

NASA为下一代民用飞机及发动机做准备

NASA Preparing for Next Generation of Commercial Aircraft and Aero Engine

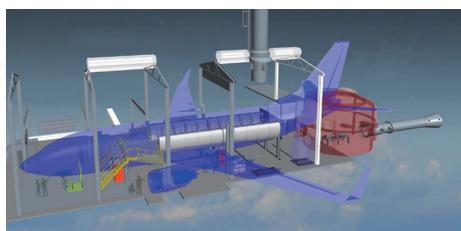
■ 王翔宇 / 中国航发研究院

顺应航空业可持续发展的历史趋势，美国国家航空航天局（NASA）已经将电推进系统、小型化核心机、跨声速桁架支撑机翼以及复合材料快速制造作为下一代民用飞机和发动机的关键技术创新领域。

随着可持续发展成为全球航空产业议程的重中之重，大西洋两岸都在紧锣密鼓地制订计划并进行新一轮的大规模技术演示，为下一代商用飞机和发动机研发铺平道路。几乎就在欧洲推出全新的清洁航空伙伴关系计划的同时，美国国家航空航天局（NASA）将环境（Environment）、效率（Efficiency）、电气化（Electrification）和经济（Economy）锁定为未来民用航空发展的核心要素，在与美国空军和工业界合作的基础上，通过采用一系列颠覆性技术提升飞行效率，这样不但能够降低航空公司运营成本、激发潜在市场需求，还可以切实促进航空产业的深度去碳化发展，为更好地保护地球生态环境贡献力量。



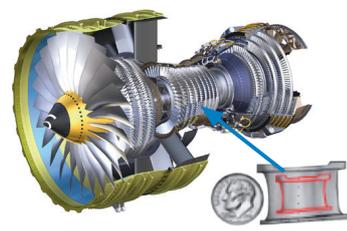
NASA关于航空业可持续发展的基本逻辑构架



电动飞机推进系统



跨声速桁架支撑机翼



高功率密度的小型核心机



复合材料快速制造

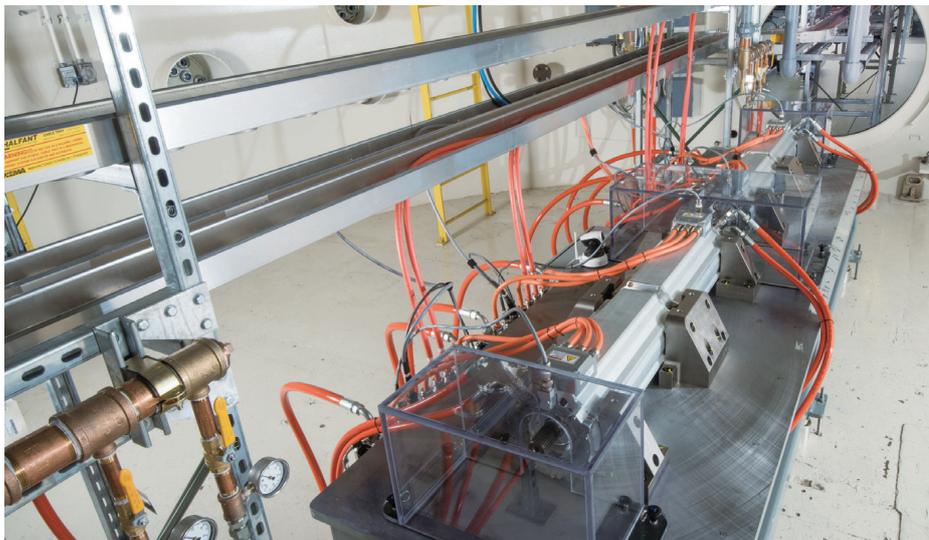
NASA下一代民用飞机关注的技术领域

电推进系统

早在2016年NASA就提出了X-57全电动推进验证飞机计划，当时的《华盛顿邮报》将其称为“朝着空中旅行更高效、更环保新时代迈出了重要的第一步”。在起飞和着陆阶段机翼前缘的12个升力电动机为X-57提供推力，到达巡航高度后则改由两个翼尖的巡航电动机驱动，此时效率将比传统飞机高出500%，且不产生任何排放物，噪声也会小很多。经过了前期的攻关与准备，NASA 2021年4月在位于加利福尼亚州爱德华的阿姆斯特朗飞行研究中心对X-57进行了高电压地面测试，项目团队为

其接通高压电以检查飞机系统，并熟悉了新构型飞机的操作，这一阶段试验的完成也意味着X-57距离首飞更近了一步。当然在通航飞行器范畴以外，即便由于当前技术的限制使大型喷气飞机整机无法做到完全电气化，只要在飞行包线内的某些部分能够通过电力完成，那么就存在着不同的方式设计其动力系统以及飞机总体布局，从而使飞行效率得到进一步的提升。

渐进式的电气化发展之路已成为业界共识，基于并联混合动力构架在发动机轴上安装电动机/发电机，在起飞和爬升阶段需要大推力



NASA的大功率电推进系统测试台

时进行涡轮电力增强，可降低对传统涡扇发动机的设计要求，使之在巡航过程中的燃油效率更高，实现不同飞行阶段推力和效率更好的匹配。正因如此，处于“发现模式”的NASA明显意识到了混合电推进系统对于尽快实现大型商用电气化飞行的重要意义，推进大功率电动机及相关电力电子设备的研发工作已经势在必行。在X-57分布式电动验证机技术积累的基础上，NASA拟启动电气化动力系统飞行验证项目（EPFD），将首先在实验室进行兆瓦级电推进系统地面测试，随后在2023—2024财年和2024—2025财年分别开展两轮飞行测试（飞行平台尚未选定），并于2026年完成整个验证计划，所配装的飞机预计在2030年后服役。

小型化核心机

与电气化推进系统相比，改善燃油效率更直接的方法毫无疑问就是调整发动机空气流经方式以及涡轮前压力和温度，事实上业界从未停止

过进一步挖掘布莱顿循环下传统燃气涡轮发动机的性能潜力。长期以来，配装大型商用飞机的涡扇发动机通过不断提高涵道比、增加流经风扇的空气量变得更加高效，但是从安全的角度出发，核心机和风扇必须被安装在短舱内，而发动机翼吊式布局则对短舱尺寸有严格限制，否则会造成发动机拖地或者起落架过长，一个最鲜明的例子就是波音

737MAX通过种种修形手段才安装上了LEAP-1B发动机，但吊挂过于前置不利于飞行俯仰稳定性才被迫安装了机动特性增强系统，成为了后续重大坠机事故的根源。总之，这意味着在短舱直径基本不变的前提下想要让更多的气流在外涵道流动，解决的办法就只能是让核心机变小。

发动机的推进效率与其构架密切相关，但与齿轮传动风扇或者开式转子这些不同公司所采用的各种具体方案相比，只有核心机上的技术突破才能够最广泛地带动整个行业的进步。显而易见的是，缩小核心机并不像缩小零部件尺寸那样容易实现。为了保证小型核心机依旧具有足够的驱动风扇和压气机的动力，燃烧温度会进一步升高，必须采用耐热性能更高且不易膨胀的先进材料，并确保较小的涡轮叶片和导向叶片能够承受多种应力。核心机内部间隙（如叶片之间以及叶片与机匣之间）也应缩小与核心机尺寸相同的百分比，同样带来了全新



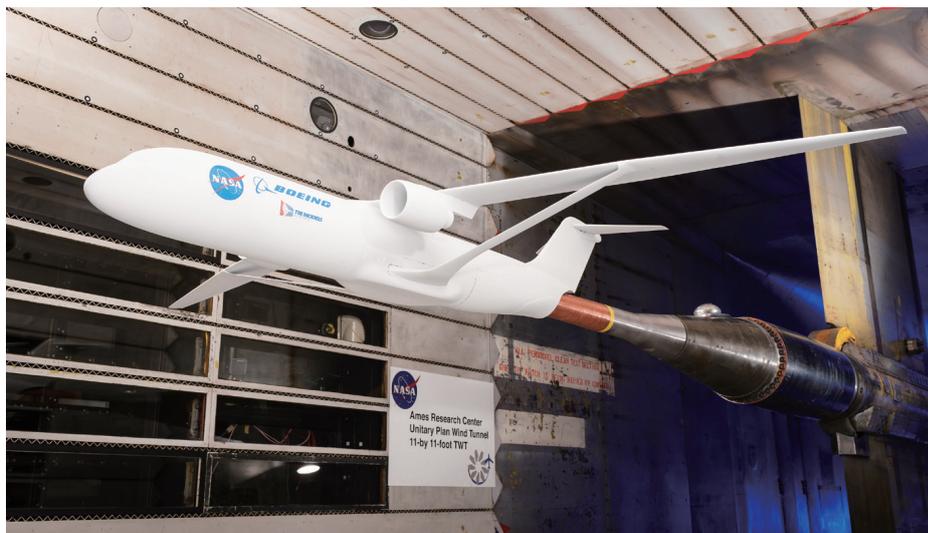
NASA将在美国空军C-17运输机上进行小型核心机飞行测试

的设计挑战。NASA正在与普惠公司和美国空军合作，利用前期稀有金属和陶瓷材料以及发动机内部独特构型相关研究成果，实现对更高的温度和压力进行管理，这也是在更狭窄区域内燃烧反应的自然结果。

2020年2月，NASA首次公布了混合热效率核心机（HyTEC）项目，通过地面验证演示开发小型核心机所需要的关键技术、材料以及压气机和涡轮组件，预期发动机的涵道比将至少提升15%、燃油效率提升5%~10%，同时高空状态下能够从中提取20%的电力，几乎是目前波音787飞机功率提取能力的4倍，有助于用更多的电子部件代替传统的液压系统，更好地满足未来飞机的电气化发展需求。根据NASA的愿景，选用这种核心机的新一代单通道飞机可能会在本世纪30年代初期投入使用。

跨声速桁架支撑机翼

跨声速桁架支撑机翼（TTBW）是早



配装跨声速桁架支撑机翼的飞机模型

期对未来飞行器设计研究形成的布局方案之一，本质上仍旧是经典的桶状机体加机翼结构，只是机翼非常长、非常薄以至于在机体两侧需要额外的桁架进行辅助支撑。当机翼延展到合适的展弦比后可产生与常规的较短、较厚机翼等同的升力，但阻力却小得多，虽然桁架并不直接参与这方面的作用，但其却是机

翼能够真正延展的依托，并使整体结构轻盈灵活（如翼尖可折叠）的同时减轻振动，可最大程度地发挥这种飞机总体设计的优势。

2010年，波音公司开展了桁架支撑机翼有效性的验证工作，测试机翼翼展达到了52m，展弦比接近波音737-800飞机机翼的两倍。根据测试结果分析，在6500km的航程上其燃油效率能够较常规悬臂式机翼高9%左右。NASA自2013年起陆续进行了一系列风洞试验以探索其低速和高速性能，并于2020年10月开始了基于跨声速桁架支撑机翼的超高效率客机构型的飞行演示，确保在几乎不增加整机质量的前提下，桁架结构能够达到足够的结构强度以支撑超高展弦比的机翼。NASA认为跨声速桁架支撑机翼设计技术已经成为目前众多革命性高效飞机设计概念中的领先者，未来10年内即可进入市场应用阶段，而诸如双气泡和翼身融合等其他布局方案可能还会晚5~10年。



波音787飞机采用的电动起落架系统

复合材料快速制造

复合材料可以制造成各种复杂的形状，结构上更加坚固、寿命更长、损坏时更易修复，并且其质量比相同的金属部件要轻得多。虽然在航空航天领域已经有几十年的应用历史，且波音787飞机更是超过50%由复合材料制成，但在很多大型商用飞机及其动力装置的生产制造中仍有机会进一步加大对复合材料的应用。一般认为这其中的制约因素主要有两点：一是从概念到设计、制造和测试，再到局方对材料进行认证的流程冗杂，需要花费大量的时间；二是目前复合材料部件，特别是大型部件制造速度太慢，远不能满足市场对飞机交付的要求。

从公开的信息看，NASA于2019年完成的先进复合材料项目（ACP）已经基本解决了第一个问题，利用具备更好建模功能的设计方法、检查手段以及零部件自动化制造技术，能够大幅节约新型复合材料的适航认证时间。后续NASA将针对复合材料快速制造启动新的计划，重点是在常规认证框架体系下发展一种可

靠可重复的高效制造模式，到2030年后实现复合材料飞机每月100架产能预期，将目前的制造速度提升5~6倍。

发展特点

NASA将电推进系统、小型化核心机、跨声速桁架支撑机翼以及复合材料快速制造，作为下一代商用飞机和发动机的关键技术创新领域，总的来说呈现了以下发展特点。

第一，通过倾听政府机构、工业界、学术界和其他利益相关方对于未来航空的需求，NASA构建了极为广阔的合作伙伴关系网络，更侧重开发对可持续发展有利、对航空市场开拓有利的普适性技术，这使整个行业都能从中获益、形成的技术成果也能更快更有力地推向市场。

第二，NASA目前重点关注的不是超声速客机也不是洲际跨洋飞行的大型宽体飞机，而是能够搭载150~175名乘客以亚声速飞行，可以在2030年左右补充或取代A320和737这样的单通道窄体飞机。显然在以数字化和电气化为典型特征的航

空产业“第三时代”大幕拉开之际尽快抢占需求量最大、经济收益最好的细分市场是当务之急。

第三，NASA选择的技术领域几乎都经历了数年乃至十数年的前期探索，已经具备了较好的基础，距离成熟应用只差最后的“临门一脚”。相比之下，欧洲的航空可持续发展愿景似乎更加宏大、发展路线也更加激进，未来二者到底谁能占得先机，有待进一步观察。

第四，NASA针对每个技术领域都计划开展相应的研发项目，但在后疫情时代航空市场需求下行、研发资金被大幅压缩的背景下，尽可能地兼顾那些与NASA利益重叠的美国工业合作伙伴的诉求变得越来越充满挑战，能否如愿推进其相关计划、是否会对技术领域进行调整都存在着较大的不确定性。

结束语

在过去的10~15年，NASA一直与工业界和其他科研机构合作研究那些可以应用到下一代民用飞机和发动机、能够改变游戏规则的使能技术，并期望在本世纪20年代中期将技术成熟度提高到6级的水平，2030—2035年实现新型单通道窄体飞机投入市场使用。事实上，除了顺应保护地球环境、实现航空产业可持续发展这一历史趋势外，NASA也始终关注着提升飞行效率所附加的经济效益，通过降低航空公司的运营成本激发航空运输市场活力，进一步拉抬对航空制造商的产品需求，实现航空市场的持久繁荣。

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）



NASA正在使用可延展6.5m的机械臂对复合材料进行制造和测试