

# 航空涡轮发动机现状及 未来发展综述

## Present Status and Development Trend of Aircraft Turbine Engine

北京动力机械研究所 焦华宾  
北京空天技术研究所 莫松



焦华宾

工程师,研究方向:涡轮发动机总体性能与试验技术;主要从事小型涡轮风扇发动机总体方案论证、总体设计与整机试验验证等相关工作。

发动机是飞机的“心脏”,被誉为航空工业“皇冠”上的“明珠”,其先进性是衡量一个国家工业水平和能力的重要标志。历经半个多世纪的发展,航空涡轮发动机技术取得了巨大进步,推动了飞行器和航空工业的蓬勃发展。未来,随着材料、制造等基础工业的发展,航空涡轮发动机将迎来新一代的飞跃。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.12.062

和航空工业的蓬勃发展<sup>[1]</sup>。未来,随着材料、制造等基础工业的发展,航空涡轮发动机将迎来新一代的飞跃。

### 航空涡轮发动机发展现状

燃气涡轮发动机发明,使航空工业发生了一场革命,飞机的速度、高度和机动性出现了历史性飞跃,飞机从亚声速跨入了超声速飞行的新时代。纵观航空涡轮发动机的发展历程,军用航空涡轮发动机技术的发展始终引领着先进航空发动机发展方向,自20世纪40年代初以来,军用航空涡轮发动机已研制发展了四代并逐步向第五代跨越<sup>[2]</sup>。

· 第一代:以涡轮喷气发动机为主,20世纪40~50年代研制,20

世纪50~60年代获得广泛应用。表征发动机综合性能指标的推重比约3~4。涡轮前燃气温度1200~1300K,典型机种有J57、BK-1等。

· 第二代:主要是加力式涡轮喷气发动机,基本上是第一代的改型,还有少量涡轮风扇发动机,推重比5~6,涡轮前燃气温度1400~1550K,典型机种有J79、TF30、SpeyMK202、M53-P2和P29-300等。

· 第三代:主要是涡轮风扇发动机,技术上有了很大进步,推重比7~8,涡轮前温度1600~1800K。从1973年F100(见图1)发动机最先投入使用以来,相继又有美国的F404、F110、西欧的RB199、法国的M-88、前苏联的PД-33和AЛ-31φ投入

自从20世纪40年代初期出现燃气涡轮以来,燃气涡轮的发展取得了巨大成就。目前,燃气涡轮发动机占据航空动力的主导地位,是知识密集、军民两用的高科技产品,是国家科技工业水平和综合国力的重要标志,成为各大国大力发展、高度垄断、严密封锁的关键技术。经过半个多世纪的发展,航空涡轮发动机技术取得巨大进步,推动了飞行器

使用,成为第三代战机的主要动力装置等。

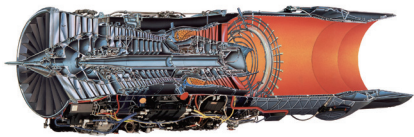


图1 第三代军用航空发动机：F100

· 第四代：从20世纪80年代开始发展,是为满足先进战斗机的超声速巡航能力、良好隐身能力、高亚声速和超声速机动能力、敏捷性、远航程和短距起落能力、高可靠性、易可维修性、强生存力、低全寿命期费用而研制的。其性能特点为：推重比9.0~10.0,涵道比0.2~0.4,增压比26~35,涡轮进口温度1800~2000K,耗油率降低了8%~10%,可靠性提高了1倍,耐久性提高了2倍。典型第四代军用发动机F119(见图2)、F120、EJ200、F135、F136、AL-41F等。

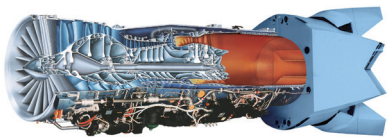


图2 第四代军用航空发动机：F119

· 第五代：21世纪初开始提出,与前四代发动机追求高推重比不同,第五代发动机将提升发动机推进效率与任务适应性为首要目标,目前仍处于研制当中。普惠公司借助美国空军自适应发动机技术(AETD)发展项目正在进行第五代发动机的测试,通过变循环发动机关键技术的突破,其耗油率可降低30%,预计2016年其原理样机将进行整机试车。

民用航空发动机历经半个多世纪的发展,发动机结构形式由早期的离心式涡轮喷气发动机到单转子轴流式涡轮喷气发动机,从双转子涡轮喷气发动机到低涵道比涡轮风扇发动机,再到高涵道比涡轮风扇发动机,一直以来以更高的效率以及更高的可靠性为追求目标。随着涵道比

的增加与新技术的应用发动机耗油率也由最早的1.0kg/daN·h降低到0.3kg/daN·h<sup>[3]</sup>。

目前,民用航空发动机主要为大涵道比涡扇发动机,其最大推力已超过500kN,发动机总压比超40,采用全权限数字控制(FADEC),发动机可靠性显著提升,空中停车率下降到每1000飞行小时0.002~0.005次,返修率仅为每1000飞行小时0.06~0.01次。同时,与早期的涡喷发动机相比,噪声强度和污染物排放分别降低了75%和80%,发动机工作更加“环保”。现役民用航空发动机主要有CFM56、PW6000(见图3)、GE90、Trent800等<sup>[4]</sup>。

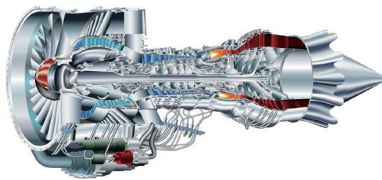


图3 现役民用航空发动机：PW6000

并为进一步降低发动机耗油率、提升民用航空发动机的经济性,一些新技术、新结构形式在民用航空发动机中得到了快速发展。例如普惠公司研发的齿轮传动风扇发动机(GTF)、罗罗公司重新研发的桨扇发动机(也称开式转子发动机),与传统民用航空涡扇发动机相比均可大幅降低油耗。目前该两类发动机均已通过了整机测试,普惠公司的PW1100G(GTF)发动机将在A320NEO飞机上进行使用。

## 燃气涡轮发动机先进技术

航空涡轮发动机能力的提升依赖于发动机技术的进步,先进航空发动机技术发展和验证,为下一代航空发动机的发展奠定了坚实的技术基础。

### 1 先进设计技术

未来,在不改变航空涡轮发动机循环方式的情况下,提升发动机循环

效率和减轻发动机自身重量是提高发动机性能的主要方法。发动机性能的提升离不开先进的气动设计与结构设计。

(1)气动设计：气动设计可使未来发动机单位推力和部件效率进一步提高,且通过减少叶轮级数、燃烧室和喷管更紧凑及在可能情况下取消加力燃烧室等办法来减轻质量。先进气动设计主要包括：风扇/压气机叶片有粘、全三维气动设计技术,燃烧室旋流燃烧技术,涡轮叶片有粘、全三维气动设计技术,复合倾斜和端弯设计技术、先进的热端传热分析和冷却设计技术,360°全方位气动矢量喷管设计技术等<sup>[5]</sup>。

(2)结构设计：先进的结构设计可减轻发动机质量,同时可充分发挥新材料的性能。先进的结构设计主要包括：空心风扇/压气机叶片结构设计、整体叶盘/叶环结构设计(见图4)、刷式和气膜密封结构设计、双层壁火焰筒、对转涡轮、双辐板涡轮盘、磁性轴承、内装式整体起动机等结构设计<sup>[6]</sup>。

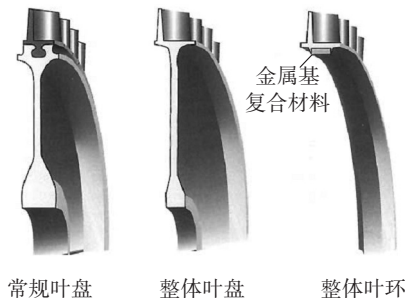


图4 钛合金整体叶盘及整体叶环结构示意图

### 2 先进材料

新材料是航空涡轮发动机技术进步的重要基础,是提高航空涡轮发动机推重比的主要突破口。据预测,在未来航空发动机性能的提高中,新材料贡献率将达到50%以上。未来应用于航空发动机上的先进材料主要包括两类<sup>[7]</sup>：

(1)轻型高比强度材料,包括钛金属基复合材料、树脂基复合材料、

TiAl 金属间化合物、Ti<sub>3</sub>Al 合金等,这些材料的应用可以大幅减轻发动机的重量、提升风扇等转子叶片强度及抗打击能力,实现发动机推重比、工作可靠性的提升<sup>[8]</sup>;

(2) 新型耐高温材料,包括耐高温合金材料、陶瓷基复合材料、碳-碳基复合材料等,新型耐高温材料的应用可使涡轮前温度提高至 2000℃~2200℃,可大幅提升发动机单位推力,甚至未来可取消发动机加力燃烧室便可满足发动机加速过程单位推力需求。

### 3 先进制造技术

为了提高发动机的可靠性和推力,未来,高性能发动机研制将采用大量新材料、新结构,对制造工艺的要求将进一步提高。先进制造技术的主要分为以下 3 类<sup>[9]</sup>:

(1) 轻量化、整体化结构件制造技术:为实现减重增效,航空发动机零部件大都采用复杂曲面和高结构效率的整体、轻量化结构,这对制造工艺以及制造设备提出了更高的要求。轻量化、整体化结构件制造技术主要包括整体叶盘制造技术、整体叶环制造技术、大小叶片转子制造技术、发动机机匣制造技术、宽弦风扇叶片制造技术、复合冷却层板结构制造技术等<sup>[10]</sup>;

(2) 新材料构件制造技术:未来高性能发动机拟采用很多种类的新材料和新材料构件,尤其是金属基复合材料、陶瓷基复合材料、碳/碳复合材料是当前高温复合材料领域开发和应用研究的热点。新材料构件制造技术的发展促进了新型材料在先进航空发动机中的应用。主要包括金属基复合材料构件制造技术、陶瓷基复合材料构件制造技术、碳/碳复合材料构件制造技术;

(3) 发动机制造新工艺:航空涡轮发动机结构复杂、加工精度高、新材料(高硬度、高强度)加工难度大,导致传统制造工艺加工成本高或无

法满足加工要求。未来,新型制造工艺的应用将加速航空发动机的发展。其主要包括新型结构件精密制坯技术、先进切屑技术、特种加工技术、特种焊接技术(见图 5)、热障涂层技术、3D 打印技术、浮壁式火焰筒制造技术等。



图5 特种焊接技术:整体叶盘线性摩擦焊主要工艺过程

### 4 先进控制技术

为了不断满足先进发动机发展的需求,未来控制系统的发展目标是提高性能、减轻重量,耐恶劣环境、提高可靠性和维护性,因此控制系统将向综合化和智能化方向发展。先进航空发动机控制技术主要包括以下 3 类<sup>[11]</sup>:

(1) 主动控制技术:主动控制技术可提高发动机的性能、耐久性和生存性,使高载荷的涡轮机械达到更高的推重比;提高高涵道比和部件效率,最后减少耗油率;主动控制技术还提供部件状态的诊断/监视信息,避免了失效,从而降低维修成本。主动控制包括主动稳定控制、主动间隙控制、主动燃烧控制等;

(2) 智能控制技术:智能控制是

将人工智能的方法引进发动机控制系统,模拟人的智能活动进行控制与信息传递过程的控制规律,其核心是控制决策,采用灵活机动的方式迫使控制向期望的目标逼近。智能推进控制系统包括智能自修复控制技术、损伤自适应修复控制技术、延寿控制技术、自主推进系统技术等多个方面;

(3) 分布式控制技术:未来控制系统将是高度分布式控制系统,它由 FADEC 和多个智能装置组成,中央处理器和各智能传感器、智能执行机构组成了一个局域网。图 6 是集中控制系统与分布式控制系统的结构对比。采用分布式控制系统可以使控制器体积减少,传感器系统精度提高,获取的系统信息更多,易于实现系统的模块化和标准化,从而减少设计、生产、装配和试验成本,减少发动机控制系统设计周期。

分布式控制系统关键技术主要包括分布式总线、智能传感器、智能作动器、微电子机械、高温电子技术等。

### 未来发展趋势特点分析

基于作战的需要,军用飞机将具有更大的作战半径、更强的生存能力、更灵活的战场适应性、更高的可靠性以及更低的全寿命周期成本等特点,这就要求其动力装置继续向着提高推重比、降低耗油率、改善可靠性、适用性、维修性和经济性的方向发展。对于民用飞机发动机,还有环

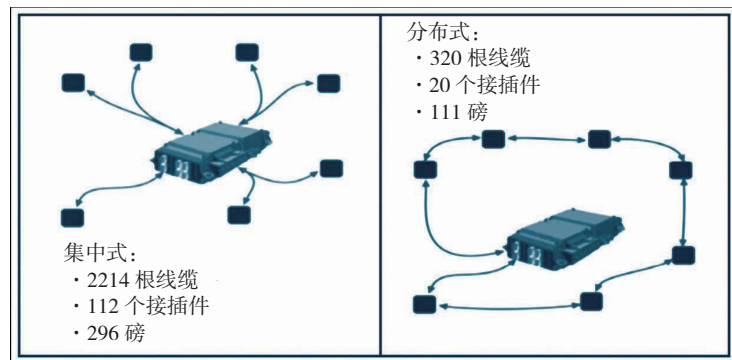


图6 集中式控制与分布式控制结构对比

保等适航要求。通过综合分析,未来航空涡轮发动机发展具有以下显著特点<sup>[4,7,12]</sup>。

(1)性能与适用性、可维护性、可靠性/耐久性、经济性等指标综合提升。

未来,美国等航空技术先进国家在追求更高推重比的同时要求发动机耗油率不断降低,以增加飞行器航程和作战半径,增强远程打击能力。另外,为保证机队完好率和高战斗生存力,发动机的可靠性、维修性设计成为关键。因此,未来航空发动机的设计将改变单纯追求高性能的做法,发动机适用性、成本、可靠性等综合性能将成为衡量发动机先进性的重要指标。

(2)提高任务适应性。

未来航空发动机的使用将从传统的最高 20~30km 以下空中飞行向临近空间(60~70km 高度)扩展,甚至实现跨大气层飞行,而飞行速度也将由现在的亚声速、超声速向高超声速跃进,由此将引发航空发动机技术的一场革命。为适应更为宽广的工作包线,需要解决相关的各种新技术,包括发动机变循环技术、组合发动机技术、发动机预冷技术、先进热管理技术等。

(3)增强环境适应性。

未来要求新一代发动机能在各种复杂自然环境和恶劣气象条件下安全可靠工作,采用先进的光/机/电综合控制系统,具有很强的抗进气畸变、防冰、防雨、防雷电和高低温工作能力。智能发动机主动控制系统和健康管理能够依靠传感器数据和专家模型全面了解发动机和/或部件的工作环境和发动机状态,实现发动机性能和状态的主动和自我管理,并根据环境因素平衡任务要求,提高发动机的性能、可操纵性和可靠性,延长发动机的寿命,降低发动机的使用与维修成本,可有效提高环境适应能力和生存力。

(4)发动机隐身性能。

就推进系统而言,隐身无疑是下一个重大的能力激励器。战斗机的进气道和排气装置是雷达横截面的主要信号源。未来,在推进系统设计中,除了要通过发动机、进气道和排气装置高度一体化设计来减少工作时辐射的整体影响外,还必须将推进系统与整个飞机机体很好地一体化设计以减少信号辐射。发动机加力工作时,红外信号将会急剧增加,未来在无加力状态下如何获得更高单位推力将成为未来隐身发动机发展的一个重要方向,新型耐高温材料与变循环技术将成为该方向的关键技术。

(5)大幅提升经济可承受性。

未来先进战斗机高昂的采购价格决定了生产规模不可能太大,在需要发动机性能大幅提升的同时,还要求其全寿命周期成本要可担负得起。美国通过 IHPTET 计划技术研究,经济可承受性达到基准发动机的 3 倍以上,通过 VAATE 计划,经济可承受性达到基准发动机的 10 倍。民机发动机除了提高性能,还要不断降低全寿命周期成本。围绕成本控制目标,采用多种措施提高发动机的经济可承受性。比如,“一机多型”满足了用户的多种任务需要,降低了采购成本;开发通用技术,研制“通用核心机”,实现用途多元化,发展出将来使用的更高性能、更高耐久性和更低费用的军用和民用发动机等。

(6)民用航空环保性要求。

环保性是大飞机发动机取得适航必须满足的强制性要求。21 世纪初,GE90、PW4084、TRENT800、TRENT900、GP7200、BR710、CFM56 等大涵道比民用涡扇发动机已经应用了大量的降低噪声与降低排放技术,并收到了很好的环保效果。为了进一步改善环保特性,美国与欧盟国家还在通过实施一系列的技术研究计划,开发更低排放、更低噪声、更少

有害物的技术,以研制在整个寿命期内对生态环境和与其有关人员的健康与安全都产生最小影响的发动机——“绿色”发动机。

## 结束语

航空涡轮发动机是集气动、热工、结构与强度、控制、测试、计算机、制造技术和材料等多种学科为一体的当代最精密的复杂机电产品之一,基础学科的创新与先进技术的不断突破,使航空涡轮发动机性能得到了不断提升。未来在追求高性能的同时,发动机综合性能的提升将成为设计者与用户共同关注的焦点,并将成为未来先进航空涡轮发动机的重要发展方向。

## 参考文献

- [1] 刘大响,金捷.21 世纪世界航空动力技术发展趋势与展望.中国工程科学,2004,6(9):1-7.
- [2] 刘大响.对加快发展我国航空动力的思考.航空动力学报,2001,16(1):1-6.
- [3] 黄太平.民用航空涡轮发动机现状与发展趋向.机电技术,2003,S1(12):38-46.
- [4] 刘永泉.航空动力技术发展展望.航空科学技术,2011(4):1-3.
- [5] 刘勤,周人治,王占学,等.军用航空发动机特征分析.燃气涡轮试验与研究,2014,27(2):59-62.
- [6] 张国乾,赵明,陆山,等.航空发动机整机叶环结构的研究进展.航空制造技术,2013(9):50-54.
- [7] M J Jones. A Future Military Propulsion Vision. AIAA 2003-2724, 2003.
- [8] 黄旭,李臻熙,高帆,等.航空发动机用新型高温钛合金研究进展.航空制造技术,2014(7):70-75.
- [9] 黄维,黄春峰,王永明,等.先进航空发动机关键制造技术研究.国防制造技术,2009(3):42-52.
- [10] 张海燕,张连锋.航空发动机整体叶盘制造技术国内外发展概述.航空制造技术,2013(23/24):38-41.
- [11] 姚华.未来航空发动机控制技术的发展趋势.航空科学技术,2012(6):1-6.
- [12] 梁春华,凌瑶.未来大飞机发动机的发展趋势.航空制造技术,2011(3):26-29.

(责编 一帆)