

航空混合电推进系统发展战略研究*

Development Strategy of Hybrid Electric Propulsion System for Aviation

■ 李建榕 王翔宇 李明 秦亚欣 / 中国航空发动机研究院

航空混合电推进系统将燃气涡轮发动机和电推进系统有机结合，是未来新能源航空发动机发展的关键方向之一，对推动航空业绿色转型、提升武器装备性能有着重要意义。探讨航空混合电推进系统未来发展路径并提出重点任务建议，将促进混合电推进系统在我国新能源航空发动机体系布局和航空强国建设征程中更好发挥作用。

航空动力系统的电气化发展趋势，按照电能是否提供全部推力可分为全电推进和混合电推进两种形式。与完全依赖电池作为动力来源的全电推进系统相比，混合电推进系统将燃气涡轮发动机和电池这两种不同类型的能源系统通过一定的组合与调度，单独或共同驱动推进器产生推力^[1]。混合电推进系统一般包括发电、推进和储能三大子系统。其中，发电子系统指燃气涡轮发动机和发电机；推进子系统包括电动机、涵道风扇或螺旋桨；储能子系统是电池，可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。

从民用角度看，在电池技术取得重大突破、全电飞行真正开始市场运营之前，混合电推进系统是飞机从燃油时代跨越至全电时代理想的过渡动力方案，也是中短期实现航空业碳达峰碳中和发展目标的关键途径之一^[2]；从军用角度看，在保留燃气涡轮发动机高速大推力这一固有特征的同时，混合电推进系统的高功率电能提取能力极大提

升，能够更好地满足定向能武器以及各种先进的探测、通信和电子对抗等设备的用电需求。通过将燃气涡轮发动机和电推进系统有机地结合起来，混合电推进系统能够全方位提升飞行平台总体效能，在民用领域和军用领域均有广阔的需求前景，是未来航空产业全面电气化发展的基础与铺垫，是航空动力技术创新与应用发展的又一有力支撑，将在我国新能源航空发动机体系布局和航空强国建设征程^[3-4]中发挥重要作用。

构型特点

在航空全电推进系统构型中，电池是飞行的唯一动力来源，电池为电动机供电以驱动螺旋桨或风扇旋转，通过电动机将电能转换为机械能，实现了完全零排放。但受限于电池的能量密度，全电推进系统在航程和载荷上较常规燃气涡轮发动机有较大差距，同时由于电推进的排气速度较低，不具备较好的高空高速推力特性，目前其应用场景只能局限在短途通用航空类市场。

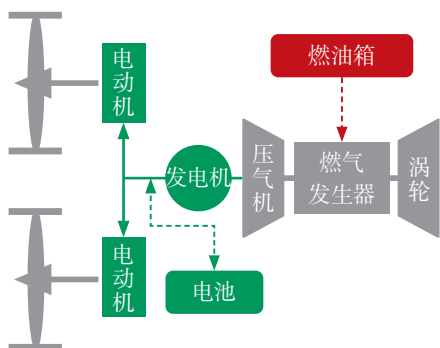
航空混合电推进系统构型主要

有串联和并联两类。

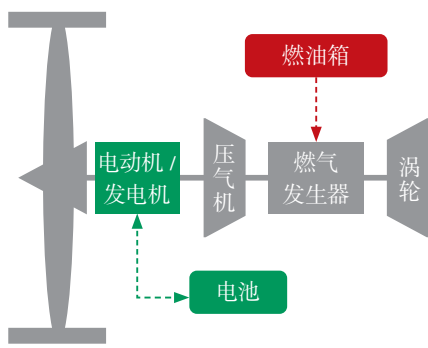
串联构型中燃气涡轮发动机(燃气发生器)一般只负责发电，所有推力均来源于电动机驱动的螺旋桨或风扇。此时燃气涡轮发动机可以最优转速长时间工作，能够实现较大的等效涵道比，易于兼容分布式推进架构，在长续航的基础上显著降低排放水平。不过与全电推进系统类似的是，串联混合电推进系统在高速飞行时总效率损失较大，一般应用于通用航空飞行器、低速无人机以及支线客机等对飞行速度要求不高的平台。

并联构型通过在燃气涡轮发动机的轴上集成电机从而调节发动机在不同飞行工况下的功率，高功率需求阶段由电动机作为助力，低功率需求阶段电动机转换为发电机进行功率提取，由于推力仍由燃气涡轮发动机产生，因此具备较好的高度和速度推力特性。但并联混合电推进系统的机械传动结构较为复杂，燃气涡轮发动机也无法随时以最大效率工作，碳排放水平高于串联混合电推进系统，主要应用于先进战斗机、中高速固定翼无人机和干线飞机等。

*基金项目：中国工程院战略咨询项目（2023-XBZD-15）



串联混合电推进系统构型示意图



并联混合电推进系统构型示意图

发展背景

混合电推进系统是航空业绿色转型的关键抓手

航空运输业是全球碳排放的重要源头。电推进技术作为航空业“第三时代”的重要标志，能够显著提高能源利用效率、降低噪声和减少排放，在航空业绿色转型上远高于常规航空发动机技术进步带来的收益。然而，全电推进中动力电池的能量密度已成为制约电推进技术发展应用的最大瓶颈^[5]，有分析认为，到2030年前能量密度为500~600W·h/kg的锂电池可实现大规模工业应用^[6]，即便如此也仅相当于传统航空煤油能量密度的1/20，如此的发展速度难以满足大载荷、远距离的干线航空运输低碳发展的迫切需求。

显然，用“发电装置+电动机”的混合电推进模式代替“储能装置+电动机”的全电推进模式将是当下航空电气化发展最为可行的一个方案^[7]。将航空燃气涡轮发动机功重比高、功率大、适用广的特点与电推进灵活、高效、低排放的特点结合，实现优势互补，能够支撑飞行器性能提升和多样化发展需求，比全电推进更快在军民用各个领域发

捷飞行控制、先进电子战能力和高功率定向能攻击等新质作战特征，对未来空战模式带来颠覆性影响。当前常规构型的涡扇发动机难以兼顾飞机高速大推力与巡航低油耗的需求，也无法支持更高功率的电能提取，成为制约飞机高水平战技性能实现的主要瓶颈。作为现有多电发动机发展的“升级版”，混合电推进系统对未来航空装备的赋能作用越发凸显。

一是提升未来军用飞机低油耗长航时综合飞行能力。多电发动机得到的电能并不用来产生推力，燃气涡轮依旧是唯一的推进功来源。混合电推进系统优化了发动机的电力调配处理能力，通过燃油/电能综合能量管理降低了全任务剖面耗油率，同时还可利用更多电气部件取代液压部件，大幅减轻质量并降低安装与维修要求，以实现军用飞机长航时、大作战半径以及远距离飞行需求。基于混合电推进系统的大型短距/垂直起降飞机，以及察打一体无人机已成为各国军事装备发展的重要方向。

混合电推进技术不仅是实现全电飞行的必然中间阶段，还在与其他新能源动力形式的市场竞争中具有独特的错位优势。一方面，混合电推进系统可充分利用燃气涡轮发动机和电动汽车长期以来积累的工业基础能力，其基础设施配套相对简单、能源供给水平相对充足；另一方面，混合电推进系统能够兼容多种新能源形式，除常规航空煤油外，不论是串联还是并联构型未来都可支持可持续航空燃料（SAF）和氢燃料^[8-9]，具有实现综合油耗降低40%以上、氮氧化物排放降低80%以上的巨大潜力。

混合电推进系统是提升武器装备性能的有力抓手

下一代航空装备将具备大空域宽速域包线飞行、大范围高机动敏

二是满足大功率机载设备以及高能武器的电力需求。未来体系化作战中，先进的探测、通信、电子对抗等设备需要大功率电能作为支撑。同时，以激光武器为代表的定向能武器系统也需要电能作为能量来源。考虑激光武器系统电光转换效率、激光器驱动源效率、冷却系统制冷效率，以及冷却循环系统供电等因素，下一代战斗机的电网容量很可能是现有水平的10倍以上^[10]，这种情况下混合电推进系统对于维持飞行平台稳定工作、满足指数级增长的电力需求具有不可替代性。

三是可通过分布式布局推动飞机和动力系统融合设计。基于电动机的尺寸无关特性，混合电推进系统能够采用多个小功率电动机驱动小尺寸风扇或螺旋桨的分布式布局，从而取代超大直径风扇推进的常规飞机总体设计方案。这样在减少飞机舵面面积和质量、进一步提高推进效率、支持飞机具备短距/垂直起降能力的同时，多动力冗余备份还可大大改善飞机安全性和可靠性，且能量控制更加灵活、系统设计自由度更高，动力系统可根据场景需求较为自由地进行布置，更易从磁、热、声等多维度实现飞发隐身设计，全面提升战场生存能力。

发展现状

国外混合电推进系统研制进展

国际上，各航空强国从国家层面发布了多项混合电推进系统研发计划，推动其工程化应用。美国国家航空航天局（NASA）将混合电推进技术列为重点方向，通过亚声速固定机翼（SFW）计划、先进飞行器计划（AAVP）和前缘异步螺旋桨技术（LEAPTech）计划等来支持相关企业和机构开展混合电推进技术探索，逐步形成了大功率混合电推进系统概念研究牵引和小功率混合电推进技术应用研究并进的发展思路。另外，根据美国空军研究实验室（AFRL）于2017年披露的《无人系统动力与推进系统》报告，基于分布式混合电推进系统的无人机研发正逐渐成为美军装备建设的主要任务之一，从而改善飞行时长、能量效率和隐身作战性能。

飞机制造商正在布局不同功率等级的混合电推进飞行器，通过积

极开展行业内部合作加快相关技术的研发应用。波音公司与NASA联合成立了设计部门研发Sugar Volt混合电推进验证机，同时还资助成立初创企业ZunumAero，预计在2030年前推出最大载客量为50人的串联架构混合电推进客机，最大输出功率达1MW。空客公司计划在2030年和2035年分别完成用于100座和150~200座支线客机的混合电推进系统的研制与验证，并与罗罗公司、西门子公司联合启动了相关验证机计划，重点探索高空大功率电推进系统的热管理和电磁兼容等问题^[11-12]。

航空发动机制造商同样将混合电推进系统研发作为战略重点，形成了较为具体的发展目标，目前兆瓦级混合电推进系统逐步从技术探索转向工程研制。GE公司于2017年发布了混合电推进重大项目研究白皮书，介绍了其在发电机和电动机领域所取得的技术突破，预计到2025年左右完成兆瓦级混合电推进系统的地面和飞行测试。罗罗公司于2020年提出混合电推进技术发展策略，短期内重点关注500kW~1MW混合电推进市场并建立供应链体系，已完成基于M250发动机的混合电推进系统地面测试。普惠公司于2019年启动混合电推进支线客机804研发计划，以此将当前可用电气化技术从千瓦级提升到兆瓦级，同时评估未来混合电推进系统投入商业运营的经济性^[13]。

国内混合电推进系统研制进展

国内针对混合电推进技术的研究起步略晚于国外，相关技术探索和概念论证主要集中在1~4座轻型飞机和无人机领域，重点开展了100kW级以下的燃气涡轮发动机改

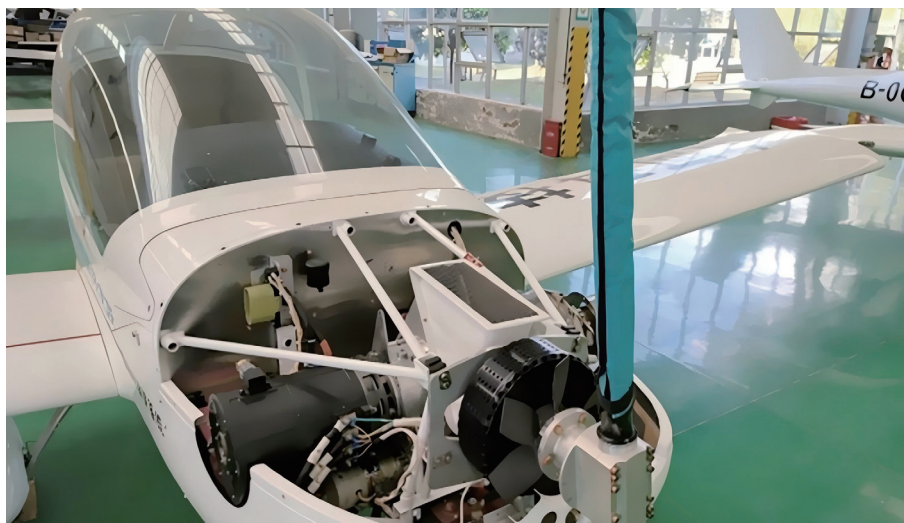
造以及小功率混合动力部件研制，基本验证了串联架构混合电推进系统的总体设计、能量管理和一体化控制等关键技术。

中国航空发动机研究院自2017年起在国内率先开展分布式混合电推进技术研究，目前已初步形成自主软件工具，基本具备混合电推进系统总体设计与仿真分析能力。完成了多套分布式混合电推进/无人机平台总体方案设计，通过缩比模型风洞试验初步验证了分布式混合电推进/无人机一体化设计方法和技术收益。

中国航发湖南动力机械研究所联合山河科技股份有限公司、中国航发南方工业有限公司，基于SA60L轻型运动飞行平台，完成80kW级混合电推进系统演示验证机研制，并于2022年3月成功首飞^[14]，这也是国内首个基于燃气涡轮发动机的航空混合电推进系统演示验证项目。同期，北京动力机械研究所宣布完成了60kW级混合电推进系统第一阶段燃气轮机发电的技术验证，展示了各系统的匹配性与工作稳定性。

关键技术分析

作为从燃油向全电推进过渡的中间形态，混合电推进系统在能量转化与控制、能量供给与分配等功能实现上与全电推进系统密切关联，高功率密度发电机、高效电驱控制、超导电能传输、高能量密度电池、大容量功率转换器等关键技术具有很大程度的共通性。不过混合电推进系统大功率电能的产生与应用是在燃气涡轮发动机上进行的，因此相比全电推进系统还存在诸多特有的关键技术方向。



改装混合电推进系统后的SA60L轻型运动飞行平台

混合电推进总体架构设计与部件集成

混合电推进系统不是燃气涡轮发动机、电动机、电池等部件的简单拼凑，系统综合收益与各部件的特性匹配与协同工作密不可分。为实现机械系统与电气系统的深度耦合，现有的设计方法和模型并不能充分覆盖混合电推进总体设计需求，例如存在着时间尺度设计不一致、控制规律不匹配、能量跨介质调度与管理效率低等问题，必须掌握不同技术路线下混合电推进系统的特性及适用边界，构建混合电推进设计方案评价体系，有针对性地重点开展混合电推进系统需求与子系统匹配、直流输电型电网架构设计、功/热/电融合系统性能仿真与模型设计，以及受限空间下的结构模块化布局设计等研究。

混合电推进飞发一体化综合设计

混合电推进系统的发展本质上是为了尽快满足飞行平台对于高效率推进、高功率提取的迫切需求，因此其架构、布局、控制等方面都

必须与飞行平台高度协同才能发挥出最大的优势。有必要从气动、结构、热电等全维度、全方位开展混合电推进系统与飞行平台的一体化设计研究，开展接口关键参数敏感性协调与迭代、飞发物理接口与结构布局的匹配、飞发综合寻优控制技术研究以及飞发综合能量供给与调配等研究，进一步明确分布式架构等新型气动布局带来的性能收益，形成高效飞发一体化设计准则以及串联、并联架构下混合电推进系统总体性能方案。

大功率燃气涡轮发电设计

针对燃气涡轮发动机与发电机之间调节响应不同步、转动惯量相差过大等问题，在现有的涡轮发电设计能力基础上，设计符合混合电推进系统总体方案约束的核心机改进优化方案，进行综合能量流与功率流的性能匹配设计、多元激励下的发电系统转子稳定性设计、轴功率流的方法等研究，实现燃气涡轮发动机与发电机工作特性协调、结构高

度耦合，从而提升燃气涡轮发电电子系统的效率与功重比。除此以外，为进一步提升并联混合电推进系统的功率提取能力，还需开展内置式电机与燃气涡轮发动机转子集成设计。

燃油/电能综合能量管理

混合电推进系统包括燃油与电能两种不同形式的能量，因此需要在不同飞行阶段对不同能量进行合理分配与管控，实现能量利用率的提升。同时还要统筹热力机械和电气系统的一体化散热问题，保证系统工作稳定可靠。通过混合电推进子系统之间的能量传递与耦合影响关系、燃油和空气可用热沉与电器件之间散热的需求评估、低温工质高功率密度高紧凑度制冷技术，以及全系统预冷与动态稳控技术等研究，掌握各子系统之间的能量传递与相互影响关系，建立综合能量管理的设计方法和流程，形成有针对性的能量管理解决方案，满足飞行平台对配电和热管理的需求。

发展路径思考

发展思路与目标

充分吸纳现有航空电气化共性技术成果，立足航空混合电推进系统特征技术领域，逐步突破高效涡轮发电、分布式电推进等部件级关键技术，具备系统一体化设计、综合热管理等技术能力。统筹未来各类通用飞机、商用飞机、先进战斗机，以及多用途无人机等发展需求，按照“平台由小到大分布推广、技术由常规到非常规逐级提升、整机由地面到空中分层验证”的思路加快航空混合电推进技术创新发展，以现有成熟发动机或核心机平台为基础，开展中小功率等级混合电推进

系统集成验证, 积极布局兆瓦级以上大功率混合电推进系统研发, 为后续混合电推进技术在各类应用场景下的市场化应用做好准备。

预计到2027年完成兆瓦级燃气涡轮发电子系统与储能子系统的集成验证, 实现燃油/电能综合能量管理技术和系统总体性能达标验证; 到2030年完成兆瓦级混合电推进系统适配高速电动垂直起降固定翼飞行器飞行验证; 到2035年完成10MW级混合电推进系统适配支线飞机的研制与集成试验验证。

措施建议

一是鼓励多技术方案探索。评估不同电气化程度的混合电推进系统相比于传统构型发动机的综合收益, 持续开展航空混合电推进系统军民应用场景研究和可行性论证, 掌握不同技术路线下混合电推进系统的特性及适用边界, 构建混合电推进技术方案评价体系。形成完备详尽的发展路线图, 明确未来工作重点和目标任务, 有针对性、有方向地推动混合电推进技术的发展。

二是加速技术攻关与集成验证。充分发挥行业创新主体的作用, 围绕国家级科创中心、国家重点实验室等平台, 以具体型号为牵引, 汇集多方位力量、保持稳定的经费投入, 着力完善混合电推进系统正向设计与集成能力, 尽快突破制约我国混合电推进技术的发展瓶颈, 补足大功率混合电推进系统研发和试验能力短板, 引领我国航空动力发展的新趋势。

三是推动混合电推进飞发融合设计。明确混合电推进系统和配套飞行平台之间的相互作用因素, 建立飞发协调机制, 实现二者从需求

论证、概念设计、技术研发、产品研制到使用维护的全流程、全阶段一体化发展。统筹飞机和推进系统物理接口与结构布局匹配、能量供给与调配等多方面因素, 进一步提升混合电推进系统的交互性、可操纵性和适用性。

四是提前布局产业配套建设。将混合电推进系统产业链从设计生产向运营服务延伸拓展, 完善适航审定体系, 打造具备良性循环、自我发展的商业环境。综合衡量混合电推进市场化发展的投资成本、运营成本、收入潜力和社会影响等, 形成清晰的商业案例来明确其替代价值, 通过明确的产业政策支持, 为相关产品在干支线市场的商业运营做好充足的准备。

结束语

航空动力系统的电气化是未来发展趋势, 在全电推进系统大规模成熟应用之前, 混合电推进系统是相当长一段时间内推动航空业绿色低碳转型、提升飞行平台综合任务执行能力的重要方式, 在军民用各个细分市场均具有广阔的应用前景。当前, 欧美国家在航空混合电推进研究上呈快速发展的态势, 在技术验证与产品研发上持续布局、逐步突破。建议在我国新能源航空发动机总体战略中进一步明确混合电推进系统的发展定位, 基于顶层牵引、围绕军民需求, 全面提升航空混合电推进系统技术创新能力, 加快兆瓦级航空混合电推进系统的集成验证与市场应用, 抢占航空动力变革制高点。

航空动力

(李建榕, 中国航空发动机研究院科技委主任, 研究员, 主要从事

航空发动机总体技术研究)

参考文献

- [1] 王鹏, 鞠新, 郑天慧, 等. 航空混合电推进系统的发展现状及应用前景[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2021, 34(2): 52-57.
- [2] 李开省. 混合电推进支线客机的可行性分析[J]. 航空动力, 2020 (2): 34-36.
- [3] 尹泽勇, 秦亚欣, 李建榕, 等. 新时期我国民用航空发动机自主发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 185-191.
- [4] 向巧, 黄劲东, 胡晓煜, 等. 航空动力强国发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 106-112.
- [5] 朱炳杰, 杨希祥, 宗建安, 等. 分布式混合电推进飞行器技术[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 025556.
- [6] 李洪亮, 康元丽, 回彦年. 电推进飞机促进航空业变革[J]. 航空动力, 2021(5): 23-28.
- [7] 王翔宇. 电动飞行与推进系统变革[J]. 航空动力, 2019 (3): 43-47.
- [8] 王翔宇. 英国零碳飞行发展愿景分析[J]. 航空动力, 2022 (3): 24-27.
- [9] 王翔宇. 氢能航空产业配套分析[J]. 航空动力, 2023 (2): 50-53.
- [10] 穆作栋. 战场电气化: 防务领域的能量系统技术革命[J]. 航空动力, 2020 (1): 75-78.
- [11] 兰海青. 支线/干线客机混合电推进技术[J]. 航空动力, 2021 (6): 41-44.
- [12] 廖忠权. 支线客机的混合电推进之路[J]. 航空动力, 2019 (5): 61-64.
- [13] 李龙, 王鹏. 混合电推进系统关键技术研究进展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2021, 34(3): 49-53.
- [14] 梅庆, 金海良, 申余兵. 航空油电混合动力系统设计及试验[J]. 航空动力, 2023 (1): 39-42.