

电动汽车动力电池全寿命周期交流加热策略研究

郑东滨^{1,2} 李夔宁^{1,2} 桑艳杰^{1,2} 谢翌³ 崔纳新⁴

(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, 400044, 重庆; 2. 重庆大学能源与动力工程学院, 400044, 重庆; 3. 重庆大学机械与运载工程学院, 400044, 重庆; 4. 山东大学控制科学与工程学院, 250061, 济南)

摘要: 针对电动汽车动力电池全寿命周期的低温安全问题, 本文提出一种基于电热老化耦合模型的锂离子电池交流加热最佳策略。高精度电热老化耦合模型融合了二阶电阻-常相位元件等效电路模型、热特性模型和参数老化动态交互模型, 并综合考虑了电池的 electrochemical 动态特性、热行为及随老化过程变化的参数。通过引入避免电池析锂反应发生的析锂约束, 并设置防止电池两端电压过高或过低的过压约束, 形成双安全约束。在此基础上, 计算出全寿命周期电池在不同温度区间对应的最优交流电频率和幅值, 制定了内部产热率最大的最优交流加热策略。研究结果表明: 全寿命周期电池的仿真与实验温度最大误差为 0.29 °C、电压最大误差为 0.057 V; 电池健康状态 (SOH) 分别为 95.03%、89.97%、84.54%、80.14% 的电池平均温升速率分别为 2.70、2.45、2.36、1.90 °C/min; 电池电压与温度的最大均方根误差分别为 30.4 mV 和 0.31 °C。电池经过 500 次循环加热后, 电池 SOH 降低了 2.2%。反映电池老化程度的容量增量 (IC) 曲线中 IC 峰值变化很小, 循环加热前后电池 IC 曲线基本重合, 从而验证了加热策略在电池全寿命周期的安全性、适用性及模型的有效性。该研究可为新能源汽车动力电池的低温加热技术提供技术支撑。

关键词: 18650 锂离子电池; 全寿命周期; 电热老化耦合模型; 交流加热

中图分类号: 文献标志码: A

文章编号: 0253-987X(XXXX)XX-0001-19

Experimental Study on Alternating Current Heating Strategies for Electric Vehicle Traction Batteries Across Full Lifecycle

ZHENG Dongbin^{1,2}, LI Kuining^{1,2}, SANG Yanjie^{1,2}, XIE Yi³, CUI Naxin⁴

- (1. Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
4. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

收稿日期: 2025-07-15。

Abstract: To address the low-temperature safety issues of traction batteries in electric vehicles throughout their entire life cycle, this paper proposes an optimal alternating current (AC) heating strategy for lithium-ion batteries based on an electro-thermal-aging coupled model. The high-accuracy coupled model integrates a second-order RQ equivalent circuit model, a thermal characteristics model, and a dynamic parameter-aging interaction mechanism, comprehensively considering the electrical dynamic characteristics, thermal behavior, and parameter variations during the aging process of the battery. In this study, a lithium plating constraint is introduced to prevent lithium plating reactions, and an over-voltage constraint is imposed to avoid excessive or insufficient terminal voltages, thereby forming a dual safety constraint. Based on these constraints, the optimal AC frequency and amplitude corresponding to different temperature ranges over the entire battery life cycle are determined, and an optimal AC heating strategy that maximizes the internal heat generation rate is developed. Simulation and experimental results demonstrate that the maximum deviations between simulated and measured temperatures and voltages are 0.29 °C and 0.057 V, respectively, throughout the battery's life cycle. The average temperature rise rates of batteries with state-of-health (SOH) values of 95.03%, 89.97%, 84.54%, and 80.14% are 2.70, 2.45, 2.36, and 1.90 °C/min, respectively. The maximum root-mean-square errors of voltage and temperature are 30.4 mV and 0.31 °C. After 500 cycles of AC heating, the SOH degradation is only 2.2%, and the incremental capacity (IC) curves before and after the heating cycles remain almost identical, with negligible changes in IC peak values, thereby verifying the safety and applicability of the heating strategy as well as the validity of the model over the battery's entire life cycle. This study provides a technical foundation for the development of low-temperature heating technologies for power batteries in electric vehicles.

Keywords: 18650 Lithium-ion battery; Full lifecycle; Electro-thermal-aging coupling model; Alternating current heating

近年来新能源汽车已成为全球汽车产业转型升级的主要方向,并成为促进世界经济持续增长的重要引擎。我国正加快绿色发展方式转型,积极优化和调整产业结构、能源结构及交通运输结构,新能源汽车行业水平显著提升,产业体系日臻完善和成熟^[1]。锂离子电池具备高能量密度、高放电率、高电压平台、低自放电率、无记忆效应和长使用寿命等优点,并凭借该独特的优势而被广泛应用^[2]。

然而,在极端低温环境下,电池的

反应速率和充放电性能会大幅下降,引发电池冻伤甚至永久性损害^[3]。因此,需要一种安全有效的加热策略,实现锂离子电池快速、均匀升温并保持安全运行。交流加热通过在电池两端施加特定幅值与频率的交流电,利用低温下阻抗增大的特性快速产热^[4]。Li等^[5]基于蓄电池安全电压极限提出正弦交流加热策略,可使电池在480 s内快速从-20 °C升温至0 °C。何锡添等^[6]在此基础上提出一种交流自加热策略,随时间调节电流频率和幅值以实现加热功率最大化,

电池在 700 s 内上升了 47.67 °C。Zhang 等^[7]提出多级交流电加热策略,可在缩短加热时间的同时避免对电池健康造成不利影响。Li 等^[8]基于自适应交流脉冲建立加热策略,避免交流加热过程中的锂沉积,在相同时间内电池温升比恒幅脉冲至少高 7.6 °C,并有效减缓电池容量衰减。此外,受电池极化影响,结合极化电压设定交流电流幅值,在电压保护下可避免电池老化^[9]。

电池使用时间增加,电池发生老化会导致电池的特性参数发生改变^[10]。电池老化具体表现为容量下降和内阻增大。宋学伟等^[11]分析老化电池性能变化时发现电阻增大使其循环过程产生的热量增多,热量积累在电池内部。Zhang 等^[12]基于不同老化条件分析,电池固体电解质界面(SEI)膜电阻及其时间常数的演变轨迹会受到储存温度和荷电状态(SOC)的影响。李爱东等^[13]发现 SEI 膜增长、电解液消耗以及孔隙率降低引起离子迁移受阻等是引起电池老化产热加剧的主要因素。Xu 等^[14]发现不同老化程度电池,在循环老化初期奈奎斯特曲线中频区呈现一个圆弧;而在进一步老化过程中,阳极表面 SEI 膜趋于稳定,高频区圆弧几乎保持不变。Messing 等^[15]的实验研究表明不同老化状态电池的电化学阻抗谱(EIS)曲线会随着电池健康状态(SOH)下降整体向右平移,欧姆内阻显著增大。极端温度等环境因素则可能加速锂离子电池老化,使锂离子电池的推广使用受到限制^[16]。

电池的老化会对电池性能参数造成不可逆的损害,故要制定全寿命周期动力电池的交流加热策略,需要准确的电热老化耦合模型。耿陈等^[17]提出一种考虑弛豫过程的电热老化耦合建模方法,并基于等效电路模型参数辨识构建了锂离子电池参数库。史永胜等^[18]从锂离子电池的物理及化学反应机理出发建立电-热-老化多参数耦合模型。Chen 等^[19]将双层电阻增加与 SEI 膜生长作为主要老化效应,构建了电化学-老化-热耦合模型。Fan 等^[20]引入锂沉积机理,建立量化不可逆锂损失的电化学-老化-热耦合模型。

制定锂离子电池全寿命周期交流加热策略时,加热策略的约束对于电池的无损至关重要,特别对于已有不同程度寿命损害的老化电池。因此,加热策略的安全约束非常关键。与锂离子电池低温交流加热相关的失效模式主要包括锂沉积、过充和过放电^[21]。计算交流电流幅值时,考虑极化电压的同时添加析锂约束,以抑制锂电池进一步老化^[22]。在此基础上采用合理的截止电压约束,锂离子电池低温交流加热不会对电池造成过多损害。Li 等^[8]开发了一种可以降低析锂的交流加热策略,以负极电位达到 0 V 作为析锂判据,避免加热过程中可能出现的电池老化,在 60 次加热循环后容量损失为 0.49 A·h。Tran 等^[23]认为锂离子电池在低温下,性能受限或失效是因为电解质的离子电导率降低以及阳极和阴极的扩散动力学,导致锂金属沉

积和枝晶生长。为保证锂离子电池在低温加热过程中的安全性,不仅需要上下截止电压的约束,还需要有明确的析锂约束。

本文研究交流加热策略在18 650电池全寿命周期(SOH为80%~100%)内的适用性。以SOC为50%的电池为对象,在不同SOH(100%、95.03%、89.97%、84.54%、80.14%)及温度条件下获取EIS曲线,辨识各工况下的模型参数。基于二阶电阻-常相位元件(RQ)模型建立高精度电热老化耦合模型,并在析锂-过压双安全约束下,计算不同温度区间的最优交流频率与幅值,从而制定内部产热率最大的加热策略。通过实验验证模型在交流加热过程中的准确性,并结合不同SOH下的温升与电压变化,评估该策略在全寿命周期内的适用性。最后开展循环加热实验分析该策略对电池性能的影响。

1 老化实验及参数辨识

1.1 加速老化实验

进行加速循环老化实验,获取全寿命周期即不同SOH状态下的18650锂离子电池。需选取同一批容量和低温欧姆内阻相近的电池进行加速循环老化实验。

电池初始容量的确定如下:将6节电池置于25℃恒温箱中2 h,以0.5 C(表示充电电流大小可以在0.5 h内把电池充满)恒流恒压(CC-CV)方式充电至电压4.2 V、截止电流0.17 A(SOC为

100%)。静置2 h后,以0.2 C恒流放电至电压为2.5 V,记录全过程电压、电流与容量数据,重复三次,取平均值作为电池初始实际容量。

电池低温内阻获取方法如下:同理充电至SOC为100%。静置2 h后,以0.2 C恒流放电至实际容量的50%(SOC为50%)。随后将电池转移至-10℃恒温箱中放置2 h,采用EIS方法测量SOC为50%时的电池欧姆内阻。

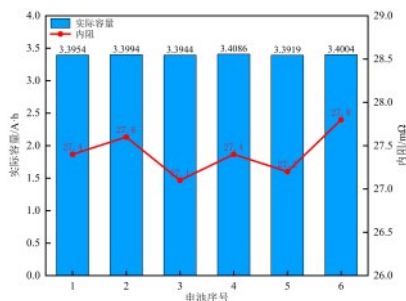


图1 不同电池的容量和内阻

Fig. 1 The capacity and internal resistance of different batteries

不同电池的容量和内阻数据如图1所示,6节电池容量均约3.40 A·h。容量筛选阈值选为3.39 A·h,低于该阈值则剔除。-10℃条件下内阻为27~28 mΩ,符合新电池内阻小于等于30 mΩ的要求,设定内阻阈值为27.6 mΩ,高于该内阻筛选阈值则剔除,以最小化容量和内阻差异性。最终选取1、2、3、4、5号电池进行加速循环老化实验,以获取不同SOH状态老化电池,研究交流加热方案在全寿命周期电池的适用性。

通过加速循环老化实验获取不同健

康状态的全寿命周期电池。电池健康状态 S_{soh} 的表达式为

$$S_{\text{soh}} = \frac{C}{C_N} \quad (1)$$

式中: C 为电池经过循环充放电老化后测得的实际容量; C_N 为电池全新状态下测得的实际容量。

电池加速循环老化实验方案如下: 将选取的 1-5 号电池静置于 25 °C 恒温箱中 2 h, 以 0.5 C 恒流恒压充电至电压 4.2 V, 截止电流 0.17 A。静置 5 min 后, 以 1 C 恒流放电至下限电压 2.5 V, 再次静置 5 min 后重新充电。进行规定次数的充放电循环, 并记录循环过程中的容量数据和计算电池的健康状态。每完成 25 次循环, 需要将电池在 25 °C 恒温箱中静置 12 h 以稳定其内部状态。重复进行上述循环老化与记录计算过程, 直至电池 S_{soh} 依次达到约 95%、90%、85% 和 80%, 可得到不同老化状态的电池样本。循环前后的 1-5 号电池在 25 °C 下的实际容量以及循环后的电池 S_{soh} 如表 1 所示, 其变化曲线如图 2 所示。

根据表 1 和图 2 电池健康状态 S_{soh} 变化数据可知, 由于 1 号电池 S_{soh} 相较于 3 号电池更接近于 80%, 因此本文选择 4 号、5 号、2 号、1 号电池来研究交流加热策略在电池全寿命周期 (S_{soh} 分别为 95.03%、89.97%、84.54%、80.14%) 的适用性以及可行性。当 S_{soh} 衰减至约 85% 时, 容量衰退速度显著加快, 主要是因为随着循环次数的增加, 电极材料发生不可逆的损耗, 正极结构退化, 削弱了锂离子的嵌入与脱嵌能力, 导致电

池可用容量进一步减少^[24]。

表 1 电池充放电循环老化前后容量及 S_{soh}

Table 1 The capacity and S_{soh} of the battery before and after charge-discharge cycle aging

电池序号	循环次数	循环前容量/A·h	循环后容量/A·h	$S_{\text{soh}}/\%$
4	150	3.41	3.24	95.03
5	375	3.39	3.05	89.97
2	585	3.40	2.87	84.54
1	613	3.40	2.72	80.14
3	603	3.39	2.70	79.58

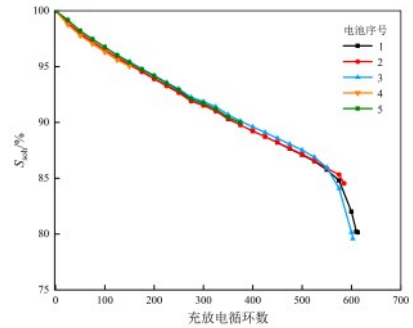


图 2 电池健康状态 S_{soh} 变化曲线

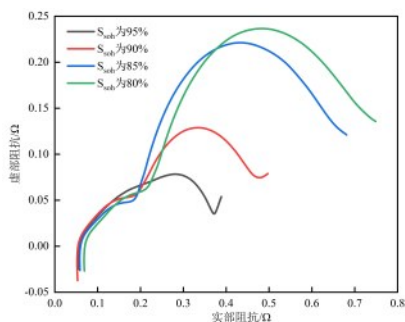
Fig. 2 S_{soh} variation curves

1.2 电池参数识别

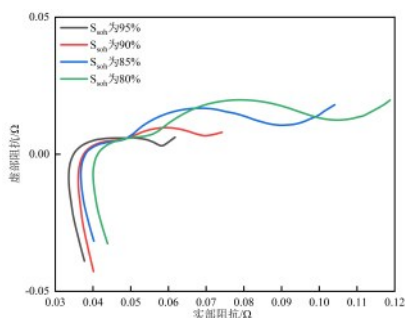
为掌握电池在不同交流电参数下的温升和电压变化情况, 需要准确获取电池在不同温度下的阻抗变化情况, 因此电池的模型参数辨识至关重要。针对不同 S_{soh} 状态的电池从 -20 °C 开始每隔 5 °C 进行 EIS 实验。其实部阻抗的计算通过 2.2 节式(9)获得, 其中 -20 °C 和 5 °C 下不同 S_{soh} 电池的 EIS 曲线如图 3 所示。

由图 3 可知, 在 EIS 左侧超高频

区, 电池温度降低导致欧姆内阻显著增大。在EIS高频与中频区, 表征SEI膜电阻和电荷转移电阻的两个半椭圆直径均随着电池温度下降而增大。其中, 电荷转移电阻增幅更大, 这主要源于电池低温下电化学反应速率显著下降。当 S_{soh} 降低时, 相同温度下的EIS整体曲线扩张, 最高点增大, 电池相关阻抗增大。为定量分析电池总阻抗变化, 根据EIS识别结果计算电池不同 S_{soh} 、温度下的总阻抗, 结果如图4所示。



(a) 温度为-20°C



(b) 温度为5°C

图3 不同 S_{soh} 电池EIS曲线

Fig.3 EIS curves of different S_{soh} batteries

由图4可知, 当电池 S_{soh} 一定时, 随着温度降低, 电池总阻抗逐渐增大。温度高于-15 °C时, 电池总阻抗上升缓

慢, 在-15 °C以下时, 电池总阻抗快速增大。随着电池老化的不断进行, 电池的总阻抗在逐渐增大。 S_{soh} 为100.00%的电池、温度为5 °C时的总阻抗为0.0256 mΩ, S_{soh} 为80.14%的电池、温度为5 °C时的总阻抗为0.0407 mΩ, 相对增加58.98%。

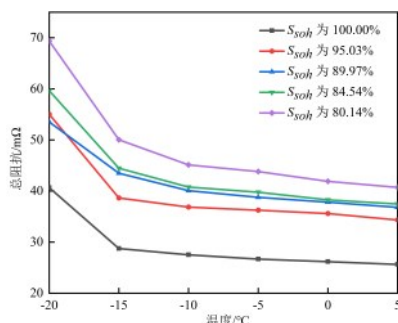


图4 不同 S_{soh} 电池不同温度总阻抗变化曲线

Fig.4 Total impedance curves of different S_{soh} batteries at different temperatures

2 电池电热老化耦合模型

2.1 等效电路模型

本文采用的二阶RQ等效电路模型如图5所示。与使用2个电阻-电容(RC)回路描述SEI膜阻抗和电荷转移阻抗的二阶RC模型相比, 本模型的关键改进在于常相位元件(CPE)替代理想电容元件, CPE能模拟非理想的电容行为, 有效表征电极表面的电容弥散效应, 显著提升电池阻抗表征的精度。

模型中 U_{ocv} 和 U_i 分别代表开路电

压与端电压; L 为等效电感; R_0 为欧姆内阻; 电阻 R_{SEI} 和常相位元件 Q_{SEI} 用于描述 SEI 膜特性; 电阻 R_{ct} 和常相位元件 Q_{dl} 分别为电荷转移阻抗和双电层常相位元件。

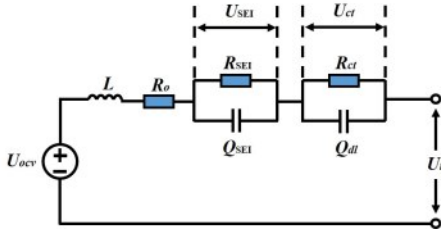


图5 二阶RQ分数阶等效电路模型
Fig. 5 Second-order RQ fractional-order equivalent circuit model

常相位元件的阻抗其表达式为

$$Z = \frac{1}{C(j\omega)^n} = \frac{1}{C(\cos \frac{n\pi}{2} + j \sin \frac{n\pi}{2})(2\pi f)^n} \quad (2)$$

式中: Z 为阻抗; j 为虚数单位; n 为谐波次数; ω 为角频率; f 为频率; C 为电容。

二阶 RQ 等效电路模型对应的状态方程为

$$U_{OCV} = U_t + L \frac{dI}{dt} + R_0 I + U_{SEI} + U_{ct} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^n U_{SEI}}{\partial t^n} = -\frac{1}{R_{SEI} C_{SEI}} U_{SEI} + \frac{1}{C_{SEI}} I \quad (4)$$

$$\frac{\partial^n U_{ct}}{\partial t^n} = -\frac{1}{R_{ct} C_{dl}} U_{ct} + \frac{1}{C_{dl}} I \quad (5)$$

式中: I 为电流; t 为时间; U_{SEI} 为 SEI 电压; U_{ct} 为电荷转移阻抗电压; C_{SEI} 和 n_{SEI} 分别为 SEI 回路的电容和阶数; C_{dl} 和 n_{dl} 分别为双电层回路的电容和阶数。

2.2 热模型

本文采用集总参数法建立电池热模型, 通过在电池两端施加正弦交流电形成产热模型; 通过电池与环境对流换热形成散热模型。基于 Bernardi 产热公式, 电池温度为 T 时, 电池产热率 Q 表达式为

$$Q = I(U_{OCV} - U_t) - IT \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} \quad (6)$$

正弦交流脉冲信号激励下的电池产热率为

$$Q(t) = -I_{ac} T \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} \sin(2\pi ft) + \frac{I_{ac} U_{ac}}{2} \cos \varphi - \frac{I_{ac} U_{ac}}{2} \cos(4\pi ft + \varphi) \quad (7)$$

由于三角函数在一个周期内的积分为零, 式(7)又可表示为

$$Q(t) = \frac{I_{ac} U_{ac}}{2} \cos \varphi = \frac{I_{ac}^2}{2} Z_{Re} \quad (8)$$

式中: I_{ac} 为交流电流; U_{ac} 为交流电压; φ 为相角; Z_{Re} 为交流阻抗实部。

对于二阶 RQ 等效电路模型, 其实部阻抗为:

$$Z_{\text{Re}} = R_0 + \frac{R_{\text{SEI}} + R_{\text{SEI}}^2 C_{\text{SEI}} (2\pi f)^{n_{\text{SEI}}\pi} \cos(\frac{n_{\text{SEI}}\pi}{2})}{1 + R_{\text{SEI}}^2 C_{\text{SEI}}^2 (2\pi f)^{2n_{\text{SEI}}\pi} + 2R_{\text{SEI}} C_{\text{SEI}} (2\pi f)^{n_{\text{SEI}}\pi} \cos(\frac{n_{\text{SEI}}\pi}{2})} + \frac{R_{\text{ct}} + R_{\text{ct}}^2 C_{\text{dl}} (2\pi f)^{n_{\text{dl}}\pi} \cos(\frac{n_{\text{dl}}\pi}{2})}{1 + R_{\text{ct}}^2 C_{\text{dl}}^2 (2\pi f)^{2n_{\text{dl}}\pi} + 2R_{\text{ct}} C_{\text{dl}} (2\pi f)^{n_{\text{dl}}\pi} \cos(\frac{n_{\text{dl}}\pi}{2})} \quad (9)$$

基于牛顿冷却定律, 电池与外部环境的热对流换热 Q_c 表示为

$$Q_c = hA(T - T_f) \quad (10)$$

式中: h 为电池的等效对流换热系数; A 为电池的表面积; T_f 为外界环境温度。

综合产热模型和散热模型, 基于能量守恒定律, 电池的热模型可表示为

$$mc \frac{\partial T}{\partial t} = Q - Q_c \quad (11)$$

式中: 电池比热容 c 参考文献^[25]的实际测量结果, 其所研究电池的型号与实际容量和本文所研究的电池接近, 为 $850 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。最终整理表达式为

$$mc \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{I^2 ac}{2} Z_{\text{Re}}(T, \text{SOC}, f) - hA(T - T_f) \quad (12)$$

2.3 老化模型

2.3.1 锂离子电池健康状态衰减模型

电池健康状态 S_{soh} 是评价电池性能和剩余寿命的重要指标。基于上文加速老化实验数据的非线性衰退过程, 本文以分段模型构建锂离子电池健康状态衰减模型。

采用线性模型描述初期缓慢衰减, 表达式为

$$S_{\text{soh}}(N) = a_{\text{in}} N + b_{\text{in}}, N \leq N_B \quad (13)$$

式中: a_{in} 为循环初期衰减速率。 b_{in} 为初始状态下电池的 S_{soh} 。 N 为充放电循环数; N_B 为充放电循环数拐点。在电池循环充放电初期, 由于电池内部材料基本完好、结构稳定、电化学反应温和, 因此 S_{soh} 衰减较为均匀。

采用拉伸指数衰减模型描述循环后期快速衰退, 表达式为

$$S_{\text{soh}}(N) = S_{\text{sohB}} - a_{\text{ep}}(1 - \exp(-b_{\text{ep}}(N - N_B)^{c_{\text{ep}}})) \quad (14)$$

式中: $S_{\text{sohB}} = a_{\text{in}} N_B + b_{\text{in}}$, 是为了确保拐点处的连续性; a_{ep} 为控制拐点后电池 S_{soh} 下降的幅值。 b_{ep} 表示衰减速率。 c_{ep} 表示后期衰减呈现加速趋势。采用两阶段优化策略对模型参数标定电池全寿命周期数据, 拟合结果如图6所示。

根据拟合结果, 线性衰减阶段表达式为

$$S_{\text{soh}}(N) = -0.024N + 99.25, N \leq 544 \quad (15)$$

快速衰减阶段:

$$S_{\text{soh}}(N) = 86.05 - 17.10(1 - \exp(-4 \times 10^{-3}(N - 544)^{1.79})) \quad (16)$$

拟合曲线均方根误差 (RMSE) 为 0.3%, 表明所构建的分段衰减模型具有较高的精度, 能够有效表征电池在循环初期的缓慢老化过程, 以及后期由于

内阻增大和电化学反应加剧等因素引起特性。
的快速衰减过程,真实反映电池的老化

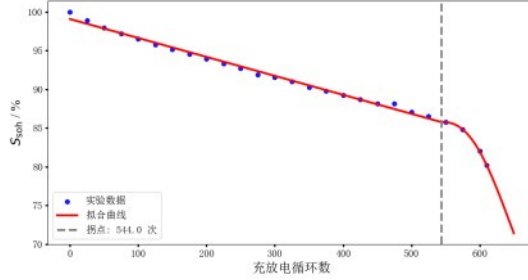


图6 锂离子电池健康状态 S_{soh} 衰减模型

Fig.6 Lithium-ion battery S_{soh} degradation model

2.3.2 参数老化交互模型

基于锂离子电池充放电循环数 N 与电池健康状态 S_{soh} 的关系,结合二阶RQ模型参数与电池健康状态 S_{soh} 、电池温度 T 的关系,建立参数老化交互模型。

对于欧姆内阻 R_0 ,基于25℃恒温环境下的加速老化实验数据,当电池 S_{soh} 从95%衰减至80%时,电池的 R_0 呈现指数增长趋势,因此 R_0 与 S_{soh} 的关系式为

$$R_0 = R_0 \exp(-\beta(1 - \frac{S_{soh}}{100})) \quad (17)$$

式中: β 为量化 S_{soh} 衰减导致的欧姆内阻非线性增长速率,与正极活性物质颗粒裂纹、负极SEI膜增厚、锂离子扩散阻抗升高等相关。式(17)的拟合结果为

$$R_0 = 0.038 \exp(-2.262(1 - \frac{S_{soh}}{100})) \quad (18)$$

此外,电池温度 T 是影响 R_0 的关键

因素,在低温环境下,电池内阻显著升高,导致可用容量骤降、充放电效率降低,甚至引发热失控风险。因此,建立温度-内阻的多项式模型,以量化内阻随温度变化的非线性规律,其表达式为

$$R_0(T) = AT^3 + BT^2 + CT + D \quad (19)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为多项式拟合系数,其拟合结果为

$$R_0(T) = -4 \times 10^{-6} T^3 - 6 \times 10^{-5} T^2 + 1.5 \times 10^{-5} T + 3.463 \times 10^{-2} \quad (20)$$

S_{soh} 会改变电池内部电化学反应,

进而影响 R_0 。因此,综合考虑 T 和 S_{soh}

的交互作用,构建的欧姆内阻 R_0 老化交互模型表达式为

$$R_0 = (BT^2 + CT + D) \cdot \exp(-\beta(1 - \frac{S_{soh}}{100}) + \gamma T(1 - \frac{S_{soh}}{100})) \quad (21)$$

式中: γ 为交互因子。 R_0 老化交互模型计算结果如图7所示,其中 R_0 初始参数由式(20)获得。拟合效果的确保是通过

调整式(21)中 φ 和 γ 的初始值,计算模型预测值,并评估RMSE和相关系数 R^2 等指标而获得。

由图7可知,电池老化 S_{soh} 和 T 越

低, R_0 的增大越显著,这说明老化效应对内阻的影响非常明显。

拟合的 R_0 老化交互模型表达式为

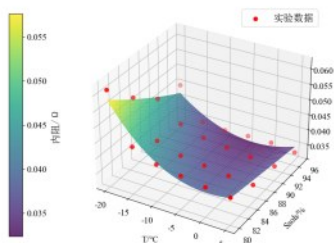


图7 欧姆内阻 R_0 老化交互模型计算结果

Fig.7 Calculation result of aging interaction model for ohmic resistance R_0 degradation

$$R_0 = (3.3 \times 10^{-5} T^2 + 3.33 \times 10^{-4} T + 3.116 \times 10^{-2}) \cdot \exp(-1.03 \ln(1 - \frac{S_{\text{soh}}}{100}) + 0.058 T (1 - \frac{S_{\text{soh}}}{100})) \quad (22)$$

其中,拟合结果的均方根误差RMSE为0.178 2%、相关系数 R^2 为0.945,说明拟合的模型表达式能够较好地反映 R_0 随 T 和 S_{soh} 变化的趋势。

对于二阶RQ模型的其他参数,采用相同的分析方法得到的参数老化交互模型表达式如表2所示,其拟合结果的误差分析如表3所示。

由表3相关性系数 R^2 和均方根误差RMSE可知,老化交互模型的拟合效果具有较高的准确度,但还需要通过实验进一步验证模型的准确性。将老化交互模型嵌入二阶RQ多项式方程,建立动

态老化模型。进行交流加热策略仿真计算时,输入当前电池的循环充放电次数,根据电池 S_{soh} 值动态调整模型中的参数值,以反映老化的影响。

2.4 耦合模型

建立二阶RQ模型、热模型和老化模型的耦合模型。各模型之间的关系如图8所示。交流电输入到等效电路模型,同时输入电池充放电循环次数得到电池 S_{soh} ,老化模型根据热模型的温度 T ,计算等效电路模型参数。

为验证电热老化耦合模型的准确

性,选择 SOC 为 50% 的全寿命周期电池在 1.5 C-100 Hz 的正弦交流电进行低温加热实验,电池温度和电压变化的仿真与实验对比结果如图 9 所示。

表 2 参数老化交互模型

Table 2 Coupled Parameter Aging Interaction Model

参数	老化交互模型表达式
电感 L	$L = (-1.021 \times 10^{-10} T^2 + 8.184 \times 10^{-10} T + 5.362 \times 10^{-7}) \cdot [(1 + 0.208(1 - \frac{S_{soh}}{100}) - 4.8 \times 10^{-3} T(1 - \frac{S_{soh}}{100}))]$
SEI 膜阻抗 R_{SEI}	$R_{SEI} = 0.011 \exp(-0.115 T - (7.3 \times 10^{-3} + 2.11 \times 10^{-3} T) \frac{S_{soh}}{100})$
常相位元件系数 Q_{SEI}	$Q_{SEI} = 0.529 \exp(-1.25 \times 10^{-2} T + (1.16 \times 10^{-2} - 1.35 \times 10^{-3} T - 7.40 \times 10^{-5} T^2) \frac{S_{soh}}{100})$
常相位元件系数 n_{SEI} 电荷转移阻抗 R_{ct} 常相位元件系数 Q_{ct}	$n_{SEI} = 0.472 - 0.001 T - 0.068 \frac{S_{soh}}{100} + 1.035 \times 10^{-2} T \frac{S_{soh}}{100} - 9.7 \times 10^{-5} T^2 + 0.385 \frac{S_{soh}^2}{100}$ $R_{ct} = 1.54 \times 10^{-9} \exp(8.51(100 - S_{soh}) + \frac{816.0.675}{(T + 195.86)})$ $Q_{ct} = 0.559 \exp(-0.115 T - 1.591(1 - \frac{S_{soh}}{100})) \cdot (0.005 T^2 + 0.211 T + 1.0774)$
常相位元件系数 n_{ct}	$n_{ct} = 0.052 + 0.039 T + 2.305 \frac{S_{soh}}{100} - 0.053 T \frac{S_{soh}}{100} - 4 \times 10^{-6} T^2 - 1.654 \frac{S_{soh}^2}{100}$

表 3 参数老化交互模型拟合结果误差分析

Table 3 Error analysis of fitting results for parameter aging interaction model

参数	R^2	RMSE
电感 L	0.936	$5.366 \times 10^{-9} \mu H$
SEI 膜阻抗 R_{SEI}	0.977	0.008 748 Ω
常相位元件系数 Q_{SEI}	0.978	0.039 7
常相位元件系数 n_{SEI}	0.978	0.012 6
电荷转移阻抗 R_{ct}	0.961	0.039 254 Ω
常相位元件系数 Q_{ct}	0.952	0.022 6
常相位元件系数 n_{ct}	0.949	0.024

由图 9(a)可知,全寿命周期电池受到 1.5 C-100 Hz 的交流电低温交流加热

时,温升速率较慢。 S_{soh} 为 80.14% 的电池,其温升速率最大,为 0.51 $^{\circ}C/min$; S_{soh} 为 84.54% 的电池,其温度误差最大,为 0.29 $^{\circ}C$ 。图 9(b)为选取初始加热阶段的 2 个交流周期 (0.01 s—0.03 s) 的电池电压, S_{soh} 为 80.14% 的电池,其电压误差最大,为 0.057 V。分析仿真和实验的温度、电压变化曲线的拟合程度,可证明本文所搭建的电热老化耦合仿真模型具有较高的准确性。

3 交流加热策略制定

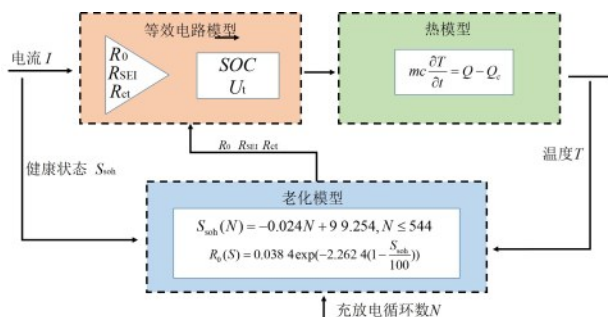
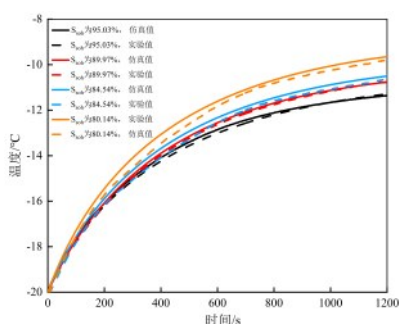
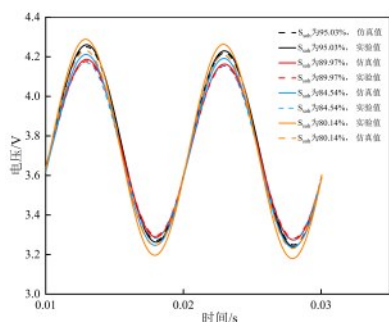


图8 电热老化耦合模型关系图

Fig.8 Electro-Thermal aging coupling model schematic diagram



(a) 温度



(b) 电压

图9 全寿命周期电池1.5C、100Hz交流加热仿真模型与实验对比图

Fig. 9 1.5C, 100Hz AC heating simulation model and experimental comparison diagram of full lifecycle battery

3.1 最大允许电流幅值和产热值

在析锂约束和上下截止电压约束的双安全约束作用下，电池温升速率最大的交流电频率和幅值为低温保护交流加热策略的最佳加热频率和幅值。根据式(8)，电池的产热率由所施加交流电信号的幅值以及电池的实部阻抗共同决定。根据式(9)，电池实部阻抗与电池温度和施加正弦交流信号的频率有关。

为确定正弦交流加热过程中的交流电最佳频率和幅值，分别计算出电池SOC为50%， S_{soh} 分别为95.03%、89.97%、84.54%、80.14%时不同交流电频率和不同电池温度下的最大允许交流电幅值，其中 S_{soh} 分别为95.03%和80.14%的结果如图10所示。在虚线左侧的交流电低频区域，正弦交流电信号施加的最大允许电流幅值主要受析锂边界的约束，在虚线右侧的高频区域则主要受上下截止电压的约束。当交流电频率较低时，电池电荷转移阻抗及总阻抗均随交流电频率的升高而减小，双安全约束下最大允许电流幅值随交流电频率

升高而增大。当频率过高时,电池虚部阻抗绝对值达到最小值后开始增大,电池总阻抗开始增大,导致最大允许电流幅值达到最高值后开始下降。

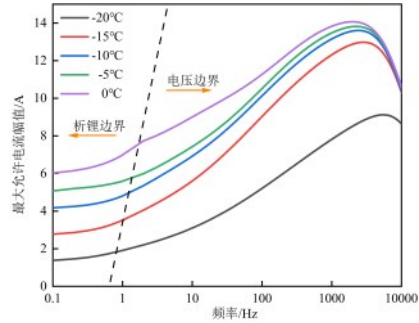
在 S_{soh} 相同的情况下,随着电池温度的升高,电池电荷转移阻抗及总阻抗不断减小,同样在双安全约束下,最大允许电流幅值不断增大,在不同 S_{soh} 下均呈现相同的趋势。

由图10(a)和(b)可知,对于不同 S_{soh} 的电池,电池的最大允许交流电幅值随 S_{soh} 的降低而减少。这与不同 S_{soh} 下的电池总阻抗相关,根据2.3.2节建立的参数老化交互模型可知, S_{soh} 降低,电池的欧姆内阻、电荷转移阻抗、SEI膜阻抗均增大。电池总阻抗增加的情况下,由于双安全约束的电压阈值,因此电池的最大允许交流电幅值呈现减小的趋势。

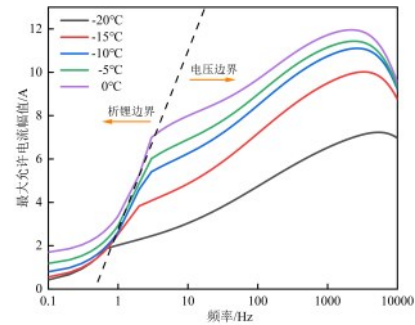
最大允许电流幅值对应频率下的产热率不一定为最大值。根据式(8),交流加热时电池的产热率除了与最大允许电流幅值有关外,还与电池实部阻抗的大小正相关。根据式(9),实部阻抗会随着频率的增大而减小。为找到交流电频率0.1~10 000Hz内的最大产热率所对应的频率,需要代入最大允许电流幅值计算出不同 S_{soh} 的电池在不同交流电频率和不同电池温度下的最大产热率,其中 S_{soh} 分别为95.03%和80.14%计算结果如图11所示。

由图11可知,在不同频率和温度下,不同老化电池的最大产热率均呈现

出和最大允许电流幅值相似的变化曲线。对于不同 S_{soh} 的电池,在不同温度下均存在低温加热的最佳交流电频率和幅值。



(a) S_{soh} 为 95.03%



(b) S_{soh} 为 80.14%

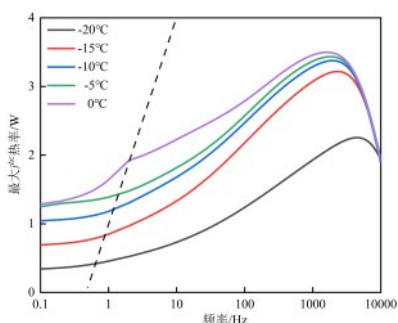
图10 不同 S_{soh} 电池低温保护的最大允许电流幅值

Fig.10 The maximum allowable current amplitude of low temperature protection for different S_{soh} batteries

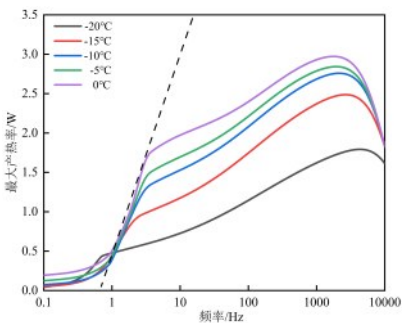
3.2 老化电池交流加热策略制定

低温环境下,要保证电池产热率最大,需要基于电池实时的 T 、SOC、 S_{soh} ,调整施加在电池两端交流电的频率和幅值,提高温升速率,缩短加热时间。通过计算得到每个温度下电池低温

保护的最大产热率对应的正弦交流电频率和幅值作为电池低温保护加热的最优解,从而制定合理、高效的加热策略。



(a) S_{soh} 为 95.03%



(b) S_{soh} 为 80.14%

图 11 不同 S_{soh} 电池低温保护的最大产热率

Fig. 11 The maximum heat production rate of low temperature protection for different S_{soh} batteries

以 5 °C 为区间更新正弦交流电信号最优幅值和频率,在 -20 °C 下,开发不同 S_{soh} (分别为 95.03%、89.97%、84.54% 和 80.14%) 电池的全寿命周期电池低温保护交流加热策略。以 S_{soh} 为 95.03% 为例,其具体参数如表 4 所示。

表 4 电池 S_{soh} 为 95.03% 时的最佳加热策略参数

Table 4 The optimal heating strategy parameters when the S_{soh} of the battery is 95.03%

温度区间	幅值/A	频率/Hz	产热率/W
-20 °C~-15 °C	9.08	4.475	2.25
-15 °C~-10 °C	12.94	2.312	3.22
-10 °C~-5 °C	13.57	1.955	3.38
-5 °C~0 °C	13.79	1.820	3.43
0 °C~5 °C	14.04	1.618	3.50

4 结果与讨论

4.1 加热结果分析

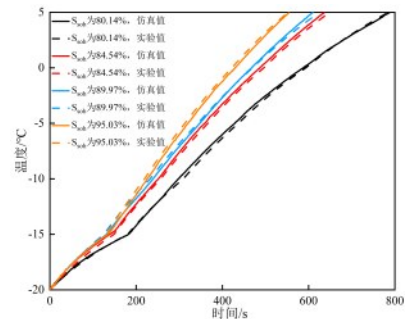
整理分析锂离子电池全寿命周期的最佳交流加热策略的仿真和实验结果,绘制电池 S_{soh} 分别为 95.03%、89.97%、84.54% 和 80.14% 的温度和电压仿真与实验对比曲线如图 12 所示。

分析图 12 的电池低温加热实验数据,电池 SOC 为 50%、 S_{soh} 分别为 95.03%、89.97%、84.54%、80.14% 的电池平均温升速率为 2.70、2.45、2.36、1.90 °C/min,而 1.5 C-100 Hz 的交流加热实验温升速率最快的 SOC 为 50%、 S_{soh} 为 80.14% 的电池平均温升速率只有 0.51 °C/min,表明本文制定的正弦交流电加热策略具备良好的适应性,并显著提升电池低温交流加热效率,缩短加热时间。老化电池温升速率随 S_{soh} 降低而减少,主要原因是内阻随 S_{soh} 降低而增大,在析锂-过压双安全约束下,其电流幅值随 S_{soh} 降低而减少。由图 10 可

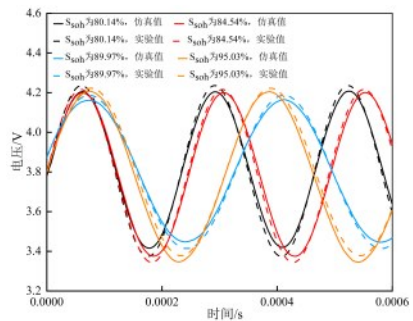
知, S_{soh} 为 80.14% 的电池的最大允许电流幅值比 S_{soh} 为 95.03% 的电池小了约 2 A。同时, 根据式(8), 产热率 Q 与电流幅值呈二次关系, 与内阻 Z_{Re} 呈一次关系, 因此最大允许电流幅值对产热率影响更大。由图 12 (b) 可知, S_{soh} 为 80.14% 的电池两端电压较高, 因为电压与最大允许电流幅值和内阻均为一次关系, 而内阻对电压影响较大。

表 5 为不同 S_{soh} 电池电压和温度仿真值的 RMSE。由表可知, RMSE 最大值分别为 30.4 mV 和 0.31 °C。将模型与现有研究对比分析, Chen 等^[19]提出的电化-热-老化效应耦合模型, 在不同温度和老化状态下的恒流放电条件下, 电压仿真值 RMSE 的最大值为 40 mV。耿陈等^[17]提出的考虑弛豫过程的锂电池电-热-老化耦合模型, 电池温度误差最大值为 1.9 °C, S_{soh} 标定误差最大值为 0.5 %。本文老化交互模型中对于 S_{soh} 拟合曲线的 RMSE 为 0.3%, 综合电压和温度的 RMSE 结果, 可证明所建立的电热老化耦合模型具有较高的精确度以及

适用性。



(a) 温度



(b) 电压

图 12 全寿命周期电池交流电加热的温度和电压结果及验证

Fig. 12 AC heating temperature and voltage results and verification of full lifecycle battery

表 5 不同 S_{soh} 电池温度和电压仿真值的 RMSE

Table 5 RMSE of different S_{soh} battery temperature and voltage simulation

S_{soh}	温度仿真与实验最大差值/°C	温度 RMSE/°C	电压仿真与实验最大差值/mV	电压 RMSE/mV
95.03%	0.50	0.30	46.6	27.4
89.97%	0.56	0.31	36.6	20.2
84.54%	0.21	0.13	46.5	26.6
80.14%	0.47	0.20	51.1	30.4

4.2 电池性能分析

针对本文所制定的最佳交流加热策略,在对电池进行多次交流加热过后,有必要对电池进行循环加热实验,分析循环加热前后的电池 S_{soh} 变化和容量增量(IC)曲线来检验电池健康状态及性能变化。

本文选取 S_{soh} 为 95% 的 2 节 1 8650 锂离子电池进行电池性能分析,1 节按照本文制定的全寿命周期交流加热策略进行 500 次循环加热实验,另外 1 节按照 2.4 节的 1.5 C-100 Hz 交流加热策略进行循环加热,两节电池的 S_{soh} 变化如图 13 所示。

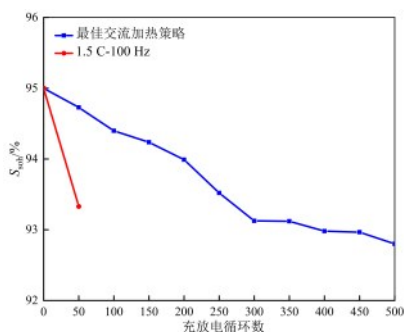


图 13 循环加热过程中电池 S_{soh} 变化
Fig.13 The S_{soh} change of the battery during the heating cycles

1.5C-100Hz 的交流加热策略进行 50 次,电池 S_{soh} 变化较大,衰减迅速,50 次循环加热后其 S_{soh} 变化接近于最佳交流加热策略的 300 次循环加热,若继续循环加热,电池 S_{soh} 持续快速衰减,容易导致电池安全问题。采用本文制定的最佳交流加热策略在经过 500 次低温循环加热后,电池 S_{soh} 最终减小 2.2%。

前期加热时容量衰减较多,后期加热时电池容量趋于稳定,因为新电池前期 SEI 膜的生成需要消耗活性锂,后期 SEI 膜生成稳定以后,消耗的活性锂较少,因此电池容量衰减很小,基本趋于稳定。

电池的 IC 曲线用于评估电池老化、容量衰减和内部状态变化。经过 500 次低温循环加热后,电池的 IC 曲线如图 14 所示。

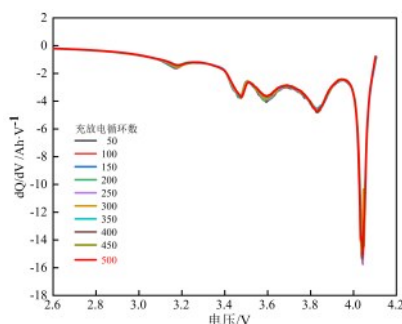


图 14 循环加热前后电池的 IC 曲线
Fig.14 IC curves of the battery before and after heating cycles

从图 14 可以看出,电池 500 次循环加热后,反映电池老化程度的 IC 曲线中 IC 峰几乎没有变化。IC 曲线中每一个峰都有独特的形状、高度和位置,每 50 次低温加热实验后所测的 IC 曲线中的峰变化极小,实验电池中的活性材料基本上没有出现损失,说明 500 次循环加热后电池状态仍较为健康。

5 结论

本文针对电动汽车全寿命周期动力电池的低温交流加热研究,建立高精度

的电热老化耦合模型,制定全寿命周期电池的双安全约束交流加热策略,通过循环加热实验分析电池性能变化,得到以下主要结论:

(1) 通过加速循环老化实验,结合电池健康状态变化曲线可知,电池老化衰减过程可分别采用线性模型与指数模型进行分段拟合。

(2) 建立高精度电热老化耦合模型,不同老化电池的电压和温度最大RMSE值分别为30.4 mV和0.31 °C,证明了该模型的准确性。

(3) 制定电池全寿命周期低温保护交流加热策略,不同老化电池的平均升温速率为1.9~2.7 °C/min,表明该加热策略能够大幅提升电池低温交流加热时的加热效率。

(4) 基于循环加热过程中的电池 S_{soh} 变化和IC曲线,验证所设计的交流加热策略为最优,多次加热后电池性能未有明显退化。

未来研究中,对于电热老化耦合模型中的老化交互模型可以权衡参数辨识与模型精度,分析参数敏感性,在进一步电池模组的应用中降低参数识别难度。同时本文未涉及多电池串并联的电池模组,故未来研究重点在于模型参数优化与电池模组扩展。

参考文献

- [1] 孙君光,杜睿,陈立新,等.考虑温度变化的新能源汽车动力电池荷电状态估计[J].西安交通大学学报,2024,58(11):39-51.
SUN J, DU R, CHEN L, et al. State of

Charge Estimation for Power Batteries in New Energy Vehicles Considering Temperature Fluctuations[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2024,58(11):39-51.

- [2] CHEN J, KOLLMEYER P, PANCHAL S, et al. Experimental results of battery power capability measurement on cells with different state of health levels[J]. IEEE Transp. Electrification Conf. Expo. (ITEC) (2024).
- [3] 薛撬,李军求,肖焱升,等.低温环境下车用锂电池预加热策略研究[J].汽车工程,2023,45(11):2014-2022.
XUE Q, LI J, XIAO Y, et al. Research on the Preheating Strategy of Lithium Batteries Under Subzero Temperature for Electric Vehicles[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(11):2014-2022.
- [4] HUANG X, MENG J, JIANG W, et al. Alternating current heating techniques for lithium-ion batteries in electric vehicles: Recent advances and perspectives[J]. Journal of Energy Chemistry,2024,96:679-697.
- [5] LI J, SUN D. Lithium-ion Batteries Modeling and Optimization Strategies for Sinusoidal Alternating Current Heating at Low Temperature[J]. Energy Procedia, 2018, 152: 562-567.
- [6] 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.
HE X, SUN B, RUAN H, 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.
- [7] ZHANG L, FAN W, WANG Z, et al. Battery heating for lithium-ion batteries based

- on multi-stage alternative currents[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32, 101885.
- [8] LI W, XIE Y, HU X, et al. An Internal Heating Strategy for Lithium-Ion Batteries Without Lithium Plating Based on Self-Adaptive Alternating Current Pulse[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(5):5809 – 5823.
- [9] 熊瑞, 朱宇华, 张骞慧, 等. 锂离子电池低温加热技术研究进展及应用综述[J]. 机械工程学报, 2025.
- XIONG R, ZHU Y, ZHANG Q, et al. Review on Research Progress and Application of Low-temperature Heating Techniques for Lithium-ion Batteries[J]. Journal of mechanical engineering, 2025.
- [10] 刘明轩, 陈文涛, 申韶鹏, 等. 储能用锂离子电池加速老化及老化后安全特性研究[J]. 储能科学与技术, 2025.
- LIU M, CHEN W, SHEN Y, et al. Research on Accelerated Aging and Safety Characteristics of Lithium ion Batteries for Energy Storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025.
- [11] 宋学伟, 于泽平, 肖阳, 等. 锂离子电池老化后性能变化研究进展[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024.
- SONG X, YU Z, XIAO Y, et al. Research progress on performance changes of lithium-ion batteries after aging[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024.
- [12] ZHANG Q, WANG D, SCHALTZ E, et al. Lithium-ion battery calendar aging mechanism analysis and impedance-based State-of-Health estimation method[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107029.
- [13] 李爱东, 刘丹丹, 陈永翀, 等. 不同老化阶段的锂离子电池热特性研究进展[J]. 电源技术, 2024, 48(04):554-567.
- LI A, LIU D, CHEN Y, et al. Research progress of electrical and thermal properties of lithium-ion batteries at different aging stages[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(04):554-567.
- [14] XU Z, LI H, YAZDI M, et al. Aging characteristics and state-of-health estimation of retired batteries: an electrochemical impedance spectroscopy perspective[J]. Electronics, 2022, 11(23):3863.
- [15] MESSING M, SHOA T, HABIBI S. Estimating battery state of health using electrochemical impedance spectroscopy and the relaxation effect[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 43:103210.
- [16] ZHU S, HU C, XU Y, et al. Performance improvement of lithium-ion battery by pulse current[J]. Journal of Energy Chemistry, 2020, 46:208-214.
- [17] 耿陈, 彭乔, 孟锦豪, 等人. 考虑弛豫过程的锂离子电池电-热-老化耦合建模[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(03): 33-39.
- GENG C, PENG Q, MENG J, et al. Coupled electro-thermal-aging modeling for lithium-ion battery considering relaxation process[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(03):33-39.
- [18] 史永胜, 张耀忠, 洪元涛, 等人. 基于电-热-老化耦合模型的锂离子电池优化充电策略[J]. 电子器件, 2020, 43 (05):1078-1084.
- SHI Y, ZHANG Y, HONG Y, et al. Optimized Charging Strategy of Li-Ion Battery Based on Electric-Thermal-Aging Coupling Model[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2020, 43 (05):1078-1084.
- [19] CHEN S, ZHANG Q, WANG F, et al. An

- electrochemical-thermal-aging effects coupled model for lithium-ion batteries performance simulation and state of health estimation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024,239,122128.
- [20] FAN W, ZHU J, QIAO D, et al. Low-Temperature Charging Strategy Optimization Based on Electrochemical-Aging-Thermal Coupling Model[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025,11(1): 901 – 911.
- [21] QIN Y, DU J, LU L, et al. A rapid lithium-ion battery heating method based on bidirectional pulsed current: Heating effect and impact on battery life[J]. *Applied Energy*, 2020,280,115957.
- [22] SHEN K, CHEN L, FENG X, et al. Non-destructive battery fast charging constrained by lithium plating and high temperature limit based on simulation. *Journal of Energy Storage*,2024,84(B),110896.
- [23] TRAN Y, HAN J, SONG S, et al. Solid Electrolyte Interphase Stabilization Path to Lithium Metal Plating-Free High-Energy Lithium-Ion Battery Under Subzero-Temperature. *Journal of The Electrochemical Society*,2021,168,020529.
- [24] HAN X, LU L, ZHENG Y, et al. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle[J]. *eTransportation*,2019,1:100005.
- [25] MATTHIAS F, OLIVER B, SIMON R, et al. A method to determine the specific heat capacity of lithium-ion battery cells using thermal insulation[J]. *Journal of Power Sources*, 2023,583.