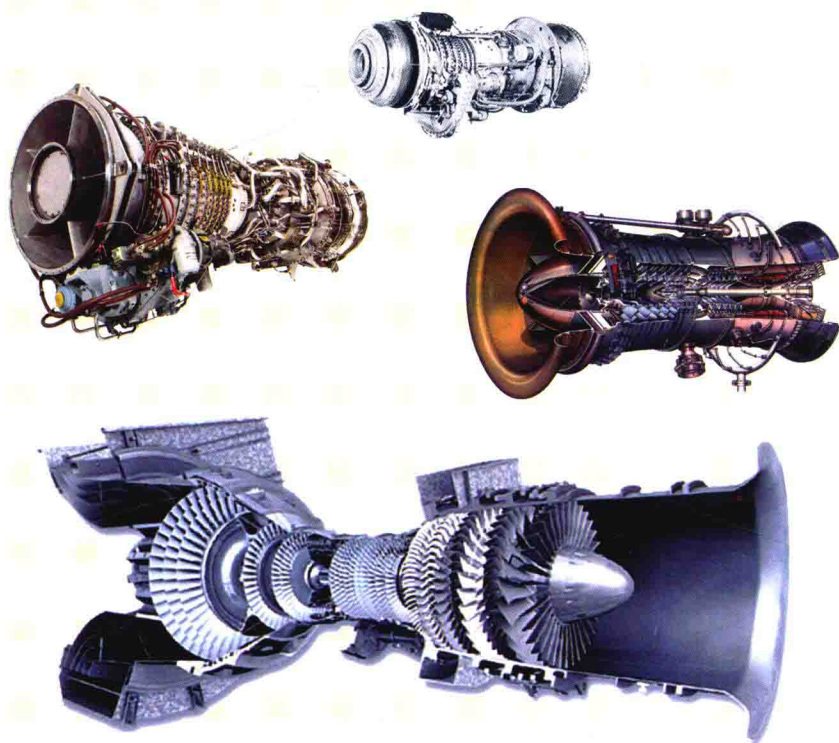
“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写



世界航改燃气轮机的发展

Worldwide Aeroderivative Gas Turbine Development

李孝堂 主编



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

世界航改燃气轮机的发展

李孝堂 主编

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书是介绍美国、英国等国家航改燃气轮机发展的综述性专业技术读物。概括介绍了燃气轮机工业发展历程；详细介绍了典型航改燃气轮机的发展现状和特点；综述了燃气轮机预先研究计划；概括、总结了燃气轮机技术、产品和产业发展趋势。

本书可供燃气轮机行业及相关领域的管理、研发和教学人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

世界航改燃气轮机的发展 / 李孝堂主编. -- 北京 :
航空工业出版社, 2017. 1

航空发动机出版工程

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1153 - 4

I. ①世… II. ①李… III. ①航空发动机—燃气轮机
—研究—世界 IV. ①V235. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 299385 号

世界航改燃气轮机的发展
Shijie Hanggai Ranqilunji de Fazhan

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

北京艾普海德印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017 年 1 月第 1 版

2017 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 25.75

字数: 608 千字

印数: 1—3000

定价: 88.00 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发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！

林左鸣

中国航空工业集团公司董事长

2013年3月

《世界航改燃气轮机的发展》编委会

主 编 李孝堂

副 主 编 梁春华 张世福 索德军 尹家录

编写人员 梁春华 张世福 索德军 刘殿春 杨东丹

孙明霞 刘国库 邹迎春 刘 静 刘红霞

徐秋实 兰海青 杨芳菲

编 辑 张世福

前 言

由于与航空发动机同样具有重量轻、功率大、污染小、起动快、加速性好和可靠性高等相似的技术要求,以及随着第二次世界大战后航空发动机技术快速发展和产品不断成熟,燃气轮机主要采用“轻型燃气轮机由成熟航空发动机改型研制,重型燃气轮机移植航空发动机技术研制”的发展途径进行大力开发和应用。

为了满足市场需求,世界知名航空发动机公司由航空发动机改型研制了四代轻型燃气轮机,收到了投资少、周期短、见效快、效率高、经济性好、可靠性高和使用维护方便的效果。

航空燃气涡轮发动机应用于非航空领域始于20世纪40年代末。此时工业燃气轮机单独开发,技术发展很慢。1950年,英国利用成熟航空燃气涡轮发动机“海神”成功改型为舰用燃气轮机,在“勇敢”号快艇上试航获得成功,皇家海军开始将注意力转向航机改型,并于1967年做出“今后大中型水面舰艇将以燃气轮机为动力”的历史性决策。从60年代起,英国、美国及苏联等国先后将各种类型的航空发动机改型为轻型燃气轮机,用于工业发电、舰船推进、油/气输送等方面,形成了第一代航改燃气轮机,至70年代获得广泛的推广应用,典型的有埃汶(Avon)、奥林帕斯(Olympus)、苔茵(Tyne)、TF4等,其压比已达14,涡轮进口温度达1050℃,效率达30%;在70—80年代先后由大流量比的涡扇发动机RB211、CF6、JT9D、TF39、JT8D、F404、PS-90A等派生出压比达20,效率达36%~42%的第二代航改燃气轮机,其典型代表是LM2500、LM5000、RB211、斯贝、FT8、LM1600等;80—90年代,由CF6-80C2、遛达(Trent)、GE90、PW4000等大型航空发动机派生出第三代航改燃气轮机,其压比达25,效率达42%,涡轮进口温度达1450℃左右,其典型代表有工业用遛达、501F、FT4000、V84-3A、WR-21等。美国于2003年开始研制的LMS100航改燃气轮机继承了CF6-80C2/E1航空发动机和重型燃气轮机技术,压比达42,效率达46%,成为第四代航改燃气轮机的代表。

目前,国内外从业于航改燃气轮机管理、科研、试验、生产、使用、维

护的单位和人员众多，而系统介绍航改燃气轮机现状、预研计划、发展趋势的书籍却少之又少，有必要出版一本全面介绍世界航改燃气轮机现状与发展趋势的书籍。因此，我们特撰写《世界航改燃气轮机的发展》一书，力求为从事航改燃气轮机研究和管理人员提供借鉴与参考。

本书共4篇22章，由中航工业沈阳发动机设计研究所组织编写，副所长李孝堂主编，梁春华、张世福、索德军、尹家录副主编。

第1篇共4章，主要介绍燃气轮机原理和分类、航改燃气轮机的选型与改型原则以及航改燃气轮机的技术特点与重要地位。由梁春华、刘国库、索德军、刘静、孙明霞、杨芳菲编写。

第2篇共12章，主要概述14型典型航改燃气轮机的发展历程，具体包括各型燃气轮机的研制历程、性能参数、结构特点、技术特点等。由梁春华、张世福、索德军、杨东丹、孙明霞、邹迎春编写。

第3篇共3章，主要综述了美国、日本和欧洲各国开展的燃气轮机先进技术预研计划。由张世福、孙明霞、刘红霞、徐秋实编写。

第4篇共3章，主要总结了航改燃气轮机技术、产品、产业等三方面的发展趋势。由梁春华、刘殿春、索德军、刘红霞、孙明霞、张世福、刘国库、兰海青、杨芳菲编写。

同时感谢科技情报档案中心情报组、文献组在资料搜集、撰写过程中提供的帮助。

因本书的参考资料全部来自公开渠道，书中错误和曲解之处在所难免，敬请读者批评指正。

李孝堂

2016年4月11日

目 录

第 1 篇 航改燃气轮机概述

第 1 章 燃气轮机原理和分类	(3)
第 2 章 航改燃气轮机选型与改型原则	(5)
2.1 航空发动机选型原则	(5)
2.2 改型原则	(5)
第 3 章 航改燃气轮机的优势与重要地位	(11)
3.1 航改燃气轮机的优势	(11)
3.2 航改燃气轮机的重要地位	(13)
第 4 章 航改燃气轮机发展历程	(16)
4.1 美国	(17)
4.2 英国	(22)
4.3 俄罗斯/乌克兰	(25)
4.4 中国	(31)

第 2 篇 典型航改燃气轮机发展现状

第 5 章 美国 GE 公司 LM1600 燃气轮机	(37)
5.1 引言	(37)
5.2 研制历程	(37)
5.3 性能参数	(40)
5.4 结构特点	(41)
5.5 结束语	(50)
第 6 章 美国 GE 公司 LM2500 燃气轮机	(51)
6.1 引言	(51)
6.2 研制历程	(51)
6.3 燃气轮机性能	(56)
6.4 燃气轮机结构	(62)

6.5 结束语	(76)
第7章 美国 GE 公司 LM6000 燃气轮机	(78)
7.1 引言	(78)
7.2 研制历程	(78)
7.3 性能参数	(80)
7.4 结构特点	(82)
7.5 技术特点	(87)
7.6 结束语	(90)
第8章 美国 GE 公司 LMS100 燃气轮机	(91)
8.1 引言	(91)
8.2 研制历程	(91)
8.3 燃气轮机性能	(97)
8.4 燃气轮机结构	(98)
8.5 燃气轮机特点	(105)
8.6 结束语	(108)
第9章 美国普惠公司 FT8 燃气轮机	(109)
9.1 引言	(109)
9.2 研制历程	(109)
9.3 性能参数	(112)
9.4 结构特点	(113)
9.5 特种涂层和加工技术	(116)
9.6 结束语	(126)
第10章 美国普惠公司 FT4000 燃气轮机	(127)
10.1 引言	(127)
10.2 烧天然气 HAT 循环参考系统的设计和参数选择	(128)
10.3 NGHAT 燃气轮机参考系统	(134)
10.4 水分回收和羽烟传播	(143)
10.5 HAT 循环高输出功率的解释	(144)
10.6 结论	(146)
第11章 英国罗罗公司斯贝燃气轮机	(147)
11.1 引言	(147)
11.2 研制历程	(147)
11.3 性能参数	(149)

11.4	结构特点	(150)
11.5	结束语	(160)
第 12 章	英国罗罗公司工业用奥林帕斯燃气轮机	(161)
12.1	引言	(161)
12.2	研制历程	(161)
12.3	性能参数	(165)
12.4	结构特点	(166)
12.5	结束语	(171)
第 13 章	英国罗罗公司工业用 RB211 燃气轮机	(173)
13.1	引言	(173)
13.2	研制历程	(173)
13.3	性能参数	(175)
13.4	结构特点	(176)
13.5	技术特点	(179)
13.6	结束语	(179)
第 14 章	英国罗罗公司工业用遑达燃气轮机	(181)
14.1	引言	(181)
14.2	研制历程	(181)
14.3	性能参数	(186)
14.4	结构特点	(188)
14.5	技术特点	(192)
14.6	结束语	(192)
第 15 章	英国罗罗公司 WR-21 燃气轮机	(194)
15.1	引言	(194)
15.2	研制历程	(194)
15.3	燃气轮机设计	(199)
15.4	WR-21 燃气轮机试验验证	(218)
15.5	技术特点	(245)
15.6	结束语	(246)
第 16 章	英国罗罗公司 MT30 燃气轮机	(247)
16.1	引言	(247)
16.2	研制历程	(247)
16.3	性能参数	(253)

16.4	结构特点	(254)
16.5	技术特点	(261)
16.6	结束语	(262)

第3篇 燃气轮机先进技术预先研究计划

第17章	美国先进涡轮系统计划	(265)
17.1	背景	(265)
17.2	计划概述	(266)
17.3	关键技术研究	(267)
17.4	结束语	(285)
第18章	日本超级舰船用燃气轮机计划	(286)
18.1	背景	(286)
18.2	计划概述	(286)
18.3	关键技术研究	(286)
18.4	结束语	(299)
第19章	欧美先进燃气轮机合作计划	(300)
19.1	背景	(300)
19.2	计划概述	(300)
19.3	关键技术研究	(300)
19.4	结束语	(301)

第4篇 航改燃气轮机发展特点和趋势

第20章	技术发展特点	(305)
20.1	航改燃气轮机直接继承航机成熟技术	(305)
20.2	采用航机成熟技术发展重型燃气轮机	(306)
20.3	航改燃气轮机采用航机预研技术	(313)
20.4	先进循环技术	(321)
20.5	低排放技术	(329)
20.6	全面依靠先进材料与工艺技术	(352)
第21章	产品发展趋势	(360)
21.1	热力参数不断优化,性能逐步提高	(360)
21.2	污染排放量明显降低	(374)

21.3	可靠性与维修性不断提高	(376)
21.4	新的循环技术不断得到应用	(377)
第 22 章	产业发展趋势	(380)
22.1	基于同一母型机, 产品呈谱系化发展	(380)
22.2	持续升级改进, 产品呈系列化发展	(382)
22.3	产品应用领域不断扩展	(383)

第 1 篇

航改燃气轮机概述

20 世纪 40 年代，航空发动机和工业用燃气轮机是在同一起跑线上各自独立并行向前发展的。航空发动机以罗尔斯-罗伊斯公司（简称罗罗公司）、普拉特-惠特尼公司（简称普惠公司）、通用电气公司（简称 GE）三大公司为代表，工业发电用的重型燃气轮机以 GE、西屋、西门子及 ABB（现为阿尔斯通公司）等公司为代表。由于政治、军事和经济等方面的原因，航空发动机技术首先获得飞速发展。50 年代取代活塞式发动机，60 年代涡扇发动机获得广泛应用。之后随着材料科学、冷却技术、计算流体力学的不断进步，使以级压比、涡轮前温度等为代表的气动、热力性能指标都获得较快提高，航空发动机性能获得极大改进。

由于航空发动机技术的飞快进步，特别是热效率、可靠性和耐久性的提高，各航空发动机公司为满足市场需求纷纷将航空发动机技术向工业和舰船用燃气轮机转移，其方式有两种：一种是直接将成熟的航空发动机改型派生出工业和舰船用轻型燃气轮机，人们称之为航改燃气轮机。目前成功开发应用的已有四代，收到了投资少、周期短、见效快、效率高、经济性好、可靠性高、使用维护方便的效果。另一种方式是航空发动机公司与燃气轮机公司合作，将航空发动机技术向重型燃气轮机移植，用于重型燃气轮机的开发研制。纵观西方国家燃气轮机的发展道路，可以毫不夸张地说，是航空发动机技术促进了轻、重型燃气轮机的飞速发展。轻型燃气轮机走航空发动机改型之路，重型燃气轮机走移植航空发动机技术、合作开发之路，这些已成为人们的共识。

第1章 燃气轮机原理和分类

燃气轮机是继蒸汽轮机和内燃机之后发展起来的新一代动力装置。它是以连续流动的气体作为工质、把热能转换为机械功的一种旋转式动力机械，主要由压气机、燃烧室和涡轮三大部件组成，再配以进气、排气、控制、传动和其他辅助系统。

简单循环燃气轮机的工作过程如图 1-1 所示。

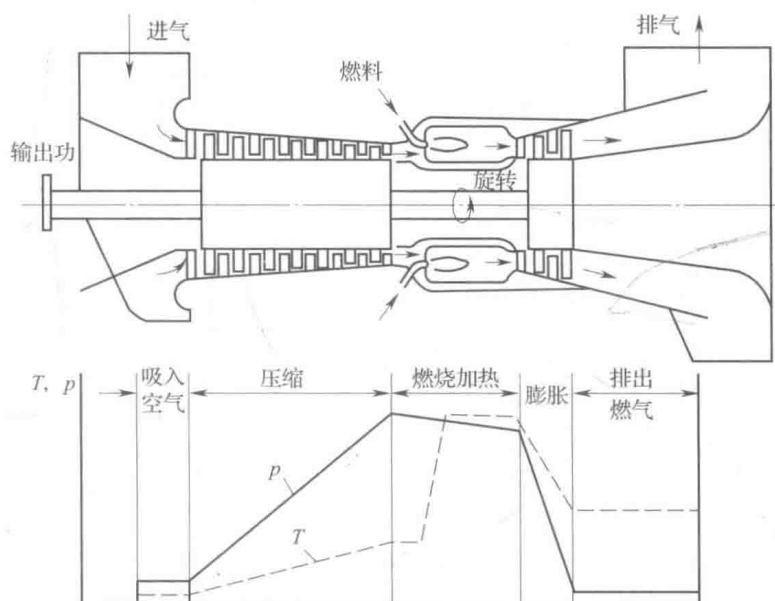


图 1-1 简单循环燃气轮机工作过程示意图

简单循环燃气轮机工作过程如下。

(1) 外界起动机带动燃气轮机压气机，直到燃气轮机发出的机械功大于压气机消耗的机械功时，起动机脱扣，燃气轮机自身独立工作。

(2) 在燃气轮机启动后，轴流式压气机从外界大气环境连续不断地吸入空气，对这些空气逐级压缩使之增压和升温，并送入燃烧室。

(3) 被压送到燃烧室的压缩空气与不断喷入的燃料混合、点火、燃烧，生成高温高压的燃气，之后进入涡轮。

(4) 进入到涡轮的高温高压燃气在涡轮中膨胀做功，推动涡轮带动压气机和外负荷转子一起高速旋转，实现气体或液体燃料的化学能部分转化为机械功。

(5) 从涡轮中排出的降压降温气体经喷管或排气系统排放至大气自然放热，或引入锅炉回收部分热量后再排放至大气自然放热。

这样，燃气轮机就把燃料的化学能转化为热能，又把部分热能转变成机械能。简单