

电气化推进系统研制新进展

Progress of the Electrified Propulsion

■ 陈玉洁 / 中国航发涡轮院

电推进技术可实现飞行器气动和推进效率的大幅提升，并且能够降低油耗、噪声和碳排放，满足未来绿色航空发展的需求，是未来航空推进技术的发展方向。近几年，电气化推进系统的研发可谓如火如荼，成为民用航空科技发展的热点之一。

目前，电推进轻型飞机已经投入生产，空中出租车原型机正在试飞，业界正在考虑如何将电推进系统的优势引入民用航空运输市场，其中大部分研究聚焦于研发适用于较大型飞机（单通道客机）的电推进技术。

当前，由于电池能量密度以及发电机和电子仪器功率密度的原因，电推进系统的应用局限在轻量级、短程2座和4座飞机及新兴的电动垂直起降（eVTOL）飞行器上。

民航客机是航空运输碳排放的主要来源，大型客机航程可达数千千米，采用电气化推进系统会更具挑战性。尽管如此，目前欧洲和美国都已经开展了政府投资的电推进技术研究项目。

欧洲的研制进展 Imothep计划

2020年1月，33家欧洲航空研究机构及工业合作伙伴发起了混合电推进技术研究及成熟（Imothep）计划，评估其在民用航空减排方面的潜力并制定混合电推进技术路线图。

欧盟在地平线2020（Horizon2020）研究计划下，向Imothep计划投资了



美国莱特电气（Wright Electric）公司正与英国易捷（EasyJet）航空公司合作研制180座涡轮电推进短途客机（来源：莱特电气公司）

1040万欧元，用于深度研究混合电推进技术、先进飞机结构以及能够提升飞发一体化水平的新型推进系统架构。

Imothep计划由法国航空航天研究院（ONERA）牵头，集合了欧洲飞机制造商空客公司和莱奥纳多公司，发动机巨头赛峰集团、GE航空集团、MTU公司、ITP公司和吉凯恩（GKN）集团，以及欧洲航空航天研究组织——意大利航空航天研究中心（CIRA）、德国航空航天中心（DLR）、奥地利国家技术研究院（AIT），波兰航空研究院

（ILOT）、罗马尼亚国家航空航天研究所（INCAS）和荷兰航空航天中心（NLR），法国、德国、意大利、瑞典和英国的大学，以及德国航空界智库——包豪斯研究院（Bauhaus Luftfahrt）和跨政府空中运输组织——欧洲航行安全组织（Eurocontrol）。此外，Imothep计划还与俄罗斯的五家研究机构，包括中央航空发动机研究院（CIAM）、军民航空系统研究科学中心（GosNIAS）、莫斯科航空学院（MAI）、国家研究委员会（NRC）和中央空气流体动力学研究院（TsAGI）等，开展了国际合作。



“海岛人”混合电动飞机

Fresson项目

2019年11月，英国政府通过航空航天技术研究院（ATI）为Fresson项目拨款900万英镑。

Fresson项目由克兰菲尔德航空航天解决方案（Cranfield Aerospace Solutions）公司牵头，采用混合电推进系统对9座的布里顿-诺曼“海岛人”（Britten-Norman Islander）进行改进，用于短途和跨岛运输，项目成本1800万英镑。Fresson项目为期30个月，项目团队由提供电力管理系统的罗罗公司、供应电动机的丹尼斯·费兰蒂（Denis Ferranti）集团、提供电池组的华威大学（WMG）、进行电池测试和定性的德尔塔汽车运动（Delta Motorsport）公司、飞机原始设备制造商（OEM）布里顿-诺曼公司和研究关键技术的克兰菲尔德大学组成。

首个原型机以现货部件为基础，预计将于2021年试飞，生产型预计将于2023年试飞。配装上电池，改装后的“海岛人”（Islander）飞机航时可达60min，外加30min的能

量储备，比配装双发活塞式发动机的飞行时间更长。在Fresson原型机验证机项目结束后，克兰菲尔德航空方案公司将通过欧洲航空安全局（EASA）认证，计划在下一阶段设计并制造一款全新的19座客机。

其他项目

在巴伐利亚政府的支持下，德

国航空航天中心计划把多尼尔228改为电动飞行验证机，预计于2020年进行首次全电动飞行，2021年进行首次混合电动飞行。柏林和巴伐利亚政府计划赞助另一个电推进系统项目，采用专门研制的技术验证机APUS i-6。同时，法国政府正在支持一项由空客公司、达海尔（Daher）集团和赛峰集团开展的项目，把TBM900改为分布式混合电推进系统。

美国的研制进展 ARPA-E

美国能源部预先研究计划局（ARPA-E）宣布启动两个研究计划，为全电的150~200座窄体客机研发推进系统。其总目标是把液态燃料的化学能高效地转化为电能输入发动机，实现波音737一级飞机零碳排放。工作的重点是轻量、超高效电动机、驱动电子元件和热管理系统以及将碳中和液态燃料转化为推进



德国航空航天中心和包豪斯研究院在“喷气流”31基础上研究了一款全电动19座飞机
(来源：德国航空航天中心)

用电力系统。

这两个计划分别是：一体化驱动的航空级协同式冷却电动机（ASCEND）计划，投资3500万美元；低碳高效电气化航空航程扩大（REEACH）计划，投资2000万美元。预计这两个计划将于2020年11月启动，为期4年。

ASCEND计划旨在研发创新的轻量级和超高效电动机、驱动器及相关热管理系统(统称为“全电力动力系统”)，使单通道、150~200座民用飞机(如波音737)实现净零碳排放。该计划为完全集成的全电力动力系统设定了一个基准：功力密度超过12 kW/kg，效率超过93%。研究计划分为两个阶段。第一阶段为期18个月，完成电动机、驱动及其集成的概念设计和计算机仿真模拟，以及关键使能技术的子系统/部件级验证。若第一阶段取得成功，且无财政制约，则顺利进入第二阶段。第二阶段对包括热管理系统在内的集成的缩比全电力系统进行研究、制造和试验。

REEACH计划的目标是开发一个系统，把碳中和液体燃料(CNLF)中包含的化学能通过电动系统和其他关键系统转换成飞机推进系统所需的电力。这种新型、经济的高性能储能发电系统(ESPG)必须提供足够的电力来推动全电动窄体客机通过各飞行阶段(即起飞、爬升、巡航和降落)，在长期飞行中储存足够的能量为整个飞机提供动力。REEACH计划将开发关键的使能部件和子系统，高效地把CNLF转换为具有足够功率密度的电力，用于飞机推进。

REEACH计划的重点是动力传

动系统、能量存储和发电。计划采用一个防错的千伏特分布系统把发电系统的电传输至驱动风扇或螺旋桨的电动机，但是ARPA-E的计划中不包括电缆及推进器。

ASCEND和REEACH计划是美国国家航空航天局(NASA)目前正在进行的民用飞机电气化推进系统研究的补充。

ARPA-E还赞助了混合燃气-电推进(HGEP)项目。在该项目下，波音公司、GE航空集团、NASA格林研究中心以及两所大学研制并试验了兆瓦级电动机和功率转换器。2019财年，ARPA-E在位于俄亥俄州的NASA电气化飞机试验台(NEAT)上对兆瓦级动力传输系统进行了初始地面试验。试验采用了民用非飞行质量部件，聚焦于通信和控制。

ARPA-E计划于2021年完成关键设计评审，验证从一涡扇发动机高低压转子提取大功率的可行性。当前发动机仅从低压轴提取功率，但是未来电动飞机将需要更大发电容

量。2016年，GE航空集团曾在F110战斗机发动机上验证了双转子功率提取的可行性，分别从高压轴提取了250kW、从低压轴提取了750kW的功率。

从涡扇发动机上提取大功率会影响其操作性。但是，把兆瓦级电动机/发电机与燃气涡轮轴集成到一起进而实现电功率提取，或者输入存储的能量，能够使发动机在极限附近工作。这样可以减小设计裕度，提高效率，并有可能实现采用耗油率更低、更小型的涡扇发动机。这种方法使所需电池质量最小化，是研制单通道客机混合电推进系统的第一步。

NASA

NASA发展电气化推进系统的思路是先提升当前在研技术的成熟度，然后以涡桨发动机为基础进行电推进验证机的地面和飞行试验，再过渡到以涡扇发动机为基础的电推进验证机试验，最后在多技术X-plane验证平台上验证，最终实现单通道飞机的电气化。



X-57 验证机概念图



Ampaire公司已经把2架赛斯纳337“空中霸主”改装成混合电推进系统试车台

2020年3月，NASA公布了第一架全电动推进验证机X-57麦克斯韦(Maxwell)的一些新概念图。

X-57麦克斯韦是X-plane系列飞机开发计划中首款采用全电动系统的飞机，是由4座常规轻型飞机泰克南(Tecnam) P2006T改型而来，其两台罗塔克斯(Rotax) 912S3四缸活塞式发动机被替换成12台电动机。该飞机效率比传统飞机提升了500%，同时零污染排放并且没有噪声污染。

X-57麦克斯韦飞机的机翼纤巧，可通过减少飞行阻力来提高效率，并由可充电锂离子电池来提供动力。飞机还装有电动巡航发动机，翼梢装有直径为1.5m的螺旋桨，目的是从翼梢涡流中回收能量。在机翼上有12台高升力电动机和螺旋桨，这些电动机仅在起飞和降落时使用，而在巡航模式中停用，螺旋桨叶片会向后折叠以此来减少阻力，使用时会依靠离心力旋转出来。

NASA计划将于2021财年启动电气化动力系统飞行验证项目(EPFD)，该项目基于目前进行的部件技术工作，利用此前已经列入计划的推进系统验证机，实现多技术亚声速

X-plane目标。该项目将验证1MW功率范围内的电气化推进系统技术，所装备飞机预计于2030—2035年服役。NASA相信，电气化推进系统将推动未来民用飞机实现低能耗和低维修成本。

按照项目计划和风险降低要求，NASA授出了5份电气化飞机推进系统(EAP)初始合同。其中3份授予了包括波音、GE和普惠在内的制造商，合同有效期截止于2020年6月。另外两份EAP合同于2019年9月授予了Ampaire和莱特电气这两家初创公司，合同于2020年9月到期。合

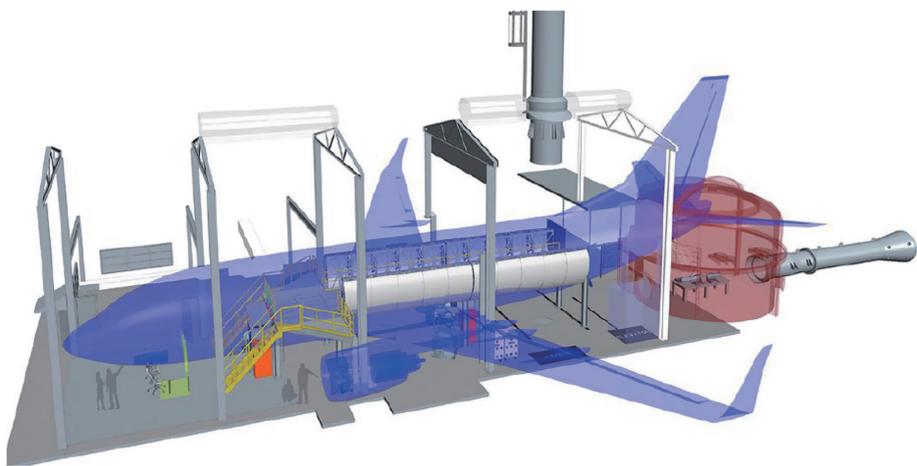
同包含12项任务，包括在EPFD下制订飞行试验台计划。

Ampaire公司目前正在赛斯纳337“空中霸主”飞机上测试混合电推进系统验证机。在NASA授予的EAP合同下，Ampaire正与Ikhana飞机服务公司合作研究把加拿大庞巴迪公司的19座DHC-6“双水獭”改成混合电推进系统。

莱特电气公司则在进行DHC-6“双水獭”的混合电推进系统地面试验，目标是私人航空市场。该公司已经启动研发1.5MW、3000V动力系统，希望能配装186座短程电动飞机在2030年左右服役。

波音公司及其合作伙伴一起在城市空中交通项目下研究小尺寸电推进系统。GE航空集团已经测试了1MW电动机，并验证了从F110发动机的双转子提取1MW功率。

GE航空集团还与NASA签订了价值1200万美元的合作合同，在此合作框架下利用碳化硅动力电子器件研发可用于飞行的1MW DC-AC变流器。该变流器的飞行试验将在NASA位于俄亥俄州梅溪站的电动飞机试验设备模拟的9144m高空条件



GE航空集团的1MW变流器试验将在NASA电动飞机试验台模拟高度条件下进行

下进行。

普惠公司对其承担的NASA项目进度保密，很有可能他们正在根据多电飞机优化需求研究兆瓦级电动机/发电机与第二代齿轮传动涡扇发动机的集成。柯林斯宇航公司和普惠加拿大公司正在基于加拿大庞巴迪公司“冲”8涡桨飞机设计并联式混合电推进系统验证机，该混合电推进系统名为“804项目”，拟采用1台普惠加拿大公司研发的1MW内燃机和柯林斯宇航公司研发的由电池供电的1MW电动机替换飞机中1台常规涡桨发动机，希望能在2022年飞机飞行时节省30%的燃料。

如果2021财年预算得到国会批准，NASA打算于2020年10月启动5年EPFD计划。在该计划下，NASA将要求之前得到5份EAP合同的公司提交各自试验台的详细提案。

基础设施建设

随着飞机向电气化结构转变，需要更广泛的试验能力推进技术的成熟和验证。传统来说，涡扇发动机在风洞中进行试验，发动机部件（如压气机和涡轮）在大功率电动机驱动的台架上进行试验。对于电动飞机，传动系统的功率流动是反向的，以便涡轮驱动发电机，电动机驱动涵道风扇。所以，技术发展需要一个新的试验台，以支持飞行质量、高功率发动机在飞行条件下测试。

NASA已经开发了3种具有试验能力的试验台：混合电集成系统试验台（HEIST）、推进电网模拟器（PEGS）以及1MW低温试验设备，用于单通道混合燃气电力推进飞机部件和系统研究。这3种试验台的飞行动力/空气动力集成技术和动态电网管理成熟

NASA电动飞机试验台

试验能力	PEGS	1MW CRC	NEAT	HEIST
最大功率等级	3kW	1MW	24MW	200kW
试验部件	缩尺电网	低温电动机和驱动	具有飞行质量的动力系统	机翼集成、飞行控制
技术成熟度（TRL）等级	3	4	6	7
飞机尺寸	N/A	N/A	150座	2座
低温	否	1.9ml液氢	11.4ml液氢、液氮、液化天然气	否
冷却器	否	否	是	否
加热、通风和空调（HVAC）	否	否	是	否
气动载荷	否	否	否	是
热	否	是	是	是
控制	否	否	是	是
大气压力	否	否	否	否
起飞、降落在巡航	是	N/A	是	是

度较高，但超导元件试验的技术成熟度较低。

近年来，NASA开发了NEAT，在电气化飞机系统环境中进行全尺寸单通道飞机环境和低温动力系统的研究与开发。在与NASA阿姆斯特朗飞行研究中心的全尺寸气动飞行试验集成之前，先在NEAT进行电气化飞机动力系统的全尺寸地面试验。

NEAT填补了大功率、大尺寸、具有飞行质量的动力系统部件和系统研发试验台的空白。NASA修建的这4种设施涵盖了从缩比部件研制到全尺寸单通道混合燃气-电力飞行验证机，使整个电气化飞机系统的技术成熟度得到稳步提升。

NEAT是首个这类电推进系统的试验设施，其他机构也在开发电动飞机所需的研制、试验、取证的基础设施。在欧盟赞助的绿色飞行路径（Green Flyway）项目下，挪威和瑞典正在开发一个试验区，为电动飞机以及中小型无人机试验提供

环境。试验区领空位于瑞典的厄斯特松德机场和挪威的勒罗斯机场之间，航线为点对点。瑞典机场运营商Swedavia把厄斯特松德机场打造为一个试验基地，配置了电动飞机所需的充电基础设施和供电系统。

结束语

尽管面临许多技术挑战，但是电气化推进系统因为能减少碳排放而持续受到高度关注，已成为当前航空推进领域的研究热点和重点。当前，欧美各国均开展了电推进系统研制工作，部分已从方案设计进入试验验证阶段，预计2030年前将有大量电推进飞机投入使用。分析发现，由政府主导集中优势攻关和提供大量资金支持，是电推进技术快速发展的关键；除了方案设计与关键技术研究，条件保障建设也应同步开展。

航空动力

（陈玉洁，中国航发涡轮院，工程师，主要从事情报研究和科技英语翻译工作）