

考虑弛豫过程的锂离子电池电-热-老化耦合建模

耿陈¹, 彭乔¹, 孟锦豪¹, 刘天琪¹, 曾雪洋², 陈刚², 李燕²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川成都 610065; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川成都 610072)

摘要:为提高锂离子电池建模精度,提出了一种考虑弛豫过程的锂电池电-热-老化耦合建模方法。基于电池测试数据,辨识Thevenin等效电路模型参数,建立不同荷电状态与健康状态下的锂电池模型多维参数库。考虑传统Thevenin模型采用固定时间常数,导致电池模型在弛豫时间段端电压的拟合效果较差,采用变时间常数方法优化电池弛豫期间的端电压响应。在热表征方面,在不同电流倍率下均辨识了电池的热模型参数。实验结果表明,所提出的模型能够精确反映锂电池在多种运行条件下的端电压、温度和健康状态。

关键词:锂离子电池; 电池建模; Thevenin模型; 电-热-老化耦合模型; 弛豫模型

中图分类号: TM911

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202501001

0 引言

随着可再生能源在电网中的比例持续提高,具有双向调节能力的储能技术已逐渐成为促进可再生能源发展的关键^[1]。除抽水蓄能外,电化学储能是最具发展潜力的储能方式^[2]。锂离子电池(下文简称锂电池)由于其比能量高、功率密度高、自放电率低、无记忆效应等优势,已成为动力电池和电网储能的重要选择^[3]。为确保动力电池安全运行并最大限度地提高其性能,通常使用电池管理系统(battery management system, BMS)监测电池运行状态^[4]。精确的电池模型对于BMS中的电池状态监测、寿命预测、电池组均衡与热管理具有重要意义^[5]。

锂电池模型通常有数据驱动模型、电化学模型和等效电路模型(equivalent circuit model, ECM)^[5] 3种类型。数据驱动模型一般通过大量电池运行数据来构建输入和输出关系,无须考虑电池内部的物理过程,但是存在着数据需求量大、泛化性差、可解释性差等问题^[6]。电化学模型包含大量的电化学参数和难以计算的偏微分方程^[7]。ECM由电压源、电阻、电容等常见电路元件组成,可以模拟电池的外特性,其状态方程简单且适用范围较广,因此相关研究较多。目前,无寄生支路的一阶或二阶RC模型是电池建模的常见选择^[8]。本文选择Thevenin电路(即一阶RC电路)为基础研究锂电池电-热-老化耦合模型。

实时监测和模拟电池的热特性对于电池的健康管理和寿命预测至关重要^[9]。根据电池几何结构的

不同,电池热模型可分为集总参数模型和1维、2维、3维模型^[10-12]。集总参数模型将热动力学进行简化并通过整体温度表示,具有极高的计算效率。1维、2维、3维模型用于研究电池在某一方向、平面和3维空间上的温度分布。本文使用集总参数模型描述电池的发热特性,所需要的参数可从测试和ECM中获得,避免了对电池内部复杂反应机理的深入探究。

锂电池老化特性的研究主要分为容量衰退评估、电池寿命预测、老化模型精准构建等。在实际使用中,电池寿命终点通常被定义为电池的可用容量降至额定容量的80%^[13]。电池老化通常可分为日历老化和循环老化。本文基于测试获得电池的全寿命周期数据,采用数据拟合方法建立老化模型,并根据电池全寿命周期数据更新ECM参数。

在实际运行中,电池的电、热、老化等要素相互耦合,给建模带来了困难。文献[14]建立了不同锂电池组(三元锂电池、磷酸铁锂电池等)的热、电模型,但并未反映电特性和热特性的相互影响。文献[15]重点关注电池模型的电热参数与温度、电流速率的相关性,但并未考虑电池老化的影响。文献[16]建立了电池电热老化模型,但仅验证了电池的老化特性。文献[17]基于二阶RC等效电路模型建立了热模型和半经验容量衰减模型,但并未对建模精度进行系统性验证。总体而言,多数建模方法仅考虑这3个因素中的部分因素,并未全面考虑电、热、老化特性的耦合。此外,针对电池弛豫阶段的建模研究目前仍然较少。

电池在弛豫阶段处于开路状态,且在弛豫期间电池的动态响应从小时间常数的电荷转移区逐渐转移到时间常数较大的扩散区^[18]。弛豫阶段的数据利用范围非常广泛,基于弛豫阶段数据可实现电池状态估计、充电策略优化等目标^[19-20]。然而,传统的建模方法(例如一阶或二阶RC模型)在表征电池弛豫阶段的端电压响应时存在明显的局限性,特别是在

收稿日期:2024-01-03;修回日期:2024-09-12

在线出版日期:2025-01-03

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5108-202299262A-1-0-ZB)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5108-202299262A-1-0-ZB)

弛豫时间较长时。单一时间常数的传统模型无法准确模拟电池弛豫阶段端电压的变化趋势,导致模型的精度下降。

针对现有研究的不足,本文提出考虑弛豫阶段的锂电池电-热-老化耦合模型建模方法,基于电池全生命周期的电测试和热测试,建立充分考虑电-热-老化相互耦合特性的模型,通过引入变时间常数方法减小端电压拟合误差,提高电池在弛豫期间的电特性拟合精度。

1 锂电池电-热-老化耦合模型构建

1.1 锂电池的Thevenin模型

锂电池的等效电路建模方法通过模拟电池实际测试中的电特性,辨识获取电模型参数。Thevenin模型如图1所示,模型由欧姆内阻 R_0 、开路电压 U_{oc} 、极化电阻 R_1 、极化电容 C_1 这4个电路元件组成: U_{oc} 表征电极间的电势差; R_0 表征动力锂电池所使用的电极材料、电解液、隔膜内阻等部位的接触内阻; R_1 和 C_1 表征锂电池的极化现象。图1中: U_1 、 U_0 分别为 R_1 、 R_0 两端的电压; U_L 为电池的端电压; I_L 为流过电池的电流; V_{SOC} 、 V_{SOH} 分别为电池荷电状态(state of charge, SOC)、健康状态(state of health, SOH)的值。

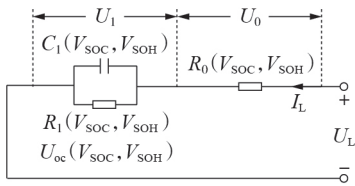


图1 Thevenin模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of Thevenin model

本文中的等效电路建模只考虑电池SOC与SOH的影响,因此 U_{oc} 、 R_0 、 R_1 、 C_1 为关于SOC和SOH的函数。 V_{SOC} 、 V_{SOH} 可分别表示为:

$$V_{SOC} = \frac{1}{3600Q_{max}} \int_0^{t_1} I_L dt \quad (1)$$

$$V_{SOH} = Q_{max} / Q_{rated} \quad (2)$$

式中: Q_{max} 为电池当前最大容量; Q_{rated} 为新电池初始标定容量; t_1 为电池充放电过程中的任意时刻。

1.2 锂电池的弛豫模型

电池充/放电后的弛豫时间电压曲线如附录A图A1所示。由图不难看出,电池的弛豫电压需要数小时才能达到平衡,且电压曲线具有很强的非线性特性。这是由于弛豫期间电池内部物理化学变化复杂,弛豫时间的电压变化由欧姆内阻引起的瞬时电压变化和由电荷传输、离子迁移等动力学效应引起的动态变化组成。因此,预测锂电池在弛豫阶段的电压通常较为困难。

Thevenin模型中的时间常数 $\tau = R_1 C_1$ 。由1.1节

可知,极化电阻 R_1 和极化电容 C_1 均是关于SOC和SOH的函数,传统模型在某一SOC及特定的SOH下仅有1个参数。在弛豫期间,电池的动态响应从小时间常数的电荷转移区逐渐转移到较大时间常数的扩散区。因此,时间常数 τ 随着弛豫时间的增加而逐渐增加。将 $\tau(t)$ 定义为 t 时刻的时间常数,即:

$$\tau(t) = \left[\ln \frac{U_{oc} - U_L(t-1)}{U_{oc} - U_L(t)} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: $U_L(t)$ 、 $U_L(t-1)$ 分别为 t 、 $t-1$ 时刻的电池端电压。

U_{oc} 已知时,可以得到电池弛豫状态的时间常数分布,如图2所示。

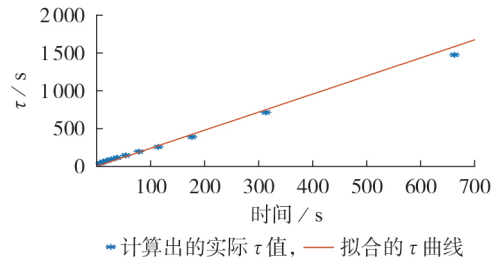


图2 弛豫区间的时间常数

Fig.2 Time constant of relaxation interval

由图2可知, $\tau(t)$ 与时间具有明显的线性关系。因此,对传统的电池电模型进行优化,即在相应SOC和SOH下采用时变的 $\tau(t)$ 模型来优化电模型在弛豫阶段的端电压曲线。弛豫模型可表示为:

$$\begin{cases} U_L(t) = U_{oc} - [U_{oc} - \hat{U}_L(t-1)] e^{-t/\tau(t)} \\ \tau(t) = kt + \sigma \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{U}_L(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻电池端电压的估计值; k 和 σ 为计算系数。

通过式(4)可拟合得到不同SOH、不同SOC下的 k 和 σ ,进而可以获得相应时间常数模型和电池弛豫时间的端电压曲线。在给定SOC、SOH下对弛豫时间采用定时间常数辨识得到的电压曲线见图3(a)。由图可见,定时间常数下电压拟合精度低,前段电压下降速率慢,后段电压下降速率快。相同条件下采用变时间常数辨识得到的电压曲线见图3(b)。由图可见,端电压曲线的绝对值误差均小于1 mV,拟合误差大幅减少,验证了变时间常数辨识的精度。

1.3 锂电池的热模型

锂电池的温度变化是电化学反应、相变、混合效应、焦耳热等因素的综合结果。电池内部的热量积累既与内部产热有关,也与对流换热有关。以能量守恒为基础,基于电池内部物质均匀发热的前提,列出相关方程为:

$$Q = Q_{ir} + Q_r + Q_c \quad (5)$$

式中: Q 为电池的净产热率; Q_{ir} 为电极极化导致的不可逆产热率; Q_r 为电池可逆产热率; Q_c 为电池自然

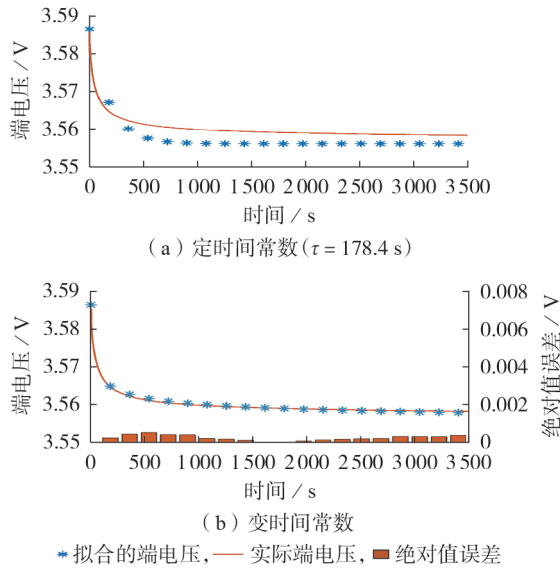


图3 锂离子电池实际端电压与拟合端电压曲线

Fig.3 Actual terminal voltage and fitted terminal voltage curves of lithium-ion battery

对流散热率。

Q 可以表示为:

$$Q = C_h M (T - T_0) \quad (6)$$

式中: C_h 为电池比热容; M 为电池单体质量; T 为电池当前时刻的表面温度; T_0 为环境温度。

Q_{ir} 、 Q_r 、 Q_c 可以表示为:

$$\begin{cases} Q_{ir} = I_L^2 (R_0 + R_1) \\ Q_r = I_L T \frac{dU_{oc}}{dT} \\ Q_c = h(T - T_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: h 为对流换热系数。

综合式(5)~(7)可以得到产热方程为:

$$C_h M (T - T_0) = I_L^2 (R_0 + R_1) + I_L T \frac{dU_{oc}}{dT} - h(T - T_0) \quad (8)$$

Tarun Huria 等人^[21]进一步简化了产热公式,忽略了电池反应热。结合以上公式,可以得到集总参数温度模型为:

$$C_T \frac{dT}{dt} = I_L^2 (R_0 + R_1) - \frac{T - T_0}{R_T} \quad (9)$$

式中: C_T 为电池的热容,单位为 J/K; R_T 为电池的热阻,单位为 K/W。

1.4 锂电池的老化模型

基于电池全周期数据,可构建一个电池 SOH 关于电池累计通过容量的函数模型,以描述电池老化特性。假定电池容量短时间内不会发生显著变化,将累计 2 次标定之间通过电池电流安时积分的绝对值之和作为电池累计通过容量。

假定电池第 1 次标定容量为 Q_1 , 第 N 次标定容量为 Q_N , 其中第 1、2 次标定之间的循环老化工况累

计通过容量记为 $Q_{1,2}$, 依此类推, 第 $N-1$ 、 N 次标定之间的循环老化工况累计通过容量记为 $Q_{N-1,N}$ 。到第 N 次标定前累计通过的安时容量为 $Q_{cum,N}$, 到第 1 次标定前累计通过的安时容量为 $Q_{cum,1} = 0$ 。

考虑到 1 次标定工况中有 5 次充放循环, $Q_{cum,N}$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} Q_{cum,N} = Q_{cum,N-1} + 10Q_{N-1} + Q_{N-1,N} \\ Q_{cum,1} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

综上所述,可以构建 Q_N 与 $Q_{cum,N}$ 之间的函数关系,即老化模型。

1.5 锂电池电-热-老化耦合模型建模步骤

锂电池电-热-老化耦合模型的整体建模框架如附录 A 图 A2 所示。模型输入为电流和电池初始 SOH、SOC, 输出为电池端电压、SOH 和电池温度。电模型内部参数和输出电压由 SOC、SOH、电流决定。热模型根据电模型中的参数 R_0 、 R_1 , 结合实时电流和式(9)所示输出温度。老化模型通过累计电池电流, 根据 SOH 与累计通过容量的函数, 得到电池当前 SOH, 并更新电模型内部参数。整体建模步骤如下:

1) 使用 MATLAB / Simulink 仿真搭建等效电路模型框架;

2) 通过锂电池测试实验获取电池端电压、电流、容量、温度等实验数据, 具体包括容量测试、混合功率特性 (hybrid pulse power characteristic, HPPC) 实验、大电流温度实验、循环老化实验等;

3) 通过对测试获得的数据进行参数拟合, 得到动力锂电池在不同 SOH、SOC 下的内部参数, 例如 U_{oc} 、 R_0 、 R_1 、 C_1 等;

4) 利用等效电路模型和温度方程处理计算大电流温度实验数据, 获取温度模型需要的参数 R_T 、 C_T ;

5) 基于弛豫过程的电压数据辨识时间常数, 建立时间常数模型, 对输出电压模块进行优化;

6) 通过实际工况测试来检验模型输出端电压、温度和 SOH 的准确性。

2 锂电池电-热-老化建模测试

2.1 锂电池基本参数和测试平台

本文实验在型号为 EVE-ICR18650 的 NMC 圆柱形锂电池上进行, 其基本参数见附录 A 表 A1。

本文的电池外特性测试设备由温控箱、可编程充放电测试仪 Chroma 17011、主控电脑组成, 如附录 A 图 A3 所示。将待测电池置于温控箱中进行充放电测试, 电池表面与 K 型热电偶测量端紧密接触。充放电测试仪可根据主控电脑的测试需求实现复杂工况。同时, 测试仪具备温度、电流、电压传感器, 实时记录电池的电流、电压、温度、充放电容量、充放电

时间等数据并传递到主控电脑,形成可导出的电池外特性数据表。

2.2 锂电池测试工况

为获取 U_{oc} 、 R_0 、 R_1 、 C_1 、 R_T 、 C_T 等参数,可设计相应的锂电池测试。测试主要分为容量测试、HPPC测试、大倍率电流温度测试和循环老化测试。

根据表 A1 可得到截止条件。温控箱环境温度设置为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,采样间隔为 1 s 。放电电流为负,充电电流为正。附录 A 图 A4(a)~(d) 分别展示了容量 HPPC 测试、温度测试、标定测试和老化测试的电压和电流曲线。

温度测试由不同电流倍率的充放电循环组成,目的是获取不同电流倍率下的电池温度数据。基于温度测试,可以获取不同倍率下温度模型所需要的热容、热阻数值,其相较于单一热容热阻值热模型的优点将在第 4 章仿真精度验证中具体展示。

循环老化测试由标定和老化测试组成。每一轮老化都由 1 次标定和 1 次老化组成,标定的目的是获取电池在不同老化阶段中的电池参数。1 次标定包含容量测试、HPPC 测试和小电流开路电压测试。容量测试可以获取当前老化状态下电池的 SOH 值。HPPC 测试包括短时脉冲充放和长时间静置过程。短时脉冲充放过程可以获取电池的电阻电容参数,长时间静置过程可以获取电池的开路电压及弛豫模型参数。为了缩短测试周期,在 3 种 SOC 值(0.2、0.5、0.7)下完成 HPPC 测试。电池的 1 次老化过程包括 20 轮充放电循环。

3 锂电池电-热-老化模型的参数辨识方法

3.1 锂电池模型参数辨识方法

电模型的参数识别是基于 HPPC 测试数据完成的。 $V_{SOH}=1$ 、 $V_{SOC}=0.5$ 时的 HPPC 脉冲如图 4 所示。图中: I_{L_char} 和 $I_{L_dischar}$ 分别为充电脉冲和放电脉冲的电流大小; V_{SOC1} 、 V_{SOC2} 分别为放电脉冲和充电脉冲后的 SOC 值。通常情况下,锂电池在充电状态下的电池基本参数、内部反应状况与放电状态下不一致,因此,需要对充、放电状态下的基本参数分别进行

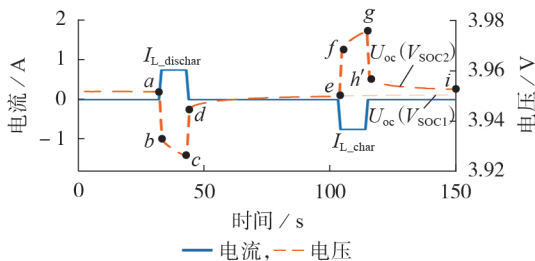


图4 HPPC脉冲和对应的电压曲线

Fig.4 Curves of HPPC pulse and corresponding voltages

辨识。

3.1.1 开路电压 U_{oc} 辨识

对于图 4 中的点 a , 4 h 的弛豫时间消除了极化效应,且电流为 0,则点 a 的电压即为 $V_{SOC}=0.5$ 时的开路电压,因此,充电阶段和放电阶段分别有 9 个 U_{oc} ,共用 $V_{SOC}=0$ 和 $V_{SOC}=1$ 时的 U_{oc} 。

3.1.2 欧姆内阻 R_0 辨识

图 4 中, $a-b$ 和 $c-d$ 段分别为放电脉冲开始和结束时的电压瞬态, $e-f$ 和 $g-h'$ 段分别为充电脉冲开始和结束时的电压瞬态。根据 Thevenin 模型, R_1 和 C_1 并联构成 RC 模块,不会引起电压瞬态变化,开路电压模块也不会很短的时间内改变电压幅值。因此,电压瞬变是由欧姆内阻 R_0 引起的,通过欧姆定律可求得 R_0 ,如式(11)所示。

$$R_0 = \begin{cases} \left(|U_{L_ab}| + |U_{L_cd}| \right) / \left(2 |I_{L_dischar}| \right) & \text{放电} \\ \left(|U_{L_ef}| + |U_{L_gh'}| \right) / \left(2 |I_{L_char}| \right) & \text{充电} \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_{L_ab} 为电池在点 a 、 b 间的端电压压降, U_{L_cd} 、 U_{L_ef} 、 $U_{L_gh'}$ 的定义可以此类推,不再赘述。

3.1.3 极化电阻 R_1 和极化电容 C_1 辨识

由图 1 所示的 Thevenin 模型可以得到:

$$U_L = U_{oc} + I_L R_0 + U_1 \quad (12)$$

由于图 4 中 $d-e$ 段和 $h'-i$ 段对应的电流为 0,因此欧姆电阻上没有压降,可以得到:

$$U_L = \begin{cases} U_{oc}(V_{SOC1}) + U_1(t_d) e^{-\frac{t}{\tau}} & d-e \text{ 段} \\ U_{oc}(V_{SOC2}) + U_1(t_{h'}) e^{-\frac{t}{\tau}} & h'-i \text{ 段} \end{cases} \quad (13)$$

$$\tau = R_1 C_1 \quad (14)$$

式中: t_d 和 $t_{h'}$ 分别为点 d 和点 h' 对应的时刻。

为了辨识参数 $U_{oc}(V_{SOC1})$ 、 $U_1(t_d)$ 、 $U_{oc}(V_{SOC2})$ 、 $U_1(t_{h'})$,只需要将实际数据与函数 $f(t) = A + B e^{-\alpha t}$ 进行非线性拟合,其中:

$$\begin{cases} U_{oc}(V_{SOC1}) = A, U_1(t_d) = B & d-e \text{ 段} \\ U_{oc}(V_{SOC2}) = A, U_1(t_{h'}) = B & h'-i \text{ 段} \\ \tau = 1/\alpha \end{cases} \quad (15)$$

因此,可得到 R_1 和 C_1 的表达式分别为:

$$R_1 = \begin{cases} U_1(t_d) / \left[\left(1 - e^{-\frac{t_d - t_d}{\tau}} \right) I_{L_dischar} \right] & d-e \text{ 段} \\ U_1(t_{h'}) / \left[\left(1 - e^{-\frac{t_e - t_{h'}}{\tau}} \right) I_{L_char} \right] & h'-i \text{ 段} \end{cases} \quad (16)$$

$$C_1 = \tau / R_1 \quad (17)$$

式中: t_a 和 t_e 分别为点 a 和点 e 对应的时刻。

3.1.4 弛豫模型参数辨识

由于 HPPC 测试在每上升 0.1 的 SOC 后需要经历长时间静置,因此弛豫模型参数的辨识可利用 HPPC 测试的静置阶段完成,无须进行额外测试。对

于不同 SOH 和不同 SOC 下的 HPPC 静置曲线,依据式(4)中的 $\tau(t)=kt+\sigma$ 计算时间常数,并采用线性函数对结果进行拟合,离线辨识 k 与 σ 的数值,从而建立 k 、 σ 关于老化程度以及 SOC 的查找表。辨识得到的弛豫参数 k 、 σ 在不同老化程度以及不同 SOC 下的变化趋势如附录 A 图 A5 所示。由图可见, k 值随着老化程度的加深逐渐下降, σ 值随着老化程度的加深逐渐上升。

3.1.5 热阻 R_T 和热容 C_T 辨识

对式(9)进行离散化,得到:

$$T(n) = -\frac{T(n-1) - T_0}{R_T C_T} + \frac{Q_{ir}(n)}{C_T} + T(n-1) \quad (18)$$

结合由 Thevenin 模型(式(7))计算得到的 Q_{ir} , 以及根据大电流温度测试得到的温度曲线,利用式(18)可以求出仿真温度值,通过最小化仿真温度与实际测得的电池表面温度的误差,可以辨识 R_T 和 C_T 值。传统方法中,热阻和热容大小单一不变,难以适应不同倍率电流工况,因此,本文提出了一种变热容热阻方法,通过辨识不同倍率下的温度参数并建立查找表,可根据电流倍率改变热容、热阻数值,减少因电流倍率变化引起的误差,所提方法的温度仿真结果将在第4章仿真模型精度验证中进行展示。

3.1.6 老化模型参数辨识

老化参数识别分为两部分,部分1是累积容量和 SOH 的函数,部分2是不同 SOH 对电模型参数的影响。

部分1中,对于每次标定中容量测试获得的 SOH,结合式(10)可得:

$$\begin{cases} Q_{cum} = \int_0^{t_1} |I_L| dt \\ V_{SOH} = f(Q_{cum}) \end{cases} \quad (19)$$

实际循环老化测试中电池累计通过容量与 SOH 的关系曲线如附录 A 图 A6 所示,由图可以观察到累计通过容量与 SOH 之间存在单调线性关系。因此,建立电池的 SOH 与累计通过电池容量 Q_{cum} 的线性内插查找表,以此为老化模型。

部分2中,通过每一轮标定的 HPPC 脉冲,可获得处于当前 SOH 的电池在3种 SOC 下的电池参数,结合式(11)和式(16)即可获得欧姆内阻、极化电阻、极化电容的数值。由文献[22]可知,在不同 SOH 下,欧姆内阻关于 SOC 的趋势相近,因此,本文在电池 $V_{SOH}=1$ 的情况下,设置 V_{SOC} 从0.1变化到0.9(变化步长为0.1),在9个 SOC 值下进行 HPPC 测试,根据9个 SOC 值下辨识得到的欧姆内阻数据,建立 R_0 关于 SOC 的模型,并根据该模型拟合了不同 SOH 下欧姆内阻在9个 SOC 下的数值,提高电池端电压在低 SOC 和高 SOC 下的仿真精度。 R_0 关于 SOC 的曲线见附录 A 图 A7。由图可见,拟合模型的均方根误差仅有0.0014,可以准确反映欧姆内阻的变化趋势。因

此, R_0 关于 SOC、SOH 的3维曲线见附录 A 图 A8。

3.2 锂电池仿真模型架构

3.2.1 弛豫模型架构

由于弛豫时间内电池两端无电流,欧姆内阻上无电压,因此,时变的时间常数在 Thevenin 模型中也体现为时变的极化电容 C_1 和极化电阻 R_1 。本文采用变极化电容不变极化电阻的方法跟踪时间常数的变化。Simulink 中弛豫模型的仿真架构见附录 A 图 A9。参数 k 、 σ 可由 SOC 和 SOH 的数值获得。当电流为0时,系统进入弛豫阶段。模型的时间常数可由 k 、 σ 、弛豫时间获得,并根据 R_1 的大小求取相应的 C_1 ; 当电流不为0时,根据已辨识出的参数 R_1 、 C_1 输出。

3.2.2 整体仿真模型架构

锂电池整体仿真架构如附录 A 图 A10 所示。SOC 模块进行电流累计,根据电池当前容量计算 SOC。SOH 模块根据电流累积量,修正电池的 SOH。RC 电路是电模型的主体,由图 A10 可以看出,输出电压由 U_{oc} 、 U_0 、 U_1 这3个部分组成。温度模块根据欧姆内阻和极化电阻值,结合输入电流值和环境温度,可以获得电池实时温度。整体模型的输入为电流 I_L 、初始 SOH 值 V_{SOH0} 和环境温度 T_0 , 输出为端电压 U_L 、电池温度 T 和 SOH 的数值 V_{SOH} 。

4 仿真模型精度验证

4.1 电模型仿真精度验证

将实际工况的电流曲线作为电模型输入,可获取端电压仿真曲线,并与实验实际电压作对比。 $V_{SOH}=1$ 、 $V_{SOC}=0.2$ 和 $V_{SOH}=0.86$ 、 $V_{SOC}=0.2$ 时的电模型端电压仿真结果分别如图5、附录 A 图 A11 所示。图5、图 A11 为不同 SOH 下标定工况的部分曲线,均展示了电池模型的动态性能和弛豫性能,并与无弛豫模型优化的仿真结果进行对比。图5中 e_v 为仿真端

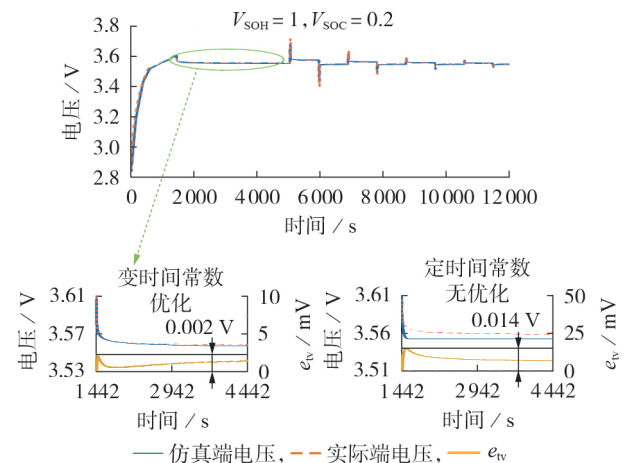


图5 $V_{SOH}=1$ 、 $V_{SOC}=0.2$ 时电模型端电压仿真结果及误差
Fig.5 Simulative results and errors of electric model terminal voltage when $V_{SOH}=1$ and $V_{SOC}=0.2$

电压和实际端电压间的误差绝对值。

由图5、图A11可以看出,仿真端电压曲线和实际端电压曲线变化情况基本一致,仿真曲线随动性良好。2张图均对长时间弛豫时间段进行了窗口放大,可以观察到,变时间常数方法能够提升仿真精度,且对比单一时间常数方法,误差由最高0.014 V下降到0.002 V,即下降到未优化情况下的1/7,大幅提高了弛豫时间段的电压仿真曲线精度。

4.2 热模型仿真精度验证

不同电流大小下的热容、热阻值如附录A表A2所示。由表可见,充电工况下的热阻、热容均高于放电工况下的热阻、热容值;随着放电电流增大,热阻下降、热容上升。单一热容热阻方法的热阻、热容值基于大电流工况辨识得到,热阻值为5.54 K/W,热容值为61.9 J/K。

变热容热阻方法和单一热容热阻方法得到的仿真温度及误差分别见图6和附录A图A12。对比图6和图A12不难看出,2张图中仿真温度曲线与实际测试温度曲线基本一致;但是,变热容热阻方法的误差最高约为1.9 °C,单一热容热阻方法的误差最高约为3.2 °C,表明变热容热阻方法提升了仿真温度精度。

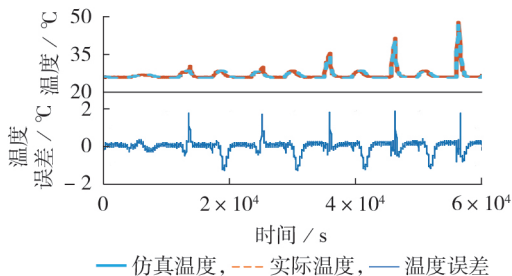


图6 $V_{SOH}=0.82$ 时,变热容热阻方法的仿真温度和误差
Fig.6 Simulative temperature and error of variable heat capacity and thermal resistance method when $V_{SOH}=0.82$

4.3 老化模型仿真精度验证

图7为电池在不同累计通过容量下的实际标定和仿真SOH。为保证验证结果有效性,本文用于建模的电池与图中用来验证的电池为同一型号的不同电池,2块电池老化工况相同,电池1累计通过容量

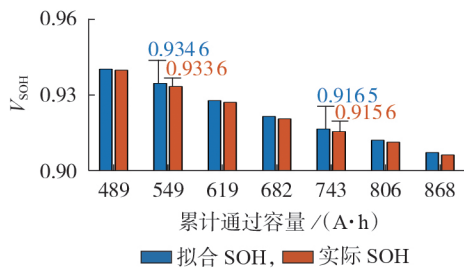


图7 仿真SOH与实际标定SOH对比
Fig.7 Comparison between simulated SOH and actual benchmarked SOH

与SOH间的关系用于建立老化预测模型;电池2的实际测试工况电流作为模型的输入,输出SOH估计值,将该SOH估计值与实际电池2标定测试获取的SOH进行对比,即可验证老化模型的精度。图7随机选取了电池的老化区间进行老化模型精度验证,不难看出,SOH的仿真结果与实际数据变化趋势相同,误差小于0.5%,表明所提模型的SOH拟合精度良好。

5 结论

本文基于ICR18650动力锂电池测试结果,提出应对输出电压、温度及老化情况预测的电池建模方法和模型参数辨识方法,建立了锂电池的电-热-老化耦合模型。在传统的一阶RC模型的基础上进一步考虑电池累计通过容量(即电池老化)对电模型参数的影响。所提模型可以精确反映电池的端电压、温度、老化情况。此外,本文结合弛豫模型,提升了锂电池弛豫阶段的端电压精度,对于锂电池的开路电压预测、状态估计等领域都具有重要意义。仿真结果表明,所提模型的电池端电压在弛豫阶段的误差小于2 mV,电池温度误差小于1.9 °C,SOH预测误差小于0.5%,证明了该模型的准确性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 朱晓荣,山雨琦. 考虑灵活性的储能容量多阶段分布鲁棒规划[J]. 电力自动化设备,2023,43(6):152-159,167.
ZHU Xiaorong, SHAN Yuqi. Multi-stage distributionally robust planning of energy storage capacity considering flexibility[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(6):152-159,167.
- [2] 李颜鑫,付强,肖先勇. 电池储能并网系统小干扰稳定性研究综述[J]. 电力自动化设备,2023,43(9):125-137.
LI Yanxin, FU Qiang, XIAO Xianyong. Review of research on small-signal stability of grid-connected battery energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(9):125-137.
- [3] 张家琪,刘朋印,谢小荣,等. 适用于故障特性分析的锂离子电池储能电磁暂态建模方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(7):166-173.
ZHANG Jiaqi, LIU Pengyin, XIE Xiaorong, et al. Electromagnetic transient modeling method of lithium-ion battery energy storage system for fault characteristic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(7):166-173.
- [4] MENG Jinhao, RICCO M, LUO Guangzhao, et al. An overview and comparison of online implementable SOC estimation methods for lithium-ion battery[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2018,54(2):1583-1591.
- [5] 李欣雨,韩雪冰,卢兰光,等. 基于大倍率电流脉冲的动力锂离子电池阻抗模型优化[J]. 储能科学与技术,2023,12(5):1686-1694.
LI Xinyu, HAN Xuebing, LU Languang, et al. Impedance model optimization of power lithium-ion battery based on large current pulse[J]. Energy Storage Science and Technology,2023,12(5):1686-1694.
- [6] LAI Xin, WANG Shuyu, MA Shangde, et al. Parameter sensi-

- tivity analysis and simplification of equivalent circuit model for the state of charge of lithium-ion batteries [J]. *Electrochimica Acta*, 2020, 330: 1352-39.
- [7] HENTUNEN A, LEHMUSPELTO T, SUOMELA J. Time-domain parameter extraction method for Thévenin-equivalent circuit battery models [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, 29(3): 558-566.
- [8] CHEN Min, RINCON-MORA G A. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and *I-V* performance [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(2): 504-511.
- [9] 金强, 李军. 锂离子动力电池建模方法综述 [J]. *汽车工程师*, 2021(7): 11-14.
- JIN Qiang, LI Jun. Review of modeling techniques for lithium-ion traction batteries [J]. *Automotive Engineer*, 2021(7): 11-14.
- [10] AL HALLAJ S, MALEKI H, HONG J S, et al. Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 1999, 83(1/2): 1-8.
- [11] PING Ping, WANG Qingsong, HUANG Peifeng, et al. Thermal behaviour analysis of lithium-ion battery at elevated temperature using deconvolution method [J]. *Applied Energy*, 2014, 129: 261-273.
- [12] BARCELONA S, PIEGARI L. Lithium ion battery models and parameter identification techniques [J]. *Energies*, 2017, 10(12): 2007.
- [13] SPOTNITZ R. Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 113(1): 72-80.
- [14] JAGUEMONT J, NIKOLIAN A, OMAR N, et al. Development of a two-dimensional-thermal model of three battery chemistries [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(4): 1447-1455.
- [15] YANG Zhuo, PATIL D, FAHIMI B. Electrothermal modeling of lithium-ion batteries for electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 170-179.
- [16] MAURI M, CASTELLI-DEZZA F, CARMELI M S, et al. Electro-thermal aging model of li-ion batteries for vehicle-to-grid services [C] // 2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE). Torino, Italy: IEEE, 2019: 1-6.
- [17] PEREZ H E, HU X, DEY S, et al. Optimal charging of Li-ion batteries with coupled electro-thermal-aging dynamics [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 7761-7770.
- [18] QIAN Yimin, ZHENG Jian, DING Kai, et al. Fast open circuit voltage estimation of lithium-ion batteries using a relaxation model and genetic algorithm [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 96643-96651.
- [19] 耿陈, 孟锦豪, 彭乔, 等. 基于弛豫过程特征提取的锂离子电池健康状态估计 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(11): 3479-3487.
- GENG Chen, MENG Jinhao, PENG Qiao, et al. Estimation of the state of health of lithium-ion batteries based on feature extraction of the relaxation process [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(11): 3479-3487.
- [20] 徐智慧, 类延香, 龚敏明, 等. 锂离子电池脉冲优化充电法的研究 [J]. *电源技术*, 2019, 43(7): 1113-1115, 1143.
- XU Zhihui, LEI Yanxiang, GONG Minming, et al. Optimal charging of lithium-ion battery by current pulse [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2019, 43(7): 1113-1115, 1143.
- [21] HURIA T, CERAOLO M, GAZZARRI J, et al. High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells [C] // 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference. Greenville, SC, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [22] YU Peng, WANG Shunli, YU Chunmei, et al. Study of hysteresis voltage state dependence in lithium-ion battery and a novel asymmetric hysteresis modeling [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104492.

作者简介:

耿陈(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为锂电池储能技术(**E-mail**:gchyc1206@163.com);

彭乔(1994—),女,副研究员,博士,通信作者,主要研究方向为新型电力系统频率稳定与控制、新能源与储能并网控制等(**E-mail**:qpeng@scu.edu.cn);

刘天琪(1962—),女,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电等(**E-mail**:tqliu@scu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Coupled electro-thermal-aging modeling for lithium-ion battery considering relaxation process

GENG Chen¹, PENG Qiao¹, MENG Jinhao¹, LIU Tianqi¹, ZENG Xueyang², CHEN Gang², LI Yan²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to improve the modeling accuracy of lithium-ion batteries, a coupled electro-thermal-aging modeling method for lithium-ion batteries considering the relaxation process is proposed. Based on the battery test data, the parameters of Thevenin equivalent circuit model are identified, and the multidimensional parameter table of lithium-ion battery model in different state of charge and state of health (SOH) is established. Considering that the traditional Thevenin model uses a fixed time constant, which leads to a poor fitting of the battery model for the terminal voltage during the relaxation period, a variable time constant method is used to optimize the terminal voltage response of the battery during the relaxation period. In terms of thermal characterization, the thermal model parameters of the battery are identified at different current multiplicities. The experimental results indicate that the proposed model can accurately reflect the terminal voltage, temperature, and SOH of lithium-ion battery under various operating conditions.

Key words: lithium-ion battery; battery modeling; Thevenin model; electro-thermal-aging coupling model; relaxation model

附录 A

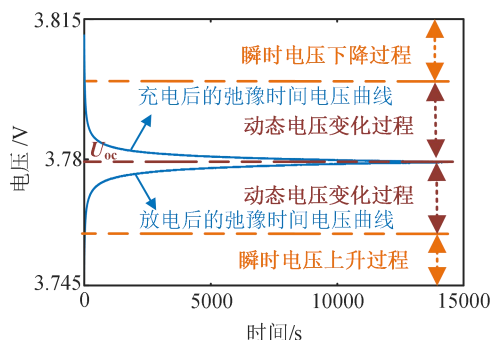


图 A1 同一 SOC 下充/放电后的弛豫时间电压曲线

Fig.A1 Post-charging/discharging voltage relaxation profile at same SOC

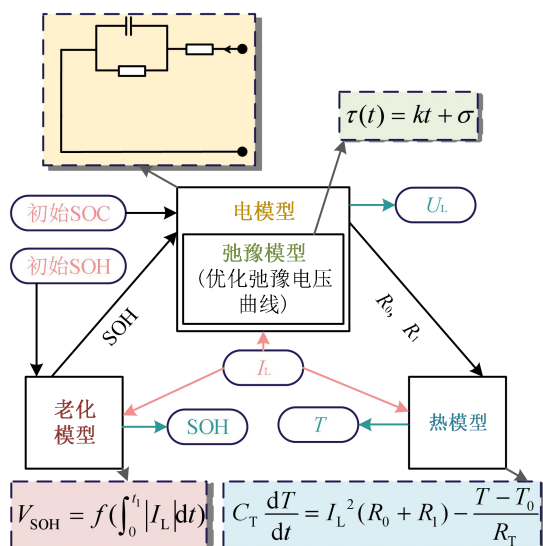


图 A2 锂电池电-热-老化耦合模型框架

Fig.A2 Electric-thermal-aging coupled model framework of lithium-ion battery

表 A1 锂电池基本参数

Tabel A1 Basic parameters for lithium-ion battery

参数	规格
型号	ICR18650
形式	圆柱形锂电池
正极活性材料	NMC
额定容量	1500mAh
额定电压	3.6V
放电/充电截止电压	2.5V/4.2V
额定充电/放电电流	0.75A/0.3A
快充电流	4A
最大放电电流	DC, 30A

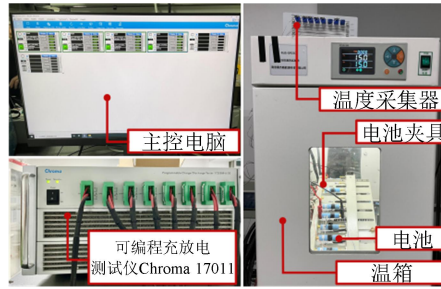


图 A3 电池测试平台

Fig. A3 Battery test platform

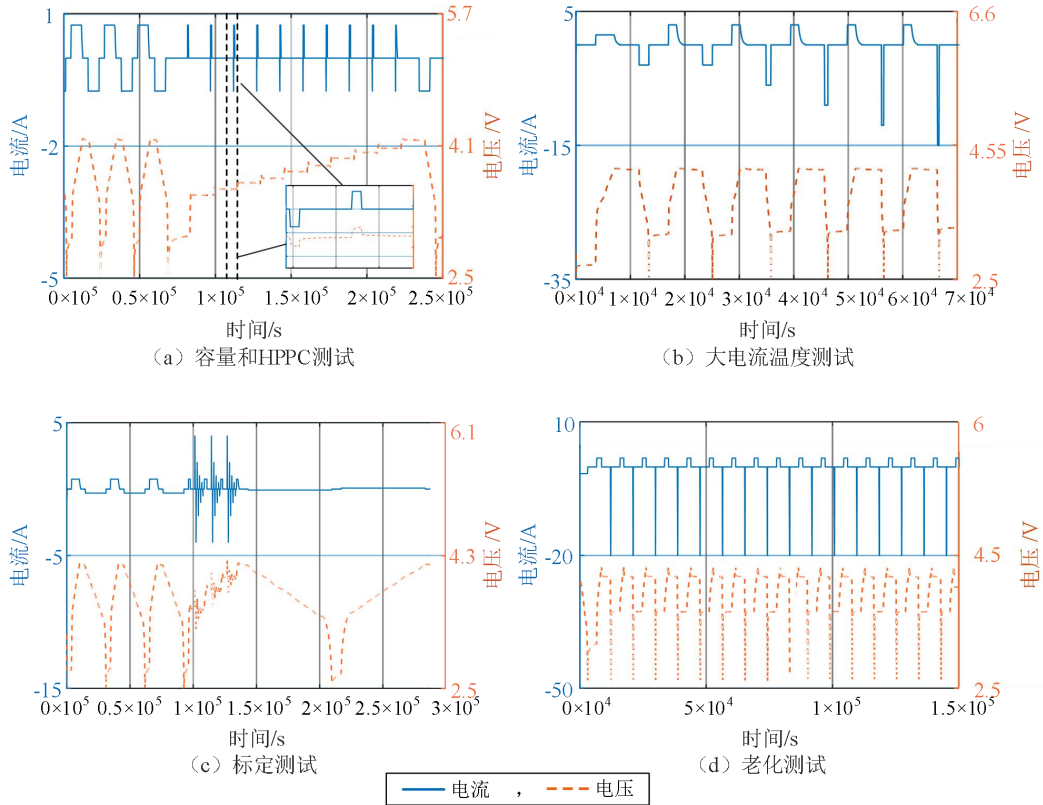


图 A4 电池测试的电压和电流曲线

Fig. A4 Voltage and current curves of battery test

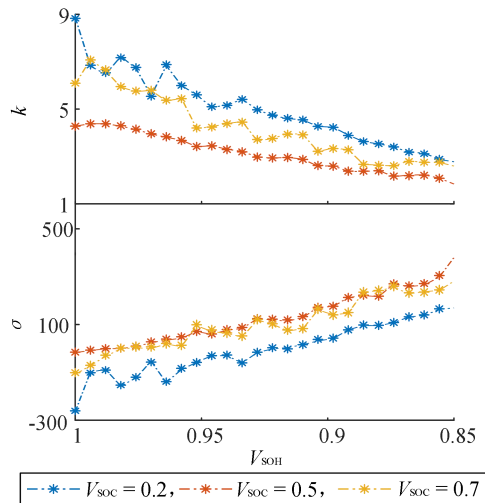


图 A5 不同 SOH、SOC 值下的 k 、 σ 值

Fig.A5 Values of k and σ under different values of SOH and SOC

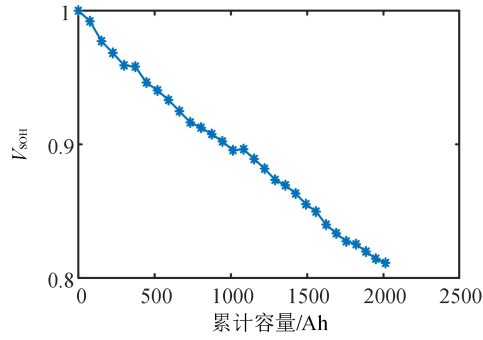


图 A6 电池累计容量与 SOH 的关系

Fig.A6 Relationship between cumulative battery capacity and SOH

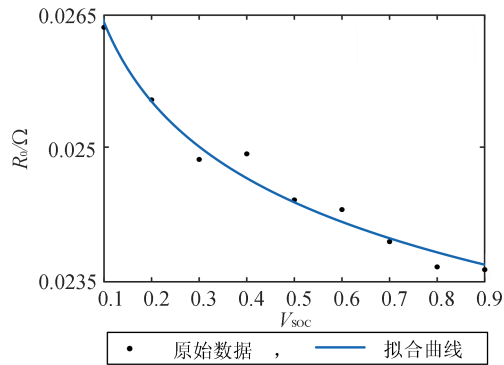


图 A7 9 种 SOC 值下欧姆内阻 R_0 的拟合曲线

Fig. A7 Fitted curve of ohmic internal resistance R_0 under nine values of SOC

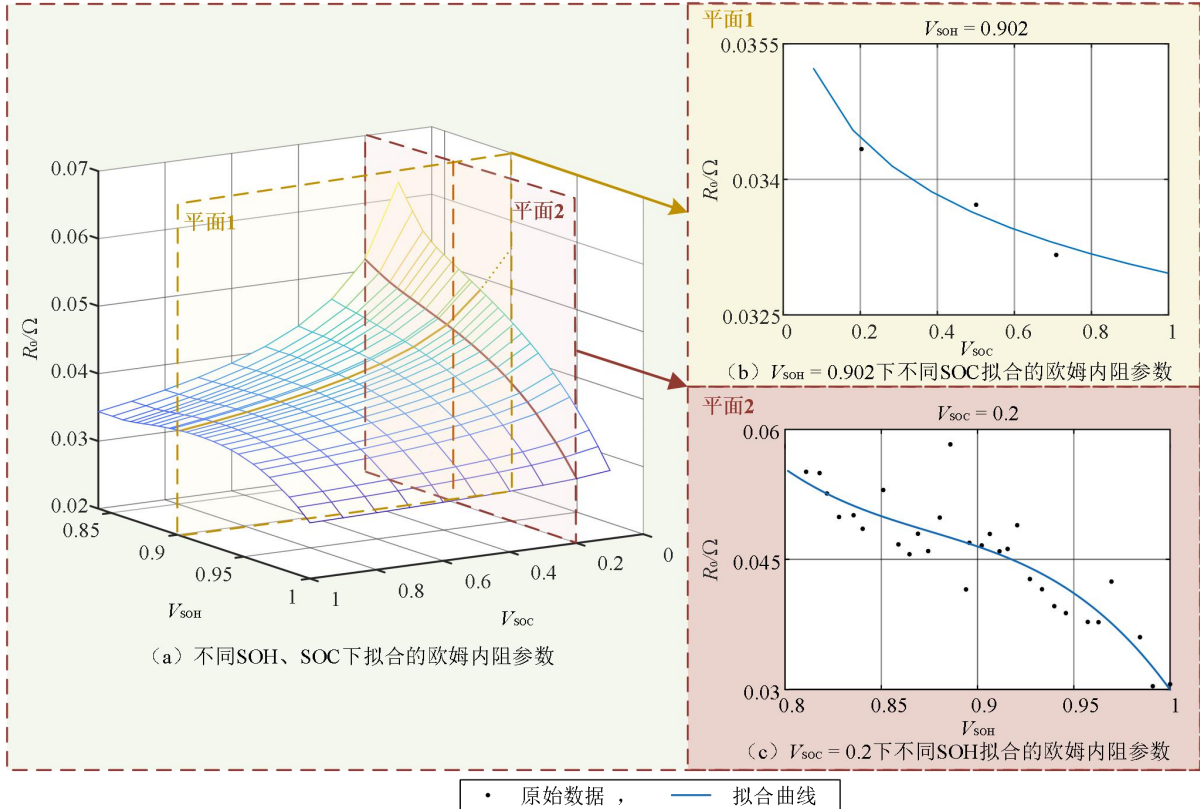


图 A8 不同 SOH、SOC 下拟合的欧姆内阻参数

Fig.A8 Ohmic internal resistance parameters fitted under different values of SOH and SOC

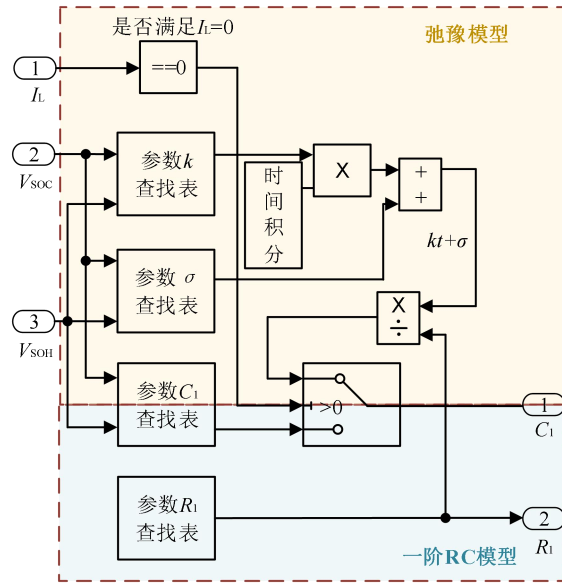


图 A9 Simulink 仿真弛豫模型架构

Fig. A9 Simulation relaxation model framework in Simulink

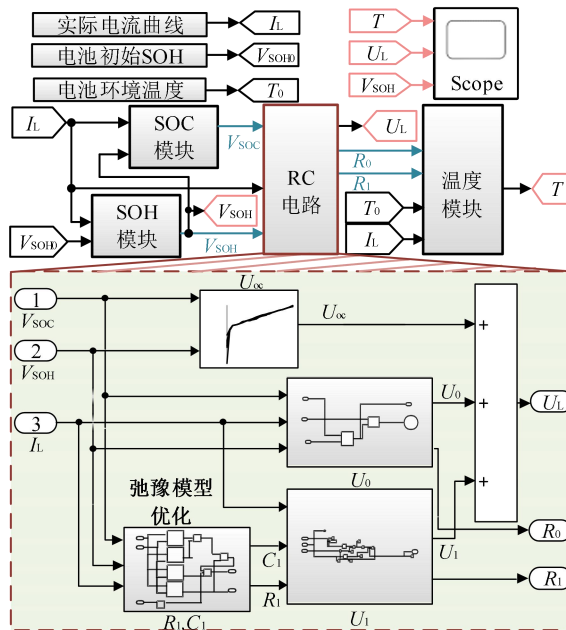


图 A10 Simulink 仿真模型架构

Fig. A10 Simulation model framework in Simulink

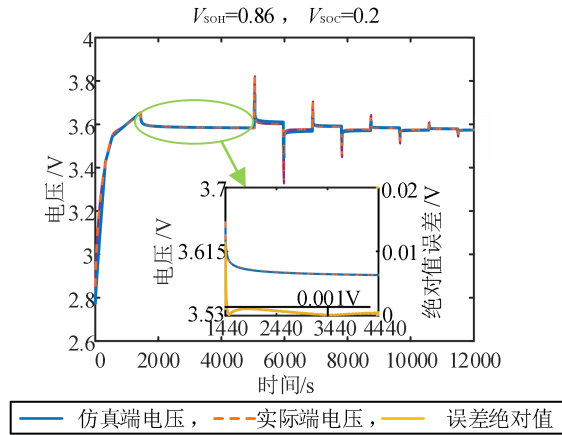


图 A11 $V_{SOH} = 0.86$ 、 $V_{SOC} = 0.2$ 时的电模型电压仿真结果及误差
 Fig.A11 Simulative results and errors of electric model terminal voltage when $V_{SOH} = 0.86$ and $V_{SOC} = 0.2$

表 A2 不同电流大小下的热阻、热容参数
 Table A2 Thermal resistance and heat capacity parameters under different currents

电流/A	热阻/ (K·W ⁻¹)	热容/ (J·K ⁻¹)
-15	6.47	75.07
-12	6.41	70.56
-9	6.69	66.91
-6	7.44	64.96
-3	8.44	62.53
0	10.64	31.68
1.5	15.72	48.64
3	11.24	88.69

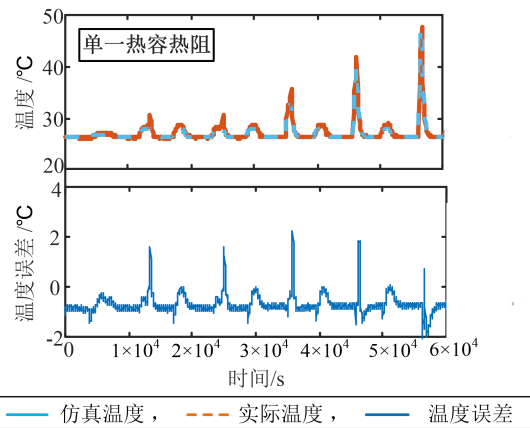


图 A12 $V_{SOH} = 0.82$ 时单一热容热阻法的仿真温度和误差
 Fig.A12 Simulation temperature and error of single heat capacity and thermal resistance method when $V_{SOH} = 0.82$