

## 基于最小二乘法的锂离子电池参数辨识方法研究

李彦乔, 李 昕

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

**摘要:**目的 针对使用戴维南等效电路模型对锂电池进行参数辨识不够精确的问题, 提出一种二阶 RC 等效电路模型并对锂电池进行参数辨识。方法 通过脉冲放电实验得到锂电池的相关数据, 在 MATLAB 上使用最小二乘法对所建立的二阶 RC 等效电路进行参数辨识, 并对不同 SOC(State of Charge) 下锂电池各个参数的变化情况进行分析, 通过计算锂电池的端电压来判断参数辨识的精确度, 最后将辨识结果与戴维南等效电路模型所辨识的结果进行对比并分析。结果 随着锂电池 SOC 下降, 锂电池的各个参数会有轻微的波动, 在锂电池的 SOC 处在较低的水平时, 锂电池的各个参数变化比较剧烈, 这是由于锂电池的化学浓差极化所导致的, 当将辨识的参数用来求解锂电池的端电压时, 随着时间的推移, 发现锂电池的端电压的误差波动比较稳定, 且最大误差不超过 0.05 V, 反观使用戴维南等效电路模型求得锂电池的端电压误差波动比较大, 且最大误差超过了 0.08 V。结论 在锂电池参数辨识上二阶 RC 等效电路比戴维南等效电路更加准确, 能够更好地描述锂电池的动静态特性, 为后续对锂电池的荷电状态估计提供了有力的基础。

**关键词:** 锂电池; 电池等效模型; 最小二乘法; 参数辨识

**中图分类号:** TM912 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0001.009

### Research on Parameter Identification Method of Lithium-ion Battery Based on Least Squares Method

LI Yanqiao, LI Xin

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China

**Abstract: Objective** Aiming at the problem that the Thevenin equivalent circuit model is not accurate enough to identify the parameters of lithium batteries, a second-order RC equivalent circuit model was proposed to identify the parameters of lithium batteries. **Methods** The relevant data of lithium battery were obtained through a pulse discharge experiment, and the least squares algorithm was used on MATLAB to identify the parameters of the established second-order RC equivalent circuit, the changes of each parameter of the lithium battery under different states of charge were analyzed, the accuracy of parameter identification was judged by calculating the terminal voltage of the lithium battery, and the identification results were analyzed and compared with the results identified by the Thevenin equivalent circuit model. **Results** As the state of charge (SOC) of the lithium battery decreased, the parameters of lithium battery fluctuated slightly. When the SOC of a lithium battery was at a low level, the parameters of the lithium battery changed more drastically, which was caused by the chemical concentration polarization of the lithium battery. When the identified parameters were used to solve the terminal voltage of the lithium battery, it was found that the error fluctuation of the terminal voltages of the lithium battery was relatively stable over time, and the maximum error did not exceed 0.05 V. In contrast, the error fluctuation of the terminal voltages obtained by using the Thevenin equivalent circuit model was large, and the maximum error was more

**收稿日期:** 2022-03-05 **修回日期:** 2022-05-18 **文章编号:** 1672-058X(2024)01-0068-07

**基金项目:** 安徽省高校自然科学基金资助项目(KJ2019A0106); 2020年安徽省教育厅项目(2020JYXM0460)。

**作者简介:** 李彦乔(1999—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 从事锂电池 BMS 研究。

**通讯作者:** 李昕(1981—), 女, 安徽淮南人, 副教授, 硕士, 从事锂电池 BMS 及图像处理研究。Email: brightgirl1981@126.com。

**引用格式:** 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.

LI Yanqiao, LI Xin. Research on parameter identification method of lithium-ion battery based on least squares method[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(1): 68—74.

than 0.08 V. **Conclusion** In the identification of lithium battery parameters, the second-order RC equivalent circuit is more accurate than the Thevenin equivalent circuit, which can better describe the dynamic and static characteristics of lithium batteries, providing a strong basis for the subsequent estimation of the state of charge of lithium batteries.

**Keywords:** lithium batteries; battery equivalent model; least squares method; parameter identification

## 1 引言

面对传统能源的枯竭以及环境的污染,世界对新能源技术逐渐重视起来,在这种情况下,新能源技术开始得到持续发展,而我国更是将资源和环境问题提升到国家战略的高度,锂电池作为新能源的重要组成部分,必然也会受到各个国家的青睐,由于锂电池体积小、容量大并且放电率高,所以在很多地方都能见到它的身影,小到人们经常使用的电子设备,大到国家的航空航天技术<sup>[1]</sup>。但是以现在的科技条件来看,锂电池的应用技术还不够成熟,许多问题依然等待被解决,其中以安全问题最为突出,因此,锂电池的应用和维护技术成为研究热点<sup>[2-3]</sup>。而对锂电池的各个状态参数的预测和估计是储能安全系统安全运行的必要条件<sup>[4-5]</sup>。所以建立一个可靠又精确的锂电池模型能够提高对锂电池的监控管理以及参数精准的预测估计。

电池模型的选择对于电池参数的辨识十分重要,如果模型选取的不恰当就会导致对锂电池的参数辨识、荷电状态估计等信息的监测变得不够准确,从而就会导致使用者错误使用,酿成不可挽回的后果,所以要选取一个能够直观且简单的锂电池模型就显得十分重要,目前比较常用的锂电池模型主要有电化学模型、智能数学模型以及等效电路模型,由于电化学模型需要分析电池内部的反应机理,所以操作起来比较复杂,并且在一些实际产品当中很难应用,一般是用来辅助电池的制造与设计,智能数学模型主要就是神经网络模型,从理论上来看完成电池建模并没有问题,但是由于它需要大量的数据进行训练,使得操作起来十分繁琐,所以在实际应用当中应用较少,而等效电路模型则采用一些电路元件组成电路网络并模拟电池的动态电压响应特性,使得模型的物理意义明确,因此被广泛使用。等效电路模型中的各个参数可以通过公式来表达,而且一般包含相对较少的数量,这使得状态空间的数学描述工作也比较容易,因此在系统仿真和实际管理中应用十分广泛。文献[5]选择一阶 RC 等效电路作为等效电路模型,由于模型简单,计算量比较小,对参数进行辨识也比较容易,但是参数辨识的结果误差较大,不能很好地体现锂电池的动静态特性。文献[6]选择二阶 RC 等效电路作为等效电路模型,能够更好地描述锂离子电池的动静态特性,但是缺乏与戴维南等效

电路所辨识出来的端电压误差做对比,体现不出来二阶 RC 等效电路的优越性<sup>[5-7]</sup>。

参数辨识是锂电池荷电状态估计(State Of Charge, SOC)的重要环节,如果所辨识的参数不够准确,那么就会影响到锂电池荷电状态估计的精确度,从而给使用者一个错误的信号,因此在对锂电池完成建模之后,需要对模型中的各个参数进行辨识。锂电池参数辨识方法主要有粒子群算法、卡尔曼滤波算法、最小二乘法等。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)又称粒子群算法、微粒群算法、或微粒群优化算法,这是一种根据群体合作的任意搜索算法,它是由仿真模拟飞禽的捕食方式而发展起来。一般,粒子群优化算法被称之为一种群体智能算法,在求得繁杂的组合优化问题的时候,与一些基本优化算法对比,PSO 一般能更有效地快速优化结果,但是它在选择遗传算子时比较麻烦,且不能有效解决离散及组合优化问题,容易陷入局部最优处理上,所以在锂电池参数辨识上使用粒子群算法的学者较少。卡尔曼滤波算法是利用现代控制理论的状态方程,通过平台的输出观测数据信息系统情况开展最佳估计的算法,因为观测数据信息包括系统中噪音以及危害,最佳估计也可以理解为一个滤波过程,但是锂电池的参数辨识涉及非线性运算,卡尔曼滤波无法对非线性运算进行很好的处理,因此卡尔曼滤波算法在参数辨识上使用较少。而最小二乘法对系统要求不高,不需要测量数据给其概率统计方面的信息,结果却具备相当不错的统计分析特性。选用最小二乘算法原理创建的辨识算法在进行锂电池参数辨识上较为简便,并且辨识结果也比较精确,因此受到众多学者的青睐。文献[8]对二阶 RC 等效电路进行参数辨识,却没有给出不同 SOC 下各个参数辨识的结果,因此所辨识结果无法判断是否准确。根据前人研究成果发现使用二阶 RC 等效电路作为等效电路模型的研究人员更多,因此本文针对使用戴维南等效电路模型对锂电池进行参数辨识不够精确的问题,提出一种二阶 RC 等效电路模型并采用最小二乘法对锂电池进行参数辨识,同时对一阶 RC 等效电路做了同样的研究,在最后对一阶 RC 电路和二阶 RC 等效电路两者的端电压误差进行对比,以验证参数辨识的准确性<sup>[9-10]</sup>。

## 2 锂离子电池建模

因为等效电路模型实际意义确定,关系式比较简单,因此选用等效电路模型对锂电池展开了建模。现阶段常见的等效电路模型主要有 Rint 模型、Thevenin 模型、PNGV 模型、GNL 模型<sup>[11]</sup>。Rint 模型非常简单,只包含电压源  $U_{oc}$  和电池内电阻  $R_0$ 。Thevenin 模型将 RC 电路导入到 Rint 模型中,从而能够表现出锂电池工作性质的极化效应。PNGV 模型在 Thevenin 模型基础上又串联了一个电容,这种模型考虑到锂电池 OCV 在充放电的过程中,电流随时间积累产生的误差,从而涵盖了欧姆内阻和电池极化效应。GNL 模型引入了一个 RC 串网络两个一阶 RC 并联网络可以模拟出锂电池的欧姆极化、电化学极化、浓差极化和电池自放电现象,精确度很高,但是模型太过于复杂。综合考虑下,选择对 Thevenin 模型进行改进,即二阶 RC 等效电路,由于 Thevenin 模型阶数只有一阶,与实际电池的特性比还是有比较大的误差,为了让电池模型更加精确,在 Thevenin 模型上加入一个一阶 RC 并联回路,如图 1 所示。经过试验分析,改进之后的二阶 RC 等效电路能够更加准确的描述锂电池的动态特性,并且由于阶数为二阶使得计算也并不太复杂,因此选用二阶 RC 等效电路作为锂电池的模型。

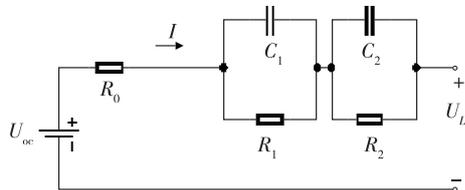


图 1 二阶 RC 等效电路模型

Fig. 1 Second-order RC equivalent circuit model

锂电池等效电路模型建立后需要辨识的参数有  $U_{oc}$ 、 $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ ,其中  $R_0$  为欧姆内阻, $R_1$ 、 $R_2$  为极化电容, $C_1$ 、 $C_2$  为极化电容,极化电容和极化电阻共同表征了锂电池的极化效应, $U_{oc}$  为开路电压,可以认为锂电池静置数个小时后的端电压就是开路电压, $U_L$  为端电压,可以直接测量获得,根据基尔霍夫定律(KVL)可得如下公式:

$$\begin{cases} I = \frac{U_1}{R_1} + C_1 \frac{dU_1}{dt} \\ I = \frac{U_2}{R_2} + C_2 \frac{dU_2}{dt} \\ U_L = U_{oc} - U_1 - U_2 - IR_0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $U_1$  为极化电容  $C_1$  两端的电压, $U_2$  为极化电容  $C_2$  两端的电压, $I$  为锂电池放电电流。

## 3 参数辨识

根据三星 INR18650-30Q 三元锂电池规格说明书

得到锂电池的参数如表 1 所示,将十块电池并联在一起作为一个整体,这个整体就是本文的研究对象。参数辨识可以将其分成两个部分,第 1 个部分是开路电压的辨识,第 2 个部分是其他参数的辨识,即  $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  的辨识。由于开路电压与 SOC 有对应关系,所以开路电压可以通过与 SOC 进行非线性曲线拟合,从而进行辨识,为了减小拟合误差采用充放电实验所得到的数据对开路电压进行非线性曲线拟合。而  $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  这几个参数通过进行脉冲放电实验,并使用 MATLAB 代入最小二乘法进行辨识。

表 1 INR18650-30Q 锂电池主要参数

Table 1 Main parameters of INR18650-30Q lithium battery

电池容量/(Ah)	标称电压/V	充电截止电压/V	放电截止电压/V
3	3.6	4.2	2.5

### 3.1 $U_{oc}$ 的辨识

在温度为 25 °C 的情况下对锂电池进行充放电实验,具体操作如下:将锂电池以恒流的方式进行充电直至充满,并静置 2 h。静置完成后,对锂电池进行 1 C (30 A) 恒流放电,每放出 5% 容量静置 2 h,将静置后的开路电压再作为下一阶段的开路电压进行放电,重复上述步骤,直到放电到截止电压为止。接着对所采集到的实验数据用 MATLAB 中的 Polyfit 函数进行非线性曲线拟合,在拟合的过程中发现九阶多项式误差相对较小,所以对实验所得的数据进行了九阶多项式拟合,得出  $U_{oc}$  和 SOC 的关系式如下:

$$\begin{aligned} U_{oc} = & 973.35667a^9 - 4367.7159a^8 + 8296.7068a^7 - \\ & 8703.2882a^6 + 5514.1839a^5 - 2169.0509a^4 + \\ & 526.89299a^3 - 78.075788a^2 + 8.3785642a + \\ & 2.7739529 \end{aligned}$$

其中, $a=f_{soc}$ , $U_{oc}$  与  $f_{soc}$  的关系拟合曲线以及实验所得的数据真实值如下:

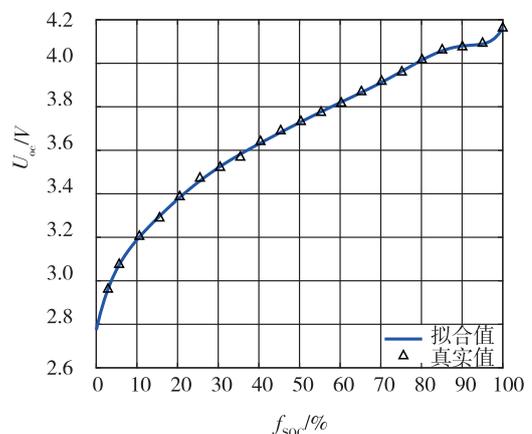


图 2 开路电压  $U_{oc}$  和 SOC 拟合曲线和实验数据

Fig. 2 Open circuit voltage  $U_{oc}$  and SOC fitting curves and experimental data

### 3.2 $R_0$ 的辨识

除  $U_{oc}$  以外的其他需要辨识的参数通过脉冲放电数据获取。放电电流为 1 C (30 A), 每次放电使得锂电池的  $f_{soc}$  下降 5%, 并静置两个小时, 然后再放电使得锂电池的  $f_{soc}$  下降 5%, 再静置两个小时, 将这个步骤循环 20 次, 得出的电压与时间的关系数据如图 3 所示。

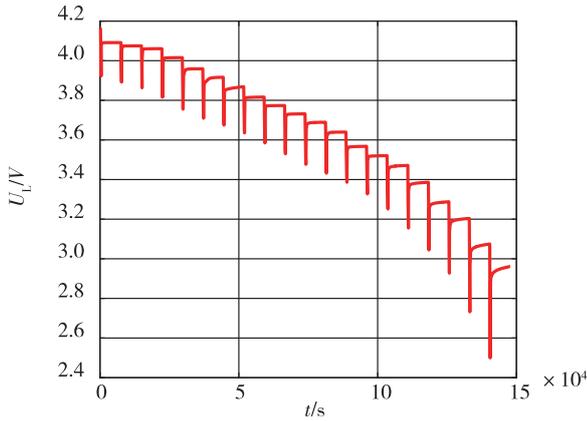


图 3 脉冲放电电压时间关系数据图

Fig. 3 The relationship between pulse discharge voltage and time

为了能更直观地看到脉冲放电后端电压的变化, 以  $f_{soc} = 0.85$  为例, 则此时完整的一次放电、静置时期的端电压如图 4 所示。

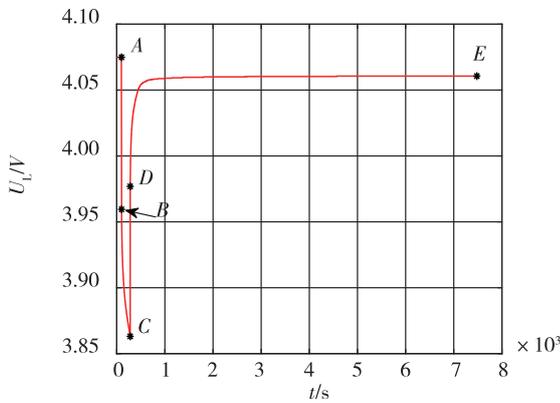


图 4 脉冲放电放大图

Fig. 4 Enlarged view of pulse discharge

图 4 中,  $A-B$  段, 放电初期电压下降十分迅速, 这是由于有欧姆内阻  $R_0$  在作用,  $C-D$  段电压迅速上升同样是由于欧姆内阻  $R_0$  在作用, 通过这两段的数据就可以利用式 (2) 来求得欧姆内阻  $R_0$  的值:

$$R_0 = \frac{|U_A - U_B| + |U_D - U_C|}{2I} \quad (2)$$

### 3.3 $R_1, R_2, C_1, C_2$ 的辨识

图 4 中,  $B-C$  段电压缓慢下降这是由于极化电容和极化电阻的共同作用所导致, 而  $D-E$  段电压缓慢上升, 这同样是由于极化电容和极化电阻共同作用所导

致, 通过对这两段数据, 就可以对极化电容  $C_1, C_2$  和极化电阻  $R_1, R_2$  进行辨识。一阶 RC 全响应公式如式 (3):

$$U_C = U_0 \frac{t}{\tau} + IR(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

其中,  $U_0$  为初始电压,  $U_C$  为电容电压,  $\tau = RC$ 。

由于  $C-D-E$  段为零输入响应, 根据式 (3) 可得:

$$\begin{cases} U_1(t) = U_1(t_C) e^{-\frac{t-t_C}{\tau_1}} \\ U_2(t) = U_2(t_C) e^{-\frac{t-t_C}{\tau_2}} \end{cases} \quad (4)$$

又  $A-B-C$  段为零状态响应, 根据式 (3) 可得:

$$\begin{cases} U_1(t) = IR_1(1 - e^{-\frac{t-t_A}{\tau_1}}) \\ U_2(t) = IR_2(1 - e^{-\frac{t-t_A}{\tau_2}}) \end{cases} \quad (5)$$

由于  $D-E$  段为锂电池的静置状态, 且此时为零输入响应, 无放电电流通过, 那么此时可以对式 (1) 的微分方程进行求解可得:

$$U_L(t) = U_{oc}(t) - U_1(t) e^{-\frac{t}{\tau_1}} - U_2(t) e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (6)$$

其中,  $\tau_1 = R_1 C_1, \tau_2 = R_2 C_2, U_L$  为端电压,  $U_{oc}$  为开路电压,  $U_1$  为电容  $C_1$  两端的电压,  $U_2$  为电容  $C_2$  两端的电压。对式 (6) 进行自定义拟合可得:

$$U_L(t) = A - B e^{-\frac{t}{C}} - D e^{-\frac{t}{E}}$$

其中:  $A, B, C, D, E$  均为未知数, 可以通过 MATLAB 中的 lsqcurvefit 函数来确定这几个未知数的最小二乘最优解。lsqcurvefit 函数调用的基本格式为:  $a = \text{lsqcurvefit}(\text{fun}, x_0, xdata, ydata)$ , 其中  $xdata$  和  $ydata$  为已有的数据,  $x_0$  为设定的初始值, 这个初始值选取并不会使结果偏离太多, 但是为了使结果更加地准确, 就需要经过多次尝试, 从而得到合适的初始值,  $\text{fun}$  为预先定义的函数, 本文中这个函数选取的是式 (6), 通过这种方法就能得出  $\tau_1, \tau_2, U_1(t_C), U_2(t_C)$  的值。将式 (5) 进行变换得:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{U_1(t_C)}{I(1 - e^{-\frac{t_C-t_A}{\tau_1}})} \\ R_2 = \frac{U_2(t_C)}{I(1 - e^{-\frac{t_C-t_A}{\tau_2}})} \end{cases} \quad (7)$$

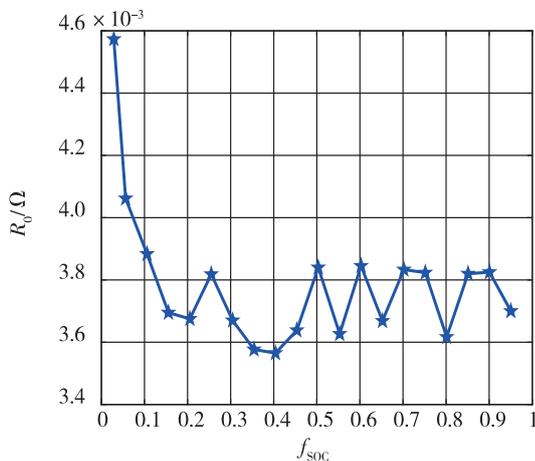
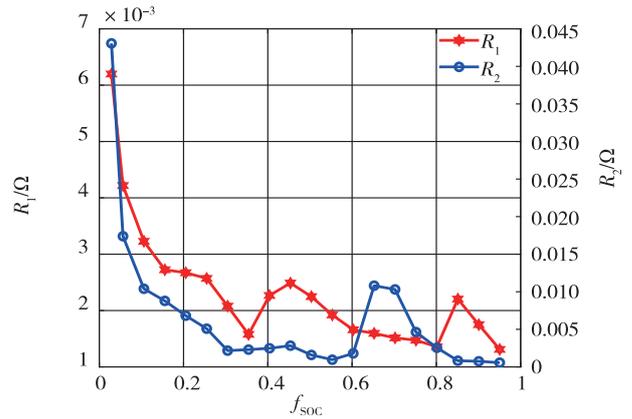
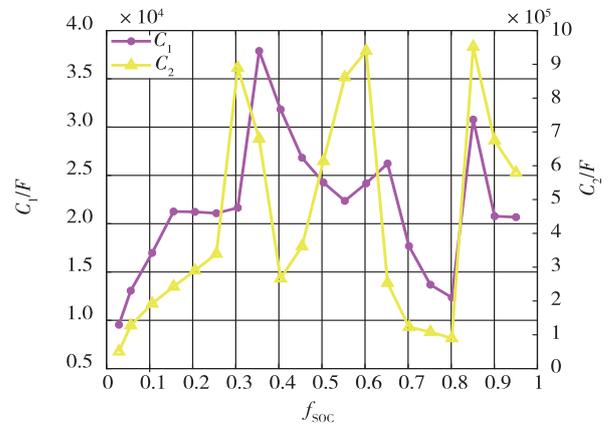
通过式 (7) 就能辨识出  $R_1, R_2$  的值。  $R_1, R_2$  得到后就可以根据  $\tau_1 = R_1 C_1, \tau_2 = R_2 C_2$ , 来计算出  $C_1, C_2$  的值。根据上述参数辨识步骤, 可以得到参数辨识的结果如表 2 所示。

表 2 参数辨识结果

Table 2 Parameter identification results

$f_{\text{SOC}}/\%$	$R_0/\text{m}\Omega$	$R_1/\text{m}\Omega$	$R_2/\text{m}\Omega$	$C_1/\text{kF}$	$C_2/\text{kF}$
95	3.7	1.3	0.56	20.68	579.3
90	3.8	1.7	0.74	20.78	674.7
85	3.8	2.2	0.82	30.78	951.9
80	3.6	1.4	2.5	12.36	89.75
75	3.8	1.5	4.6	13.68	108.3
70	3.8	1.5	10.3	17.68	122.9
65	3.7	1.6	10.8	26.23	253.1
60	3.8	1.7	1.8	24.18	939.4
55	3.6	1.9	0.95	22.36	861.5
50	3.8	2.2	1.6	24.27	613.6
45	3.6	2.5	2.8	26.86	361.5
40	3.6	2.3	2.5	31.83	266.6
35	3.6	1.6	2.3	37.88	679.8
30	3.7	2.1	2.2	21.65	889.7
25	3.8	2.6	5.1	21.08	339.3
20	3.7	2.7	6.8	21.22	290.3
15	3.7	2.7	8.8	21.26	242.3
10	3.9	3.2	10.4	16.98	192.3
5	4.1	4.2	17.4	13.07	127.7

为了能够更直观地感受不同  $f_{\text{SOC}}$  与各个参数的对应关系,做出了  $f_{\text{SOC}}$  与  $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  的关系图(图 5—图 7),通过这几幅图发现,当  $f_{\text{SOC}}$  小于 0.1 时,各参数的变化比较剧烈,这是由于锂电池的化学浓差极化所引起的,而当  $f_{\text{SOC}}$  大于 0.9 时,由于锂电池处在化学活化极化状态,所以此时各参数波动也会比较大。

图 5  $f_{\text{SOC}}$  与  $R_0$  的关系图Fig. 5 Diagram of  $f_{\text{SOC}}$  and  $R_0$ 图 6  $f_{\text{SOC}}$  与  $R_1$ 、 $R_2$  的关系图Fig. 6 Diagram of  $f_{\text{SOC}}$  with  $R_1$  and  $R_2$ 图 7  $f_{\text{SOC}}$  与  $C_1$ 、 $C_2$  的关系图Fig. 7 Diagram of  $f_{\text{SOC}}$  with  $C_1$  and  $C_2$ 

#### 4 验证与分析

根据安时积分法可知锂电池  $t$  时刻的 SOC 为

$$f'_{\text{SOC}} = f_{\text{SOC}}^0 - \frac{\eta}{Q_N} \int_0^t I dt \quad (8)$$

联立式(1)和式(8)可得:

$$\begin{cases} \frac{dU_1}{dt} = -\frac{U_1}{R_1 C_1} + \frac{I}{C_1} \\ \frac{dU_2}{dt} = -\frac{U_2}{R_2 C_2} + \frac{I}{C_2} \\ \frac{d\text{SOC}}{dt} = -\frac{I}{Q_N} \end{cases} \quad (9)$$

$$U_L = U_{oc} - U_1 - U_2 - IR_0 \quad (10)$$

其中,式(9)称为系统方程,式(10)称为观测方程。将式(9)在  $k$  时刻离散化可得:

$$\begin{cases} U_{1,k} = \left(1 - \frac{T_s}{R_1 C_1}\right) U_{1,k-1} + \frac{T_s}{C_1} I \\ U_{2,k} = \left(1 - \frac{T_s}{R_2 C_2}\right) U_{2,k-1} + \frac{T_s}{C_2} I \\ f_{\text{SOC}}^k = f_{\text{SOC}}^{k-1} - \frac{T_s}{Q_N} I \end{cases} \quad (11)$$

令  $x = (U_1, U_2, f_{SOC})$ ,  $y = U_L$ , 则式(9)、(10)可写成:

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + BI_k \\ y_k = Cx_k + DI_k + U_{oc} \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$A = \begin{pmatrix} 1 - \frac{T_s}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{T_s}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} \frac{T_s}{C_1} \\ \frac{T_s}{C_2} \\ \frac{T_s}{Q_N} \end{pmatrix}$$

$$C = (-1, -1, 0), D = -R_0.$$

为了验证参数辨识的准确性,用 MATLAB 把式(9)-式(12)进行编程,由于当锂电池  $f_{SOC}$  处于较低水平时锂电池存在着化学浓差极化,所以为了能够更好地准确体现锂电池在正常工作下的端电压,取表 2 中所辨识的各个参数的前 18 行数据,即  $f_{SOC}$  在 0.05~0.95 区间内的数据,求平均得到:  $R_0 = 3.7 \text{ m}\Omega$ ,  $R_1 = 2.0 \text{ m}\Omega$ ,  $R_2 = 4.2 \text{ m}\Omega$ ,  $C_1 = 22.87 \text{ kF}$ ,  $C_2 = 469.79 \text{ kF}$ 。

将所得到的参数代入到建立的程序中,得出仿真电压与实测电压如图 8 所示,仿真电压与实测电压的误差曲线如图 9 所示。根据图 8 所示,能看出仿真电压和实测电压十分接近,并且随着时间的推移仿真电压与实测电压偏移较小,而通过图 9 能看出实测电压和仿真电压之间的误差最大不超过 0.05 V,说明参数辨识的结果是十分准确的。

如图 10 所示,为了能更好地体现二阶 RC 锂电池等效电路模型的优越性,利用同样的方法做出了锂电池戴维南等效电路模型,对其参数辨识之后,得到其仿真电压与实测电压的误差曲线图后,将其与二阶 RC 等效电路模型的仿真电压和实测电压的误差曲线图做对比。

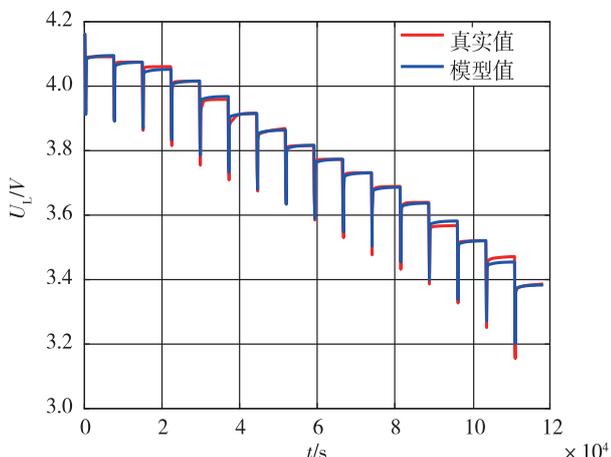


图 8 真实值和模型值对比图

Fig. 8 Comparison of true values and model values

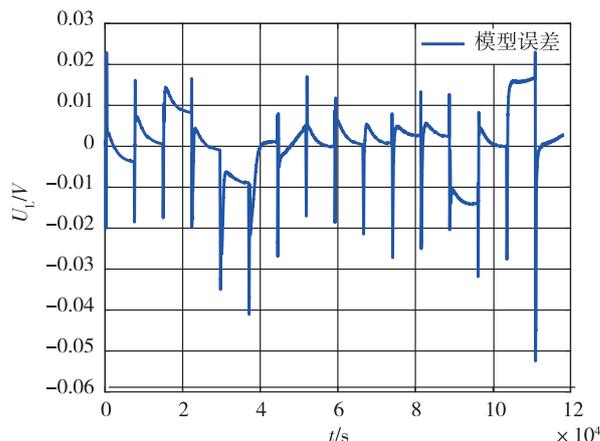


图 9 误差曲线图

Fig. 9 Error curves

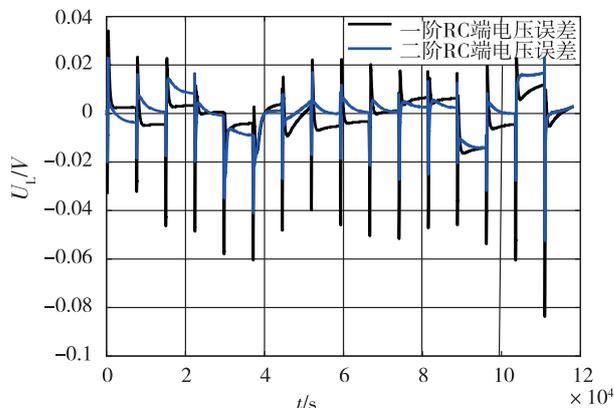


图 10 一阶与二阶的误差曲线图

Fig. 10 Error curves of first-order and second-order

通过图 10 可以发现二阶 RC 等效电路模型的精确度要比一阶 RC 等效电路模型更高,并且二阶 RC 等效电路模型的误差最大不超过 0.05 V,而一阶 RC 等效电路模型的最大误差却超过了 0.08 V,说明所搭建的二阶 RC 等效电路模型能够精准地体现出锂电池的动态特性。

### 5 结束语

本文通过脉冲放电实验得到锂电池的相关数据,在 MATLAB 上使用最小二乘算法对所建立的二阶 RC 等效电路进行参数辨识,并对不同 SOC 下锂电池各个参数的变化情况进行分析,通过计算锂电池的端电压来判断参数辨识的精确度,最后将辨识结果与戴维南等效电路模型所辨识的结果进行对比,并分析。随着锂电池 SOC 下降,锂电池的各个参数会有轻微的波动,在锂电池的 SOC 处在较低的水平时,锂电池的各个参数变化比较剧烈,这是由于锂电池的化学浓差极化所导致的,当将辨识的参数用来求解锂电池的端电压时,随着时间的推移,发现锂电池的端电压的误差波动比较稳定,且最大误差不超过 0.05 V,反观使用戴维南等

效电路模型求得锂电池的端电压误差波动比较大,且最大误差超过了 0.08 V。在锂电池参数辨识上二阶 RC 等效电路比戴维南等效电路更加准确,能够更好地描述锂电池的动静态特性,为后续对锂电池的荷电状态估计提供了有力的基础。

本文选取了三元锂电池作为研究对象,通过对电池模型进行比较选取了更能表现出锂电池动静态特性的二阶 RC 等效电路模型,接着利用充放电实验得出  $U_{oc}$  与  $f_{SOC}$  的对应数据,并将数据进行多项式非线性拟合,从而得到  $U_{oc}-f_{SOC}$  关系式,利用 MATLAB 将关系式做成直观的平面图后,得到  $U_{oc}-f_{SOC}$  的拟合曲线图,对二阶 RC 等效电路进行计算分析与脉冲放电实验数据以及最小二乘法相结合得出锂电池的各个参数辨识结果,并汇总成图表,为了确定所辨识参数的准确性,将参数辨识的结果代入求解锂电池端电压的公式中,通过误差结果可以看出对二阶 RC 等效电路模型进行参数辨识后,得到的结果比较准确可靠。

#### 参考文献(References):

- [1] 呼升. 三元锂电池在新能源汽车上的设计与应用[J]. 时代汽车, 2022(14): 122—124.  
HU Sheng. Design and application of ternary lithium battery in new energy vehicles[J]. Auto Time, 2022(14): 122—124.
- [2] 来鑫, 李云飞, 郑岳久, 等. 基于 SOC-OCV 优化曲线与 EKF 的锂离子电池荷电状态全局估计[J]. 汽车工程, 2021, 43(1): 19—26.  
LAI Xin, LI Yun-fei, ZHENG Yue-jiu, et al. Global estimation of lithium-ion battery state of charge based on SOC-OCV optimization curve and EKF[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(1): 19—26.
- [3] 胡浪, 乔俊叁, 何涛. 基于最小二乘向量机的锂离子电池建模及参数辨识研究[J]. 金属功能材料, 2021, 28(6): 52—56.  
HU Lang, QIAO Jun-san, HE Tao. Modeling and parameter identification of lithium-ion battery based on least squares vector machine[J]. Metal Functional Materials, 2021, 28(6): 52—56.
- [4] 关庆庆, 邢丽坤, 罗双. 关于锂离子电池 Thevenin 模型的仿真研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2019, 36(3): 72—76.  
GUAN Qing-qing, XING Li-kun, LUO Shuang. Simulation research on Thevenin model of lithium-ion battery[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2019, 36(3): 72—76.
- [5] 邵玉龙, 李龙, 周时国, 等. 电动汽车锂电池建模及参数辨识方法研究[J]. 客车技术与研究, 2022, 44(1): 13—16.  
SHAO Yu-long, LI Long, ZHOU Shi-guo, et al. Research on modeling and parameter identification method of lithium battery for electric vehicle[J]. Bus Technology and Research, 2022, 44(1): 13—16.
- [6] 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.  
WU Xiao-hui, ZHANG Xing-gan. Identification of second-order RC equivalent circuit model parameters of lithium batteries[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2020, 56(5): 754—761.
- [7] 王宇伟, 赵阳, 华迪, 等. 基于二阶等效电路模型的锂电池状态估计方法研究[J]. 节能, 2022, 41(4): 38—42.  
WANG Yu-wei, ZHAO Yang, HUA Di, et al. Research on state estimation method of lithium battery based on second-order equivalent circuit model[J]. Energy Conservation, 2022, 41(4): 38—42.
- [8] 薛喜红, 吴明江. 基于最小二乘法的动力锂离子电池参数识别[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(7): 72—75.  
XUE Xi-hong, WU Ming-jiang. Parameter identification of power lithium-ion battery based on least squares method[J]. Information and Computer(Theoretical Edition), 2022, 34(7): 72—75.
- [9] 秦东晨, 张东明, 王婷婷, 等. 电动汽车锂电池建模仿真及 SOC 估计研究[J]. 机械设计与制造, 2021(2): 164—168.  
QIN Dong-chen, ZHONG Dong-ming, WANG Ting-ting, et al. Modeling and simulation of lithium battery electric vehicle and SOC estimation[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021(2): 164—168.
- [10] ZHU Q, XIONG N, YANG M L, et al. State of charge estimation for lithium-ion battery based on nonlinear observer: An  $H_\infty$  method[J]. Energies, 2017, 10(5): 660—679.
- [11] 言理. 电动汽车动力电池荷电状态(SOC)的估算方法研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2016.  
YAN Li. Research on estimation method of electric vehicle power battery state of charge (SOC) [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2016.

责任编辑:陈芳