

罗罗公司超扇发动机发展态势分析

The Development and the Future of UltraFan

■ 王翔宇/中国航发研究院

从碳纤维/钛合金 (CTi) 复合材料叶片到大功率传动齿轮箱, 从与利勃海尔公司合资组建传动技术公司到与空客公司建立长期研发合作关系, 罗罗公司的超扇 (UltraFan) 发动机项目正在按部就班的推进中, 这款具有跨时代性能指标的发动机逐渐成为了罗罗公司应对未来民航市场竞争与挑战的标志性产品, 受到了业界的广泛关注。

UltraFan发动机的发展历程

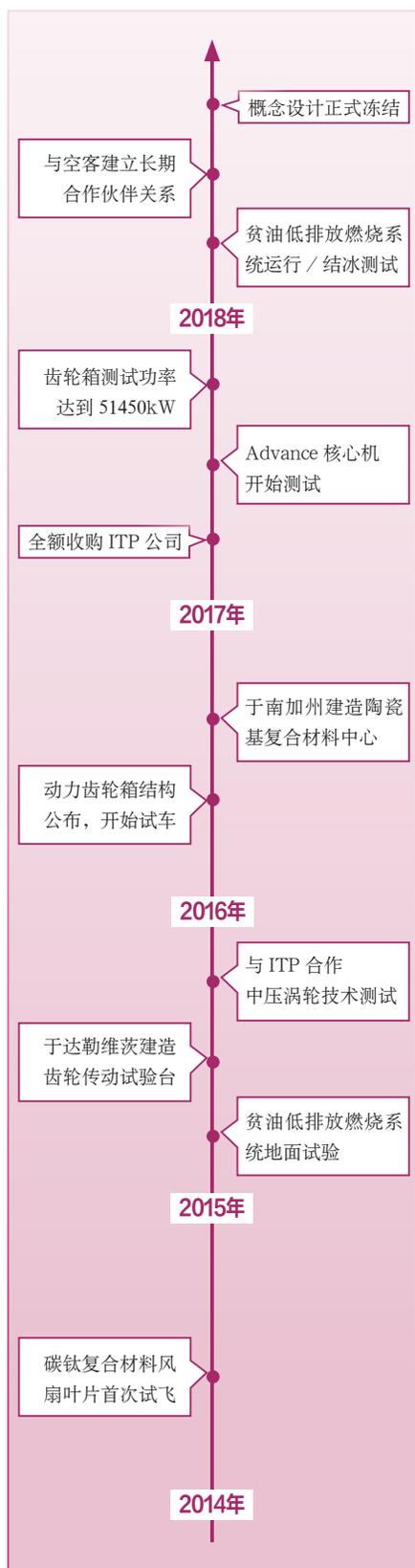
自2012年将其窄体飞机发动机合资企业IAE的股份出售给普惠公司后, 罗罗公司的运营策略完全转向了宽体机动力市场。在这一背景下, 除了立足原有的遛达系列发动机, 着眼于未来20年技术和产品发展趋势的Advance和UltraFan计划应运而生。按照罗罗公司的构想, 第一阶段以遛达XWB发动机为起点开发和验证全新负载构架的Advance核心机与发动机, 该核心机主要由新的高压和中压压气机、贫油燃烧室、带有陶瓷基复合材料 (CMC) 封严段和先进冷却涡轮叶片等部分组成, 燃油消耗和排放将比目前的遛达700发动机降低20%。第二阶段则以Advance核心机为基础开发和验证具有颠覆性技术特征的UltraFan发动机, 这里所说的颠覆性技术, 重点是指可变桨距CTi复合材料风扇/机匣与驱动风扇的大功率齿轮系统。UltraFan发动机的涵道比预期将达到15, 总增压比为70, 燃油消耗和污染物排放将下降25%以上, 实现从111kN到444kN的推力全覆盖。



碳纤维/钛合金 (CTi) 复合材料风扇

2014年10月, 安装CTi复合材料风扇叶片的遛达1000发动机在747飞行平台上成功进行了试飞, 这是Advance和UltraFan项目从构想变为现实的第一次跨越。在初步形成复合材料叶片的解决方案之后, 罗罗公司加快了Advance核心机的设计进度, 其中, 先进贫油燃烧低排放燃烧系统 (ALEcsys) 已于2015年下半年在遛达1000全尺寸发动机上进行了地面试验, 与西班牙ITP公司合作开展的中压涡轮研制也在

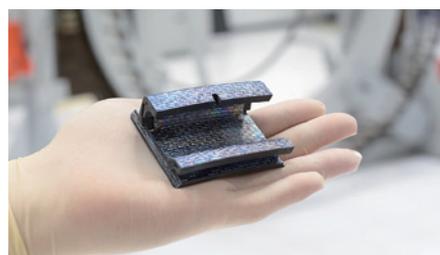
紧锣密鼓地进行。同时, 罗罗公司投入了6500万英镑在德国达勒维茨 (Dahlewitz) 建造了齿轮传动试验台, 2016年首次在低压低速条件下获取了齿轮箱的动力特性和滑油系统功能指标, 2017年9月测试的传动系统运行功率达到了创纪录的51450kW, 后续样机将会进一步达到73500kW的设计值。同年年底, 经过中、高压涡轮组件改良的Advance 3核心机首次试车, CMC、3D打印部件和贫油燃烧室的组成部件均取得了较为



UltraFan项目大事记 (2014—2018年)



贫油燃烧低排放燃烧系统 (ALEcsys)



UltraFan发动机上采用的陶瓷基复合材料

理想的测试结果。到2018年7月，罗罗公司宣布冻结概念设计，以“Advance核心机+复合材料叶片+齿轮箱”为典型特征的UltraFan发动机各方面均进展顺利，罗罗公司预计在2021年完成相关地面试车工作，到2025年左右可正式投入市场。

可以说，愿景宏大、研发急进成为了UltraFan发动机项目的主旋律，不仅仅是令人震撼的性能提升，更是前所未有的覆盖全推力量级的可扩展设计，体现了罗罗公司巩固宽体机动力市场份额、重新开拓窄体机动力市场的雄心。为此，一系列的新技术陆续应用到了UltraFan发动机上：CTi复合材料风扇叶片代替了遛达系列原有的钛空心叶片，使得发动机质量大幅度减轻；调整核心机负载结构，高压压气机由两级高压涡轮驱动以承担更大的工作负载，可以更经济的方式得到所需增压比；重新设计先进金属冷却部件与陶瓷基复合材料涡轮，核心机工作压力和温度得以进一步提高；最为核心的还是通过添加行星齿轮传动系统，风扇和低压涡轮可以以各自最优转速进行运转，从而带来了16%的燃油效率提高和75%的噪声降低。另外，通过与西班牙ITP公司合作开展中压涡轮设计、与GKN公司合作开展中介机匣研制、与利勃海尔公司共同开展齿轮系统研制，

罗罗公司引入了足够多的项目参与者和合作伙伴，整个UltraFan的分工体系也已经大致成型。2018年4月，罗罗公司进一步与空客公司签署共同研发协议，预期2020年前后空客公司将在罗罗公司的747飞行平台上对UltraFan发动机进行整机试飞测试，并据此优化改进其进气道、短舱及其吊架和反推装置等部件设计。显然，这种在飞机体系结构下的合作对于降低未来飞发不协调的风险、增强潜在飞机客户的使用信心有很大帮助。

业界普遍认为，未来UltraFan项目的成败在很大程度上取决于大功率动力齿轮箱能否达到研制预期。一方面齿轮传动的设计生产难度之大是公认的，尽管罗罗公司在AE2100、T56、M250以及升力风扇系统上对齿轮箱研制有所涉猎、在前期概念阶段的试车也很成功，但能否真正满足UltraFan的需求（相当于普惠第二代GTF技术水平）仍未可知。

普惠公司在GTF项目前后20年的投入超过了100亿美元，即便如此，其PW1000G发动机在技术细节和生产质量上仍未达到尽善尽美的地步，发动机推力越大，齿轮箱的受力越大，越容易出现故障，设计生产中面临的问题也会越多。另一方面，从公开的资料来看，罗罗和普惠的

齿轮传动概念和应用可能同出一辙，只是存在推力大小之分。对于先行者普惠公司来说，长期积累构建的知识产权壁垒是不会允许竞争对手轻易进入并瓜分其市场份额。目前，普惠公司在发动机齿轮设计方面申请的专利超过了300项，保护期限均在20年以上，更是不止一次地表示即使UltraFan使用不同类型的变速箱仍可以发起专利诉讼，到时候一场旷日持久的法律纠纷可能在所难免，这对UltraFan发动机市场形势可能会产生不小的影响。

UltraFan发动机的市场未来

正当业界关注的焦点集中在UltraFan的技术革新之时，关于其市场前景的讨论也随着整个研发进程的推进而不断升温。对于一款产品来说，“叫好”（性能指标先进）与“叫座”（市场反响强烈）是两个没有必然联系的概念。纵观近10年来的航空装备市场，无论是从CFM56到LEAP，从GE90到GENx，还是从遛达1000到1000TEN，民用航空发动机的产品谱系大多高度固化，即使是那些处于成长期的新型号也更多属于时代发展、科技进步下的自然升级换代。各家航空发动机制造商似乎都在谨守已有市场份额的同时，非常小心地去试探可能的成长边际，避免由于贸然引入全新的产品线所带来的巨大资金风险和市场需求风险。

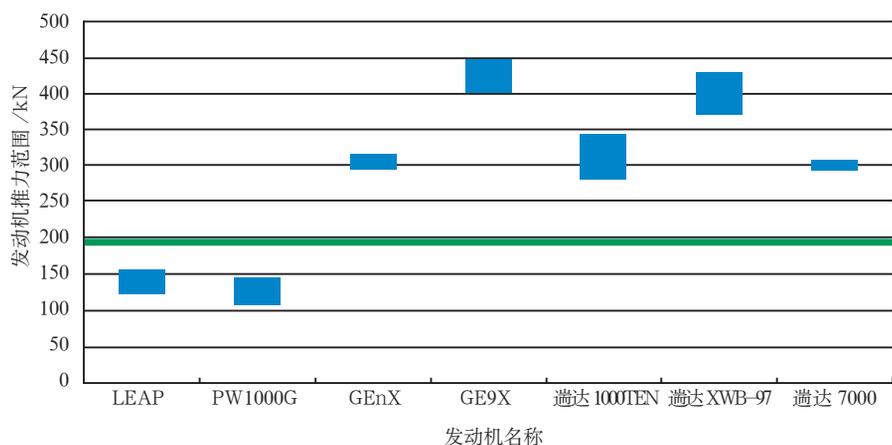
未来，UltraFan发动机进入市场的立足点，要么直接强势加入现有飞机序列的换发竞争（如PW1100G成为了A320neo的换装方案之一），要么耐心等待新型飞机立项时选发的机会。UltraFan发动机推力覆盖

范围广，窄体机动力、宽体机动力都能胜任，但实际上前者早就是一片红海，相关市场份额已被CFM国际公司与普惠公司瓜分殆尽，更何况UltraFan的最大竞品PW1000G珠玉在前，罗罗公司想凭借一款横空出世的产品重返博弈白热化的窄体机动力市场并占据一席之地实在是难以想象。而罗罗公司也从未放弃对遛达系列发动机的更新改造（普惠公司在2008年推出GTF发动机计划时就战略性地停止了PW2000等老旧窄体机动力产品后续发展），过早地将UltraFan引入宽体机动力市场“左右互搏”，只会白白冲击遛达1000TEN、遛达XWB-97和遛达7000的市场行情，而大推力量级的齿轮系统研制量产也未必就能一蹴而就。

2016年的新加坡航展上，波音公司公布了针对中间级市场（MOM）的新中型飞机（NMA）研发计划。通过对36家航空公司的市场调查，波音公司表示所有受访对象都对载客200~270人、飞行航程8000km左右的中型客机有迫切需求，未来其市场空间可能超过4000架。而据美国《航空周刊》的相关预测结果，今后5年老旧的波音757和767的在役数量将从1253架减少到989架，就在波音公司这段产品换代断档期，空客公司将利用A321neo及其衍生型进一步扩大在中型飞机市场的份额。截至2018年年初，A321neo在中间级市场的占有率达到了71%，其保有订单数量几乎是737MAX 10的10倍，到2022年在役的A321neo数量将接近1000架。考虑到近些年在与空客公司市场竞争中总体占优，波音公司显然不可能坐视其对手在

中间级市场风生水起，通过引入比A321neo运营经济性和生产经济性更好的中型客机NMA去真正替换757和767，形成与A321neo全面的对抗，建立从窄体机到宽体机自然平稳过渡的全产品谱系。为了达成这一目标，除了尽可能的多利用787、777X和737MAX项目中验证的大量先进技术外，波音公司认为全新的发动机及其与飞机的集成因素将是决定NMA的研制进度的关键。

2010—2020年，处于成长周期内的民用航空发动机有7款之多，而在这令人惊叹的多样性中，却没有一型正在研发或已经生产的推力在200kN左右、能够完美搭配NMA的产品。放眼整个155~275kN推力级发动机市场，CF6-80C2、PW2000、PW4000-94和RB211-535C占据了在役发动机数量的88%，而这些配装757和767的老旧动力产品显然无法满足波音公司降低NMA单位运行成本30%的要求。若UltraFan能率先进入这一长期被忽略的领域成为NMA的指定动力方案，罗罗公司既避免了窄体机动力市场的激烈竞争与宽体机市场的无谓内耗，又能在在这个型号定位上为以后真正打入窄体机动力市场做铺垫。更为难得的是，二者的预期上市时间均为2025年左右，UltraFan的研发日程无需为NMA进行大幅度调整。早在2015年NMA项目概念吹风后，罗罗公司就表示将向中间级市场需求靠拢，随着UltraFan项目的快速推进，2017年罗罗公司更是宣布暂不考虑与合作伙伴一起追求这个项目的计划，这一独立发展策略也展示了罗罗公司对未来中间级动力市场志在必得的信心。



2010—2020年成长周期内的发动机推力范围 (绿色为NMA需求范围)

中间级市场主要在役的航空发动机 (155 ~ 275kN)

发动机型号	CF6-80C2	PW2000	PW4000-94	RB211-535C
制造厂商	GE	普惠	普惠	罗罗
推力范围/kN	229 ~ 273	167 ~ 185	240 ~ 300	163 ~ 190
在役数量/台	2283	562	1906	896
装备飞机型号	波音747, 波音767 A300, A310	波音757	波音747, 波音767 A300, A310	波音757

UltraFan发动机面临的重大挑战

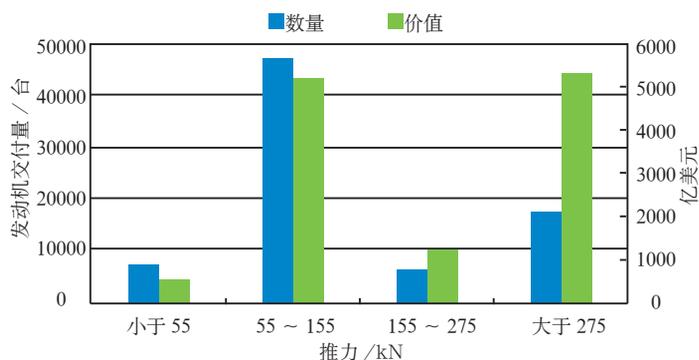
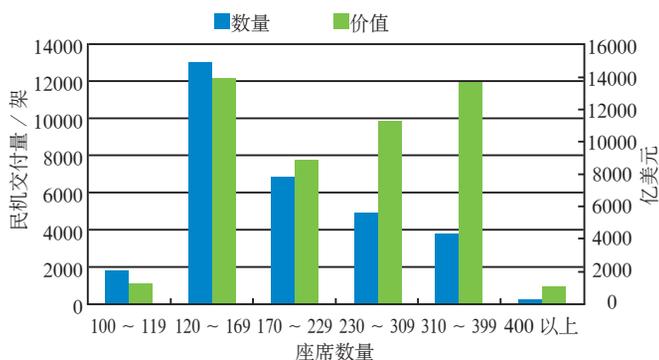
就在罗罗公司摩拳擦掌发力中间级市场的同时，普惠公司和CFM国际公司也表示了对NMA中型客机项目的浓厚兴趣。经历了最近5年窄体机动力市场的迅猛发展之后，两家公司都在积极寻找下一个业务增长点，尽可能地充分释放LEAP和PW1000G的市场竞争潜力。普惠公司第一代GTF产品线最后一个型号PW1133G为145kN推力，而LEAP最大推力已经达到了160kN，距离NMA项目的选发范围仅一步之遥。CFM国际公司和普惠公司无须像罗罗公司那样另起炉灶、重新打造类似UltraFan的产品，通过合适的升级策略完全有可能以较小的代价使

LEAP和PW1100G覆盖中间级动力市场，抢占从窄体机动力市场向宽体机进军的跳板。特别是普惠公司，在2016年新加坡航展之后就迅速与波音公司进行了接触，商讨GTF在NMA上的潜在应用以及PW1100G缩放架构的可行性。与PW1100G相比，UltraFan在技术上有后发优势，但从齿轮传动这一核心技术的发展看，二者已经逐渐趋同，2017年10月普惠公司着手开展了第二代GTF技术的测试工作，整体技术指标并不亚于UltraFan项目。结合两年多的交付使用情况，GTF的技术成熟度与产品可靠性越发得到了市场的检测与认可，这也必然会对未来用户的信心与黏性产生深远的影响，UltraFan与其在中间级动力市场的短兵相接

可以说已是箭在弦上。

而波音公司显然很乐于看到这种选发“三国杀”的局面。由于A321neo已经在中间级市场占有率具有支配性优势，空客公司肯定不会紧跟波音公司的脚步重新布局新的中间级机型。事实上，空客公司一直对所谓的“中间级市场”概念冷嘲热讽，认为是波音公司无中生有地杜撰出来的。相当长的一个时期内，无论是罗罗公司、普惠公司还是CFM国际公司的中间级发动机产品受众只能是波音公司一家。在典型的买方市场态势下，“一机双发”甚至是“一机三发”几乎将是波音公司的必然选择，这样可为航空公司客户提供更多的选择、保持最大的发动机定价压力，同时也尽可能地降低了技术风险。据CFM国际公司估计，配套NMA的新型发动机的研发费用大约在25 ~ 30亿美元之间，两个供应商分摊后的市场投资回报已经非常有限，“一机三发”则无法满足立项的商业条件。然而食之无味，弃之可惜，一旦任何一家发动机制造商主动退出了竞争就意味着对手会此消彼长地做大，这可能是更无法接受的。可以说这种“一机多发”焦虑的根源还是未来NMA市场规模的不确定性，如果它能够像A320neo那样占有市场，那么类似LEAP-1A和PW1100G双选也未尝不可。

虽然已经要求各大发动机制造商提交投标方案，但波音公司时至今日仍未给出NMA最终的概念设计，只是表示2019年年底将决定是否继续这个项目。业内普遍认为，先前波音公司的市场需求估计过于乐观，经典窄体飞机和宽体飞机对NMA的市场挤压与渗透可能会比想



2018—2037年民用飞机交付量与价值预测 (来源: JADC 报告) 2018—2037年民用航空发动机交付量与价值预测 (来源: JADC 报告)

象之中的更为强劲。如果NMA错过2025年这一服役当口,随着航空公司发现其他飞机可以取代老化的757和767,那么需求可能会进一步缩减。而以日本飞机开发公司(JADC)的市场分析报告《世界航空市场预测》为例,230~309座客机未来20年预计的交付量也不过4887架,这其中还包含了比NMA载客量更大、飞行距离更远的787-8/9/10以及A330neo/neo的市场需求。考虑到NMA在与A321neo、737MAX 10产品差异化上面面临的挑战,即使中间级市场真有如波音公司所说的4000架左右的需求空间,短期内NMA也很难占有一半以上的份额。

按照7500万美元的潜在单价估计(尚不足A321neo的70%),2000架NMA订单总计1500亿美元,相应发动机的市场价值总量可能在300亿美元左右,这一数字不会超过LEAP同期的1/5。与窄体机和宽体机相比,中间级市场的份额本来就小,在这里又会有NMA与A321neo竞争,而NMA的选发对象又不会是一个,能留给UltraFan的市场空间就更小了。一方面,短期看NMA是UltraFan进入市场的良机,竞争对手也在虎视眈眈,罗罗公司必将全力以赴;另一方面,浅水难养蛟

龙,恋战中间级动力市场对UltraFan的长远发展意义不大,如何寻找下一个目标市场值得思考。有报道称,罗罗公司在NMA选发的同时也在为航空公司下一代双通道宽体飞机动力做准备,不过该型飞机进入市场的时间可能比NMA至少晚5~10年。

结束语

在概念设计完结之际,UltraFan项目呈现出以下四方面的态势。

第一,罗罗公司重磅推出的Advance核心机、CTi复合材料叶片和大功率齿轮传动系统等在相关试验测试中大放异彩,展现了一个老牌航空发动机制造商雄厚的技术实力,奠定了UltraFan项目后续发展的基础;

第二,除了功率大小不同外,UltraFan在减速齿轮箱设计概念上越来越与普惠公司GTF发动机趋同,这也是其实现高效省油的核心技术,弱差异化除了带来法律层面的潜在纠纷,也会引起二者未来在市场上的正面碰撞;

第三,波音公司的NMA飞机计划是UltraFan发动机打入市场的关键,既避免了直面窄体机和宽体机动力市场恶劣的竞争环境,又能够灵活保留未来进入窄体机和宽体机

动力市场的可能;

第四,在罗罗公司努力争取中间级动力市场的同时,普惠公司和CFM国际公司都在通过相关产品的更新升级来参与竞争。极为有限的市场容量无益于实现罗罗公司对于UltraFan发动机的长远战略预期,开拓新的市场需求仍然任重道远。

值得一提的是,就在罗罗公司大张旗鼓地宣传推介UltraFan发动机的同时,以Advance核心机为基础的新一代常规构型的Advance发动机研制也在颇为低调、有条不紊地同步进行着。作为UltraFan发动机之前的产品过渡,Advance发动机项目将独立于UltraFan发动机进行,罗罗公司预计在2020年左右即可实现市场投放。若UltraFan发动机在后续研制中遇到难以克服的新问题(特别是齿轮传动系统),或者由于种种原因市场接受度达不到预期,那么罗罗公司很可能会用这款“低配”的产品尝试替代UltraFan发动机的角色与定位。可以说UltraFan发动机确实是罗罗公司为未来复兴押下的最大赌注,但它肯定不是罗罗公司的全部筹码。 **航空动力**

(王翔宇,中国航发研究院,工程师,主要从事航空发动机发展战略研究)