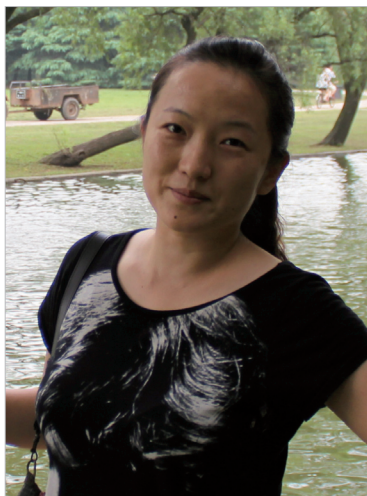


# 大型民机发动机关键技术现状 与发展趋势

## Key Technology and Development of Large Civil Aircraft Engine

中国商飞上海飞机制造有限公司 聂晶 杨瑾 童悦



聂晶

中国商飞上海飞机制造有限公司情报档案馆副馆长,主要从事航空制造领域的情报研究等工作。

航空发动机是当代尖端技术的标志,对飞机的性能、可靠性、环境特性和成本以至飞机的研制进度和成败有着决定性的影响,历史上飞机能力的每一次飞跃几乎都离不开发动机技术进步的贡献。当前燃气涡轮发动机经过 70 年的发展已经相当成熟,成为航空动力的主要形式。而与涡轮喷气发动机相比,涡轮风扇发动

当前燃气涡轮发动机经过 70 年的发展已经相当成熟,成为航空动力的主要形式。而与涡轮喷气发动机相比,涡轮风扇发动机因其特有的技术优势,自 20 世纪 50 年代以来,在民用航空发动机中一直占据着主流地位。未来,气动热力、结构强度、控制和诊断、新材料和新工艺等方面的技术进步将把航空涡轮发动机的能力推向一个新的高度,更经济、更安静和更清洁的动力装置将成为研究的方向。

机因其特有的技术优势,自 20 世纪 50 年代以来,在民用航空发动机中一直占据着主流地位。未来,气动热力、结构强度、控制和诊断、新材料和新工艺等方面的技术进步将把航空涡轮发动机的能力推向一个新的高度,更经济、更安静和更清洁的动力装置将成为研究的方向。

我国的大飞机研制尚在起步发展中,技术的研发不是一蹴而就的,开发验证的道路也充满了荆棘和挑战。在光荣的历史使命和重大的研发责任下,研究并掌握国外民机发动机技术的目前进展和未来发展,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,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。

### 世界主要大型民机发动机 制造商

航空发动机的发展有其自身的特点和规律,技术复杂,研究和发工作难度大、周期长、经费投入多、经营风险高,因此准入门槛也比其他航空专业更高。从大型民机发动机的市场份额和研发能力看,现有的企业分为 3 个层级<sup>[1]</sup>:

第一层级是发动机行业中的三巨头——GE 公司、普惠公司和罗·罗公司,其中 GE 公司无论是军用发动机还是民用发动机,市场份额都最高;罗·罗公司因是唯一的欧洲公司,在日益显著的发动机国际合作趋势中占据

优势。普惠公司在大型发动机领域研制能力很强,但在民用发动机领域的竞争力稍逊于GE和罗·罗公司。

第二层级只有斯奈克玛公司,通过在CFM56发动机项目上与GE公司合作,在民用发动机领域的竞争力大大增强,研发能力不逊于第一层级的公司,但是其市场相对单一,综合实力较第一层级有一定差距。

第三层级包括霍尼韦尔国际公司、国际航空发动机公司(IAE)和俄罗斯的留里卡-土星科研生产联合体(土星联合体)等公司,这些公司具备一定的发动机研制能力,定位于若干细分市场(例如公务机或军用飞机发动机市场),市场份额有限,因此只能划归在局部市场有一定竞争力的层级。

### 主要大型民机发动机类型及技术特点

涡轮喷气发动机是航空燃气轮机中较为简单的一种,也是民机最广泛应用的发动机类型。其中又以涡轮风扇发动机(涡扇发动机)最为普遍<sup>[2]</sup>。在窄体机领域,737MAX和C919将装配LEAP-X发动机(图1),MS-21和C系列将装配普惠静洁动



图1 LEAP-X发动机

力发动机, A320neo 将从 LEAP 和普惠静洁动力中选择。

在宽体机领域,对于四发的A380,罗·罗公司和动盟(由通用电气公司和普惠公司联合组成)分别推出遛达900和GP7200发动机,

对于双发的A350和波音787,罗·罗公司和GE公司分别推出遛达1000和GENx发动机。其中遛达1000的涵道比达11。他们的推力范围为25000~35000N。采用的新技术有全三维有黏叶轮设计方法、复合材料风扇叶片和机匣、第三代超塑性成形/扩散连接钛合金风扇叶片、双环预旋流燃烧室、对转涡轮和智能发动机状态监控系统等。

评价涡轮风扇发动机的性能指标主要包括涵道比 $B$ 、功分配系数 $x$ 、内外涵的单位推力、总推力和耗油率。本文主要从涵道比、总推力、耗油率3个技术参数简介现今的大型民机发动机。

#### 1 GE公司GE90、GENx发动机

GE90是美国GE公司最早采用复合材料技术的高涵道比、超高推力的民航涡扇发动机。GE90-115B这一型号的发动机是吉尼斯世界纪录所记载的世界最高推力的民航发动机,试验推力可达569kN。现在的飞机发动机涵道比一般是6,但是GE90-115B的涵道比可以达到9,大涵道比在增加推力的同时,也给压气机轴和转速很大的压力,噪声也大了许多。

GE90明显的特征是有极大的进气口(3.43m)以及弯曲的进气叶片,其材质为实心复合材料。但是GE90的直径比较大,无法进入波音747货机,因此在运输时需要特制的超大型运输机,这造成了维修成本的上升。

GE90目前仅在波音777上使用,在777-200、-200ER及-300上是选配发动机之一(另可选用Trent 800或PW4004084),但在777-200LR、-300ER及-200F上则是唯一可用的发动机。

GENx(图2)是GE公司为波音787“梦幻”客机研制的高涵道比(10)、高总压比(45)、低油耗、低污染与低噪声的新一代发动机。GENx发动机以经过验证的GE90结构为



图2 GENx发动机

设计基础,将替代GE的CF6发动机。与CF6发动机相比,GENx将提高15%的燃油效率,减少15%的CO<sub>2</sub>排放。GENx发动机的最大推力小于GE90的378~511kN,大于CF6-80C2发动机(用于波音747-400飞机)的258kN。

与GE90相比,GENx在4个方面有了技术飞跃:采用双环径向分级燃烧室,压气机叶片采用三元流设计,高压压气机减少为9级,进一步降低污染排放量<sup>[3]</sup>。

2012年3月,FAA通过了GENx-1B PIP发动机的330min双发延程飞行(ETOPS)认证,目前GENx用于波音787、747-8及空中客车A350。

#### 2 罗·罗公司的遛达900、遛达1000、遛达XWB

遛达900(图3)是A380飞机的启动发动机,是英国罗·罗公司Trent系列发动机的第4个成员,推力为302.6~340.4kN。

遛达900的涵道比高达8.7~8.5,这是遛达系列从未使用过的(遛达800的涵道比为6左右,遛达700则不到5)。高涵道比发动机油耗将降低,但同时也因尺寸增大,带来重量增加;起飞时,遛达900的总压比为37~39。遛达900风扇直径达到破纪录的2.9m,具有1级风扇、8级中压压气机、6级低压压气机、1级高压涡轮、1级中压涡轮和5级低压涡轮。

遛达900的风扇叶片采用的是新型弯曲前缘后掠式钛合金叶片,降低了发动机噪声,提高了气动性能,

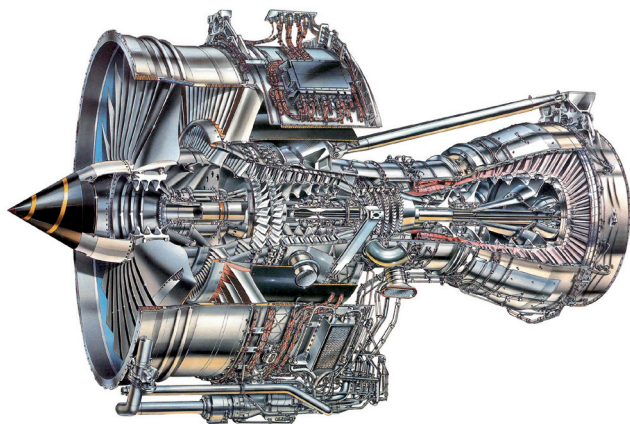


图3 达达900发动机

增强了抗外来物损伤能力。发动机采用高压转子反向旋转设计,提高了核心机的效率,使气流更“直”地穿过发动机,提高了发动机气动性能。

达达 1000 发动机(图 4)是罗·罗为应对波音 787 的各项要求而研发的,是达达系列发动机的第 5 个成员。达达 1000 发动机的推力范围为 236.7~333.8kN,其涵道比为 10.8~11,总压比为 52.1。达达 1000 发动机继承了达达 900 发动机的新型弯曲前缘后掠式钛合金叶片和高压转子反向旋转设计等先进技术,不断升级、改进。

2011 年年底,达达 1000 升级



图4 达达1000发动机

包 B 发动机获得了 EASA 的认证。2012 年 5 月,达达 1000 发动机 C 升级包的首次地面试验完成,这种发动机将在 2013 年安装在波音 787-9 上。升级后的发动机会产生 329.3kN 的推力,且比 B 升级包的燃烧效率提高 1%。该发动机的主要

特色为全新的涡轮机匣冷却系统,这会提高发动机的效率。

达达 XWB 发动机是罗·罗公司达达家族航空发动机中的最新型号,融合了达达家族发动机设计的完美经验和最新技术,专为空中客车的 A350XWB 系列飞机量身打造。达达 XWB 风扇直径约为 300cm,是目前燃油效率最高、对环境影响最小的一款大型涡扇发动机。相比于之前推出的达达系列发动机,其耗油量降低了 28%<sup>[4]</sup>。达达 XWB 得益于下一代减声模式消散发动机导管系统(RAMES)以及在 A380 上开发的零拼接进气口设计和吊舱进气口发动机降噪技术。

首先推出市场的是达达 XWB-83,推力为 373.8kN,装载于 A350-900XWB 上,预计 2014 年上半年投入运营。之后推出 333.8kN 的达达 XWB-74,装载于 A350-800XWB 上,预计于 2014 年投入服务。最后是 413.9kN 的达达 XWB-92,配置于 A350-1000XWB 上,预计于 2017 年投入服务。

发动机在风扇模式上有所改进。直径仍约 300cm,但运转更快一些,并且创新了叶片设计。研发团队开发了新材料技术,增加了温度。达达 XWB 最大的推力,已进一步上调至 431.7kN,使 A350XWB 系列更有能力与波音 777-300ER 竞争。

### 3 普惠公司 PurePower 发动机

普惠作为联合技术公司的子公司,和日本航空发动机公司(JAEC)以及 MTU 航空发动机公司一起合作作为 A320neo 项目研发 PurePower PW1100G-JM 发动机,预计于 2016 年开始交付。

普惠 PW1100G 风扇直径为 205.7cm,涵道比为 12,推力为 106.8~146.9kN。与现今发动机相比,它在燃料消耗量、环境排放量、发动机噪声和运营成本方面都取得显著改善。以空客 A320 为例,换装普惠 PW1100G 发动机后,新机型将比现役机型在燃油消耗率上减少 16%,噪声水平至少降低 50%,氮氧化物排放量减少 50%。

PW1100G 的主要特点是齿轮传动系统与全新先进核心机技术的组合。发动机采用先进的齿轮传动系统,将发动机风扇与低压压缩机、涡轮机分离开,使得它们能够获得不同的转速——发动机风扇以一个相对较低的速度转动,而低压压缩机和涡轮机则以较高的速度运行。这样可以提高发动机效率,降低燃料消耗、排放和噪声,同时降低了一部分质量和维修的成本<sup>[5]</sup>。

除了空客 A320neo 系列飞机,普惠“静洁动力”发动机还被三菱支线飞机(MRJ)和庞巴迪 C 系列飞机选定为专用动力装置。三菱支线喷气飞机将采用推力为 62.3~75.7kN 的静洁动力 PW1217G 发动机;庞巴迪 C 系列飞机发动机 PW1500G 的额定推力为 93.5~103.7kN,是 PurePower 系列发动机核心机的更大推力的版本。

不仅如此,俄罗斯伊尔库特公司的 MC-21 飞机也选用 PurePower 系列发动机,PW1400 推力将达到 111.3~142.4kN,预计 2017 年投入运营。

### 4 CFM 公司 LEAP-X 发动机

LEAP-X 系列飞机发动机是 CFM 国际有限公司推出的致力于替

换目前单通道大型客机动力装置的新型航空发动机系列。

2008年范堡罗航展上,CFM的合作伙伴GE和SNECMA公司宣布开始为下一代窄体客机研制新型LEAP-X发动机,该发动机研制目标是噪声比第4阶段标准低1015dB;油耗比装载CFM56-7B发动机(图5)的737NG飞机降低16%;CO<sub>2</sub>排放量的降低与油耗的降低相当;与当前国际民用航空组织(ICAO)的



图5 CFM56-7B发动机

CAEP6的排放标准相比,LEAP-X发动机的氮氧化物(NO<sub>x</sub>)排放量可以降低50%~60%。

CFM的LEAP系列只提供推力超过80.1kN的发动机。

LEAP-X采用一个比CFM56发动机大16%的风扇,直径为1.8m。为了大幅度地减重,LEAP-X发动机的风扇叶片边缘将采用钛合金,叶片本身将采用利用3D组合碳纤维转化浇铸方法生成的复合材料。LEAP-X发动机中18个1.8m叶片总重将达76kg,而CFM56系列发动机的24个1.5m叶片总重达118kg。

LEAP发动机计划于2014年取证,2016年在空客A320neo和C919飞机上服役,2017年在波音737MAX飞机上服役。

LEAP-1B发动机是LEAP-X系列的一款衍生品,LEAP-1B采用新

整流罩和挂架,改进燃油系统,以及更新发动机软件<sup>[6]</sup>。LEAP-1B的核心机,将使燃油效率提高11%~12%,运营成本降低7%,已由最初的概念发展到发动机性能。波音737 Max飞机将采用CFM国际公司的风扇直径173cm的LEAP-1B发动机。

## 未来民用航空发动机先进技术

### 1 结构创新

#### (1) 齿轮传动涡扇发动机。

由于风扇和低压涡轮机械部件都能以最佳的效率独立旋转,可以提高涡扇发动机涵道比,降低燃油消耗<sup>[7]</sup>。风扇可以比低压部件旋转得慢,较低的叶尖速度可以使每一个叶片造得更轻。同理,齿轮系统可以使转速的低压涡轮能够以较少的级数来驱动压气机和风扇,转速较快的压气机也可以在保持质量流量不变的情况下减少所需要的级数。普惠公司PW1000G(图6)即采用齿轮传动的风扇发动机设计技术,该技术的应用还可提高低压涡轮的切线速度,提高负荷。与现有的发动机相比,PW1000G系列维护费用将降低40%,噪声和排放将减少1/2。该款发动机获得了庞巴迪CS100/300、空客A320NEO、Irkut MC-21和三菱公司MRJ70/90等机型的发动机

订单。当前,越来越苛刻的燃油消耗率要求迫使发动机制造选用高涵道比和风扇叶片设计,并不断提高整机压比和涡轮前温度以实现更高热效率,这些都使RTM复合材料风扇叶片制造技术、3D压气机叶型、CMC低压涡轮叶片的使用成为必然。风扇齿轮传动系统的出现不仅改变了传统发动机架构,也为这些新技术的充分使用提供了平台,同时还为齿轮传动发动机未来的技术升级留足了空间。

#### (2) 开式转子发动机。

传统构型发动机的发展已经相当成熟,难以有大的突破,制造商开始将目光转向油耗更低的开式转子发动机架构。罗·罗官方宣称开式转子与先进的涡扇技术相比燃油消耗可降低10%~15%,与现在的涡扇发动机相比可以降低30%,GE、罗罗和斯奈克玛都在探索研究各种开式转子发动机方案。在欧盟“净洁天空”计划下的2种开式转子发动机架构,分别是罗·罗主导研发的SAGE1构型和斯奈克玛主导的SAGE2构型;这2种构型的开式转子发动机均采用齿轮传动技术,以使不同的转子均工作在其最佳转速。但开式转子目前还存在一些技术难题,包括噪声、重量、飞/发一体化和认证(可能会有叶片包容、振动和维护问题)等问题。此外,由于此类发动机的最高巡航马赫数仅为0.8,在远航客机的应用上可能会收到限制。罗·罗的开式转子技术主要针对100~200座的单通道客机,发动机推力为111~156kN,技术方案是直接驱动或者齿轮传动的对转螺旋桨构型。公司的目标是2020年设计制造3台开式转子发动机,前2台用于地面试验,第3台用于飞行试验。目前,罗·罗公司的研究主要集中在噪声和振动等开式转子所面临的最大问题上。公司正在对其1/6缩比的开式转子验证机进行试验。对于斯奈克玛公司的SAGE2,



图6 PW1000G发动机

预期将于 2013 年底完成详细设计评审,2016 年进行首次飞行试车。CFM 也在 LEAP56 项目框架下于 2008 年年末进行了相关的缩比模型的台架试验。

### (3) 对转涡扇发动机。

对转涡扇发动机是在常规风扇发动机的风扇中增加了一级对转的风扇,2 级对转的风扇通过 2 个套在一起对转的轴分别与 2 组对转的低压涡轮组相连。在不减速齿轮箱的前提下,降低风扇叶尖速度,从而提高风扇叶片的效率和可靠性,以应对发动机内部因转向一致所带来的效率损失。对转涡扇发动机的目的是通过降低 2 个对转风扇的转速来进一步降低噪声和燃油消耗,而不需要增加发动机风扇的直径。斯奈克玛、GE 和其他发动机制造商一起探究了对转涡扇概念。罗·罗的遑达 900 和 1000 发动机以及 GE 的 GENx 发动机都采用了对转轴。在欧盟的环保型航空发动机项目中,由斯奈克玛公司领导对对转涡扇项目进行了预研并在 2010 年制造了实体的对转涡扇发动机,同年 10 月对其进行了测试。据斯奈克玛称,此种结构可以极大地增加涵道比,与先进的材料和安装方式相结合,可以达到欧盟 VITAL 计划中关于降低燃油消耗 18% 的目标。

## 2 先进材料及工艺

新材料是发动机性能提高的关

键。可用于发动机的主要新材料有:金属基复合材料、耐高温的超级合金和隔热涂层、陶瓷基复合材料和碳-碳复合材料、金属间化合物、有机物基复合材料以及非结构材料。随着复合材料在航空领域的发展,越来越多的发动机制造商和研究机构希望通过先进材料的应用进一步降低发动机的重量、提高涡轮前温度从而提高整机热效率。

目前,钛基复合材料已经或即将用于压气机叶片、整体叶环、整体叶盘等零部件。普惠公司后期的 PW4048 采用了钛合金宽弦空心风扇叶片,由内部铣槽的叶背和叶盆用扩散连接工艺组成。该公司还在研究钛基复合材料宽弦空心风扇叶片。整体叶盘开始向金属基复合材料的整体叶环发展。

在进一步开发单晶材料和先进热障涂层的同时,国外正在为燃烧室和涡轮等高温部件开发陶瓷基复合材料(CMC)和金属间化合物。大型亚声速飞机发动机燃烧室的  $\text{NO}_x$  排放指数为 10~20g/kg,在巡航状态下增加到 20~30 g/kg 燃油。未来高效发动机的增压比和温度将分别达到 70 和 1922℃。在高温高压下,燃烧室将产生更多的  $\text{NO}_x$ 。未来需要更加清洁燃烧的燃烧室。GE 公司开发的陶瓷基复合材料燃烧室和 UEET 计划中高温陶瓷基复合材料用于燃

烧室能够提供较大的温升并具有较长的寿命,而且需要的冷却空气较少。

先进材料和涂层可以提高高压涡轮的耐高温能力。PW4084 发动机高压涡轮采用由第 3 代中单晶 PW1487 材料加工的叶片,并涂有热障涂层;GE90 发动机高压涡轮叶片采用 ReneN5 中单晶材料加工,并涂有铝铂涂层;目前,普惠、GE 和罗·罗公司等正在开发更先进的材料和涂层。普惠公司计划把带热障涂层的纤维增强的碳化硅陶瓷基复合材料瓦片用于下一代发动机的发展。

## 3 新型发动机循环

除以上所述,还有一些更激进的产品设计。GE 公司目前正在研究的 2 个可能方向是混合燃气涡轮-电力系统以及脉冲爆震发动机(PDE)<sup>[8]</sup>。混合动力系统的原理是采用燃气发生器为发动机提供电力,驱动风扇产生推力。脉冲爆震发动机的原理是在一端开口的管道里点燃燃氧混合气,靠高温高压气体喷射产生推力。2 种概念各有其优点,混合动力系统使得飞机设计者可以在设计推进系统的时候更加符合空气动力学的发动机,而不是在短舱里集中产生推力。PDE 发动机则取消了所有的旋转部件。

但这些概念还没有很快就能实用的可能。混合动力系统需要非传统的机身设计方式,如翼身融合等,而且推进系统的分布式设计也会比燃气涡轮发动机更加笨重。PDE 发动机则会产生超声速的爆震波,带来巨大的噪声和机体损伤。尽管如此,GE 公司仍然在研究这两种下一代的推进系统。NASA 也在赞助早期的商业客机翼身融合,包括混合燃料动力系统的研发。

本文共有参考文献 8 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 夏宛)