

文章编号: 1000-8055(2008)06-0976-05

# 大型飞机发动机的发展现状和关键技术分析

刘大响<sup>1</sup>, 金捷<sup>2</sup>, 彭友梅<sup>1</sup>, 胡晓煜<sup>3</sup>

(1. 中国航空工业第一集团公司 科技委, 北京 100012;

2. 北京航空航天大学 航空发动机数值仿真研究中心, 北京 100083;

3. 中国航空工业第一集团公司 发展研究中心, 北京 100012)

**摘 要:** 对军民用大涵道比涡扇发动机的现状和发展趋势等进行了阐述, 从国家大型飞机工程的战略目标、大型飞机发动机的重要性和市场前景等方面, 对我国大涵道比涡扇发动机的需求、现状和差距进行了初步分析, 简要介绍了我国大涵道比涡扇发动机的总体方案, 提出了发展我国大涵道比涡扇发动机的主要关键技术, 并分别从大涵道比涡扇发动机、国际合作、材料工艺试验条件建设等方面, 简要论述了关键技术解决途径与措施建议。

**关 键 词:** 大涵道比涡扇发动机; 综述; 需求分析; 关键技术; 措施途径

**中图分类号:** V231

**文献标识码:** A

## Summarization of development status and key technologies for large airplane engines

LIU Da-xiang<sup>1</sup>, JIN Jie<sup>2</sup>, PENG You-mei<sup>1</sup>, HU Xiao-yu<sup>3</sup>(1. Committee of Science and Technology of China Aviation Industry Corporation I,  
Beijing 100012, China;

2. Aeroengine Numerical Simulation Research Center,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

3. Development and Research Center of China Aviation Industry Corporation I,  
Beijing 100012, China)

**Abstract:** The development status and trends of military and civil high bypass pressure ratio(BPR) turbofan engines for large airplanes has been summarized in the paper. In the aspects of strategical goals, importance and marketing foreground of the high BPR turbofan engines for national large airplanes engineering in China, the requirements, status and gaps of high BPR turbofan engines in China have been analysis briefly as well as the introduction of the overall engine scheme for the high BPR turbofan engines with the main key technologies for the engines. In terms of military and civil high BPR turbofan engines technologies, international cooperation, materials and techniques and test facilities, some suggestion and approach have been discussed for the technical challenges with the development of high BPR turbofan engines in China.

**Key words:** highbypass pressure ratio (BPR) turbofan engine; summarization; requirements; key technologies; approach

收稿日期: 2007-08-09; 修订日期: 2008-04-08

作者简介: 刘大响(1937—), 男, 湖南祁东人, 教授、博导、工程院院士, 主要研究方向: 发动机发展战略、发动机总体、稳定性分析和评定、发动机数值仿真技术等。

## 1 国外大涵道比涡扇发动机发展概况

大涵道比涡扇发动机是指涵道比大于4的涡扇发动机,它具有推力大、耗油率低和噪声小等优点,广泛用于军民用运输机和其他大型亚声速飞机。

经过30多年的发展,大涵道比涡扇发动机的性能、可靠性、耐久性、经济性和环保水平等方面都有很大进步。与早期的涡喷发动机相比,发动机的噪声降低了20 dB,推力增加了100倍,耗油率减少了50%。目前,大涵道比涡扇发动机的最大推力已超过50 000 daN,发动机的空中停车率从每1 000飞行小时1次下降到0.002~0.005次左右,返修率达到每1 000飞行小时0.06~0.01次,航班准点率达到99.95%~99.98%。发动机在飞机上不拆换的工作时间达到16 000 h,最长超过40 000 h<sup>[1]</sup>,发动机的噪声强度和污染物排放分别降低了75%和80%。

在民用大涵道比涡扇发动机市场上,150座级干线客机的发动机是主流产品。据预测,未来20年,世界150座级干线客机至少需要25 000台发动机,大约占民用发动机市场的73%<sup>[2]</sup>。目前典型的150座级干线客机用大涵道比涡扇发动机是CFM国际公司的CFM56发动机和IAE公司的V2500发动机。其中,CFM56系列发动机占据150座级干线客机发动机市场的78%,该发动机不仅是B737飞机的唯一动力,而且赢得新型A320飞机一半以上的发动机订货,目前已经交付使用的CFM56发动机超过15 600台。V2500发动机占据150座级干线客机20%左右的市场份额,主要用于A320、A321和MD-90客机。

关于此类发动机今后的发展,CFM国际公司在1998—2004年实施了Tech56计划<sup>[3]</sup>,目标是燃油消耗率降低4%~8%,拥有成本和维护成本降低15%~20%,NO<sub>x</sub>排放比目前ICAO标准低40%~50%,噪声比FAR36第三阶段低20 dB。该计划发展的技术包括:金属材料空心风扇叶片、压比15的6级高压压气机、双环腔预旋流燃烧室(TAPS)、锯齿型喷管(降噪3 dB)、低成本控制系统等。2007年,这些技术将用于生产型的CFM56-5B/7B发动机。2004年底,CFM国际公司又开始实施LEAP56(前沿航空推进)计划<sup>[4]</sup>,专门研究下一代150座级干线客机所需的发动机技术。该计划的目标是在目前CFM56-5B/7B的基础上,燃油消耗率降低10%~15%,维护成本降低15%~25%,机上寿命延长25%,污染物(特别是NO<sub>x</sub>)

排放降低50%,噪声比FAR36第四阶段的标准低15 dB。

从1990年开始,普·惠公司与MTU、菲亚特、Avio和Volvo等联合发展下一代150座级干线客机所需的齿轮传动涡扇发动机PW8000<sup>[5]</sup>,目标是使发动机的耗油率比目前的水平低11%~12%,噪声比第三阶段的要求低30 dB,维修费和使用费分别降低30%和10%。发动机推力为111~156 kN,压气机总增压比40,风扇直径1.93 m。另外,英国罗罗公司和俄罗斯的一些机构也都在积极发展下一代150座级干线客机的发动机技术。

军民用大涵道比涡扇发动机技术的通用性很强(达70%),但是在安全可靠、环保要求、舒适性、经济性和适航取证方面,民用干线客机发动机比军用运输机发动机要求更高、更严格,研制难度更大。因此,军民结合、互相支持是世界通行的发展途径。由于军用大涵道比涡扇发动机数量不大,很多大型军用运输机发动机就直接是民用发动机的改型,典型的机种包括CFM56-5C发动机和俄罗斯的D-30KP发动机等。

## 2 我国大涵道比涡扇发动机的需求与现状

### 2.1 需求分析

研制大型飞机及其发动机是党中央、国务院在新世纪做出的具有重大战略意义的决策。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》和“十一五”规划纲要中,国家已经把大型飞机列为重大专项工程,而且要求最终配装具有自主知识产权的大涵道比涡扇发动机,包括军民两型大型飞机发动机,这是必须实现的国家战略目标。

发动机是飞机的心脏,大涵道比涡扇发动机是自主研制大型飞机的关键,发动机技术不突破,就无法掌握大型飞机研制的主动权。而民用航空发动机又是航空动力产业的重要支柱(国外民用发动机产值已达总产值的80%),不发展民用大涵道比涡扇发动机,就没有独立、完整、强大的航空动力产业和航空工业。

据有关部门预测,我国未来20年,仅150座级干线客机就需要800架左右,加上其他用途的大型飞机,共需军民用大涵道比涡扇发动机约2 750台,总价值达412亿美元,折合人民币3 300亿元左右。大涵道比涡扇发动机用途广泛、市场巨大,经济、军事、社会效益显著,对国民经济发展、国防建设和科技进步具有重大推动作用和战略意义。

## 2.2 发展现状与差距

经过多年发展,我国在航空动力技术领域取得了一些成绩,在军用涡喷和小涵道比涡扇发动机方面已具有一定的研制生产能力,研制生产了数十个型号、6 万多台各类航空发动机,装备了几十种军民用飞机,为空军装备建设和民用航空事业的发展做出了自己的贡献.在大型飞机使用的大涵道比涡扇发动机方面,对风扇/增压级、高压压气机等关键技术开展了初步研究,并在航空推进技术验证计划支持下,建立了以设计定型的太行发动机核心机为基础的大涵道比涡扇发动机整机验证平台.但与国际先进水平相比差距仍然较大,技术基础相对薄弱,大量关键技术尚未突破和掌握,部分试验设备还存在缺口,工程设计和使用经验缺乏,自行独立研发还有较大困难.

## 3 我国大涵道比涡扇发动机关键技术分析

### 3.1 军用大涵道比涡扇发动机总体方案

根据大型军用运输机及特种大型飞机的使用要求,在已设计定型的太行发动机核心机的基础上,利用航空推进技术验证计划构建的大涵道比涡扇发动机验证平台,对高压压气机叶片进行全三维改进设计,改善核心机性能;同时改进设计风扇/增压级,匹配设计低压涡轮,采用全权限数字电子控制系统.该发动机主要技术指标与正在服役的 CFM56 发动机相当,与现役俄制 D-30KP 发动机相比明显提高,在同等条件下,将使大型军用运输机航程增加 10% 以上,具有一定的先进性,可满足我国大型军用运输机对动力装置的需求.

### 3.2 民用大涵道比涡扇发动机总体方案

突破关键技术,提高自主研发能力.以 137.2 kN 推力级的下一代先进民用大涵道比涡扇发动机为背景,通过预先研究和国际合作,完成部件、系统、核心机和验证机的设计、加工和试验,突破民用大涵道比涡扇发动机关键技术,基本具备自主研发能力.在验证机的基础上,根据市场和飞机需求,研制出具有自主知识产权和市场竞争力的大涵道比民用涡扇发动机,满足我国干线客机发展对动力的需求,进入市场,逐步形成产业.

主要技术指标:起飞推力 137.2 kN;巡航耗油率:不大于 0.572 kg/(daN·h) ( $H=11$  km,  $Ma=0.8$ );噪声、有害物排放水平满足当时的适航标准;寿命、可靠性、可维护性等综合性能水平优于现役

CFM56 发动机,与其后继机的水平相当.

### 3.3 大涵道比涡扇发动机关键技术

#### 3.3.1 主要设计关键技术

对于军民用大涵道比涡扇发动机而言,除环保、寿命和经济性等指标外,其他的主要设计技术是相同的,包括总体、部件、系统、整机、仿真等,因此将其关键技术合并研究,主要有:大涵道比发动机总体方案设计技术(含飞发一体化和经济性分析);民用发动机适航技术;大涵道比风扇/增压级设计技术;高效高压比压气机设计技术;低排放、长寿命燃烧室设计技术;高性能长寿命高、低压涡轮设计技术;发动机短舱及反推力装置设计技术;核心机设计技术;验证机设计技术;整机/部件综合数值仿真技术;大涵道比涡扇发动机数控系统设计技术;低噪声设计技术;长寿命、高可靠性和可维护性设计技术;轴承和传动润滑系统设计技术;故障诊断和监控技术;涡轮主动间隙控制技术;辅助动力装置(APU)设计技术.

#### 3.3.2 材料、工艺技术

军用大涵道比涡扇发动机主要采用现有成熟材料和工艺,但在部分关键零部件(如大型风扇叶片、机匣等)的制造上仍有其特殊要求,需要进行攻关.民用大涵道比涡扇发动机由于技术指标要求更高,满足适航取证的要求也更多,需要采用更多的新材料和新工艺,才能达到设计要求.军民用大涵道比涡扇发动机研制中需要攻关的主要材料工艺项目包括:

大型宽弦风扇空心叶片(钛合金或复合材料)制造技术;大型钛合金中介机匣铸造、焊接和制造技术;钛合金整体叶盘/叶环制造及修复技术;复合材料包容环制造技术;风扇盘圆弧形榫槽加工技术;三维弯扭多联组合涡轮导向叶片精铸技术;定向凝固带冠大展弦比低压涡轮叶片精铸技术;风扇转子和发动机本机平衡技术;风扇机匣涂层本机加工技术;高温钛合金材料工程化与制造工艺;镍基高温合金整体叶盘低成本制造技术;低成本燃烧室机匣整体铸造技术;火焰筒浮动壁材料与制造技术;高压涡轮动叶及导叶用涂层及其涂覆工艺;单晶涡轮叶片低成本材料、铸造以及打孔工艺;涡轮导叶低成本材料、铸造以及打孔工艺;粉末轮盘制粉、锻造工艺以及缺陷检测.

#### 3.3.3 试验、测试技术

大涵道比涡扇发动机与军用小涵道比涡扇发动机相比,除了因为尺寸、流量、推力的增加,而需要对现有试验设备和技术进行完善改进外,由于

大涵道比涡扇发动机、尤其是民用大涵道比涡扇发动机,为了满足适航条例的要求,需要进行大量的特殊的适航试验,如吞咽试验、包容试验、环境试验等。因此,在加紧建设相关的缺口试验设备的同时,还需对大涵道比涡扇发动机所需的特殊试验技术进行研究,并发展相应的试验方法和规范。主要包括:整机试验与调试技术;发动机反推力试车技术;发动机投鸟试验技术;发动机吞水、吞冰、吞砂试验技术;发动机侧风、逆风试验技术;发动机噪声场测量技术;风扇叶片包容试验技术;部件和整机寿命和可靠性试验技术。

## 4 关键技术解决途径与措施建议

### 4.1 军用大涵道比涡扇发动机

通过型号验证机研制、原型机研制和科研试飞、定型批研制和设计定型、生产定型及批量使用等几个发展阶段,充分继承了定型发动机的核心机、滑油系统和控制系统的部分附件,继承性较高,研制风险小,可降低研制成本、缩短研制周期。

### 4.2 民用大涵道比涡扇发动机

尽快组织实施先进民用大涵道比涡扇发动机关键技术研究计划,利用10年左右时间,结合国际合作,通过部件/系统/核心机/验证机研制,突破和掌握关键技术,夯实技术基础,提高自主创新能力。然后,在验证机的基础上进一步研发出具有自主知识产权和当代水平的、取得适航证进入市场的民用大涵道比涡扇发动机。

#### 4.2.1 关键技术攻关和验证机研制

1) 发动机总体方案设计和部件设计、加工和试验。完成发动机总体方案设计和性能分析计算、整机/部件气动热力性能数值仿真分析、发动机方案草图设计和选材方案、各部件和系统的设计技术指标和参数要求;完成总体/部件/系统试验件设计和试验、部件强度寿命设计分析、选材和关键加工工艺设计、部件/系统综合数值仿真分析、辅助动力装置设计和试验等。

2) 核心机和验证机的工程设计、加工和试验验证。完成核心机和验证机的工程设计和加工、核心机的地面模拟试验、验证机地面台架性能调整试验、地面台架持久试验、高空台巡航状态性能模拟试验( $H=11\text{ km}$ ,  $Ma=0.8$ )以及部分适航性标准试验(如噪声、低污染排放等)。

#### 4.2.2 原型机研制和适航取证

在第一阶段验证机高空台性能达标的基础上,

针对我国干线客机发动机的具体要求,完成原型机的研制,取得型号合格证、生产许可证和适航证。

### 4.3 积极开展国际合作

我国航空动力行业与世界先进水平相比,差距仍然较大,尤其在大涵道比涡扇发动机技术方面,基础十分薄弱,缺乏技术储备,大量关键技术尚未突破和掌握,没有工程经验,材料、工艺差距更大,试验设备不配套,缺乏高水平的人才,短期内完全自行研发出先进大涵道比涡扇发动机有很大困难。为此,必须强化基础、自主创新,又要改革开放、借助外力,积极开展国际合作。

同时,也应看到,国际合作发展民用航空发动机已成为当今世界的一大潮流。为了筹措资金、技术互补、减少风险、扩大市场,即使实力超群的大国公司也在奉行合作开发的道路,表示了开展合作的意向。尽管仍然存在着多种矛盾和风险,但和平开放的国际环境毕竟为开展大涵道比涡扇发动机的国际合作提供了比较有利的条件。

多年的实践证明,与俄罗斯开展技术合作,能够学到大部分关键设计技术,这是与西方国家合作所做不到的,而且俄罗斯也已经表现出与我合作的强烈意愿,所以在开展关键技术研究 and 验证机研制中,重点要抓紧对俄合作的工作。同时,也通过各种方式加强与西方的已有合作,并不断探索新的合作途径,通过与西方的商业合作加快型号产品的开发,尽快进入国际市场。

### 4.4 加强材料、工艺、试验等基础条件建设

有关材料、工艺是大涵道比涡扇发动机的关键技术之一,必须尽早安排计划,攻关研究,加以突破。大涵道比涡扇发动机的研制需要特殊的加工和试验手段,必须在现有基础上,根据军民结合的原则,尽快进行补充和完善。如:野外试车台、环境试车台、2号高空舱、快速反应科研试制力量等。

## 5 结 论

航空要振兴,动力须先行。大型飞机列为国家重大专项工程,是一次难得的历史发展机遇。我们一定要抓住机遇,迎难而上,不辜负国家的信任和人民的期望,发愤图强,团结拼搏,坚决把我国的大型飞机用大涵道比涡轮风扇发动机搞出来,为国产大飞机提供一颗健康、强劲的“中国心”。

## 参考文献:

[1] 方昌德.世界航空发动机手册[M].北京:航空工业出版社

- 社,1996.
- [ 2 ] Gastineau Z D. Turbine engine performance improvements a proactive approach[R]. ASME-2001-GT-37, 2001.
- [ 3 ] Seidel J A. NASA aeropropulsion research; looking forward [R]. ISABE-2001-1013, 2001.
- [ 4 ] Benzakein M J. Propulsion strategy for the 21st century; A vision into the future [R]. ISABE-2001-1005, 2001.
- [ 5 ] Mari C. Trends in the technological development of aero-engines; An overview [R]. ISABE-2001-1012, 2001.