

2024年航空电推进系统进展

Progress of Aviation Electric Propulsion System in 2024

■ 罗彧 / 中国航空发动机研究院

2024年，航空业对电推进技术的关注和投入持续增加，适用于各类飞行器的电推进系统都在同步发展中，难度最大的是适用于单通道干线客机的混合电推进系统，目前正在持续引发各国航空企业和研究机构的竞争。

电推进是达成世界航空运输“双碳”目标的重要动力解决方案之一。2024年，航空电推进技术保持着高速发展，美国和欧洲等国家和地区依然全面关注电推进技术的进展情况，持续推进已经开启的研究计划和项目，加大电推进系统条件建设的投入。航空动力制造商在保持既有电推进产品发展的同时不断推出新产品，为各类飞行平台的电气化应用奠定基础。



GE 航空航天公司在 Passport 发动机中嵌入电动发电机

美国：面向未来，厚积薄发

2024年，美国研究机构继续推动电气化动力系统飞行验证（EPFD）、混合热效率核心机（HyTEC）和综合驱动航空协同冷却电机（ASCEND）等项目，为发展适用于单通道干线客机的混合电推进系统铺平道路；GE 航空航天公司、雷神技术公司和莱特电气公司等航空动力制造商持续推动航空电推进技术和产品的开发，通过推陈出新促进技术和产品的发展成熟。

GE 航空航天公司推动混合电推进系统的开发

2024年6月，GE 航空航天公司宣布与美国国家航空航天局（NASA）合作，共同开发用于下一代单通道

干线客机的混合电推进系统，双方将基于NASA的EPFD项目持续合作。与此同时，GE 航空航天公司还与NASA合作开发了混合电推进技术验证机，该验证机将在大涵道比商用涡扇发动机中嵌入电动发电机，可以在不同的运行阶段补偿动力。GE 航空航天公司通过HyTEC项目对“通行证”（Passport）发动机进行改装，创建了一个可使用或不使用电池等储能装置的系统优化发动机性能，有助于在储能解决方案完全成熟前，加快在商用航空领域引入混合电推进技术，这是GE 航空航天公司为加速多电发动机技术成熟而进行的项目之一，并将用于CFM国际公司针对

下一代单通道干线客机动力进行的可持续发动机革命性验证（RISE）项目。

2024年11月，GE 航空航天公司在美国陆军研究实验室（ARL）应用研究合作涡轴电气化项目（ARC-STEP）资助下，成功测试了新型混合电推进系统，该系统采用了现有的CT7涡轴发动机和兆瓦级发电机，旨在提升系统效率、减轻质量，并探索其在不同平台的应用潜力。

此外，GE 航空航天公司还与西科斯基公司合作开发了600kW混合电推进系统试验台，用于西科斯基公司最大起飞质量为4082kg的倾转旋翼混合电推进验证机（HEX）的试验评估。

雷神技术公司的混合电推进技术 开发取得重要进展

2024年1月，雷神技术公司旗下普惠加拿大公司开发出了一种先进的移动充电装置（MCU），这是雷神技术公司混合电推进技术验证机项目的一部分。该充电装置充电功率为280kW，电压为1500V，与业界正在推进的高压兆瓦级充电系统标准兼容；具有双向功能，既能为电池充电，也能为电池放电，可将未使用的电力回收到电网。普惠加拿大公司在持续推进雷神技术公司混合电推进技术验证机的试验工作，其目标是与当今最先进的涡桨发动机相比燃油效率提高30%。

2024年7月，雷神技术公司正在研发的混合电推进技术验证机取得重要进展，实现了燃气涡轮发动机、发电机、电池系统和推进装置集成后的持续运行，并通过高压电网实现了这些组件间的能量转移。该验证机也被称作可扩展涡轮电力传动系统技术（STEP-Tech）验证机，功率范围在100 ~ 500kW，还可进一步提高至1MW以上。该混合电推进技术可以应用于下一代飞行平台，包括先进空中交通（AAM）飞行器、高速电动垂直起降（eVTOL）飞行器和飞翼布局飞机等。

2024年10月，雷神技术公司旗下柯林斯宇航公司为欧盟清洁航空（Clean Aviation）计划支持的包含混合电推进的可持续喷水涡扇（SWITCH）项目完成了配电组件和固态电源控制器原型产品开发。其中，配电组件能处理更高的电力负荷，因此在巡航飞行时能安全管理整个SWITCH混合电推进架构的高压电，是SWITCH项目第一阶段末

期地面测试验证机所需的关键组件，在柯林斯宇航公司位于德国诺德林根的工厂完成设计和生产后，该组件将运往美国伊利诺伊州罗克福德市的电网（The Grid）实验室进行系统集成测试。固态电源控制器则是雷神技术公司技术研究中心、柯林斯宇航公司和普惠公司合作开展研究的一部分，依托于NASA的先进飞行器项目。

莱特电气公司逐步开展2.5MW 电动机的地面试验

2024年4月，莱特电气公司开始对其为100座飞机开发的电推进系统进行地面测试。第一阶段将在新建的莱特电气飞机发动机试验台（WEAETC）评估2MW的莱特-1A电动机，该电动机将与莱康明LF507-F涡扇发动机和C-130军用飞机的螺旋桨一起进行测试；第二阶段将在美国能源部预先研究计划局（ARPA-E）针对未来干线客机混合电推进系统的ASCEND项目下研制并测试2.5MW的WM2500电动机，该电动机具有集成的定制驱动系统。莱特电

气公司使用WEAETC开展的地面测试旨在评估莱特-1A和WM2500电动机的电力输出以及将扭矩转换为推力的能力，试验将至少持续1年时间。

VerdeGo Aero公司发布400kW 混合电推进系统

2024年7月，美国VerdeGo Aero公司在范堡罗航展上展出VH-4T混合电推进系统，这是公司继2022年推出185kW的VH-3混合电推进系统之后的最新产品。VH-4T混合电推进系统的额定功率为415kW，功率水平适合大部分电动飞机市场，应用范围包括混合电推进eVTOL飞行器、长航程货运无人机，以及采用分布式电推进的高效固定翼飞机等。

NASA与MagniX公司联合开发 电动飞行试验台

2024年8月，NASA和MagniX公司宣布计划将德·哈维兰加拿大公司“冲锋”（Dash）7飞机改装成电动飞行试验台，标志着NASA的EPFD项目迈出了重要一步。此前，MagniX公司已经完成了改装项目的初步设计审查，1台Magni650电推进装置在



MagniX公司电动飞行试验台



E9X全电推进飞机



欧盟CICLOP项目的DEP模型

NASA的电动飞机试验平台（NEAT）完成了初始阶段测试，“冲锋”7飞机也完成了基线飞行测试，为改装提供了重要的性能数据。下一阶段将用 MagniX 公司的电推进装置替换“冲锋”7飞机4台涡桨发动机中的1台，并计划于2026年进行飞行测试，随后将替换第二台涡桨发动机，这种配置预计可减少40%的燃油消耗。

欧洲：推陈出新，百家争鸣

2024年，欧洲的航空电推进领域百花齐放，新产品层出不穷，技术和产品应用覆盖干线客机、支线客机和通用飞机；同时，还在持续推动电推进系统与电推进飞机的协同发展，对电推进飞机常用的分布式推进构型，持续发起项目以研究电推进装置与飞机机翼之间的耦合，优化飞发一体化设计。值得一提的是，罗罗公司决定关闭电推进业务，专注开展燃气涡轮发动机业务。

Elysian 公司开发全电推进飞机 E9X

2024年1月，荷兰初创飞机公司 Elysian 宣布已在开发一种90座的全电推进飞机 E9X，该飞机采用下单翼布局，宽度为3m，翼展为42m，与波音777X飞机一样翼尖可折叠；最

大起飞质量约为76t，其中电池及包装质量为35t，占总质量的46%。其推进装置为8个直径为3.7m的电动螺旋桨，由电池驱动。此外，在机身后部安装了涡轮发电机，特殊情况下可提供45min的备用动力。

欧盟清洁航空计划继续研究分布式推进构型

2024年1月，继机翼和紧密耦合螺旋桨之间相互作用特性研究（CICLOP）项目成功结束后，德国布伦瑞克工业大学（TUBS）在清洁航空计划下启动了高升力分布式推进构型螺旋桨间相互作用研究（InPAH）项目，在CICLOP项目得出的风洞模型基础上进行修改，进一步详细研究分布式电推进（DEP）构型。DEP构型可以降低阻力、减小机翼尺寸，减轻飞机质量，减少燃油消耗和污染排放。CICLOP项目是欧盟清洁天空2（Clean Sky 2）计划的一部分，由德国布伦瑞克工业大学牵头与意大利航空航天研究中心（CIRA）合作开展，项目周期为2020年12月—2023年3月，欧盟资助预算为84.8万欧元，研究了在机翼特定位置安装3个小型电动螺旋桨的推进构型，测试了一种多功能DEP模型，量化了DEP螺旋桨和机翼尺寸之间的最佳耦合参数。

Greenjets 公司研发集成电动涵道风扇

2024年4月，在英国政府支持的电动飞机集成飞行控制、能量储存和推进（InCEPTion）项目下，英国初创公司 Greenjets 完成了新型电推进系统验证机关键部件 IPM500 的开发。IPM500 是一种直径为1.8m、推力为6kN的电动涵道风扇，集成了风扇及其驱动器、电池组、热管理系统和整个控制系统，设计宗旨是将尽可能多的动力系统单元集成到涵道风扇中。InCEPTion 项目于2021年1月启动，预计2025年3月结束，初始阶段目标是在结束时将 IPM500 的技术成熟度提升到6级。

赛峰集团扩充电推进系统产品

2024年4月，赛峰集团推出 GENeUSCONNECT 大功率电气线束，补充其专用于新一代全电推进和混合电推进飞机的电气系统系列产品，已有的产品还包括 ENGINeUS 电动机、GENeUS 电动发电机、GENeUSGRID 电源管理系统和 GENeUSPACK 电池组。GENeUSCONNECT 大功率线束适用于800V的直流电压，并能在高空飞行时具有抗局部放电的能力；线束的尺寸与当前为传统飞机生产的线束大小相当，但承载的功率水平将

是其2倍。由于采用了新工艺和适用的绝缘材料，这些线束能够满足新型全电推进和混合电推进系统的需求，特别是在高温、剧烈振动和集成度要求高的环境中。

2024年5月，赛峰集团电气电力公司与贝尔公司签署协议，为美国陆军新型未来远程攻击机（FLRAA）项目提供高压电动发电机系统。系统采用高速转子和先进的电力电子设备，能够产生满足军用飞机不断变化的电力需求，提供稳定的控制和可靠性保障。系统的设计、开发和认证将在位于美国俄亥俄州特温斯堡和佛罗里达州萨拉索塔的赛峰电气和电力卓越中心进行。赛峰集团的高压电动发电机系统作为FLRAA平台的单一来源，有望成为未来军用项目的行业标准。

VoltAero 公司混合电推进系统开始适航认证

2024年4月，法国飞机开发商VoltAero公司开始对其为5座Cassio 330飞机配装的并联混合电推进系统进行地面测试，这是其适航认证的一部分，预计2025年年中将该系统配装Cassio 330飞机进行试飞，2025年年底完成适航认证。该系统集成了赛峰集团电气电力公司的ENGINEUS

100电动机和川崎重工（KHI）四缸高性能活塞式发动机，输出总功率超过340kW，其中，电动机输出180kW，活塞式发动机输出165kW。川崎重工目前正在开发278kW的配有涡轮增压器的新型六缸活塞式发动机，未来将替换目前的四缸活塞式发动机，用于Cassio 330飞机的混合电推进系统。

荷兰航空航天中心分布式电推进验证机完成首飞

2024年5月，1架分布式电推进缩比飞行验证机（SFD）在意大利完成了10min首次遥控飞行，该SFD是在洁净天空2计划的SFD项目支持下开发，项目牵头单位是荷兰航空航天中心（NLR），采用了A320飞机的12%缩比分布式电推进飞机，起飞质量为167kg，翼展为4m，机翼上安装6个电动螺旋桨，外侧2个螺旋桨安装在翼尖上以减小诱导阻力，并且直径较小以加大离地距离。经测算，如果采用全尺寸飞机，预计能减少20%的能源消耗。

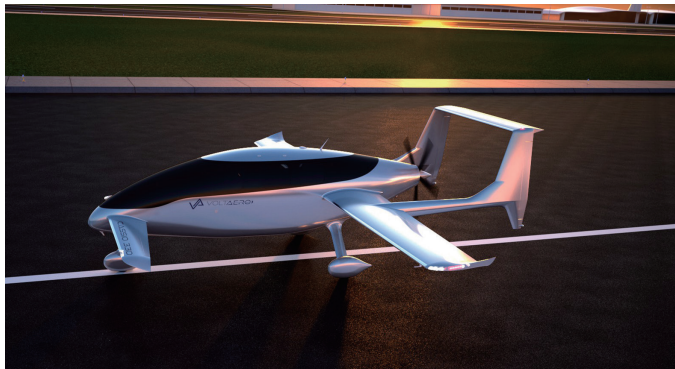
Heart 公司推出全新的ES-30混合电推进系统

2024年5月，瑞典Heart公司发布了30座ES-30支线客机的技术验证机Heart X1概念，采用了一种全

新设计的混合电推进系统，涉及的涡桨发动机和电动机都是货架产品。Heart X1全尺寸原型机计划于2025年年初首飞。原来的ES-30飞机采用的是全电推进设计，而全新设计的混合电推进系统被称为“独立混合电推进系统”，其特点是机翼外侧配置了2台涡桨发动机，而机翼内侧配置了2个电动螺旋桨，这种构型使之前预设的机翼支撑结构得以取消。全电推进ES-30飞机的航程只有约200km，而混合电推进模式的航程却可提升至804km。该系统也将配装Heart X2预生产型原型机，并于2026年开始飞行测试。ES-30飞机由瑞典Vinnova创新机构出资研制，翼展为32m，将短舱和机翼集成在一起，可在较短的跑道上起降。

SWITCH验证机通过初步设计审查

2024年7月，MTU公司SWITCH项目的混合电推进技术验证机通过了初步设计审查，该项目是在欧盟清洁航空计划下开展，旨在验证混合电推进技术和水增强涡扇（WET）发动机技术在提高未来中短程飞机燃油效率和减少排放方面的潜力。SWITCH验证机以普惠公司齿轮传动涡扇（GTF）发动机为基础，内嵌2



Cassio 330 飞机



Heart X1 全尺寸原型机

台柯林斯宇航公司的兆瓦级电动发电机，并配备相关的控制器、高压线路和电池，是针对未来单通道干线客机动力的并联混合电推进系统。该验证机将在柯林斯宇航公司电网实验室开展电力系统试验，然后再集成试验全尺寸验证机。

罗罗公司计划关闭电推进业务

2023年11月，罗罗公司宣布了1项全面重组计划，欲退出电推进业务领域，重新聚焦传统燃气涡轮发动机业务。2024年9月，罗罗公司因一直未能为其电推进业务找到买家，决定关闭电推进部门。罗罗公司的电推进业务集中在两大区域，涡轮发电机的开发在罗罗公司位于德国达勒维茨的工厂进行，目标功率范围为600 ~ 1200kW；储能装置的开发则是在罗罗公司位于英国沃里克郡的工厂。罗罗公司在2018年成立了一个创新部门，作为内部创新中心的一部分，开始涉足电推进领域。2019年，通过收购西门子公司在德国和匈牙利的关键技术和设施进行扩张。2022年，罗罗电气公司独立，重点开发用于城市空中交通(UAM)飞行器的150 ~ 200kW的电推进装置，以及用于支线飞机平台的300 ~ 400kW大型电动机和涡轮发电机。罗罗公司还为英国Vertical Aerospace公司的eVTOL飞行器VX4开发了电动机，但2024年5月双方协商终止了该项目。2024年4月，罗罗公司在挪威特隆赫姆市的工厂还进行了首台320kW电动机验证机的台架测试，该验证机原本计划用于意大利泰克南公司的P2012双发轻型支线飞机的全电推进型号P-Volt(使用2台320kW电动机取代原本的莱康明活塞式发动机)，而泰克南公司已

于2023年年中暂停开发该项目。

其他国家：顺应形势，重视发展

除了美国和欧洲，其他地区的航空强国也非常重视电推进技术的发展，典型的有日本和俄罗斯。

IHI混合电推进技术开发计划获日本绿色创新基金支持

2024年4月，日本石川岛播磨重工(IHI)的电力控制、热能与空管理系统技术开发计划获得日本新能源和工业技术发展组织(NEDO)的绿色创新基金支持，用于下一代飞机开发项目。该计划旨在开发兆瓦级电动发电机等飞机电气化核心技术，并构建一个能量控制系统，集成混合电推进系统和飞机热空气管理系统，以建立一种比传统飞机燃料消耗更低的机身系统概念。该计划将持续7年，预计2031年结束。NEDO已经设立2万亿日元(131.85亿美元)的绿色创新基金，将在未来10年内为相关实体提供资金支持，助力实现2050年碳中和目标。

JAXA研究电动尾流自适应推进器概念

2024年10月，日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)宣布正在研究一种基于边界层吸入(BLI)原理的尾流自适应推进器(WAT)概念，WAT将由JAXA开发的额定功率2MW的混合电推进系统提供电力驱动，能吸收机身边界层并重新激活尾流以减少阻力。该概念与欧洲和美国研究的尾部推进单个环形风扇不同，是由一对紧密耦合的水平安装电动涵道风扇组成。这种双风扇结构能实现比单风扇结构更大的等效风扇直径，而不会显著影响其

离地间隙，推进效率比单风扇结构更高。WAT可用于单通道干线客机，将于2027年进行缩比模型风洞试验，21世纪30年代中期进行全尺寸试验。

UEC展示混合电推进全尺寸样机

2024年7月，俄罗斯联合发动机制造集团(UEC)在叶卡捷琳堡举行的俄罗斯工业展(IPPOPROM)上展出了1型500kW的混合电推进系统全尺寸样机，其原动机采用VK-650V涡轴发动机。该系统采用开放式架构，UEC希望在此架构基础上将系统功率提升至1.5MW，从而可以用于空中出租车和垂直/短距起降飞机的大功率动力系统。

结束语

2024年，世界电推进技术发展态势呈现出以下特点：一是继往开来，美国和欧洲继续推进ASCEND、EPFD、ARC-STEP、STEP-Tech，以及清洁航空等既有的计划和项目，取得了阶段性成果；二是不同机构选取的技术方案也不完全相同，不同构型的电推进系统在齐头并进探索和开发中，HyTEC项目、SWITCH项目在研究嵌入式电动发电机构型，CICLOP项目在研究分布式推进构型，日本JAXA则是在研究WAT构型；三是各国广泛关注适用于干线客机、支线客机、通用飞机，以及eVTOL飞行器的电推进系统的开发，其中难度最大的是应用于单通道干线客机的动力，目前其动力解决方案为采用混合电推进系统；四是一如既往地重视相关基础设施和条件的建设。各航空动力强国持续加大电推进技术研发的投入，电推进技术的发展如火如荼，正在加速航空电气化时代的到来。

航空动力