[混合电池系统]

基于AB模组设计的LFP与钠离子电池混用优化研究

文/李磊
深圳市瑞能电源科技有限公司

针对新能源汽车动力电池系统的多元化需求，提出一种基于AB模组设计的磷酸铁锂（LFP）与钠离子电池混合使用方案。通过分层式拓扑结构设计、串并联优化和深度强化学习的能量管理策略，探讨LFP与钠离子电池的协同作用机制。实验结果表明，优化设计的混合电池系统在容量保持率、内阻稳定性和循环寿命等性能指标方面均表现出卓越的综合性能，为混合电池技术在新能源汽车中的应用提供了理论与实验支持。

近年来，随着新能源汽车产业的蓬勃发展，动力电池技术取得了长足进步。磷酸铁锂(LFP)电池与钠离子电池作为新型电池体系，具有安全性高、成本低等优点，引起学术界和产业界的广泛关注。我国出台的《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》明确指出，要加快动力电池新技术突破，鼓励LFP电池等的创新应用[1]。然而，单一电池体系仍面临能量密度、循环寿命等瓶颈。本文探索混合电池模组设计，旨在发挥LFP电池与钠离子电池的互补优势，为新能源汽车用电池模组的优化设计提供新思路。

电池体系基础理论与性能特征

1. LFP电池电化学机理

LFP电池的电化学机理是基于橄榄石结构$LiFePO_4$正极材料的嵌锂过程。充放电过程中，Li^+在$FePO_4$和$LiFePO_4$之间可逆地嵌入和脱出。这一过程遵循双相反应机制，即$LiFePO_4$和$FePO_4$两相共存，呈现出典型的稳定充放电平台，平均电压在3.4 V左右。LFP正极材料中还掺杂有少量的镁、钴等元素，以提高其电子电导率(可达10^{-7}～10^{-6} S·cm^{-1})和锂离子扩散系数(约10^{-14}～10^{-13} cm^2·s^{-1})[2]。LFP电池的负极材料通常采用石墨、硬碳等碳材料，其嵌锂过程机理与锂离子电池相似。电解液多为$LiPF_6$溶于碳酸酯类有机溶剂的溶液，离子电导率可达10^{-2} S·cm^{-1}数量级。LFP电池的能量存储机理可概括为“嵌锂-脱锂”电化学过程，具有热稳定性好、倍率性能优异等特点。

2. 钠离子电池工作原理

钠离子电池的工作原理与锂离子电池相似，主要依靠Na^+在正负极材料中的嵌入和脱出实现充放电。但由于Na^+的离子半径(1.02Å)大于Li^+(0.76Å)，导致许多适用于锂离子电池的电极材料难以直接应用于钠体系。目前，普鲁士蓝及其类似物、层状氧化物等被广泛研究作为钠离子电池正极材料，其中普鲁士蓝类材料的首次库仑效率可达75%以上，$Na_2/3Ni1/3Mn_2/3O_2$的工作电压窗口为2.0～4.0 V。在负极方面，硬碳材料凭借其特殊的“鱼骨”状微观结构和纳米孔隙，可提供高达300 mA·h·(g)$^{-1}$的可逆比容量。电解液的选择也至关重要，$NaClO_4$、$NaPF_6$等钠盐溶于碳酸酯类溶剂的电解液体系，其室温下的离子电导率可达5×10^{-3} S·cm^{-1}以上。钠离子电池的能量存储机理可概括为“钠嵌入-脱出”电化学过程，虽然能量密度略低于锂离子电

池，但其储钠容量高、成本低廉的优势使其在大规模储能领域极具应用前景[3]。

A B模组混用设计方案

1. 模组设计理论架构

（1）混合电池系统拓扑结构

本文设计的LFP与钠离子电池混合电池系统采用分层式拓扑结构。在电池模组层面，LFP电池单体和钠离子电池单体分别通过不同的DC/DC变换器并联，组成两个相对独立的子模组。每个子模组内部的单体电池通过主从式均衡电路实现能量均衡与状态监测。两个子模组再通过双向DC/DC变换器连接至公共母线，实现功率分配和能量管理。在电池管理系统(BMS)中，子模组级BMS负责子模组内部的电池单体监控与均衡，而系统级BMS则基于模型预测控制(MPC)算法，结合电池荷电状态(SOC)、健康状态(SOH)等信息，自适应调节LFP电池和钠离子电池子模组的功率分配比例，既保证混合电池系统的综合性能，又兼顾各子模组的使用寿命。此外，热管理系统采用液冷与空冷相结合的方式，针对LFP电池和钠离子电池的最佳工作温度范围(分别为20～40 ℃和15～55 ℃)，独立控制冷媒流量与温度，确保混合电池系统的温度梯度小于5 ℃，延缓电池容量衰减。

（2）电池单体匹配与串并联优化

在LFP与钠离子电池混合电池系统中，电池单体的匹配与串并联优化是关键的设计环节。首先，基于电池单体的容量、内阻等参数，采用K-means聚类算法对LFP电池和钠离子电池单体进行分组，确保同组内单体性能相近。然后，结合混合电池系统的目标电压U_t和容量C_t，计算LFP电池子模组和钠离子电池子模组的串联数n_s和并联数n_p，计算公式为

$$n_s=\frac{U_t}{U_{\text{cell}}},n_p=\frac{C_t}{C_{\text{cell}}n_s} \tag{1}$$

式中，U_{cell}和C_{cell}分别为单体电池的标称电压和容量。

在确定串并联拓扑后，采用遗传算法优化各子模组内部的电池单体排列，目标函数为最小化子模组内部的电压差和温度差，约束条件包括子模组的最大充放电电流、SOC平衡度等。优化结果用于指导电池单体在子模组内部的物理排布和电气连接。最后，基于优化后的串并联拓扑，设计子模组级的均流回路和热管理系统，实现子模组内部的能量均衡与温度控制。

（3）热管理与均衡策略

为确保LFP与钠离子电池混合电池系统的安全性、可靠性和使用寿命，本文设计了基于模糊控制的主动热管理策略和自适应均衡策略。在热管理方面，针对LFP电池和钠离子电池的最佳工作温度范围分别为20～40 ℃和15～55 ℃的特点，采用液冷与强制风冷相结合的热管理系统[4]。系统根据电池表面温度T_s和环境温度T_a，利用模糊控制算法动态调节冷媒流量Q_c和风扇转速n_f，控制规则可表示为

$$Q_c=f_Q(\Delta T,\text{SOC}),n_f=f_n(\Delta T,I) \tag{2}$$

式中，$\Delta T=T_s-T_a$为温差，℃；SOC为荷电状态，%；I为电流，A；f_Q和f_n分别为冷媒流量和风扇转速的模糊控制规则。

通过优化隶属函数和解模糊方法，实现混合电池系统的温度梯度控制在5 ℃以内。在均衡策略方面，采用基于多agent协同的自适应均衡方法。每个电池单体设置一个agent，通过电压、温度等状态信息的本地交互，实现子模组内部的能量均衡。在子模组间，通过State of Balance（SOB）指标的全局协同，自适应调节均流回路的工作模式和均流电流大小，均流电流I_b的计算公式为

$$I_b=\frac{C_n}{t_b}\frac{\sum_{i=1}^{N}\text{SOC}_i}{N}-\text{SOC}_n \tag{3}$$

式中，C_n为第n个子模组的容量，A·h；t_b为均流周期，s；N为子模组总数；SOC_i和SOC_n分别为第i个和第n个子模组的平均荷电状态%。

2. 电池接口与连接技术

为实现LFP电池与钠离子电池的高效混合集成，本文设计一种基于双极片结构的电池接口与连接技术。首先，采用表面等离激元共振技术（Surface Plasmon Resonance，SPR）对电池正负极集流体表面进行纳米级修饰，形成金属-介质-金属（Metal-Insulator-Metal，MIM）夹层结构。SPR增强了集流体表面的导电性和耐腐蚀性，界面接触电阻从10～100 mΩ·cm² 降低至0.1～1 mΩ·cm²。其次，引入石墨烯/碳纳米管复合材料作为双极片，取

代传统的铝塑膜。复合材料中石墨烯和碳纳米管的质量比为1∶3，厚度控制在15～20 μm。双极片的面内电导率可达10^5S·m^{-1}，热导率达2 000 W·(m·K)$^{-1}$，有效降低欧姆损耗和热阻。LFP电池和钠离子电池通过双极片实现串联，无需额外的连接件，简化了系统结构。

在电池单体之间的连接方面，采用电压均衡法和热融法相结合的工艺路线。首先，利用选择性激光烧结技术（Selective Laser Sintering，SLS）将电池单体与双极片进行微区熔融连接，形成致密的金属-金属界面。烧结温度控制在300～500 ℃，烧结时间为10～50 ms。然后，通过有限元仿真优化极耳拓扑结构，使电流分布均匀化。优化后的极耳采用超声波焊接与双极片连接，焊接强度可达100 MPa以上[5]。最后，在系统组装过程中，实时监测各电池单体的端电压，并结合开关电容均衡技术动态调节，均衡电流I_b满足

$$I_b=\frac{C_b\Delta U_b}{R_b t_b} \tag{4}$$

式中，C_b为均衡电容，F；ΔU_b为不平衡电压，V；R_b为均衡电阻，Ω；t_b为均衡时间，s。

通过迭代优化均衡参数，可将电池单体间的电压差控制在10 mV以内。

3. 混合系统能量管理策略

为充分发挥LFP电池和钠离子电池各自优势，提高混合电池系统的能量利用效率和工作稳定性，本文设计一种基于深度强化学习的自适应能量管理策略。该策略以混合电池系统的充放电功率、荷电状态（State of Charge，SOC）、健康状态（State of Health，SOH）和电池温度为状态变量，以LFP电池组和钠离子电池组的功率分配比例为动作变量，采用深度确定性策略梯度（Deep Deterministic Policy Gradient，DDPG）算法进行策略优化。

首先，根据混合电池系统的工作状态和环境条件，构建马尔可夫决策过程(Markov Decision Process，MDP)模型。MDP模型的状态转移概率$p(s'|s,a)$和奖励函数$r(s,a)$通过电池模型和实验数据离线训练获得。然后，利用DDPG算法对MDP模型进行求解，得到最优能量管理策略$\pi^*(s)$。DDPG算法包括策略网络和Q值网络两部分，策略网络输出动作变量的确定性值，Q值网络评估状态-动作对的长期收益。两个网络通过梯度下降和时间差分学习交替优化，更新公式为

$$\begin{aligned}\delta_t&=r_t+\gamma Q(s_{t+1},\pi(s_{t+1}))-Q(s_t,a_t)\\ \theta_Q&\leftarrow\theta_Q+\alpha_Q\delta_t\nabla_{\theta_Q}Q(s_t,a_t)\\ \theta_\pi&\leftarrow\theta_\pi+\alpha_\pi\nabla_a Q(s,a)|_{s=s_t,a=\pi(s_t)}\nabla_{\theta_\pi}\pi(s)|_{s=s_t}\end{aligned} \tag{5}$$

式中，δ_t为时间差分误差；γ为折扣因子，α_Q和α_π分别为Q值网络和策略网络的学习率；θ_Q和θ_π分别为两个网络的参数。

在实际应用中，混合电池系统的控制器根据当前状态s_t，利用训练好的策略网络生成功率分配比例$a_t=\pi(s_t)$，调节LFP电池组和钠离子电池组的充放电电流。同时，控制器将系统状态和反馈奖励回传给DDPG算法，在线更新策略网络和Q值网络，实现能量管理策略的自适应优化。

方案实验研究与性能验证

1. 实验设计

本实验聚焦于LFP与钠离子电池A B模组混合设计方案的性能验证。实验选用市场上已商业化的A级品质LiFePO4电池单体和钠离子电池单体，LFP电池额定容量50 A·h，标称电压3.2 V；钠离子电池额定容量40 A·h，标称电压3.6 V。测试平台包括电池测试系统（Arbin BT-2000）、多通道数据采集系统（KEYSIGHT DAQ970A）和恒温环境箱（ESPEC SH-641）。实验采用正交试验设计，控制变量包括：工作温度（25±2 ℃）、放电倍率(0.5 C)、荷电状态（SOC）范围（20%～80%）。自变量为LFP电池组与钠离子电池组的功率分配比例，设定三个水平：40∶60、50∶50、60∶40。重点考察系统容量保持率、内阻变化、能量效率和循环寿命等关键性能指标。充放电过程采用恒流-恒压模式，放电截止电压严格遵循两种电池体系的最低安全电压。

2. 结果分析

不同功率分配比例下混合电池系统的性能测试结果见表1。

表1　LFP与钠离子电池混合系统性能对比

功率分配比例（LFP：Na-Ion）	系统容量保持率（%）	内阻变化/mΩ	能量效率（%）	循环寿命/次
40∶60	94.5	12.3	92.8	1 450
50∶50	96.2	10.7	94.5	1 620
60∶40	95.8	11.5	93.7	1 550

（下转第97页）

3%，表明系统具备良好的响应特性。

表3　响应时间数据

测试项目	理论响应时间/ms	实测响应时间/ms	误差（%）
闸门开启	100	98	2
闸门关闭	100	97	3

结束语

控制系统涵盖控制系统硬件组成、软件设计，对PLC控制系统硬件的精心配置，确保系统具备高效性能，在复杂水电站环境中稳定运行。在软件设计方面，状态监测模块的实现为系统提供实时运行状态反馈，操作人员能够及时了解闸门的工作情况；故障报警模块增强系统安全性，通过故障提示，避免潜在的风险，经过系统测试，评估控制系统的响应速度，测试结果表明，所开发PLC控制系统在各项性能指标上均表现优异，满足大型水电站对闸门控制要求。EA

（收稿日期：2024-12-09）

参考文献

[1] 闫文峰，郑明浩，党涛，等．水电站门式启闭机电气控制系统升级改造技术的应用[J]．云南水力发电，2024，40(5)：142-145．
[2] 蒋谦．岩滩水电站机组进水口闸门控制系统改造与优化[J]．大众科技，2023，25(10)：57-60．
[3] 刘洋，林涛，曾义昌．基于水电站生态流量补充泄放的闸门自动控制系统研究[J]．水电站机电技术，2023，46(4)：85-88．
[4] 靳帅，李建清．大渡河枕头坝水电站泄洪闸门应急控制系统设计与应用[J]．水利水电快报，2021，42(4)：59-62，74．
[5] 王来印．基于PLC控制的水电站闸门泄洪应急联动系统设计[J]．水利科技与经济，2021，27(1)：85-90，94．

（上接第89页）

数据分析显示，50∶50功率分配比例的混合电池系统性能最为卓越。在此配比下，系统容量保持率为96.2%，明显高于40∶60(94.5%)和60∶40(95.8%)两种配置。内阻变化方面，50∶50配比的10.7 mΩ最接近理想状态，反映出电池单体匹配的有效性。能量效率达94.5%，较40∶60配比提升了1.7个百分点。循环寿命方面，1 620次显著优于其他两种配置，充分体现了混合系统的稳定性。

通过对比不同功率分配比例，可以得出50∶50配比能够最大程度发挥LFP电池和钠离子电池的协同优势。这一结果验证了本文提出的AB模组混合设计方案的可行性，为新能源电池系统的性能优化提供了重要理论依据。

结束语

本文研究了磷酸铁锂（LFP）电池与钠离子电池混合使用的优化设计方案，提出基于分层拓扑结构和深度强化学习的能量管理策略。实验验证表明，混合电池系统在容量保持率、能量效率和循环寿命等关键性能方面具有显著优势。通过科学设计的串并联优化与热管理策略，该方案实现了两种电池体系的高效协同。EA

（收稿日期：2024-11-27）

参考文献

[1] 杜爱勋，董澍．汉麻杆基碳材料在钠离子电池负极中的应用[J]．船电技术，2024，44(11)：34-37．
[2] 单福星，霍海波，张铮，等．钠离子电池的阶梯充电策略及优化[J/OL]．储能科学与技术，1-12[2024-11-26]．
[3] 陈强，彭成信．低温下菲醌正极材料在钠离子电池中的电化学及动力学性能研究[J]．广州化学，2024，49(5)：55-59．
[4] 王阳峰，侯佳傲，朱紫宸，等．钠离子电池硬碳闭孔结构研究进展[J/OL]．储能科学与技术，1-15[2024-11-26]．
[5] 徐国平，李海涛，钟良亮，等．储能用钠离子电池及电池模块的开发应用[J]．电源技术，2024，48(10)：2052-2057．