



SOC/SOH 不一致串联电池模组低温交流加热策略

卢健明^{1,2}, 李夔宁^{1,2*}, 郑东滨^{1,2}, 桑艳杰^{1,2}, 谢 翌³

(¹重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044; ²重庆大学能源与动力工程学院, 重庆 400044; ³重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对 SOC/SOH 不一致引起的串联电池模组单体电压裕度、阻抗特征和产热响应差异, 提出一种兼顾单体安全与加热能力的低温交流脉冲加热方法。采用 NCR18650B 圆柱锂离子电池构建 4S 串联模组, 通过低温开路电压和电化学阻抗谱测试及弛豫时间分布分析, 表征温度、SOC 和 SOH 对单体电压与阻抗频率特征的影响; 利用复数非线性最小二乘法辨识二阶 RQ 等效电路—集中参数热耦合模型, 并引入 $0.484 \sim 0.562 \mu\text{H}$ 的等效寄生电感描述高频感抗影响。在过压、过放、析锂和安全频率约束下, 计算各单体在电流幅值—频率域内的安全可行域, 并由可行域交集确定模组允许运行范围。SOC 不一致工况根据动态电压安全裕度最小的单体调节电流幅值, SOH 不一致工况根据安全频率下限最高的单体调节激励频率, 同时采用相邻温区线性插值、变化率限制和滞回控制改善温区切换过程。该策略通过离线参数标定和在线查表插值实现, 无需在 BMS 中实时重构完整阻抗谱, 可降低在线计算负担。分别对 70%-50% 和 50%-30% SOC 不一致模组以及 80%-100% 和 90%-100% SOH 不一致模组开展 3 次独立重复试验, 所得温升速率依次为 0.364 ± 0.006 、 1.257 ± 0.010 、 1.193 ± 0.014 和 $1.157 \pm 0.015^\circ\text{C}/\text{min}$, 变异系数为 $0.79\% \sim 1.62\%$ 。同工况比较结果表明, 固定 1.5C-100 Hz 加热在 70%-50% SOC 工况下使最高单体电压达到 4.457 V, 超过 4.2 V 上截止电压; 所提方法的温升速率为安全限幅 100 Hz 方法的 2.29 ~ 3.62 倍。采用模组平均状态或固定初始短板单体进行调节, 还会分别造成局部安全裕度判断偏差和限制单体迁移漏跟踪。结果说明, 基于单体安全可行域交集和限制单体动态识别的幅值—频率调节方法, 能够在满足各单体安全约束的同时充分利用模组允许的加热能力, 可为不一致串联电池模组的低温预热控制提供依据。对于不同类型电芯和更高串数模组, 相关电热参数与安全边界需根据具体对象重新标定。

关键词: 锂离子电池; 交流脉冲加热; 串联模组; SOC/SOH 不一致; 安全可行域

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0458

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-14

Inconsistency-aware low-temperature AC heating strategy for series-connected battery modules

Lu Jianming^{1,2}, Li Kuining^{1,2*}, Zheng Dongbin^{1,2}, Sang Yanjie^{1,2}, Xie Yi³

(¹Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; ²School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; ³College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Low-temperature operation increases cell polarization and lithium-plating risk, while

收稿日期: 2026-05-25; 修改稿日期: 2026-07-13。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U23A20327)。

第一作者: 卢健明 (2002—), 男, 硕士研究生 (在读), 研究方向为锂离子电池低温加热与热管理, E-mail: cqulujm@stu.cqu.edu.cn; 通信作者: 李夔宁, 教授, 研究方向为电池热管理、车辆热管理, E-mail: leekn@cqu.edu.cn。

引用本文: 卢健明, 李夔宁, 郑东滨, 等. SOC/SOH 不一致串联电池模组低温交流加热策略[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-14.

Citation: Lu Jianming, Li Kuining, Zheng Dongbin, et al. Inconsistency-aware low-temperature AC heating strategy for series-connected battery modules[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-14.

cell-to-cell differences in state of charge (SOC) and state of health (SOH) produce nonuniform voltage margins, impedance characteristics, and heat-generation responses in series-connected battery modules. To coordinate cell-level safety and heating capability under these inconsistencies, an AC pulse heating method based on feasible-domain intersection and dynamic identification of limiting cells is proposed. A 4S module composed of NCR18650B cylindrical lithium-ion cells was constructed as the experimental platform. Low-temperature open-circuit voltage and electrochemical impedance spectroscopy tests, together with distribution of relaxation times analysis, were conducted to characterize the effects of temperature, SOC, and SOH on cell voltage and impedance-frequency behavior. A coupled electrothermal model consisting of a second-order resistor-constant phase element equivalent circuit and a lumped-parameter thermal model was identified using complex nonlinear least squares. An equivalent parasitic inductance of 0.484-0.562 μH was included to account for the high-frequency inductive response. Cell-level safety-feasible domains in the current-amplitude-frequency plane were then calculated under overvoltage, overdischarge, lithium-plating, and safe-frequency constraints, and their intersection defined the allowable operating range of the module. For SOC-inconsistent modules, the current amplitude was adjusted according to the cell with the minimum dynamic voltage safety margin; for SOH-inconsistent modules, the excitation frequency was adjusted according to the cell with the highest safe-frequency lower bound. Linear interpolation between adjacent temperature intervals, rate limits, and hysteresis control were employed to smooth parameter updates during temperature-region transitions. The strategy uses offline parameter calibration and online lookup-table interpolation, avoiding real-time reconstruction of full impedance spectra and reducing the computational burden on the battery management system. Three independent heating tests were conducted under each of four conditions: modules with 70%-50% and 50%-30% SOC distributions and modules with 80%-100% and 90%-100% SOH distributions. The corresponding temperature-rise rates were 0.364 ± 0.006 , 1.257 ± 0.010 , 1.193 ± 0.014 , and 1.157 ± 0.015 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, respectively, with coefficients of variation ranging from 0.79% to 1.62%. Under the 70%-50% SOC condition, fixed 1.5C-100 Hz heating increased the maximum cell voltage to 4.457 V, exceeding the upper cutoff voltage of 4.2 V. Compared with the voltage-safe 100 Hz current-limited method, the proposed method achieved temperature-rise rates that were 2.29-3.62 times as high. Control based on the module-averaged state or a fixed initial bottleneck cell also led to local safety-margin misjudgment or failure to track limiting-cell migration. The results demonstrate that the proposed amplitude-frequency regulation method can exploit the allowable heating capability of the module while satisfying the safety constraints of every cell. The method provides a basis for low-temperature preheating control of inconsistent series-connected battery modules. For other cell formats and modules with more series-connected cells, the electrothermal parameters and safety boundaries should be recalibrated for the specific system.

Keywords: lithium-ion battery; AC pulse heating; series-connected module; SOC/SOH inconsistency; safety-feasible domain

寒区储能电站、户外储能柜和备用电源系统在低温待机后投运时，需要通过预热恢复可用功率和

容量。低温电解液传输受限、界面极化增强和析锂风险升高，会造成可用容量下降、端电压平台降低和安全裕度收窄^[1-2]；低温脉冲或交流加热实验也表明，电池在低温下更容易出现电压波动放大和极化压降增加^[3-4]。储能用大容量锂离子电池低温快速加热研究进一步体现了储能场景对快速、安全预热的工程需求^[5]；对于储能系统而言，上述现象不仅影响启动效率，也会放大充放电切换和并网功率调节过程中的安全风险^[6]。

交流或双向脉冲加热利用电池内部欧姆阻抗和极化阻抗产热，具有体热源、升温快、附加结构少和 SOC 净变化小等特点^[3-5,7]。已有研究从频率、幅值和寿命衰减角度指出，降低激励频率或提高电流幅值通常能够提升产热功率，但也会增加端电压峰谷波动、极化滞后和析锂/寿命风险^[8-11]。温度一致性管理和外部热管理研究进一步说明，加热策略不能只追求温升速率，还应受电压边界、温度均匀性和安全裕度共同约束^[12]。

实际串联电池模组并非理想一致对象。制造差异、温度梯度和循环老化会使单体容量、内阻和热响应逐渐分化，进而形成 SOC 和 SOH 不一致^[13-14]。SOC 和容量估计研究表明，老化模组中单体状态差异会影响可用容量与安全边界判断^[15]；一致性演化研究进一步指出，循环过程中的局部温度和负载差异会放大模组不平衡^[16]。SOH 估计、单体差异与热梯度研究也表明，单体级参数离散会影响热一致

性和控制裕度^[17-21]。

SOH 不一致还会改变阻抗频率特征。EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy, 电化学阻抗谱) 机理研究和 DRT (Distribution of Relaxation Times, 弛豫时间分布) 方法能够分离不同弛豫时间尺度下的欧姆、电荷转移和扩散相关响应，为识别低温老化阻抗特征提供依据^[22-23]。基于 EIS 的 SOH 估计和多频点阻抗分选研究表明，阻抗谱不仅反映容量衰退，也可用于区分老化程度和筛选一致性样本^[24-25]。因此，在低温交流加热中，SOH 差异不应只被视为产热增强因素，还应进入安全频率边界和单体级可行域计算。

综上，已有研究已覆盖低温交流加热、温度一致性管理和模组一致性评价，但多数工作仍以单体、一致性模组或平均模组状态为对象，尚未将 SOC/SOH 不一致下的单体电压边界、析锂约束和阻抗频率特征统一映射到模组幅值-频率可行域。本文与前期相关研究^[26-27]在研究对象和约束粒度上的差异见表 1。

本文采用 NCR18650B 圆柱锂离子电池构建 4S 串联模组，用于验证 SOC/SOH 不一致条件下的单体级安全可行域交集及控幅、控频方法。对于大容量方形或软包电芯，OCV、阻抗谱、热参数、连接寄生参数和析锂边界均需根据具体封装形式与容量等级重新标定。

表 1 本文与前期研究差异

Table 1 Differences from previous studies

对比项	文献 ^[26]	文献 ^[27]	本文
研究对象	单体电池/一致性模组	全寿命周期单体电池	SOC/SOH 不一致 4 串模组
SOC/SOH 不一致	未显式考虑	未显式考虑	有，分 SOC 控幅与分 SOH 控频
单体级安全可行域	无	无	有，由各单体 F_i 的交集得到 F_{mod}
同工况简化基线	未比较	未比较	固定频率、平均单体、静态短板

本文主要贡献如下。

(1) 构建单体级安全可行域 F_i 及模组交集 F_{mod} ，将过压、过放、析锂和安全频率约束统一到幅值-频率域。

(2) 定义短板单体和频率限制单体迁移判据，分别由动态电压裕度 $M_{i,\text{dyn}}$ 和安全频率下限 $f_{\text{safe},i}$ 的排序反转确定。

(3) 在四类 SOC/SOH 不一致 4 串模组中验证分段控幅/控频策略，并与固定频率、平均单体和

静态短板规则进行同工况基线对比。

计算复杂度约为 $O(K \cdot N \cdot N_i \cdot N_f)$ ，其中 K 为温区数， N 为串联单体数， N_i 和 N_f 分别为候选电流幅值和候选频率网格数。本文不一致性感知交流脉冲加热策略框架如图 1 所示。

1 实验与模型方法

1.1 实验对象与低温测试平台

实验对象为 NCR18650B 圆柱形锂离子电池，

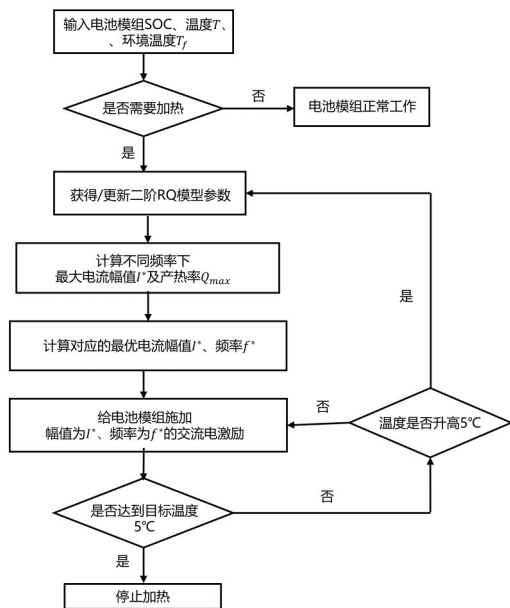


图1 策略框架

Fig. 1 Inconsistency-aware AC pulse heating framework

正、负极材料分别为三元材料和石墨。串联模组由4节单体电池组成，所用电池的主要技术参数见表2。低温实验平台包括恒温箱、新威电池测试系统、KIKUSUI PBZ20-20 双极性电源、DH7002A-1 电化学工作站、示波器和安捷伦数据采集仪，可实现SOC调节、OCV（Open-Circuit Voltage，开路电压）测试、EIS测试、交流脉冲加热、电压波形监测和温度同步记录。平台结构见图2。该4S模组用于验证单体级安全约束、控幅/控频逻辑及限制单体迁移。文中辨识参数仅适用于当前电芯与连接结

构，不作为大容量储能电芯的通用参数。本文SOC/SOH不一致模组的工况组成如表3所示。表中3#、4#、5#、8#和10#均为实验电池样品编号，并非模组串联位置编号；串联位置1—4仅表示4串模组中的连接顺序。其中，8#和10#分别为SOH90%和SOH80%老化样品。70%-50% SOC和50%-30% SOC工况均由3节高SOC单体与1节低SOC单体构成，因此对应平均单体策略的等效SOC分别为65%和45%。

表2 电池主要技术参数

Table 2 Main technical specifications of the battery

项目	参数
电池型号	NCR18650B
正、负极材料	三元/石墨
标称容量	3500 mAh
电池质量	45.57 g
比热容	889 J/(kg·K)
标称电压	3.65 V
上、下截止电压	4.2 V/2.5 V
工作温度范围	充电0~45℃，放电-20~60℃
模组构型	4节串联



图2 低温实验平台

Fig. 2 Low-temperature experimental platform

表3 SOC/SOH不一致模组工况组成

Table 3 Operating conditions of SOC/SOH-inconsistent modules

工况名称	串联位置1	串联位置2	串联位置3	串联位置4	用途
70%-50% SOC	2#, SOC50%	3#, SOC70%	4#, SOC70%	5#, SOC70%	SOC不一致控幅验证；平均SOC为65%
50%-30% SOC	2#, SOC30%	3#, SOC50%	4#, SOC50%	5#, SOC50%	SOC不一致控幅验证；平均SOC为45%
80%-100% SOH	10#, SOH80%	3#, SOH100%	4#, SOH100%	5#, SOH100%	SOH不一致控频验证
90%-100% SOH	8#, SOH90%	3#, SOH100%	4#, SOH100%	5#, SOH100%	SOH不一致控频验证

1.2 低温表征数据与参数基础

低温表征数据包括低温放电、OCV、EIS和等效对流换热系数。放电数据用于评估-20~25℃范围内容量与电压平台变化；OCV用于计算不同

SOC下单体电压安全裕度；EIS用于辨识二阶RQ参数、分析温度/SOC/SOH对阻抗特征的影响，并支撑高频复阻抗包络重构。

0.5C放电结果表明，-20℃下平均可用容量相

比 25℃ 减少约 0.46 Ah，占额定容量 13.76%；升至 5℃ 后初始端电压比和可用容量比分别恢复至常温 25℃ 的 99.26% 和 97.04%。继续升温的容量收益有限，因此本文将 5℃ 作为低温交流加热目标温度。

OCV 实验在 100%、90%、70%、50%、30%、10% 和 0% SOC 点进行，每个 SOC 点通过放电-静置-测量步骤降低极化影响。五个单体电池的 OCV-SOC 曲线在全 SOC 区间内较好重合，说明样本初始电势一致性较好；当串联模组中人为设置不同 SOC 时，OCV 差异就成为电压安全裕度差异的主要来源。EIS 采用 200 mA 小幅正弦扰动，频率范围为 0.1 Hz 至 10 kHz；低温下 Nyquist 曲线高频截距右移、容抗弧增大，SOH 降低时阻抗和 DRT 弛豫特征进一步增强并向长弛豫时间迁移。图 3 和图 4 分别给出 OCV-SOC、电压裕度及低温 EIS/DRT 特征。

二阶 RQ+L 参数采用复数非线性最小二乘法联

合辨识。首先根据 EIS 高频段阻抗虚部相对于角频率的局部斜率估计等效寄生电感初值，随后将其与欧姆内阻及两组 RQ 参数在实测频段内联合修正。本文参数集覆盖 -20~5℃ 和 SOH 80%~95%，所得等效寄生电感为 $4.84 \times 10^{-7} \sim 5.62 \times 10^{-7}$ H，即 0.484~0.562 μ H。该参数包含单体引线、连接片及测试回路的等效寄生贡献，其辨识质量通过模型复阻抗与实测 EIS 数据的一致性进行检查；更换电芯封装、线束或模组连接结构后需重新标定。

OCV-SOC 关系由离线静置试验获得，RQ 参数和等效寄生电感由离线 EIS 数据辨识得到；析锂临界电位裕度通过单体析锂一过压安全边界的离线标定与模型计算形成查找表。安全频率下限由 EIS/2RQ+L 模型约束计算，DRT 用于辅助识别老化敏感频段。在线阶段主要执行温度、SOC、SOH、电流幅值和频率维度的查表插值、可行域交集及限幅保护，无需实时重构完整 EIS 或 DRT。

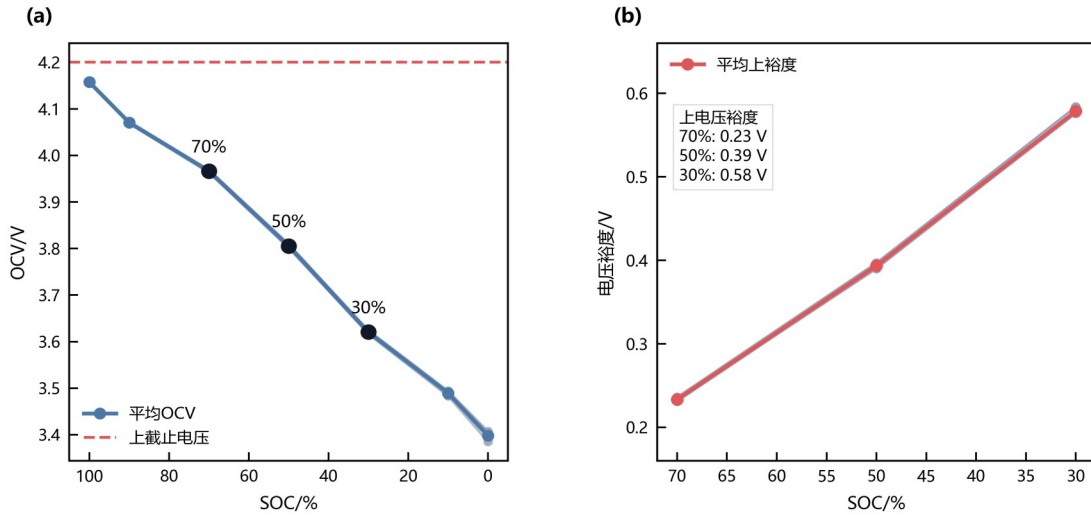


图3 OCV-SOC与电压裕度
Fig. 3 OCV-SOC curves and voltage margins

1.3 串联电池模组电热耦合模型

本文以既有二阶 RQ 等效电路与集中参数热模型作为建模基础^[26-27]，并在 kHz 交流激励端电压计算中引入单体及连接结构相关的等效寄生电感 $L_{ind,i}$ ，用于描述 kHz 频段高频感抗对端电压峰谷值的影响。等效电路描述欧姆压降和快、慢极化过程，热模型计算内部产热与对流散热之间的能量平衡；串联模组中各单体流过相同电流，模组总电压

为各单体端电压之和。本文使用该模型预测给定交流幅值和频率下各单体电压与温度响应，并将预测结果用于单体级安全可行域筛选。

1.4 模组级安全约束

交流加热安全边界由析锂约束和上下截止电压约束共同构成。与仅限制模组总电压不同，本文要求串联模组内每一节单体均满足安全边界。候选交流激励只有在所有单体均不发生过压、过放或析锂

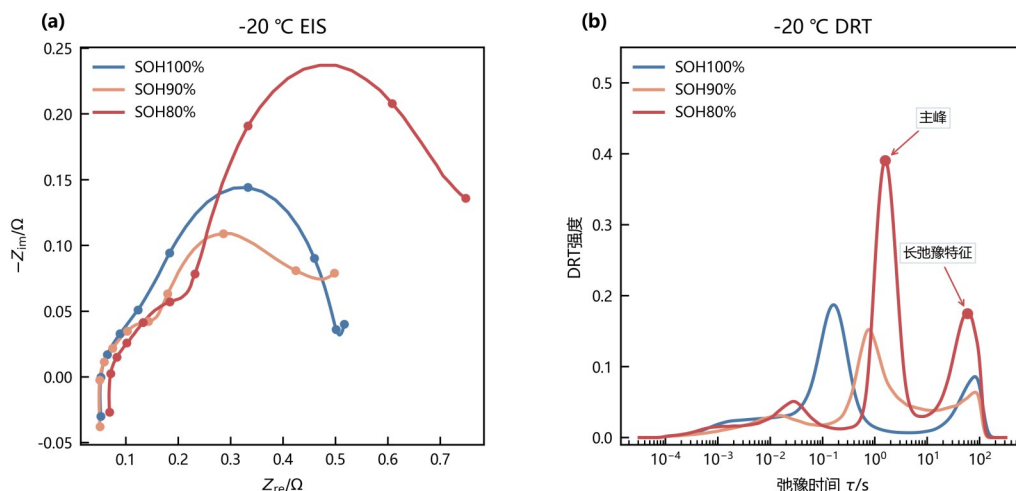


图4 低温EIS/DRT特征

Fig. 4 Low-temperature EIS/DRT characteristics

风险时才可施加。因此，模组可允许的电流幅值和频率由最先触及局部安全边界的单体决定。

2 串联模组 SOC/SOH 不一致性机理分析

2.1 SOC 不一致与短板单体迁移

SOC 不一致首先表现为单体开路电压差异。SOC 越高，开路电压越接近上截止电压，正半周期交流加热时可用电压裕度越小；70% SOC 单体上电压裕度约 0.23 V，50% SOC 约 0.39 V，30% SOC 约 0.58 V。因此，70%-50% SOC 模组温升速率低于 50%-30% SOC 模组，主要受 70% SOC 单体较窄上电压安全裕度限制；50%-30% SOC 模组中的高 SOC 单体仍保留更大的上电压空间。

短板单体定义为当前温度、SOC 和交流激励下动态电压安全裕度最小的单体。由于温度、阻抗谱、电压边界和产热响应随加热过程变化，短板单体并非固定对象；当第 i 、 j 节单体的动态裕度排序在相邻温区发生反转时，可判定短板迁移，充分判据如式 (1) 所示。

$$[M_{i,dyn}(T_k) - M_{j,dyn}(T_k)][M_{i,dyn}(T_{k+1}) - M_{j,dyn}(T_{k+1})] < 0 \quad (1)$$

2.2 SOH 不一致与频率限制单体迁移

SOH 不一致不仅改变内阻大小，还改变 EIS/DRT 中的阻抗弛豫特征。老化单体弛豫峰增强并向较长弛豫时间迁移，表明界面动力学迟滞加剧；本文将 DRT 用于表征整体弛豫特征迁移，不对单峰

作唯一机理解耦。SOH 不一致控频的目的在于避开深度老化单体更敏感的迟滞响应区间，降低局部极化越界和非均匀产热风险，而不是简单利用高阻抗提高产热。

低温下，电解液离子传输与界面电荷转移动力学减缓，电荷转移阻抗和扩散相关阻抗增大，DRT 弛豫特征相应增强并向较长时间尺度迁移。频率较低时，慢极化和扩散过程能够更充分地参与单个交流周期，从而增大端电压摆幅和负极极化，提高局部电压越界与析锂风险。提高频率可削弱慢过程的参与程度，但频率过高会增大感抗贡献，并提高双极性电源开关、采样和控制的实现要求。随着温度升高，电荷转移和扩散阻抗的贡献减小，安全频率下限可相应降低；在相同温度下，SOH 降低通常会增强界面阻抗与扩散迟滞，使安全频率下限升高。

频率限制单体定义为因阻抗特征需要更高安全激励频率的单体。该限制对象会随温度、阻抗谱和安全频率下限变化而迁移；当第 i 、 j 节单体的安全频率下限排序在相邻温区发生反转时，可判定频率限制单体迁移，充分判据如式 (2) 所示。

$$[f_{safe,i}(T_k) - f_{safe,j}(T_k)][f_{safe,i}(T_{k+1}) - f_{safe,j}(T_{k+1})] < 0 \quad (2)$$

3 不一致性感知交流脉冲加热策略

3.1 单体级安全可行域

策略核心在于每个温区内计算所有单体安全可行域的交集。只有候选幅值 I 和频率 f 同时满足所有

单体的电压、析锂和频率约束时，才允许施加到串联模组。

本文将单体安全频率下限定义为候选频率集合中满足下式的最小频率：

$$f_{\text{safe},i}(T, \text{SOC}_i, \text{SOH}_i) = \min_{f \in \Omega_i} \{ f | \exists I \in I_i, M_{i,\text{dyn}}(I, f, T) \geq 0 \wedge f \notin \text{sens}_i \} \quad (3)$$

其中，动态安全裕度同时考虑上下截止电压和析锂裕度约束。EIS/2RQ+L 模型用于定量计算候选幅值和频率下的电压响应，DRT 用于辅助表征老化敏感频段的弛豫特征。安全频率下限由上述约束共同确定，并不等同于某一单独 DRT 峰值或单一 EIS 特征频率。第 i 节单体端电压模型如式 (4) 所示。其中 $L_{\text{ind},i}$ 表示第 i 节单体及连接结构相关的等效寄生电感，用于描述 kHz 频段高频感抗对端电压峰谷值的影响。

$$V_i(t) = U_{\text{OCV},i}(\text{SOC}_i, T) + I(t)R_{0,i}(T, \text{SOH}_i) + V_{\text{p}1,i}(t) + V_{\text{p}2,i}(t) + L_{\text{ind},i} \frac{dI(t)}{dt} \quad (4)$$

上下截止电压约束、峰值电压和谷值电压分别定义为式 (5) 一式 (7)。

$$V_{\min} \leq V_i(t; I, f, T, \text{SOC}_i, \text{SOH}_i) \leq V_{\max} \quad (5)$$

$$V_{i,\text{peak}} = \max_{t \in T(f)} V_i(t) \quad (6)$$

$$V_{i,\text{valley}} = \min_{t \in T(f)} V_i(t) \quad (7)$$

$\tau(f)$ 表示交流周期或当前温区内用于峰谷值评价的仿真时间窗。

动态电压裕度定义为式 (8)。其中 $\eta_{i,\text{pl}}$ 为第 i 节单体析锂临界电位裕度，非负表示满足析锂安全边界。析锂临界电位裕度由单体析锂一过压双安全边界的离线试验与模型标定获得，并按温度、SOC、SOH、电流幅值和频率构建查找表。在线运行时，BMS 依据当前状态进行插值调用，并结合单体端电压反馈和经试验标定的电流安全裕量进行修正。

$$M_{i,\text{dyn}}(I, f, T) = \min(V_{\max} - V_{i,\text{peak}}, V_{i,\text{valley}} - V_{\min}, \eta_{i,\text{pl}}) \quad (8)$$

单体安全可行域定义为式 (9)，同时考虑动态裕度非负和安全频率下限。

$$F_i(T, \text{SOC}_i, \text{SOH}_i) = \{ (I, f) | M_{i,\text{dyn}}(I, f, T) \geq 0, f \geq f_{\text{safe},i}(T, \text{SOC}_i, \text{SOH}_i) \} \quad (9)$$

模组安全可行域为所有单体可行域的交集，如式 (10) 和图 5 所示。该交集直接决定串联模组可施加的幅值-频率域。

$$F_{\text{mod}}(T) = \bigcap_{i=1}^N F_i(T, \text{SOC}_i, \text{SOH}_i) \quad (10)$$

先按式 (11) 确定满足所有单体安全频率下限

的模组统一频率 $f^*(T)$ ，再按式 (12) 在该频率下求取最大可行电流 $I^*(T)$ 。

$$f^*(T) = \max_{1 \leq i \leq N} f_{\text{safe},i}(T, \text{SOC}_i, \text{SOH}_i) \quad (11)$$

$$I^*(T) = \max_{I \in I} I, \text{s.t. } (I, f^*(T)) \in F_{\text{mod}}(T) \quad (12)$$

短板单体和频率限制单体分别定义为式 (12) 和式 (13)。

$$b(T) = \arg \min_{1 \leq i \leq N} M_{i,\text{dyn}}(I^*(T), f^*(T), T) \quad (13)$$

$$r(T) = \arg \max_{1 \leq i \leq N} f_{\text{safe},i}(T, \text{SOC}_i, \text{SOH}_i) \quad (14)$$

当存在并列最小裕度或并列最高安全频率下限时，按更保守的电压裕度或更高频率要求选取限制单体。

式 (3) 一式 (14) 给出了从单体端电压、动态裕度、单体可行域到模组交集、控幅/控频输出和限制单体迁移的闭环定义。

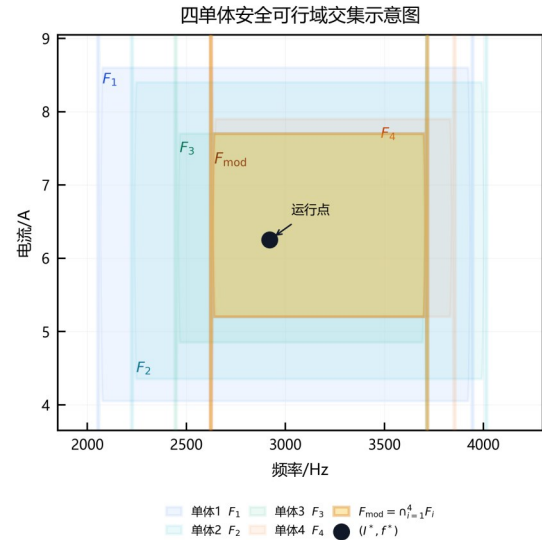


图5 可行域交集

Fig. 5 Feasible-domain intersection

3.2 SOC/SOH 不一致模组分温区动态调度策略

在获得模组级安全可行域后，本文根据不一致类型分别进行分温区幅值和频率调度。SOC 不一致主要改变单体开路电压和上下截止电压裕度，因此其控制重点是在所有单体安全约束内最大化交流电流幅值，并随温区更新动态电压裕度最小的短板单体；SOH 不一致除影响内阻和产热能力外，还会改变阻抗弛豫特征和安全频率下限，因此在控幅基础上进一步引入频率调度，以频率限制单体所需的最高安全频率下限作为模组统一激励频率。

对于 SOC 不一致模组, 控幅目标是在满足过压、过放和析锂约束的前提下提高电流利用率。70%-50% SOC 工况受高 SOC 单体较窄上电压裕度限制, 允许电流整体低于 50%-30% SOC 工况; 同时, 短板单体随温区发生迁移, 说明固定初始短板不能准确表征整个升温过程的安全边界。两类 SOC 不一致模组的分温区幅值、频率和短板单体如表 4 所示, 对应调度趋势见图 6。

对于 SOH 不一致模组, 策略在控幅基础上进一步根据 EIS/DRT 识别得到的老化相关阻抗弛豫特征区间计算安全频率下限, 并选取各单体安全频率要求中的最大值作为模组统一频率, 使交流加热避开老化单体更敏感的迟滞响应区间。80%-100% SOH 工况在低温初始阶段需要更高激励频率, 表明深度老化单体对频率边界的约束更强; 随温度升高, 各工况频率要求逐渐降低, 频率限制单体也可

表 4 SOC 不一致模组加热策略参数

Table 4 Heating strategy parameters for SOC-inconsistent modules

温度区间	70%-50% SOC 幅值/频率	短板单体	50%-30% SOC 幅值/频率	短板单体
-20~-15℃	4.57 A/3771 Hz	4#SOC70%	7.61 A/3472 Hz	4#SOC50%
-15~-10℃	5.17 A/2893 Hz	4#SOC70%	8.63 A/2585 Hz	3#SOC50%
-10~-5℃	5.40 A/2451 Hz	5#SOC70%	8.95 A/2322 Hz	3#SOC50%
-5~0℃	5.51 A/2204 Hz	5#SOC70%	9.10 A/2182 Hz	3#SOC50%
0~5℃	5.60 A/2075 Hz	3#SOC70%	9.28 A/2014 Hz	3#SOC50%

能发生迁移。表 5 中“短板/频率限制单体”采用“电压裕度限制单体/安全频率限制单体”的形式表示, 例如 10#/10# 表示短板单体和频率限制单体均为 10# 样品。两类 SOH 不一致模组的分温区幅值、频率及短板/频率限制单体如表 5 所示, 对应调度趋势见图 7。

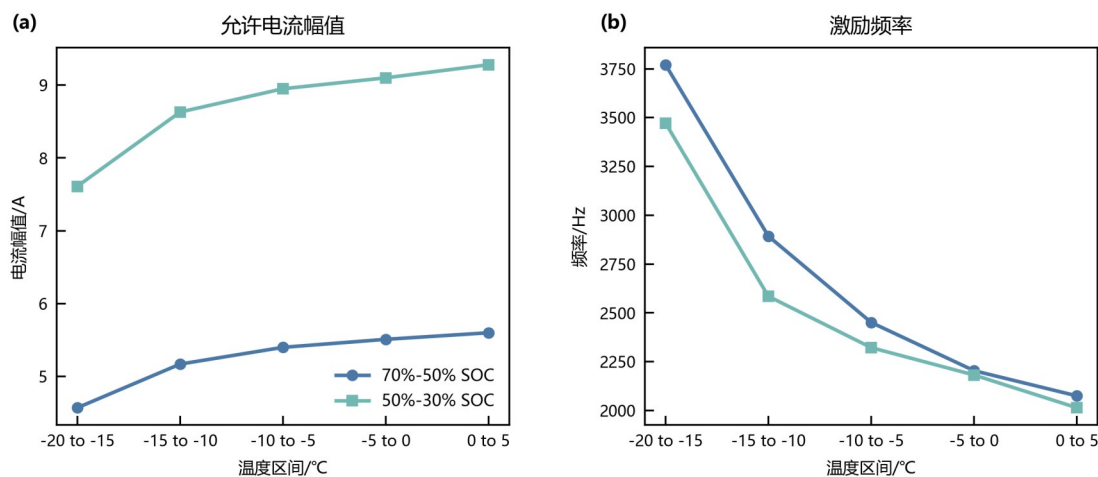


图 6 SOC 调度参数

Fig. 6 SOC scheduling parameters

表 5 SOH 不一致模组加热策略参数

Table 5 Heating strategy parameters for SOH-inconsistent modules

温度区间	80%-100% SOH 幅值/频率	短板/频率限制单体	90%-100% SOH 幅值/频率	短板/频率限制单体
-20~-15℃	7.21 A/4320 Hz	10#/10#	7.61 A/3578 Hz	8#/5#
-15~-10℃	8.63 A/2661 Hz	3#/10#	8.63 A/2585 Hz	3#/5#
-10~-5℃	8.95 A/2322 Hz	3#/5#	8.95 A/2322 Hz	3#/5#
-5~0℃	9.10 A/2182 Hz	3#/5#	9.10 A/2182 Hz	3#/5#
0~5℃	9.28 A/2104 Hz	3#/5#	9.28 A/2104 Hz	3#/5#

3.3 控制流程与参数更新逻辑

在线执行时, BMS 读取单体温度、SOC、SOH 和电压边界, 在当前 5℃ 温区内查表或计算候

选 (I, f) 下各单体端电压与析锂裕度; 随后求取所有单体安全可行域交集。策略先根据各单体安全频率下限确定模组统一安全频率 $f'(T)$, 再在该频率下

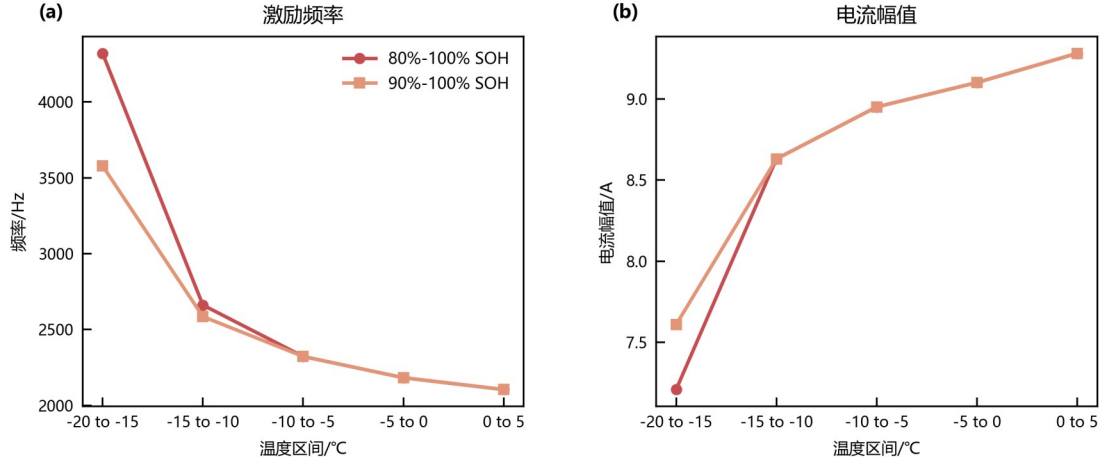


图7 SOH调度参数

Fig. 7 SOH scheduling parameters

于模组级可行域 $F_{\text{mod}}(T)$ 内求取最大可行电流 $I'(T)$ 。当温度跨区、在线电压接近边界或任一单体预测越界/进入析锂风险区时，策略更新限制单体并降低幅值或调整频率，直至所有单体重新满足安全约束。

为避免跨越 5°C 温区边界时电流幅值和频率发生突变，根据当前温度对相邻温区节点的目标参数进行线性插值，并限制电流幅值和频率的变化速率，以减小控制量突变引起的瞬态冲击。同时，在温区边界设置宽度大于温度测量不确定度的滞回区间，以避免测温波动导致参数频繁切换。变化速率上限需综合考虑双极性电源动态响应、控制周期及

单体电压安全裕度，并结合实际硬件特性进行标定。

4 结果与讨论

4.1 模组模型验证

本节以固定 $1.5\text{C}-100\text{ Hz}$ 激励下 SOC 一致性模组的实测结果验证基础电热模型预测精度，暂不作为不一致加热策略的直接性能基线。图 8(c)表明，三组一致性模组温升速率误差均处于可接受范围，说明模型可用于后续不一致工况的策略验证和安全边界筛选。

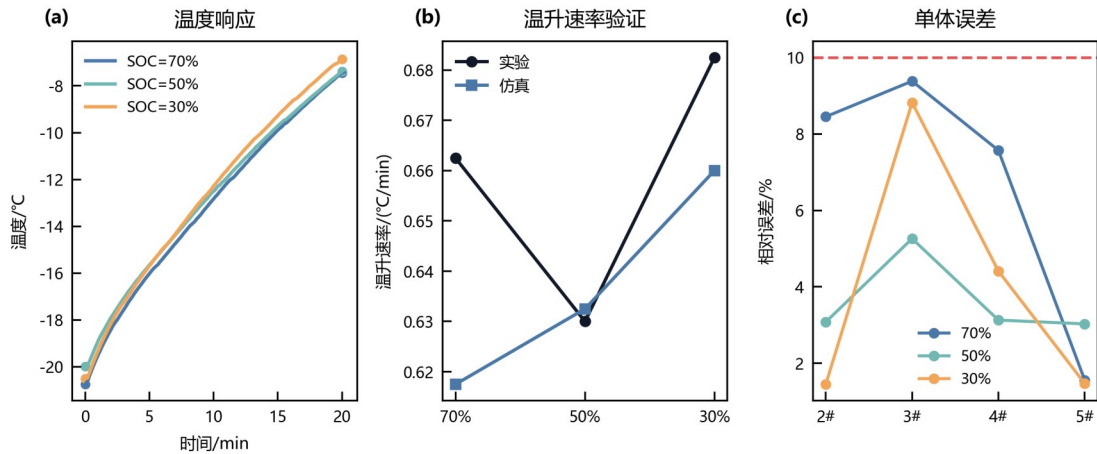


图8 模型验证

Fig. 8 Model validation

4.2 SOC不一致模组加热结果

为评价 SOC 不一致工况下加热结果的重复性, 对 70%-50% 和 50%-30% SOC 模组分别开展 3 次独立重复试验。两种工况的温升速率分别为 0.364 ± 0.006 和 1.257 ± 0.010 °C/min, 重复试验间的变异系数分别为 1.62% 和 0.79%。

70%-50% SOC 工况的温升速率低于 50%-30% SOC 工况, 主要是由于高 SOC 单体的上电压安全裕度较小, 限制了模组允许的电流幅值; 在 50%-30% SOC 工况下, 单体上电压裕度相对增大, 策略能够在共同安全可行域内采用更高的电流幅值, 从而提高产热功率。上述结果表明, SOC 不一致模组的加热能力取决于局部电压裕度最小的单体, 不能由模组平均 SOC 直接判断。

4.3 SOH不一致模组加热结果

采用相同的温度表征和温升速率计算方法, 对 80%-100% 和 90%-100% SOH 模组分别开展 3 次独立重复试验。两种工况的温升速率分别为 1.193 ± 0.014 和 1.157 ± 0.015 °C/min, 重复试验间的变异系数分别为 1.17% 和 1.27%。

两种 SOH 不一致工况的温升速率较为接近。虽然老化单体阻抗增大有利于提高局部产热, 但其电压裕度和老化敏感频段也会限制允许的电流幅值与激励频率; 因此, 模组加热能力由阻抗产热效应和单体级安全约束共同决定, 不能仅依据 SOH 降低或内阻增大推断。该结果也说明, SOH 不一致工况下需要同步跟踪频率限制单体及其随温度的迁移。

图 9 给出了 4 类不一致工况的温度验证和阻抗

重构电压包络。图 9(b)(e)(h)(k) 中的单体电压峰谷线由 EIS/2RQ+L 模型重构得到, 并非示波器逐单体直接采集结果; 现有示波器记录主要为 4 串模组总端电压, 可用于对模型端电压峰谷重构结果进行整体校核。该重构包含高频欧姆、极化及等效感抗贡献, 可用于离线安全边界筛选; 工程应用时仍需结合单体端电压反馈, 并根据模型误差和硬件动态特性标定电流安全裕量。

4.4 同工况基线仿真与简化策略对比

为检验简化规则在相同 SOC/SOH 不一致工况下的适用性, 本文设置固定 1.5C-100 Hz、安全限幅 100 Hz、平均单体和静态短板策略作为对比对象。固定频率用于检验一致性模组参数外推风险, 安全限幅 100 Hz 用于检验固定频率下的保守控幅效果, 平均单体和静态短板分别用于检验平均状态替代和初始限制单体固定假设的失效模式, 结果见表 6。

表 6 表明, 固定 1.5C-100 Hz 的主要风险是局部上电压越界, 安全限幅 100 Hz 虽能恢复边界安全但电流利用不足、温升较慢; 平均单体策略会掩盖高 SOC 单体上电压裕度压缩, 静态短板策略则漏跟踪短板迁移。因此, 不一致串联模组低温交流加热需要进行单体级可行域交集计算和限制单体动态识别, 不能仅依赖固定频率、平均状态或初始短板。

为提高比较的可比性, 选取模组或串联电池包低温加热研究, 从加热对象、温度区间、输入方式、温升性能以及安全与一致性约束等方面进行比较, 结果见表 7。鉴于不同研究的电芯类型、目标

表 6 简化基线风险汇总

Table 6 Risk summary of simplified baselines

工况	基线策略	幅值/频率	温升速率	最高电压/最小裕度	失效模式
70%-50% SOC	固定 1.5C-100 Hz	5.25 A/100 Hz	0.566 °C/min	4.457 V/-0.257 V	上电压越界
70%-50% SOC	安全限幅 100 Hz	2.52 A/100 Hz	0.159 °C/min	4.200 V/0.000 V	电流利用不足
70%-50% SOC	平均 SOC	5.36-6.25 A/2451-3771 Hz	0.504 °C/min	4.240 V/-0.040 V	平均 SOC 误判
70%-50% SOC	静态短板	4.62-5.12 A/2893-3771 Hz	0.371 °C/min	4.202 V/-0.0015 V	迁移漏跟踪
50%-30% SOC	固定 1.5C-100 Hz	5.25 A/100 Hz	0.566 °C/min	4.327 V/-0.127 V	上电压越界
50%-30% SOC	安全限幅 100 Hz	3.98 A/100 Hz	0.347 °C/min	4.200 V/0.000 V	电流利用不足
50%-30% SOC	平均 SOC	8.31-9.93 A/2014-3472 Hz	1.349 °C/min	4.241 V/-0.041 V	平均 SOC 误判
50%-30% SOC	静态短板	7.58-9.01 A/2014-3472 Hz	1.117 °C/min	4.203 V/-0.0025 V	迁移漏跟踪
80%-100% SOH	固定 1.5C-100 Hz	5.25 A/100 Hz	0.557 °C/min	4.319 V/-0.119 V	上电压越界
80%-100% SOH	安全限幅 100 Hz	4.02 A/100 Hz	0.349 °C/min	4.200 V/0.000 V	电流利用不足
90%-100% SOH	固定 1.5C-100 Hz	5.25 A/100 Hz	0.541 °C/min	4.319 V/-0.119 V	上电压越界
90%-100% SOH	安全限幅 100 Hz	4.02 A/100 Hz	0.339 °C/min	4.200 V/0.000 V	电流利用不足

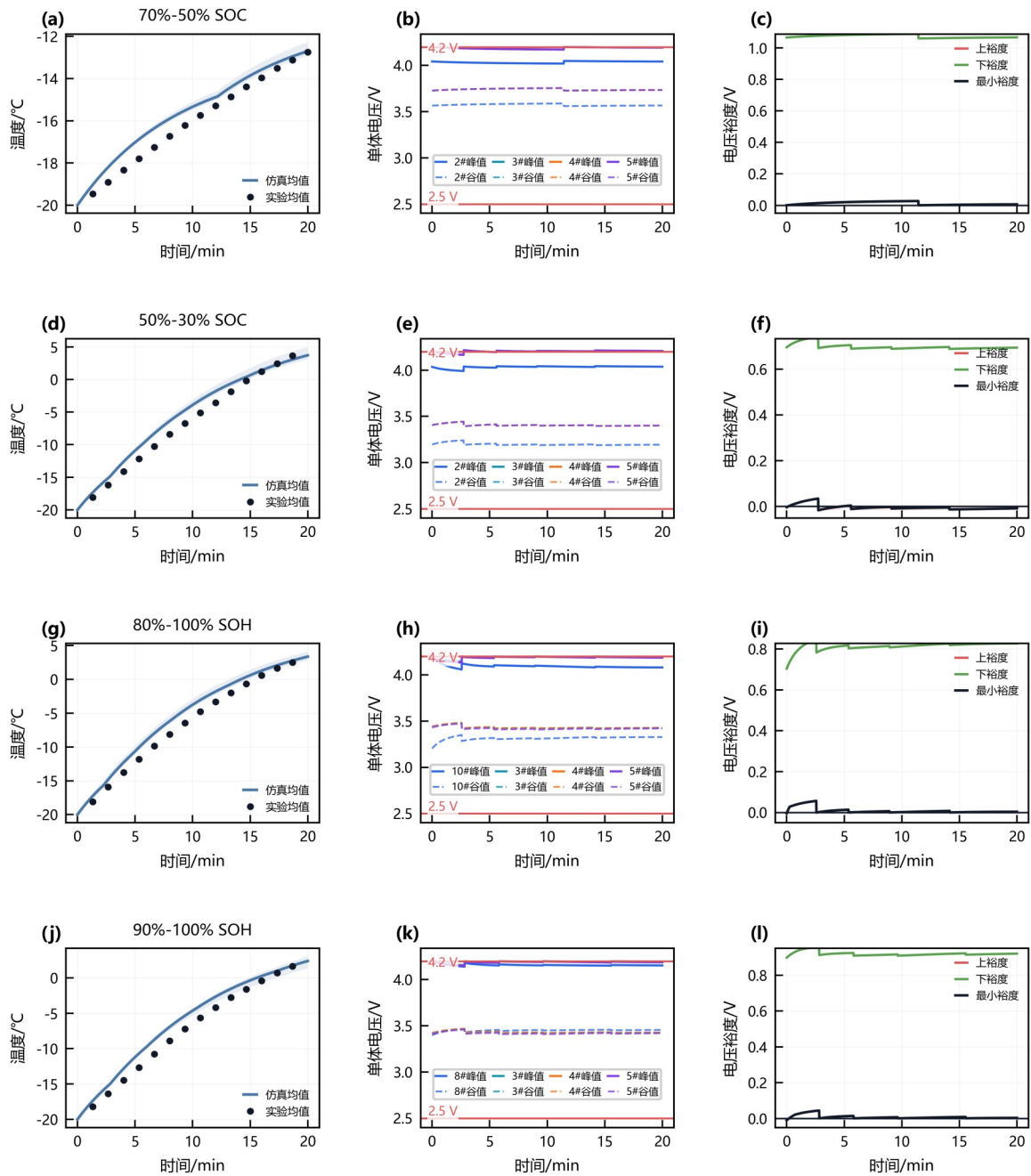


图9 不一致模组温度与电压包络验证

Fig. 9 Temperature and voltage-envelope validation

温度和约束条件存在差异，表中同时列出约束条件与工程特征，以综合评价各方法的适用性。

表7 模组级低温加热方法的约束条件与性能比较

Table 7 Comparison of constraints and performance among module-level low-temperature heating methods

来源	对象	加热方式	温升性能	温区
文献[5]	100 A·h 方形模组	350 W 电热膜外部加热	约 10.17°C/min	-20~0°C
文献[28]	串联电池包	自供能加热；模型预测限流	约 3.64°C/min	-40~-20°C
文献[29]	6S 18650 模组	固定 10 A-100 Hz 交流加热	1.3°C/min	-20~6°C
本文	不一致 4S 模组	变频变幅交流加热	0.364~1.257°C/min	-20~5°C

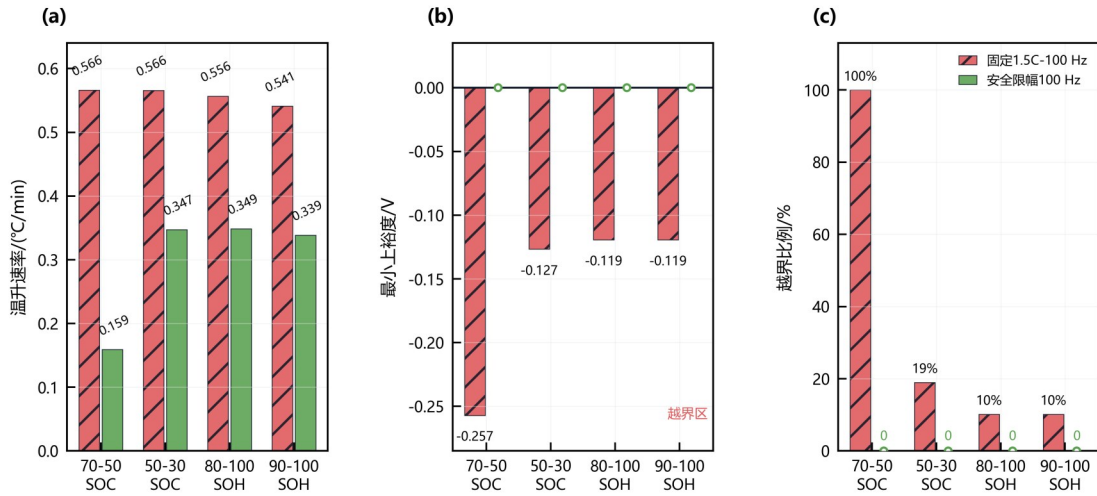


图 10 固定 100 Hz 基线对比
Fig. 10 Fixed-100 Hz baseline comparison

表 7 表明, 模组温升速率与热源形式、初始温度及安全约束密切相关。电热膜外部加热^[5]可获得较高温升速率, 但需要附加热源, 且局部最高温度达到 39.4°C ; 串联电池包自供能加热^[28]能够在 -40°C 环境下实现均匀预热, 但消耗 4.7% 的额定容量。与本文加热形式较接近的 6S 交流加热模组^[29]采用固定 10 A-100 Hz 激励, 温升速率为 $1.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$; 本文除 70%-50% SOC 工况外, 其余 3 种工况的温升速率为 $1.157\sim 1.257^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 与该模组级结果处于相近范围。进一步地, 本文将 SOC/SOH 不一致、逐单体电压与析锂边界以及限制单体随温度迁移纳入统一调度; 其中, 70%-50% SOC 工况的允许电流受高 SOC 单体较小上电压裕度约束。综合来看, 本文方法在获得与同类交流模组研究相近温升性能的同时, 可利用不一致模组共同安全域内的加热能力。

4.5 工程适用性与后续扩展方向

工程实现时, OCV-SOC 关系、RQ+L 参数、析锂临界电位裕度和安全频率下限均在离线阶段完成标定, 并形成分温区查找表。在线 BMS 读取单体温度、SOC、SOH 和端电压后, 主要执行查表、插值、单体可行域筛选、模组交集及限幅保护, 无需实时重构完整 EIS 或 DRT。在线阻抗信息不可用时, 可根据 SOH 估计结果和当前温区调用保守频率, 并结合单体电压反馈预留经试验标定的电流安全裕量。

对于由 N 个单体串联组成的模组, 若温区数、

电流幅值网格数和频率网格数分别为 K 、 N_i 和 N_f , 则离线遍历复杂度为 $O(K \cdot N \cdot N_i \cdot N_f)$ 。完成查找表后, 在线阶段仅需遍历各单体约束并进行极值筛选, 计算复杂度近似为 $O(N)$ 。因此, 串联规模扩大后的主要压力集中在离线参数标定和查找表更新, 而非在线控制计算。以 1P52S 模组为例, 若各单体共享相同候选幅值和频率网格, 在线阶段主要增加 52 个单体约束的遍历和极值筛选, 计算量随串联单体数近似线性增长; 因此更高串数场景的主要挑战不是在线求解负担, 而是单体级 OCV、EIS、热参数和析锂边界的离线标定工作量。

本文采用 4S NCR18650B 模组验证所提方法, 并完成 4 类不一致工况的 3 次独立重复试验及重复性分析。将该方法应用于大容量方形或软包储能电芯以及更高串数模组时, 仍需针对目标对象重新标定 OCV、EIS、热参数、等效寄生电感和析锂边界, 并开展规模化试验验证。当前研究的局限性主要包括重复试验次数较少, 示波器记录以 4 串模组总端电压为主, 尚缺少 kHz 激励下逐单体端电压峰值的高速同步测量。

5 结 论

本文围绕 SOC/SOH 不一致串联锂离子电池模组低温交流加热问题, 建立了单体级安全可行域交集与分温区控幅/控频策略。四类不一致工况和同工况基线结果表明, 单体级动态约束是保证低温交流加热安全性的关键。

(1) 单体级安全可行域交集能够统一过压、过放、析锂和安全频率约束,并决定串联模组在各温区可输出的幅值-频率组合。

(2) SOC 不一致主要压缩电压裕度并导致短板单体迁移;SOH 不一致改变阻抗频率特征并导致频率限制单体迁移。

(3) 3 次独立重复试验结果表明,70%-50% SOC、50%-30% SOC、80%-100% SOH 和 90%-100% SOH 模组的温升速率分别为 0.364 ± 0.006 、 1.257 ± 0.010 、 1.193 ± 0.014 和 1.157 ± 0.015 °C/min,各工况重复试验间的变异系数均低于 1.7%。

(4) 工程应用中,该策略依赖目标电芯的离线参数标定、单体电压闭环保护和经试验确定的安全裕量。本文通过 4S 圆柱电池模组及 3 次独立重复试验验证了方法的可行性。面向更高串数模组和大容量储能电芯,需重新标定 OCV、EIS、热参数、等效寄生电感和析锂边界,并进一步开展高频逐单体端电压同步测量与规模化验证。

参考文献

- [1] ZHAO Y, GENG L, MENG W, et al. Low-temperature electrolytes for lithium-ion batteries: Current challenges, development, and perspectives[J]. Nano-Micro Letters, 2026, 18(1): 65. DOI: 10.1007/s40820-025-01914-x.
- [2] SHU W, ZENG Z, QIN M, et al. Perspective on fast-charging lithium-ion batteries: Mechanism, detection, and suppression of graphite anode lithium plating[J]. Energy Storage Materials, 2025, 81: 104479. DOI: 10.1016/j.ensm.2025.104479.
- [3] QU Z G, JIANG Z Y, WANG Q. Experimental study on pulse self-heating of lithium-ion battery at low temperature[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 696-705. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.020.
- [4] CAI F, CHANG H, YANG Z, et al. Experimental study on self-heating strategy of lithium-ion battery at low temperatures based on bidirectional pulse current[J]. Applied Energy, 2024, 354: 122232. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122232.
- [5] 匡智伟,张振东,盛雷,付林祥. 储能用大容量锂离子电池低温快速加热方法研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(2): 791-798. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0894.
- [6] KUANG Z W, ZHANG Z D, SHENG L, FU L X. Research on low-temperature rapid heating method for high-capacity lithium-ion batteries in energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(2): 791-798. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0894.
- [7] 李晋,王青松,孔得朋,等. 锂离子电池储能安全评价研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2282-2301. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0252.
- [8] LI J, WANG Q S, KONG D P, et al. Research progress on the safety assessment of lithium-ion battery energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2282-2301. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0252.
- [9] ZHU J, SUN Z, WEI X, et al. Experimental investigations of an AC pulse heating method for vehicular high power lithium-ion batteries at subzero temperatures[J]. Journal of Power Sources, 2017, 367: 145-157. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.09.063.
- [10] RUAN H, JIANG J, SUN B, et al. An optimal internal-heating strategy for lithium-ion batteries at low temperature considering both heating time and lifetime reduction[J]. Applied Energy, 2019, 256: 113797. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113797.
- [11] HU Z, LIU F, CHEN P, et al. Experimental study on the mechanism of frequency-dependent heat in AC preheating of lithium-ion battery at low temperature[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 214: 118860. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118860.
- [12] WU X, CUI Z, CHEN E, et al. Capacity degradation minimization oriented optimization for the pulse preheating of lithium-ion batteries under low temperature[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101746. DOI: 10.1016/j.est.2020.101746.
- [13] 何锡添,孙丙香,阮海军,等. 锂离子电池变频变幅交流低温自加热策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1798-1805. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180604.
- [14] HE X T, SUN B X, RUAN H J, et al. A variable-frequency and variable-amplitude AC low-temperature self-heating strategy for lithium-ion battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1798-1805. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180604.
- [15] QIN Y, XU Z, XIAO S, et al. Temperature consistency-oriented rapid heating strategy combining pulsed operation and external thermal management for lithium-ion batteries[J]. Applied Energy, 2023, 335: 120659. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120659.
- [16] TIAN J, FAN Y, PAN T, et al. A critical review on inconsistency mechanism, evaluation methods and improvement measures for lithium-ion battery energy storage systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 113978. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113978.
- [17] NAGUIB M, KOLLMEYER P, EMADI A. Lithium-ion battery pack robust state of charge estimation, cell inconsistency, and balancing: Review[J]. IEEE Access, 2021, 9: 50570-50582. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068776.
- [18] YANG C, WANG X, FANG Q, et al. An online SOC and capacity estimation method for aged lithium-ion battery pack considering cell inconsistency[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29: 101250. DOI: 10.1016/j.est.2020.101250.
- [19] WANG X, FANG Q, DAI H, et al. Investigation on cell performance and inconsistency evolution of series and parallel lithium-ion battery modules[J]. Energy Technology, 2021, 9(7): 2100072. DOI: 10.1002/ente.202100072.
- [20] TANG A, WU X, XU T, et al. State of health estimation based on inconsistent evolution for lithium-ion battery module[J]. Energy,

- 2024, 286: 129575. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129575.
- [18] LIU X, AI W, NAYLOR MARLOW M, et al. The effect of cell-to-cell variations and thermal gradients on the performance and degradation of lithium-ion battery packs[J]. *Applied Energy*, 2019, 248: 489-499. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.108.
- [19] YU C, ZHU J, WEI X, et al. Research on temperature inconsistency of large-format lithium-ion batteries based on the electrothermal model[J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2023, 14 (10): 271. DOI: 10.3390/wevj14100271.
- [20] 王莉, 谢乐琼, 张干, 何向明. 锂离子电池一致性筛选研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(2): 194-202. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0169.
- WANG L, XIE L Q, ZHANG G, HE X M. Research progress in the consistency screening of Li-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(2): 194-202. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0169.
- [21] 张腾, 常国峰. 基于单体特征参数差异的电池组热特性和热一致性研究[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(8): 3194-3206. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0127.
- ZHANG T, CHANG G F. Thermal characterization and thermal consistency study of battery packs based on differences in monomer characteristic parameters[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(8): 3194-3206. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0127.
- [22] ILLIG J, SCHMIDT J P, WEISS M, et al. Understanding the impedance spectrum of 18650 LiFePO₄-cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 239: 670-679. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.020.
- [23] BOUKAMP B A. Distribution (function) of relaxation times, successor to complex nonlinear least squares analysis of electrochemical impedance spectroscopy?[J]. *Journal of Physics: Energy*, 2020, 2(4): 042001. DOI: 10.1088/2515-7655/aba9e0.
- [24] LI C, YANG L, LI Q, et al. SOH estimation method for lithium-ion batteries based on an improved equivalent circuit model via electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 86: 111167. DOI: 10.1016/j.est.2024.111167.
- [25] 范茂松, 耿萌萌, 赵光金, 等. 基于多频点阻抗的梯次利用电池分选技术研究[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(7): 2202-2210. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0333.
- FAN M S, GENG M M, ZHAO G J, et al. Research on battery sorting technology for echelon utilization based on multifrequency impedance[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12 (7): 2202-2210. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0333.
- [26] ZHENG D B, LI K N, SANG Y J, et al. Experimental study on alternating current heating strategy for lithium-ion batteries based on lithium precipitation-overvoltage dual safety constraints[J]. *Energy*, 2025, 335: 138356. DOI: 10.1016/j.energy.2025.138356.
- [27] 郑东滨, 李夔宁, 桑艳杰, 等. 电动汽车动力电池全寿命周期交流加热策略研究[J]. *西安交通大学学报*, 2026, 60(2): 11-23. DOI: 10.7652/xjtub202602002.
- ZHENG D B, LI K N, SANG Y J, et al. Full-life-cycle AC heating strategy for electric vehicle power batteries[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2026, 60(2): 11-23. DOI: 10.7652/xjtub202602002.
- [28] HUANG D, CHEN Z, ZHOU S. Model prediction-based battery-powered heating method for series-connected lithium-ion battery pack working at extremely cold temperatures[J]. *Energy*, 2021, 216: 119236. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119236.
- [29] XU Q, WANG X, FAN W, et al. Design and implementation of a non-destructive AC heating system for lithium-ion battery modules [J]. *Batteries*, 2024, 10(9): 300. DOI: 10.3390/batteries10090300.