

无人机动力系统技术方案对比分析

刘震涛¹, 符字简¹, 高健², 夏娟¹

1. 浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 中国兵器工业集团有限公司, 北京 100032

摘要:为辨析当前主流无人机动力系统的特点与应用前景, 简要介绍无人机技术的发展历程, 针对当前行业对提高无人机续航、效率与可靠性的核心需求, 通过构建多维度的评价体系, 系统对比分析纯电动、燃油、混合动力三大主流无人机动力系统技术方案。结果表明: 无人机动力系统已呈现多元化、场景化发展趋势; 纯电动系统凭借高可靠性、低噪声的优势主导中小型无人机市场; 燃油动力系统的能量密度较高, 在长航时、大载质量任务中具有不可替代性; 混合动力作为新兴技术方向, 有效融合了纯电动和燃油动力系统的优势, 有望突破现有续航瓶颈, 推动无人机动力系统向更高效、更清洁、更智能的方向发展。

关键词: 无人机; 动力系统; 燃油动力; 电力驱动; 混合动力

中图分类号: V279

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)06-0001-11

引用格式: 刘震涛, 符字简, 高健, 等. 无人机动力系统技术方案对比分析[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(6): 1-11.

LIU Zhentao, FU Zijian, GAO Jian, et al. Comparative analysis of technical solutions for UAV power systems[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5): 1-11.

0 概述

2024年, 党的二十届三中全会通过的《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》将发展通用航空和低空经济纳入国家发展战略体系, 为我国低空领域开发与产业创新指明了方向。伴随着多项支持性政策的持续发布与制度环境的不断完善, 空中交通需求逐步提高, 加之无人机技术飞速发展, 低空经济迎来前所未有的发展机遇。在这一背景下, 无人机凭借其自动化程度高、机动性强、运营成本低、安全性良好等优势, 迅速成为低空经济运营体系中的核心载体, 并广泛应用于物流配送、城市交通、应急救援、农林植保等多个领域。无人机是通过远程遥控设备或自主程序控制实现飞行的无人驾驶航空器, 是信息化时代的典型智能装备。随着通信、导航、人工智能等关键技术的持续突破, 无人机已从早期的军事用途逐步扩展至民用和工业应用, 成为推动国防现代化和经济高质量发展的重要技术力量。它不仅承担侦察、监视、打击等军事任务, 更在地理测绘、环境监测、电力巡检、影视拍摄等民用领域发挥越来越重要的作用。

无人机具有灵活高效、成本可控及较好的环境适应性, 正广泛融入经济社会各领域。在民用方面, 无人机技术推动低空经济蓬勃发展, 不仅可提供旅游观光体验, 也在城际通勤、区域客运和私人飞行中展现出潜力, 有望构建新型三维立体交通网络; 同时, 无人机已成为警务安防的核心工具, 用于执行空中巡逻、交通执法等任务, 提高公共安全行动的效率。在国防军事领域, 无人机是现代军事系统中提高作战与保障能力的关键装备, 可遂行侦察、打击、通信等多样化作战任务。在公共服务方面, 无人机为城市与社会治理提供了强大技术支撑, 广泛应用于城市管理、消防灭火、紧急救援、农林治理、自然保护、地理勘测、科

收稿日期: 2025-09-24

基金项目: 国防科工局基础产品创新计划动力专项资助项目(** 关键技术)

第一作者简介: 刘震涛(1971—), 男, 山东德州人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为车船动力系统零部件轻量化及可靠性设计理论与方法、多能源动力系统能量管理理论及方法, E-mail: liuzt@zju.edu.cn。

学研究和电力巡检等场景。此外,无人机技术正在深刻改变物流行业的运作模式,通过提供同城即时配送、城际空中快递及乡村物流服务,有效破解了“最后一公里”难题。无人机产业因具备天然的军民两用属性,成为贯彻军民融合战略的典范。军民资源共享、技术协同创新以及需求双向牵引的发展机制,显著推动了无人机系统在平台设计、载荷集成、数据链与控制等方面的研究进展,不仅提高了我国国防装备的智能化水平,也培育了一批具有国际竞争力的无人机龙头企业,强化了无人机在国家空天体系与数字经济中的战略地位。

1 无人机技术发展历程

无人机技术的发展历程跨越百年,从早期的军事试验逐步拓展至民用和商业领域。1917年,美国海军成功改装了世界上第一架由无线电操控的无人飞行器——“空中鱼雷”(Automatic Air Torpedo)^[2],初期主要应用于靶机训练和军事试验。20世纪60年代,无人机在实战中开始发挥重要作用。在越南战争期间,美军广泛使用“火蜂”(Firebee)系列无人机执行高空侦察与情报搜集任务,显著提高了战场感知能力,也验证了无人机在复杂环境下的军事价值^[3]。我国在1966年自主研制并成功首飞第一架大型靶机——“长空一号”,标志着中国进入无人机自主研发阶段,为后续航空技术积累奠定了基础^[4]。20世纪80年代,无人机应用领域不断拓展,日本雅马哈公司于1987年成功开发世界上首款农业喷洒无人直升机R-50,并在1989年实现试飞和实际应用,开始了无人机在农林植保中规模化使用,极大提高了作业效率与精确性^[5]。1994年,美国通用原子公司研制出著名的“捕食者”(Predator)无人机^[6],该机型不仅可执行长时间侦察监视任务,还可挂载导弹实施精确打击,实现了“察打一体”的作战模式,深刻影响现代军事无人机的技术路线与发展方向。2003年,美国国家航天局成立无人机应用中心(UAV Application Center),系统推进无人机在遥感、通信、气象监测等商业与科研领域的应用研究,进一步拓宽了无人机的使用场景^[7]。民用无人机领域在21世纪迎来爆发式增长,2006年成立的大疆创新公司推出了消费级和多用途无人机,改变了民用无人机的产业格局与应用生态。与此同时,国内外多种型号无人机陆续问世并广泛应用:国外代表性机型,如MQ-1B“捕食者”、MQ-1C“灰鹰”等,并持续迭代;国内也涌现出如“长鹰”“彩虹”“翼龙”等系列高端无人机,具备侦察、打击、通信中继等多任务能力。近年来,无人机不仅在军事领域作用愈发突出,在民用方面也实现规模化发展:2023年,我国交付了超过317万架民用无人机,通用航空制造业产值突破510亿元,具备了巨大的市场潜力与完整的产业链优势^[8];自2020年以来持续进行的俄乌冲突中,双方投入各类无人机总数超过4000架,无人机已成为战场侦察、火力引导、精确打击和兵力支援的核心装备^[9];2024年,“低空经济”首次写入我国政府工作报告,无人机作为关键承载平台,在物流配送、城市治理、应急救援等多个方面发挥重要作用。无人机发展历程中,军用无人机起步较早,以作战需求为牵引、技术创新为动力,在现代战争中具有显著优势,需求持续增长;民用无人机虽起步较晚,但发展极为迅速,应用场景不断拓展,市场潜力巨大,已成为推动经济与社会发展的重要力量。

2 无人机动力系统技术发展

无人机动力系统可分为热动力与电动力,主要动力方案包括燃油、纯电、混合动力、氢能源4种。传统燃油动力具有载质量大、航时长长的优点;纯电动力是清洁能源,适配智能化、噪声小的需求,但航时短,负载能力弱;混合动力拥有纯电动力的优势,同时弥补了续航短板;氢能源动力仍处于早期发展阶段,有望在大机型上率先应用。

无人机动力系统在很大程度上决定整机的任务适配性与发展方向。当前,无人机动力系统的发展主要受应用场景驱动,不同领域对动力形式的需求差异明显。在军用领域,由于作战环境复杂、载荷与航时要求极高,传统的热动力系统依旧占据主导地位,其成熟度较高、动力较强,能够满足远程飞行和重型挂载任务的需求。相比之下,民用领域更强调经济性与环保性,广泛应用于物流配送、农业植保、城市巡检

等多个领域,动力选择由燃油动力逐渐向纯电动力和混合动力过渡。纯电动力具有结构简单、维护便利、噪声较低、适配智能化的优势,广泛应用于小型、轻型无人机市场;混合动力系统在一定程度上兼顾了纯电的环保特性和燃油的航时优势,成为中大型民用无人机的重要发展方向。

燃油动力依托传统航空发动机和活塞发动机技术,具备较强的任务适应性和工程经验积累,在航时较长和载质量较大的无人机中占据优势;纯电动力凭借清洁能源属性,与智能电池管理和飞行控制系统结合紧密,推动了消费级与轻型工业级无人机的快速普及;混合动力能够在一定程度上缓解电池能量密度不足的限制,提高无人机的续航能力与应用灵活性;氢能源被视为前沿探索方向,具备高能量密度和零排放潜力,但受制于制氢、储氢及燃料电池可靠性等关键技术瓶颈,目前尚处于验证与试点阶段,预计未来将在中大型无人机领域率先落地。整体而言,随着任务需求不断扩展和能源技术迭代,无人机动力系统正呈现多元化发展趋势,不同技术路线将在军用与民用的不同场景中形成互补格局。

3 无人机动力系统对比与分析

3.1 燃油动力推进系统

燃油动力推进系统主要指以甲醇、汽油或航空煤油为燃料的发动机系统,是目前军用无人机的重要动力来源。常见的无人机发动机主要包括活塞式发动机、涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机、涡轮轴发动机等,类型如图 1^[10]所示。

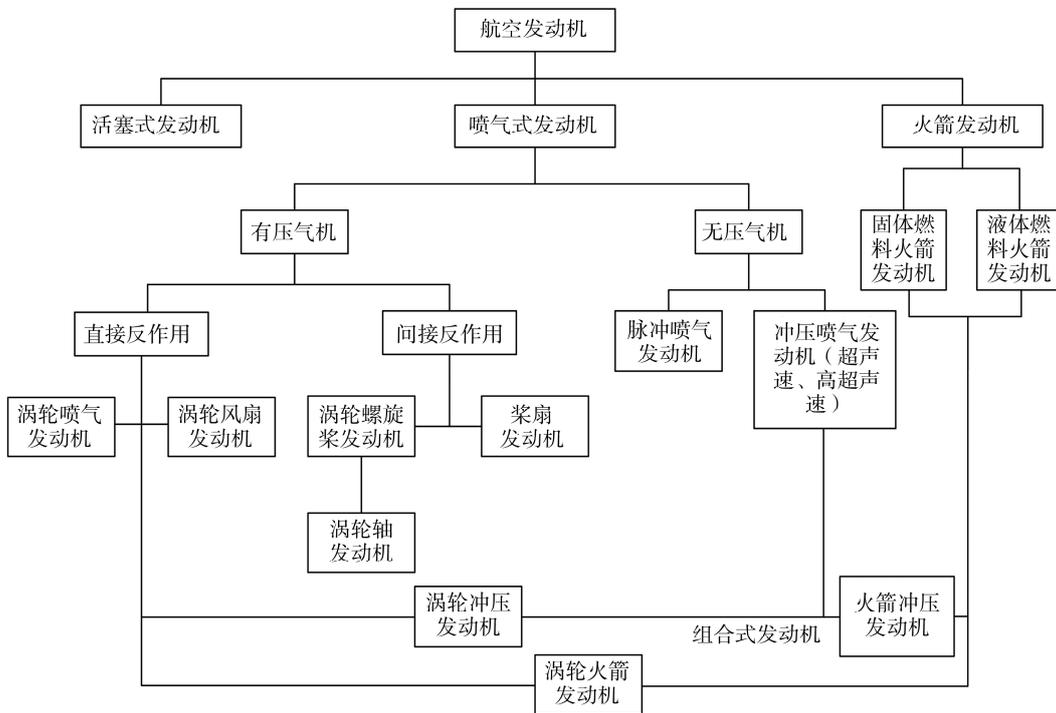


图 1 航空发动机分类

不同发动机的性能特点不同,适用于不同的任务场景,其中大功率航空发动机目前主要应用于军事无人机领域。不同燃油动力无人机发动机类型在功率、适航高度、续航时间、制造成本及应用领域对比如表 1 所示。目前无人机燃油动力系统呈现多元化技术路径并存发展,各类动力装置因特性差异适配不同的任务场景。活塞式发动机具有制造成本较低的优势,在靶机、侦察无人机及中短航时任务中占有一席之地,但其较低的比功率和有限的适航高度(3 000~8 000 m)制约了其在高端平台的应用。涡轮喷气发动机和涡轮风扇发动机可满足高空、高速及长航时的需求,新型涡扇发动机的功率可达 50 000 kW,续航时间显著延长(8~42 h),但制造与运营成本相对较高。涡轮螺旋桨发动机在效率与功率之间取得了较

好平衡,其比功率和续航能力较强,但成本约为活塞发动机的10倍。涡轮轴发动机在无人直升机领域的占比较大,其高比功率确保了飞行器具备优异的载荷和机动性能,但制造成本较高。从察打一体无人机发展历程来看,第一代察打一体无人机普遍采用涡桨发动机或活塞式发动机;随着飞行速度和效率要求的提高,第二代察打一体无人机开始配装涡扇发动机;至第三代察打一体无人机,涡扇发动机因具有优异的综合性能已成为该类型无人机的首选动力装置^[11]。

表1 燃油动力无人机发动机性能和应用对比

发动机类型	功率/kW	比功率/ (kW·kg ⁻¹)	适航高度/m	续航时间/h	制造成本	应用领域	适用领域
活塞式	<2 000	<1.43	3 000~8 000	1.0~6.0	较低	军民	靶机、侦察无人机、长航时无人机
涡轮喷气式	<15 000	2.7~10.0	3 000~14 000	0.2~2.5	较高	军	靶机、高空高速无人机
涡轮风扇式	<50 000	3~12	14 000~20 500	8.0~42.0	较高 ^①	军民	长航时无人机
涡轮螺旋桨式	<10 000	5~6	13 000~16 000	8.0~42.0	较高 ^②	军民	长航时无人机
涡轮轴式	<7 457	5~10	300~7 600	3.0~24.0	较高 ^③	军民	无人直升机

①直接运营成本比涡桨发动机高35%~43%。②约为活塞式发动机的10倍。③约为活塞式发动机的10倍。

目前燃油动力推进无人机技术的发展重点在于突破续航与载质量的瓶颈,未来的创新也将围绕提高综合效能展开。一方面,混合动力技术致力于融合不同动力源的优势,例如尝试将燃油发动机的高能量密度与电动机的快速响应相结合;另一方面,应用绿色氢燃料等替代燃料在提高高海拔环境下燃烧效率方面潜力较大,为清洁长航时动力提供了新路径。此外,新工艺与技术也层出不穷,某航发公司采用3D打印技术研制的微型涡喷发动机,有效提高了部件效率并减轻了质量^[12];不断推出的高可靠性、高比功率的航空活塞发动机,可以适应更广泛的应用场景^[13]。发展趋势表明,无人机燃油动力系统将在大载荷、高机动性的基础之上,进一步满足军民领域高性能、高可靠性、低成本及环境友好的需求。

3.2 纯电动推进系统

某电动无人机空间扫描飞行控制系统结构示意图如图2所示,图中CMOS为金属氧化物半导体。

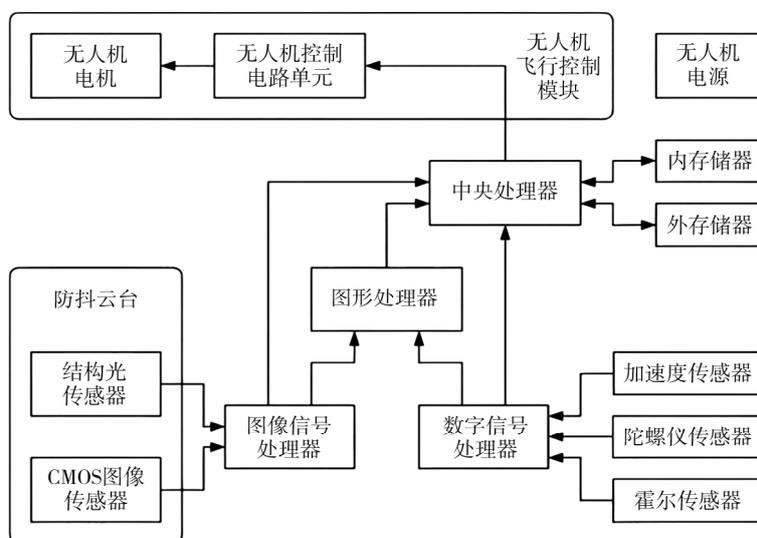


图2 某电动无人机空间扫描飞行控制系统的结构示意图

无人机的纯电动推进系统主要组成部分包括电动机、电池组、电子调速器、动力分配系统、螺旋桨以及飞行控制系统。电动机是系统的核心部件,它将电池储存的电能转化为机械能,并驱动螺旋桨产生动力,直接影响无人机的飞行速度、稳定性和载质量。常见的无人机电动机类型为无刷直流电机,电动机的

电力来源是电池组,通常使用锂聚合物电池或锂离子电池,并配备电池管理系统实时监控电池的健康状况,确保飞行过程中的安全性并延长电池的使用寿命。电子调速器通过智能调节电动机的转速,精确控制电动机的功率输出,进而调整无人机的功率,确保飞行器的稳定性和响应性。动力分配系统负责将电池的电能按需分配给各电动机,保证飞行器的平衡与稳定。螺旋桨作为直接将电动机功率转化为动力的部件,其大小、数量和布局根据不同无人机的设计需求而有所不同。飞行控制系统是无人机的“大脑”,通过实时监控传感器数据精确调整电动机的功率输出,保持飞行的稳定性和精准性。

随着互联网技术的发展,现代无人机的飞行控制系统还能与云端服务器连接,实现远程飞行控制和飞行参数优化调整,提高飞行的安全性与效率。此外,智能化的自我诊断与故障预警系统结合数据传输技术,使无人机能够实时反馈飞行数据、环境变化和操作指令,从而实现群体协作、航迹优化和动态任务调整。通过这些精密部件和技术的协同工作,纯电动推进系统不仅能确保无人机高效稳定地飞行,还能在多变的环境和复杂任务中保持良好的适应性和可靠性。

纯动力系统具有结构简单、运行高效及零排放的优点,广泛应用于中小型无人机。目前,受电机功率限制,电动无人机固定翼布局有一定局限,主要采用多旋翼构型与垂直起降固定翼构型,市面上基于两种构型生产的纯动力系统无人机型号对比如表2所示。

表2 纯电动多旋翼构型与垂直起降固定翼构型无人机对比

构型	型号	应用类型	最大速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	最大航程/km	最大航时/min	最大起飞质量/kg
多旋翼	DJI FlyCart 30	载物货运	72.0	28		95
	大疆经纬 M30	公共服务	82.8		41	4
	百纳智航 A-50	植物保护	32.4		41	100
	中飞科技 D25L-8	植物保护	36.0		40	91
	中飞科技 S32P	高空清障			30	40
垂直起降	中飞科技 V50		125.0	600		68
固定翼	纵横 CW-15		61.0		180	

多旋翼与垂直起降固定翼两大主流构型的性能差异直接反映了纯动力系统在不同应用场景下的技术权衡。多旋翼机型,如 DJI FlyCart 30、大疆经纬 M30 等凭借垂直起降能力和悬停稳定性,在货运、公共服务等场景占主导地位,但其能量效率较低,航程普遍较短,通常小于 50 km,核心限制在于电池能量密度和旋翼力效。当前锂聚合物电池的能量密度约为 $180\sim 240\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}^{[14]}$,无人机生产企业通过优化动力链效率提高航时,例如采用高精度磁场定向控制(field orientation control, FOC)技术降低驱动损耗^[15],或通过气动设计,如优化桨叶形状减少阻力以提高整机能效比。

垂直起降固定翼机型,如中飞科技 V50、纵横 CW-15 无人机融合了多旋翼无人机的起降便利与固定翼无人机的高效巡航,其长航时与高速(最大速度可达 $125\text{ km}/\text{h}$)源于升阻比优化和能量管理策略,巡航阶段主要依赖机翼产生升力,显著降低功率需求。然而,该类机型需解决垂直起降与平飞模式下的动力分配问题,依赖复杂电控系统实现动力切换,且对电池功率密度和质量分布更敏感。

纯动力系统的技术瓶颈集中于电池性能,当前电池能量密度限制了其航程与载荷,电池能量密度与电机功率系数对纯电多旋翼无人机的载质量和航时的影响如图3^[9]所示。

现阶段三元锂电池能量密度约为 $250\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$,部分固态电池能量密度可达到 $450\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}^{[16]}$,但续航与载质量依旧是纯电无人机的最大短板。未来需通过高能量化学体系(如固态电池)或轻量化材料突破此限制。热管理、充放电效率及循环寿命也是影响其实用性的关键因素。此外,智能能量管理系统成为技术研发核心,通过实时监测电池状态、动态调整功率输出以延长续航时间。

纯电无人机动力技术正从单一提高电池性能转向系统级优化,包括高效电驱动设计(如无传感器 FOC 算法)、气动创新(如复合翼/倾转构型)与智能能量分配。未来随着电池技术革新与整机效率提高,

纯电动有望在更大载质量、更长航时任务中替代混合动力,但短期内仍需根据任务需求即载质量-航程-速度选择最优构型与动力配置。

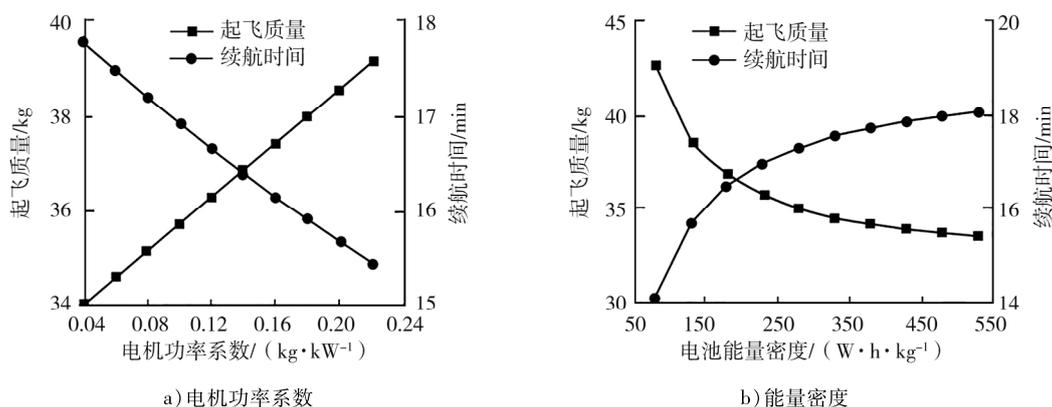


图3 电池能量密度与电机功率系数对起飞质量和续航时间的影响

3.3 油电混合动力推进系统

混合动力推进系统是一种新型动力装置,其基本工作原理是:通过传统发动机驱动发电机发电,为分布式布置在机翼或机身的多个电机/螺旋桨提供电力,并由电动机驱动螺旋桨提供绝大部分或全部功率。该系统能够显著增大飞行器在宽工况范围内的动力效率,大幅延长续航时间。对并联式构型,还可通过飞行任务剖面的综合能量优化管理,有效降低全任务循环的综合燃料消耗,进一步提高飞行器的能效与航时,并联式混合动力推进系统综合能量优化管理如表3^[17]所示。

表3 并联式混合动力推进系统综合能量优化管理

工况	推进功率/kW	燃气涡轮功率/kW	电池功率/kW	电池容量百分比/%	飞行时间百分比/%
起飞	100	70	30	93	2
攀升	100	70	30	93~40	21
巡航	50	70	-20	40~60	40
下降	40	70	-30	70~50	35
着陆	10	0	10	50~40	2

根据结构和工作模式,混合动力系统主要可分为串联、并联和混联3种架构。

3.3.1 串联架构

串联架构中,传统发动机带动发电机产生电能,并通过电缆传输至电动机。在爬高等高功率需求阶段,电池可作为辅助能源提供额外动力;在巡航或下降等低功率阶段,燃气涡轮发动机可持续运行在高效工作区,一部分功率用于驱动涵道风扇、旋翼或螺旋桨,剩余功率可为电池充电。串联式混合动力通常采用分布式推进布局,如图4所示^[18]。一台核心机带动多个电动螺旋桨或风扇,依托能量管理系统实现能量高效分配。

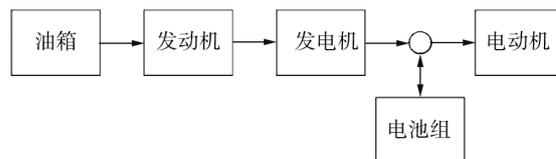


图4 油电混合动力推进系统串联架构原理图

目前无人机油电混合动力推进系统的串联架构已成为突破纯电续航瓶颈的关键技术路径之一,其通过“燃油发动机发电-电池储能-电动机推进”的能源转换模式,实现了动力源解耦与能效优化。该架构利用燃油发动机持续运行于高效工作区间驱动发电机,电能既可直接驱动电动机,也可为电池充电,从而

在无人机起降和高功率需求阶段由电池提供峰值功率,在巡航阶段依赖燃油发动机维持高效发电。目前市面上3款采用油电混合动力推进系统串联架构的无人机性能对比如表4所示。

表4 油电混合动力推进系统串联架构无人机性能对比

型号	最大速度/(km·h ⁻¹)	最大航程/km	最大航时/h	最大起飞质量/kg	最大飞行高度/m
蜂巢航宇 HC-540	162		8.0	30	4 000
灵动鹰-25 六旋翼可折叠无人机	65		1.5	5	2 500
弥勒浩翔科技 DLE128MA	36	432	6.0	53	3 000

由表4可知:串联架构在不同等级无人机上均展现出显著性能优势;蜂巢航宇 HC-540 的最大速度为 162 km/h,航时为 8 h,体现了串联系统在载质量为 30 kg 的中等载荷无人机中平衡速度与耐久性的能力;弥勒浩翔科技 DLE128MA 的航程为 432 km,超长航程表明其具有巡航效率优化能力,适用于大范围巡检与测绘;灵动鹰-25 作为小型折叠无人机,虽航时仅为 1.5 h,但串联结构可为其提供更紧凑的布局与快速响应能力。这些性能差异间接反映了串联架构的灵活性——通过调整发电单元功率、电池容量及能量管理策略,可针对不同任务需求定制动力方案。

串联架构的技术优势集中体现在三方面:1)通过机电解耦简化机械结构,降低传动损耗,并允许发动机独立安装于最佳散热位置;2)依托智能能量管理,如基于荷电状态的动态功率分配算法,实现油电协同,例如在起飞阶段调用电池峰值功率补偿动力缺口,在巡航时利用富余电能充电,从而将续航时间相对纯电系统大幅提高^[19];3)增强环境适应性,如高原地区可通过调整发电单元空燃比维持效率,并结合电池低温预热保障低温起动性能。

然而,该架构仍面临因发电单元和电池质量增加导致的比功率的质量冗余、燃油发动机高温与电池组热管理复杂性,以及智能化带来的控制算法挑战。未来技术发展将聚焦于轻量化材料、高能量密度电池与预测性能量管理策略,进一步挖掘串联混合动力的效能潜力。

3.3.2 并联架构

油电混合动力推进系统并联架构原理图如图5所示。由图5可知:并联架构动力推进系统在传统发动机基础上耦合了内置式起动发电机,以实现高功率电能的生成与利用。起动阶段,起动发电机作为电动机将发动机带动到点火所需转速;进入稳定工作后,切换为发电机模式,提取发动机功率为机载设备供电。系统通过外置储能装置,结合燃油与电能的综合调度,实现全飞行阶段的高效能量管理,如图6所示。通过燃油与电能的综合能量调配,可降低能耗、提高航程或滞空时间,适用于对飞行性能要求较高的任务场景。其优点包括无需额外发电机,整机体积相对紧凑,油耗较低,功率响应快,高空高速特性良好;缺点是制造成本较高,系统结构复杂,并在一定程度上限制了混合动力系统的综合性能优化。该方案更适用于中高速无人机、公务机、干线客机等对飞行性能有较高要求的航空器。

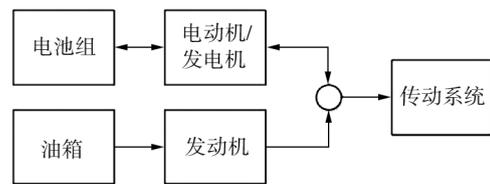


图5 油电混合动力推进系统并联架构原理图

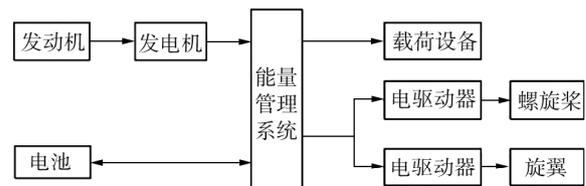


图6 油电混合动力推进系统并联架构能量管理

与串联架构将发动机作为发电机、仅由电动机提供功率的方式不同,并联架构保留了发动机直接输出机械功率的能力,同时集成电驱动单元作为补充动力。这种结构避免了串联模式中机械能-电能-机械能多次转换带来的效率损失,尤其在高速巡航阶段能量利用率更高。此外,并联系统在动力冗余性和

响应速度方面表现更出色,电驱动单元可快速补偿发动机功率波动,更适合高动态飞行任务。然而,相比串联架构在总体布局与控制策略上的灵活性,并联系统在电动功率比例和能量优化自由度方面仍存在一定约束。

3.3.3 混联架构

混联架构与并联方式的主要区别在于配备了独立的发电机,发动机可与电动机协同工作并可同时对电池组充电,混联架构原理图如图7所示。在高功率需求阶段(如爬升),发动机与电动机共同驱动旋翼/螺旋桨;在低功率需求时,可灵活选择由发动机单独驱动或完全由电动机驱动。该架构工作模式灵活,动力充沛,但系统结构复杂,占用空间大,且控制策略设计难度较高,因此不太适用于小型无人机。其传动系统通常配备两套机械变速机构,通过齿轮系或行星轮结构综合调节发动机与电动机的转速。目前常见的优化传动方案包括输入功率分流和输出功率分流两种混合电力推进系统。

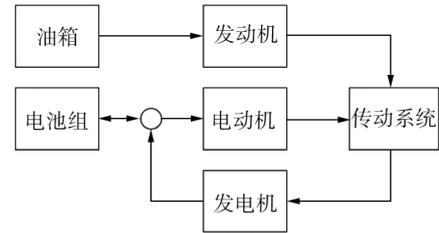


图7 油电混合动力推进系统混联架构原理图

在混合动力无人机系统中,发动机直接影响其性能与适用场景,目前主要分为活塞发动机混合动力与涡轮发动机混合动力两种技术路线。活塞发动机混合动力系统具有油耗低、体积小、环境适用性好、制造成本较低等优点,但其功率、比功率比涡轮发动机低,高空性能不足,且运行噪声较大,主要适用于载质量较小、低成本的低速中小型无人机,如VH-3-185混合动力系统、HPS400混合动力驱动系统等。涡轮混合动力系统具备比功率较高、零部件少、结构相对简单及噪声较小等优势;但制造成本高,油耗较大,且响应速度通常不及活塞式发动机,因此该动力方案更适用于大载质量、长航时及高性能要求的中大型无人机,如Chappell C1采用分布式电推进和涡轮发电机电池结构可实现有效载质量为13 kg,续航里程为483 km。

3.4 燃油动力与油电混合动力系统对比分析

在无人机动力系统的发展过程中,燃油动力与油电混合动力呈现出显著不同的技术特征与应用前景。燃油动力系统技术成熟,具备超过两百年的实践积累,产业链完整,功率覆盖范围广,且在载荷能力和续航时间方面表现突出。但燃油动力系统存在机械响应迟缓、动力输出一致性不高、环保性能较弱等问题,尤其在频繁起降的应用场景下,其燃油经济性较差,运行成本较高。

相比之下,油电混合动力系统在环保性能、运行噪声控制和运营成本方面具有优势,并能够在发动机发生故障时提供更高的安全性,支持应急降落操作。但目前该技术实际应用案例有限,在功率、载质量及续航时间方面仍存在一定局限,同时其适航认证过程也面临更多挑战。两款尺寸相近的不同动力类型无人机的性能对比如表5所示。

表5 市面两款不同动力类型无人机的性能对比

型号	动力系统	最大起飞质量/kg	最大任务载荷/kg	飞行速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	续航时间/h	升限/km
中飞科技 HUA-50	燃油	26.0	8	100	6	5
纵横 CW-25	混动	29.5	6	100	6	7

虽然混合动力无人机减少了少量动力性能,但能够大幅改善环保性与噪声,同时还能降低油耗。燃油动力无人机中飞科技 HUA-50 在最大任务载荷上具有传统优势,这使其在执行重载侦察、特种设备搭载等任务时更具潜力;油电混合动力无人机纵横 CW-25 在最大起飞质量与实用升限两项关键指标超过了 HUA-50,体现了混合动力系统在能量综合利用与高空、高原环境适应性方面的巨大潜力。两款机型在飞行速度与续航时间上达到了同等水平,这表明先进的混合动力技术已在核心性能指标上与传统燃油系统持平,而且在环保、噪声与安全性方面具备优势。不同推进系统巡航距离对最大起飞质量和燃油消耗的影响如图8^[20]所示。

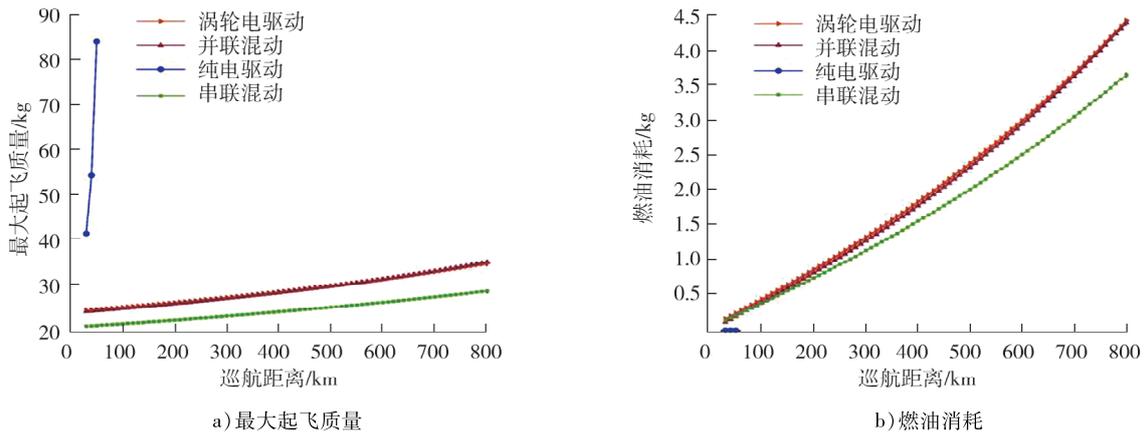


图8 不同推进系统巡航距离对最大起飞质量和燃油消耗的影响

综合以上燃油动力和油电混动系统的优缺点分析可知,发展油电混合动力系统具有明确的现实必要性。当前燃油动力系统仍面临多项严峻问题:国内在高性能航空发动机领域与国际先进水平存在差距,部分型号依赖进口,中小型无人机缺乏成熟可靠的国产动力装置,高空长航时动力平台存在技术空白;在军事应用方面,燃油动力系统由于噪声和热辐射特征明显,隐身性能不足;在民用领域中,高油耗与排放问题也限制了进一步推广。

因此,推进油电混合动力技术研发,不仅有助于补齐现有动力系统的短板、完善航空发动机型谱,也是我国突破技术壁垒、减少对外依赖、布局新能源动力系统,进而提高全球竞争力的重要路径。

3.5 纯电力与油电混合动力系统对比分析

混合动力系统融合了传统燃油动力与电力推进的技术特点,与纯电力系统相比,在多项关键性能上具有较大优势:其最大起飞质量和电池负载需求较低,巡航高度更高,适用范围更广,具备更强的载荷能力、更远的飞行距离以及更低的运营成本。以飞行汽车为例,混合动力系统能够实现更高的飞行速度、更长的航程以及更大的载人数与载荷能力。当前市面2种混动推进和纯电无人机的性能对比如表6所示。

表6 当前市面2种油电混动和纯电力无人机基本性能对比

型号	动力系统	最大速度/(km·h ⁻¹)	最大航程/km	巡航速度/(km·h ⁻¹)	巡航高度/m
基于SA60L轻型运动飞机	油电混动	170	1 200		4 000
锐翔RX-1	纯电动	160	24	120	1 500

基于SA60L轻型运动飞机的混合电推进系统和锐翔RX-1E电动飞机,体现了当前航空电推进技术发展的两种主要方向。SA60L采用的串联混合动力架构,通过将燃油发动机与发电机耦合,作为持续飞行的主供电单元,同时搭配储能电池用于高功率需求阶段。该系统的技术优势在于显著提高航程性能,其实用升限4 000 m也表明其动力系统具备充足的能量储备,能够满足大多数现有通航任务的性能要求。从技术实现角度分析,混合动力方案有效规避了当前锂电池能量密度低的根本性限制,是一种兼顾环保性与任务实用性的过渡路径。然而,该系统的复杂性较高,涉及多能量源的协调管理与质量控制,对系统集成和能量管理策略提出了挑战。

相比之下,锐翔RX-1E作为一款纯电动飞机,其系统构成更简单,完全依赖机载电池储能。其最大航程为24 km,反映了当前电池技术对飞行器性能的严格制约。该机型实用升限1 500 m和巡航速度120 km/h表明适用于特定低空、短时任务的应用场景,如初级飞行训练或局部区域监测。纯电动推进的优势在于零排放、低噪声以及维护成本较低,但其应用范围的拓展直接依赖于未来电池能量密度技术的突破。然而,该技术目前仍面临成本较高、应用规模有限等问题,整体尚处于发展起步阶段。2020—2030年电推进技术飞机性能发展如表7^[21]所示。

表7 2020—2030年电推进技术飞机性能发展

年份	航程/km			座级			功率/kW		
	纯电垂直起降飞机	纯电传统起降飞机	混合电起降飞机	纯电垂直起降飞机	纯电传统起降飞机	混合电起降飞机	纯电垂直起降飞机	纯电传统起降飞机	混合电起降飞机
2020	150	200	400	1~4	1~4	4~6	150	50	200
2025	250	400	800	4~6	4~6	1~19	500	200	1 000
2030	400	600	1 000	6~9	19	19~50	1 000	1 000	2 000

当前无人机动力系统发展路径深刻反映了不同应用场景对能量密度、续航里程及载荷能力的综合需求。纯电动力系统具有可靠性高、噪声低和易维护等优势,在中小型无人机和短途任务中占据主导地位,2025年纯电垂直起降飞机可实现航程为250 km和座级为4~6,但其续航能力受限于电池能量密度,面临长航时、大载质量的技术瓶颈问题挑战。油电混合动力系统通过三种联合架构实现了动力源解耦,使燃油发动机持续运行于高效工作区间,显著提高了航程能量利用效率。混合电起降飞机在2025年已实现航程为800 km和功率输出为1 MW,到2030年更将扩展至1 000 km和2 MW功率、覆盖19~50座级应用场景。

混合动力的核心优势在于融合了燃油的高能量密度与电驱动的灵活性和环保性。研究表明:混合动力系统的燃油消耗率比纯燃油系统可降低30%左右,且通过智能能量管理策略如基于模糊控制的功率动态分配^[22],进一步优化了全任务周期的经济性。此外,混合动力尤其适用于分布式推进的电动垂直起降飞行器,因其无需机械传动结构,简化了系统设计并提高了冗余安全性。然而,该技术仍面临质量冗余、热管理复杂及控制算法挑战,未来仍需通过提高电池能量密度、轻量化材料和能量优化管理对无人机进行持续优化。混合动力技术因其卓越的续航性能,已成为当前长航时飞行器的优选推进方案,正在成为低空经济与新型航空器研发的重要方向。未来一段时间内,混合动力与纯电动力预计将长期共存、互补发展。

总体而言,纯电动力与油电混合动力并非替代关系,而是互补共存的技术路线。纯电系统适用于城市短途运输、巡检等低功耗场景,混合动力是突破续航瓶颈、实现支线物流和城际通勤的关键路径,尤其在高海拔、低温等极端环境下更具适应性。未来随着电池技术革新和混合动力系统优化,无人机动力技术将呈现纯电主导末端配送、混动引领支线运输的多元化发展格局。

4 结束语

无人机动力系统的发展呈现出多元技术路线并存、军民应用协同推进的鲜明特征。燃油动力凭借其成熟可靠、载质量较大和航时较长的优势,在特定任务场景中仍不可替代;纯电动力以其环保、低噪、低维护成本的特点,成为消费级和工业级中小型无人机的主流选择;油电混合动力作为重要发展方向,正逐步展现出其在平衡续航与性能、提高能效与可靠性方面的巨大潜力。未来,随着高性能电池、高效发电机、智能能量管理以及氢燃料电池等技术的持续突破,无人机动力系统将朝着更高效、更清洁、更智能的方向演进,进一步拓展无人机的应用边界,为低空经济建设和国家安全提供坚实支撑。同时,应重视关键技术自主攻关、适航标准体系构建和产业生态培育,推动我国在全球无人机技术竞争中占据更有利地位。

参考文献:

- [1] 中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定[Z/OL]. (2024-07-21)[2024-08-30]. <http://cpc.people.com.cn/n1/2024/0721/c64387-40282037.html>.
- [2] 肖永利,张琛.微型飞行器的研究现状与关键技术[J].宇航学报,2001,22(5):26-32.

- [3] YAN B B, LI Y, DAI P, et al. Aerodynamic analysis, dynamic modeling, and control of a morphing aircraft[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(5): 04019058.
- [4] 吕厚谊. 无人机发展与无人机技术[J]. *世界科技研究与发展*, 1998, 20(6): 113-116.
- [5] 周建军, 陈超, 崔麦会. 无人直升机的发展及其军事应用[J]. *航空科学技术*, 2003 14(1): 38-40.
- [6] MCCALMONT J F, UTT J, DESCHEENES M, et al. Sense and avoid technology for global hawk and predator UAVs[C]// *Proceedings of Infrared Technology and Applications XXXI*. Orlando, USA: SPIE, 2005: 684.
- [7] 朱青. 无人机测量技术在地形测量及制图方面应用分析[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
- [8] 高尚. 低空经济视域下的无人机产业发展研究[J]. *现代工业经济和信息化*, 2025, 15(5): 44-46.
- [9] 张文昌. 无人机运用与思考[J]. *国防科技工业*, 2023(4): 47-49.
- [10] 马一元, 张炜, 张星雨, 等. 分布式电推进无人机总体参数设计方法研究[J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(1): 27-36.
- [11] 张建华, 赵晨皓, 吕诚中. 察打一体无人机发展现状及趋势[J]. *飞航导弹*, 2018(2): 19-24.
- [12] 潘萌霓, 何皓, 刘佳帅, 等. 氢燃料航空发动机控制系统技术发展现状及趋势[J]. *推进技术*, 2025, 46(11): 104-121.
- [13] 王士奇. 中国无人机动力装置现状浅析[J]. *航空动力*, 2019(2): 9-12.
- [14] 邱福生, 董翔行, 杜一鸣. 太阳能飞机全天巡航高度与翼载荷耦合参量敏度分析[J]. *航空工程进展*, 2025, 16(1): 37-44.
- [15] 虞依洋. 面向旋翼无人机的 FOC 动力系统设计与实现[D]. 上海: 华东师范大学, 2024.
- [16] 马舒娴. 低空经济赋能现代物流体系创新的机制研究[J]. *商业文化*, 2025(14): 130-133.
- [17] 伏宇, 刘昭威, 郑天慧, 等. 航空燃气涡轮-电混合动力系统关键技术分析[J]. *推进技术*, 2024, 45(3): 78-88.
- [18] 陈宗科. 并联型混合动力无人机的能量管理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [19] 卢家欢. 锂离子动力电池峰值功率估计及其在能量管理中的应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [20] ZONG J N, ZHU B J, HOU Z X, et al. Evaluation and comparison of hybrid wing VTOL UAV with four different electric propulsion systems[J]. *Aerospace*, 2021, 8(9): 256.
- [21] 李洪亮, 康元麗, 回彦年. 电推进飞机促进航空业变革[J]. *航空动力*, 2021(5): 23-28.
- [22] LEI T, MIN Z, FU H, et al. Dynamic balanced energy management strategies for fuel-cell hybrid power system of unmanned air vehicle[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(12): 324048.

Comparative analysis of technical solutions for UAV power systems

LIU Zhentao¹, FU Zijian¹, GAO Jian², XIA Juan¹

1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. China North Industries Group Corporation, Beijing 100032, China

Abstract: To clarify the characteristics and prospects of mainstream unmanned aerial vehicle (UAV) power technologies, this study outlines the development of UAV technology, in response to industry needs for improved endurance, efficiency, and reliability, a multidimensional evaluation framework is constructed to compare electric, fuel-powered, and hybrid systems. The results indicate that UAV power technologies are becoming increasingly diversified and scenario-driven. Electric systems, with high reliability and low noise, dominate small-and medium-scale UAVs; fuel-powered systems, due to their high energy density, remain indispensable for long-endurance and heavy-payload tasks; hybrid systems, integrating the strengths of both, show strong potential for breaking endurance limitations and advancing UAV power systems toward higher efficiency and intelligence.

Keywords: UAV; power system; fuel power; electric propulsion; hybrid power

(责任编辑:刘丽君)