

21世纪大飞机发动机的预研计划与关键技术

Advanced Program and Key Technology for 21st Century Large Commercial Jet Engine

沈阳发动机设计研究所 梁春华



梁春华

研究员。主要研究方向为航空发动机情报。曾先后荣获“九五”、“十五”国防科技情报研究成果三等奖各1项,原中国一航95优秀科技情报成果一等奖和三等奖各1项,所科技进步二等奖3项,所科技进步三等奖14项,发表论文30多篇。

随着航空发动机技术的飞速发展、市场竞争的日益激烈和环保要求的不断严格,大飞机发动机向着费用更低、性能更高和环保特性更好的方向发展。为此,在改进发展GE90、PW4084、TRENT800等发动机和全新研制GP7200、TRENT900、GENx

随着紧凑叶轮机、低排放燃烧室、先进降噪技术、新颖结构、先进材料和工艺、智能控制等常规涡扇发动机技术,以及齿轮驱动涡扇发动机、间冷回热航空发动机和多电发动机等先进循环发动机关键技术的不断发展和成熟,未来大飞机发动机的性能将越来越高,经济性将越来越好,环保特性将越来越得到改善,甚至会取得突破性进展。

和TRENT1000等发动机的同时,美国和欧盟国家独立和/或联合实施了一系列的预研计划,开发和验证了性能高、质量轻、可靠性高以及排放与噪声低的未来常规循环大飞机发动机技术,探索研究了更经济和环保的先进循环大飞机发动机技术,为未来大飞机发动机的研制打下了很好的技术基础。

国外大飞机发动机技术研究计划的进展

1 美国大飞机发动机技术研究计划

20世纪90年代,美国实施了经济、环保、节能发动机(5E)计划,高速研究机(HSR)计划和先进亚声速技术(AST)计划等一些大飞机发动

机预研计划,开发和验证了大量的气动、燃烧、传热、结构和材料等先进技术。20世纪90年代末,美国又启动了UEET预研计划,开发和验证创新的、绿色的、经济的大飞机发动机技术。

UEET计划始于1999年初,其总目标是采用NASA基础预研计划中大量的研究成果为新一代飞行器发动机提供先进部件与通用技术。具体目标是:与GE90发动机相比,燃油消耗降低10%,使用费用降低50%,噪声降低10dB,NO_x排放降低20%。该计划主要有7个技术项目:推进系统一体化和评定;降低排放;高载荷涡轮机械;高性能发动机的材料和结构;推进系统/飞机一

体化;推进系统控制;一体化的部件技术验证。

2004年,美国调整了UEET计划FY2004~2007的工作重点。调整后为:通过开发确保性的智能发动机革新技术,研制环境友好的清洁燃烧的涡轮发动机,进而在大大降低有害排放与保持高的性能的同时达到明显提高可靠性的目的。在计划级,重点开发亚声速飞行器应用的低 NO_x 燃烧技术、降低总燃油消耗率的技术和提高推重比的技术,开发超声速飞行器应用的高性能进口技术,开发旋转翼飞行器应用的先进驱动技术;在子计划级,开发低排放燃烧室技术、系统集成与验证技术、高负荷轻质量叶轮机技术、大升力旋转翼飞行器的先进驱动系统技术和智能

发动机的基础技术。

此外,在综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)和多用途、经济可承受的先进涡轮发动机(VAATE)这2个预研计划下,美国开发和验证了一些军民两用技术。前者的总目标是到21世纪初使航空涡轮发动机的能力较1988年的水平提高1倍,具体指标是推重比提高100%、耗油率降低30%以及成本减少35%。后者的目标是通过开发通用核心机、智能发动机和耐久性3大领域的关键技术,到2017年使航空涡轮发动机的经济可承受性较2000年的技术水平提高10倍,具体指标如推重比提高200%,耗油率(燃料成本)降低25%,研制、采办与全寿命维修成本降低60%。

2 欧盟大飞机发动机技术研究计划

20世纪90年代,欧盟国家已经实施了一些商用航空发动机预研计划,开发并验证了很多较为先进的技术,取得了明显的成效。

2001年,欧盟航空研究咨询委员会(ACARE)战略研究局(SRA)确定了2020年大飞机的发展目标:相对2000年的技术水平,噪声降低50%; NO_x 排放降低80%; CO_2 排放降低50%;事故率降低80%;使用费用降低;投入市场时间缩短50%等。其中,发动机的发展目标为:相对2000年技术水平的发动机(如CFM56和TRENT700),耗油率降低20%; NO_x 排放降低80%;噪声降低10dB;事故率降低80%;使用费用降低;投入市场时间缩短50%。

表1 欧盟典型大飞机发动机预研计划概述

计划名称	时间	投资数额	合作伙伴	研究目标
EEFAE之ANTLE	2000年3月启动,2008年左右投入使用	1.01亿欧元	R·R公司总负责,RRD、FIAT、ITP等公司参与	燃油消耗降低12%; CO_2 排放降低12%; NO_x 排放较ICAN CAEP/96的降低60%;CO排放较ICAN CAEP/96的降低10%;可靠性提高60%;研制时间缩短50%;拥有费用降低20%;寿命期费用降低30%
EEFAE之CLEAN	2000年3月启动,2015年左右投入使用		SNECMA和MTU公司领导,欧盟19家合作伙伴参与	开发和验证间冷回热航空发动机核心技术;燃油消耗量降低20%; CO_2 排放降低20%; NO_x 排放较ICAN CAEP/96的降低80%;CO排放较ICAN CAEP/96的降低15%~20%;可靠性提高60%;研制时间缩短50%;拥有费用降低30%;寿命期费用降低30%
SILENCE	2001年4月启动	1.1亿欧元	SNECMA公司领导,51家机构参与	到2008年使飞机噪声降低6dB
POA	2002~2006年	9920万欧元	由46家机构参与	开发和验证A330级飞机应用的电力系统、能量管理优化技术和革新结构
VITAL	2005年1月~2009年	9050万欧元(欧盟5049万欧元)	SNECMA公司领导,R·R、MTU、ITP、AVIO、CIAM、CSIR等52家机构参与	开发和验证先进发动机低压部件,相对于2000年技术水平,使未来航空发动机燃油消耗率降低20%,噪声降低6dB, CO_2 排放降低7%, NO_x 排放较ICAN CAEP/96的降低60%~80%
NEWAC	2007年	7100万欧元(欧盟4000万欧元)	MTU公司领导,由欧盟40家机构参与	开发和验证革新核心机方案,提高热效率,同时使 CO_2 排放降低6%, NO_x 排放降低16%
DREAM	2008年1季度到2011年	4000万欧元	R·R公司总负责,20~30家参与	开发和验证开式转子发动机方案、革新的系统和可选择燃油方案,降低发动机使用费用
CLEANSKY之SAGE	2009年到2014年	4.21亿欧元(CLEANSKY共16亿欧元)	R·R和SNECMA公司领导	开发和验证由先进低压/高压系统和革新核心机(包括开式转子)组成的5种全尺寸验证发动机,使噪声降低15dB, CO_2 排放降低15%~20%, NO_x 排放降低15%~40%

为此,欧盟国家不惜花费巨额资金,集中工作界与研究界的力量,分级(部件级、核心机级和发动机级)、分批(欧盟第5、6、7框架)地开展系统成套的大飞机发动机预研计划,探索并研究常规循环和先进循环大飞机发动机方案和关键部件技术。

在第5框架,欧盟国家的航空发动机产官学机构联合制定并实施了旨在降低排放的高效和环境友好的航空发动机(EEFAE)预研计划(核心机级)、旨在大幅度降低飞机噪声对居民区影响(SILENCE)的预研计划(部件级)和旨在提高性能的多电飞机(POA)预研计划(发动机级),与美国合作制定并实施了TECH56和前沿航空推进(LEAP56)预研计划(发动机级)。

在第6框架,继续制定并实施了旨在降低排放和噪声的环境友好的航空发动机(VITAL)预研计划(低压部件级),同时启动了旨在探索研究先进循环发动机的新型航空发动机方案(NEWAC)预研计划(核心机级)。目前,正在规划跨第6和第7框架的革新的发动机结构系统验证(“梦想”DREAM)(部件和发动机级)和清洁天空(CLEANSKY)预研计划,该预研计划是飞机级计划,包含可保持且绿色的发动机



(SAGE)分预研计划(部件和发动机级)。表1汇总了上述一些典型预研计划的时间、投资、合作伙伴和研究目标。

3 美国和法国合作的大飞机发动机技术研究计划

(1)TECH56计划。1998~2003年,CFMI公司制定了旨在获取新技术的TECH56计划。其目标是:与1999年水平的CFM56发动机相比,拥有费用(Owner Cost)降低15%~25%,燃油消耗率降低4%~7%,维护费用降低15%~20%, NO_x 排放降低到低于国际民航组织规定水平的50%,噪声相对于FAR36第3阶段的水平降低20dB。

该计划开发和验证了金属材料空心弯掠风扇叶片、新的高载荷高压压气机、低排放/低费用的双环腔贫油预混燃烧室、高载荷高压涡轮、对转低压涡轮和对转差动轴承、锯齿形喷管、冷却的全功能发动机数字控制器、低噪声喷气技术和风扇隔离器技术等。这些技术满足甚至超过了TECH56计划的预期目标,已经开始并将继续用于现役CFM56发动机的升级和新型发动机的研制。

(2)LEAP56计划。在TECH56计划之后,CFMI公司确定了CFM56发动机的未来发展方向,即总运行费用逐步降低;结构设计更加牢固;噪声明显降低;排放大大降低;循环参数实现最优;控制更加高效;系统集成性明显改善等。为此,CFMI公司启动了LEAP计划,为未来30年或更远的发动机开发和验证更先进的技术。

其开发和验证的技术包括:铝、钛和复合材料风扇机匣等轻质结构,先进的复合材料风扇叶片,高效率且低油耗的高压压气机,双环形预旋流低排放燃烧室,涡轮3D设计,革新的发电装置设计等发动机基本设计技术;可靠且轻质的部件,低费

用的外部硬件,先进轻质齿轮箱,下一代控制器等发动机系统部件设计技术。基本技术的部件验证试验于2007年开始,系统验证试验于之后的2~3年进行,而应用这些技术的CFM发动机最早于2013年投入使用。

另外,在LEAP56预研计划的基础上,CFMI公司也提出了拉动式开式转子方案。该方案与GE公司的GE36 UDF发动机相似。对这些开式转子发动机,还要进行多年的研究和试验验证。预计到2015年左右才能进行飞行试验,2020年以后可能投入使用。

未来大飞机发动机的关键技术

1 紧凑叶轮机

叶轮机部件的多变效率已经超过90%,提高的潜力已经不大。因此,重点开发和验证了一些紧凑叶轮机,以提高发动机效率,降低费用,改善经济性。具体如下:

(1)MTU公司的增压比达到11的6级跨声速高压压气机;

(2)MTU公司探索研究的压比为20左右的6级高压压气机;

(3)UEET计划研制的总压比为55~60的1级风扇/3级低压压气机/6级高压压气机;

(4)TECH56计划研制的压比为14.7的6级高压压气机。

(5)TECH56计划研制的2种对转的高负荷(提高15%)、高效率(提高1%)高压/低压涡轮;

(6)UEET计划开发和验证的级效率达90%、压比为5.5的高压涡轮;负荷增加50%、系统效率提高2%、系统质量减轻20%的紧密匹配的低压涡轮。

2 先进的低排放技术

除了开发和验证多孔层板火焰筒、陶瓷材料火焰筒、多孔内外壁火焰筒和浮动壁火焰筒等辅助降低排放技术以外,世界著名的航空发动机

设计与制造商已经成功地推出了多种低排放燃烧技术,并进一步开发和验证了以下燃烧室:

(1) 双环腔预混预涡流燃烧室(TAPS)。AST/DAC TAPS 燃烧室已经应用到 B787 飞机的 GENx 发动机中。第 2 代 TAPS 燃烧室已在 LEAP56 和 UEET 计划下开发和验证,目标是将 NO_x 排放值较 ICAO CAEP/2 的极限值降低 50% ~ 80%。

(2) 驻涡燃烧室。第 3 代驻涡燃烧室的试验验证工作已经取得成功,将探索移植到军用小涵道比涡扇发动机、商用大飞机发动机、工业和舰船燃气轮机中。

(3) TALON 燃烧室。第 1 代和第 2 代已经成功应用。第 3 代 TALON 燃烧室(MSQ 燃烧室)的 NO_x 排放值大大满足了 ICAO CAEP/6 的要求,CO/CH 满足了 CAEP/6 的目标值(分别有 60% 和 95% 的裕度),无可见烟。第 4 代 TALON 燃烧室(RSQ 燃烧室)在 UEET 计划下研究。

(4) 贫油分级单环形低排放燃烧室。R·R 公司等 ANTLE 研究计划下开发和验证。

(5) 双头超低 NO_x 贫油预混预蒸发燃烧室。SNECMA 公司等 CLEAN 计划下开发和验证。

(6) 局部蒸发/快速混合燃烧室。MTU 公司等 NEWAC 计划正在开发。

3 降低噪声技术

除了优化循环参数和采用 GTF 等先进循环以外,常规大飞机发动机主要通过先进部件技术和先进短舱/安装技术,降低发动机的噪声。

已经应用的先进部件降低噪声技术包括优化处理进气/风扇机匣、加大风扇与进口导流叶片的间距、加大风扇与导流叶片的间距、优化风扇所有级与低压压气机/低压涡轮特定级的转子叶片与静子叶片的数量

比、进口导流叶片与短舱吊挂一体化设计以及吸声衬垫等。正在开发和验证的包括 3D 叶型(掠形和弓形等)和尾迹管理等。

已经应用的采用先进短舱/安装降低噪声技术包括围巾式短舱进口、波瓣式混合器、用于起飞和着陆状态的外部气流混合器/引射器、可变面积风扇喷管、小突片喷管、控制 3D 核心机气流涡流结构技术和主动噪声控制技术。

4 新颖结构

新颖的结构是减轻大飞机发动机质量和提高可靠性的关键技术,对提高发动机经济性也特别重要,目前发动机结构正在向部件一体化、冷却

高效化和结构紧凑化方向发展。

新型一体化结构技术包括:风扇/压气机整体叶盘(环);风扇/压气机静叶成组;压气机转子分段焊接;涡轮整体叶盘;整体框架;整体混合器/扩压器等。

新型高效冷却结构技术包括:多孔层板火焰筒、浮动壁火焰筒、多斜孔气膜冷却火焰筒、发汗冷却火焰筒、复杂多通道强迫对流加气膜冷却涡轮叶片、铸冷涡轮叶片、内部对流增强冷却涡轮叶片、超级冷却涡轮叶片和多孔层板涡轮叶片等。

新型结构紧凑技术包括无导向器对转涡轮和无静子对转风扇技术等。

丹阳险峰轴承附件厂

我厂是原机械工业部中国机械基础件成套技术公司轴承专用设备、仪器仪表联营会成员单位,是专业生产机床附件和仪器仪表附件的工厂。

DJK-150 型“百灵”牌电解刻印机具有技术先进、品质优秀、设计新颖、造型美观、电脑控制、字迹清晰、工作可靠及使用方便等优点,是轴承、活塞环、工具和喷嘴等标志加工的理想选择。



▲ DJK-150 型“百灵”牌电解刻印机的技术规格

刻印直径: 15 ~ 150mm
电 源: 220V, 50Hz
刻印高度: >4mm 功耗: <40W
刻印深度: 5-15mm 净重: 10kg
刻印效率: 60 件/min(双槽型)
膜片寿命: 约 10 万件/片
电解液消耗: 约 1.2kg/万件
外形尺寸: 320mm×280mm×100mm(刻印电源)
300mm×420mm×80mm(刻印槽)
不但在平面上而且在外径上也可使用

本厂生产的硬质合金钢球,于 1999 年 4 月 28 日和 2000 年 7 月 6 日经国家轴承质量鉴定检测中心测定,分别达到 G16(8 ~ 14mm)、G10($\phi 3$ ~ $\phi 7.5$ mm),深受用户青睐。

通讯地址: 江苏省丹阳市新桥镇何家村
邮编: 212322
电话: 0511-86356866 86352019

传真: 0511-86357163
网址: WWW.XFDJKQ.COM
电子邮箱: Xqzhff@pub.zj.jsinfo.net

广告索引号 09-051

5 先进材料和工艺

先进的材料和工艺也是减轻大飞机发动机质量、提高性能、改善经济性的关键技术之一,目前它正在向性能高效化和环境无害化2个方向发展。

性能高效化材料和工艺包括:外涵机匣、风扇转子/静子叶片、包容环等冷端部件的树脂基复合材料及工艺;压气机转子/静子叶片、整体叶环、轴等中温部件的钛基和镍基复合材料及工艺;燃烧室火焰筒、涡轮转子/导向叶片、排气喷管等高温部件的陶瓷基复合材料和碳碳复合材料及工艺;涡轮盘粉末冶金及工艺;涡轮叶片单晶合金及工艺;压气机叶片和低压涡轮的钛铝金属间化合物及工艺;先进环保热障涂层及工艺等。

为了满足未来航空发动机“无危害”的需要,PW和MTU等公司



正在努力实现“工作场所无有害物质,工作人员无损伤,提供的产品和服务安全”的目标。其开发和验证的关键技术和措施包括:保证材料充分利用、使用便利的设计技术;开发新的环保材料和无铬底漆与涂层;开发去除现役发动机和未来发动机有害材料的技术;开发避免有害物质出现和废物排出的制造工艺;开发使能源充分利用并确保材料全部利用的制造工艺;开发和完善使金属切割、钻孔、精加工等工作最少的制造工艺;研究有害材料处理技术和6价格表面处理替代技术;开发绿

色的清洗剂与润滑材料。

6 智能控制技术

发动机智能控制技术有能够准确感知发动机及其部件的工作环境和执行特定任务的能力,它还能够快速适应变化的环境和功率降低的状态,精确地规划/重新规划一项任务甚至整个任务,进而使整个发动机在所有工作状态下的综合性能(性能、可操纵性、可靠性、寿命、费用)都达到最优,达到改善发动机的耐久性与经济可承受性的目的。目前,智能控制在UEET计划的推进系统智能控制项目和VAATE计划的智能发动机研究领域下进行开发和验证。其关键技术主要包括:燃烧、间隙和振动的主动控制技术;高精度实时性能和寿命模型技术;分布式主动控制技术;发动机健康管理技术;一体化低观测性进气道和喷管技术;微机电传感器和作动器技术;信息融合技术;先进非线性技术;灵巧结构、受控化学反应燃料等。

7 先进循环

为了满足更具挑战性的目标,世界知名的航空发动机设计与制造商正在探索研究更经济和环保的先进循环大涵道比发动机技术。

(1)多电发动机。在美国的IHPTET计划、欧盟国家的航空发动机用主动磁力轴承(AMBIT)、灵巧航空发动机用磁力轴承(MAGFLY)、多电发动机和机翼系统(MEEAWS)、POA、VITAL、NEWAC预研计划的SAGE下已经完成,正在或将要进行技术验证。其关键技术包括灵巧航空发动机用主动磁力轴承设计技术、主动磁力轴承系统、内置式整体起动/发电机、分布式控制系统、电动燃油泵和电力作动器等。

(2)对转涡扇发动机。在EEFAE、SILENCE、VITAL、CLEANSKY计划的SAGE分计划下已经完成,正在或将要进行技术验

证。其关键技术包括低噪声超大涵道比风扇、轻质包容机匣、轻质结构件、大力矩发动机轴、轻质低噪声涡轮、轻质短舱、对转风扇、对转涡轮和低速增压级等。

(3)齿轮驱动的涡扇发动机。在先进的涵道桨扇(ADP)验证机计划、先进技术风扇综合验证机(ATFI)计划、VITAL、NEWAC和CLEANSKY预研计划的SAGE下已经完成,正在或将要进行技术验证。其关键技术包括轻质、高效、高可靠性的齿轮箱技术,轻质、紧凑的高速低压压气机技术,少级数、短长度、轻质量低压涡轮技术等。

(4)间冷回热航空发动机。在CLEAN、航空发动机先进排气回热器技术(AEROHEX)、VITAL、NEWAC和CLEANSKY预研计划的SAGE下已经完成,正在或将要进行技术验证。其关键技术包括中间的轴流-径向压气机、高效轻质间冷器、高压压气机主动喘振控制系统、变几何涡轮系统(高压、中压和低压涡轮)、结构紧凑且温差大的回热器组件。

(5)开式转子发动机。20世纪80年代进行了大量研究和验证,90年代基本或接近停止,近期又开始在DREAM、LEAP56等计划下进行探索研究和试验验证。

结束语

随着紧凑叶轮机、低排放燃烧室、先进降噪技术、新颖结构、先进材料和工艺、智能控制等常规涡扇发动机技术,以及齿轮驱动涡扇发动机、间冷回热航空发动机和多电发动机等先进循环发动机关键技术的不断发展和成熟,未来大飞机发动机的性能将越来越高,经济性将越来越好,环保特性将越来越得到改善,甚至会取得突破性进展。

(责编 玉龙)