



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

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。

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。

我国的大飞机研制尚在起步发展中,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”等目标显得尤为重要。

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^[1]。在窄体机领域,737MAX和C919将装配LEAP发动机,MS-21和C系列将装配普惠静洁动力发动

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·罗和动机组(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·罗和 GE 分别推出遛达 1000 和 GENx 发动机。其中遛达 1000 的涵道比达 11。它们的推力为 25000~35000N。采用的新技术有全三维有黏叶轮机设计方法、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。本文将从涵道比、总推力、耗油率方面介绍现今的大型民机发动机。

1 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 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。且其涵道比可达到 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 有着极大的进气口 (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, 但在 777-200LR、-300ER 及 -200F 上则是唯一可用的发动机。

GENx 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 CO₂ 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^[2]。

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 已用于波音 787、747-8 及空客 A350。

2 遛达 900、遛达 1000、遛达 XWB

遛达 900 是 A380 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, 这是遛达系列之前从未使用过的。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, 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。

遛达 1000 发动机 (图 1) 是罗·罗为应对波音 787 的各项要求而研发的, 是遛达系列发动机的第 5 个成员。遛达 1000 发动机的推力为 236.7~333.8kN, 其涵道比为 10.8~11, 总压比为 52.1。遛达 1000 发动机继承了遛达 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, 遛达 1000 发动机 B 升级包获得了 EASA 认证。2012 年 5 月, 遛达 1000 发动机 C 升级包完成首次地面试验, 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轮匣冷却系统, 这会提高发动机的效率。

遛达 XWB 发动机是罗·罗遛达家族航空发动机中的最新型号, 融合了遛达家族发动机设计的完美经验和最新技术, 专为空客 A350XWB 系列飞机量身打造。遛达 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。相比于之前推出的遛达系列发动机, 其耗油量降低了 28%^[3]。遛达 XWB 得益于下一代减声模式消散发动机导管系统以及在 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。

首先推出市场的是遛达 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 的遛



图1 遛达1000发动机

达 XWB-74, 装载于 A350-800XWB 上, 预计于 2014 年投入服务。最后是 413.9kN 的遑达 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。研究团队开发了新材料技术, 增加了温度。遑达 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 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, 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^[4]。

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 系列发动机核心机更大推力的版本。

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

4 LEAP 发动机

LEAP 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 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 发动机的 737NG 飞机降低 16%; CO₂ 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的 CAEP6 的排放标准相比, LEAP 发动机的氮氧化物(NO_x)排放量可降低 50%~60%。

CFM 的 LEAP 系列只提供推力超过 80.1kN 的发动机。

LEAP 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 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 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 采用新整流罩和挂架, 改进燃油系统, 以及更新发动机软件^[5]。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, 可提高涡扇发动机涵道比, 降低燃油消耗^[6]。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 PW1000G (图 2) 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及负荷。与其他发动机相比, PW1000G 系列维护费用降低了 40%, 噪声和排放减少 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



图2 PW1000G发动机

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·罗的研究主要集中在噪声和振动等开式转子所面临的最大的问题上。公司正在对其 1/6 缩比的开式转子验证机进行试验。对斯奈克玛的 SAGE2,预期 2013 年底完成详细设计评审,2016 年进行首次飞行试车。CFM 也在 LEAP 项目框架下于 2008 年年末进行了相关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·罗的遛达 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

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。该公司还在研制钛合金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 NO_x 排放指数为 10~20g/kg,在巡航状态下增加到 20~30g/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 NO_x 。未来需要更加清洁燃烧的燃烧室。GE 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·罗等公司等正在开发更先进的材料和涂层。普惠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 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)^[7]。混合动力系统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 仍致力于这 2 种推进系统的研究。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 7 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 夏宛)