

世界三大航空发动机制造商民机动力发展布局研究

Research on the Development of Civil Aero Engines of the Big Three

■ 何龙江 / 中国航发动研所 弓升 / 中国航发动动力所

面对新的市场需求，GE航空集团、普惠、罗罗等航空发动机制造商在核心机改进改型及发展的基础上积极研发市场急需技术，抢占技术制高点，对民机产品发展谋篇布局。

根 据波音公司2019年发布的《民用航空市场预测》，未来20年将新增44040架飞机，到2038年全球民机机队将达到50660架，价值6.8万亿美元，同时中国将超越美国成为全球最大航空客运市场。民用航空动力具有单位价值高、研发难度大、技术更新快的特点，技术更新周期约为10年。面对新一轮的民机升级发展需求，GE航空集团、普惠、罗罗等航空发动机巨头利用政府研究支持计划，结合自主投资，大力发展具有市场潜力的技术，对民机产品发展谋篇布局。本文以核心机发展为脉络，通过综合分析三大航空发动机制造商正在开展的产品与技术研究项目，初步勾勒出未来民用航空发动机发展趋势。

GE航空集团持续深耕，推动核心机改进发展 持续巩固在宽体和窄体客机市场的独特地位

GE航空集团在高压比核心机研发方面处于世界领先水平，独具竞争力的核心优势保证了其在民机动力的领先地位。在多年支撑其宽体客机动力产品发展的核心机中，基于高效节能发动机（E³）计划支

表1 GE90系列发动机参数

发动机型号	发动机参数			
	最大推力/kN	压比	涵道比	风扇直径/mm
GE90-94B	420	40 : 1	9 : 1	3124
GE90-115B	510	40 : 1	8 : 1	3256

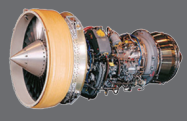



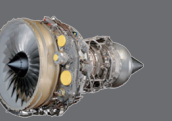
持、由“10级高压压气机+2级高压涡轮”构成的GE90系列发动机核心机逐渐成为主力。该核心机随GE90发动机不断改进升级，逐步实现性能优化提升，衍生发展出GE90-115B、GP7200、GENx、GE9X等系列发动机。

面对普惠公司齿轮传动涡扇（GTF）发动机通用核心机的竞争，GE航空集团启动了更高效、更低污染的eCore核心机计划，将GENx核心机进行缩比设计，引入最新气动、结构、冷却、复合材料和低排放设计技术，使“10级高压压气机+第二代双环预混旋流（TAPS）燃烧室+2级高压涡轮”构型的核心机应用由宽体客机延伸至窄体客机，市场对象包括支线客机和公务机等，同时延长与赛峰集团的合作至2040年，以上述核心机为基础，共同研发替代现有CFM56系列发动机的推力范围

在80 ~ 220kN的下一代窄体客机的LEAP发动机。LEAP发动机由于核心机性能大幅提升、涵道比增加，燃油效率较CFM56发动机提高15%以上。LEAP系列的LEAP-1A、LEAP-1B和LEAP-1C分别为空客A320neo、波音737MAX和中国商飞C919飞机提供动力，巩固了GE航空集团在窄体客机发动机市场上的地位。

为满足新一代宽体客机发展需求，GE航空集团在GE90基础上，基于eCore核心机技术发展了GE9X发动机核心机。核心机采用“11级高压压气机+第三代TAPS燃烧室+2级高压涡轮”构型，压比达27 : 1，这是GE航空集团目前压比最高的核心机。核心机压比的提高使得GE9X发动机总压比高达60 : 1，高压涡轮进口温度已超出现有常规材料承受范围。为此，GE航空集团发展了第四代粉末合金材料、陶瓷基复合

表2 CF34系列发动机参数

参数	发动机类型				
	 CF34-3	 CF34-8C	 CF34-8E	 CF34-10A	 CF34-10E
风扇+压气机级数	1+14	1+10	1+10	1+3+9	1+3+9
高+低压涡轮级数	2+4	2+4	2+4	1+4	1+4
尺寸(长×直径)/mm×mm	2616×1245	3251×1321	3078×1354	2286×1478	3696×1478
最大推力/kN	41	61	65	81	89
最大压比	21 : 1	28 : 1	28.5 : 1	29 : 1	29 : 1

材料(CMC)和先进冷却技术,目前正研究在第二级高压涡轮叶片上使用CMC,这也是CMC首次应用到商用发动机旋转部件上。GE9X发动机配装了约300个3D打印零部件,包括燃油喷嘴、温度传感器、燃油混合器以及较大的换热器、扩压器和钛铝低压涡轮叶片等部件,GE9X燃油效率将比GE90-115B发动机提升10%,也比竞争机型高出5%以上。

GE9X发动机从2013年启动设计,2015年完成首台核心机试验,核心机性能表现超出预期。2016年进行首台发动机整机试验。2017年进行了一系列结冰试验。原计划2018年取得适航许可证并于2019年初实现首飞,但在发动机耐久性试验中发现可调导叶装置存在设计问题,使波音777X首飞时间推迟,直至2019年11月该问题才得到解决。2020年2月,配装2台GE9X的波音777X实现首飞。GE9X从设计到首飞,完成了超过4100h的地面和高空试验,循环达6500余次。2020年5月,GE9X发动机进行最终型号取证测试,有望于2021年随波音777X投入商业运营。

奋力开拓支线客机及公务机动力市场

GE航空集团在宽体和窄体客机动力上一直处于领先地位,但在支线喷气客机动力方面仅有CF34系列发动机产品独当一面。该发动机历经CF34-1、CF34-3、CF34-8、CF34-10等多次改进,核心机也从原来CF34-3的14级高压压气机改进升级为CF34-8、CF34-10的10级、9级高压压气机,性能大幅提升。

为了在新一轮公务机动力竞争中抢占先机,GE航空集团和赛峰集团联合,充分应用LEAP发动机核心机技术衍生发展了Passport 20发动机。该发动机采用“3级低压压气机+10级高压压气机+第二代TAPS燃烧室+2级高压涡轮+4级低压涡轮”结构设计,推力74kN。相比于CF34发动机,Passport 20发动机可靠性和性能大幅提升,2012年完成方案设计,2013年完成首台发动机地面试验,2014年在波音747-100上进行飞行测试,2016年11月配装庞巴迪G7000(后更名为G7500)公务机实现首飞并于同年年底取得美国联邦

航空局(FAA)颁发的适航许可证,2018年12月随首架G7500交付使用。Passport 20发动机成功配装于G7500和G8000系列公务机,将GE航空集团发动机的市场领域拓展到新一代高端公务机。

普惠公司明确定位,研制全新核心机

另辟蹊径,研发GTF发动机

在窄体客机动力方面,普惠公司虽然接收了罗罗公司V2500发动机股份,但该型发动机作为20世纪80年代末研制的产品,其性能难以满足新一代飞机技术升级要求,普惠公司亟须研制出性能更先进的新型发动机。在宽体客机动力方面,普惠公司面对GE航空集团这个强有力的竞争对手,想保住其市场份额显得力不从心,普惠公司原计划与罗罗公司共同研制替代PW4000的新一代中型发动机也未能如愿。

有鉴于此,普惠公司基于对未来民机动力市场发展的预期,将筹码放在了“改变行业游戏规则”的GTF发动机上。通过20年技术积累和10亿美元投入,更加清洁安静的

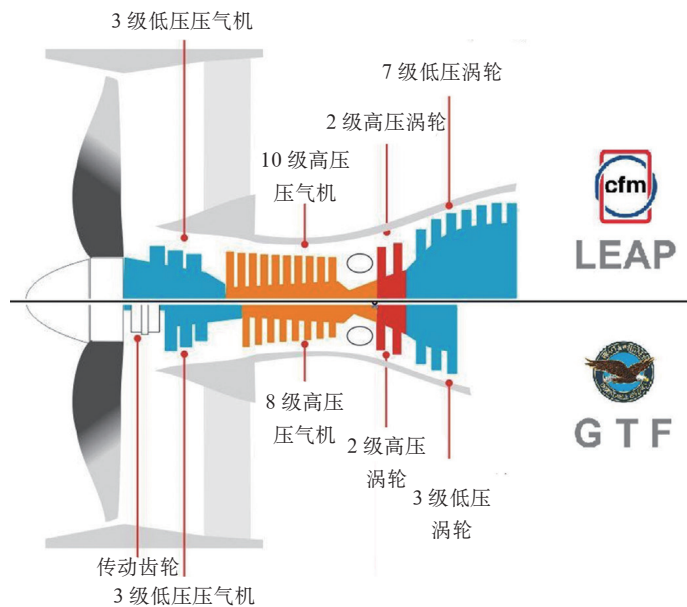
GTF发动机PW1000G研制成功。该核心机是普惠公司在未来相当长的一段时间内实现发动机系列化发展的重要基础，奠定了其在GTF发动机领域无可撼动的技术优势。普惠公司高度重视GTF发动机专利体系的布局、申请和保护，使得其他竞争对手一旦采用GTF构型设计就可能面临侵权诉讼，难以准入。

PW1000G发动机核心机为全新研制，采用“8级高压压气机+TALON-X燃烧室+2级高压涡轮”构型，核心机压比达到16:1。PW1000G系列发动机推力为60~180kN，已作为空客A320neo、A220、三菱SpaceJet M90、俄罗斯MC-21、巴航工业E-Jets E2等5型飞机平台的动力。此外，普惠公司正联合波音公司探讨“新中间市场”(MoM)客机上的潜在应用，希望通过波音的MoM项目来扩展GTF发动机的应用，使GTF发动机逐步进入高推力市场。

厘清现状，紧盯公务机动力市场

普惠公司拥有推力等级较齐全的轻型和中型公务机发动机，含推力4.5~11kN的PW600系列、13~20kN的JT15D系列及后续替换型PW500系列、21~33kN的PW300系列、44~88kN的PW800系列发动机。

最新型的PW800系列发动机采用“单级风扇+2~3级低压压气机+8级高压压气机+TALON-X燃烧室+2级高压涡轮+2~3级低压涡轮”结构，核心机压比为16:1，于2013年实现首台发动机地面运转。2015年年初，PW814GA(配装“湾流”G500)和PW815GA(配装“湾流”G600)获颁型号合格证。2016年，PW810系列发动机在波音747SP测试平台及“湾流”G500飞机上进



GTF发动机与LEAP发动机结构对比示意图

行了超4000h的飞行测试，结果表明发动机性能超出预期。2019年，PW800发动机荣膺美国《航空周刊》“公务航空推进类”网络年度月桂冠。2019年年底，PW810系列发动机开始服役。

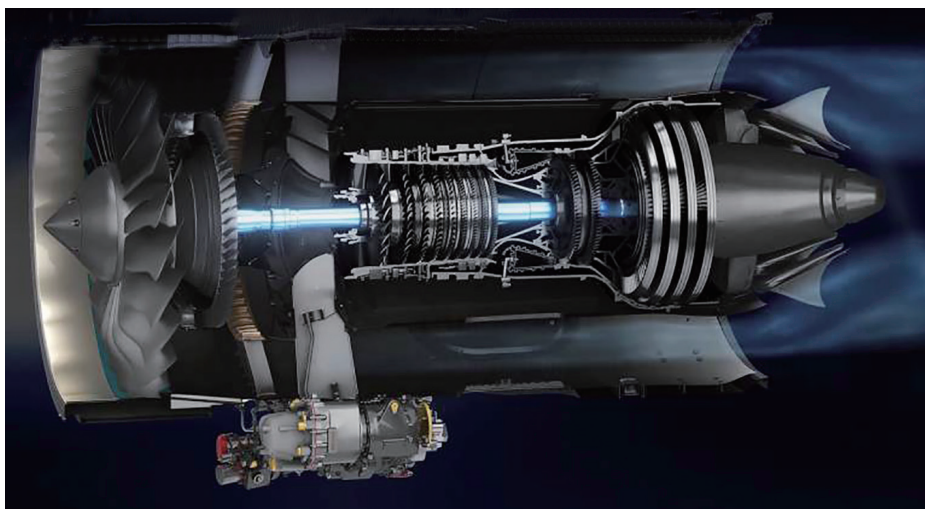
机核心机，推动发展与变革 审时度势，从三转子向传统双 转子结构转型

20世纪70年代，罗罗公司研发了用于RB211三转子发动机的核心机，通过对核心机不断改进升级，发展了遑达700、遑达800、遑达500、遑达900、遑达1000等系列发

罗罗公司通过三转子发动

表3 普惠GTF发动机家族

飞机平台	配装动力	发动机参数	最大推力/kN
 空客 A320neo	PW1100G	构型1-G-3-8-2-3 涵道比12:1 风扇直径2057mm	106.7~146.7
 空客 A220	PW1500G	构型1-G-3-8-2-3 涵道比12:1 风扇直径1854mm	93~103.6
 巴航工业 E-Jets E2	PW1700G/ PW1900G	构型1-G-2-8-2-3 涵道比9:1 风扇直径1422mm	62.2~102.2
 三菱 SpaceJet M90	PW1200G	构型1-G-2-8-2-3 涵道比9:1 风扇直径1422mm	66.7~75.6
 俄罗斯 MC-21	PW1400G	构型1-G-3-8-2-3 涵道比12:1 风扇直径2057mm	106.7~146.7



PW800发动机剖面图

发动机，奠定了罗罗公司在三转子发动机方面的霸主地位，支撑了其近半个世纪的发展。

近年来，为了应对飞机升级需要，罗罗公司以代表最新技术成果的遛达1000发动机核心机为基础，应用在高效和环境友好的航空发动机（EFAE）计划验证的新技术，放大设计，发展出了遛达XWB发动机，成为遛达系列有史以来最畅销的发动机，也是目前罗罗公司生产的最大发动机。在遛达XWB发动机技术基础上，罗罗公司又发展了遛达1000发动机的改进型遛达1000-TEN发动机。同时，采用遛达XWB发动机核心机，充分借鉴最新型遛达系列发动机的技术和经验，发展了用于空客A330neo的遛达7000发动机。

面对普惠公司GTF发动机和GE航空集团超高压比发动机的竞争，罗罗公司基于对民机动力发展需求的预测，制定了分阶段进行的未来10年航空发动机技术和产品发展路线：第一阶段以遛达XWB发动机为起点，开发验证Advance核心机与

发动机；第二阶段以Advance核心机为基础，引入齿轮传动结构，开发和验证具有颠覆性技术特征的“超扇”（UltraFan）发动机。Advance项目是罗罗基于高压比核心机丰富的研制经验而做出的转型抉择，是从三转子结构到传统民机动力主流结

构的重大战略转变。Advance核心机为“10级高压压气机+2级高压涡轮”构型，发动机涵道比为11：1，总压比60：1。2019年，罗罗公司持续开展了Advance3演示验证。

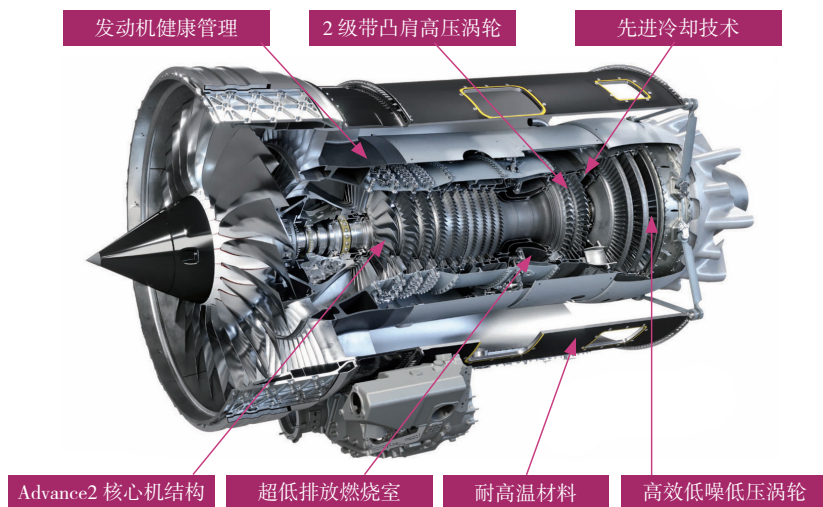
UltraFan基于Advance的基础，采用超大“变螺距风扇系统”（variable pitch fan system），完全取消了低压涡轮，由中压涡轮通过齿轮减速传动驱动风扇，结构上由三转子发动机变化为“两轴半”。该发动机与普惠PW1000G系列发动机结构基本相似，致力于满足111~445kN推力范围市场需求，与第一代遛达发动机相比效率提高25%以上，与遛达XWB发动机相比效率提高10%以上。2019年，UltraFan取得里程碑节点，完成了复合风扇系统试验，持续开展演示研制，冻结设计状态，成为全球效率最高的民用大型发动机。UltraFan发动机将于2021年开



遛达系列7个成员

表4 遛达XWB系列发动机参数

发动机型号	发动机参数			
	最大推力/kN	压比	涵道比	风扇直径/mm
遛达1000	370	52 : 1	11 : 1	2850
遛达XWB	420	52 : 1	9 : 1	2997
遛达7000	320	50 : 1	10 : 1	2840



“珍珠”15发动机结构

始地面试验，预计于本世纪20年代末投入使用。

长期探索，开拓发展公务机动力市场

罗罗公司曾在公务机动力方面占据领先地位，主要产品有推力为30 ~ 52kN的AE3007系列发动机以及推力为65 ~ 72kN的BR700系列发动机，且BR700系列发动机占据较大市场份额。但在后续发展中，罗罗公司的多次尝试均未成功，包括：AE3012被竞争对手CF34-8击败；AE3014被自家BR710竞争击败；RB282、RB282-5、RB282-7被竞争对手PW800击败。虽然多次努力未成，但罗罗公司对于公务机动力发展从未停止。

2018年庞巴迪公司宣布新推出两型长航程大客舱环球公务机——G5500和G6500，配装罗罗公司的“珍珠”15系列发动机。这一消息揭开了罗罗公司为期6年的公务机发动机研制的神秘面纱。“珍珠”15发动机结合了Advance 2核心机的创新技术和BR700发动机的成熟技术，并引入遑达XWB发动机燃烧室技术，核

心机采用“10级高压压气机+2级高压涡轮”结构，压比24 : 1。发动机总压比43 : 1，涵道比4.8 : 1，最大推力67kN，耗油率、噪声、污染物排放量等均比BR700系列发动机低。“珍珠”15发动机于2015年完成地面测试，2019年第一批量产型“珍珠”15发动机交付。2019年12月，G5500和G6500通过了FAA认证。

启示

通过上述对全球三大航空发动机制造商的研究分析，得到以下几点启示。

一是统筹布局，积极谋划未来技术发展。民机市场竞争激烈且技术更新换代周期快的特点，决定了其动力研制必须快速且安全可靠。世界航空发动机巨头通用发展思路是：同代产品在已有核心机的基础上进行系列改进改型衍生发展；换代产品基于技术成熟的发动机核心机进行全新研制。GE航空集团、普惠公司均基于为新一代民机动力研制的成熟核心机，通过缩放设计发展新一代公务机动力产品。罗罗公司虽然在窄体客机动力方面屡次受

挫，但是通过多年潜心研究终获突破，牢牢占据了原有的市场份额。

二是科学定位，追求多元化市场发展格局。三大航空发动机巨头积极关注市场，通过对市场发展预测找准定位，找到适合自己的发展道路，在激烈竞争中赢得市场。GE航空集团在宽体、窄体和公务机动力上均有布局，LEAP发动机成为窄体客机动力首选，GE9X发动机突破多项先进技术获得宽体客机广泛青睐，新研Passport 20发动机激烈争夺公务机动力市场；普惠公司通过研发GTF技术牢牢占据原有窄体客机市场，并将推力范围不断向上下扩展，精心布局全推力等级公务机动力产品；罗罗公司利用三转子发动机技术优势衍生发展多款新发动机，不断巩固宽体客机动力市场，基于Advance和UltraFan分步发展，锚定未来窄体客机和更大推力级宽体客机市场，多年努力成功研制的“珍珠”15发动机保住了大型公务机动力市场份额。

三是先发制人，抢占知识产权保护制高点。当前，世界格局发生深刻变化，全球知识产权体系的布局、申请、管理和保护变得尤其重要。世界三大航空发动机巨头高度重视知识产权制度建设，普惠公司对GTF技术和罗罗公司对三转子结构发动机技术的保护甚至过度保护使得其他竞争对手难以准入，一旦采用其中的设计或技术同源的设计都很可能面临他们的侵权诉讼，知识产权竞争成为市场竞争的主要内容，也是企业的核心竞争力之一。 **航空动力**

(何龙江，中国航发研研所，高级工程师，主要从事航空发动机战略发展研究)