

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.110

考虑集肤效应和高频额外产热的锂离子电池 等效电化学阻抗热耦合模型

唐国峰¹, 朱广曜¹, 胡明辉¹, 胡嘉敏¹, 金国庆^{1,2}

(1. 重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆长安新能源汽车科技有限公司, 重庆 401135)

摘要: 建立一种合理的等效电化学阻抗-热耦合模型对采用高频交流电(AC)进行电池低温加热过程中的阻抗计算和温度预测具有重要意义。采用NSGA-II算法对7种不同的等效阻抗模型在10~100 000 Hz频率范围进行参数辨识后,通过对比发现在高频部分,与单个电感模块相比,采用一个电阻和电感并联模块能够在不增加计算量的条件下更准确地描述集肤效应对阻抗曲线的影响;在利用依靠电池自身能量进行低温加热的拓扑结构获取了不同频率下的高频额外产热和随温度时变的换热系数后,建立了一种适用于高频AC加热的电池等效电化学阻抗-热耦合模型;在恒定频率加热下验证了模型的准确性,证明了采用随温度时变的换热系数进行温度预测的必要性;在变频加热下验证了模型的实用性,且与现有模型相比,在高频范围内的温度预测最大误差从2.93 °C降为0.35 °C, RMSE仅为0.23 °C。

关键词: 锂离子电池; 电化学阻抗; 高频电流; 温度预测

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)11-051-14

Equivalent electrochemical impedance-thermal coupling model for lithium-ion batteries considering skin effect and high-frequency additional heat

TANG Guofeng¹, ZHU Guangyao¹, HU Minghui¹, HU Jiamin¹, JIN Guoqing^{1,2}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chongqing Chang'an New Energy Vehicles Technology Co., Ltd., Chongqing 401135, P. R. China)

Abstract: Developing an accurate equivalent electrochemical impedance-thermal coupling model is crucial for calculating impedance and estimating temperature during low-temperature heating of batteries using high-frequency alternating current (AC). The NSGA-II algorithm was used to identify parameters for seven equivalent impedance models across a frequency range of 10 Hz to 100 000 Hz. The study found that a model using a resistor and inductor parallel module better accounts for the skin effect at high frequencies without increasing computational complexity compared to a single inductor module. The proposed model, which incorporates time-varying heat transfer coefficients and high-frequency additional heat, was validated under both constant-frequency and variable-frequency conditions. It reduced the maximum temperature prediction error from 2.93 °C to 0.35 °C,

收稿日期: 2023-03-13 网络出版日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52072053)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52072053).

作者简介: 唐国峰(1999—),男,硕士研究生,主要从事电池管理系统研究,(E-mail)17379430076@163.com。

通信作者: 胡明辉,男,教授,博士生导师,(E-mail)minghui_h@163.com。

with an RMSE of only 0.23 °C compared with existing models, proving its practicality and accuracy.

Keywords: lithium-ion batteries; electrochemical impedance; high-frequency current; temperature prediction

低温会导致锂离子动力电池在使用过程中可用容量下降、内阻增大、峰值功率减小^[1],在电池材料未取得革命性进展前,通常采用低温加热方式避免上述问题^[2]。加热方式根据热量来源可以分为外部加热和内部加热^[3],其中内部加热因其可利用电池本身阻抗产热而避免了外部加热时间长、效率低等缺陷受到广泛关注^[4]。自 Vlahino 等^[5]首次阐明交流(alternating current, AC)加热的可行性以来,由于相同情况下,与直流和脉冲加热相比,交流加热不会引起显著的锂离子沉积的荷电状态(state of charge, SOC)变化而被深入研究^[6]。

对于 AC 加热,目前多采用基于电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)计算产热率的方式进行加热过程中电池温度预测^[3],因此,建立合理的模型以准确获取电池在不同状态下的阻抗显得尤为重要。等效电路因其结构简单、方程解明确且便于电池管理系统(battery management system, BMS)的在线使用^[7],被大量学者用于对 EIS 曲线进行拟合并搭建相应的模型。Pauliukaite 等^[8]采用常相位角元件(constant phase-angle element, CPE)对 EIS 曲线非理想半圆特征进行了拟合且效果良好,但 CPE 元件在计算中涉及复杂分数阶运算而难以用于时域分析^[9]。为解决上述问题,Westhoff 等^[10]采用电阻和电容并联(RC)模块进行等效,发现当 RC 个数等于 5 时模型精度较高,满足温度预测需求。Jiang 等^[11]提出一种降阶等效电化学阻抗模型,阻抗实部拟合误差小于 5.5 mΩ; Ruan 等^[12]成功采用该降阶模型进行了温度预测。然而,上述研究频率均小于 5 kHz,电池作为一种储能元件,常与 IGBT (insulate-gate bipolar transistor)和 MOSFET (metal-oxide semiconductor field effect transistor)等高频开关共同使用,因此有必要对更高频率范围(> 10 kHz)的 EIS 曲线进行拟合。此外,随着频率升高,集肤效应对阻抗影响显著。虽然针对高频范围的 EIS 曲线, Ferraz 等^[13]指出采用多个电阻和电感并联(RL)模块拟合效果良好,但未详细说明如何选取 RL 模块个数。

低频 AC 加热下,现有研究根据阻抗实部,采用 Bernadi 生热方程^[14]计算加热时的焦耳热,同时得出低频、高幅值有利于缩短加热时间的结论。与已有结果相反,Shang 等^[15]基于 LC 谐振电路探究了高频 AC 加热参数变化对产热率和加热速率的影响规律,指出到达一定频率后,增加电流频率和幅值均能提高电池产热率,进而缩短加热时间,且频率越高,自加热拓扑结构的体积和成本越低。为进一步探究高频加热下的电池产热特性,Shang 等^[16]基于 Buck-Boost 转换器搭建了可产生频率达 45 kHz 的 AC 加热拓扑,研究发现在高频电流激励下,除焦耳热外,电池还会产生一种额外热量,其与频率和电流大小密切相关。Hu 等^[17]深入研究了这种高频额外热,得出高频额外热不是由可逆热造成的,但对其具体组成未给出准确答案,也未用其进行不同频率加热下的电池温度预测。

综上所述,低温下采用高频 AC 加热能减小拓扑结构体积,降低使用成本,且更高的频率意味着更短的电极反应周期和更少的活性锂损失,进而可以延长电池使用寿命^[18]。然而,针对高频加热下电池模型搭建、考虑集肤效应和额外产热的温度预测研究较少。因此,笔者考虑集肤效应对 EIS 曲线影响,搭建 7 种不同的等效电化学阻抗模型;采用 NSGA-II 算法对不同模型进行参数辨识,通过对比获得了一种在计算量和精度上能够达到平衡的最优模型;标定了随温度时变的换热系数和不同频率下的高频额外产热,提出一种适用于高频 AC 加热下的电池等效电化学阻抗-热耦合模型;在恒频和变频加热模式下,通过对比实验和仿真结果验证了模型的准确性和实用性。

1 实验及基础参数获取

1.1 实验平台与测试对象

实验对象为 NCR1865B 锂离子电池,具体参数如表 1 所示。实验平台如图 1 所示,图中的 PWM 为脉冲宽度调制(pulse width modulation)。在搭建和选择合理的等效电化学阻抗模型并进行温度预测之前,需要获取包括电池可用容量 Q 、开路电压 V_{oc} 、电化学阻抗在内的基础参数。

表 1 NCR1865B 电池主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of NCR1865B battery

标称容量/(mA·h)	质量/kg	表面积/m ²	充电截止电压/V	放电截止电压/V
3 400	0.048 5	0.004 18	4.2	2.5

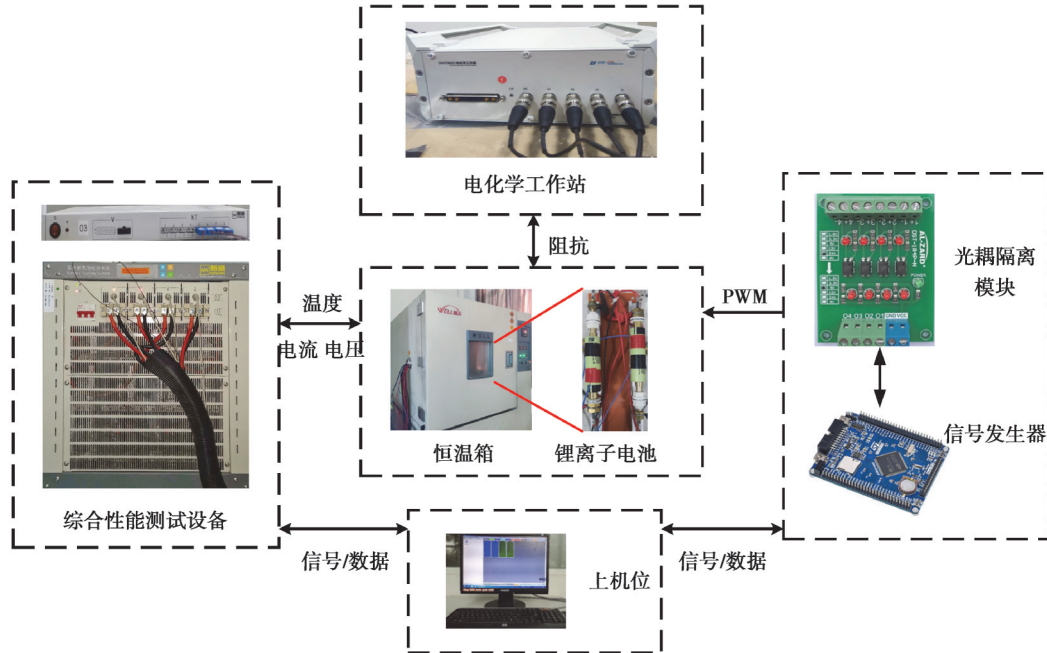


图 1 电池测试平台

Fig. 1 Battery test platform

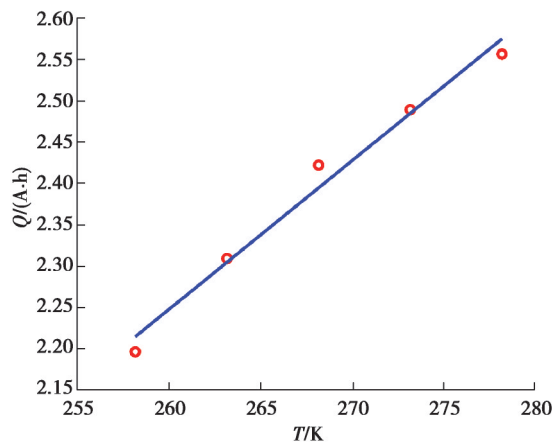
1.2 电池基础参数获取

1.2.1 电池可用容量和开路电压确定

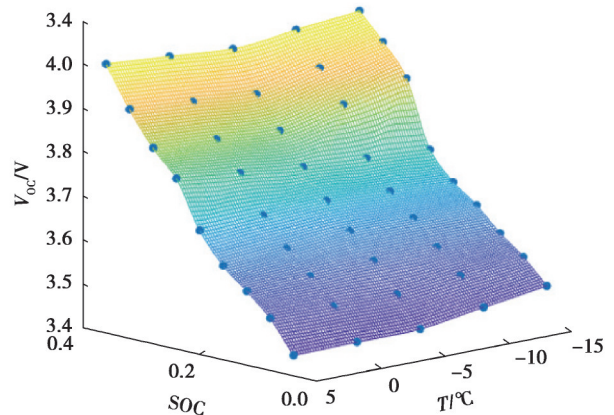
电池可用容量通过静态容量测试获取。分别在-15、-10、-5、0、5 °C下进行3次充放电测试,将每个温度下的平均容量作为对应可用容量,结果如图 2(a)所示,采用公式(1)^[19]对可用容量进行拟合:

$$Q = a \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) + c. \quad (1)$$

式中: T 为温度; a 、 b 、 c 为拟合参数, $a = 19\ 770$, $b = 598.4$, $c = 267.5$ 。 $R^2=0.989\ 6$,说明拟合效果良好。



(a) 可用容量随温度变化曲线



(b) SOC-温度-开路电压(V_{oc})曲面

图 2 可用容量和开路电压测试结果

Fig. 2 Test results of available capacity and open circuit voltage

电池开路电压用双脉冲实验测试获取,结果如图2(b)所示。可知开路电压随SOC减小而降低,温度对开路电压影响较小,以SOC=0.4为例:当温度从5℃降为-15℃时,开路电压仅从3.615V变化为3.636V。

1.2.2 电池阻抗确定

当SOC=0.2,0.4,0.6,0.8时,在-5~0℃区间,每隔2.5℃进行EIS测试。测试条件如下:5mV恒电位法激励、频率 f 范围0.1~100000Hz、采样频率为每十倍频采样30次。

图3为不同温度下SOC=0.4的电池EIS曲线,可以看出相同频率下随温度降低阻抗幅值不断增大。从右下角-5℃下的EIS曲线可知,当频率大于2.5kHz时,曲线位于负半平面,随着频率降低阻抗幅值整体呈增加趋势;当频率为2.5~10.0kHz时,曲线为一条垂直于阻抗实轴的直线,仅有虚部 Z_{im} 发生变化;当频率大于10.0kHz时,随着频率增大,集肤效应导致实部 Z_{re} 逐渐增加,曲线也逐渐偏离原直线。因此,在分析大于10.0kHz下的电池高频特性时不能忽略集肤效应的影响。

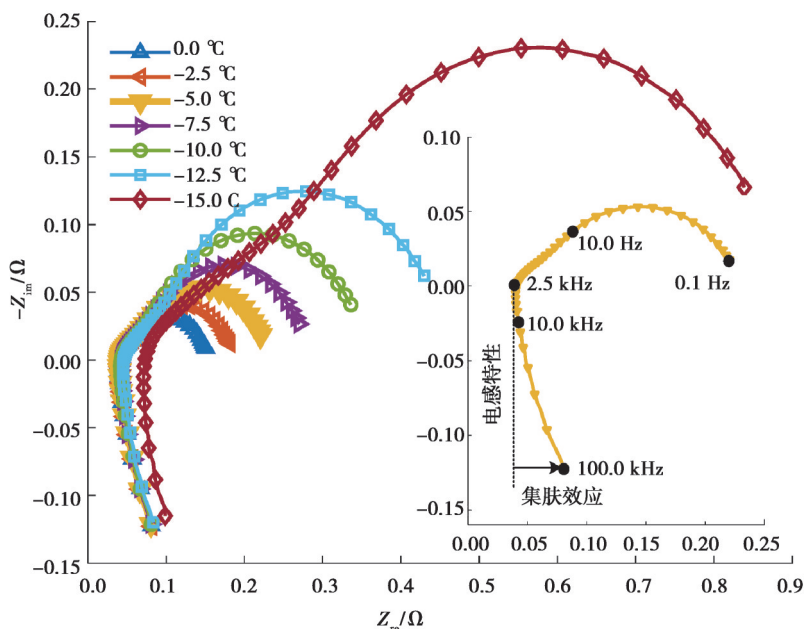


图3 SOC=0.4,不同温度下电池EIS曲线

Fig. 3 Battery EIS curves for SOC=0.4 at different temperatures

2 等效电学阻抗-热耦合模型搭建

2.1 等效电学阻抗模型对比分析

采用等效电路形式拟合EIS变化规律^[10]:RC模块在复平面上是一个以 $(R/2,0)$ 为圆心(这里的 R 为RC模块的电阻值)、位于第二象限的半圆弧,所以通常用其描述 $Z_{im}<0$ 区间的EIS曲线;类似地,RL模块可用于描述 $Z_{im}>0$ 区间的EIS曲线。一般而言,RC和RL个数越多,模型精度越高,但计算量也会随之增加。考虑到本文探究频率范围在10~100000Hz,且根据图3可知,在 $Z_{im}<0$ 且 $f>10$ Hz范围,EIS曲线所在圆弧半径变化并不明显。因此为避免计算量过大,最多采用2个RC模块对该频率区间阻抗进行拟合^[10]。

搭建的7种等效电学阻抗模型如图4所示,其中模型b被用于文献[20]的电池低温加热探究。图中的 L_1 、 L_2 和 L_3 分别为3个RL模块的等效电感; R_{L1} 、 R_{L2} 和 R_{L3} 分别为3个RL模块的等效电感电阻; C_1 和 C_2 分别为2个RC模块的等效电容; R_{C1} 和 R_{C2} 分别为2个RC模块的等效电容电阻; R_0 为欧姆内阻。

以模型d为例,阻抗实部、虚部和总阻抗分别用式(2)~(4)描述:

$$Z_{re} = \frac{(2\pi f)^2 R_{L1} L_1^2}{R_{L1}^2 + (2\pi f L_1)^2} + R_0 + \frac{R_1}{1 + (2\pi f R_1 C_1)^2} + \frac{R_2}{1 + (2\pi f R_2 C_2)^2}, \quad (2)$$

$$Z_{im} = \frac{(2\pi f)^2 R_{L1}^2 L_1}{R_{L1}^2 + (2\pi f L_1)^2} - \frac{2\pi f R_1^2 C_1}{1 + (2\pi f R_1 C_1)^2} - \frac{2\pi f R_2^2 C_2}{1 + (2\pi f R_2 C_2)^2}, \quad (3)$$

$$Z = Z_{re} + jZ_{im} = \frac{j2\pi f R_{L1} L_1}{R_{L1} + j2\pi f L_1} + R_0 + \frac{R_1}{1 + j2\pi f R_1 C_1} + \frac{R_2}{1 + j2\pi f R_2 C_2}. \quad (4)$$

式中, R_1 和 R_2 为等效电阻。

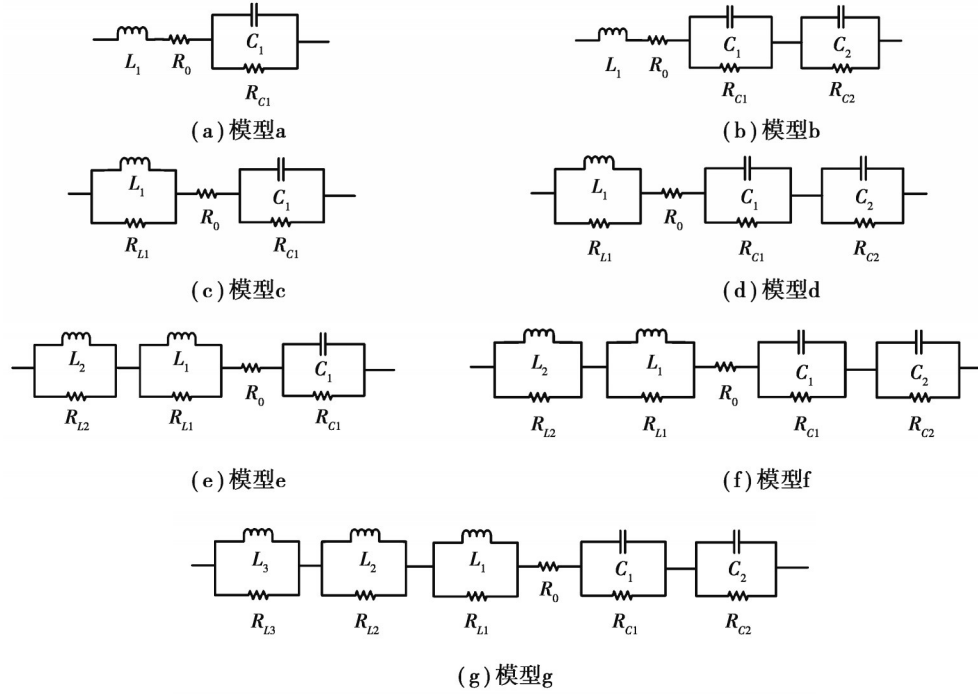


图 4 不同等效电化学阻抗模型

Fig. 4 Different equivalent electrochemical impedance models

模型的参数辨识过程可以看成是一个多目标优化问题:优化对象为 Z_{re} 和 Z_{im} , 优化参数为 L_1 、 R_{L1} 、 R_0 、 C_1 、 C_2 、 R_{C1} 和 R_{C2} 。针对类似问题,由于带有精英策略的非劣分级排序的遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)具有更快的收敛速度和更强的鲁棒性,以及能够更好地接近真正的帕累托最优前沿而被广泛采用^[21]。在本文中,算法适应度函数为优化对象平均绝对误差(mean absolute error, MAE)的最小值,用式(5)表示:

$$\begin{cases} j_1 = \min \left[\frac{\sum_{i=1}^l |Z_{re}(i) - Z_{res}(i)|}{l} \right], \\ j_2 = \min \left[\frac{\sum_{i=1}^l |Z_{im}(i) - Z_{ims}(i)|}{l} \right]. \end{cases} \quad (5)$$

式中: j_1 和 j_2 为 NSGA-II 算法的适应度函数; l 为样点数; Z_{res} 和 Z_{ims} 分别为拟合的阻抗实部和虚部。

由于 RL 或 RC 模块越多,模型精度也越高,因此,在进行具体精度差异对比时,只需保证初始条件相同,不同模型间的精度关系并不会发生变化。为了减小工作量,本研究中以 SOC=0.4、 $T=-5^\circ\text{C}$ 为例进行深入分析。表 2 中列出了经过参数辨识后不同模型阻抗的 MAE 和均方根误差(root mean square error, RMSE)。表中最后一列给出了在 Simulink 中,当施加频率 10 kHz、占空比 5% 的 PWM 电压信号时,模拟 100 s 的真实仿真用时,用于对比各模型的计算量。

表2 不同模型在SOC=0.4、 $T=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下精度及计算量

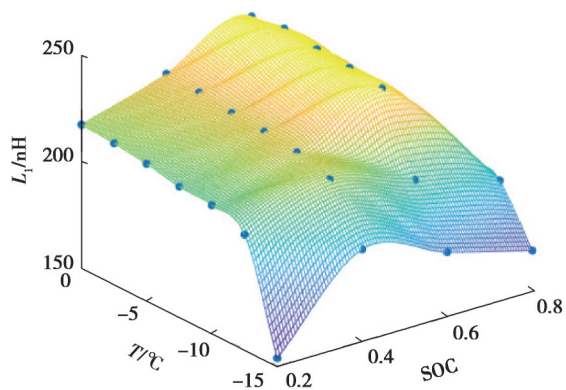
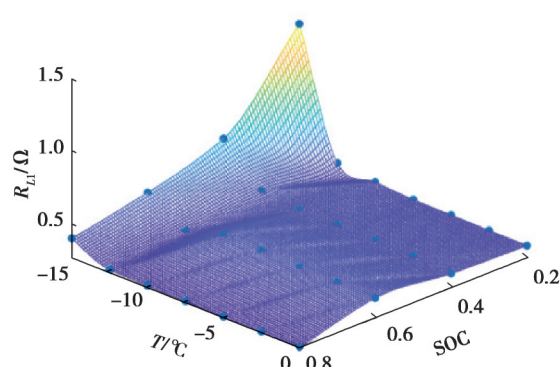
模型	Z_{rc}		Z_{im}		仿真时间/s
	MAE/m Ω	RMSE/m Ω	MAE/m Ω	RMSE/m Ω	
a	5.55	8.07	3.88	5.88	40.92
b	3.65	7.67	1.56	2.68	41.72
c	3.52	4.28	3.59	5.83	35.90
d	1.31	1.80	1.05	1.24	37.11
e	3.51	4.27	3.55	5.82	67.82
f	1.22	1.69	1.03	1.25	69.18
g	1.19	1.66	0.99	1.22	58.80

从表2中可以看出,模型复杂程度增加并不意味着仿真时间更长:以模型f和g为例,虽然模型g多一个RL模块,但是仿真时间仅为模型f的85%,文献[22]中也得到了类似结论,这可能是由于Simulink内部算法差异造成的。由于产生这种差异的原因不在本文研究范围内,因此不进行深入分析。对比模型c和d:虽然模型d的仿真时间比模型c增加3.37%,但是精度提升显著, Z_{rc} 的RMSE值降为原来的42.06%。对比模型b和d:将L变为RL模块后,模型d的 Z_{rc} 的RMSE为模型b的23.47%,仿真时间降为原来的88.95%。对比模型c和e:在增加一个RL模块后,不仅精度没有显著变化,仿真时间还增加到原来的188.91%。最后,与模型d相比,模型f和g的精度有所提升,但仿真时间明显增加。

综上所述:在10~100 000 Hz范围,对于 $Z_{im}<0$ 的EIS部分,相比于1个RC模块,采用2个RC模块时模型精度得到显著提升,且几乎不影响计算量;对于 $Z_{im}>0$ 的EIS部分,采用单个电感元件无法准确描述集肤效应的影响,采用1个RL模块的精度较高,再增加RL模块个数不仅不能明显提升精度,还会极大增加计算量。因此,模型d为最优模型,能够在精度和计算量之间实现较好平衡。对于不同种类的动力电池,也可以通过上述方式进行对比分析,确定最优模型的RC和RL模块个数。

2.2 最优等效电化学阻抗模型参数辨识与精度验证

图5给出最优模型d在不同SOC和温度下参数辨识的结果。可以看出在不同SOC下, L_1 随温度降低而不断减小;所有电阻元件的电阻值均随温度降低而不断增大,且温度越低增幅越明显;需要注意的是, R_{L1} 在所有温度和SOC下均大于其余电阻值,说明当电池在受到高频电流激励时,集肤效应引起的阻抗将占主导地位;电容元件的电容值主要受到温度影响,但其变化规律恰好和电阻相反。最后,通过表3和表4可知模型在不同温度和SOC下精度均较高。

(a) L_1 计算结果(b) R_{L1} 计算结果

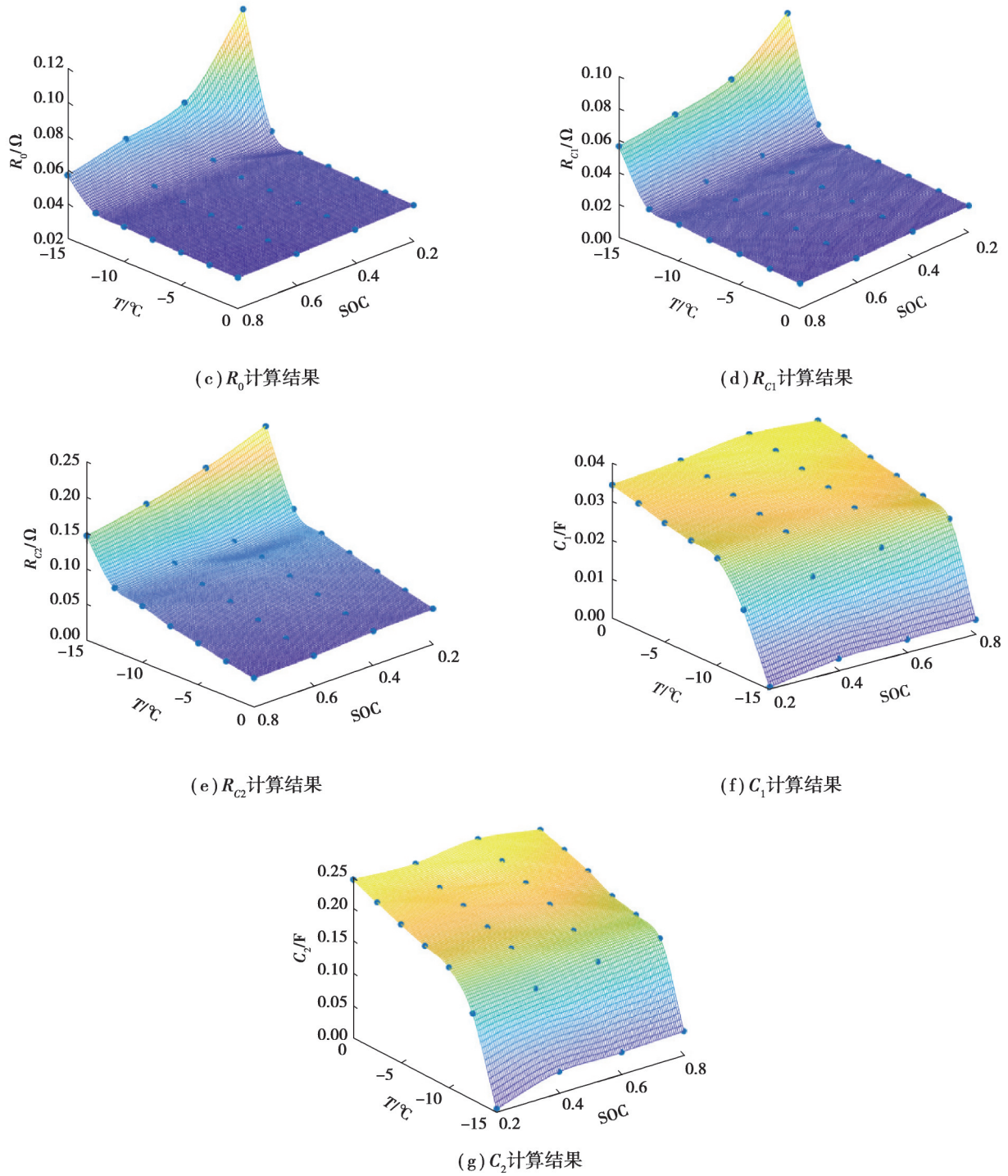


图 5 最优等效电化学阻抗模型参数辨识结果

Fig. 5 Optimal equivalent electrochemical impedance model parameter identification results

表 3 $T=-5\text{ }^\circ\text{C}$,不同 SOC 下最优等效电化学阻抗模型精度验证

Table 3 Verification of the accuracy of the optimal equivalent electrochemical impedance model under different SOC at $-5\text{ }^\circ\text{C}$

SOC	MAE/mΩ		RMSE/mΩ	
	Z_{re}	Z_{im}	Z_{re}	Z_{im}
0.2	1.31	1.08	1.82	1.27
0.4	1.31	1.05	1.81	1.24
0.6	1.39	1.06	1.90	1.28
0.8	1.37	1.09	1.86	1.37

表4 SOC=0.4,不同温度下最优等效电化学阻抗模型精度验证

Table 4 Verification of the accuracy of the optimal equivalent electrochemical impedance model for SOC=0.4 under different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	MAE/ $\text{m}\Omega$		RMSE/ $\text{m}\Omega$	
	Z_{re}	Z_{im}	Z_{re}	Z_{im}
-15	6.59	6.24	9.36	9.99
-10	1.57	1.22	2.22	1.45
-5	1.31	1.05	1.81	1.24
0	1.16	0.94	1.57	1.12

2.3 热模型与参数辨识

电池充放电时的产热和换热过程基于导热微分方程可描述为^[20]

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = q - hS(T - T_{\text{amb}}) \quad (6)$$

式中: ρ 、 c 、 V 、 h 和 S 分别为电池的密度、比热容、体积、换热系数和表面积; T_{amb} 为环境温度; q 为电池产热率; T 为电池温度; t 为时间; $hS(T - T_{\text{amb}})$ 为电池通过热对流传递给环境的热量。根据文献[23]研究结果,电池比热容取值为 $1\,145\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

q 通常由不可逆热和可逆热两部分组成^[6]:

$$q = I_{\text{B(RMS)}}^2 Z_{\text{re}} + iT \frac{dV_{\text{oc}}}{dT} \quad (7)$$

式中: $I_{\text{B(RMS)}}$ 为通过电池电流的有效值; i 为电流的瞬时值; $I_{\text{B(RMS)}}^2 Z_{\text{re}}$ 为不可逆焦耳热; dV_{oc}/dT 为温熵系数^[24],根据文献[25]研究结果,其值很小可忽略。

实际上,在高频电流激励下电池还会产生额外热量 Q_{h} ,如何确定 Q_{h} 将在3.1节给出。因此,式(7)转变为

$$q = I_{\text{B(RMS)}}^2 Z_{\text{re}} + Q_{\text{h}} \quad (8)$$

根据静置过程中电池表面温度变化情况确定 h ,当电池为静置状态时, $q=0$,式(6)转变为

$$h = \frac{\rho c V \frac{dT}{dt}}{S(T_{\text{amb}} - T)} \quad (9)$$

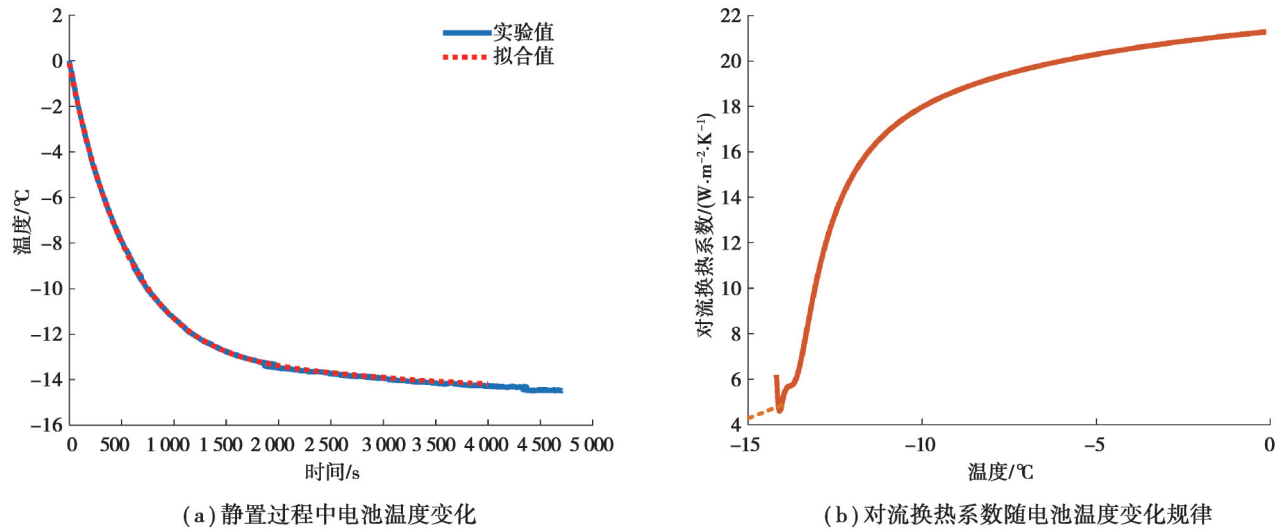
因此,本研究中,在 $T_{\text{amb}}=-15\text{ }^\circ\text{C}$ 下,采用K型热电偶获取了电池加热至 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 后静置过程中的温度变化曲线,如图6(a)中蓝色实线所示。采用高次多项式进行拟合:

$$T = at^8 + bt^7 + ct^6 + dt^5 + et^4 + ft^3 + gt^2 + mt + n \quad (10)$$

拟合结果为: $a=2.254\times 10^{-27}$, $b=-4.571\times 10^{-23}$, $c=2.923\times 10^{-19}$, $d=-1.893\times 10^{-15}$, $e=5.856\times 10^{-12}$, $f=-1.28\times 10^{-8}$, $g=2.08\times 10^{-5}$, $m=-0.023\,5$, $n=-0.119\,6$ 。 $R^2=0.999$,说明曲线拟合效果良好,能够准确描述电池静置过程中温度变化规律。对式(10)求导得

$$\frac{dT}{dt} = 8at^7 + 7bt^6 + 6ct^5 + 5dt^4 + 4et^3 + 3ft^2 + 2gt + m \quad (11)$$

结合式(9)和式(11)得到在加热过程中电池的对流换热系数变化规律,如图6(b)所示。可以看出其整体随电池和环境间温差的增大而逐渐增加;需要注意的是,在接近 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 时,换热系数出现回升,这和实际情况不符,因此,在这一温度区间通过合理估计,采用图中虚线对应换热系数进行计算,在第3.2节将证明这样计算的合理性。平均对流换热系数通过将静置过程中电池相关参数代入式(6),求出瞬态热平衡方程的通解,再采用通解拟合图6(a)中的曲线获取,具体计算方法参考文献[18],结果为 $15.94\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。



(a) 静置过程中电池温度变化

(b) 对流换热系数随电池温度变化规律

图 6 静置过程中电池温度变化及对流换热系数标定结果

Fig. 6 Battery temperature variation during the resting stage and convective heat transfer coefficient

2.4 等效电化学阻抗-热耦合模型

将得到的等效电化学阻抗模型与热模型进行耦合得到适用于高频 AC 加热下的电池等效电化学阻抗-热耦合模型,如图 7 所示。电模型根据输入的频率、SOC 和温度计算 Z_{re} 和 $I_{B(RMS)}$,将计算值返回给热模型计算产热并更新当前时刻的温度值;热模型输出的温度同样会对电模型中的参数产生影响,还将影响热模型中换热系数的取值。

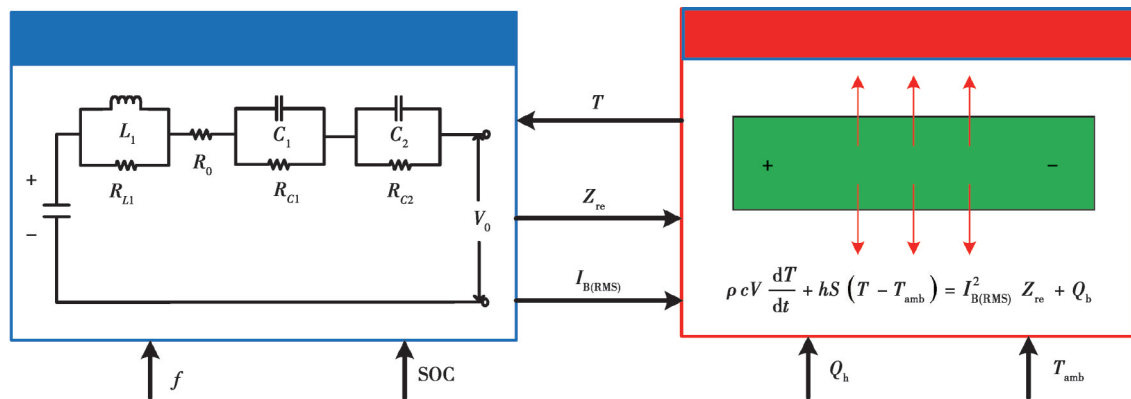


图 7 等效电化学阻抗-热耦合模型

Fig. 7 Equivalent electrochemical impedance-thermal coupling model

3 等效电化学阻抗-热耦合模型精度验证

3.1 高频额外产热标定

根据文献[26]搭建了图 8 所示的全周期加热拓扑:该结构分为上下 2 部分,均由电池和 MOSFET 组成,中间通过电感相互连接。在该结构中定义电池放电电流为正方向,因此,在一个完整的加热周期下,拓扑结构可采用 2 对互补的 PWM 信号(忽略死区)分别驱动 $M_1(M_4)$ 和 $M_2(M_3)$,产生 4 种不同的工作状态。一个 PWM 信号周期 T_m 内电流方向如图中红色箭头所示:很明显,2 个电池(B1 和 B2)的电流波形完全一致,且通过电池的电流频率 f_B 为 PWM 信号频率 f_m 的 2 倍,对应地,周期 $T_B=0.5T_m$ 。

为了与模型理论电感进行区分,真实电感元件用“ L_r ”表示。根据基尔霍夫电流定律(Kirchhoff’s Current Law, KCL),在 $0 \sim T_B$ 内通过电池的电流为

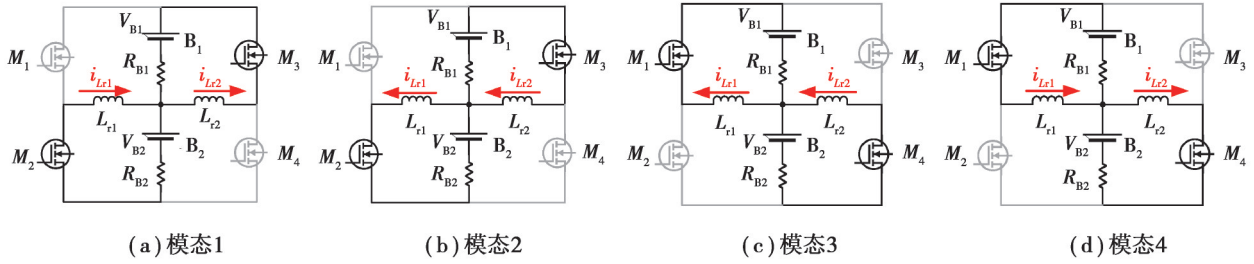


图8 自加热拓扑及对应的不同模态

Fig. 8 Self-heating topology and related different modalities

$$i_B(t) = \frac{V_{oc}}{R_{eq}} \left(1 - \frac{2}{1 + e^{\frac{R_{eq}t}{2L_r f_m}}} e^{-\frac{R_{eq}t}{L_r}} \right) \quad (12)$$

式中, R_{eq} 为一个回路的电阻值之和, Ω 。 R_{eq} 可表示为

$$R_{eq} = R_{Lr} + R_{wire} + R_{mos(on)} + R_B \quad (13)$$

式中: R_{Lr} 为电感电阻; R_{wire} 为导线电阻和接触电阻之和; $R_{mos(on)}$ 为 MOSFET 的导通电阻; R_B 为电池总内阻。

通过式(12)得到在 $0 \sim T_B$ 内通过电池的有效电流

$$I_{B(RMS)} = \frac{V_{oc}}{R_{eq}} \sqrt{1 - \frac{4L_r f_m}{R_{eq}} \left(\frac{2}{e^{\frac{R_{eq}}{2L_r f_m}} + 1} - 1 \right)} \quad (14)$$

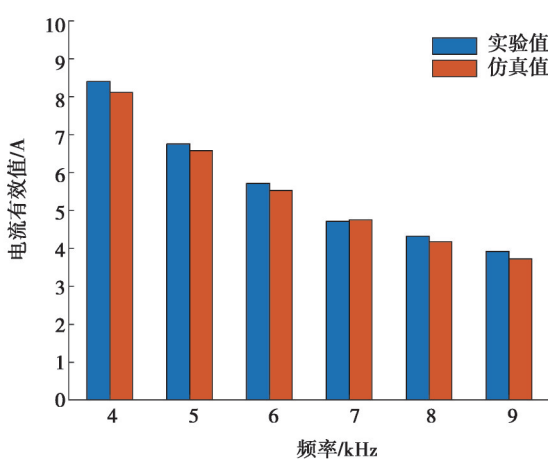
通过上述分析可知:这种结构不仅能实现全周期电池低温加热,还可以通过仅控制 f_m 达到改变 f_B 和 $I_{B(RMS)}$ 的目的;此外,由于电池在一个周期内同时经历充放电过程,因此可以实现能量平衡。后续实验中将选取 $15 \mu\text{H}$ 和 $500 \mu\text{H}$ 的电感分别用于产生高频和低频电流。

为了获取高频加热下的 Q_h , 将 T_{amb} 设定为 -15°C , f_m 在 $4 \sim 9 \text{ kHz}$ 频率范围内,每隔 1 kHz 进行电池低温加热,当热电偶采集到的温度大于 0°C 或加热时间超过 1800 s 时停止加热。实验和仿真结果如图9所示。图9(a)为不同频率下的电流有效值,可知仿真和实验结果最大误差在5%以内,说明模型参数设置合理;然而根据图9(b)中的温度变化曲线可以看出仿真温升速率明显低于实际值,说明在高频电流加热下 Q_h 对电池温度的影响不能忽略。

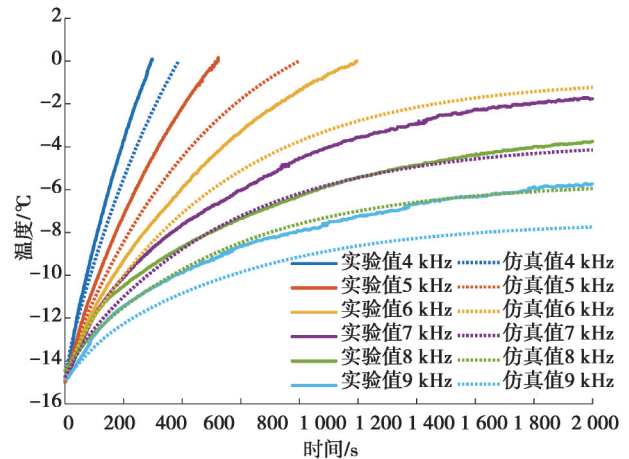
结合式(6)和式(8),得到加热过程中 Q_h 的标定式

$$Q_h = \rho c V \frac{dT}{dt} + hS(T - T_{amb}) - I_{B(RMS)}^2 Z_{rc} \quad (15)$$

Q_h 和修正后的仿真加热曲线分别如图9(c)和(d)所示,可知 Q_h 随着 f_m 增加逐渐减小,修正后的仿真温升曲线与实际值吻合。



(a) 电流有效值



(b) 修正前加热结果

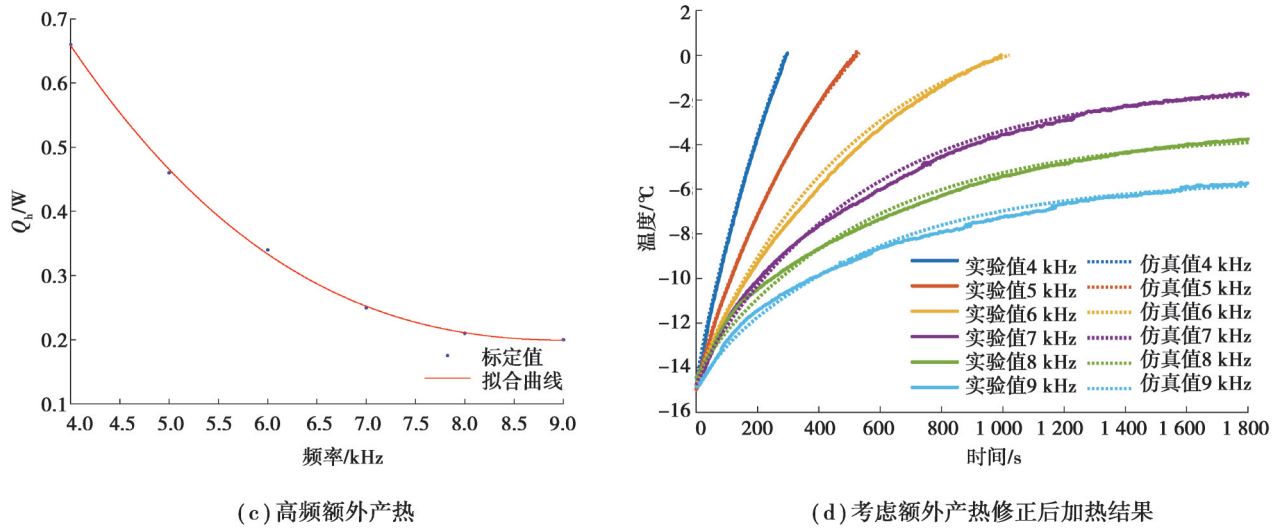


图 9 高频额外产热标定相关结果

Fig. 9 High frequency additional heat generation calibration results

3.2 恒定频率精度验证

模型精度验证均在 SOC=0.4、 $T_{amb}=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行。为了探究在低频加热时 Q_h 是否会对电池温度产生影响,同时验证 3.1 节获取 Q_h 的通用性,采用图 10 中的频率对电池加热,仿真时采用随温度时变对流换热系数 h 。低频下结果如图 10(a) 所示,仿真和实验值吻合,最大 MAE 和 RMSE 分别为 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明采用低频电流对电池加热时可不考虑 Q_h 的影响,也证明了 2.3 节获取的 h 的准确性;高频下结果如图 10(b) 所示,最大误差出现在 6.5 kHz 时,这可能是由于中间频率下的 Q_h 通过插值获取,与实际值之间存在误差造成的,对应的 MAE 和 RMSE 分别为 $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.81\text{ }^{\circ}\text{C}$,仍然在可接受范围。需要注意的是,仿真过程中模型的 SOC 为定值,即为电池初始 SOC,根据图 10 结果可知仿真结果和实验值接近,因此,可以推测加热过程中电池能量损耗较小,加热前后电池 SOC 不会发生显著变化。

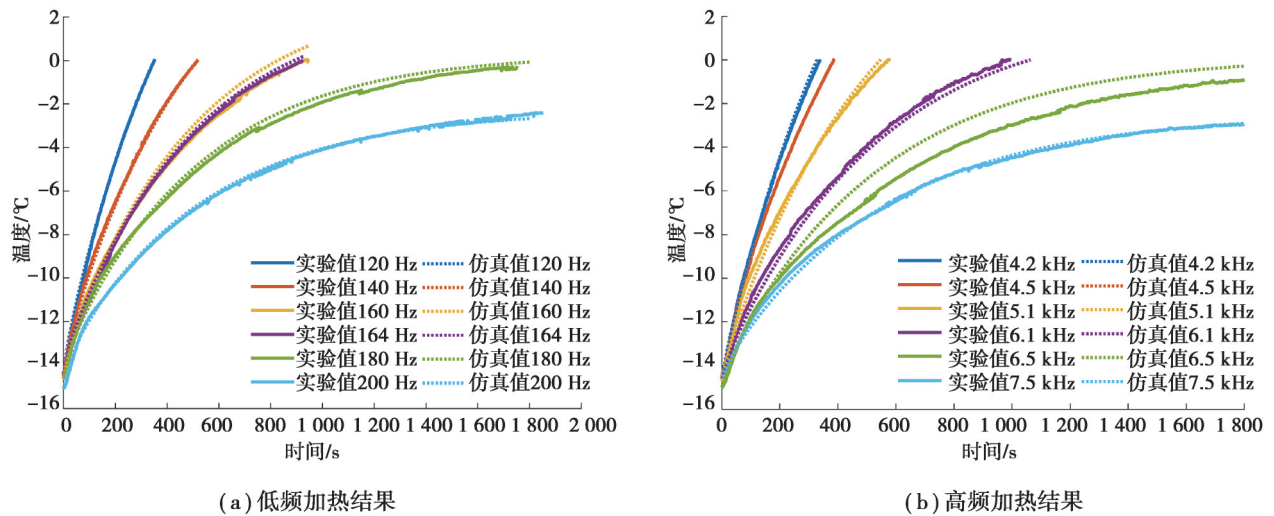


图 10 不同恒定频率加热结果

Fig. 10 Heating results under different constant frequencies

以 200 Hz 和 7.5 kHz 为例,对比采用随温度时变换热系数 h 和恒定换热系数 \tilde{h} 对仿真结果的影响,最终结果及仿真误差分别如图 11(a) 和 (b) 所示。初始阶段,由于加热初期存在热迟滞现象导致电池表面温度低于核心温度,仿真值略大于实验值; 200 Hz 下,采用 \tilde{h} 进行仿真得到结果(仿真值 2)的误差随着加热进行不断增大,最大接近 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而采用 h 仿真结果(仿真值 1)可以很好地跟随真实值,对应 MAE 和 RMSE 分别为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大误差不超过 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}$; 7.5 kHz 下的结果与 200 Hz 下类似。上述结果说明在进行低温加热时,仅采用恒定的对流换热系数难以准确描述电池温度变化趋势。

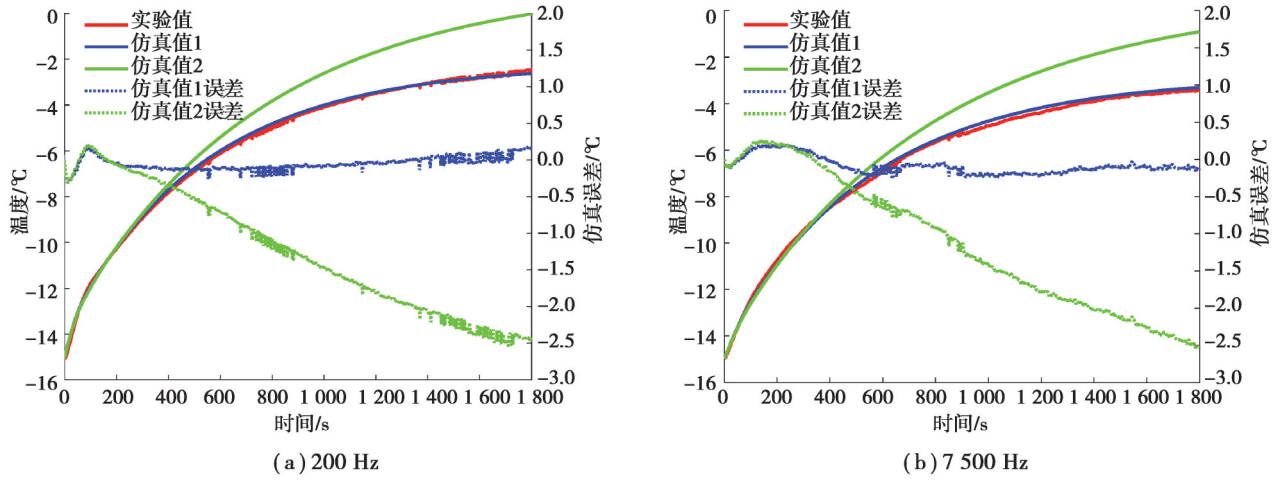


图 11 不同频率下, 实验和采用不同换热系数仿真的电池温升曲线

Fig. 11 Experimental and simulated battery temperature curves at different frequencies with different heat transfer coefficients

3.3 变频精度验证

在进行电池低温加热时可能由于工况要求需要改变 PWM 信号频率大小^[12], 因此有必要探究变频加热下模型精度以验证其实用性。为更好地体现变频过程, 根据阻抗随温度变化规律制定了如图 12(a) 和 (b) 所示每隔 1 °C 变化频率用于验证, 且与采用文献[20]的现有模型进行仿真得到的结果进行对比, 为方便描述, 将本研究中的模型称为“模型 1”, 文献[20]的模型称为“模型 2”。

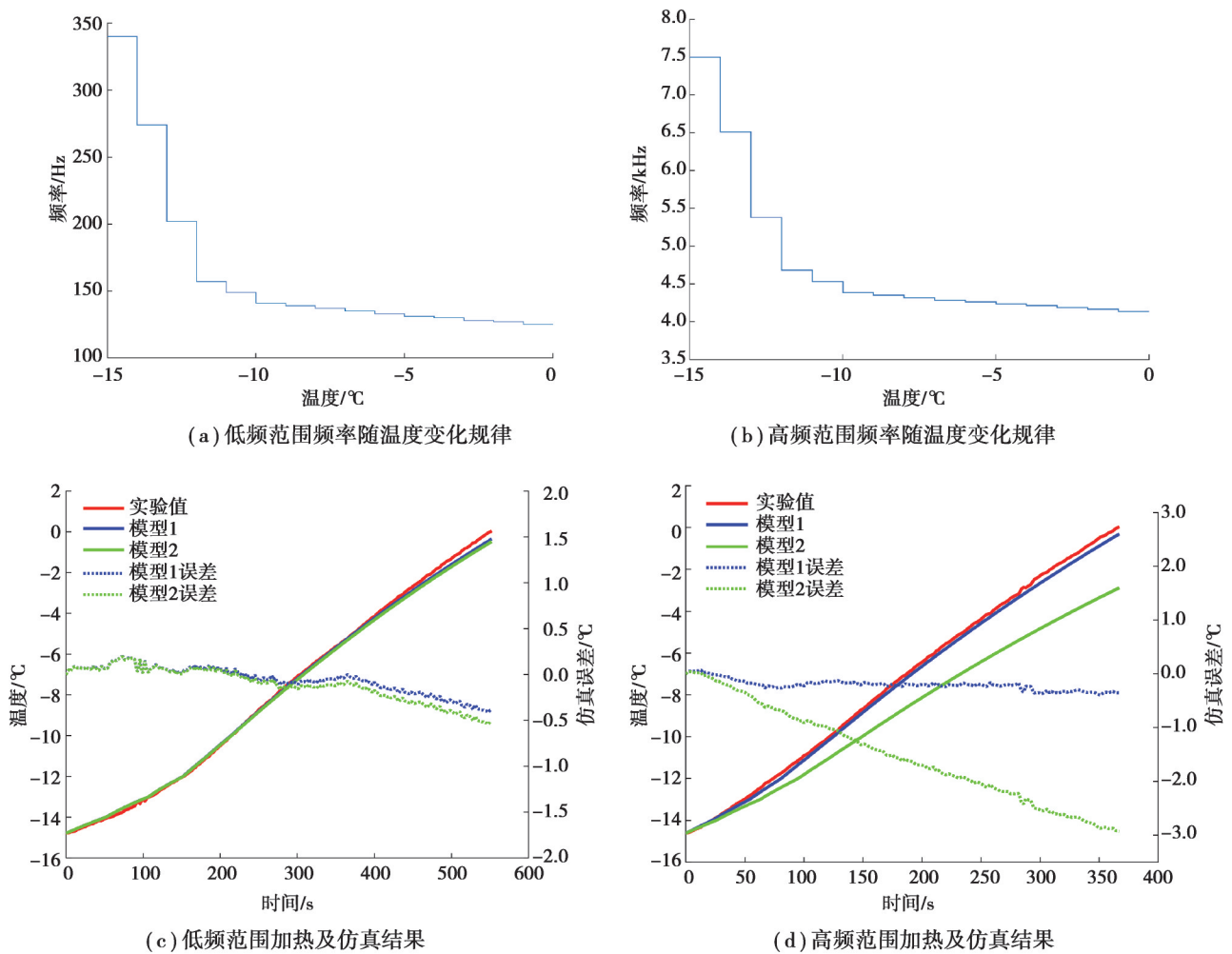


图 12 不同频率范围内的频率变化规律和对应加热结果

Fig. 12 Frequency variation laws in different frequency ranges and corresponding heating results

低频范围下的结果如图 12(c)所示。可以看出两模型均能够准确描述电池温升,模型 1 误差略小于模型 2,但差别并不明显。高频范围下的结果如图 12(d)所示:随着加热进行,模型 2 结果逐渐偏离真实值,最大误差达到 2.93 °C,而模型 1 的最大误差仅为 0.35 °C, RMSE 为 0.23 °C。上述结果说明在低频范围,现有不考虑集肤效应和高温额外产热的模型能够较好预测电池温升,然而在高频下误差较大,而本研究中提出的模型在高低频范围精度均较高。

4 结 论

根据所选研究对象的实验和仿真结果得出以下结论:

1)利用等效电化学阻抗模型拟合电池阻抗时,在 10~100 000 Hz 范围内,采用一阶 RL 模块能够准确描述高频电流导致的集肤效应对 EIS 曲线影响,与仅包含单个电感元件的模型相比,阻抗实部和虚部 RMSE 分别减少 76.54% 和 53.73%,且仿真时间降为原来的 88.95%。

2)在加热过程中,对流换热系数随电池和环境温差增大而增加,为了实现温度准确预测,需要考虑这种时变性对电池温升的影响。

3)在电池受到高频电流激励下集肤效应和高温额外产热会对电池的产热率和温升速率造成影响,但在低频电流激励下可以忽略二者的影响。

4)对于电池受到高频电流激励下产生的额外热,无需了解其内在产热机理,本研究中提出的等效电化学阻抗-热耦合模型可用于恒定频率和变频加热时的电池温度预测,与现有模型相比,高频范围内的温度预测最大误差从 2.93 °C 降为 0.35 °C,且 RMSE 仅为 0.23 °C。

后续研究将深入分析引起高温额外产热的内在机理,并探究不同 SOC 及电池种类对额外产热和最优等效电化学阻抗模型中 RC 和 RL 模块个数的影响规律。

参考文献

- [1] Jaguemont J, Boulon L, Dubé Y. A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 99-114.
- [2] Tang G F, Hu M H, Chen L G, et al. A variable-frequency self-heating strategy for lithium-ion batteries based on an electrochemical impedance-thermal coupling model applicable to a wide frequency range[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106293.
- [3] Wu S J, Xiong R, Li H L, et al. The state of the art on preheating lithium-ion batteries in cold weather[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 27: 101059.
- [4] Ji Y, Wang C Y. Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 107: 664-674.
- [5] Vlahinos A, Pesaran A A. Energy efficient battery heating in cold climates[J]. *SAE Transactions*, 2002, 111: 826-833.
- [6] Jiang J C, Ruan H J, Sun B X, et al. A low-temperature internal heating strategy without lifetime reduction for large-size automotive lithium-ion battery pack[J]. *Applied Energy*, 2018, 230: 257-266.
- [7] Beelen H, Mundaragi Shivakumar K, Raijmakers L, et al. Towards impedance-based temperature estimation for Li-ion battery packs[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(4): 2889-2908.
- [8] Pauliukaite R, Ghica M E, Fatibello-Filho O, et al. Electrochemical impedance studies of chitosan-modified electrodes for application in electrochemical sensors and biosensors[J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(21): 6239-6247.
- [9] Schmidt J P, Chrobak T, Ender M, et al. Studies on LiFePO₄ as cathode material using impedance spectroscopy[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(12): 5342-5348.
- [10] Westerhoff U, Kurbach K, Lienesch F, et al. Analysis of lithium-ion battery models based on electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Energy Technology*, 2016, 4(12): 1620-1630.
- [11] Jiang J C, Ruan H J, Sun B X, et al. A reduced low-temperature electro-thermal coupled model for lithium-ion batteries[J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 804-816.
- [12] Ruan H J, Jiang J C, Sun B X, et al. A rapid low-temperature internal heating strategy with optimal frequency based on constant polarization voltage for lithium-ion batteries[J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 771-782.

- [13] Ferraz P K P, Schmidt R, Kober D, et al. A high frequency model for predicting the behavior of lithium-ion batteries connected to fast switching power electronics [J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 18: 40-49.
- [14] Zhang J B, Ge H, Li Z, et al. Internal heating of lithium-ion batteries using alternating current based on the heat generation model in frequency domain[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 273: 1030-1037.
- [15] Shang Y L, Liu K L, Cui N X, et al. A sine-wave heating circuit for automotive battery self-heating at subzero temperatures[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(5): 3355-3365.
- [16] Shang Y L, Zhu C, Lu G P, et al. Modeling and analysis of high-frequency alternating-current heating for lithium-ion batteries under low-temperature operations[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 450: 227435.
- [17] Hu Z X B, Liu F R, 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.
- [18] 杨莹莹, 魏学哲, 刘耀锋, 等. 车用锂离子电池交流加热的研究[J]. *汽车工程*, 2016, 38(7): 901-908.
Yang Y Y, Wei X Z, Liu Y F, et al. A research on the AC heating of automotive lithium-ion battery[J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(7): 901-908. (in Chinese)
- [19] Ratnakumar B V, Smart M C, Whitcanack L D, et al. The impedance characteristics of Mars Exploration Rover Li-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(2): 1428-1439.
- [20] Li J Q, Sun D N, Chai Z X, et al. Sinusoidal alternating current heating strategy and optimization of lithium-ion batteries with a thermo-electric coupled model[J]. *Energy*, 2019, 186: 115798.
- [21] Verma S, Pant M, Snasel V. A comprehensive review on NSGA-II for multi-objective combinatorial optimization problems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 57757-57791.
- [22] Li H, Zhang W G, Sun B X, et al. Lithium-ion battery modeling under high-frequency ripple current for co-simulation of high-power DC-DC converters[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 54: 105284.
- [23] 陈军, 康健强, 谭祖宪. 基于电化学-热耦合模型分析 18650 型锂离子电池的热性能[J]. *化学工程与技术*, 2018(2): 97-107.
Chen J, Kang J Q, Tan Z. Analysis of thermal performance of 18650 Li-ion battery based on an electrochemical-thermal coupling model[J]. *Hans Journal of Chemical Engineering and Technology*, 2018(2): 97-107. (in Chinese)
- [24] Wu B, Li Z, Zhang J B. Thermal design for the pouch-type large-format lithium-ion batteries: I. thermo-electrical modeling and origins of temperature non-uniformity [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2014, 162(1): A181-A191.
- [25] Chen L G, Hu M H, Cao K B, et al. Core temperature estimation based on electro-thermal model of lithium-ion batteries[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(7): 5320-5333.
- [26] Zhu C, Shang Y L, Lu F, et al. Core temperature estimation for self-heating automotive lithium-ion batteries in cold climates[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(5): 3366-3375.

(编辑 罗 敏)