

复合翼无人机氢电增程式混合动力系统设计

罗文田, 周宁航, 赵新恒, 韩哲, 彭旭

(中国民用航空飞行学院 航空电子电气学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 针对复合翼无人机(UVA)发展面临的悬停高能耗与长航时需求冲突问题, 提出一种氢电增程式混合动力系统设计。为保证巡航效率的同时提升悬停阶段能源利用效率, 设计采用燃料电池为核心的高能量密度混合动力系统, 优化传统复合翼无人机的能源系统布局结构。在此基础上, 提出了一种面向跨模式飞行工况的氢电协同功率调度策略, 动态分配燃料电池与锂电池的输出功率, 在巡航阶段可将动力电池的荷电状态(SOC)稳定恢复并保持在 95% 的预设值, 在保障高耗能悬停作业功率冗余的同时, 实现氢-电协同输出的能量动态平衡与全局氢气消耗量最优。通过仿真试验与飞行验证, 系统支持样机完成了 28 min 悬停与 230 km 巡航的复合任务, 相较于 rule-based equivalent consumption minimization strategy(RB-ECMS)策略, 氢气消耗量降低了约 8.3%, 为复合翼无人机提供了一种高效清洁的混合动力解决方案。

关键词: 复合翼无人机; 氢电增程式混合动力; 功率调度策略; 跨模式飞行; 能量优化

中图分类号: V37

文献标志码: A

Design of hydrogen-electric extended-range hybrid power system for compound-wing UAVs

Luo Wentian, Zhou Ninghang, Zhao Xinheng, Han Zhe, Peng Xu

(Institute of Electronic and Electrical Engineering,

Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China)

Abstract: To resolve the conflict between high hover energy consumption and long endurance in compound-wing unmanned aerial vehicle (UAV), a high-energy-density hydrogen-electric extended-range hybrid power system is proposed. A cross-modal power scheduling strategy dynamically allocates output between the fuel cell and lithium battery, maintaining a 95% state of charge (SOC) during cruise to ensure hovering power redundancy and optimize global hydrogen consumption. Validated through simulations and flight tests, the prototype achieved a 28 min hover and a 230 km cruise. Notably, it reduced hydrogen consumption by approximately 8.3% compared to the rule-based equivalent consumption minimization strategy (RB-ECMS) strategy, providing an efficient and clean hybrid power solution.

Keywords: compound-wing UAV; hydrogen-electric extended-range hybrid power; power scheduling strategy; cross-mode flight; energy optimization

复合翼无人机融合了固定翼长航时巡航与多旋翼垂直起降的双重优势, 在电力巡检、广域遥感、物流配送等工业与民用领域展现出不可替代

的应用潜力^[1-3]。然而, 其动力系统面临垂直起降阶段瞬时高功率需求与巡航阶段持续高效能量供给之间的突出矛盾, 严重制约了其续航能力与任

收稿日期: 2026-04-09

基金项目: 四川省民航飞行技术与飞行安全工程技术研究中心开放课题(GY2024-14C)

作者简介: 罗文田(1976—), 男, 副教授, 硕士, 研究方向为智能车载平台、图像识别。E-mail: 136013346@qq.com

通信作者: 彭旭(1989—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为油电混动垂起固定翼无人机等。E-mail: pengxuswjtu@foxmail.com

引用格式: 罗文田, 周宁航, 赵新恒, 等. 复合翼无人机氢电增程式混合动力系统设计[J]. 航空动力学报, 2026, 41(9): 20260122. Luo Wentian, Zhou Ninghang, Zhao Xinheng, et al. Design of hydrogen-electric extended-range hybrid power system for compound-wing UAVs[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(9): 20260122.

务适应性^[4-6]。当前,纯电动力系统受限于锂电池能量密度(150~300 W·h/kg),难以支撑大范围、长周期作业任务^[7-9];传统油电混合动力方案虽在一定程度上提升了航时,却存在响应滞后、控制精度低、碳排放高等问题,无法满足绿色航空与高性能飞行的双重需求^[10-12]。

近年来,氢能技术的快速发展为无人机动力系统提供了新的路径。氢燃料电池具有能量密度高(可达 2000~3 000 W·h/kg)、零碳排放、运行安静等显著优势,尤其适合长航时巡航任务^[13-15];而锂电池则具备高功率输出特性,可有效弥补燃料电池动态响应不足的缺陷^[16-18]。国内外已在氢电增程式混合无人机领域取得重要进展,如韩国 Doosan 公司推出的 DS30 氢动力无人机已成功应用于工业巡检场景,实现超过 2 h 连续飞行;美国 Hylium Aviation 公司采用液氢技术方案,其无人机平台在低温环境下续航达到同等锂电池平台的 4 倍以上,验证了氢电增程式混合系统在高寒、长航时任务中的卓越可靠性^[19-21]。

针对现有混合动力复合翼无人机无法同时满足多点悬停与长航时双重任务需求的问题,研究提出一种氢电增程式混合动力系统的创新设计方法^[22-23]。其核心创新点主要体现在能量分配与协调控制两方面:第一,采用燃料电池-负载高效直

连架构,消除传统传动机构的能量损耗,针对悬停和巡航阶段的不同功率需求,通过动态调整电池充放电策略实现系统能量的高效分配与利用^[24];第二,在控制逻辑层面,构造了面向跨模式飞行工况的氢电协同功率调度策略,精准控制 SOC 稳态边界并有效规避过充风险,从而实现整机全局动态寻优与可靠性跃升^[25-26]。

本文围绕氢电增程式混合动力系统,重点开展系统架构设计、多模式功率耦合建模、能量控制策略以及仿真、台架测试与样机飞行的验证工作,旨在验证该系统能够有效协调悬停阶段的高能耗需求与巡航阶段的冗余功率充电,显著提升复合翼无人机在多点悬停与长航时巡航复合任务中的综合性能。

1 氢电增程式混合动力系统设计

1.1 氢电增程式混合动力系统组成结构

氢电增程式混合动力系统主要由燃料电池、DC/DC(direct current)变换器、缓冲电池、供氢与循环系统、热管理系统、综合控制单元、储氢罐及多级能量管理系统等核心部件构成,系统结构如图 1 所示。

燃料电池通过氢氧反应发电,作为主要动力源,DC/DC 变换器用于提升和稳定电压,缓冲电



图 1 氢电增程式混合动力系统组成结构

Fig. 1 Structure of hydrogen-electric extended-range hybrid power system

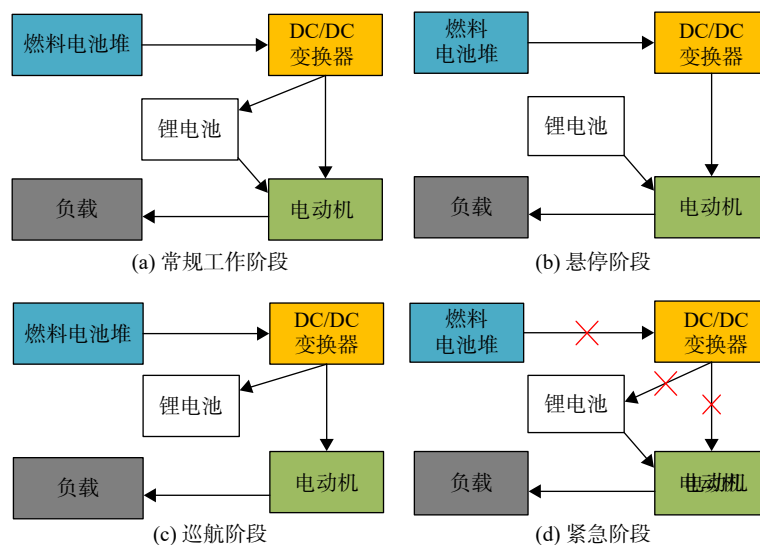


图 4 各飞行阶段能量流动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of energy flow in each flight phase

构内嵌了高可靠的硬件级容错隔离机制,可瞬时平滑切换至纯锂电池应急驱动模式。该模式下,动力电池接管推进与核心航电负载,并依据剩余容量动态施加功率限幅,以最大化保障紧急返航的安全航程。这一多模式拓扑设计凭借其出色的容错冗余度与高阶动态自适应能力,从物理底层彻底打通了复合翼平台悬停高耗能与平飞长航时之间的调度壁垒,为严苛工况下的连续作业提供了坚实的能源底座。

1.3 风冷电堆控制设计

为保障燃料电池在高频跨模式变载下的运行安全,构建了多维状态感知的智能风冷与分级容错子系统,如图 5 所示。该模块独立执行闭环温控与三级故障降级响应,并通过 CAN(controller area network)总线与顶层能量管理架构深度耦合。在运行全周期内,系统依据实时功率请求与电池 SOC 动态寻优散热逻辑,将电堆工作温度严格控制在 $-5 \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高效区间。结合启停阶段的自检标定与延时吹扫保护机制,这种紧凑型智能化底座设计有效平抑了极端变载下的热迟滞与衰减风险,为复合翼无人机的长航时高可靠作业夯实了硬件基石。

1.4 氢电增程式混合动力系统建模

1.4.1 系统动态建模基础

在明确氢电增程式混合动力系统架构与工作原理的基础上,本文基于能量守恒定律、电荷守恒原理及电化学动力学方程,构建了系统的多域耦合数学模型。

首先,燃料电池的输出电压动态响应、DC/DC 变换器的功率转换特性以及锂电池组的充放电行为,分别由式(1)、式(2)和式(3)进行描述:

$$U_{fc} = E_{\text{nernst}} - U_{\text{act}} - U_{\text{ohm}} - U_{\text{diff}} \quad (1)$$

$$P_{\text{out}} = U_{fc} I_{fc} \eta \quad (2)$$

$$F_{\text{SOC}}(t) = F_{\text{SOC}}(t_0) - \int_{t_0}^t \frac{\eta_c I_{\text{bat}}(\tau)}{Q} d\tau \quad (3)$$

式中 U_{fc} 为燃料电池输出电压, E_{nernst} 为热力学平衡电势, U_{act} 、 U_{ohm} 和 U_{diff} 分别表示活化过电位、欧姆过电位和扩散过电位, P_{out} 为 DC/DC 变换器输出功率, $U_{fc} I_{fc}$ 为输入到变换器的燃料电池功率, η 为变换器的功率转换效率, $F_{\text{SOC}}(t)$ 为当前时刻的电池荷电状态, η_c 为库伦效率, $I_{\text{bat}}(\tau)$ 为电池充放电电流, Q 为电池额定容量。

为精确描述燃料电池在不同负载条件及热力学状态下的动态特性,引入了基于电流密度和温度的经验模型。其中,主导低电流区电压暂态响应的活化过电位 U_{act} 表达式如式(4)所示:

$$U_{\text{act}} = \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (4)$$

式中 R 为通用气体常数, T 为绝对温度, α 为电荷传递系数, F 为法拉第常数, i 为实际电流密度, i_0 为交换电流密度。

此外,在稳态及准稳态工作条件下,燃料电池的总输出功率与氢气消耗量率呈近似正比例关系,其电化学消耗动力学表达式如式(5)所示:

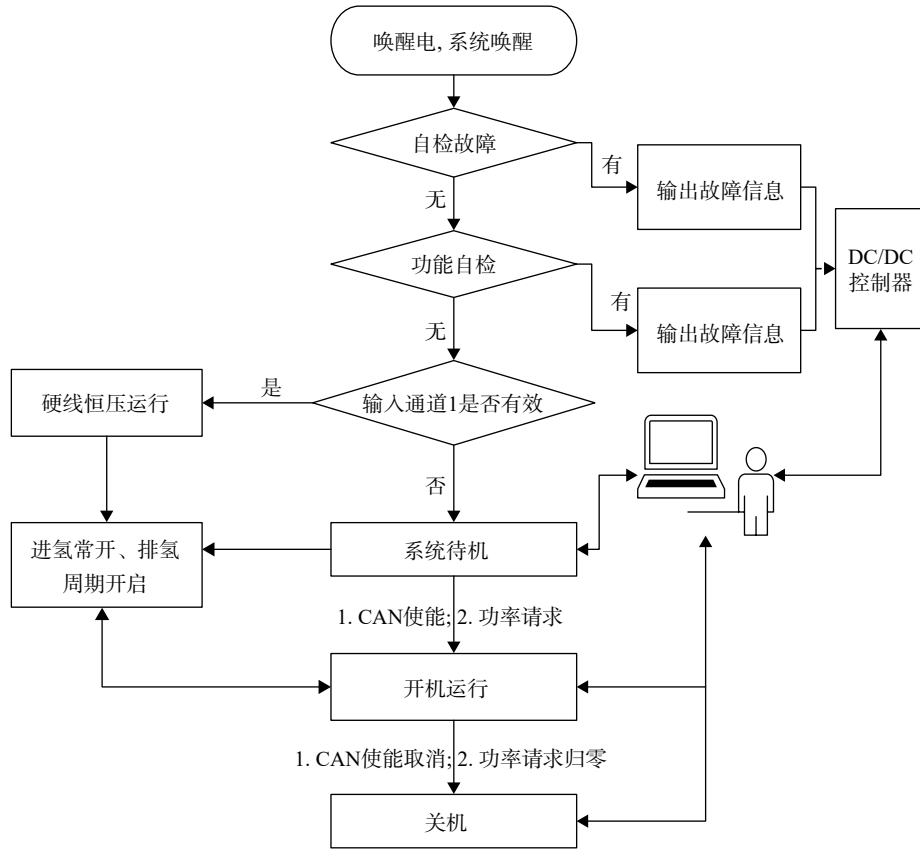


图5 风冷电堆控制流程图

Fig. 5 Control flow diagram for air-cooled fuel cell stack

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{NI_{fc}}{2F} M_{H_2} \quad (5)$$

式中 $\dot{m}_{H_2}$ 为氢气质量流量, N 为燃料电池堆内的单电池数量, I_{fc} 为燃料电池输出电流, M_{H_2} 为氢气摩尔质量。

1.4.2 锂电池功率计算与选型

在锂电池模型中, 其端电压及内部电阻的动态特性表达式如式(6)和式(7)所示:

$$U_t = U_{oc}(F_{SOC}) - I_{bat}R_{in} \quad (6)$$

$$R_{in} = a_0 + a_1 F_{SOC} + a_2 T \quad (7)$$

式中 U_t 为电池端电压, U_{oc} 为电池开路电压, 是 SOC 的非线性函数, I_{bat} 为电池充放电电流, R_{in} 为电池内阻, 其阻值随 SOC 和绝对温度 T 的变化而动态改变, a_0 、 a_1 和 a_2 均为通过试验数据提取的拟合系数。

试验表明, 在不同放电倍率条件下, 受电池极化效应和内部损耗的影响, 电池可用容量与放电电流满足如下关系:

$$C_{avail} = \alpha I_{bat}^\beta \quad (8)$$

式中 C_{avail} 为特定放电电流下的可用容量, α 和 β

为经验系数, 需通过对不同倍率下的恒流放电试验数据进行非线性回归获取。

考虑到无人机动力系统对质量和体积的严格限制及设计裕度系数为 1.14, 锂电池组作为混合动力系统的瞬态功率补偿源与应急能量储备, 需满足如下功率和能量约束:

$$P_{bat_max} \geq P_{hover} - P_{fc} \quad (9)$$

$$E_{bat} \geq \frac{P_{emg} t_{emg}}{\eta_{all}} \quad (10)$$

式中 P_{bat_max} 为电池最大输出功率, P_{hover} 为无人机悬停功率需求, P_{fc} 为燃料电池额定输出功率, E_{bat} 为电池组能量容量, P_{emg} 为应急返航功率, t_{emg} 为应急续航时间, η_{all} 为系统整体能量转换效率。

根据上述多目标约束条件, 结合燃料电池的功率输出特性, 可计算确定锂电池组的最小容量阈值和最大放电倍率要求。本系统最终选用高能量密度的锂聚合物电池组, 其核心参数需满足, 标称电压为 45.6 V, 满充电压为 52.2 V, 额定容量不小于 12 000 mA·h, 最大持续放电倍率达 25 C, 且总质量严格控制在 5 000 g 以下。

2 控制策略和系统仿真分析

2.1 氢电协同功率调度策略

无人机混合动力系统的能量管理独立于飞行控制层。为实现系统能量的高效分配与安全运行,

提出了一种面向跨模式飞行工况的氢电协同功率调度策略。该策略的核心控制逻辑如图 6 所示,其目标是在维持电池荷电状态于参考阈值范围的前提下,通过闭环反馈实时寻优,实现预测时域内等效氢气消耗量的多步滚动最小化。

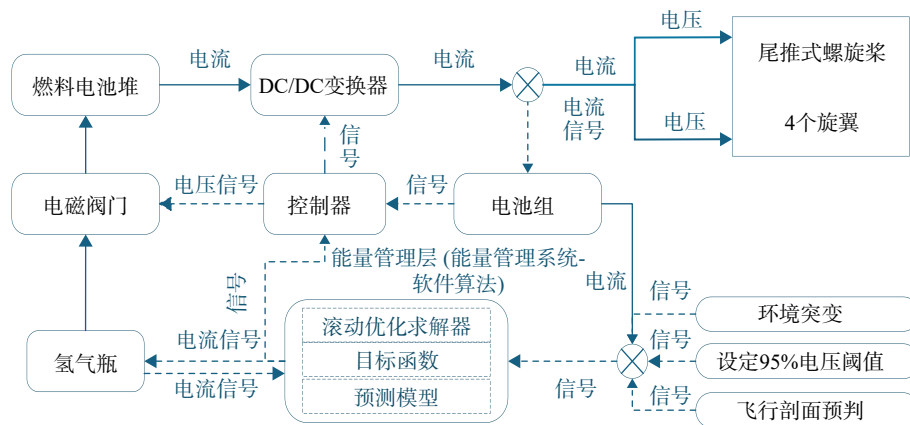


图 6 模型预测控制(MPC)逻辑

Fig. 6 Model predictive control (MPC) logic

具体而言,该策略构建了基于状态预测与多步滚动优化的全局寻优架构。在起飞或悬停等高频变载工况下,MPC算法通过提前预判负载阶跃需求,在物理硬约束下超前规划进氢阀门开度,引导燃料电池平滑切入高效大功率区间,有效满足瞬态推力并抑制母线电压跌落。转入平飞巡航后,算法在预测域内统筹求解多目标成本函数,主导功率流的动态分配:燃料电池在满足当前负载的基础上,严格按最优控制序列以冗余功率为电池回充。当SOC逼近95%参考轨迹时,目标函数中的惩罚项机制促使充放电功率平滑衰减,引导电堆平稳切换至稳态跟随模式。通过高频执行每个控制周期内的首步最优指令,该策略在全局维度上有效规避了SOC越限风险,实现了系统燃料经济性与运行可靠性的最大化。

2.2 仿真分析

2.2.1 仿真模型设置

基于Simulink平台,构建了涵盖燃料电池、锂电池、DC/DC变换器及机动负载的多域耦合仿真模型。针对复合翼无人机的多模式任务特征,设计了包含500 s悬停与7200 s巡航、总计8000 s的典型飞行剖面。该场景有效复现了系统极限载荷阶跃工况,在起降悬停阶段,整机面临约4000 W的高频瞬态功率需求;转入平飞巡航阶段后,随着升力模式切换,稳态功率需求大幅回落至约1500 W。

这一大跨度的功率起伏,为深度检验能量管理策略的稳健性与寻优能力提供了真实、苛刻的物理边界。图7为飞行阶段总功率随时间的变化,图中 $t_1 \sim t_7$ 为各阶段的仿真时间。表1为仿真飞行参数设定,表中 m 为机体质量, v 为巡航空速, P 为燃料电池额定发电功率, C 为锂电池额定容量。

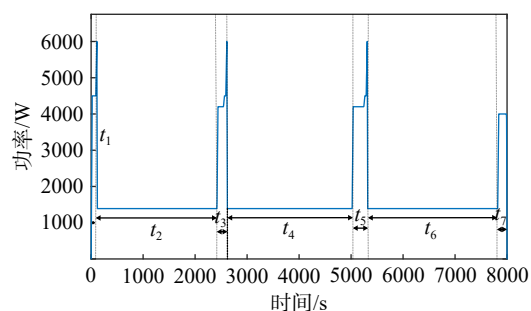


图 7 飞行阶段总功率随时间的变化

Fig. 7 Variation of total power with time during flight phases

2.2.2 策略仿真结果分析

图8展示了氢电无人机从垂直起飞到巡航阶段内,电池SOC、电堆发电功率、进氢阀门开度以及电堆温度随时间变化的动态趋势。在仿真初期的起飞爬升阶段,由于系统需电量激增,电池率先放电导致其SOC迅速跌落(见图8(a));为弥补功率缺口并适时介入充电,进氢阀门迅速响应并开至最大(见图8(c)),促使电堆的发电功率快速跃升至峰值状态(见图8(b)),伴随着剧烈的电

表 1 仿真飞行参数设定

Table 1 Simulation flight parameter settings

参数	数值
m/kg	35
$v/(\text{m/s})$	25
P/W	2 500
SOC/%	95
$C/(\text{mA}\cdot\text{h})$	12 000
t_1/s	120
t_2/s	2 300
t_3/s	200
t_4/s	2 400
t_5/s	300
t_6/s	2 500
t_7/s	180

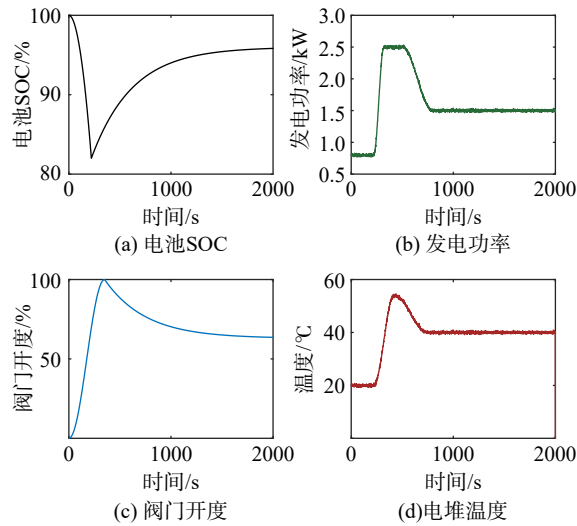


图 8 电池 SOC、发电功率、阀门开度和电堆温度随时间的变化

Fig. 8 Variation of battery SOC, generation power, valve opening and stack temperature with time

化学反应, 电堆温度也随之急剧攀升至最高点(见图 8(d)). 随着无人机转入巡航状态且负载需求回落, 系统进入稳态调节与充电恢复阶段。在此期间, 电池 SOC 呈现出平缓的回升趋势, 并最终稳定在预设的较高电量水平; 与此同时, 控制系统根据实时需求同步下调指令, 进氢阀门开度逐渐收缩并保持稳定, 电堆的发电功率也随之平滑回落至巡航所需的稳定输出水平。此外, 在热管理系统的作用及发热量减少的双重影响下, 电堆温度从峰值逐渐回落, 最终平稳维持在理想的工作温度范围内。整体变化趋势充分表明, 该氢电动力系统在面对复杂工况切换时, 能够实现各关

键参数的平滑过渡与协同稳定控制。

2.2.3 续航仿真结果分析

在巡航阶段, 复合翼无人机由尾推式螺旋桨提供巡航推力, 螺旋桨推进效率约为 0.78。图 9 给出了动推力及功率消耗随系统阀门开度的动态变化曲线。由图可知, 当阀门开度维持在 55%~65% 的区间时, 系统不仅能精准匹配巡航阶段的功率需求, 还能提供充足的前向动推力, 有效保障无人机平飞状态的稳定与高效。

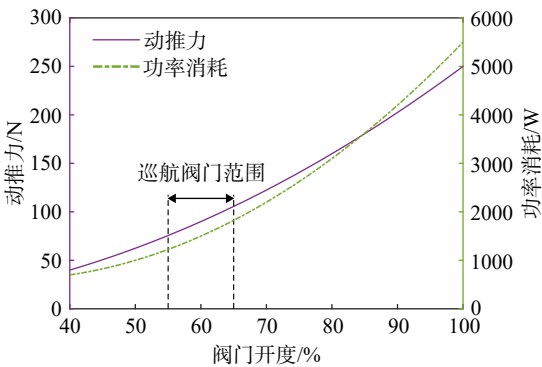


图 9 动推力和功率消耗随阀门开度的变化

Fig. 9 Variation of dynamic thrust and power consumption with valve opening

在复合翼无人机结束悬停转入巡航工况后, 由于整体功耗降低, 持续供电的电堆能够将冗余电能不断输送给电池, 驱使电池 SOC 稳步恢复至 95%。如图 10 所示, 通过在巡航期间实施这一动态的能量回充策略, 动力电池得以始终维持高电量储备, 从而为后续的大功率悬停作业及持久平飞奠定了坚实的能源基础, 这是提升无人机综合续航性能的核心机制。

此外, 为在平飞期间维持稳定的飞行工况, 系统通过对尾推式螺旋桨的推力进行实时调节, 将

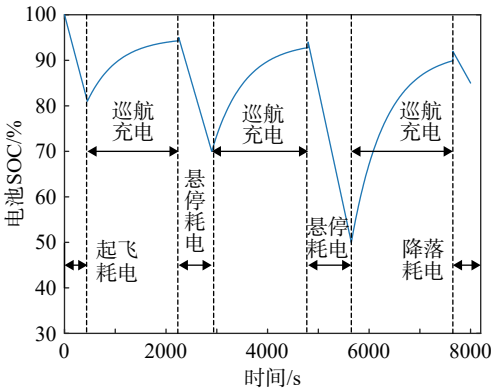


图 10 电池 SOC 随时间的变化

Fig. 10 Variation of battery SOC with time

巡航空速动态稳定在 26 m/s 左右。这一控制机制不仅保障了长航时巡航的平稳顺畅,也使系统的能量消耗始终处于合理可控的区间,为进一步延长整机续航奠定了坚实基础。

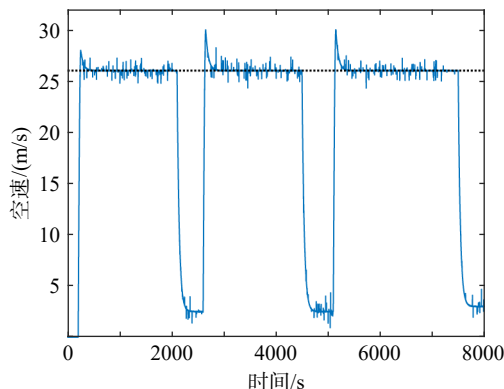


图 11 空速随时间的变化

Fig. 11 Variation of airspeed with time

2.2.4 氢气消耗量与经济性对比分析

为了直观评估提出的 MPC 策略在提升系统燃料经济性方面的优势,将其与 RB-ECMS 策略及基于规则控制策略在同等 8 000 s 飞行剖面下的氢气消耗量进行了仿真对比,结果如图 12 所示。在飞行任务初期,三种策略的累计氢气消耗量差异较小,然而随着飞行任务的推进,尤其是在经历悬停与巡航工况的频繁切换后,传统基于规则的策略由于采用静态阈值,难以保证燃料电池始终运行在最优效率区间,导致其累计氢气消耗量迅速拉高。相比之下,RB-ECMS 策略通过实时引入与电池 SOC 相关的动态等效因子实现了瞬时最优分配;而更为优异的 MPC 策略,则进一步凭

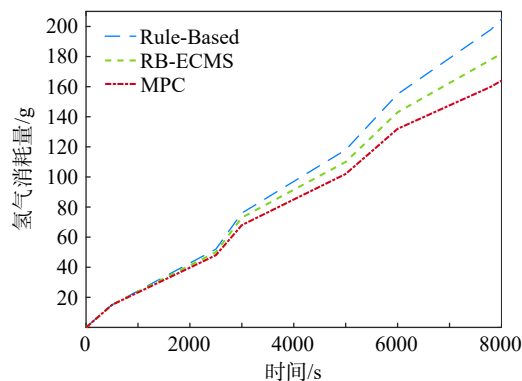


图 12 全飞行剖面下不同能量管理策略的氢气消耗量演变轨迹

Fig. 12 Hydrogen consumption evolution trajectories under different energy management strategies across the entire flight profile

借前瞻性的状态预测能力与滚动优化机制,主动平抑了跨模态转换时的功率剧变,使得燃料电池更高效地工作在最高效区间。在整个 8 000 s 的飞行任务结束时,采用 MPC 策略的系统总氢气消耗量显著低于 RB-ECMS 与基于规则的策略。具体而言, MPC 策略相较于传统基于规则的策略,氢气消耗量显著降低了约 19.5%;相较于 RB-ECMS 策略,也进一步降低了约 8.3%。该结果充分验证了所提 MPC 策略在降低系统能耗、延长复合翼无人机实际作业航时方面的突出效能。

3 台架试验与试飞验证

3.1 地面台架试验

为验证氢电增程式混合动力系统在真实气动载荷下的动态调度效能,研究搭建了多旋翼动力测试台架。台架以高刚性铝型材为承力架构,底层布置 12 L 高压储氢瓶,中层集成额定功率 2 500 W 的燃料电池电堆、DC/DC 变换器及 12 000 mAh 动力电池组,顶部刚性铰接复合翼无人机的真实多旋翼推进组件。与常规纯电学负载模拟不同,通过调节 PWM 占空比,直接利用旋翼桨叶切削空气产生的气动阻力作为真实负载。此物理配置完整引入了电机电感特性与旋翼气动迟滞效应,有效避免了仿真模型对瞬态高频动态特征的过滤,确保了全工况时序响应数据的工程保真度。

基于物理台架执行“悬停-巡航”典型任务剖面测试,实测多模式功率流向与电池荷电状态演变轨迹确证了 MPC 策略的全局协同机制。在 0~300 s 的模拟起飞与悬停阶段,气动阻力迫使



图 13 氢电增程式混合动力多旋翼测试台架实物

Fig. 13 Photograph of the hydrogen-electric extended-range hybrid multirotor test bench.

整机负载激增至约 4 500 W, 此时电堆迅速满载输出至约 2 500 W, 动力电池组同步切入大倍率放电模式, 精准补偿近 2 000 W 的瞬态功率缺口, 其 SOC 随之陡降至 60%, 验证了电池的瞬态削峰能力。越过 300 s 节点进入模拟平飞巡航模式后, 推进负载回落并稳定于 1 400~1 500 W 区间, MPC 算法自适应重构母线功率流向, 将电堆输出控制在 1 600~1 700 W, 利用覆盖巡航功耗后的冗余功率对电池实施恒流回充。在该补能机制驱动下, 电池 SOC 呈现典型指数型恢复特征, 最终平稳收敛于 95% 的预设安全上限, 从物理层面证实了所提架构在载荷突变工况下打通高载荷悬停与长航时平飞能量闭环的可靠性。

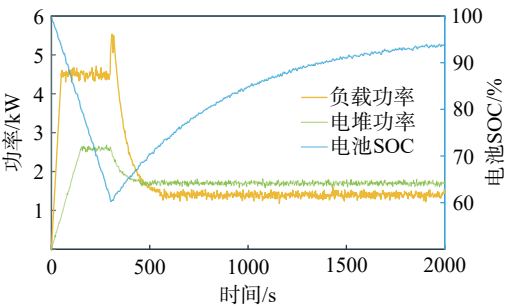


图 14 台架试验系统动态响应曲线
Fig. 14 Dynamic response curves of the test bench system.

3.2 试飞试验设置

表 2 详列了本次试飞所用氢电复合翼无人机原型的核心技术指标。 $m_{\max}$ 为最大起飞重量, V 为巡航速度, b 为翼展, l 为机身长, v_w 为场地空速, V_w 为气瓶容量。为确保实测数据能够严谨校验理论模型, 该样机的动力系统架构与边界条件均严格对齐前期数值仿真的设定工况。

表 2 氢电复合翼无人机试飞参数
Table 2 Flight Test Parameters of the Hydrogen-Electric Compound-Wing UAV

参数	数值
m/kg	35
$m_{\max}/\text{kg}$	38
$V/(\text{km/h})$	90~100
b/m	3.92
l/m	2.36
P/W	2 500
C/mAh	12 000
SOC/%	95
$v_w/(\text{m/s})$	3
V_w/L	12

为验证动力系统在真实物理场下的动态响应, 实飞试验于四川彭州专属空域开展。图 15 展示了搭载氢电增程式混合动力系统的复合翼无人机物理样机。本次飞行剖面严格对标典型作业工况, 完整覆盖垂直起降、定点悬停及长航时平飞三个核心模式。通过执行累计 230 km 巡航与 28 min 悬停的极限测试, 本试验在真实气动载荷下, 全面量化考核了氢电系统的多模式功率耦合效能与全周期能量消耗水平。

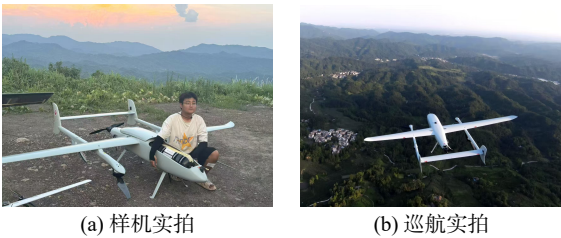


图 15 氢电增程式混合动力系统复合翼无人机样机
Fig. 15 Prototype of the Hydrogen-Electric Extended-Range Hybrid Compound-Wing UAV

动力系统状态参数的实时获取是量化评估原型机飞行效能的物理基础。为实现对氢电增程式混合动力系统的全工况监测, 样机在关键拓扑节点部署了多源传感器网络。具体而言, 燃料电池输出端布设电流传感器以监测瞬态发电输出, 动力电池节点则同步配置电压与电流传感器, 用于捕获充放电循环的动态电学特征, 同时集成温度与气压传感器以监控系统热力学及供氢状态。原始遥测数据经底层动力控制器聚合滤波后, 借由机载专频链路低延迟下传至地面测控站。基于此时序采集的电学参量, 结合前文构建的系统动力学模型, 即可精确解析无人机在各飞行模式下的整机能耗特征与电池 SOC 的演变轨迹。

3.3 试飞试验结果

样机实飞的瞬态功率数据揭示了理想仿真模型与真实物理边界之间的未建模动态差异。在垂直起降模式下, 氢电增程式混合动力系统的实测总输出功率峰值达 4 700 W, 较标称仿真阈值 4 500 W 存在 4.44% 的正向偏差。该偏差的物理根源在于, 仿真环境未能充分表征原型机从静止状态克服整机惯性与重力梯度所需的非线性加速做功, 此高频瞬态负载直接映射至动力系统, 迫使锂电池承担了超出理论预期的深度放电以填补燃料电池的响应迟滞。进入固定翼巡航模式后, 实测稳态消耗功率同样高于仿真基线。这一现象可

归因于真实试验场地的低空阵风扰动,实测风速 3 m/s 引发的频繁姿态修正,加之高海拔 1 000 m 带来的空气密度衰减降低了尾推式螺旋桨的滑流效率。上述多源气动阻力惩罚产生叠加效应,最终迫使氢电能量管理系统上调了燃料电池的基准输出功率,以维持飞行器在复杂扰动下的动推力平衡。

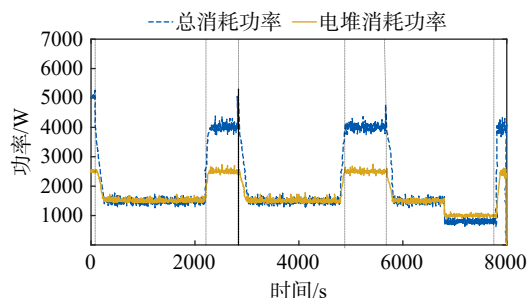


图 16 氢电增程式混合动力系统多模态飞行实测功率时序响应曲线

Fig. 16 Measured power time-series response curves of the hydrogen-electric extended-range hybrid power system under multi-modal flight

实测数据表明,在多旋翼悬停作业区间,受限于燃料电池的额定输出上限,锂电池主动承担了瞬态高功率缺口的补偿任务,系统进入深度放电, SOC 呈现大斜率快速探底,但全程维持在安全放电阈值之上,有效保障了高能耗悬停的功率冗余。进入固定翼水平巡航模式后,整机推进功率需求显著回落,氢电能量管理系统动态重定向燃料电池的冗余输出,向动力电池执行持续的恒流/恒压补能。在此阶段, SOC 呈现出指数型充电恢复特征,并最终稳定收敛于 95% 的预设充电阈值。该

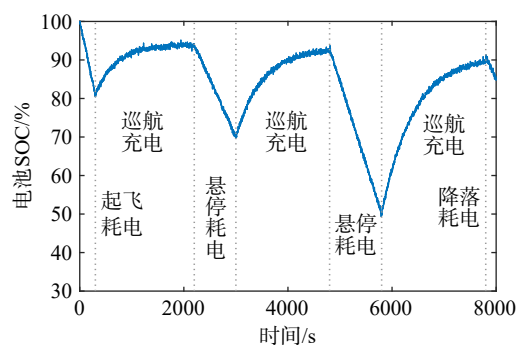


图 17 多模态工况下氢电增程式无人机电池 SOC 动态响应特性

Fig. 17 Dynamic Response Characteristics of Battery SOC for the Hydrogen-Electric Extended-Range UAV Under Multi-Modal Operating Conditions.

充放电循环轨迹与仿真边界高度吻合,从物理层面确证了 MPC 策略的有效性。这一协同机制彻底打通了氢电增程式混合动力在高载荷悬停与长航时平飞模式间的能量调度瓶颈,从根本上拓展了复合翼无人机的连续作业包络。

4 结 论

1) 确立了无机械传动损耗的直连式氢电增程式混合动力拓扑,实现了动力系统底层架构的能效跃升。依托‘源-储-载’间的高效调配,系统在悬停高频变载期通过电池瞬态介入弥补电堆响应迟滞,在平飞巡航期利用电堆冗余功率完成动态补能。该协同调度机制成功破解了跨模态工况下的能量分配壁垒,为严苛条件下的多点悬停任务构筑了坚实的硬件基石。

2) 引入并验证了面向跨模式飞行工况的氢电协同功率调度策略。该策略凭借状态预测与滚动优化机制,能提前预判并应对大跨度负载阶跃。通过求解多约束全局最优输出序列,不仅实现了复杂变载下燃料电池与锂电池的平滑协同,更确保了全周期氢气消耗量极小化。结果表明, MPC 机制能主动且平稳地将巡航期 SOC 恢复并保持于 95% 的预设基准;在规避过充与深度放电风险的同时,有效削弱了功率剧变对电堆的瞬态冲击,显著提升了系统的燃料经济性与核心部件循环寿命。

3) 仿真及验证全面证实了氢电增程式混合动力系统在工业级应用中的工程价值。样机试飞数据客观记录了在 32.3 kg 实际起飞重量下,该系统支持复合翼无人机完成了累计 230 km 的巡航以及长达 28 min 的悬停极限测试。实测参数与仿真模型的高度吻合,不仅量化评估了系统在多模式飞行下的卓越能效,也为电力巡检、物流配送等对续航有严苛要求的领域提供了一种高效、清洁且极具竞争力的动力解决方案。

参考文献:

- [1] Zhou Mingjie, Zhou Zhiyan, Liu Luohao, et al. Review of vertical take-off and landing fixed-wing UAV and its application prospect in precision agriculture[J]. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2018, 1(1): 8-17.
- [2] 韦振鹏, 刘峰, 杨森. 垂直起降固定翼无人机发展现状与技术要点[J]. *飞机设计*, 2024, 44(1): 5-13.
Wei Zhenpeng, Liu Feng, Yang Sen. Development and key technologies of vertical take-off and landing UAV with fixed wing[J]. *Aircraft Design*, 2024, 44(1): 5-13. (in Chinese)
- [3] 王科雷, 周洲, 马悦文, 等. 垂直起降固定翼无人机技术发

- 展及趋势分析[J]. *航空工程进展*, 2022, 13(5): 1-13.
- Wang Kelei, Zhou Zhou, Ma Yuewen, et al. Development and trend analysis of vertical takeoff and landing fixed wing UAV[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2022, 13(5): 1-13. (in Chinese)
- [4] Kumar V, Sharma R, Sharma S, et al. A review on design methods of vertical take-off and landing UAV aircraft[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1116(1): 012142.
- [5] 郑育行, 张勋, 阿斯奇, 等. 复合翼垂直起降无人机直驱混合动力系统验证设计与试验建模方法[J]. *内燃机工程*, 2023, 44(6): 77-89.
- Zheng Yuhang, Zhang Xun, An Siqi, et al. Verification design and experimental modeling method of the direct-drive hybrid power system on a vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle with composite wings[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2023, 44(6): 77-89. (in Chinese)
- [6] 何程, 童玉奇, 夏兴禄, 等. 面向货运任务的混电垂直起降无人机能量管理策略和任务路径综合优化[J]. *航空学报*, 2024, 45(14): 270-283.
- He Cheng, Tong Yuqi, Xia Xinglu, et al. Integrated optimization of energy management strategy and mission path for hybrid-electric VTOL UAVs in cargo transportation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(14): 270-283. (in Chinese)
- [7] An Siqi, Gan Yuantao, Peng Xu, et al. Charging optimization with an improved dynamic programming for electro-gasoline hybrid powered compound-wing unmanned aerial vehicle[J]. *Energies*, 2025, 18(1): 30.
- [8] An J H, Kwon D Y, Jeon K S, et al. Advanced sizing methodology for a multi-mode eVTOL UAV powered by a hydrogen fuel cell and battery[J]. *Aerospace*, 2022, 9(2): 71.
- [9] 刘书洋. 混合动力无人机电源监测控制系统设计与实现[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- Liu Shuyang. Design and implementation of power monitoring and control system for hybrid UAV[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023. (in Chinese)
- [10] Jarrah K, Alali Y, Lalko A, et al. Flight time optimization and modeling of a hybrid gasoline-electric multirotor drone: an experimental study[J]. *Aerospace*, 2022, 9(12): 799.
- [11] Finger D F, Braun C, Bil C. Comparative assessment of parallel-hybrid-electric propulsion systems for four different aircraft[J]. *Journal of Aircraft*, 2020, 57(5): 843-853.
- [12] 甘元涛, 付尧明, 彭旭, 等. 垂直飞行性能增强的油电混动复合翼无人机设计[J]. *内燃机工程*, 2025, 46(3): 98-106.
- Gan Yuantao, Fu Yaoming, Peng Xu, et al. Design of a fuel-electric hybrid composite wing unmanned aerial vehicle(UAV)with enhanced vertical flight performance[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2025, 46(3): 98-106. (in Chinese)
- [13] Chen Zhiting, Eri Qitai, Yang Liwei. Study on the comprehensive performance of a hybrid power system based on hydrogen-driven solid oxide fuel cells for green unmanned aerial vehicles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 327: 119611.
- [14] Gong A, Verstraete D. Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(33): 21311-21333.
- [15] 刘惠影. 燃料电池多旋翼无人机混合电源系统能量管理关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- Liu Huiying. Key technology research on energy management of hybrid power system for fuel cell multi-rotor unmanned aerial vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)
- [16] Kim Y, Kang S. Development of optimal energy management strategy for proton exchange membrane fuel cell-battery hybrid system for drone propulsion[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258: 124646.
- [17] Belmonte N, D'urso C, Marocco P, et al. Fuel cell powered octocopter for inspection of remote areas[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(23): 10868-10878.
- [18] Ozbek E, Yakan H, Bradley T H. Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell: Li-Po batteries as a hybrid energy harvester to produce more wattage power for the fixed wing UAVs[J]. *Energy*, 2021, 230: 120612.
- [19] Chen Yincong, Wang Weida, Yang Chao, et al. An efficient energy management strategy of a hybrid electric unmanned aerial vehicle considering turboshaft engine speed regulation: a deep reinforcement learning approach[J]. *Applied Energy*, 2025, 390: 125837.
- [20] Li Haitao, Wang Chenyu, Yuan Shufu, et al. Energy scheduling of hydrogen hybrid UAV based on model predictive control and deep deterministic policy gradient algorithm[J]. *Algorithms*, 2025, 18(2): 80.
- [21] 陈伟, 涂钊, 刘建宏, 等. 基于油电混动六旋翼无人机的模糊PID飞行控制策略研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(8): 124-132.
- Chen Wei, Tu Chuan, Liu Jianhong, et al. Fuzzy PID flight control strategy based on oil-electric hybrid six-rotor UAV[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2024, 43(8): 124-132. (in Chinese)
- [22] 唐靖昆, 吕伟, 彭旭. 复合翼混动无人机起/发电电机控制器设计[J]. *自动化应用*, 2025, 66(2): 159-164.
- Tang Jingkun, Lv Wei, Peng Xu. Design of starter/generator motor controller for composite wing hybrid UAV[J]. *Automation Application*, 2025, 66(2): 159-164. (in Chinese)
- [23] 代明潇. 基于ECMS的复合翼无人机混动系统能量管理策略研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- Dai Mingxiao. Research on ECMS based energy management strategy on compound-wing VTOL's hybrid propulsion system[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024. (in Chinese)
- [24] 张勋. 混动复合翼无人机变距推进装置控制策略研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- Zhang Xun. Research on the control strategy of variable range propulsion device for hybrid composite wing UAVs[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024. (in Chinese)
- [25] Yang Langhong, Xi Jianxiang, Zhang Shunjia, et al. Research on energy management strategies of hybrid electric quadcopter unmanned aerial vehicles based on ideal operation line of engine[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 97: 112965.
- [26] Tu Chuan, Liu Jianhong, Yan Zhiwei. Simulink modeling analysis based on oil-electric hybrid six-rotor UAV[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2782(1): 012081.

(编辑: 秦理曼)