

GE下一代航空动力技术发展路线

GE Aerospace's Roadmap for Next-Generation Aerospace Power Technology

■ 王翔宇 刘金超 / 中国航发研究院

通过将开式转子、混合电推进、紧凑型核心机与可持续航空燃料（SAF）、氢燃料相结合，GE公司努力打造特色鲜明、覆盖全面的技术发展路线，为21世纪30年代中期开始服役的下一代航空发动机做准备。

革命性技术和替代燃料将在航空业实现2050年零碳排放的征程中起到决定性作用。2022年7月，GE公司公布了开式转子、混合电推进和紧凑型核心机等先进发动机架构的工作进展，以及为增强SAF和氢燃料可用性所做的努力，描绘出公司百余年历史上涉及的内容最广泛的技术发展路线图。2023年3月，GE公司相关负责人在美国参议院商业、科学和运输委员会组织的推动下一代航空技术发展听证会上重申了对航空动力技术进步的理解，展示了近年来在定义和开发下一代航空发动机上采取的行动，希望能突破所谓的创新极限来引领整个行业的发展。

开式转子发动机

在20世纪80年代实现开式转子发动机GE36首飞之后，通过几十年来对开式转子架构的不断探索，GE公司认为如今设计技术和材料技术的提升已经能够基本消除早期产品存在的质量、尺寸及噪声等问题。未来开式转子发动机不再像GE36那样采用后置对转风扇结构，可变间距的导流定子取代了第二级风扇，不但增加了整体风扇的压比、降低了叶



开式转子发动机飞行试验（来源：空客公司）

片的载荷，还使转子系统大幅简化，在质量和可靠性上有更好的表现；借助现代化的碳纤维复合材料风扇叶片设计制造方法，开式转子发动机在保持原有涡扇发动机巡航速度的同时噪声较适航标准低10dB以上，风扇直径也将从接近5m缩小到4m以下，与当今主流的短舱外径相差无几，具备安装到现役窄体飞机上的潜力。

2021年6月，GE公司和赛峰集团宣布依托CFM国际公司启动可持续发动机革命性验证（RISE）项目，以开式转子为核心技术特征的下一

代航空发动机较目前LEAP发动机的油耗和碳排放进一步降低20%以上。2022年7月，CFM国际公司和空客公司宣布联合开展开式转子发动机的测试工作，地面测试在GE公司位于美国加州的测试中心进行，后续会转移到法国图卢兹的空客基地借助改装后的A380开展飞行试验，从而评估开式转子发动机的真实推进效率和飞发一体化后的气动性能。GE公司认为开式转子发动机那些曾经困扰人们的问题都已经找到了解决方案，相关技术和产品有望在2035年左右实现商业化运营。



GE公司对兆瓦级混合电推进系统进行测试

混合电推进系统

除了开式转子架构外，GE公司还准备在RISE项目中通过混合电推进技术来进一步优化发动机效率，提升飞机机载系统的电气化水平。2021年9月，美国国家航空航天局(NASA)资助GE公司1.79亿美元开展电气化动力系统飞行验证(EFPD)项目。通过与波音公司合作，GE公司将在2025年左右使用萨伯(Saab)340飞行平台对由CT7-9B涡桨发动机、电池电源、发电机、电动机、逆变器和功率转换器等组成的兆瓦级混合电推进系统进行地面和飞行测试，验证为窄体飞机提供动力的可行性，并使之在扩展和改进后具备用于各种飞行平台的潜力。而就在EFPD项目中标之后，GE公司还从美国陆军获取了一份510万美元的涡轴电气化应用项目(ARC-STEP)合同以加速兆瓦级混合电推进系统的研发。

2022年范堡罗航展期间，GE公司在NASA的电动飞机试验平台(NEAT)进行了全球首次兆瓦/千伏级混合电推进系统的高空模拟测试(对标13700m飞行高度)，初步展现

了在低大气密度和绝缘水平环境下大功率、高电压混合电推进技术的成熟度。后续相关地面测试将对混合电推进系统各组件的电磁干扰和振动响应进行安全性评估，重点关注抗冲击和其他各种极端环境条件的耐受能力。2023年3月，西科斯基公司宣布将和GE公司联合研制混合电动垂直起降无人机(HEX)，最大起飞质量超过3t、航程在800km以上，这无疑将为兆瓦级混合电推

进系统提供更加广阔的应用场景和商业可能。

紧凑型核心机

作为NASA混合热效率核心机(HyTEC)项目的合作伙伴，GE公司已获得2000万美元的合同用以开发小型高功率密度核心机，研究内容包括用以提升热效率的压气机、燃烧室和高压涡轮技术以及功率提取技术等，计划在2025年前完成地面测试。紧凑型核心机同样是RISE项目中关键的一部分：一方面，缩小发动机的核心机可以加大涵道比，特别是对于开式转子发动机与现役飞机的配适具有重大意义；另一方面高达20%的发动机功率提取能力可与兆瓦级混合电推进系统深度集成，进一步改善燃油效率。

更小的核心机意味着更高的内部温度。陶瓷基复合材料(CMC)的密度只有常规合金的三分之一，但耐温极限却远超后者，大大减少了对冷却气流的需求，使发动机具有更高的能效和更好的耐用性。自1986年



GE公司研发的CMC发动机部件

获取第一个CMC专利以来，GE公司将之设定为未来航空技术发展的核心战略方向，投入了超过10亿美元和数百名技术专家对CMC开展技术攻关，构建了全球第一个也是唯一一个一体化的CMC供应链，相关产品已在公司的多型发动机上得到广泛应用，这可能也是GE公司实现HyTEC项目研究目标的主要依托。

替代燃料：SAF和氢

2007年以来，GE公司一直在积极参与SAF的评估和认证，与能源供应商、航空运营商和监管机构通力合作作为SAF的推广应用扫除障碍，支持的SAF飞行验证活动创造了多个第一：2008年维珍大西洋航空公司配装CF6发动机的波音747完成全球首次SAF商业测试飞行；2018年联邦快递公司配装GE90发动机的波音777完成全球首次双发100%SAF演示验证；2021年美国联合航空公司在波音737 MAX上配装的一台LEAP发动机使用100%SAF进行了全球首次载客飞行等。目前GE公司的所有航空发动机产品均可在不进行改动的情况下按照批准的混合比例使用SAF。

GE公司在地面燃气轮机应用氢燃料上有着超过800万h的运行经验。在此基础上，2022年2月空客公司和CFM国际公司签署协议合作进行氢涡轮动力系统研发验证，为2035年氢动力航空器投入使用做准备。CFM国际公司将负责改造“通行证”（Passport）发动机的燃烧室、燃料系统和控制系统使之能够与液氢燃料相匹配，待地面测试完成后由空客公司集成到A380飞行试验平台对巡航阶段的氢涡轮动力系统的

GE公司相关SAF飞行测试活动

时间	事件	测试发动机型号
2008年	首次SAF商业测试飞行	CF6
2010年	首次使用SAF的直升机测试飞行	T700
2011年	首个使用SAF的商业航班	CFM56
2011年	跨大西洋SAF大型货运验证	GE9x
2016年	首次100%SAF军用动力飞行	F414
2018年	首次100%SAF民用动力飞行	GE90
2021年	首次采用电转液（PtL）工艺制备的SAF商业飞行	CFM56
2021年	首次使用SAF的直升机商业飞行	CT7
2021年	单台发动机100%SAF商业试飞	LEAP



氢涡轮动力系统验证机（来源：空客公司）

性能和排放进行测试。空客公司认为这是继2020年提出ZEROe概念以来，为开创氢动力飞行新时代所迈出的最重要的一步。

发展路线分析

如果用一句话来概括GE公司构想的未来民用航空发动机，那就是“以开式转子构架为基础，融合混合电推进和紧凑型核心机技术，能够兼容SAF和氢燃料”。其中既有GE公司一贯坚持的较为独特的技术导

向（如开式转子和CMC），也涉及当前业界公认的具有明显减排前景的研究热点领域（如电推进和氢动力），这些被打包整合起来形成了一揽子的RISE项目，2025年开始测试、2035年投入市场的时间节点能够与未来LEAP发动机的更新换代无缝衔接。不过，如此多元分散的业务布局也意味着RISE项目更多停留在对可能的各种新型动力技术的探索验证阶段，而不是像罗罗公司的“超扇”（UltraFan）项目那样直接形成面向

市场的单一型号产品。

发动机和飞机的匹配被视为航空工业中最为关键的设计决策，决定着未来三四十年的发展产品的发展方向。有“超扇”发动机一波三折的选发教训在前，在缺乏明确飞机需求牵引的情况下贸然推动预研项目转化为产品存在巨大的经营风险，想获取飞机制造商对开式转子这条研发主线的认可可能会比“超扇”发动机更不容易，很难想象空客公司和波音公司会为了开式转子发动机而对A320neo或737 MAX机体结构进行大幅修改。虽然RISE项目中混合电推进和紧凑型核心机是与开式转子构架捆绑出现的，但GE公司同样有着深厚的技术积累，二者也并不是开式转子发展过程的附属品，都具备独立的技术路径和应用前景，这是GE公司避免单一技术成功但市场失败的均衡性决策体现。

与美国政府航空气候行动计划一致，GE公司给出了“到2050年实现航空零碳排放的最大机会在于SAF”的观点，支持美国正在实施的可持续航空燃料大挑战（SAF Grand Challenge）战略，积极推进SAF相关测试鉴定工作。考虑到SAF产业发展的关键在于提升产能、降低成本并增强可持续性，未来航空制造商与能源供应商和航空运营商的通力合作尤为关键。针对其他零排放技术方向，不只是全电推进系统（含氢燃料电池）的优先级被GE公司放在较后的位置，研发氢涡轮动力似乎也更多是在飞机制造商的主导下亦步亦趋开展的、更像是为“下一代”航空动力的主方案做探索，用GE公司自己的话形容就是“这不是一件容易的事情，需要对推进系

统进行重大改变才能燃烧液氢”。

过去的五十年里，GE公司与NASA、美国联邦航空局（FAA）的合作改变了全球航空动力发展格局，这种政府和行业的伙伴关系是维持美国航空产业竞争力的源泉。GE公司在参议院听证会证词中特别强调了NASA和FAA在通过项目投资加速新技术研发方面发挥的不可替代的作用。无论是NASA发起的EPFD和HyTEC计划，还是FAA主导的持续降低能耗、排放和噪声（CLEEN）计划，都会对GE公司下一代航空动力技术的发展产生深远的影响。GE公司认为美国航空业正面临着来自欧洲的激烈竞争（如在欧盟地平线计划下建立的清洁航空伙伴关系）和来自中国的新挑战（中国制造2025计划），呼吁美国政府加大对航空技术的战略性、结构性投资，从而确保美国的国家安全和经济利益。

为跟上产品和技术发展的步伐，有必要破除那些老旧僵化的规章制度的制约，迅速更新法规、政策和指南以支持新产品、新技术在认证和运营期间的持续适航性。这不仅能够让用户更快体验到航空业绿色变革的现实效益，也大大降低了航空市场参与者在绿色转型中的运营风险和经济压力。GE公司表示将大力支持FAA在绿色航空产业认证和监管上的改革措施，实现航空制造商和航空运营商的利益深度融合互锁，加快下一代航空动力的市场应用进程。此外，绿色航空发展过程中伴随的新型技术人才需求问题应引起重视，GE公司正在发起专项职业准备计划，借助奖学金、学徒制、特色航空课程和其他产学研合作方式，提供充足的资源和合适的平台

以帮助培养更多的技术人才、创造更多的就业机会。

结束语

虽然航空业可持续发展的未来是如此的清晰，不过如何实现这一愿景，不同的市场参与者可能会给出不同的答案。从GE公司下一代航空动力技术发展路线选择来看，一是充分发挥前期开式转子技术储备优势，争取在短时间内形成高水平且特异化的产品竞争力；二是广泛布局，有一定的倾向性而又不完全押注某一条技术路径，注重飞机制造商的需求牵引，降低不可预知的研发和市场风险；三是以SAF为代表，将国家顶层战略与企业发展方向尽可能融合起来，顺应全局发展趋势争取更大的市场机遇；四是以多种形式深化政府和行业间的合作，寻求更多的外部资金支持，推动新技术、新产品从研发到运营的全链条贯通。

航空动力

（王翔宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）

参考文献

- [1] HEGEMAN A. Testimony for hearing on advancing next generation aviation technologies[R/OL]. (2023-03-29)[2023-7-24]. <https://www.commerce.senate.gov/services/files/4C13E160-94BB-44CD-9EE2-76CA76CB95E0>.
- [2] LEVINGSTON C. GE aviation's roadmap for the future of flight[N/OL]. (2022-07-14)[2023-7-24]. <https://blog.geaerospace.com/sustainability/ge-aviations-roadmap-for-the-future-of-flight>.