

# 中国大飞机发动机研制 任重而道远

## Long-Term Task for China to Research Large Commercial Aircraft Engine

中航工业燃气涡轮研究院 黄春峰  
绵阳职业技术学院 唐丽君



黄春峰

高级工程师。现从事航空发动机情报和翻译工作,研究方向为国外发动机预研、试验与制造技术跟踪研究。在核心期刊发表论文 80 多篇,编撰出版《航空发动机技术创新与发展》系列情报研究文集,《世界航空发动机预研技术计划的进展》、《国外航空发动机新技术》、《航空涡轮发动机静态和瞬态压力、温度测量探针技术》、《现代航空发动机测试技术的发展》等 4 部发动机技术情报研究文集。

### 研制中国大飞机及其 发动机具有重大意义

大飞机是衡量一个国家科技水平、工业水平和综合国力的重要标

航空发动机是构成国家实力基础和军事战略的核心技术之一,发达国家在策略上对内优先发展,对外严密封锁。我国大飞机发动机研制任重道远,突破关键技术、走自主研制航空发动机之路是我国的必然选择。中国大飞机未来适时装配自主研发的先进发动机是其终极目标。

志,更是代表着一个国家竞争力的制高点。大飞机项目是 21 世纪建设创新型国家的标志性工程之一,是提升我国自主创新能力和增强国家核心竞争力的重大战略决策。由于各国航空工业发展水平不一样,“大飞机”是一个相对的概念。国际航运体系通常把 300 个座位以上的客机称作“大型客机”。我国将起飞总重量在 100t 以上、座位在 150 座以上、单次最大航程在 5000km 以上的飞机称为大飞机,包括军用大型运输机和民用大型运输机。

航空发动机是构成国家实力基础和军事战略的核心技术之一,发达国家在策略上对内优先发展,对外严密封锁。我国大飞机发动机研制任重道远,突破关键技术、走自主研制

航空发动机之路是我国的必然选择。中国大飞机未来适时装配自主研发的先进发动机是其终极目标。

### 发达国家航空发动机产业 发展的主要特点

从发达国家航空发动机产业发展的历程看,体现出以下 2 个主要特点:一是将航空发动机产业视为保持大国地位的核心。美国政府从未放松过对航空发动机技术的控制,不仅对我国保持封锁,甚至在某些核心技术上也对其欧洲盟友实行“禁运”。在未来 10 ~ 20 年,航空发动机产业仍然占据了美国国防科技战略的核心位置。法国在组建空客公司的过程中,可以放弃飞机整机的研发与制造,却始终牢牢把握航空发动机不

放。同时,发达国家还在人力资源方面实行看不见的封锁,不仅限制其他国家人员进入航空发动机核心研制领域,而且限制本国相关人才向国外转移,以此来保持产业实力。二是国家对航空发动机产业进行长期、稳定的投入。西方国家的经验表明,一项新的发动机关键技术从开发到应用大约需要 10 年的时间;一型先进航空发动机,除了基础研究、预研等费用外,国家直接投入的研制费用大致在 20 亿美元左右。

美、英、法等国一直按照“预研先行”的思想,通过国家长期、稳定的大力支持和投入,实施了多项超前于具体型号的中长期研究计划,它们都是纯粹的综合性技术研究计划;通过政府与工业界联合投资,实施了多项短期专项研究计划,为发动机研制提供了充足的技术储备,降低了工程研制的技术风险,缩短了研制周期。正是因为这种长时间的巨额投入人才保持了美国在航空发动机产业的领先地位。

### 大飞机发动机研制的难度所在

飞机发动机是一种高度复杂精密装置,在高温、高压、高转速和高负荷等苛刻条件下长期反复工作,同时还要使用安全,能够保持高的可靠性、低的油耗、噪声及废气排放标准,因而必须设计精巧、加工精密、使用高性能材料合成附件。这些对于发动机的材料、工艺、装配、生产管理都有着非常严格甚至苛刻的要求。同时,航空发动机直接影响飞机的性能、可靠性及经济性,是飞机的核心部件。航空发动机的研制对结构力学、材料学、气体动力学、工程热力学、转子动力学、流体力学、电子学、控制理论等学科都有极高要求。

由此可见,航空发动机技术涉及专业广、结构复杂、性能水平高、新材料应用多、技术难度大、投资多、周期

长、风险大等难题,其研制难度之大,超出了人们的想象。

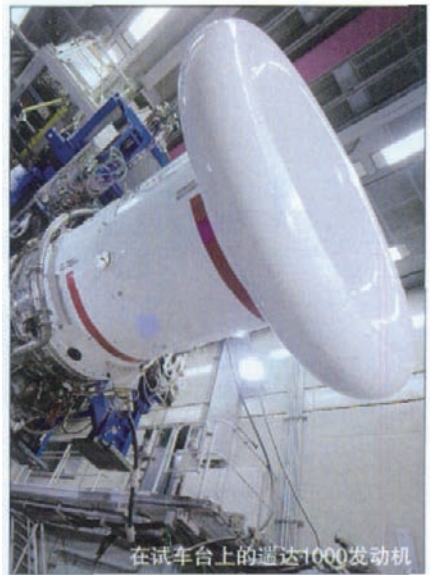
### 1 航空发动机的设计之难

航空发动机是所有动力装置中技术含量最高、制造难度最大的。第二次世界大战末期诞生的喷气式发动机将人类航空事业推进了超音速时代。通俗一点讲,喷气式发动机就是一个两端开口的圆筒,通过圆筒中压气机、燃烧室、涡轮的工作,将前端吸入的空气压缩、燃烧,推动涡轮驱动压气机工作,最后高温、高速的燃气从后端喷射出去,产生向前的推力。要让流动的空气经过几米长、直径不到 2m 的发动机产生几千 kg 甚至上万 kg 的推力,不是一件简单的事。

喷气式发动机的工作特点是高温、高压、高转速、高负荷。发动机燃气温度越高,发动机推力越大;通过发动机的空气流量越大,发动机推力也越大。在喷气式发动机中,最关键的压气机、燃烧室、涡轮组成发动机的核心机。涡轮驱动压气机以每秒上千转的转速高速旋转,进入发动机的空气在压气机中逐级增压,多级压气机的增压比可达 25 以上。在涡扇发动机中往往采用双转子压气机,由高压涡轮和低压涡轮分别以最佳的转速驱动高压压气机和风扇,以达到更高的增压比和工作效率。

增压后的空气进入发动机燃烧室,与燃油混合、燃烧。要保持燃油火焰在以每秒 100 多 m 高速流动的高压气流中稳定燃烧,就好像要在狂风中保证手中火炬不灭一样困难;同时为了保护燃烧室火焰筒壁不被高温燃气烧蚀,光靠选择耐高温材料和耐热涂层还不够,还要通过燃烧室结构设计,采取冷却手段,降低燃烧室筒壁温度,保证燃烧室正常工作。

从燃烧室出来的高温、高压燃气流驱动涡轮叶片以每分钟数千转甚至上万转的转速运转,通常涡轮前温度要超过涡轮叶片材料的熔点。除



在试车台上的遑达1000发动机

此之外,航空发动机的外部运行环境极其严苛,要适应从地面高度到万米高空缺氧环境、从地面静止状态到每小时数千米的超音速状态和从沙漠干燥环境到热带潮湿环境。总之,要让航空发动机在高温、高寒、高速、高压、高转速、高负荷、缺氧、振动等极端恶劣环境下,到达数千 h 的正常工作寿命,这就对航空发动机的设计、制造、安装提出了极高的要求。

要让涡轮叶片在这种极端苛刻的工作状态下保持足够的强度正常运转,除了选择新型耐高温材料、采用定向结晶精密铸造工艺外,还要通过精细设计制造出多通道空心涡轮叶片,利用气膜冷却降低叶片表面温度,以便发动机上千片叶片在极端苛刻的工作环境下满足发动机工作的需要。

航空发动机设计中有些地方是常人难以想像的。比如发动机减重,几乎达到毫克必争的地步,设计的时候就要把材料用得恰到好处还不出问题,因为通常发动机增加 1kg 重量,飞机就要增重 5kg 以上。

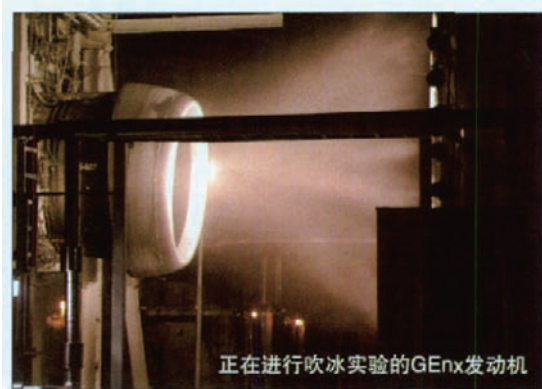
飞机发动机的总体设计,旨在使发动机取得稳定良好的推力和操纵性。因为发动机整机系统的性能不但取决于先进的部件,更是发动机各部件之间取得最佳匹配的结果。目前,我国对航空发动机总体结构设计

要素的理解还不够,还没有形成可供设计参考的规范性文件,在外来物撞击对部件影响的分析及整机安全性分析等许多专业领域,都需要进行更深入的工作。

在发动机防冰系统设计技术方面,由于历史的原因我国防冰系统设计一直处于借鉴国外防冰系统设计结构的阶段,全面性、基础性试验很少。相比之下,英、美、俄、德等国早在 20 世纪三四十年代就已经开始重视防冰问题,形成了较为完备的防冰系统设计体系。

航空发动机主轴承是航空发动机的关键部件之一,在高速、高温、受力复杂的条件下运转,其质量和性能直接影响到发动机性能、寿命和可靠性。目前国外发达国家航空发动机主轴承的寿命均能达到 1 万 h 以上,完全可以满足大飞机发动机主轴承的寿命需求。而我国目前航空发动机的主轴承寿命基本在 900h 以内。主轴承寿命不如西方 1/10。

反推力装置是大飞机发动机必不可少的常设装置,可以显著缩短飞



机的着陆滑跑距离(在潮湿和结冰的跑道上,这个装置的作用尤为突出),降低了对机场的要求。美、英、俄等国很早就开展了这方面的基础研究和工程应用研究,在机械式反推力装置设计方面的技术十分成熟,拥有完备的设计手段、丰富的研制经验。而国内反推力技术研究刚刚起步,对设计方法和设计技术的掌握少,与国外

相比差距很大。

状态监控及健康管理系统是先进大飞机发动机的重要特性之一。智能发动机关键部分就是智能管理系统,通过广泛采用信息融合技术,实现发动机的状态监视和管理自动化、自我诊断和自我预测,对发动机的性能和状态进行主动的自我管理,控制发动机性能和诊断发动机“健康”状况,可以延长发动机寿命。通过一体化的地面和机上控制、诊断和预报系统,使发动机的飞行时数达到最大,同时使保障费用降到最低,而又不损失性能,并大大减少不定期更换和维护工作。在发动机设计和研制阶段,将发动机状态管理(EHM)作为发动机的一项设计特性给予重视,而不仅仅是在发动机的使用与维修保障阶段应用。

## 2 航空发动机先进材料和制造之难

航空发动机综合了多学科和多种专业的技术成果:喷气式发动机上大量使用高强度材料和耐高温合金,零部件精度要求达到 $\mu\text{m}$ 级,叶片型面复杂,燃烧系统和加力系统薄壁焊接零件多,大量使用定向凝固、粉末冶金、复杂空心叶片精铸、复杂陶瓷型芯制造、钛合金锻造、微孔加工、涂层与特种焊接等先进制造技术。

先进材料和制造技术亟待突破,特别是发动机高温材料和复合材料需要突破。制造大飞机的材料,将是中国大飞机研制工作面临的最大挑战,也就是最难突破的。我国航空发动机材料技术与国际先进水平相比还存在较大的差距,包括应用水平、材料基础、制造工艺、设计方法,以及现代大型制造企业管理的应用基础



研究等方面,大飞机的立项为我们提供了很好的发展机遇,我们应该抓住这个机遇,自主创新,提高我国自主研发能力。

发动机最关键的是压气机、燃烧室和涡轮。特别是涡轮,在工作过程中,现代喷气发动机的涡轮叶片通常要承受 1600~1800℃ 的高温,同时还要承受 300m/s 左右的风速,以及由此带来的巨大的空气压力,在这种极为恶劣的工作环境下可靠工作成千上万个小时。什么样的材料符合此要求?这就是定向凝固高温合金、单晶、金属间化合物、金属基复合材料和陶瓷基复合材料,如碳化硅纤维增强的陶瓷基复合材料(C/C),使用温度可达 1500℃,比超合金涡轮叶片的使用温度(1100℃)高得多。目前中国在这方面的差距与国外相比非常大,以至于中国没有民用的发动机。

先进复合材料分为树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料和碳/碳复合材料以及它们相互混合构成的复合材料。先进复合材料,是大飞机工程中最尖端的东西,如波音 737、波音 777、A380 就大量使用这种材料。

对高端复合材料的要求也会影响我国大飞机的研制进度,目前我国的复合材料研究实力在全球还大大落后于先进国家,如果未来 10 年我国在相关复合材料上的研究还不能取得突破性进展,那么国产大飞机研制很可能要受制于人。不能大量应用高级复合材料,我们只能造笨

重的“金属飞机”。

航空发动机的制造涉及材料、结构、焊接等众多难度极高的工业技术。如喷气式发动机上大量使用高强度材料和耐高温合金,零部件精度要求达到  $\mu\text{m}$  级,叶片型面复杂,燃烧系统和加力系统薄壁焊接零件多,大量使用定向凝固、粉末冶金、复杂空心叶片精铸、复杂陶瓷芯制造、钛合金锻造、微孔加工、涂层与特种焊接等先进制造技术。如航空发动机整体叶盘,每个原始毛坯成本约二三十万,加工到成品要经过几十道工序、数百次换刀、上千次进退刀。A4 纸大小的整体叶盘叶片最厚 2mm,最薄处只有 0.2 ~ 0.3mm,绝不允许有任何瑕疵。

### 3 我国航空发动机试验技术和手段相对落后

航空发动机是一种高温、高压、高速旋转的热力机械,需在广阔的飞行范围和恶劣的环境条件下,长期反复使用、高效可靠地工作。发动机内部复杂的气动、热力过程、结构形式和控制规律,决定了它的研究和发展是一个设计 - 制造 - 试验 - 修改设计 - 再制造 - 再试验的反复迭代过



程,即使在数值计算仿真技术取得巨大进步的今天,它的研制仍在很大程度上要依靠大量的实物试验和工程经验。

统计表明,研制一型发动机需要 1 万 ~ 2 万 h 的整机地面试验(包括 2000 ~ 4000h 的地面模拟高空试验)、4000 ~ 5000h 的飞行试验和 4 万 ~ 10 万 h 的零部件试验,以及 4 万 h 材料试验。据文献报道,国外在

较好的技术基础上,研制一台推重比 8 的一级中等推力军用涡扇发动机,需要做 10 万 h 的零部件试验、4 万 h 的构件材料试验和 1 万 h 的整机试验,大约需要 10 ~ 15 年时间、耗资 10 亿美元以上。先进推比 10 和新一代发动机试验还要远远超过这些数字。在发动机改进发展期间,部件和系统试验是一个重要方面。由此可见,国外在发动机研制全过程中,几乎有 1/3 时间用在部件试验上。尽管近年来计算机技术和数值计算方法发展迅速,航空发动机的试验工作量有所减少,但相关试验技术和设备仍是各航空大国的发展重点。

由此可见,航空发动机试验平台对航空工业整体发展,特别是对先进航空动力的自主创新具有重大的推动作用,具有基础性、关键性、全局性、战略性意义。

而在我国发动机特种试验技术领域经验欠缺,如发动机吞咽(吞鸟、吞冰、吞水和吞砂)、包容(也称风扇叶片甩出试验,是最危险、最费钱的试验)等试验技术。

世界各国航空发动机发展历程证明,先进发动机研制程序必须是通过预研建立技术储备,开发出先进核心机,然后根据市场需要派生出涡喷、涡扇等多种型号发动机,或是发展燃气轮机用于陆用、船用等多种型号,一机多用,系列发展。压气机、燃烧室、涡轮等核心部件以及加力燃烧室、燃油系统、附件传动系统、控制系统都经过验证是先进、可靠的。这样到型号发展阶段,设计师才能在成熟、可靠的技术基础上进入整机研制,减少研制中的风险,避免遇到颠覆性的问题,直至研制出成熟、实用、先进的飞机发动机。

### 4 大飞机发动机的发展需要巨额资金支持

我国由于长期处于航空发动机仿制生产状态,对于航空发动机研制客观规律掌握严重不足,对于航空发

动机研制工作的长期性、艰巨性和大投入性没有清晰认识,这造成了我国航空发动机研制投资强度远远低于研制实际需要。

航空工业是典型的高技术、高投资、高风险和国际化的工业,附加值非常高,而航空发动机更是如此,被称作飞机的心脏,属于资本技术密集型产品,研制周期长、耗资巨大,特别是对于民用飞机,发动机的性能直接影响着飞机的安全性、经济性、舒适性、环保性;对于军用飞机来说,发动机的性能更是直接影响着战斗机的性能。因为发动机研究需要高投入,设计费用异常高昂,所以需要政府和民间资金的支持。

根据国外经验,典型的发动机研制周期约为 8~14 年,整个发动机的使用寿命期约为 30 年。研制经费在历年增长,根据发动机型号大小、研制条件的不同,研制一台先进的大中型航空涡轮发动机,大致需要 15 亿 ~ 30 亿美元。发动机的研制周期一般要比飞机机体长 3~5 年,如果发动机和飞机的研制工作同时启动,发动机不可能满足飞机的进度要求。

### 实现我国航空发动机产业科学发展的建议

为加快振兴我国航空发动机产业,实现航空发动机产业的科学发展,现提出以下建议。

(1) 从国家的层面将航空发动机列为构成国家实力基础和我国军事战略的核心技术,制定长期发展规划,将加快航空发动机发展作为国家重大科技专项,列入“十二五”计划,加大投入,先行发展。

(2) 统筹资源加强航空发动机预先研究、基础研究和关键技术验证工作,打好技术基础。

(3) 国家产业和财政政策对航空发动机产业予以必要的倾斜,加大研制的经费投入和人力资源投入。

(责编 小颖)