

基于Simulink的电池单体及电池组DP模型参数辨识

朱嘉晟¹, 康健强^{2*}

¹武汉理工大学国际教育学院, 湖北 武汉

²武汉理工大学汽车工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年6月7日; 录用日期: 2025年7月16日; 发布日期: 2025年8月11日

摘要

在新能源汽车与储能领域, 锂电池组的精准建模对电池管理至关重要。本文基于Simulink搭建锂电池双极化DP等效电路模型参数辨识框架, 实现单体与电池组统一建模。通过结合恒流-静置间歇放电和HPPC测试, 解耦辨识开路电压、欧姆内阻与极化参数。实验表明, 单体模型动态电压预测误差低于0.3 V, 电池组模型误差在5%以内, 验证了模型有效性, 可为高精度电池组建模及管理系统优化提供理论依据。

关键词

锂电池, DP模型, 参数辨识, Simulink仿真

Parameter Identification of DP Models for Battery Cells and Battery Packs Based on Simulink

Jiasheng Zhu¹, Jianqiang Kang^{2*}

¹School of International Education, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

²School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

Received: Jun. 7th, 2025; accepted: Jul. 16th, 2025; published: Aug. 11th, 2025

Abstract

In the field of new energy vehicles and energy storage, accurate modelling of lithium-ion battery

*通讯作者。

文章引用: 朱嘉晟, 康健强. 基于 Simulink 的电池单体及电池组 DP 模型参数辨识[J]. 电力与能源进展, 2025, 13(4): 191-201. DOI: 10.12677/aepe.2025.134020

packs is critical for battery management. This paper establishes a parameter identification framework for lithium-ion battery bipolarization DP equivalent circuit models using Simulink, enabling unified modelling of individual cells and battery packs. By combining constant current-quiescent intermittent discharge and HPPC test, open-circuit voltage, ohmic internal resistance, and polarization parameters are decoupled and identified. Experiments show that the dynamic voltage prediction error of the cell model is less than 0.3 V, and the error of the battery pack model is within 5%, verifying the effectiveness of the model. This provides a theoretical basis for high-precision battery pack modelling and management system optimization.

Keywords

Lithium Battery, DP Model, Parameter Identification, Simulink Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球能源转型加速推进以及“碳达峰、碳中和”战略目标的背景下,锂离子电池作为新能源汽车与储能系统的核心组件,其建模精准度对电池管理系统的决策效率产生直接影响[1]。实际应用中,单体电池需通过串并联方式构成电池组以满足电压和容量要求,这一过程会带来参数不一致性、连接结构差异等复杂问题[2]。

等效电路模型因具备结构简洁、参数物理含义清晰、计算效率高的优势,在模拟电池极化效应与控制模型复杂度之间实现了较好平衡,能够较为准确地反映电池内部电化学反应过程,成为研究电池特性的主流方案[3]。早期的 Rint 模型仅包含欧姆内阻与理想电压源,无法描述极化效应,适用于静态工况。一阶 RC (Thevenin)模型通过引入 RC 网络增强了对电池动态特性的刻画能力,但在动态工况下仍存在精度不足的问题,难以准确体现电池极化特性随工况变化的非线性特征。为此,双极化(Dual-Polarization, DP)模型通过引入两对 RC 网络分别表征电化学极化和浓度极化效应,进一步细化极化机制,可显著提升动态工况下的电压预测精度[4]。

当前研究仍面临两大显著挑战:其一,传统离线辨识方法(如最小二乘法)难以适应电池的时变特性;其二,DP 模型涉及的参数更多,且与 SOC、温度、老化程度等因素存在较强耦合关系,模型精度高度依赖参数辨识的准确性,但计算复杂度限制了其在嵌入式设备中的实时应用。吴小慧等学者指出,DP 模型通过引入两个 RC 环节分别表征电池的极化效应和扩散效应,在模型精度与复杂度之间实现了良好平衡[5]。李彦乔等通过混合脉冲功率特性(Hybrid Pulse Power Characterization, HPPC)实验结合最小二乘法完成了等效电路模型参数的离线辨识,并对不同阶次等效电路模型的动态特性进行对比分析,验证了 DP 模型在不同工况范围内的适用性[6]。罗勇等学者进一步优化了车用动力电池的二阶 RC 建模方法,但其参数辨识精度仍受实验条件制约[7]。

在电池模型参数辨识领域,韦超毅等学者基于 Parameter Estimation Toolbox 优化了参数辨识流程,提高了拟合精度,但计算效率有待提升[8]。在线辨识方面,赵佳美采用二阶扩展卡尔曼滤波实现了 SOC 与模型参数的协同估计[9],而 Zhu 等学者提出的基于 H_∞ 方法的非线性观测器进一步增强了电池等效电路参数辨识的鲁棒性[10]。值得注意的是,现有方法在应用于电池组层级时,面临参数耦合性强、计算复杂度高等难题。詹涵的研究表明,单体电池成组后参数特性会发生显著改变,传统单体辨识方法难以直

接应用[11]。近年来, 基于扩展卡尔曼滤波(EKF)、无迹卡尔曼滤波(UKF)以及粒子滤波(PF)等在线估计方法在动力电池参数辨识中取得了广泛应用。但这些方法在工程实施中常受限于算法稳定性与收敛速度, 相比之下, 本文提出的 Simulink 模块化参数辨识方法具有更高的系统集成性与应用可行性。

综上所述, 本文基于 Simulink 搭建电池单体和电池组的 DP 模型, 根据间歇放电实测数据拟合来辨识模型参数并进行验证, 以期实现 DP 模型电池参数的准确辨识, 为电池单体及电池组的等效电路模型构建与优化提供思路和指导框架。

2. 电池模型建立

2.1. 等效电路模型

电池等效电路模型是一种将电池内部复杂的电化学反应抽象化的数学模型, 通过使用电容、电阻等电子元器件来表征电池的工作特性, 从而便于分析和研究电池的行为。常见的电池等效电路模型包括:

- 1) Rint 模型: 也被称为内阻等效模型, 把电池看作一个理想电压源串联一个电阻。该模型结构简单, 但仅考虑正常使用特性, 未考虑瞬态效应, 无法准确描述电池复杂动态特性。
- 2) Thevenin 模型: 在 Rint 模型基础上增加一个电阻电容并联回路, 又称一阶 RC 模型。能在一定程度上反映电池的极化现象, 但对于复杂工况下电池特性的描述仍有局限。
- 3) PNGV 模型: 基于 Thevenin 模型改进而成, 增加一个由串联电容器组成的环节, 用来描述负载电流随时间累积所引起的开路电压变化。

2.2. DP 双极化模型

DP 双极化模型又称二阶 RC 等效电路模型, 由开路电压源 U_{oc} 、欧姆内阻 R_0 、两组极化电阻电容组合 R_1 、 C_1 与 R_2 、 C_2 以及输出电压 V_o 构成, 如图 1 所示。

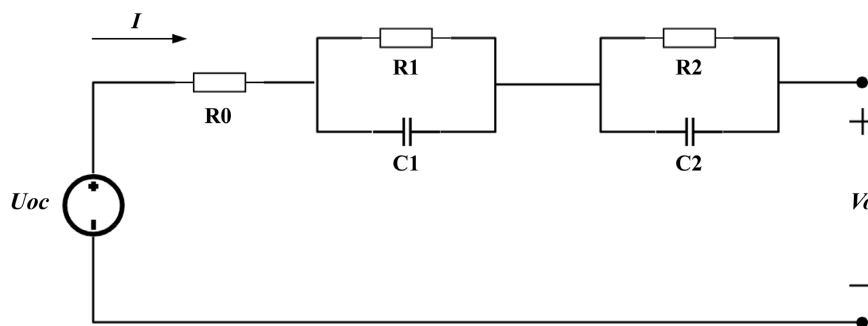


Figure 1. Dual-polarization model
图 1. DP 双极化模型

DP 双极化模型的状态方程可由基尔霍夫定律和电路元件特性获得, 如公式(1)所示:

$$\begin{cases} \frac{dU_{C1}}{dt} = \frac{I}{C_1} - \frac{U_{C1}}{R_1 C_1} \\ \frac{dU_{C2}}{dt} = \frac{I}{C_2} - \frac{U_{C2}}{R_2 C_2} \\ V_o = U_{oc} - IR_0 - U_{C1} - U_{C2} \end{cases} \quad (1)$$

其中, 开路电压 U_{oc} 与电池荷电状态 SOC 相关, 是电能输出基础; R_0 体现电池内部导电损耗; R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 分别为极化电阻和极化电容, 其中 R_1 、 C_1 用于模拟快速极化如浓度差极化, R_2 、 C_2 则用于模拟

缓慢极化如电化学极化; V_o 为电池实际输出到外部的电压; I 表示流经电池的电流大小。

从公式 1 中可以看出, 为了建立一个精确的电池模型来描述电池的特性, 识别出 R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 和 R_0 这五个关键参数是至关重要的。

2.3. 电池单体 Simulink 模型搭建

本文使用的电池为 50 Ah 锂离子电池单体和六串两并的 100 Ah 磷酸铁锂电池组。电池模型搭建常采用 Simulink 和 Simscape 等工具, 本文将基于 Simulink 分别搭建电池单体及六串两并电池组的 DP 双极化模型。

对于电池单体 DP 模型搭建, 依据 DP 等效电路模型原理, 需整合开路电压源、欧姆内阻、两组极化电阻电容组合等模块。在 Simulink 中, 可选取电压源模块模拟开路电压 U_{oc} , 电阻模块代表欧姆内阻 R_0 , 以及两组由电阻和电容模块并联构成的部分来分别模拟极化电阻电容组合 R_1 、 C_1 与 R_2 、 C_2 。各模块间通过连线实现电气连接, 连线方式精准对应实际电路连接关系, 以此构建出准确表征电池单体特性的 DP 模型, 如图 2 所示。

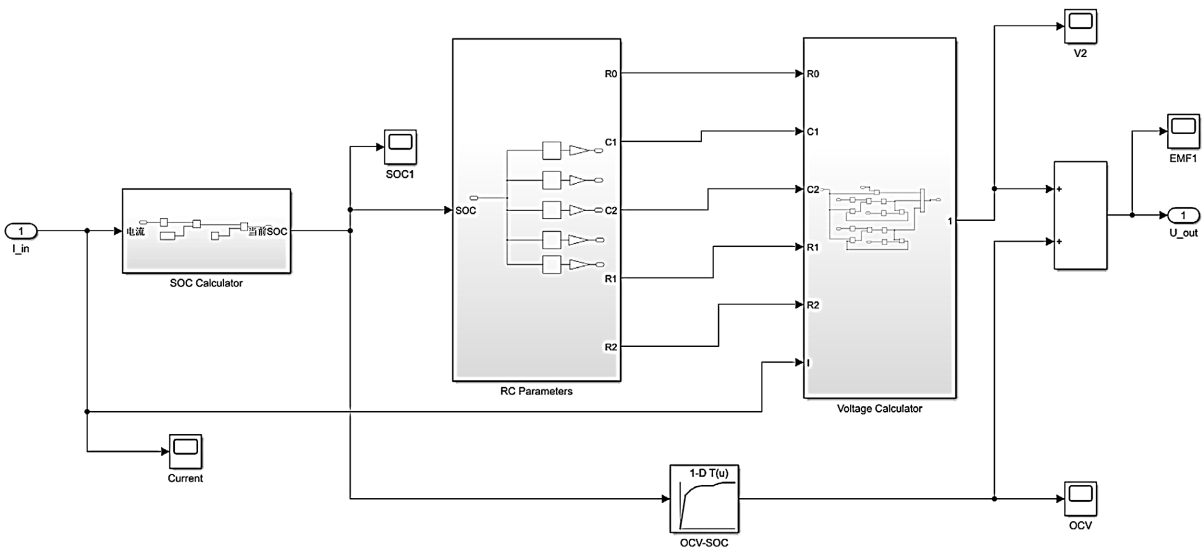


Figure 2. Battery cell dual-polarization model
图 2. 电池单体 DP 模型

2.4. 电池组 Simulink 模型搭建

对于 100 Ah 的六串两并磷酸铁锂电池组, 搭建电池组 DP 模型时, 在电池单体模型的基础上, 考虑电池组的串并联结构特点。先将六个电池单体进行串联, 串联过程中, 前一个单体模型的输出端与后一个单体模型的输入端依次相连, 实现电压的累加。随后, 将两组已串联好的电池组进行并联, 并联时确保对应节点正确连接, 从而构建出所需的电池组 DP 模型, 如图 3 所示。

3. 模型参数辨识

3.1. 恒流 - 静置间歇放电实验

为了解所测电池开路电压特性与回弹电压特性, 可以使用对电池进行间歇放电的方法[6], 具体实验流程如下。

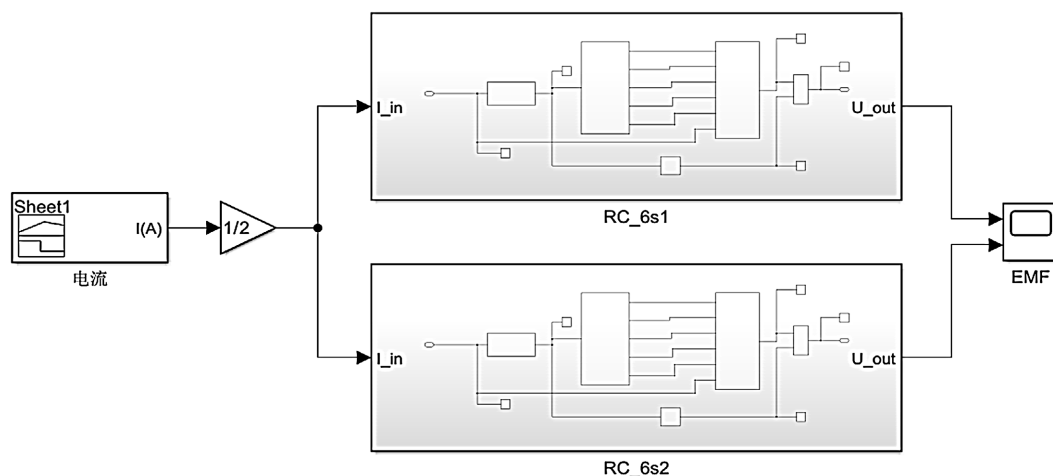


Figure 3. Battery pack dual-polarization model

图 3. 电池组 DP 模型

使用充放电设备在温度 25℃ 恒定条件下, 以 0.3 C (15 A) 恒流充满电, 即 SOC = 100%, 随后静置 3 小时, 待电池内部电化学反应稳定后, 以 0.5 C (25 A) 的电流进行恒流放电, 每放出 5% SOC 的电量, 便停止放电并再次静置 3 小时, 使电池内部极化现象充分衰减, 随后记录当前 SOC 下的开路电压值。依此流程循环操作, 直到放电至截止电压为止, 最后再以 0.3 C (15 A) 的充电电流将电池充满, 以便于下一次的实验和电池养护。

其中, 每次对电池放出一定比例 SOC 的电量后, 需要对电池进行静置, 为使电池电压充分回弹, 将电池的静置时间设置为 3 小时。

3.2. 开路电压 U_{oc} 辨识

对于 50 Ah 电池单体开路电压 U_{oc} 的辨识, 通过间歇放电实验, 每次放出 5% SOC 的电量并充分静置后, 测量当前 SOC 下的电池开路电压, 从而获取开路电压与荷电状态之间的关系。间歇放电实验结束后, 对所采集到的实验数据用 MATLAB 中的拟合工具箱进行非线性曲线拟合, 得出开路电压 U_{oc} 与电池荷电状态的对应关系如图 4 所示。

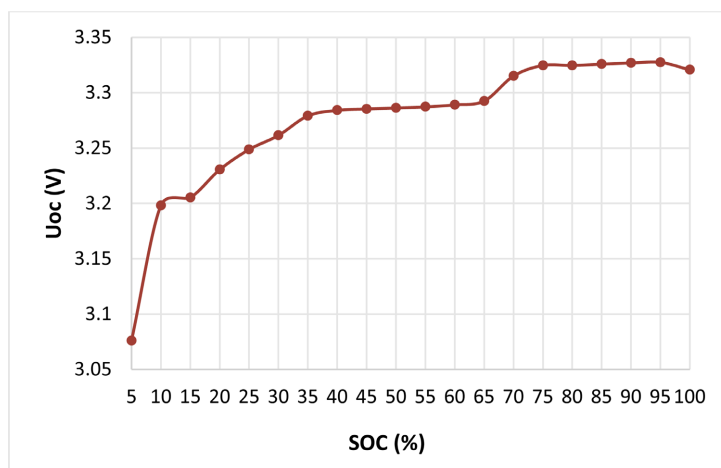


Figure 4. Identification of the relationship between open-circuit voltage and state of charge

图 4. 开路电压 U_{oc} 与荷电状态的关系辨识

3.3. 欧姆内阻 R_0 辨识

欧姆内阻 R_0 也可以通过间歇放电实验来辨识。在整个实验过程中, 记录电池端电压与时间的关系, 用于后续对欧姆内阻的计算分析。

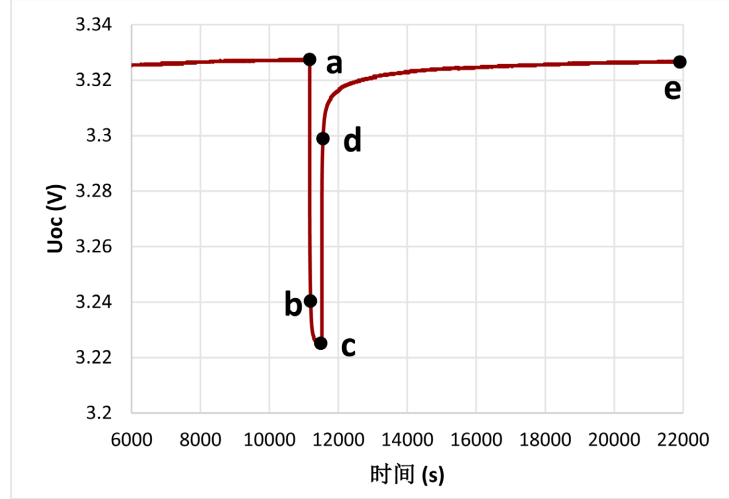


Figure 5. Intermittent discharge rebound voltage
图 5. 间歇放电回弹电压

取一次放电为例, 放电回弹电压曲线如图 5 所示。由于欧姆内阻 R_0 的作用, 电压在放电初期快速下降, 从 a 点到 b 点; 同理, 在停止放电后, 在内阻 R_0 的作用下, 电压迅速回升, 从 c 点到 d 点。因此。根据以上这两个过程, 我们可以求出该 SOC 下的内阻 R_0 值, 计算式如公式(2)所示:

$$R_0 = \frac{|U_a - U_b| + |U_c - U_d|}{2I} \quad (2)$$

其中, U_a 、 U_b 、 U_c 、 U_d 为 a、b、c、d 各点所测的电池端电压为间歇放电时的放电电流。

3.4. 极化参数辨识

电池内部存在极化现象构建, 双极化 DP 模型将电池等效为包含欧姆电阻 R_0 以及两个 RC 电路的电路模型。其中, 两个 RC 电路分别由极化电阻 R_1 、 R_2 和极化电容 C_1 、 C_2 组成。

以图 5 为例, a-b-c 段为电池放电阶段, 属于零状态响应, 其电压表达式为:

$$\begin{cases} U_1(t) = IR_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \\ U_2(t) = IR_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

c-d-e 段电池处于静置状态, 属于零输入响应, 无放电电流通过。此时电池电压变化由极化电容和极化电阻共同作用, 其电压表达式为:

$$U_L(t) = U_{oc}(t) - IR_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - IR_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4)$$

其中 $\tau_1 = R_1 C_1$ 、 $\tau_2 = R_2 C_2$ 为时间常数, U_L 为端电压, U_{oc} 为开路电压, I 为放电电流, t 为时间。

1) 拟合未知参数: 将零输入响应电压表达式转化成二阶指数函数 $f(x) = A - Be^{-bx} - Ce^{-cx}$, 通过 MATLAB 拟合工具箱中自定义拟合二阶指数函数, 来确定 A 、 B 、 C 、 b 、 c 这几个未知数的最优解, 从而得出 τ_1 、 τ_2 、 U_1 、 U_2 的值。

2) 计算极化电阻: 由欧姆定律, 得出极化电阻 R_1 、 R_2 的计算式如公式(5)所示:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{B}{I} \\ R_2 = \frac{C}{I} \end{cases} \quad (5)$$

辨识出极化电阻 R_1 、 R_2 的值, 其中, I 为放电电流。

3) 计算极化电容: 在得到 R_1 、 R_2 后, 根据 $\tau_1 = R_1 C_1$ 、 $\tau_2 = R_2 C_2$, 得出极化电容的计算式如公式(6)所示:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{I}{bB} \\ C_2 = \frac{I}{cC} \end{cases} \quad (6)$$

从而辨识出极化电容 C_1 、 C_2 的值。

3.5. 模型参数辨识结果

通过上述部分的辨识方法, 计算得出电池单体 DP 模型各 SOC 下模型参数辨识结果如表 1 所示。

Table 1. Battery cell DP model parameter identification results

表 1. 电池单体 DP 模型参数辨识结果

SOC/%	$R_0/\text{m}\Omega$	$R_1/\text{m}\Omega$	C_1/kF	$R_2/\text{m}\Omega$	C_2/kF
5	2.30	26.82	10.36	60.88	99.31
10	2.25	15.28	307.77	14.63	7.00
15	2.12	6.27	562.39	16.15	5.20
20	2.09	11.46	6.99	5.08	561.11
25	2.15	5.50	776.90	12.54	8.60
30	2.14	12.33	7.43	5.68	489.79
35	2.18	5.22	559.11	11.67	8.72
40	2.18	12.14	11.88	6.96	367.46
45	2.15	5.72	458.90	0.15	872.44
50	2.14	4.83	704.16	12.02	10.08
55	2.14	11.01	7.22	5.22	477.02
60	2.14	4.99	457.88	10.28	6.95
65	2.09	9.64	8.63	5.14	570.76
70	2.07	9.26	9.31	5.06	506.08
75	2.07	10.17	278.89	9.69	15.25
80	2.04	8.18	282.99	12.64	15.94

续表

85	2.03	6.03	324.33	13.39	8.65
90	2.01	5.02	504.44	11.84	7.78
95	2.09	10.38	7.61	4.74	434.73
100	2.20	3.79	659.44	9.12	9.49

采用相同的辨识方法，得到电池组 DP 模型各 SOC 下的模型参数，如表 2 所示。

Table 2. Battery pack DP model parameter identification results

表 2. 电池组 DP 模型参数辨识结果

SOC/%	$R_0/\text{m}\Omega$	$R_1/\text{m}\Omega$	C_1/kF	$R_2/\text{m}\Omega$	C_2/kF
10	14.08	44.48	11.06	8284.00	640.74
20	13.83	43.32	11.95	8296.00	697.57
30	13.70	7936.00	729.21	42.20	14.23
40	13.77	7948.00	679.73	42.72	13.71
50	13.46	50.04	9.58	7952.00	634.80
60	13.33	7960.00	579.47	69.28	4.72
70	13.70	7996.00	699.85	62.00	11.67
80	13.58	55.60	4.64	8032.00	730.65
90	13.70	8028.00	811.49	91.00	1.68
100	13.58	8020.00	2749.47	58.00	1.33

4. 模型验证

4.1. HPPC 电池模型测试

HPPC 电池模型验证方法是一种评估电池模型准确性和可靠性的技术手段。该方法通过将模型预测的电池电压与实际测量数据进行比较，来验证模型能否准确反映电池的动态特性[12]。

对于本文所采用的电池单体，HPPC 测试具体包括以下几个步骤：

- 1) 将电池在室温条件下以 15 A 的充电电流充满，确保电池的 SOC 达到 100%，然后静置 1 小时，以消除由于充电过程引起的电池内部温度变化和极化现象。
- 2) 以 25 A 的放电电流对电池进行放电，放电量为 10% SOC，随后静置 1 小时，旨在测试电池在轻度放电工况下的动态响应。
- 3) 以 40 A 的脉冲电流放电 10 秒，静置 40 秒；接着以相同的脉冲电流充电 10 秒，静置 40 秒。旨在测试电池在快速充放工况下的动态响应。
- 4) 重复步骤 3 的脉冲充放电测试，直到放电至截止电压为止，最后再以 15A 的充电电流将电池充满，为下一次实验和电池养护做好准备。

4.2. 电池单体模型有效性验证

验证模型有效性的方法是将实际测量得到的电池电流工况数据输入到 Simulink 仿真模型中，然后对比仿真模型计算出的电池端电压与实验实测所得的端电压数值之间的偏差。通过分析计算结果与实验数

据的吻合程度, 以评估模型的准确性。

为检验单体模型有效性, 对电池单体及其仿真模型进行脉冲放电和 HPPC 测试, 对比模型仿真结果与实测电压值及误差大小, 如图 6 和图 7 所示。其中脉冲放电的测试流程为: 以 25 A 的电流进行恒流放电, 每放出 5% SOC 的电量, 停止放电, 静置 3 小时后重新以 0.5 C 的电流进行恒流放电, 如此循环直至电池单体放电至截止电压, 记录整个测试过程的电压变化。

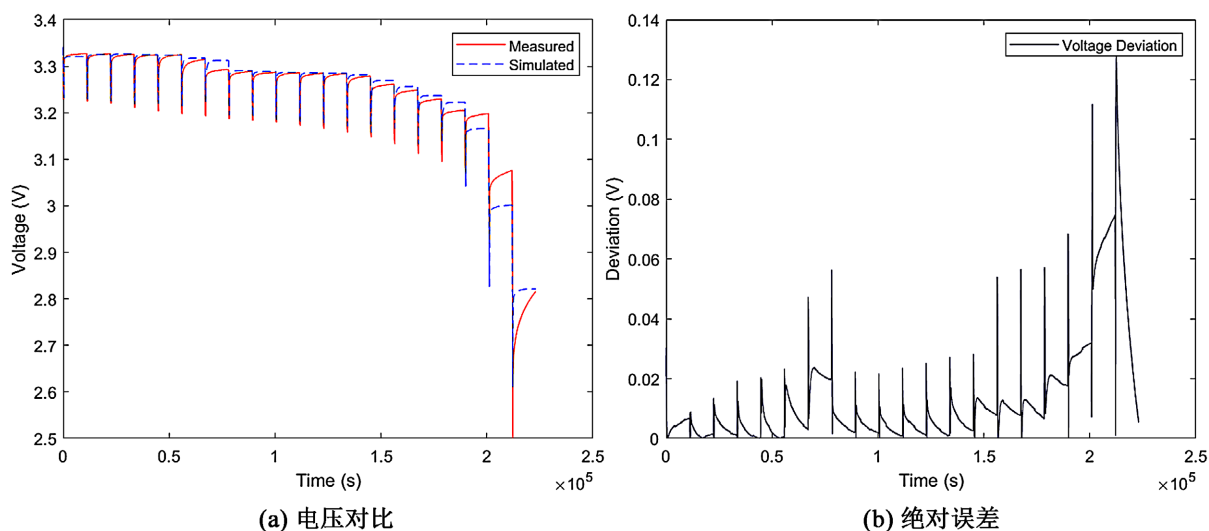


Figure 6. Pulse discharging verification results for battery cell model

图 6. 电池单体模型脉冲放电验证结果

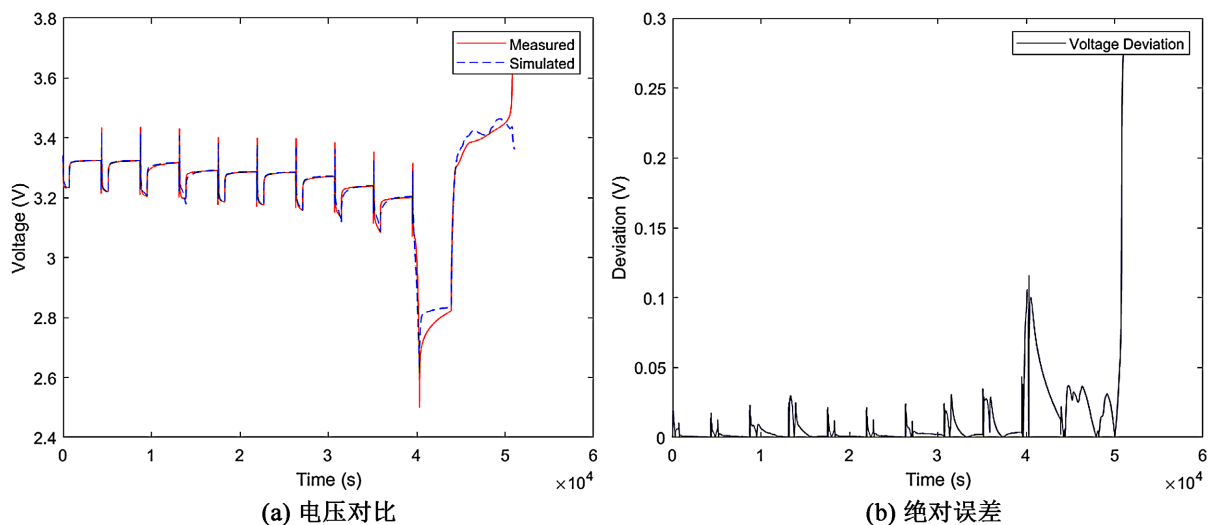


Figure 7. HPPC verification results for battery cell model

图 7. 电池单体模型 HPPC 验证结果

4.3. 电池组模型有效性验证

为检验电池组模型有效性, 对电池组模型进行了脉冲充电测试。具体步骤如下: 先将电池组放电至截止电压, 静置 3 小时使其达到稳定状态, 随后以 50 A 的电流进行恒流充电, 电池 SOC 每增加 10% 的电量, 停止充电, 充分静置 3 小时后继续以 50 A 恒流充电, 如此循环直至电池组充电至截止电压, 记录

整个测试过程的电压变化。根据第 2.4 节所建立的电池组 Simulink 模型, 对电池组 DP 模型进行间歇放电试验, 整个脉冲充电过程的仿真值与实测电压对比及误差结果如图 8 所示。

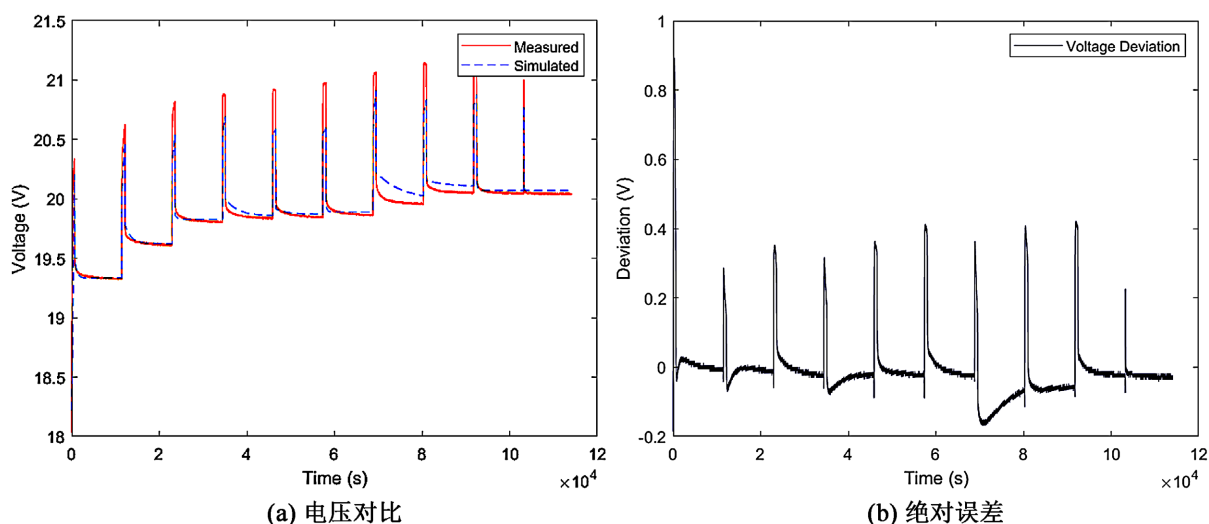


Figure 8. Pulse charging verification results for battery pack model

图 8. 电池组模型脉冲充电验证结果

4.4. 结果评价

对所得的仿真结果进行分析, 在电池单体 DP 模型的有效性验证中, 电池端电压仿真值和实测值的最大偏差值为 0.1287 V, 平均偏差值为 0.0138 V, 最大偏差百分比为 4.8210%, 平均偏差百分比为 0.4460%。

对于电池组 DP 模型, 整个间歇放电测试过程中电池端电压仿真值和实测值的最大偏差值为 0.8936 V, 平均偏差值为 0.0779 V, 最大偏差百分比为 4.4880%, 平均偏差百分比为 0.3812%。

综合以上分析, 所建立的电池单体及电池组 DP 模型的电压预测误差分别在 0.3 V 和 5% 以内, 因此, 可以认为所辨识出电池 DP 模型参数是准确的, 验证了该辨识方法的可行性和有效性。

5. 结论

本文基于 Simulink 平台, 研究了锂电池单体及电池组的 DP 等效电路模型参数辨识方法。通过间歇放电实验与 HPPC 测试, 辨识了锂电池单体与电池组的开路电压、欧姆内阻及极化参数, 并验证了所辨识模型参数在动态工况下的有效性。结果表明, 电池单体模型的电压预测最大误差为 0.1287 V, 电池组模型的最大偏差为 0.8936 V, 相比于目前主流的辨识方法均有提升, 且能够满足工程精度要求。基于 Simulink 平台的电池组参数解耦辨识的方法, 解决了电池组建模中单体参数成组后的耦合问题, 且无需重复编写复杂脚本, 可为电池管理系统的精细化设计与算法优化提供技术参考, 具有较强的工程实用性。考虑到电池组内电芯间存在参数离散性和热效应耦合等问题, 本文初步采用串并联模型组合方式建模。在未来研究中, 可引入平均参数校正模型或使用分布式建模框架来进一步增强模型的精度和鲁棒性。

参考文献

- [1] 候亚虹. 动力电池组不一致性建模及 SOC 融合估计研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2021.
- [2] 郭向伟. 电动汽车电池荷电状态估计及均衡技术研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [3] 郭向伟, 高岩, 司阳, 等. 动力电池等效电路模型研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(1): 62-64+68.

-
- [4] 程燕兵, 韩如成. 锂电池 PNGV 模型与二阶 RC 模型分析与比较[J]. 太原科技大学学报, 2019, 40(6): 430-436.
 - [5] 吴小慧, 张兴敢. 锂电池二阶 RC 等效电路模型参数辨识[J]. 南京大学学报(自然科学), 2020, 56(5): 754-761.
 - [6] 李彦乔, 李昕. 基于最小二乘法的锂离子电池参数辨识方法研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(1): 68-74.
 - [7] 罗勇, 赵小帅, 祁朋伟, 等. 车用动力电池二阶 RC 建模及参数辨识[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(4): 738-744.
 - [8] 韦超毅, 覃小婷, 班璐, 许哲. 基于 Parameter Estimation Toolbox 的锂离子电池参数辨识[J]. 电力与能源进展, 2021, 9(3): 132-139.
 - [9] 赵佳美. 基于二阶 EKF 的锂离子电池 SOC 估计的建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2018.
 - [10] Zhu, Q., Li, L., Hu, X., Xiong, N., *et al.* (2017) H_∞ -Based Nonlinear Observer Design for State of Charge Estimation of Lithium-Ion Battery with Polynomial Parameters. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **66**, 10853-10865. <https://doi.org/10.1109/tvt.2017.2723522>
 - [11] 詹涵. 基于等效电路模型的锂离子电池成组性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2021.
 - [12] 谢乐琼, 王莉, 胡坚耀, 等. 动力电池重要测试方法: 混合脉冲功率特性测试[J]. 电池工业, 2018, 22(5): 257-264.