

大型民机发动机的特点及关键技术

西北工业大学动力与能源学院 蔡元虎 宋江涛 邓明



蔡元虎

西北工业大学教授,主要从事航空发动机总体设计、性能仿真和气动热力研究。

大型发动机与大型飞机相比,前者技术上的难度和投资的风险会更大。本文对大型民机用涡扇发动机的特点及关键技术作了初步探讨。

大型民机发动机的特点

民用涡轮风扇发动机与军用飞机发动机相比具有如下特点:

1 安全性、经济性和环保性

民用航空发动机最本质的特点是安全性、经济性和环保性,这3个特点是靠航空发动机的性能设计、可

民用航空发动机最本质的特点是安全性、经济性和环保性。国内民航运营及维修企业早已和国际接轨,因而大型民机发动机的性能、油耗、可靠性、维修性、全寿命运营成本、振动及噪声等内在或外在的技术特征,哪一项水平不高,都会遭到航空公司和乘客的拒绝。

靠性设计、维修性设计和环保设计来保证的。安全性主要指空中停车率要低(现已降至0.002~0.005次/1000飞行小时)。经济性主要指发动机的高空巡航耗油率(sfc,单位为

$\text{kg}/\text{N}\cdot\text{h}$)低,见图1。目前GE90-115B的sfc只有 $0.052\text{kg}/\text{N}\cdot\text{h}$ 。环保性主要指排放和噪声要低。

使sfc大幅度下降的两个主要因素是:大幅度提高涡扇发动机的涵

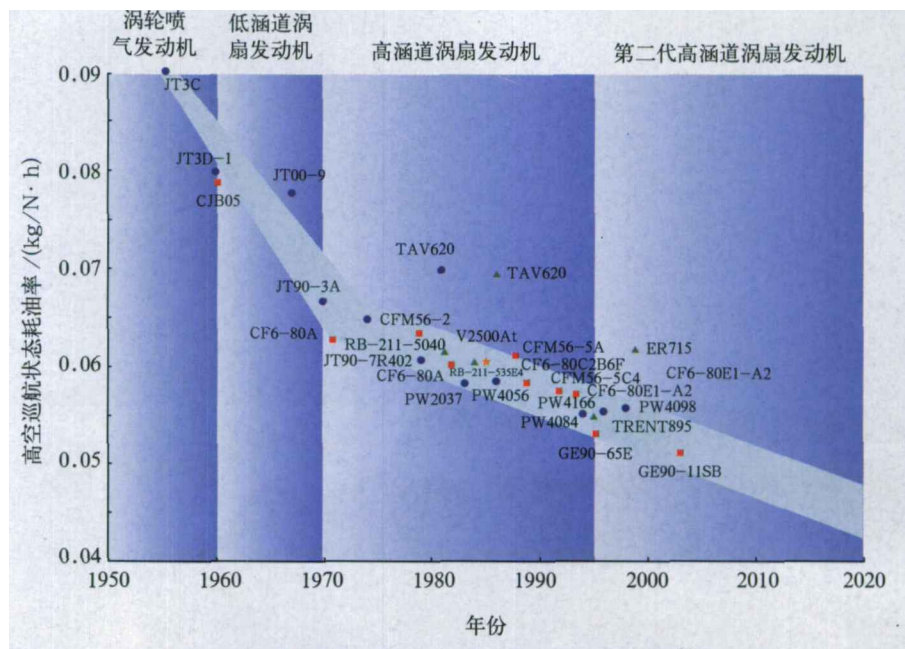
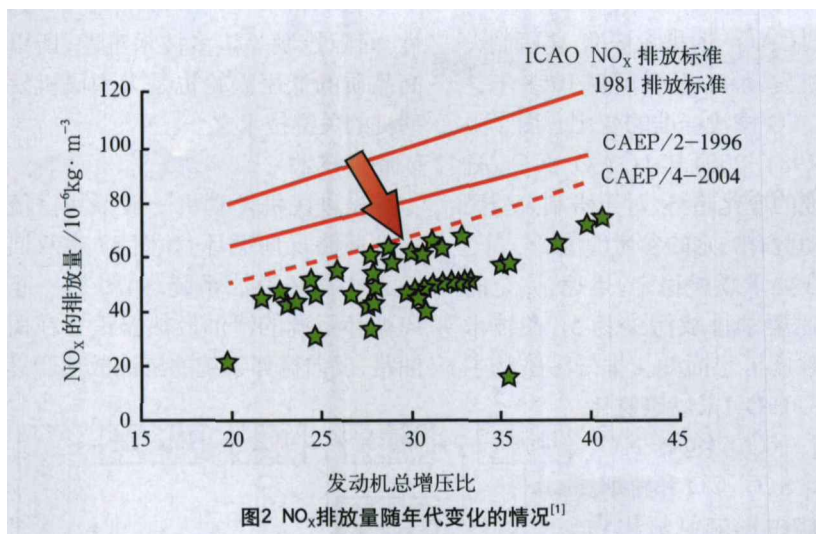


图1 航空发动机高空巡航耗油率(sfc)的变化趋势^[1]

图2 NO_x排放量随年代变化的情况^[1]

道比 B 和总增压比 π 。进入本世纪之后，涡扇发动机的 B 和 π 进一步提高，使 sfc 进一步下降。如 GE90-115B，其 B 已达到 9， π 已达到 42， sfc 降低到 $0.052\text{kg}/\text{N}\cdot\text{h}$ 。

国际民航组织 (ICAO) 对排放的要求越来越严格，具体要求见图 2。

大型民机发动机的噪声越来越低，详见图 3。

2 寿命长

大型民用飞机发动机在保证高可靠性的前提下，要求长寿命。现在先进的发动机寿命已超过 40000h。为了保证长寿命和高可靠性，民机发动机的推重比要比军机低。

3 外廓尺寸大

起飞推力越来越大也是民用航空发动机的一个发展趋势，目前已经超过 50000daN。大推力高涵道比发动机的外廓尺寸也相应很大。20000daN 推力发动机的风扇直径大约为 1.5m 左右，40000daN 的在 2m 以上（如 PW4090 发动机），而 50000daN 的则高达 3m 以上（如 GE90-115B）。如此巨大的发动机的总体结构强度、刚度和传力路线及安装节都必须仔细加以考虑。

4 机动过载小

运输机和客机比歼击机或轰炸机的机动过载要小得多，因此发动机可以安置在距离机身较远的机翼下

面或尾翼上的发动机舱中，便于维护和改善进气道的工作条件。其安装节的布局、结构和载荷也与军机有所不同。

5 系统复杂

除了燃油系统、滑油系统、液压系统、起动系统、点火系统、气流控制系统等一般军机所具有的系统外，民机发动机还有反推系统、客舱空调供气系统、空气涡轮起动供气系统、整体传动发电机系统 (IDGS)。另外，由于大型民机发动机早已采用 FADEC (全功能数字式电子控制) 型的燃油控制系统和状态监控与故障诊断技术，因此用于测试和采集发动机状态参数的数据系统也很复杂，对其可靠性和精度要求高。

6 适航认证

民机要投入运营必须要通过“适

航认证”以保证飞行安全，适航认证行使的是国家权力，执行的是法定程序。适航认证的程序、项目和内容是根据民用航空长期运营积累下来的安全经验，依据成熟的技术制定的，以法律规章的形式确定下来。适航过程涵括民机整个系统（包括整体、部件、子系统，还包括性能和操纵的安全品质）并贯穿其整个寿命期。

7 技术起点高

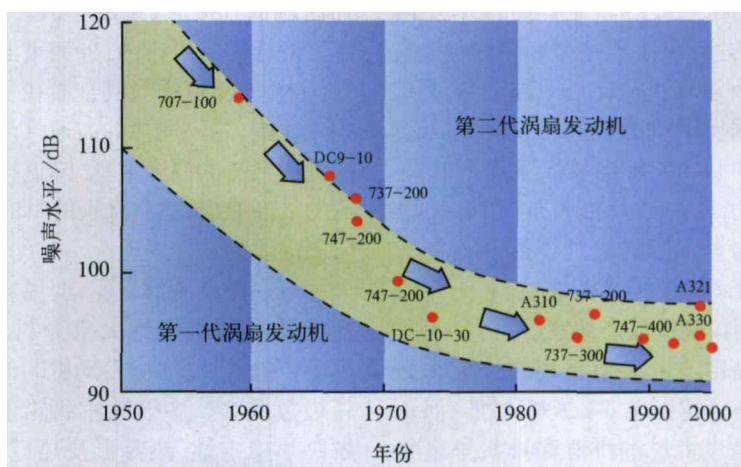
国内民航运营及维修企业早已和国际接轨，因而在大型民机发动机的性能、油耗、可靠性、维修性、全寿命运营成本、振动及噪声等内在或外在的技术特征中，哪一项水平不高，都会遭到航空公司和乘客的拒绝。原因很简单，因为乘客需要舒适感和优质服务，航空公司要求盈利。因此，在研制大型民机发动机过程中，必须吸取国内运输机发动机研制的经验和教训。

大型民机发动机关键技术

根据对国外民用航空发动机技术水平的初步了解和分析，发展大型民机涡扇发动机至少需要突破以下关键技术：

1 抗颤长风扇叶片

长叶片的颤振问题是转子叶片的常见故障之一。高涵道比涡扇发动机的风扇叶片更长（GE90-115B 的风扇叶片长度超过 1m）。风扇叶

图3 民机噪声（装涡扇发动机）随年代的变化趋势^[1]

片不但要质量轻、抗颤振、抗鸟撞,还要能够进行单枚叶片拆装。过去长风扇叶片采用叶身凸台(叶肩)以起到抑制振动的作用,有的长叶片甚至有两道凸台。但叶身凸台会增加叶片质量,减少有效进气面积,影响风扇性能。目前在先进发动机上已采用无叶身凸台的弯掠叶片,该叶片采用非定常有粘全三维方法设计。抗颤长风扇叶片技术与气动设计、结构设计、复合材料及其制造成形技术等多个学科有关。

2 压气机气流控制系统

喘振是压气机的常见现象,在先进发动机上也不例外。压气机容易发生喘振的工作状态和外部条件有:起动及低功率状态,发动机转速(推力)下降过程中,打开反推、使用操纵不当等。所以在先进的航空燃气涡轮发动机上采用中间级放气、双转子、进口可调导流叶片和多级可调静子叶片等多种防喘扩稳措施,以保证压气机在各种工作状态、各种飞行条件和工作状态转换的过程中不发生喘振。

压气机气流控制系统(CACS)的功用是在发动机起动、非设计状态和反推力工作状态下保证压气机稳定工作。该系统一般由放气系统和可调静子叶片系统组成。放气系统中有程序放气系统,起动放气系统和打开反推放气系统。程序放气系统的功用是在发动机工作时依据发动机的转速、压比等信号,程式化的控制各个放气机构工作;起动放气系统依据发动机的转速在发动机启动过程中放气;反推放气系统与反推杆随动,在打开反推时放气,防止压气机喘振。压气机气流控制系统一般由发动机的控制系统控制。

3 低污染物排放燃烧室

民用飞机动力系统的排放物必须符合适航标准CCAR34部《涡轮发动机飞机燃油排泄和排气排出物规定》的要求,同时要符合国际民航

组织(ICAO)的排放标准,要研制大型民机发动机,更要预测10多年之后ICAO排放标准的变化。图2中包含1981-2004年ICAO NO_x排放标准的变化趋势,对于研制大型民机发动机有一定的参考价值。

在要求燃烧稳定、迅速、完全的同时还要求排放污染物少,在技术上的难度可想而知。排气污染物主要有UHC(未燃碳氢化合物)、NO_x(包括NO、NO₂)、SO₂、CO和冒烟。在燃烧中影响氮氧化物生成的主要因素是主燃区的火焰温度和燃气滞留时间。主燃区的火焰温度低,燃气滞留时间短,则NO_x排放量小。如GE90发动机的双环腔燃烧室。它采用双路供油方式,保证了大功率状态的供油量和低功率状态的燃油雾化,改善了燃烧条件。

4 降低噪声污染技术

燃气涡轮发动机工作噪声来源于其高速转子、机械系统和高速排气噪声。

高涵道比涡扇发动机可以大大降低排气速度,有效抑制噪声的产生。双涵道涡扇发动机广泛采用内、外涵道排气混合器来消音。如A340飞机上的CFM56-5发动机有长外涵道排气装置,采用了内、外涵道排气混合器来进行内、外涵道混合排气。内、外涵道排气混合器在发动机内完成内、外涵道热的高速气流与冷的低速气流的混合过程,降低排气的最高速度,达到降噪的目的。

5 高品质的低压涡轮

风扇由低压涡轮驱动,风扇要消耗发动机获得的绝大部分机械能。因此,高涵道比涡扇发动机的低压涡轮级数较多。多级低压涡轮设计要解决热稳定性、热变形及热应力、热疲劳寿命、热定心、平衡性、装配工艺

性、间隙控制等诸多技术难题,所以高品质的低压涡轮也是大型民机发动机的关键技术之一。

6 润滑技术

先进民机发动机一般采用全流式单回路反向循环(如图4)或双回路正向循环滑油系统(如图5)。正向循环系统的滑油散热器设置在回油路,反向循环系统的滑油散热器设

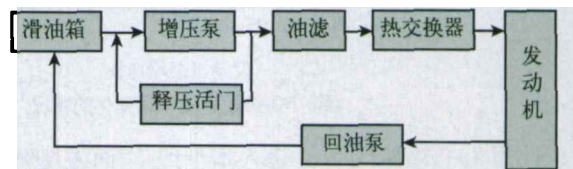


图4 全流式单回路反向循环滑油系统

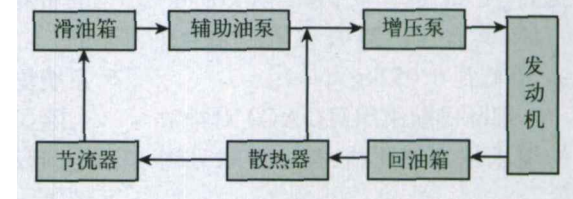


图5 双回路正向循环滑油系统

置在供油路。全流式滑油系统的供油量随转速的提高而增加(调压式基本保持不变),有利于满足大功率状态的滑油量需要,反向循环或双回路的滑油系统可以提高发动机的起动性能,缩短暖机准备时间,能有效减轻轴承的磨损和损伤,延长其使用寿命。

环下供油方式是一种新型润滑技术(滑油经过轴承内环上的油孔进入轴承),这种供油方式应用于大推力发动机转子的止推轴承润滑,可以提高轴承的承载能力,改善滚子的散热效率,解决轴承的损伤失效和延长轴承寿命等问题。

7 反推装置

反推装置是大型民机发动机重要的组成部分。高涵道比涡扇发动机采用冷气流反推系统,即将外涵道堵塞迫使外涵道气流向斜前方喷出,产生反向推力。反推操纵机构有气动式、液压式和机械式等。反推装置的设计也是一项系统工程,与飞机设

计(发动机舱)、发动机设计和燃油控制器设计(反推由反推杆操纵,打开反推时发动机要从近慢车经最大状态再进入到反推状态)均有关系。

8 发动机控制技术

现代发动机控制系统采用全功能数字式电子控制(FADEC)系统。该系统包括发动机管理和控制、状态监控与故障检测、数据通信等功能,与发动机管理和控制有关的功能包括:推力管理,燃油流量控制,空气流量控制,冷却控制,间隙控制,启动、点火、反推控制,燃油、滑油温度管理,安全保护等。FADEC系统由发动机电子控制器(EEC)和燃油计量分配装置两部分组成,两者之间通过电-液转换装置联系。

9 状态监控与故障诊断技术

状态监控与故障诊断技术是保障飞行器及发动机高可靠性安全运行的必要条件,也是实现先进维修思想和维修方式的必要手段和前提条件。状态监控与故障诊断系统与FADEC系统相结合,利用其完善的测试与数据采集系统、机载计算机和EEC强大的计算功能,随时监控发动机各种状态参数,完成超限警告、趋势图分析、故障诊断和故障隔离。状态监控与故障诊断技术包括诊断算法研究、发动机故障模式分析、建立故障模型和积累故障经验数据。大型民机发动机中常采用的状态监视手段有孔探检查、滑油屑末和滑油光谱分析、滑油系统关键参数监测、振动监测以及以气流参数为主的性能监视与趋势分析等。

10 控制技术

这里所说的控制技术是指与发动机气动性能有关的间隙控制技术和与发动机机械性能有关的振动控制技术。

间隙控制技术指低压涡轮和高压涡轮的间隙控制,目前先进发动机对高压压气机也采用间隙控制技术,以提高压气机效率,如V2500发动

机的高压压气机采用了被动式间隙控制技术。

振动控制技术融合了转子动力学多年的研究成果,此项技术工业发达国家已经比较成熟。完善的振动控制系统包括挤压油膜阻尼器、先进的篦齿密封装置(封严环为阶梯形)或刷式封严、转子轴向力控制、支承结构的变刚度设计等。

11 维修性设计

现代发动机以先进的维修理论和维修方式作为设计基础,均要求具有视情维修的能力。采用先进的维修理论和维修方式,可以防止维修不足和维修过度的发生,既降低了维修成本,又可以提高可靠性。

维修性设计是维修性工程的核心,在研制大型民机发动机的过程中,应特别重视维修性设计。

维修性设计准则中通常应包括可达性、标准化、互换性、防错性、人素工程、安全性、可检测性、冗余设计等方面的内容。

通常采用每飞行小时直接维修工时、更换发动机时间、外场可更换组件更换时间等指标来评价航空发动机的维修性。

12 整体传动发电机系统

大型飞机的各种计算机(如飞行管理计算机、大气数据处理计算机)和发动机电子控制器要求恒频恒压的供电系统(400Hz,115V)。因此发动机高压转子和发电机之间需要有恒速传动装置,其功用是在输入转速变化时保持输出转速不变。目前已将发电机和恒速传动装置集合在一起,组成IDGS(Integrated Drive Generator System),即整体传动发电机系统。系统有独立的润滑装置。

参考文献

[1] Benzakein M J. GEAE propulsion vision for the 21st century//“纪念航空百年高层学术论坛”大会报告,北京,2003。

(责编 鱼十)

2008特别策划

CCMT2008 特别策划(4月)

报道国内外数控机床领域最新技术和应用。

信息化专刊(8月)

报道制造业信息化发展以及航空企业的信息化解决方案。

复合材料专刊(9月)

报道航空航天复合材料设计制造技术及其解决方案。

珠海航展特别策划(10月)

报道国内外航空航天及装备制造技术发展。

中国航展全接触(11月)

报道航展信息、航空航天及有关装备制造业发展。

年度特别策划(12月)

特设“行业回顾与展望”、“年度回顾”、“年度论坛”、“国防工业要览”栏目。

广告正在征集中



航空制造技术杂志社
Aeronautical Manufacturing Technology Magazine

地址:北京市朝阳区东军庄1号
通讯:北京340信箱 杂志社(100024)
电话:010-85700465
传真:010-85700466
E-mail: ad@mte.net.cn(广告部)
ed@mte.net.cn(编辑部)
网址: www.mte.net.cn