

未来大飞机发动机的发展趋势

Future Development Trend of Large Commercial Aircraft Engines

沈阳发动机设计研究所 梁春华 凌 瑶



梁春华

研究员,主要研究方向:航空发动机情报研究。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“九五”优秀科技情报成果一等奖和三等奖各1项,发表论文30多篇。

21世纪初,无论是在波音777客机上使用多年的PW4084、GE90、TRENT800发动机与在A380客机

21世纪初,无论是在波音777客机上使用多年的PW4084、GE90、TRENT800发动机、在A380客机上使用不久的GP7000与TRENT900发动机,还是为波音787客机正在研制的GENx与TRENT1000发动机,在耗油率、全寿命费用、污染物排放、噪声排放、可靠性与安全性等方面都已经取得了显著的进步。为了应对日益激烈的市场竞争和愈发严格的环保要求,美国与欧盟国家确定了大飞机发动机的未来发展目标。

上使用不久的GP7000与TRENT900发动机,还是为波音787客机研制的GENx与TRENT1000发动机,在耗油率、全寿命费用、污染物排放、噪声排放、可靠性与安全性等方面都已经取得了显著的进步。为了应对日益激烈的市场竞争和愈发严格的环保要求,美国与欧盟国家确定了大飞机发动机的未来发展目标。

美国在通用的、经济可承受的涡轮发动机(VAATE)研究计划下确定

的军民用航空发动机的发展目标,即:相对当时的技术水平(如F119发动机),到2017年使经济可承受性提高10倍。欧盟国家2020年大飞机发动机的发展目标是:相对2000年技术水平的发动机(如CFM56和TRENT700),耗油率降低20%;使用费用降低;投入市场时间缩短50%;NO_x排放降低80%;噪声降低10dB;事故率降低80%。这也就是说,未来的大飞机发动机还将沿着更经济、更

环保的方向发展。

经济性要求

经济性一直是飞机发动机的追求目标,主要通过降低耗油率与全寿命费用来实现。21世纪初,CFM56、GE90、PW4084、TRENT800、GP7000与TRENT900等现役大飞机发动机的经济性已经取得了显著提高,具体体现在:巡航状态耗油率已经由20世纪50年代JT3D与AVON等发动机的 $0.85 \sim 0.95 \text{kg}/(\text{kgf} \cdot \text{h})$ 、60年代SPEY与JT8D-11等发动机的 $0.72 \sim 0.84 \text{kg}/(\text{kgf} \cdot \text{h})$ 、70~80年代RB211、CFM56与D-30等发动机的 $0.60 \sim 0.70 \text{kg}/(\text{kgf} \cdot \text{h})$,下降到90年代的GE90、PW4084、TRENT900与GP7000等发动机的 $0.50 \sim 0.55 \text{kg}/(\text{kgf} \cdot \text{h})$;全寿命费用已经较20世纪50年代JT3D与AVON等发动机有了巨幅降低。为了进一步提高未来大飞机发动机的经济性,美国与欧盟国家还在通过实施一系列的技术研究计划,大力开发和验证降低耗油率与全寿命费用的革新技术,以应对越加激烈的市场竞争。

在美国,GE公司与SNECMA公司于1998~2003年实施了TECH56研究计划,开发和验证金属材料空心弯掠风扇叶片、高载荷高压压气机、高载荷高压涡轮、对转低压涡轮、对转差动轴承、冷却的全功能发动机数字控制器等,实现了“与1999年的CFM56发动机相比,拥有费用降低15%~25%,耗油率降低4%~7%,维护费用降低15%~20%”的目标。NASA与工业界于1999年开始实施超高效发动机技术(USET)研究计划,开发和验证轻质高负荷少级数叶轮机(压比达到12的4级高压压气机和冷却空气量为15%的涡轮)、轻质材料、智能控制技术等,实现了“与GE90发动机相比,耗油率降低10%、使用费用降低50%”的目标。GE公司与SNECMA公司正在

实施LEAP56研究计划,开发和验证复合材料风扇机匣、复合材料风扇叶片、高效率且低油耗的高压压气机、3D气动设计的涡轮、革新的发电装置、低费用的外部硬件、先进轻质齿轮箱与下一代控制器等,以实现“与CFM56-7B发动机相比,耗油率降低10%~15%,维护费用降低15%~25%,初始机上寿命延长25%”的目标。美国官产学研机构于2006年开始实施VAATE研究计划,开发和验证由革新材料/气动/结构组成的多用途通用核心机、包括故障预诊/健康管理/主动控制等技术的智能发动机和使发动机零部件避免损伤/寿命延长/可靠性与维修性提高的耐久发动机,以实现“到2017年,使推重比提高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%”的目标。

在欧盟,R·R公司等多家机构于2000年开始实施经济可承受的近期低污染发动机(ANTLE)研究计划,开发和验证提高热力/推进/部件效率与减轻部件质量的技术,实现了“相对2000年的技术水平,到2008年使耗油率降低12%、拥有费用降低20%、可靠性提高60%、研制时间缩短50%、寿命期费用降低30%”的目标。SNECMA和MTU公司领导19家合作伙伴于2000年开始实施环保型航空发动机部件验证(CLEAN)计划,开发和验证间冷回热循环发动机核心机技术,以实现“相对2000年的技术水平,到2015年使耗油率降低20%、拥有费用降低30%、可靠性提高60%、研制时间缩短50%、寿命期费用降低30%”的目标。SNECMA公司领导52家机构于2005年开始实施环境友好的航空发动机(VITAL)研究计划,开发与验证对转涡扇发动机(CRTF)、直接驱动涡扇发动机(DDTF)与齿轮驱动涡扇发动机(GTF)的先进低压部件与技术,以实现“到2009年

使耗油率相对于2000年技术水平降低20%”的目标。MTU公司领导40家机构于2007年开始实施新型航空发动机方案(NEWAC)研究计划(核心机级),开发和验证革新的用于对转涡扇发动机的高总压比间冷核心机、用于间冷回热循环发动机的间冷回热核心机、用于GTF的主动控制核心机和常规涡扇发动机的间冷核心机等,以实现“通过提高热效率来降低耗油率”的目标。R·R公司领导的20多家机构于2008年开始实施革新的发动机结构系统验证(DREAM)(部件和发动机级)计划,开发与验证开式转子发动机及其革新的系统,以实现“到2011年使耗油率降低10%~15%、使用费用显著降低”的目标。R·R和SNACMA公司等机构于2009年实施了清洁天空(CLEANSKY)研究计划中的可保持且绿色的发动机(SAGE)分研究计划(部件和发动机级),开发和验证更高效的革新核心机、主动流量/载荷控制技术、通过新结构与新材料等实现减重的技术、能量管理技术和任务管理技术等,以实现“到2014年使耗油率降低15%”的目标。

通过以上技术的开发和验证,预计大飞机发动机的经济性,特别是耗油率将得到明显降低。到2015年,R·R公司的RB282对转涡扇发动机、PW公司的PW1000G齿轮驱动的涡扇发动机和CFMI公司的LEAP-X发动机的耗油率将比目前发动机的降低15%;2020~2025年,PW公司与MTU公司的第2代2级对转风扇的齿轮驱动涡扇发动机和R·R公司、CFMI公司的第1代开式转子发动机的耗油率将较目前发动机的降低20%~25%;2026~2035年,PW公司与MTU公司的第3代回热型齿轮驱动涡扇发动机、RR公司与CFMI公司的第2代开式转子发动机、R·R公司与MTU公司的间冷回热循环发动机的耗油



GE9x发动机

率将较目前发动机的降低 30%。

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。

1 低排放

在美国, NASA 实施了 UEET 研究计划,开发和验证第 4 代 TALON 燃烧室(采用低发烟燃油喷嘴、低冷却流量火焰筒、革新的燃烧孔优化技术、淬熄叶片与和驻留时间控制等部件或技术)与贫油直接喷射燃烧室等低排放燃烧技术和一体化的低阻力短舱、缩短长度的进气道与去掉附面层隔板等新式飞机/发动机一体化技术,实现了“NO_x 排放量较 GE90 发动机的降低 20%、CO₂ 排放明显降低”的目标。GE 公司与 SNECMA 公司实施了 TECH56 研究计划,开发和

验证低排放/低费用的双环腔贫油预混燃烧室(TAPS)与陶瓷基复合材料燃烧室,实现了“NO_x 排放量低于国际民航组织(ICAN)规定值的 50%”的目标。GE 公司与 SNECMA 公司正在实施 LEAP56 研究计划,开发和验证新一代双环形预旋流低排放燃烧室,以实现“NO_x 排放量低于国际民航组织的排放规定值的 60%、CO₂ 排放量明显降低”的目标。美国官产学研机构正在实施 VAATE 研究计划,开发和验证驻涡燃烧室、陶瓷基复合材料燃烧室、主动燃烧控制技术,以实现“降低排放”的目标。

在欧盟, R·R 公司领导实施了 ANTLE 研究计划,开发和验证低费用的贫油分级和单环形低排放燃烧室,实现了“NO_x 排放较 ICAN CAEP/96 规定值降低 60%、CO 排放较 ICAN CAEP/96 规定值降低 10%、CO₂ 排放降低 12%”的目标。SNECMA 和 MTU 公司领导 19 家合作伙伴实施了 CLEAN 研究计划,开发和验证用于间冷回热循环发动机的轴向分级的双头超低 NO_x 贫油预混预蒸发燃烧室,以实现“NO_x 排放较 ICAN CAEP/96 规定值降低 80%、CO 排放较 ICAN CAEP/96 规定值降低 15%~20%、CO₂ 排放降低 20%”的目标。SNECMA 公司领导的 52 家机构实施了 VITAL 研究计划,开发

和验证先进发动机低压部件,实现了“相对于 2000 年技术水平, CO₂ 排放降低 7%、NO_x 排放较 ICAN CAEP/96 规定值降低 60%~80%”的目标。MTU 公司领导 40 家机构正在实施 NEWAC 研究计划,开发和验证革新的贫油预混预蒸发燃烧室、直接喷射(LDI)燃烧室与局部蒸发/快速混合(PERM)燃烧室,以实现“CO₂ 排放降低 6%、NO_x 排放降低 16%”的目标。R·R 和 SNACMA 公司等正在实施 CLEANSKY 之 SAGE 研究计划(2009~2014 年),开发和验证由先进低压/高压系统和革新核心机,以实现“CO₂ 排放降低 15%~20%、NO_x 排放降低 15%~40%”的目标。

2 低噪声

在美国, NASA 实施了 UEET 研究计划,开发和验证后缘吹风的低噪声风扇技术,实现了“噪声较 GE90 发动机的降低 10dB”的目标。GE 公司与 SNECMA 公司实施了 TECH56 研究计划,开发和验证金属材料空心弯掠风扇叶片、高载荷高压压气机、高载荷高压涡轮、锯齿形喷管和风扇隔离器等技术,实现了“噪声相对于 FAR36 第 3 阶段规定值降低 20dB”的目标。GE 公司与 SNECMA 公司正在实施 LEAP56 研究计划,开发和验证先进的复合材料风扇叶片、先进轻质齿轮箱等技术,以实现“噪声相对 2000 年发动机的降低 10~15dB”的目标。

在欧盟, 欧盟国家航空发动机产官学机构于 2000 年结束了采用理解的和革新的设计降低发动机源噪声(RESOUND)研究计划、采用短舱处理和主动控制降低飞机噪声(RANNTAC)研究计划、降低机体和安装噪声(RAIN)研究计划和管道声学辐射的基础研究(DUCAT)计划等 4 项降低噪声的专项研究计划,开发和验证了低噪声风扇、低噪声低压涡轮、低噪声短舱、斜嵌进气道等,实现了“使噪声降低 4dB”的目

标。SNACMA 公司领导 51 家机构于 2001 年开始实施大幅度降低飞机噪声对居民区的影响(SILENCE)研究计划(启动部件级),开发和验证新型进气道、新颖进气道衬套、低噪声风扇、低噪声涡轮、喷管喷气噪声抑制器、发动机一体化技术、采用智能控制的主动噪声控制技术,实现了“到 2008 年使噪声降低 6dB”的目标。SNECMA 公司等实施了环境友好的航空发动机(VITAL)研究计划(低压部件级),开发和验证先进发动机大涵道比技术、低叶尖速度风扇技术、低噪声出口导向叶片技术与低噪声涡轮技术等,以实现“噪声较 2000 年技术水平发动机降低 6dB”的目标。AIRBUS 公司与 RR 公司、SNACMA 公司等 30 多家机构于 2009 年开始实施低噪声飞机优化(OPENAIR)研究计划,开发和验证主动噪声控制、主动流量控制、自适应可调技术与综合方案,以实现“噪声较 2000 年技术水平发动机降低 12dB”的目标。R·R 公司与 SNACMA 公司等正在实施清洁天空(CLEANSKY)研究计划下的可保持且绿色的发动机(SAGE)分研究计划(部件和发动机级),开发和验证轻质部件技术、低噪声结构技术和主动噪声控制技术等,以实现“噪声较 2000 年技术水平发

动机降低 16dB”的目标。

减少有害物

为了减小航空发动机及其部件的材料对环境与人类的影响,美国和欧洲国家正在大力开发绿色设计、绿色材料、绿色制造、绿色翻修与修理工艺维护等技术,以实现“工作场所无有害物质、工作人员无损伤、安全提供产品和服务”的目标。

(1) 发动机设计与制造厂要通过国际非官方的环境管理系统标准 ISO 14001 的认证,以控制和减少对环境产生不良影响的因素。

(2) 在设计方面,必须保证材料充分利用、使用便利、可以采用多种方法修理,还要考虑到发动机具有较长的翻新周期。

(3) 在材料方面,开发新的有害材料的替代材料和无铬底漆与涂层,与合作伙伴和供应商合作开发去除现役发动机和未来发动机有害材料的技术,尽量采用环保材料,以替代用于发动机零件、螺栓、粘结剂和涂层上的有毒物质(如铅、镉、银、水银和铬酸盐等)。

(4) 在制造工艺方面,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

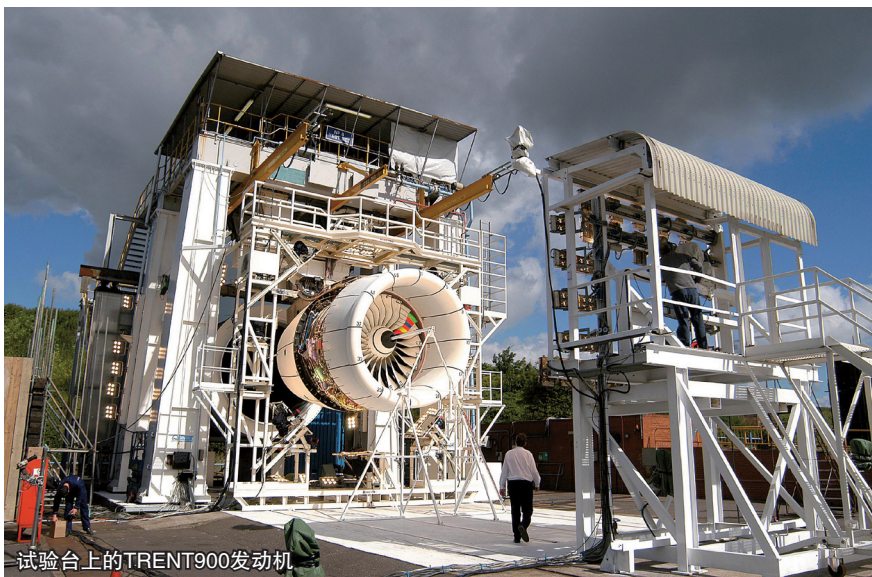
善使金属切割、钻孔、精加工等工作最少的制造工艺,如引入(零件)锻造到尺寸(精密锻造)的制造工艺和金属喷注成型工艺等。如 PW 公司在 21 世纪初,已经将工厂生产过程中排出的有害废物减少了 80%,有毒气体减少了 98%。现正在通过净形(net-shape)制造工艺,酸浸、磨削与脱模的闭环工艺,水喷射清洗技术,采取与供应商合作等措施,进一步消除发动机中的有害物质。

(5) 在维护与翻新工艺方面,开发有害材料处理技术、Cr⁶⁺离子表面处理替代技术等绿色维护与修理工艺。其中包括:代替镀铬的高速氧燃油热喷涂(HVOF);代替静子叶片镀镍镉合金的化学镀镍;在 JT8D 发动机钢压机盘及钢静子叶片上采用的代替镍镉镀的铝粉漆;代替铆钉的铬酸盐底漆的钼酸锌底漆;不含铅的紧固件装配辅助材料;风扇和压机叶根采用不含铅的防微动磨蚀防卡件;在齿轮箱及中介机匣采用的代替防电偶腐蚀的 6 价铬酸盐底漆的不含铬酸盐的底漆;紧固件采用的不含铅的焙烧干膜润滑剂;薄膜过滤的闭水清洗工艺等。

(6) 在报废部件的回收再利用方面,开发和验证一些方法,比如将一些部件处理为构成先进合金的纯金属粉末,提高报废部件的回收率。

结束语

相信随着先进技术的不断开发与验证,常规大飞机发动机与新型大飞机发动机的经济性与环保性都将得到很大提高。但是,技术的开发与验证不会总是一帆风顺,也不可能总是成功。因而及时跟踪和掌握世界领先技术的进展,可以为刚刚起步的中国大飞机发动机研发工作提供更多的经验和教训,对达到“节省时间和费用,加快发展速度,实现跨越式提高”等目标,具有非常重要的参考和借鉴作用。 (责编 侧卫)



试验台上的Trent900发动机