

支线 / 干线客机混合电推进技术

Regional/Trunk Aircraft with Hybrid Electric Propulsion System

■ 兰海青 / 中国航发动动力所

在未来先进推进系统的各种可能形式中，混合电推进技术改善了原有飞机气动结构、大幅提高等效涵道比、降低耗油率和排放及减少噪声，展现出较为明显的发展潜力，是应对航空业日益严峻的气候变化挑战的重要手段。

近年来，针对混合电推动技术开展了大量研究，主要有涡轮电力推进、串联混合电推进和并联混合电推进等。目前支线/干线客机采用混合电推进的大多尚处于验证和概念设计阶段，包括美国国家航空航天局（NASA）研制的N3-X飞机、带后部边界层推进的单通道涡轮电力飞机（STARC-ABL）、采用协同利用方案的并联电燃气结构（PEGASUS），波音公司研制的Sugar Volt方案，实验系统航宇（ESAero）公司的ECO-150飞机，以及空客公司的E-Fan X验证机、E-Airbus客机等。近年来，新的研究方案更是层出不穷，包括带前缘嵌入式分布的单通道涡轮电力飞机（STARC-LEED）和法国航空航天实验室（ONERA）研制的带发电机的分布式风扇研究飞机（DRAGON概念飞机）。

ECO-150 飞机

项目概况

美国实验系统航宇公司于2008年开始在N+3计划下进行ECO-150飞机研究。ECO-150为150座的干线飞机，如图1所示，最大巡航速度为Ma0.785，计划于2035年投入使用。

该飞机的动力装置为涡轮电



图1 ECO-150飞机

力分布式推进（TeDP）系统，左右机翼中间位置各安装1台功率为11185kW的涡轮发电机，向嵌在分裂式机翼的上半部分和下半部分之间的16个（左右各8个）风扇供电，如图2所示。在该推进系统中，涡轮发动机不产生推力，只带动发动机发电，直接为电动机供电，进而驱动风扇。TeDP系统的关键部件为采用液态氢冷却的超导发电机和超导电动机^[1]，能够显著减轻质量并提高效率。

研制历程及进展

2009年，ESAero公司在NASA授予的小型企业创新研究（SBIR）合同下，开始研制ECO-150-16支线飞机，重点研究低温冷却电子部件提高效率的潜力。

2010年，ESAero公司在SBIR后续合同下，以ECO-150-16飞机作为基准，研究分布式风扇概念。在该研究中，推进器安装在分裂机翼内，

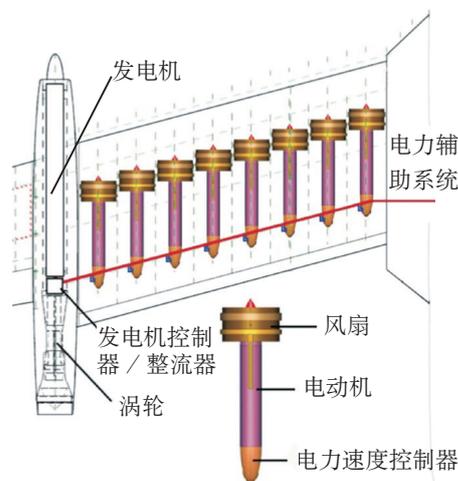


图2 TeDP系统结构

以确定该布局对机翼结构、推进器性能和整个机翼气动性能的影响。研究发现，内侧机翼部分的桁架结构具有固定的刚性，与类似平面形状的传统机翼相比，分裂机翼方案不需要压缩支柱支架，可以使机翼质量减轻22%。

2011年，ESAero公司研究发现，对于特定级别的飞机来说，采用低温冷却降低油耗和机场噪声不是必需的，因此重新设计了ECO-150飞机，采用常规而不是低温冷却的电子部件，旨在确定不依靠低温技术的TeDP结构能否实现N+2飞机目标。该飞机保持了ECO-150-16飞机的分裂式机翼设计，采用涡轮发电机和电池、电动机、电功率管理系统、功率分配电缆和总线、电力控制器和涵道风扇等，但取消了液态氢冷却系统。结果表明，相比ECO-150-16飞机，该飞机燃油节省较少，无法实现N+2飞机的目标。

2016年，ESAero公司研究发现ECO-150飞机（携带液态氢冷却电子部件）的基础设施近期无法实现，因此开始研究配备常规电子部件的ECO-150R飞机，将带有冲压空气热交换器的再循环液体热管理系统集成到设计中，冷却电子部件，以实现N+2飞机目标。研究结果表明，ECO-150R飞机至少能与目前运营的飞机一样高效。

2019年，ESAero公司再次对ECO-150飞机进行改进，重新设计热管理系统，并且增加电池供电，最终研制出ECO-150-300飞机，预计于2030—2040年中期推出。研究发现，ECO-150-300飞机TeDP系统采用协同技术具有显著优势，设计指标上总质量降低5.7%，燃油消耗

降低11%，NO_x排放在着陆/起飞试验中降低12.9%，巡航时降低14%^[2]。

STARC-LEED 概念飞机 项目概况

带前缘嵌入式分布的单通道涡轮电力飞机（STARC-LEED）是NASA于2019年开始研制的，重点研究分布式混合电推进系统飞机的机翼结构设计，以减轻相比常规飞机机翼额外增加的系统质量。

STARC-LEED概念飞机的基准飞机为先进常规单通道结构（N3CC）飞机，与基准飞机不同的是，STARC-LEED概念飞机机翼采用嵌入式推进系统结构，推进系统采用涡轮电力分布式推进系统。STARC-LEED概念飞机有两种结构，分别为STARC-LEED概念I（混合电动分布式推进系统集成至机翼内）和STARC-LEED概念II（电力风扇集成至主机翼和上机翼之间），如图3

所示。STARC-LEED概念I采用16个电力风扇（左右机翼各8个）嵌入机翼内，两个机翼下安装的涡轮发动机驱动发电机，为分布式风扇提供电力。STARC-LEED概念II的电力风扇集成至主机翼和上机翼之间，跨距较短，风扇之间的多个翼型弦向挂架与上机翼和主机翼连接在一起。

研制历程及进展

2019年，NASA采用有限元分析模型，对STARC-LEED概念飞机的两种结构进行研究和分析，以确定相比常规结构，嵌入式方法是否具有结构轻量化优势。STARC-LEED概念I的混合电推进机翼结构与常规机翼相比，具有结构质量减轻的潜力，但是减轻的质量仅能弥补分布式电推进系统的部分额外质量。STARC-LEED概念II能够解决STARC-LEED概念I遇到的一些推进集成的挑战，但是该机翼结构的质

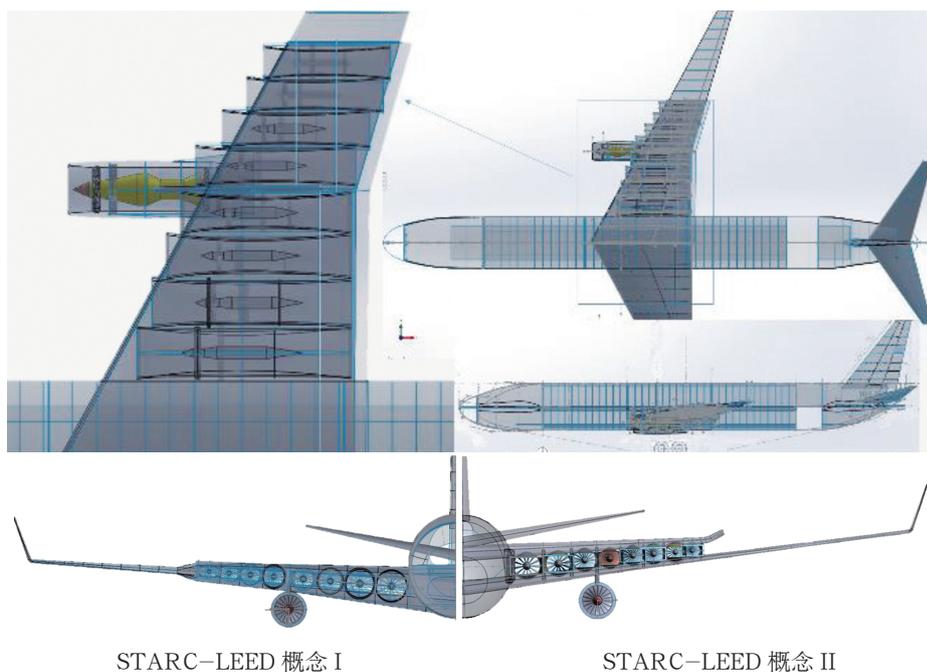


图3 STARC-LEED概念飞机

量实际大于基准常规机翼，无结构轻质优势，因此不能抵消更多的推进系统质量^[3]。

E-Fan X 验证机

项目概况

E-Fan X 验证机是由空客公司、西门子公司和罗罗公司于2017年共同研制的。在该项目中，空客公司负责混合电推进系统的控制架构和电池的集成，以及与飞行控制系统的集成；西门子公司负责提供2MW电动机和电子控制装置，以及逆变器、直流转换器和能量分配系统；罗罗公司负责涡轮发动机、2MW发电机和电子设备，同时致力于对现有发动机短舱和电动机进行风扇适配等。

E-Fan X 是基于1架BAe146/Avro RJ支线客机改装而成，如图4所示。该机原来配装的是4台霍尼韦尔公司的LF507涡扇发动机。E-Fan X 验证机将BAe146/Avro RJ客机配装的1台涡扇发动机替换为电动机以驱动风扇，电动机由3000V交流电系统驱动，采用的是碳化硅单元体和永磁材料，风扇则来自于1台罗罗公司的AE3007涡扇发动机。

研制历程及进展

2019年，罗罗公司提供2.5MW



图5 DRAGON概念飞机及推进系统

发电机和电子设备，改装在1台AE2100涡桨发动机上，安嵌入E-Fan X飞机验证机进行飞行试验。2019年6月，罗罗公司收购了西门子公司的电气化部门，E-Fan X验证机改由罗罗公司和空客公司合作开展。

2020年3月，E-Fan X验证机进行气动设计试验，以明确对基准飞机所作的更改将如何影响整体气动性能和飞行品质。在试验期间，E-Fan X验证机的1:8缩比模型安装在费尔顿低速风洞上，附在试验模型上的丝线使工程师能够分析各个迎角下的空气流动。该风洞试验非常成功，标志着E-Fan X验证机达到又一个关键里程碑^[4]。因为认识到

当时对所有要素进行集成，并进行试验飞行并不是最关键的，2020年4月24日，空客公司和罗罗公司宣布停止E-Fan X验证机项目。尽管项目已经终止，但是罗罗公司后续仍会继续开展E-Fan X发电系统的地面试验，将在挪威特隆赫姆进行试验的发电机与在德比研制的动力控制系统和在印第安那波利斯研制的动力控制和热管理系统进行集成，以验证该技术并获得研制经验。

DRAGON 概念飞机

项目概况

法国航空航天实验室（ONERA）在欧洲“清洁天空”2计划下，于2018年提出带发电机的分布式风扇研究飞机（DRAGON概念飞机），如图5所示，以加快分布式电推进技术的成熟。其对标机型为空客A320飞机或波音737飞机，巡航速度为Ma0.78、设计航程约为5093km、有效载荷为13t，预计于2035年投入使用。DRAGON概念飞机机身后部两侧各安装1台涡轮发动机以驱动发电机，为沿机翼翼展分布的40个涵道风扇（分为4组，每组10个）提供电力。相比对标的涡扇发动机，



图4 E-Fan X验证机

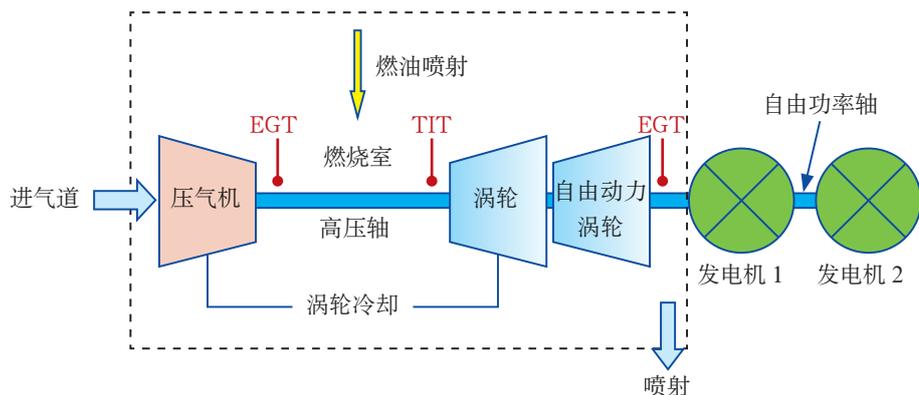


图6 DRAGON概念飞机分布式混合电推进系统

GRAGON飞机结构显示出优势，燃油消耗降低7%。

DRAGON概念飞机采用分布式混合电推进系统，涡轮发动机有两个轴，额外引入自由动力涡轮，与压气机独立工作，以完全获得可用的额外功率。在该推进系统中，两台涡轮发动机与嵌入式安装的4台发电机连接，每台发电机与2个推进总线相连提供电力，无电能存储装置。该结构采用并联的方式，1台发动机可以为所有风扇提供电力，这种布局不仅考虑了故障模式，而且更重要的是，电力系统的冗余选择能够优化功率和质量。

研制历程及进展

2019年，ONERA确定了DRAGON概念飞机的最终结构，并对DRAGON概念飞机进行了多学科研究，评估飞机性能。其中包括采用有限元模型对机身部件进行质量评估，验证了质量沿翼展分布的优势，但是相比传统结构，因为机翼上分布的部件沿翼弦产生了扭矩，机翼整体质量会增加；在研究该结构的气动弹性性能时发现，在低速和高速状态下存在颤振行为，将通过增加机翼的弯曲刚度来消除，除此之外没有发现任何严重的气动弹性问题^[5]。

2020年，考虑到分布式推进能够提高整个推进系统的效率，但是集成至大型客机上还存在挑战，ONERA为此开展了研究以发现问题，并制订解决方案。从气动视角分析，通过仿真计算验证了机翼的形状具备良好的整体流动特性，需要改进的区域很小；通过机翼结构分析，发现将涵道风扇和相关电机改为传统悬挂安装，通过电动机和逆变器对翼展增加载荷可以使布局更有效；更为重要的是，如果改进机翼结构强度足够限制翼尖偏转，结构尺寸则会进一步减小；改进机翼结构的气动弹性分析显示DRAGON概念飞机无颤振风险；当翼尖附近没有涵道风扇时，总体气动弹性阻尼较高^[6]。

结束语

支/干线客机向混合电推进方向发展已经成为未来的发展趋势，但仍面临许多已知或未知因素的限制。在目前的研制进展中，各研究机构正面临着电池密度低、发电机和电动机功率小、电机需要的低温超导环境、电力系统的质量增加、电机安装位置的选择和热管理等诸多技术难题有待解决。因此，距离混合电推进的商业应用还有较长的路要走，需要

在技术、市场和社会环境等领域进行更多的发展和探索。

航空动力

（兰海青，中国航发动动力所，工程师，从事航空发动机文献研究）

参考文献

- [1] Schiltgen B, Gibson A, Green M. More electric aircraft: “tube and wing” hybrid electric distributed propulsion with superconducting and conventional electric[C]// SAE International Machines, 2013.
- [2] Freeman J, Schiltgen B. ECO-150-300 design and performance: a tube-and-wing distributed electric propulsion airliner[C]// AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.
- [3] Mukhopadhyay V, Ozoroski T, McMillin M. Structural configuration analysis of advanced flight vehicle concepts with distributed hybrid-electric propulsion[C]// 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018.
- [4] Airbus. The E-Fan X puts its aerodynamic design to the test[EB/OL]. (2020-3-16)[2021-12-4]. <http://www.airbus.com/newsrooms/stories/The-e-fan-X-puts-its-aerodynamic-design-to-the-test.html>.
- [5] Schmollgruber P, Doll C, Hermetz J. Multidisciplinary exploration of DRAGON: an ONERA hybrid electric distributed propulsion concept[C]// AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.
- [6] Schmollgruber P, Donjat D, Ridet M. Multidisciplinary design and performance of the ONERA hybrid electric distributed propulsion concept (DRAGON)[C]// AIAA Scitech 2020 Forum, 2020.