

2023年航空电推进系统进展

Progress of Aviation Electric Propulsion Systems in 2023

■ 罗彧 / 中国航空发动机研究院

2023年，航空电推进领域一如既往地保持高速发展，各国对航空电推进系统的投入持续增加，各种技术和产品不断涌现，呈现出群雄逐鹿的态势，未来充满机遇和挑战。

电推进是未来航空业实现净零排放目标的主要动力解决方案之一，是未来航空发动机行业的“蓝海”，近年来持续受到关注。美国、欧洲、俄罗斯、日本等国家和地区的研究机构和企业对电推进系统的技术和产品开发力度在持续加强，技术领先的航空发动机制造商和行业新进入者无不想在该领域方兴未艾之时抢占制高点；同时，电推进配套基础设施的建设也在不断完善，以全面促进电推进技术、产品和产业的发展。电推进领域呈现出百花齐放的态势。

新概念异彩纷呈

航空电推进系统本身就是一种新概念，在近年来的快速发展中，航空发动机制造商以电推进系统为核心又不断研发出更新概念的技术和产品。

UAVHE公司测试RW1-300混合电推进系统

2023年1月，西班牙无人机发动机制造商UAVHE公司发布其最新的混合电推进系统RW1-300C，该系统的特别之处在于其原动机是一台汪克尔转子发动机，系统的总输出功率为48kW，恒速运行条件下非常高效，专为具有高电气负载的固定翼无人机和电动垂直起降（eVTOL）

飞机制造。RW1系列混合电推进系统可适配减速器和可变桨距螺旋桨，以及配备有12:1减速器的直升机，改进型RW1-300的系统性能得到优化提升。7月，UAVHE公司使用可持续航空燃料（SAF）对系统进行了测试。

Kite公司开发高效质轻的航空电动机

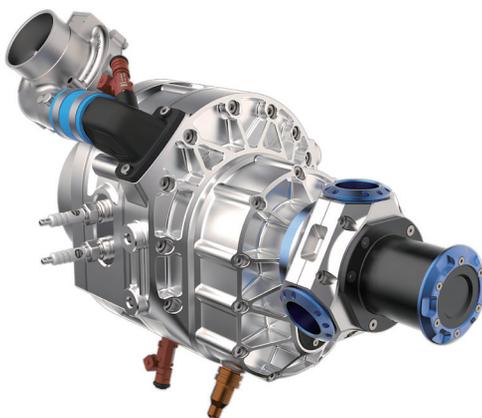
2023年3月，澳大利亚初创企业Kite公司推出其首型产品KM-120航空电动机，功率为120kW，旨在取代2~4座轻型飞机的活塞式发动机。该电动机采用了Kite公司的低损耗纳米晶体磁性材料制造技术，电动机铁芯采用了类似碳纤维的物质，由20 μ m厚的纳米晶体

材料制成，与传统电动机相比，功率损耗降低到原来的1/10，结构质量也更轻。

格林喷气公司开发新型分布式电推进系统

2023年5月，英国格林喷气公司推出其首型用于商用无人机的分布式电推进发动机IPM5，总质量为750g，最大推力为49N。IPM5发动机采用涵道风扇架构设计，与开放式螺旋桨叶片相比，既降低了噪声，又提高了安全性。格林喷气公司还克服了传统涵道风扇面临的质量和效率挑战并获得了相关专利，目前正在使用IPM5发动机的技术开发eVTOL和支线飞机电推进装置。

GE公司开发创新的混合电推进



RW1-300混合电推进系统



KM-120航空电动机

系统

2023年10月，GE公司在成功完成美国能源部预先研究计划局（ARPA-E）授予的燃料电池嵌入式发动机（FLyCLEEN）项目的设计阶段后，再次获得ARPA-E授予的450万美元的资金，以进一步开发和验证一个25kW的发电子系统。该系统集成了固体氧化物燃料电池（SOFC）和燃气涡轮发动机，在燃料电池和燃气涡轮发动机中都使用了SAF，一部分SAF转化为合成燃气供给燃料电池，其余的SAF则用于燃气涡轮发动机。这种将两者结合起来的新概念动力系统，可提高燃料效率和发动机推力。

莱特电气公司开发大型全电推进飞机用航空电池

目前，航空用锂离子电池的能量密度约为 $250\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，可适用于小型飞机，但不足以用于大型客机。2023年10月，美国莱特电气公司宣布正在开发一种能量密度为 $1000\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 的高能量密度电池，是传统锂电池能量密度的4倍，足以应用于100座级、航程1130~1290km的全电推进飞机。

新产品不断涌现

目前，世界航空电推进领域还处在发展的初期阶段，尚未形成像传统发动机领域那种居于垄断地位的航空发动机制造商，无论传统的发动机领先企业还是初创企业，都在奋勇争先开发电推进新产品和新技术，以期在未来的竞争中获得相对优势。

西科斯基公司和GE公司合作研制混合电推进验证机

2023年3月，西科斯基公司和GE公司宣布合作开发一型全自主



Maeve 01 全电推进支线客机

混合电推进验证机（HEX），为一系列大型多功能军民用先进空中交通（AAM）飞机储备技术。HEX的目标航程超过926km、起飞质量为3175~3628kg，采用由CT7涡轴发动机驱动的混合电推进系统，该系统将大量借鉴GE公司目前在美国国家航空航天局（NASA）电气化动力系统飞行验证（EPFD）项目和美国陆军应用研究合作涡轴电气化应用项目（ARC-STEP）下开发的技术。

Maeve公司将开发全电推进支线客机

2023年4月，荷兰Maeve公司宣布计划开发一型全电推进支线客机Maeve 01，正从可行性阶段进入概念设计阶段。动力装置采用翼吊布局，将配备8个翼吊螺旋桨，采用美国安普瑞斯公司提供的 $500\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 电池。到2029年，Maeve 01客机的航程将达到460km，载客44人，由于其在设计尺寸上的可扩展性很强，随着电池技术的进步，2032年的载客量预计将增加到52人，到2040年航程可延长到710km。

罗罗公司研制电推进用小型燃气涡轮发动机

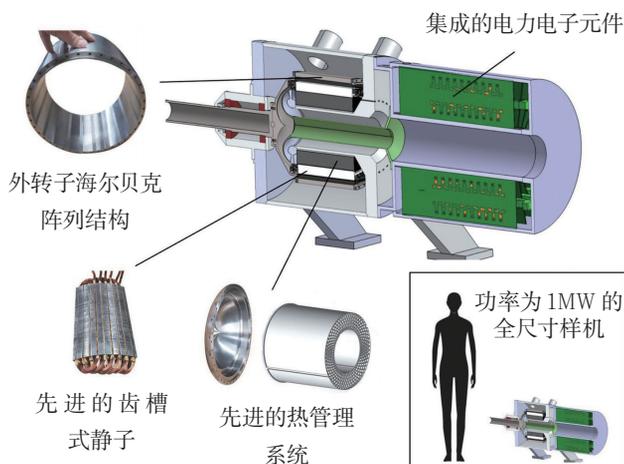
2023年6月，罗罗公司研制了

一型专门用于混合电推进系统的小型燃气涡轮发动机，是其新型涡轮发电系统的一部分。罗罗公司的涡轮发电系统专为AAM市场而研制，包括应用于城市空中交通的eVTOL飞机和19座通勤飞机。该系统既适用于串联混合电推进，也适用于并联混合电推进。不仅能为电池充电，还能直接为电推进装置提供能源，系统功率范围可拓展到500~1200kW，可延长当前电推进飞机的航程，未来还可使用氢燃料进一步降低污染物的排放。

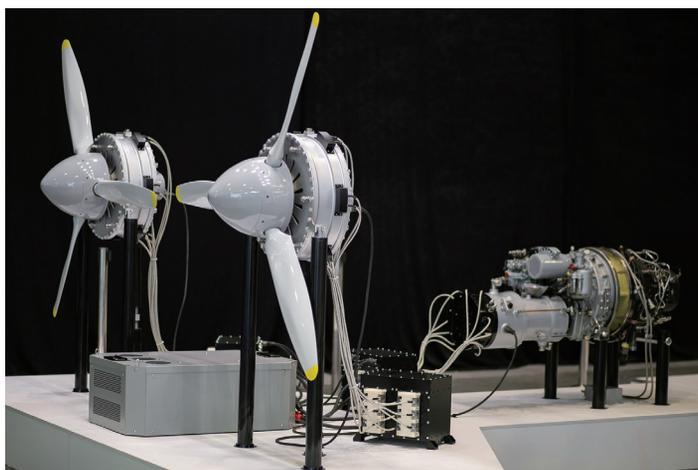
麻省理工学院开发1MW紧凑型电动机

2023年6月，麻省理工学院的研究人员开发出一款1MW的紧凑轻型电动机，由带恒定磁铁的圆柱形鼓筒转子与带螺旋铜导线的静子组成，将新型铝合金空气冷却换热器置于静子内部，圆柱形内部是由不大的空气通道构成的蜂窝结构，复杂的几何形状需要采用3D打印。电动机质量为57.4kg，功率密度为 $17\text{kW}/\text{kg}$ ，已超过了NASA为大型飞机电动机设定的阈值，这一突破将有助于开发非传统结构的大型电推进飞机。

UEC研究基于VK-650V发动机



1MW 紧凑轻型电动机



基于VK-650V发动机的混合电推进装置

的混合电推进装置

2023年8月，联合发动机制造集团（UEC）在2023年俄罗斯工业展览会上首次展示了一型功率为500kW的混合电推进装置验证机，其原动机采用VK-650V涡轴发动机。混合电推进装置是UEC科技战略关键发展方向之一，2020年以来UEC一直在从事该领域的研究。

Heart公司和BAE系统公司合作开发电池系统

瑞典Heart公司和英国BAE系统公司将合作开发ES-30混合电推进飞机所需的电池系统，开发工作将在BAE系统公司位于纽约恩迪科特的工厂进行。ES-30飞机计划于2026年首飞，2028年投入使用，质量为5t的电池放置在机身下方的一个特殊隔间中。当载客30人时，全电推进的航程为200km，混合电推进的航程为400km；若只载客25人，则航程可达800km。

既有产品、技术和基础设施稳步发展

航空发动机制造商此前已经开展的电推进项目在2023年持续取得进展，

并有多种产品实现了首次地面测试或首飞。

赛峰集团ENGINEUS XL 电动机准备投入使用

2023年3月，赛峰集团ENGINEUS XL电动机在气候实验室中进行了高空试验，达到可交付使用状态。该电动机是ENGINEUS 500电动机系列中功率最大的产品，功率达到750kW，可扩展到1MW。当月，ENGINEUS电动机获得欧洲航空安全局（EASA）颁发的设计机构批准（DOA）资质，

通过DOA审批之后可从EASA获得电动机审定合格证。

Dufour公司混合电推进系统即将开展飞行测试

2023年3月，瑞士Dufour公司与Suter公司签订协议，Dufour公司选用Suter公司的TOA288发动机作为其eVTOL飞机Aero 2的混合电推进系统的关键子系统。TOA288发动机可使用汽油和航空燃油，功率为17.4kW。Aero 2飞机X2.3原型机的混合电推进系统计划于2024年年初开始飞行



Aero 2飞机

测试，之前的X2.1全电推进原型机已经完成了飞行测试。

美国空军支持乔比公司发展 eVTOL 飞机

2023年4月，美国空军敏捷至上项目向eVTOL飞机制造商乔比（Joby）公司授予总价值5500万美元的9架S4飞机采购合同，这是敏捷至上项目首次签署采购合同，也是eVTOL技术在军用领域获得的重大进展。敏捷至上项目旨在开展军民合作，在美国联邦航空局（FAA）适航审定程序之前，通过军方先行测试，推动eVTOL相关技术发展与应用。2023年9月，乔比公司在加利福尼亚州爱德华空军基地向美国空军交付了首架eVTOL飞机S4，该机可载客4人，动力为6台电动螺旋桨，每台电动机峰值功率为236kW。公司计划于2025年对S4飞机开展商业空中出租车运营认证。

安派尔公司将与美国空军合作开发兆瓦级混合电推进系统

2023年10月，安派尔（Ampaire）公司与美国空军签订了一份价值125万美元的合同，在美国空军敏捷

至上项目下开发兆瓦级混合电推进系统AMP-H570。公司还公开了与NASA的一份单独的后续合同，基于现有技术开发一个更高效、更小型的新型混合电推进系统。

赛峰集团Tech TP技术验证机首次试车

2023年2月，赛峰集团完成Tech TP混合电推进涡桨发动机技术验证机的首次运行。Tech TP是阿蒂丹3涡轴发动机的改型，包含了来自欧盟资助的清洁天空2（Clean Sky 2）计划中的为新型涡桨发动机的电起动机-发电机和健康监控系统开发先进机电设备（ACHIEVE）项目的技术，将一个电起动-发电机集成在涡桨发动机的减速齿轮箱中，可以仅依靠电池动力滑行，或在飞行中提供助力以减小涡轮发动机的载荷。

雷神技术片公司完成STEP-Tech验证机首次试车

2023年6月，雷神技术公司旗下普惠公司和柯林斯宇航公司联合研制的可扩展涡轮电力传动系统技术（STEP-Tech）验证机完成首次试

车和电气系统集成测试。STEP-Tech验证机是模块化、可扩展的验证平台，加速了分布式推进概念原型机设计，可广泛用于下一代飞行平台，包括AAM飞机、高速eVTOL和翼身融合飞机。与当今最先进的支线涡桨发动机相比，验证机的燃油效率提高了30%，二氧化碳排放降低了30%。雷神技术公司通过开展STEP-Tech项目和包含混合电推进的可持续喷水涡扇（SWITCH）项目，推进了公司电推进系统的研究进展。

赛峰集团电动机配装eDA40全电推进飞机首飞

2023年7月，钻石飞机公司的全电推进教练机eDA40在位于奥地利维也纳新城的公司总部完成首飞，该飞机采用了赛峰集团的ENGINEUS电动机，并配备了电气保护系统，这是赛峰集团这两种产品在全电推进飞机上的首次应用。eDA40也是第一型获得EASA和FAA认证的电推进飞机。

空客公司EcoPulse验证机完成首飞

2023年12月，由空客公司、赛峰集团和大合（Daher）公司联合开发的分布式混合电推进验证机EcoPulse完成首飞。EcoPulse在大合TBM飞机的基础上，配装6个分布在机翼上的集成电动螺旋桨，由空客公司提供的电池和赛峰集团提供的涡轮-发电机供电。EcoPulse验证机旨在评估集成分布式混合电推进系统的运行优势，重点关注二氧化碳排放和噪声水平的降低。

GE公司追加投资建设电推进试验设施

2023年5月，GE公司计划投资2000万美元在俄亥俄州代顿市的电



S4电动垂直起降飞机



EcoPulse混合电推进验证机

力集成系统中心（EPISCenter）增加一个新的试车台，用于混合电推进系统及部件的测试，该中心占地12820m²，于2013年在代顿大学校园内开放，当时投资了5300万美元，后又追加投资2600万美元；加上此次宣布的额外投资，使总计划支出达到近1亿美元。

新动向出乎意料

航空电推进领域整体形势趋于加速发展，但也出现了不同选择的新动向。NASA中止了X-57项目，而罗罗公司选择了退出此前大力发展的电推进业务。

NASA终止X-57全电推进验证机项目

2023年2月，NASA的X-57麦克斯韦（Maxwell）验证机完成了首飞前试验，对全电推进系统的巡航电动机控制器进行了热试验，达到了关键里程碑，原计划于2023年实现首飞。但到6月，NASA却宣布终止X-57验证机项目。NASA认为，项目研发的目标不是开发验证机，而是研究分布式电推进系统

的应用效果，开发电推进飞机技术，同时帮助制定未来航空器取证标准。虽然终止了X-57项目，但是该项目的经验，以及对电池技术的积累，仍然可以用在其他电推进飞机的项目研发中。该项目是NASA首个全电X验证机项目，2014年开始子系统研制，2016年获得验证机代号，2017年正式发布，是NASA在2017年公布的未来10年航空新视界规划的验证机之一。

罗罗公司决定退出电推进领域

2023年12月，罗罗公司宣布出售电推进系统部门，并逐步放弃电推进业务，以加速利润增长和简化运营。公司2022年的营业收入为8.37亿英镑，2023目标收入在25~28亿英镑，这得益于疫情后的市场复苏和对远程飞机发动机需求的激增，出售电推进部门预计将带来约15亿英镑的收入。2023年罗罗公司对电推进业务发展前景的观点发生了明显转变：公司承认电推进飞机在短途运输方面的潜力，但仍对其是否适合长途运输持怀疑态度，而长途运输是公司的主要业务；相反，罗

罗公司设想的未来客机将由合成燃料驱动，特别是SAF，因此正在大力研发SAF；公司还在开发氢燃料电池发动机，通过多管齐下共同推动可持续航空发展。

结束语

2023年，世界电推进技术、产品和配套基础建设都呈现出日新月异的发展趋势，主要包括以下特点：一是根据对当前电推进技术和产品的分析，各国研究的重点主要集中在100座级以下飞机的动力系统，尤其是中小型支线飞机、通用飞机和eVTOL飞机，同时也在为电推进大型商用飞机做技术储备；二是新概念的电推进系统更多是由新创公司和行业新进入者提出和开发，新进入者成为最具创造力的推动力量；三是电推进领域的新进入者不断增加，新研产品层出不穷，没有哪些企业或机构拥有压倒性的垄断优势，这和传统燃气涡轮发动机市场由少数几家制造商的少数产品系列垄断形成鲜明对比，目前电推进处于战略机遇期，竞争胜负犹未可知；四是无论是传统动力企业，还是不断增加的行业新进入者，都在稳步推动既有产品、技术或基础设施的发展，并追加投资；五是一些机构和企业基于战略定位，重新调整了自身的电推进发展策略，罗罗公司在前期不断加大电推进领域投入的背景下，2023年年底突然发生转折，重新聚焦远程航空运输的主业，而决定放弃暂时不能广泛支持远程大型客机发展的电推进业务，这和GE公司、普惠公司以及赛峰集团大力发展电推进技术的举措形成鲜明对比。

航空动力