

NASA可持续航空发展战略分析

Analysis of NASA Sustainable Aviation Strategy

■ 王翔宇 刘英杰 / 中国航空发动机研究院

美国国家航空航天局（NASA）在基于可持续飞行国家伙伴关系（SFNP）计划多维度、模块化布局航空业绿色转型的同时，开始通过2050年环境可持续先进飞机概念（AACES 2050）等计划逐步明确SFNP计划之后下一个阶段的研发重点，完善了其可持续航空发展战略。

为了更好地协同政府机构、工业界和学术界力量，努力实现2050年航空净零排放愿景，NASA于2024年11月通过AACES 2050计划为5个研究项目提供资金支持，这是NASA为2040年以后进一步提高飞行效率、降低环境影响所采取的最新举措。在此之前，2021年NASA启动了SFNP计划，对可在2030年前投入应用的先进飞机和发动机设计技术、高效空中交通管理，以及可持续航空燃料（SAF）推广应用等进行了广泛布局，为AACES 2050计划的实施奠定了基础。整体来看，围绕美国航空气候行动计划中为实现2050年航空净零排放目标所设计的行为框架，NASA正在不断完善其阶段式的可持续航空发展战略，为航空业的绿色转型提供切实可行的解决方案。

SFNP计划

根据美国航空气候行动计划，在2035年和2040年左右分别引入下一代窄体飞机和宽体飞机是实现航空净零排放的里程碑节点。考虑到新的飞机和发动机技术从飞行演示验证到投入市场运营至少需要7年的时间，2022—2026年这5年的研发与



正进行风洞试验的X-66验证机缩比模型

投资显得极为重要。结合前期先进飞行器计划（AAVP）、综合航空系统计划（IASP）、变革性航空概念计划（TACP），以及空域操作和安全计划（AOSP）的相关基础研究和演示验证成果，NASA希望通过SFNP计划使下一代飞机燃油效率提升25%~30%、噪声降低10dB，能够完全兼容SAF并按照最优航迹飞行。围绕这些目标，SFNP计划的工作重点主要包括以下几方面。

跨声速桁架支撑机翼

作为一种独特的飞机机翼设计方案，跨声速桁架支撑机翼（TTBW）可显著减少飞行阻力，有望降低

5%~10%的燃料消耗。TTBW面临的技术难题主要涉及高速抖振边界预测、机翼铰接结构设计、噪声评估、失速特性分析、高升力系统集成和结冰影响分析等，从2009年至今NASA一直在开展TTBW的数值仿真与风洞试验研究，并与波音公司合作通过X-66验证机加快相关飞行测试工作的开展。

可持续飞行验证机

NASA提出的可持续飞行验证机（SFD）是在MD-90原型机基础上引入X-66验证机技术特征而开发的全尺寸飞行验证平台，移除了MD-90飞机现有的机翼和尾吊发动机，机



EPFD项目中GE航空航天公司和MagniX公司的验证机概念图

体长度也将被缩短，用来重点展示TTBW可用性并进一步测试超高效空气动力学设计与先进涡扇发动机的集成效益。相关研究合同已于2023年1月授予波音公司，累计金额达到7.25亿美元，预计在2028年完成首次飞行。

混合热效率核心机

以提高燃气涡轮发动机热效率、减少核心机尺寸并提升动力系统电气化水平为着眼点，NASA希望通过混合热效率核心机（HyTEC）的研发使下一代发动机燃油消耗较2020年同类产品减少5%~10%、在高海拔条件下具备20%的功率提取能力（约为当前最新技术的4倍），且能够完全高效兼容SAF。2021年9月HyTEC第一阶段的研究合同被授出，第二阶段研究工作也于2023年正式启动。

航空电推进系统

NASA重点关注兆瓦级航空电推进（EAP）系统在提升电池系统能量密度和可靠性、减少电损耗和直流电

压传输限制、优化大功率涡轮发电和飞发一体化设计等方面面临的挑战，并推动逐步建立基于EAP系统的商用飞机的适航认证标准，为商业化的电动飞行扫清技术障碍。目前EAP系统架构开发和高功耗组件的测试已基本完成，大功率、高电压EAP系统的集成测试正在进行中。

电动飞行演示验证

电动飞行演示验证（EPFD）项目旨在针对兆瓦级EAP系统开展一系列的地面和飞行试验，加速其从通用飞机到窄体飞机的递进应用，预计到2050年前通过混合电推进系统的市场运营可减少5%的燃料消耗。在EPFD项目支持下，GE航空航天公司计划于2026年对EAP系统改装后的萨伯（SAAB）340B平台进行首次飞行验证，MagniX公司则在2024年6月借助NASA电动飞机试验平台（NEAT）开展了混合电推进系统的首轮高空试验。

复合材料机体快速制造

NASA通过复合材料机体快速

制造（Hi-CAM）项目重新定义生产系统需求，开发了专门的流程来评估先进制造技术对生产效率的影响，涉及的领域有浸渍树脂、热塑性/热固性塑料以及无损检测等，同时还将利用数值仿真工具来指导开发，并帮助比较不同制造方法的改进潜力。NASA计划在2027年完成Hi-CAM项目的大规模演示验证，届时复合材料机体结构的制造速率将提高4~6倍。

先进空中交通管理

NASA将为美国国家空域系统（NAS）开发全新的面向服务的体系架构。通过打造完全共享的航空信息环境，提高航班起降效率的同时NAS将向空管决策者提供持续的、精确的态势感知，在此基础上结合飞行前后的气象条件变化评估，利用机器学习和人工智能算法形成最佳航路方案，从而减少燃料消耗以及尾迹的形成，实现对空域高效友好地利用。

可持续航空燃料

为尽快实现100%SAF的规模化应用，NASA正在通过一系列测试深入评估SAF对燃烧室性能的影响，探究SAF所带来的额外性能或飞行生产率增益，确保SAF与现有以及在研发发动机的兼容性。此外还将在飞行测试中利用激光雷达传感器扫描飞行尾迹，对SAF排放组分进行抽样和表征以充分评估其非二氧化碳减排效果。

高效静音集成推进系统

这里所指的高效静音集成推进系统实际上就是GE航空航天公司近年来力推的开式转子发动机概念。目前NASA正在利用与GE航空航天公司建立的长期合作关系来支持开

式转子验证机的性能测试，重点关注风扇结冰问题并评估基于新型声衬的先进降噪技术的应用收益，同时还和波音公司协同开展开式转子发动机的飞发一体化设计研究，希望通过开式转子技术的应用实现燃料消耗降低5% ~ 10%。

“超越” SFNP 计划

在积极推动SFNP计划落地的同时，从2022年开始NASA也在加大对下一代飞机和发动机技术的布局。通过明确那些在“21世纪20年代完成探索、30年代完成验证、40年代投入应用”的技术如何在航空净零排放愿景的实现乃至延伸发展中发挥作用，NASA开始形成了所谓“超越”SFNP计划的概念框架，而AACES 2050计划的启动则标志着“超越”SFNP计划相关工作迈出了实质性的一步。根据2024年AACES 2050计划第一批合同，NASA将提供1.15亿美元资金帮助工业界和学术界选择并确定有前途的、变革性的飞机和发动机技术以供进一步研究，预计在2026年年中可形成初步的研究结论。目前AACES 2050计划下的研究项目被授予以下5家机构。

极光（Aurora）飞行公司：作为波音公司旗下的初创公司，极光飞行公司将对先进飞机和发动机技术进行全面的开放式探索，包括新型替代航空燃料及其适配的推进系统、高效空气动力学机体布局等。

美国Electra公司：公司于2020年正式成立，在其已发布1年多的小型电动飞行验证机基础上，将探索分布式电推进系统与先进飞机总体布局的集成潜力，从而进一步降低排放和噪声，并全面提升旅客的飞



AACES 2050 计划下 Electra 公司设计方案概念

行体验。

佐治亚理工学院：开展各类替代燃料、新能源航空动力与飞机总体架构研究，重点基于其自研的ATH2ENA氢燃料电池飞行器，结合前期技术探索成果形成可用的未来飞机及其动力系统概念方案。

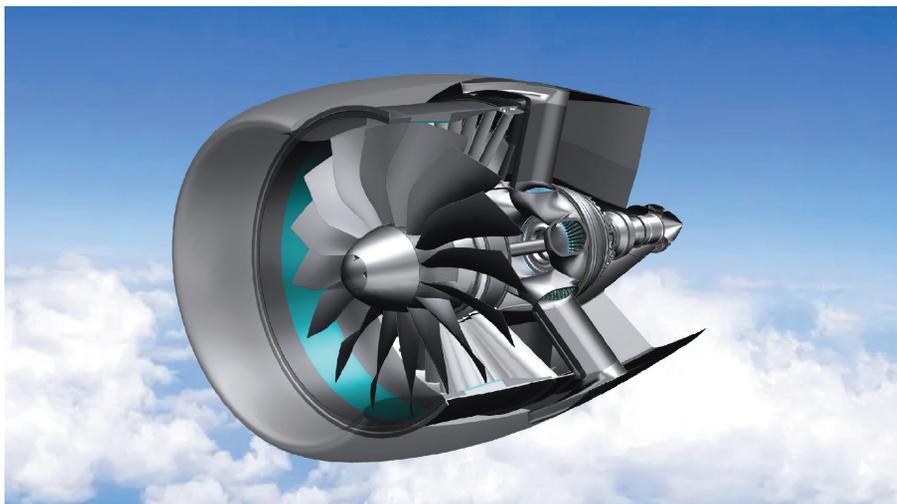
美国JetZero公司：重点探索低温液氢在商用飞机上应用的可能性，相关设计方案将在常规翼吊式飞机和该公司自主研发的翼身融合（有可能为氢燃料箱提供更大的内部空间）飞机上同步进行综合评估和比较。

普惠公司：持续探索提高航空发动机的热效率和推进效率的前沿技术，推动常规燃气涡轮发动机进一步降低燃油消耗及碳排放，并筛选高优先级推进概念进行集成验证。

从某种意义上看，AACES 2050计划的逐渐明晰标志着NASA三步走可持续航空发展战略的初步形成。第一步为“演变”，在现有航空基础设施条件下仍旧以提升常规飞机和发动机技术效率、运营效率为主要出发点，逐渐提升电气化水平并开始在一定程度上使用SAF，相关工



AACES 2050 计划下 JetZero 公司设计方案概念



AACES 2050 计划下普惠公司设计方案概念

作将持续到21世纪30年代；第二步为“革新”，此时常规飞机和发动机总体构型将开始出现改变，SAF成为航空燃料的主体，以混合电推进系统为代表的新能源动力得以应用并催动配套航空基础设施改造，相关工作已基本为当前的SFNP计划所覆盖；第三步为“转型”，重点关注21世纪50年代及以后的航空产业范式转变，此时兆瓦级电推进系统和氢能源动力得以广泛应用，具有颠覆性构型的飞机和发动机产品成为市场主流，航空基础设施随之发生重大变化，这也是需要“超越”SFNP计划进行前瞻布局的主要方向。

需要特别说明的是，AACES 2050计划被NASA纳入了先进航空运输技术（AATT）计划，该计划又与HyTEC、Hi-CAM等一同作为AAVP的一部分用来进一步研究评估全新飞机和发动机的技术概念。而除了AAVP外，NASA目前属于“超越”SFNP计划的研究活动主要以TACP为主，涉及旨在开发先进仿真工具从而提升未来飞行性能预测能力的转型工具和技术（TTT）计划、旨

在评估创新性概念可行性和投资前景的聚合航空解决方案（CAS）计划，以及为大学科研团队提供更多机会从而更好参与NASA变革性技术研发项目的大学创新（UI）计划等。考虑到2050年中长期可持续发展战略中面临的不确定性和技术风险，“超越”SFNP计划仍旧停留在一个较为松散的概念阶段，AAVP和TACP之间的密切结合将是NASA为实现航空业彻底绿色转型的基础，而其中具体的项目设置和资金流向还需综合考量2040年后市场对产品的需求导向、新能源航空动力的应用场景假设、先进飞机和发动机技术的发展预期，以及其全生命周期经济性和环境影响等因素才能进一步明确。

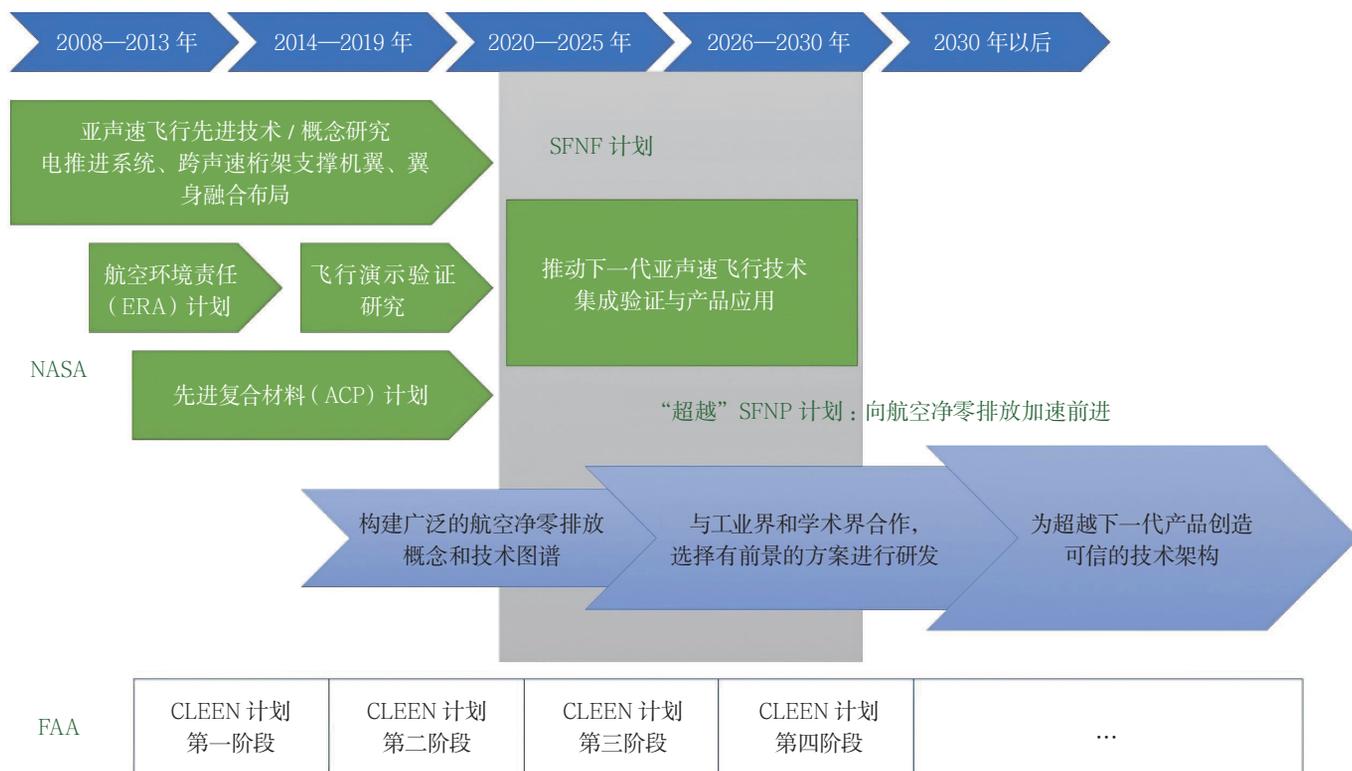
特点分析

作为NASA可持续航空一揽子方案的主体，SFNP计划的最大特点在于分门别类尽可能完全覆盖在下一代飞机和发动机上可行可用的技术，这种模块化的布局既突出了通过多举措组合应用以降低技术不可知风险，也具有较高的柔性，便于根据实时

技术发展情况将新的研究方向纳入进来。事实上，针对提升飞机效率（即TTBW）、发动机效率（即HyTEC）以及电气化水平（即EAP）这3个被SFNP计划最早定量评估的技术领域，其对应降低的燃料消耗均为5%~10%，体现了先进飞机和发动机技术发展的均衡性。而随着GE航空航天公司的开式转子发动机研究不断取得重大进展、展现出丝毫不亚于前3者的碳减排潜力后，NASA也相应地在SFNP计划框架下给予其更大支持。

相比之下，由于可持续航空发展的远期预测更加充满未知，常态化多元布局的同时广泛的适用性价值分析正在被NASA作为设置“超越”SFNP计划方向的关键要素，即相关技术和产品的应用场景有哪些、作为绿色转型的优先示范领域如何选取、能在多长的时间内为民众所接受、市场参与者能从中获取多大的经济利益等。从目前AACES 2050计划透露的有限信息来看，NASA在“超越”SFNP计划中开始尝试从项目制驱动转变为研究机构自主探索的新模式，似乎有意地模糊具体技术细节和减排贡献，围绕若干宽泛的技术领域给予研究机构更大的自主决策权，同时资助对象也在很大程度上从之前SFNP计划下的传统航空制造商向初创公司和大学倾斜，更好释放其在新概念、新能源航空领域的创新活力。

从NASA设置的重点研究方向来看，飞机和发动机自身与SAF相关的兼容性技术开发应在SFNP计划阶段完全达成，2035年后支持100%SAF将成为在役和在研航空装备的必备能力。类似地，在当前航空基础设施条件下，与提升运营能



NASA 可持续航空发展战略整体架构

力相关的技术支持也将在同期实现，这些内容在“超越”SFNP计划阶段很可能不会再涉及。新能源航空动力的发展被放在了最突出的位置，特别是在SFNP计划中涉及很少的氢动力技术已经在AACES 2050计划得到了大力资助。而从普惠公司入围的情况可以看出，NASA对2050年前继续挖掘常规燃气涡轮发动机技术持积极态度，在相当长的一段时期其与新能源动力技术的推广应用并不矛盾。

此外，产品技术研发和试验条件建设同步进行也是NASA在可持续航空发展布局中的一大特征，SFNP计划中的TTBW和SFD、EAP和EPFD之间呈现出了非常明确的关联性。以电推进技术为例，由于其所需验证平台在大功率、高电压电力设施、电磁干扰环境与燃气涡轮发动机存

在较大差异，规划建设面向电推进系统的油电匹配综合性能试验台和整机电气化试验台的重要性不言而喻。当然，无论是产品技术研发还是试验条件建设，NASA除了与工业界和学术界形成创新型合作模式推动飞发集成研发与验证外，还在积极与其他政府机构统筹协调形成阶段性发展预期明确且统一的牵引，事实上SFNP计划即与美国联邦航空局（FAA）主导的持续降低能耗、排放和噪声（CLEEN）计划第四阶段对于2030年目标的设定保持一致，二者在项目布局上也存在一定的交叉和补充。

结束语

自从美国航空气候行动计划发布以来，NASA立足自身业务领域，在瞄准下一代飞机和发动机所需技术、

加速前期SFNP计划研发的同时，逐渐针对中长期航空业持续绿色转型需求形成了“超越”SFNP计划构想和有侧重的研发布局。从其可持续航空发展战略特点来看，一是始终关注应用场景牵引，围绕国家顶层战略形成符合自身基础和特点的绿色航空发展路径；二是强化对“技术不可预测性”的深刻认知，实现多元布局和均衡发展；三是以多步走的思路提前为2035年后的航空新概念新构型做技术准备；四是常规燃气涡轮发动机的技术升级与新能源航空动力的预研探索并重；五是创新合作模式、强化飞发协同，将试验条件建设放在了十分关键的位置。

航空动力

（王翔宇，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）