

面向无人机的电池智能均衡调控与能效优化 技术应用研究

李文昊*, 刘佰易, 张路坛, 洪镇峰
广东南华工商职业学院, 广东 广州 510507
DOI:10.61369/ASDS.2025040018

摘要： 针对无人机在复杂任务环境下对电池系统高性能与高安全性的双重需求, 本文围绕电池智能均衡调控与能效优化技术展开系统研究。通过分析电池系统的电化学性能与动态负载适应特性, 提出基于多模态感知的状态耦合估计模型, 构建自适应滞回区间动态均衡控制策略, 并引入热-电协同机制以强化系统运行安全。在此基础上, 深入探讨电池材料与结构优化路径, 创新智能均衡调控机制, 并构建热-电一体化能效强化体系。结合工程实测数据验证所提方法在典型工况下的适应性与实效性。

关键词： 无人机电池系统; 智能均衡调控; 热-电协同管理; 能效优化

Research on Intelligent Battery Balancing Control and Energy Efficiency Optimization Technology for Unmanned Aerial Vehicles

Li Wenhao*, Liu Baiyi, Zhang Lutan, Hong Zhenfeng
Guangdong Nanhua Vocational College of Industry And Commerce, Guangzhou, Guangdong 510507

Abstract : In response to the dual demands of high performance and high safety for battery systems in complex mission environments for unmanned aerial vehicles (UAVs), this paper conducts a systematic study on intelligent battery balancing regulation and energy efficiency optimization technologies. By analyzing the electrochemical performance and dynamic load adaptation characteristics of battery systems, a state coupling estimation model based on multi-modal perception is proposed, an adaptive hysteresis interval dynamic balancing control strategy is constructed, and a thermal-electrical collaborative mechanism is introduced to enhance system operation safety. On this basis, the optimization paths of battery materials and structures are deeply explored, an intelligent balancing regulation mechanism is innovated, and a thermal-electrical integrated energy efficiency enhancement system is established. The adaptability and effectiveness of the proposed methods under typical working conditions are verified through engineering measurement data.

Keywords : UAV battery system; intelligent balancing regulation; thermal-electrical collaborative management; energy efficiency optimization

引言

无人机是现代航空技术与智能控制技术相结合的产物, 在军事侦察、后勤保障、农业监控、环保等方面有着广泛的应用, 其续航能力直接关系到任务完成效率与安全。电池是无人机的核心能量源, 其性能稳定与能源利用率已成为制约无人机长时间续航的重要因素。传统电池管理系统在多电池组环境下存在充放电不平衡、能量浪费及使用寿命短等问题, 严重影响系统的可靠性与经济性。智能均衡控制技术通过实时监测单体电池运行状态, 对充放电策略进行动态调整, 有效地缓解了电池之间的失衡, 提高了电池的能量利用率, 延长了电池的使用寿命。该研究不仅可以提高无人飞行器的续航能力, 还可以为电池管理系统的智能化开发提供理论支持与技术途径, 促进无人飞行器技术向更高效率、更可靠的方向发展, 具有重要的科学意义与应用前景。

作者简介:

刘佰易, 广东南华工商职业学院在校生;

张路坛, 广东南华工商职业学院在校生;

洪镇峰, 广东南华工商职业学院在校生。

通讯作者: 李文昊, 广东南华工商职业学院在校生。

一、无人机电池系统工作特性分析

（一）电池系统的电化性能特性分析

无人机电池系统的电化性能由其核心电芯的氧化还原动力学特性决定，主要体现为能量密度、放电倍率、电压平台稳定性及循环寿命等关键参数。如锂聚合物电池，其能量密度一般在200–300 Wh/kg左右，放电平台电压在3.7 V左右，放电结束时会出现明显的电压骤降（ $\Delta V \geq 0.5V$ ），该特性直接影响到无人机的续航能力和任务可靠性。电池内部阻（DCIR）是决定电池瞬时功率输出的关键参数，其典型值要求为5–10 $\mu\Omega$ 。充放电过程中（ $\geq 5C$ ）电极极化效应加剧，限制了锂离子在石墨负极中的嵌脱率，引发浓差极化和欧姆极化，导致电池温升（ $\Delta T \geq 8^\circ C / \min$ ）。此外，固体电解质界面（SEI）的稳定性直接影响其循环寿命，电解液分解副反应加速 SEI 膜厚度（>100nm），导致容量衰减大于0.5%/循环。采用准二维电化学模型定量研究电极孔隙结构、活性物质粒度分布等因素对锂离子扩散系数（ $D_{Li^+} \approx 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ ）的影响规律，优化电极微结构设计。热管理系统的设计需要充分考虑其电化性能特性。比如，通过相变材料（PCM）和液冷（液态冷却）来降低电池的工作温度（Arrhenius 方程计算的温度系数 $\alpha = 0.03\text{--}0.05/^\circ C$ ），同时抑制锂枝晶生长（临界电流密度大于2 mA/cm²）。此外，多电芯串并联拓扑需匹配均衡电路（被动均衡精度 $\pm 20\text{mV}$ ，主动均衡效率 > 85%），以消除单体 SOC 差异导致的木桶效应^[1]。

（二）电池系统的动态负载适应特性

电池系统动态阻抗谱具有双容抗弧特性，高频（>1 kHz）表征膜阻抗，低频（<100 Hz）表征电荷转移阻抗（ $R_{ct} > 10\text{--}30 \text{m}\Omega$ ）。利用动态阻抗参数在线辨识，实时修正电池等效电路模型 Rint 或 Thevenin 参数，提高 SOC/SOH 估算精度（误差 <3%）。脉冲放电时（脉冲宽度 <10 秒，峰值电流 $\geq 3C$ ），要求电池保持电压下降 ΔV 小于10% 额定值。实验数据显示，锂离子扩散弛豫时间（ $\tau \approx 30\text{--}60\text{s}$ ）是制约其瞬态响应的主要瓶颈。为此，采用梯度多孔电极（表层为45%，下层为30%）来缩短离子传导路径，并利用硅–碳复合体（ $S/C \geq 5\text{wt}\%$ ）提高负极比容量（>1000 mAh/g）。电池管理系统需要具有毫秒级的动态补偿功能。比如，基于模型预测控制闭环控制策略，在电压崩溃时触发降额保护（3.2V/cell）；利用卡尔曼滤波将开路电压和库仑计数数据进行融合，实现 SOC 估算均方根误差（RMSE）<1.5%。

二、面向无人机的电池智能均衡调控机制设计

（一）基于多模态感知的电池状态耦合估计模型

传统的电压、电流等单一参数检测方法难以满足复杂工况条件下的动态均衡需求，需要建立多模态感知融合的耦合估计模型。该模型通过同步采集电池组内各单体电芯的电压梯度、温度

分布、内阻变化及历史循环数据，结合电化学阻抗谱特征提取，实现荷电状态（SOC）与健康状态（SOH）的协同辨识。在电压梯度分析方面，重点研究串联电池端电压的离散性问题，并利用滑模观测器消除测量噪声的影响，提取出真实的极化压差。利用分布式光纤传感阵列，实时构建0.1 $^\circ C$ 分辨率的三维温度场，并结合热电偶模型，解析温度对欧姆极化效应的影响权重^[2]。针对电池老化导致的容量衰减问题，引入容量增量分析方法（ICA）对充电/放电曲线进行微分，并用特征峰位偏移量化 SOH 的衰减速率。利用扩展卡尔曼滤波（EKF）对多源异构数据进行融合，实现 SOC 估计误差 $\leq 1.5\%$ 和 SOH 预报精度 $\geq 95\%$ 的闭环估计系统，为均衡策略提供动态参考。

（二）自适应滞回区间动态均衡控制

无人机电池组在飞行过程中产生的能量差异，除了电池本体自身的差异外，还受到飞行工况动态载荷的显著影响。传统的定门限无源均衡方式存在响应滞后和能量损失过大等缺点，需要设计具有自适应迟滞特性的动态均衡控制策略。其核心是构建双层滞回层：底层滞回层根据电池 SOC 差设置动态触发阈值（初始阈值 $\pm 3\%$ ）；高级滞回层根据实际飞行载荷（如爬升功耗、悬停时间等）和环境参数（海拔气压、环境温度等）对滞回层进行动态修正。在能量转移路径优化方面，采用分级式主动均衡拓扑结构。一级均衡解决了模块之间的能量差问题，利用双向直流/直流变换器实现跨模块间的能量传递，转换效率最高 $\geq 92\%$ ；二级均衡是在模块内引入开关电容阵列，利用谐振电荷泵技术在核心级进行能量再分配，使电压差减小到5毫伏以下。针对突然加载引起的暂态不平衡问题，引入前馈–反馈复合控制机制，前馈通道根据飞行控制指令对负荷变化趋势进行预测，提前进行预均衡运算；反馈通道采用李雅普诺夫稳定性理论设计非线性均衡控制器，保证强干扰下系统收敛性。

（三）热–电协同管理下的均衡安全强化机制

电池均衡过程伴随能量转移与焦耳热效应，会导致电池局部过热，甚至出现热失控。需要构建热力耦合深度协同的均衡安全强化系统，并基于热力学约束对均衡参数进行动态优化。首先，建立电池产热模型，利用伯纳迪方程计算电池产热速率，并结合计算流体力学（CFD）模拟计算电池温度场演化趋势。当电池温度超过安全阈值时，系统会自动启动均衡电流降额模式，并采用可调脉宽调制技术实现电池能量传输速率和散热能力的动态匹配。在散热结构设计方面，采用相变材料（PCM）和微热管（Micro 热管）的复合散热方案。将相变材料包覆在电池表面，利用潜热吸收来抑制平衡时的瞬态温升；将微热管网络嵌入蓄电池组件中，利用毛细力驱动气液两相流动，达到快速散热的目的。在检测到局部热点（温度梯度 $\geq 8^\circ C$ ）时，优先启动有源均衡，将高 SOC 电池的能量传输至低温区，并提高相应区域的散热风扇转速，形成冷热双向负反馈调控。此外，针对高海拔低气压环境导致的散热效率下降问题，设计气压自适应均衡保护算法。利用气

压传感器实时测量周围空气压力，对允许的最大均衡电流进行动态修正^[3]。

三、面向无人机的电池能效优化技术路径研究

（一）电池材料与结构的深度优化

在材料选择方面，突破传统锂-聚合物电池的局限，探索新的电极材料和电解质体系。采用高比容量硅-碳复合体替代部分石墨型负极材料，充分发挥硅材料理论比容量高的优点，提高电池的能量密度。设计合适的电解液添加剂，提高电极/电解质界面相容性，抑制副反应，减少自放电和能量损失。电池的结构设计摒弃了传统的同质结构，采用了梯度的设计策略。例如，设计具有梯度孔隙的电极，调控电极各部分的孔隙结构，优化锂离子传输路径，降低离子扩散阻力，提高充放电速率。在电池内部构筑三维立体导电网络，提高电子输运效率，降低内阻，降低电池运行时的欧姆热损失。此外，对多电芯串并联拓扑进行创新，通过模块化和可重构设计，灵活调整电池组的串并联方式以满足不同飞行任务的需要，保证电池组始终处于高效工作状态。

（二）智能动态均衡调控机制创新

构建多模态感知融合体系，突破单参数检测的局限性，实现电池组各单体电池电压、温度、内阻等多维数据的同步采集，结合电化学阻抗谱特征分析，实现电池荷电状态和健康状态的精准协同识别。采用自适应滤波等先进信号处理算法，有效地消除了数据采集过程中的噪声干扰，提高了数据的精度。建立双层滞回层模型，底层滞回层根据电池 SOC 差异设置初始触发阈值，并结合实际飞行载荷和环境参数动态修正阈值，实现均衡策略与实际工况深度匹配。采用分层有源均衡拓扑，在模块间与模块内分别采用高效的能量转移技术，如双向 DC/DC 变换器与开关电容阵列相结合的方式，提高均衡效率，减少能量损耗。采用前馈-反馈复合控制机制，前馈通道根据飞行控制指令对负荷的变化进行预均衡；反馈通道基于稳定性理论设计非线性均衡控制器，确保电池系统在各种工况下的稳定性与高效性。

（三）热-电协同与安全强化体系构建

构建热-电深度协同管理机制，建立电芯产热模型，结合散热特性分析，动态优化电池工作参数。采用可变脉冲宽度调制技术，实现能量传输速度与散热能力的匹配，避免因过热累积引起的电池性能退化和安全隐患。在散热结构设计方面，利用相变材料（PCM）和微热管（Micro 热管）进行复合散热。利用潜热吸收原理，有效地抑制了电池工作时的瞬态温升；微热管网络利用良好的导热性能，将电池内部热量快速排出，保证电池堆内温度分布均匀。同时，研究热-电双向负反馈调控机制，使热管理控制器和电池均衡系统实时共享数据，在检测到局部热点时，优先启动有源均衡，实现高 SOC 电池能量向低温区传输，并强化相应

区域的散热能力^[4]。针对高海拔、低压等不同环境条件，设计自适应安全防护算法，根据环境参数动态调整电池运行边界条件，以保证电池在复杂环境中的稳定、高效运行，实现电池能量效率和安全双重提升。

四、工程应用与实测案例分析

（一）工程概况

某大型无人机制造企业在其新型行业级无人机系统研发中，针对高原巡检、电力巡线及应急物资投送等复杂场景，开展了电池能效优化技术的工程化应用。该项目选用锂聚合物电池体系为基础，融合硅碳复合负极材料与梯度孔隙率电极结构设计，构建了具备自适应均衡调控与热-电协同管理的智能电池系统。电池组额定容量 5800mAh，能量密度达 260Wh/kg，采用 12S2P 串并联结构，集成多模态传感器，实现 DC/DC 双向能量流动和毫秒级动态响应控制。该系统采用微热管和相变材料复合散热技术，在 -20℃ -50℃ 环境温度范围内实现电芯温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的精确控制。该系统与自主研发的六旋翼无人机平台相匹配，采用 850mm 机身，起飞重量为 12kg，设计载荷为 3kg，目标是在复杂环境下续航超过 20%，使用寿命超过 800 次。

（二）典型任务工况下性能表现分析

在高原电力巡检工况中，无人机需在海拔 4000m 以上区域执行长航时飞行，面临低气压散热效率下降与高频次变载需求。实测显示，电池系统在爬升至目标高度时，由空气压力自适应均衡算法自动调节到 0.6C，并结合前馈控制，提前对负载突变引起的电压波动进行补偿，使得电池端电压的离散度保持在 5mV 以内，避免了传统系统因局部过放电引起的容量衰减。在运行过程中，利用微热管实现电池组温差小于 1.5℃，利用相变材料有效抑制瞬态温升，达到 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，比传统方案降低 8℃。在城市物流配送工况下，无人机需要频繁的起降和起降，其脉冲放电峰值可达 8C。梯度多孔电极结构可有效提高锂离子输运效率，将电压下降幅度控制在额定值 8% 以内，满足瞬时功率输出要求。BMS 根据多模态传感数据实时修正等效电路模型参数，估算 SOC 均方根值误差不超过 1.2%；结合再生制动能量回收算法，实现单次配送任务能量回收率达到 15%，较传统系统提高 50% 以上。针对高温环境应急投送工况（环境温度为 45℃），采用可变脉冲宽度调制技术，动态调节散热风扇转速，并结合主动均衡技术，实现高 SOC 电池组能量向低温区传输，达到 42℃，低于传统系统 55℃ 的临界温度，在保证均衡效率的前提下，避免热失控风险^[5]。

（三）效果分析

工程应用实测表明，优化后的电池系统在多场景任务中展现出显著能效优势。与企业前代产品相比，在复杂工作状态下，续航时间由 55 分钟延长到 67 分钟，满足远距离巡检和超视距作业的

要求；电池电压离散度降低60%，均衡时间缩短40%，能量传输效率提高93%，有效缓解串并联结构的木桶效应。通过热-电协同管理，将电池组运行温度的标准差降低至1.8℃，循环寿命试验表明，充放电循环后，电池容量保持率达到85%，比传统方案提高15%，显著降低了运营成本。同时，将-10℃低温环境中启动时间缩短至30秒，高原功率衰减率控制至10%以内，全面提升无人机在极端环境中的工作可靠性。项目成果将为无人机产业级动力电池系统设计提供可复制的工程化范例，促进无人机从民用到专业应用的效能突破。

五、结语

面向无人机复杂运行需求，本文构建了融合多模态感知、动态均衡控制与热-电协同管理的电池智能调控体系，有效提升了电池系统的能效水平与运行安全性。通过工程实测试验，所提技术路径在典型任务工况下表现出良好的适应性与应用价值。未来研究可进一步拓展面向多类型无人系统的电池协同管理机制，结合人工智能算法实现更高精度的状态估计与负载预测。

参考文献

- [1] 任东哲, 邵帅, 王剑峰, 等. 分布式无人机蜂群电池性能综合管理和预测方法 [J]. 今日制造与升级, 2024, (07): 10-12.
- [2] 宇文璞玉, 徐狄柯, 肖振华, 等. 光伏电站智能运维无人机技术研究 [J]. 电子元件与信息技术, 2023, 7(07): 191-194.
- [3] 蓝誉鑫, 刘奕麟, 尹胜立, 等. 无人机电池充电管理系统的优化与应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(04): 380-381.
- [4] 王星, 杜春平, 夏腾辉, 等. 无人机电池智能维护系统设计 [J]. 装备制造技术, 2021, (11): 116-120+128.
- [5] 郭凯, 王亚晓, 张文辉. 无人机电源的智能充电器系统研究 [J]. 现代电子技术, 2021, 44(14): 60-64.