

赛峰和 GE 启动可持续发动机革新技术演示验证计划

Safran and GE Aviation Launch RISE Program

何萍 王翔宇 / 中国航发研究院

通过可持续发动机革新技术（RISE）演示验证计划，赛峰集团和GE公司将合作为民机市场带来一系列具有革命性的动力技术，使下一代干线飞机的燃油消耗和碳排放降低到一个前所未有的水平，共同塑造航空业低碳化发展的未来。

赛峰集团和GE公司于2021年6月在法国巴黎签署协议，将双方在CFM国际公司的平股合作关系延长至2050年，同时为秉承航空业到2050年碳排放减半的承诺、共同引领未来航空业可持续发展，两家公司宣布依托CFM国际公司启动可持续发动机革新技术（RISE）演示验证计划，旨在通过一系列全新的颠覆性技术来推动下一代窄体机动力系统的研发。与LEAP发动机相比其油耗和碳排放将降低20%以上，并能够与可持续航空燃料（SAF）和氢燃料等替代能源100%兼容。为了达成这一宏伟目标，RISE计划实施的关键就是采用开式风扇发动机架构，结合混合电推进系统、紧凑型核心机以及先进复合材料等其他技术，在大幅提升动力系统效率的基础上提供与当前干线机相同的飞行速度和环境体验，实现更多飞机部件系统的电气化。

跌宕起伏的开式转子发动机发展史

1973年和1979年的两次中东战争诱发了全球性能源危机，原油价格



CFM国际公司推出CFM RISE计划

暴涨，高效节能的新推进技术受到了航空发动机制造商和科研机构的高度重视，开式转子航空发动机概念也应运而生。它既可看作带先进高速螺旋桨的涡桨发动机，又可看作除去外涵道的超高涵道比涡扇发动机，兼具涡桨发动机推进效率高、耗油率低和涡扇发动机飞行速度快的优点。在美国国家航空航天局（NASA）先进涡轮螺旋桨计划的支持下，GE公司设计完成了无涵道、无齿轮、逆向旋转的推进式开式转子发动机GE36，斯奈克玛公司（2016年更名为赛峰飞机发动机公司）也

是其合作伙伴。GE36发动机有两排反向旋转的开式转子风扇，前一级风扇直接连接在内部的涡轮叶片上，后一级风扇则由连接在主轴上、位于涡轮和喷管之间的叶片驱动，而这也带来了热和负荷不平衡的问题。为此轻质复合材料风扇叶片设计制造技术得以快速发展，并在后来GE90发动机上得到了应用。

1985年的地面测试结果显示，GE36发动机的燃油消耗较常规涡扇发动机下降了20%，航空业大幅节省燃料的迫切愿望似乎越来越接近现实。一年之后，GE公司借助一架



1988年正在进行飞行测试的GE36开式转子发动机

波音727飞机对GE36发动机进行了飞行测试，在1988年的范堡罗航展上，配装GE36发动机的MD-80飞机完成试飞时，NASA甚至认为“所有的指标都表明，到20世纪90年代民用飞机将广泛采用全新的涡桨发动机”。令人遗憾的是，伴随着后续原油价格意想不到的持续走低，航空业对于开式转子发动机的兴趣开始急转直下。在那个经济性至上的年

代，一旦渡过了能源危机，整个市场对先进高效动力的需求很快就消失了。不仅如此，阻碍GE36发动机从试验验证走向真正商业化的技术问题也没有被完全解决，其中最具有代表性的一点就是噪声。缺乏短舱遮蔽的外部对转桨扇叶片会产生比涡扇发动机大得多的噪声，且这种噪声会比核心机的宽频噪声更让乘客无法接受，同期也只有乌克兰的



安-70军用运输机上的D-27开式转子发动机

D-27开式转子发动机应用到了对噪声水平相对宽容的安-70军用运输机上。

在尘封了30年之后，2009—2012年GE公司联合NASA和美国联邦航空局（FAA）再次启动了开式转子风洞外流试验，基于现代方法重新设计制造的叶片相对于20世纪80年代最佳设计的净效率提高了3%，噪声已能达到比适航标准要求还低10~13dB的水平。不仅如此，借鉴这几十年来降噪经验与成果，GE公司还测试了很多其他方法，如增加叶片数量、减少轮盘载荷、增加转子之间和塔架与转子之间的间距，以及去掉机尾转子以减少叶尖涡的相互作用等。显然，除了航空业低碳发展的迫切性驱动外，许多曾与当初开式转子发动机一同攻关的关键技术在这段时间里通过其他项目渠道取得了重大的进展，这些技术正在使更高的效率、更少的排放和更低的噪声的开式转子发动机逐渐成为现实。

几乎就在同时，受欧盟“清洁天空”（Clean Sky）计划的资助，赛峰集团启动了为期8年的反向旋转开式转子发动机（CROR）项目。在2013年的风洞试验和2015年组装验证机之后，赛峰集团于2017年5—12月对SAGE 2样机进行了超过70h的地面测试。该样机基于M88发动机改造完成，三维编织碳纤维复合材料叶片呈前12个、后10个分布排列，能够产生100kN的推力，基本与LEAP发动机保持一致，但测试产生的燃油消耗却较LEAP发动机减少15%左右、噪声也控制在国际民航组织（ICAO）附件16第14章限制范围内。赛峰集团对测试的结果非常满意，并表示开式转子是“迄今已



2017年赛峰集团对CROR样机进行地面测试

知的唯一一种既具备两位数的油耗降低潜力，又能满足日益严苛噪声适航标准的动力构型”。2020年年底，赛峰集团透露将以CROR项目为基础竞标“清洁天空”的后继计划“清洁航空”（Clean Aviation），除了通过飞行试验进一步证明开式转子构型的推进效率优势外，下一阶段的工作重点还包括提高核心机的热力学效率与进行混合电推进改造。

RISE计划的前景与挑战

通过赛峰集团和GE公司几十年来对开式转子架构不懈地探索努力，相关设计技术和材料技术的改进已经能够基本消除早期产品存在的尺寸、质量以及噪声等问题。预计RISE计划下的开式转子发动机外部风扇直径会进一步减小到365 ~ 398cm，推力将维持在133kN，并具备向宽体机动力扩展的可能性。不同于CROR和GE36的“推进式”构型，前置叶片的“牵引式”布局方案很可能会被采用，能够在几乎不改变机体构架的前提下为窄体机提供动力。此外，发动机自身整体架构也会得到简化，

反向旋转的第二级风扇被取消，具有可变桨距的碳纤维风扇叶片后面就是一排静态导流叶片，这种设计可在减少转子负荷的同时增加整个风扇的压比，从而可以进一步提升飞行速度。CFM国际公司目前并未公开核心机各部件的具体技术细节，只表示届时涡轮前温度和压比必将超过LEAP发动机，并将更为广泛地使用陶瓷基复合材料（CMC）和增材制造技术来生产新型零件，例如具有内部通路的定子叶片以提供更好的冷却性能。

需要特别说明的是，CFM国际公司RISE计划的初衷只是用来促进未来新型动力技术的成熟与发展，并不会借此机会推出全新的民用航空发动机产品。蒂尔（Teal）咨询公司更是认为，虽然RISE计划对开式转子发动机表现出了极大的信心与热情，但还不能将其等同于GE公司和赛峰集团未来将会走开式转子发动机发展路线的承诺，它可能只是把若干潜在的技术发展方向融合了起来，看看哪些才是真正的出路。事实上，GE公司在2020年9

月首次阐述其新技术演示计划构想时，开式转子发动机、提升涡轮前温度和压比，以及混合电推进系统就被并称为实现20%动力效率提升的3个主要“技术篮子”，可以预见在RISE计划的实施过程中后二者显然不会缺席。未来的开式转子发动机一方面会集成多个先进发电机组并根据飞行状态的需求进行功率提取、为飞机实现燃油动力和电力之间的转换提供切口，另一方面也会兼容航空煤油、生物燃油等多种燃料，甚至在某些时候直接燃烧氢气，CFM国际公司宣称20%的效率提升足以抵消液氢燃料罐所带来的额外飞行质量。

不过在RISE计划公布后，波音公司和空客公司都拒绝就此发表官方的评论或声明。从公开的报道看，波音公司首席执行官大卫·卡尔霍恩对在10年左右的时间里通过下一代动力系统立即实现15% ~ 20%的效率提升表示悲观，空客公司也似乎更倾向于赛峰集团的超高涵道比发动机（UHBR）演示验证项目，该发动机涵道比约为15 : 1，仍为带短舱的传统动力结构，虽然其燃油消耗较LEAP发动机仅下降5% ~ 10%，但总体技术较为成熟，预计到2025年就可以投入商业运营且不需要对发动机安装进行太多的调整，事实上除了噪声问题外，影响开式转子发动机适航取证的另一个关键难点就是安全性。由于缺乏短舱和密封环的包容，一旦风扇叶片发生故障可能会对飞机机体产生严重破坏，也正是这种顾虑的存在，尽管当时赛峰集团认为复合材料叶片并不存在像金属那样疲劳失效的风险，空客公司还是搁置了原定于2017年年



RISE 计划下开式转子发动机与飞机集成概念(来源:CFM 国际公司)

底利用 A340 飞机对 CROR 样机进行飞行测试的计划。而如果在机体加装防护层,飞机起飞质量无疑会大幅增加,这也是飞机制造商万万不愿意接受的。

开式转子与齿轮传动的路线选择

除了飞机制造商,CFM 国际公司在窄体机动力领域的竞争对手普惠公司对 RISE 计划的反应也引起了业界的关注,要知道,20 世纪 80 年代 GE 公司在开发 GE36 发动机的同时,普惠公司和艾利逊公司也联合研制了 578DX 开式转子演示样机,并顺利完成了地面和飞行验证试验。然而时殊事异,普惠公司在齿轮传动涡扇(GTF)发动机研发上的空前成功似乎没有理由使其再回到开式转子这条老路。2020 年 10 月,普惠公司宣布即将启动第二代 GTF 发动机的研发,在通过齿轮传动系统提升推进效率的基础上未来可能会重点针对发动机的热效率开展工作,而这一块也是 CFM 国际公司的传统优

势领域。普惠公司正在加速应用能够承受 1320℃ 的超高温陶瓷基复合材料,并尝试利用增材制造技术生产热交换器和燃油泵等高温镍基合金组件。普惠公司还将与 NASA 合作建造涵道比高达 18 : 1 的 GTF 样机(PW1000 系列的涵道比为 12 : 1),探索进一步提升 GTF 构架效率的方法以及对 100%SAF 和液氢燃料的兼容性。虽然目前民用飞机已经可以使用最高 50%SAF 组成的混合燃料,普惠公司还是希望能尽快完全放开 SAF 的使用限制,这样有望减少 80% 的航空碳排放。

一个有意思的事实是,虽然 CFM 国际公司在公开的 RISE 计划中对是否采用齿轮传动系统只字不提,不过之前赛峰集团的 CROR 项目实际上就是在研发齿轮传动开式转子发动机,GE 公司旗下的意大利 Avio 公司则负责其中齿轮箱的设计制造工作,要知道当年普惠公司在 578-DX 的低压涡轮和风扇叶片之间就加入了一个 13 : 1 的减速箱,这也是其与直接驱动的 GE36 的最大不同。

很快在后续的媒体报道中,CFM 国际公司还是承认了 RISE 验证机的前级旋转叶片将由高压压气机和高速低压轴驱动的前齿轮箱提供动力。NASA 格伦研究中心在 2010 年曾预测,单考虑推进技术的进步,与基准发动机 CFM56-7B 相比,2030 年服役的齿轮传动开式转子发动机和 GTF 发动机的单位耗油率将分别改善 38% 和 24%,典型任务总耗油量分别降低 44% 和 28%,将齿轮传动和开式转子这两种革新技术结合起来所产生的巨大增益可见一斑。也许关于开式转子和齿轮传动这两种发展路线的争论最终还需要市场来检验,但无论是 CFM 国际公司还是普惠公司,它们似乎都在积极学习借鉴对方的成功经验来不断改进自身的技术和产品,这也意味着可能越到最后越会殊途同归,对于混合电推进系统和 SAF 的支持就是一个很好的证明。

结束语

根据 CFM 国际公司的计划,预计在 2025 年左右完成 RISE 验证机的地面测试与飞行测试,到 2035 年前实现市场商业化运营,这与波音公司和空客公司推出下一代窄体飞机的时间表高度一致。经过过去几十年的努力,CFM 国际公司相信开式转子构架那些曾经困扰人们的问题都已经找到了解决方案,也许就在不远的未来,开式转子发动机将会实现航空史上最大的飞行效率提升,并达到令人满意的噪声和安全水平。

航空动力

(何萍,中国航发研究院,工程师,主要从事航空发动机信息技术、保密技术研究)