

航空油电混合动力系统设计及试验

Design and Integrated Verification of Fuel-Electric Hybrid Power System

■ 梅庆 金海良 申余兵 / 中国航发动研所

全电推进技术是实现航空业脱碳减排的重要技术路线，是实现绿色航空愿景的前沿技术方向，而油电混合动力系统则是未来全电推进的过渡路线。中国航发动研所依托多年的技术积累，联合业内的飞机、电机和电控相关优势单位，开展了多型混合动力系统的设计与试验研究。

习近平总书记于2015年巴黎气候大会、2020年联合国大会等重要场合多次重申了中国2030碳达峰和2060碳中和的目标，这对国内的航空碳排放提出了更高的要求。现有燃油动力技术改进已无法满足减排政策的要求，必须采用革命性技术。全电推进是实现航空零排放的终极目标，预测电池能量密度在未来30年内几乎不可能取得突破性进展，仅适合城市垂直起降通勤飞行器开发和轻型通航飞机的改装，无法适用于更大起飞重量的飞行器。油电混合动力系统作为飞机从燃油时代跨越至全电时代的过渡方案，结合飞机分布式推进布局，在保证航空运力的基础上，可大幅降低燃油消耗。中国航发动研所目前有在役和在研的80~8000kW级多型涡轴、涡桨发动机和辅助动力装置（APU），功率谱系齐全，依托多年的技术积累，联合业内的飞机、电机和电控相关优势单位，开展了多型混合动力系统的设计与试验研究。

80kW级混合动力系统

2020年3月，中国航发动研所在相关预研项目支持下，开展了80kW级串



80kW级混合动力系统装SA60L飞机进行飞行试验

联式油电混合动力系统研制。研制分为方案阶段和工程研制阶段。

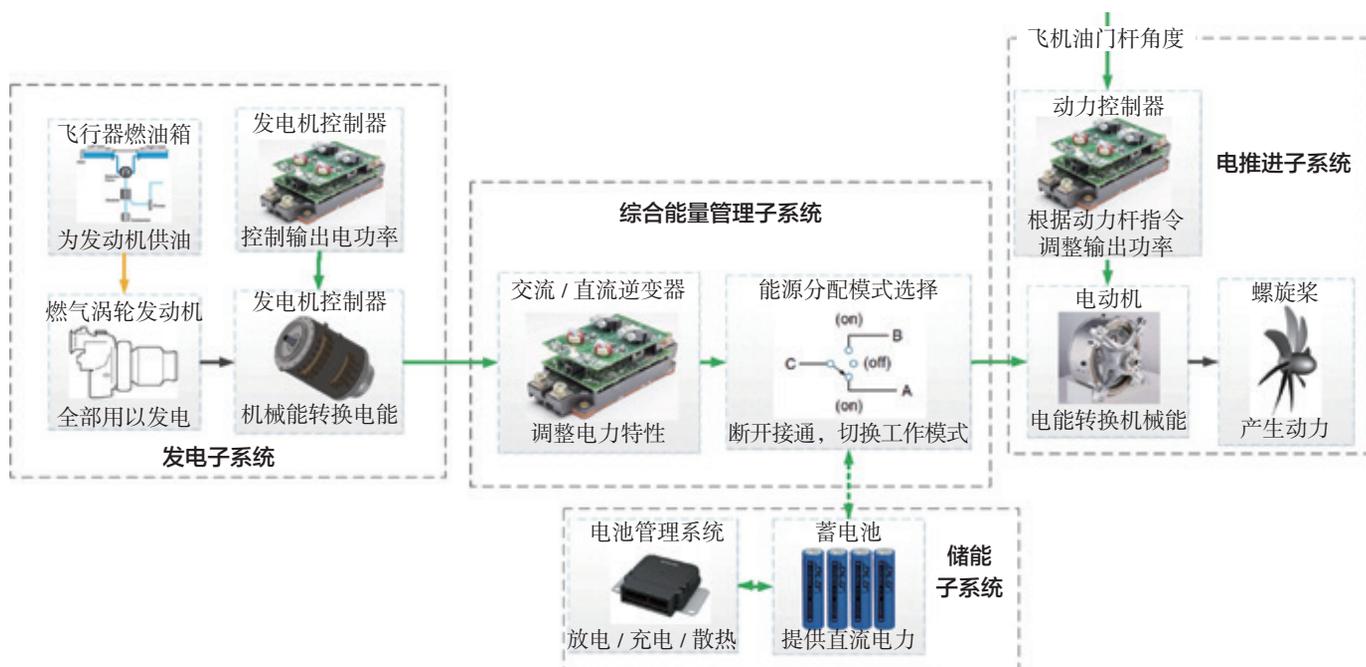
方案阶段主要开展方案论证、子系统选型等工作，并与飞机方协调确定动力舱布局、功率匹配、质心配平、飞行控制和发动机控制系统接口改装等事项，根据研制需要开展电气系统、动力舱设计等，对动力舱安装架进行振动、强度计算和校核。

工程研制阶段按照子系统地面试验—整机台架试验—飞行前摸底试验—飞行试验的验证路径开展集成验证。

系统组成

80kW级油电混合动力系统研究立足现有技术基础，系统集成尽量采用货架产品，并基于成熟的飞行平台进行适应性改装，主要目的是验证系统集成关键技术。

混合动力系统采用串联式架构，系统由发电、储能、能源分配和电推进等子系统组成。其中，发电子系统包括燃气涡轮发动机、发电机和发电机控制器；储能子系统包括动力电池和电池管理系统（BMS）；双向直流/直流作为能源分配子系统的重要部分，负责对电推进子系统、



80kW级串联式油电混合动力系统架构

发电子系统及储能子系统的电功率进行管理及调控，采用相关能量管理算法，确保系统性能最优；电推进子系统包括电动机及其控制器，为螺旋桨提供动力。

发电子系统采用的小型航空燃气涡轮发动机是一型成熟的直升机辅助动力装置，最大输出功率为80kW，已配装在直升机上累计飞行验证5年。交流发电机选择风冷式无刷交流发电机，额定功率为70kW·A，输出电压115V。交流发电机散热器和翅片式散热管通过螺旋桨来流冷却。

储能子系统采用的动力电池模组由三元锂电芯串联而成，满足电动机电压和电流需求。电池管理系统拥有完善的充放电过流保护、充放电过温保护和短路保护功能，响应迅速，数据采样精度高。

能源分配子系统集成于机载综合电源内部，主要由交流/直流变换器、控制器以及开关组成。交流/直

流实现将发电机的交流电压转换为系统可用的直流电压。控制器通过测量系统输入和输出功率，由开关控制系统进行能量分配，实现发电机单独供电或与动力电池一起联合供电。

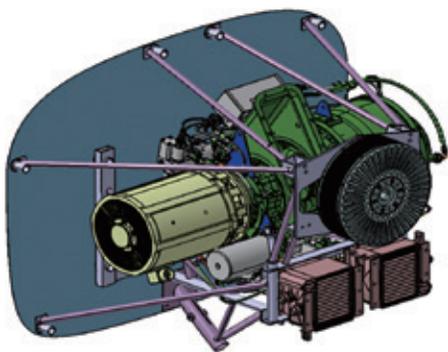
电推进子系统由接口控制单元、控制面板和主要动力模块组成。根据飞机的动力需求指令，控制电动机的状态和发电机与动力电池的组合作模式。控制面板模块油门杆用来向接口控制单元传输控制指令，启动和关机为带钥匙的按钮，由飞行员操作。选用轴向磁通永磁同步电动机，连续工作功率为40~75kW。为了加强电动机散热，设计了导流冷却通道和高效冷却风扇。针对电动机控制器散热难题，开展了控制器散热优化设计。

为了配装混合动力系统，对SAGOL飞机进行了适应性改装。发电子系统沿用原燃气涡轮发动机的

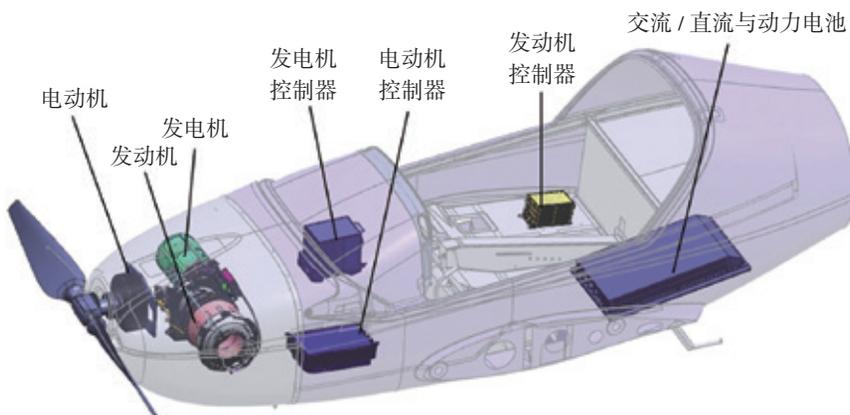
安装形式，通过1个后支架和2个前撑杆固定在飞机动力舱承力框架上。电推进子系统采用电动机直驱螺旋桨形式，电动机与螺旋桨之间通过螺旋桨转接段连接。螺旋桨拉力通过螺旋桨转接段、电动机、电动机安装架传递到飞机动力舱承力框架上。动力电池组、机载综合电源和其他部件根据飞机配平要求，灵活布置到飞机相应部位。

主要工作模式与性能参数

混合动力系统工作时，发电子系统在燃气涡轮发动机的带动下输出540V高压直流电，供给直流母线。储能子系统在飞机需要较大推进功率时（如起飞爬升阶段）提供额外功率，在飞机巡航阶段吸收发电子系统多余的功率，起到功率调配的作用，使作为源动力的燃气涡轮发动机始终工作在最佳状态。能源分配子系统根据电动机需求功率和发电机输出功率动态调整动力电池输



混合动力系统在动力舱安装示意图



80kW级混合动力系统装机示意图

输出功率或充电功率，以维持母线电压稳定。根据飞行平台需求，混合动力系统共设置起飞、巡航和应急等3种工作模式。

在起飞模式时，电推进子系统在能源分配子系统调控下，同时从动力电池和发电子系统提取电功率，驱动螺旋桨为飞机提供前飞拉力。

在巡航模式时，动力电池处于充电状态，电推进子系统从发电子系统提取所需的功率满足飞机巡航需求，储能子系统从发电子系统提取充电功率，能源分配子系统根据动力电池电量对充电功率进行动态调整。

在应急模式时，能源分配子系统自动从动力电池提取电功率给电

推进子系统，满足飞行平台失去发电功率时的应急着陆需要，保证飞行安全。

混合动力系统主要性能参数满足飞行平台使用需求，5min最大起飞功率 $\geq 80\text{kW}$ ，巡航功率 $\geq 50\text{kW}$ ，最大使用高度为4000m，应急着陆功率 $\geq 40\text{kW}$ 。

集成验证

在子系统地面试验中，完成了发电子系统试验，对发电子系统的功能和性能进行了验证，试验过程中系统功能正常、完整，发动机本体未出现振动超标、超温等异常现象。电推进子系统试验包括电动机空载试验和带桨试验，验证了电动机工作的性能和可靠性，试验结果



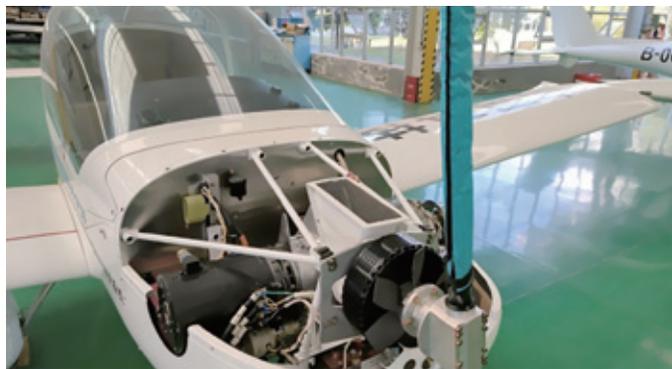
电推进子系统带桨试验

满足技术指标要求。

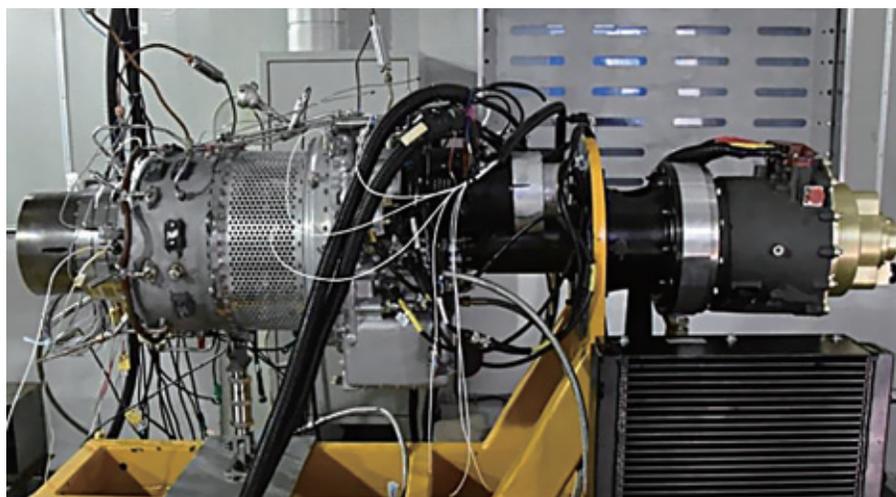
为了完成混合动力系统整机台架试验，全新搭建了地面移动试验台，对系统的功能、性能进行了调试及验证，系统各项功能完整，起飞状态电动机输出功率达到70kW，



混合动力系统地面性能试验



配装混合动力系统的SA60L飞机



200 ~ 300kW 级油电混合动力系统

螺旋桨转速满足飞机要求，试验过程中未出现强烈振动、异响、烟雾或排气火焰异常、超转、超温、滑油低压差警告等异常状况。

配装 SA60L 飞机在地面进行了 10h 持久验证试验，对飞行载荷谱和地面滑跑谱进行了摸底；完成了电源故障试验，系统在断开交流发电机电源后能自动切换到动力电池供电，螺旋桨转速平稳。

2022 年 3 月，混合动力系统配装 SA60L 飞机完成首飞，在真实飞

行条件下验证了混合动力系统的集成关键技术，确认了该油电混合动力系统结构布局灵活、动力响应迅速、功率分配智能、安全裕度高的突出优势，为后续更大功率混合动力系统的研制和产业化发展提供了借鉴。

200 ~ 300kW 级混合动力系统

中国航发动研所以城市空中交通、城际无人机货运以及电动通用航空

动力需求为牵引，针对飞行平台对混合动力系统高适应性、高安全性和高拓展性的发展需求，在自主研制的 200 ~ 300kW 级涡轴发动机基础上，开展了 200 ~ 300kW 级混合动力系统集成演示验证研究，计划 2025 年配装 1.5t 级油电混合动力复合翼垂直起降无人机完成飞行演示验证。

兆瓦级混合动力系统

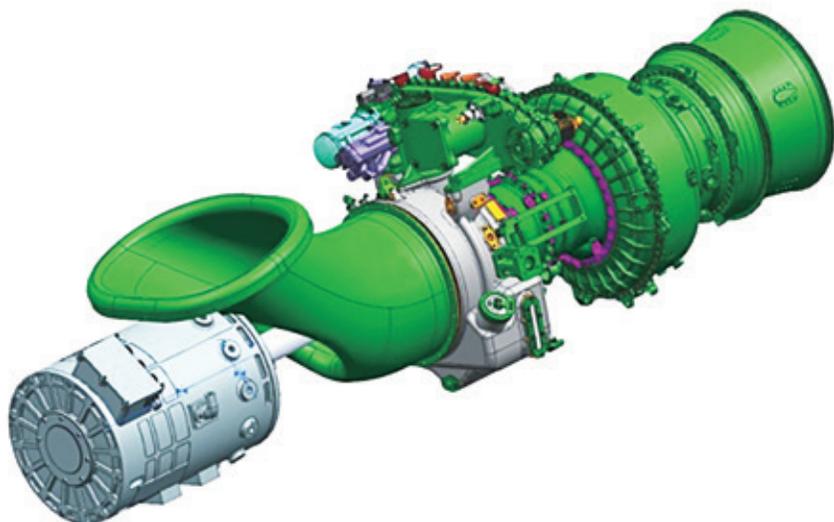
针对大型电动垂直起降飞行器、电动通勤飞机和小型支线飞机等应用场景，中国航发动研所基于 AES100 民用涡轴发动机分别开展了 1MW 级串联架构和 2MW 级并联架构混合动力系统研制，计划于 2025 年完成混合动力系统地面验证，后续视飞行平台需求开展飞行验证和工程研制。

结束语

当前，国内低空空域管理改革不断深化，通用航空基础设施不断完善，各级政府和各类市场主体纷纷投身通用航空产业，通用航空领域显示出强大的内生动力，除传统的业务外，城市空中交通、无人货运等应用场景需求不断得到激发，大大激发了混合动力系统的开发应用。当前，油电混合动力系统发展已具备坚实基础，随着后续航空电机、电力电子、储能系统等技术的进步，油电混合动力系统可迅速应用到垂直起降城市通勤飞机、通用飞机等场景，实现我国航空动力领域的换道超车，为全面实现民用航空运输业的碳达峰和碳中和贡献力量。

航空动力

（梅庆，中国航发动研所副所长，研究员，主要从事涡轴/涡桨发动机、航空混合动力系统研发工作）



兆瓦级油电混合动力系统