

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107545

# 基于锂电池等效电路模型的阻抗曲线拟合算法\*

黄海宏,汪宇航,王海欣

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

**摘要:**近些年利用电池阻抗谱(EIS)估算锂电池状态的研究取得了较大进展。本文提出了一种EIS等效电路模型参数提取算法,用于分析提取不同状态下的电池等效电路参数,具有简单、不易发散的优点。首先通过结合模型的物理意义计算获得等效电路模型参数初值,然后利用等效电路与EIS之间的映射关系进行迭代,从而实现了参数的提取。对比理论参考值,提取的关键参数的误差低于4.4%。为了获得锂电池在不同荷电状态下的EIS数据,利用电化学工作站在恒温状态下测量选用的磷酸铁锂电池,利用算法编写的软件实现等效电路参数的提取。通过对比不同荷电状态下的等效模型参数,在一定程度上验证了利用EIS快速估计锂电池状态的可行性。

**关键词:**磷酸铁锂电池;曲线拟合;阻抗谱;等效电路

中图分类号:TH89 TM93 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:470.40

## A novel impedance curve fitting algorithm for lithium batteries

Huang Haihong, Wang Yuhang, Wang Haixin

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:**In recent years, the great progress has been achieved in the estimation of lithium battery state using the electrochemical impedance spectroscopy (EIS). In this paper, an EIS equivalent circuit model parameter extraction algorithm is proposed to analyze the battery equivalent circuit parameters in different states, which has advantages of simplicity and good convergence. Firstly, the initial values of equivalent circuit model parameters are obtained by combining the physical meaning of the model. The mapping relationship between the equivalent circuit and EIS is used for iteration to extract parameters. Compared with the theoretical reference value, the error of the key parameter is less than 4.4%. To obtain the EIS data of lithium-ion battery under different states of charge, the electrochemical workstation is used to measure the EIS data of lithium-ion phosphate battery under constant temperature. Finally, by comparing the equivalent model parameters under different states of charge, the feasibility of using EIS to quickly estimate the state of lithium battery is verified to a certain degree.

**Keywords:**lithium-iron phosphate battery; curve fitting; impedance spectrum; circuit equivalent model

## 0 引言

近些年,电动汽车的研发、生产受到了全球的广泛关注,是新能源领域研究的热点对象。电动汽车逐渐走入了公众的视野,随之带来的是全球范围内退役汽车电池的数量急剧增加。如何分类处理退役电池成为了一个热门主题。

传统的退役电池分类方法是通过对退役电池进行完整的充放电,这种方法存在速度慢、能耗高等问题。针对退役电池分选存在的耗时多问题,虽然有学者提出了快速充电曲线分选方法<sup>[1]</sup>,但是减少的时间有限。近些年,通过电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)估算电池状态的研究取得了很大的进展,这为退役电池实现快速分类提供了新的思路。EIS是指测量不同频率下电池的内部阻抗的一种方法,具有

收稿日期:2021-02-28 Received Date: 2021-02-28

\* 基金项目:安徽省科技重大专项项目(18030901064)资助

快速、安全、低能耗的优点<sup>[2-3]</sup>。通常无法直接从 EIS 中获取锂电池荷电状态(state of charge, SOC)、健康状态(state of health, SOH), 所以首先需要建立等效电路与锂电池的 SOC、SOH 的相关性模型。通过 EIS 对应的等效电路模型(equivalent circuit model, ECM) 参数, 可以获得电池内部状况信息以及电池的老化程度。文献[4-5]指出 EIS 对应的 ECM 能够准确的反应锂电池的 SOH, 这奠定了利用 EIS 分类退役电池的基础。文献[6-7]指出了阻抗谱曲线与锂电池 SOC、SOH 之间关系。利用 EIS 估算电池状态的研究也取得了较大的进展。文献[8-9]指出了 ECM 与电池 SOC、SOH、温度之间的关系, 并指出 EIS 可以应用于二次电池分类领域。文献[10]提出了基于 ECM 参数估算 SOC 的神经网络算法, 并指出通过 EIS 对应的 ECM 参数估算 SOC 具有低能耗、快速的优点。针对 EIS 测量设备昂贵的问题, 文献[11]提出了利用廉价设备测量电池 EIS 数据的方法。文献[12]指出基于 ECM 参数能够正确的估计电池的状态, 并探究了实现估计的方法。

为了实现对退役电池的快速分类, 即对退役电池 SOH 的估算, 需要建立准确的 ECM, 提取 ECM 参数是十分重要的一步。文献[13-14]利用最小二乘法实现对阻抗谱曲线的提取, 但是由于需要矩阵运算, 所以存在不易收敛、运算量大的问题。文献[15-16]提出直接利用 ECM 的物理意义进行提取, 但是存在精度低的缺点。针对现有方法存在的收敛与精度不能同时兼顾的问题, 本文提出了基于 ECM 的 EIS 参数提取算法。

磷酸铁锂电池是退役汽车电池中应用最为广泛的一种, 具有能量密度高、性能稳定的优点<sup>[17-18]</sup>。本文选用磷酸铁锂电池作为研究对象, 基于典型的磷酸铁锂电池 ECM, 实现了 ECM 参数的提取。首先, 本文在等效电路模型部分描述了 EIS 的影响因素, 不同 EIS 曲线区域的含义以及选取的等效电路模型。接着, 本文描述了等效电路参数的初值选取和模型参数的提取方法。最后, 本文在实验与讨论部分验证了算法的有效性, 并且描述了 SOC 与选取的 ECM 参数之间的关系。本文通过结合 ECM 的物理意义获取拟合算法的初值, 然后进行迭代运算实现了 ECM 参数的提取。

## 1 等效电路模型

EIS 与 SOC、SOH、温度都有关系<sup>[8]</sup>, 图 1 和 2 分别展示了 EIS 随温度、容量的变化。

图 1 选用 14.85AH 的磷酸铁锂电池充放电至 SOC=50%, 并静置 1 h 后, 在不同温度下测量 EIS, 如图 1 所示, 不同温度下, EIS 电荷转移区存在明显的差异。温度对 EIS 曲线的影响较大, 所以探究容量与 EIS 关系的实验应该在恒温状态下进行。

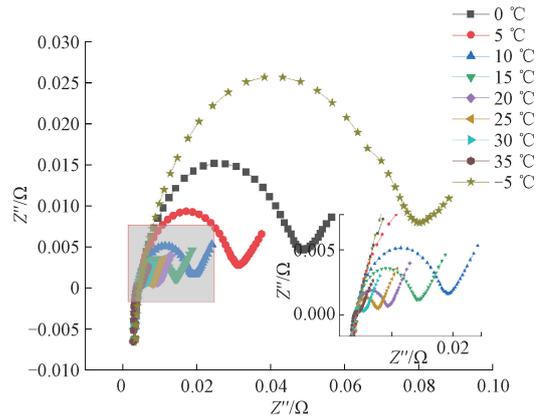


图 1 磷酸铁锂电池在不同温度下电化学阻抗谱曲线  
Fig. 1 Electrochemical impedance spectroscopy curves of lithium batteries at different temperatures

选取相同型号、不同剩余容量的磷酸铁锂电池充放电至 SOC=50%, 静置 0.5 h 后, 在 20 °C 时测量 EIS 曲线。如图 2 所示, 不同磷酸铁锂电池 EIS 曲线存在差异, 但变化规律不直观。通过曲线拟合提取 EIS 曲线电路等效模型参数, 可为估计 SOH 提供参考<sup>[3]</sup>。

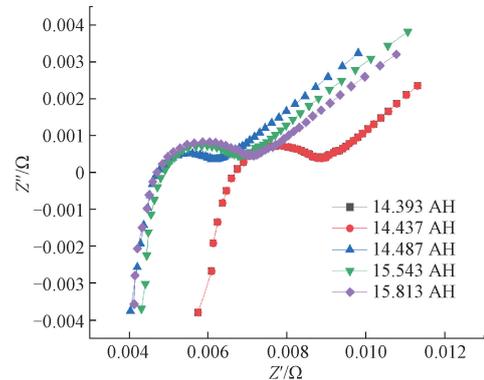


图 2 不同容量磷酸铁锂电池电化学阻抗谱曲线  
Fig. 2 Electrochemical impedance spectroscopy curves of lithium batteries with different capacities

如图 3 所示, ECM 中的不同元件对应阻抗谱曲线的不同区域。这种映射关系为等效电路模型参数的快速拟合提供了新的思路, 同时也为拟合算法初值参数的选取提供了依据。中频的电荷转移区域是高度非线性的, 这也是电路模型等效拟合十分困难的重要原因。

如图 4 所示, 选取的等效电路模型由电感  $L$ 、欧姆内阻  $R_s$ 、恒相位元件(constant phase element, CPE)、极化内阻  $R_{ct}$  以及 Warburg 阻抗组成。模型采用电阻与恒相位元件 CPE 并联来拟合电荷转移区域, CPE 在数学中的表达式如下所示:

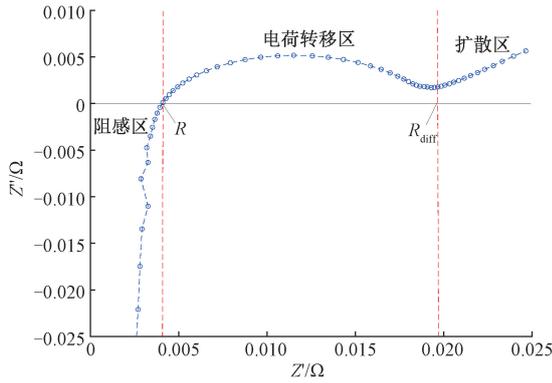


图3 电化学阻抗谱曲线

Fig. 3 Electrochemical impedance spectroscopy curve

$$Z_{CPE} = \frac{1}{(j\omega)^{N_r} Y} \quad (1)$$

式中:  $N_r$  为抑制因子, 通常取 0~1 之间的值。电荷转移区不是一个标准的半圆, 通过改变  $N_r$  的值可以改变电荷转移区被抑制半圆的扁平程度。

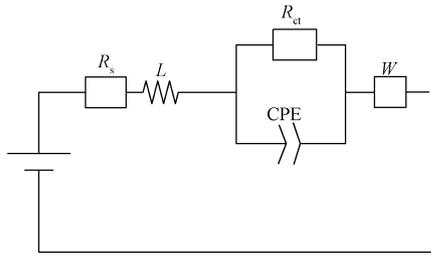


图4 等效电路模型

Fig. 4 Equivalent circuit model

高频阻感区域的阻抗可以用电阻与电感相串联进行映射。低频扩散区域由 Warburg 阻抗进行映射。其中  $W$  为 Warburg 阻抗, 是由等效电阻和电容串联所构成的等效元件。等效阻抗的电感和电容需满足:

$$\omega R_w C_w = 1 \quad (2)$$

$$R_w = \sigma \omega^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$C_w = \sigma^{-1} \omega^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$Z_w = R_w + C_w = \sigma \omega^{-\frac{1}{2}} - j \sigma \omega^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中,  $\sigma$  为 Warburg 系数, 扩散区的拟合通过 Warburg 阻抗实现。

综上, ECM 的阻抗可表述为:

$$Z = R_s + j\omega L + Z_{CT} + Z_w \quad (6)$$

$$Z_{CT} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ct}} + (j\omega)^{N_r} Y} \quad (7)$$

$$Z_{CT-re} = \frac{R_{ct} + \cos\left(\frac{\pi N_r}{2}\right) R_{ct}^2 Y \omega^{N_r}}{1 + 2\cos\left(\frac{\pi N_r}{2}\right) R_{ct} Y \omega^{N_r} + \omega^{2N_r} R_{ct}^2 Y^2} \quad (8)$$

$$Z_{CT-im} = \frac{-j \sin\left(\frac{\pi N_r}{2}\right) R_{ct}^2 Y \omega^{N_r}}{1 + 2\cos\left(\frac{\pi N_r}{2}\right) R_{ct} Y \omega^{N_r} + \omega^{2N_r} R_{ct}^2 Y^2} \quad (9)$$

## 2 ECM 参数初步计算

文献[9]中结合等效元件与 EIS 曲线的映射关系, 直接计算对应 ECM 参数。这种方法存在速度快, 不易发散的特点, 但是精度很低。如果利用等效元件与 EIS 曲线的映射关系计算迭代算法的初值, 能减少迭代的次数和易于算法的收敛。

$R_s$  初值的选取: 一般情况下, 锂电池测得的阻抗谱阻抗数据中, 虚部恰好等于 0 的可能性很低。如图 5 所示, 阻抗谱曲线与实轴的交点值可以将距离实轴最近的两个点之间连线近似为直线。

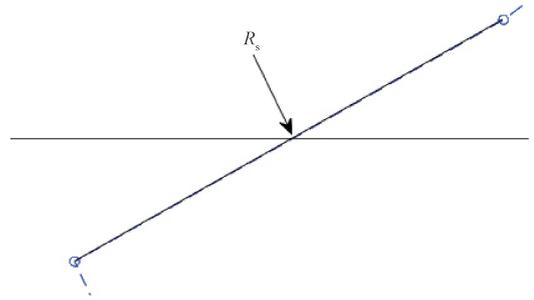


图5 欧姆内阻计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of  $R_s$  calculation

$$R_s = R \quad (10)$$

$R_{ct}$  初值的选取: 本文  $R_{ct}$  初值选取为电荷转移区与扩散区临界点所对应的横坐标  $R_{diff}$  与  $R_s$  的差值, 如图 3 所示。

$$R_{ct} = R_{diff} - R_s \quad (11)$$

CPE 元件  $N_r$  值的选取:

$$X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c = 0 \quad (12)$$

$$N_m = 1 - \frac{2}{\pi} \sinh \frac{b}{2r} \quad (13)$$

$$N_r = c_0 + c_1 N_m \quad (14)$$

式(12)是对电荷转移区半圆的拟合方程。式(13)中  $r$  为电荷转移区半圆的半径,  $c_0 + c_1 = 1$ ,  $c_1 > 0$ ,  $c_0 > 0$ 。式(14)的目的是抑制  $N_m$  变化速度过快。

扩散区是低频区域的阻抗数据, 通过 Warburg 阻抗

拟合, 则:

$$W = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \frac{\sum_{i=1}^m f_i^{-\frac{1}{2}} (Z'_i - R_{diff})}{\sum_{i=1}^m f_i^{-1}} \quad (15)$$

其中,  $m$  指发散区测得的阻抗数目;  $f$  指发散区的频率;  $Z'$  指发散区阻抗的实部。

### 3 ECM 参数提取算法

在模型完成初值初始化计算后, 需要对初始化后的值进行修正。此时不能独立的去修正等效模型的某一特定等效元件, 而应考虑到整体曲线的拟合。例如, 调整参数  $R_{ct}$  的值可以调整电荷转移区半圆的半径, 但是同时也会导致曲线和实轴的交点发生偏移, 此时需要调节参数  $R_s$  值去纠正这种偏移。

等效电路模型参数的修正过程是逐步逼近最优值的过程, 即不断降低最优值和实际值之间误差的过程。初值的选取部分是基于一定程度的理论计算的结果, 虽然粗略的理论计算不能直接将最优值精确的确定, 但是能快速确定最优值的范围, 这也是算法能快速收敛的重要原因。

$$R_s = R_s + c_1 \times (R_{sreal} - R_{sfit}) \quad (16)$$

如图 6 所示, 其中  $R_{sreal}$  是真实阻抗谱曲线与实轴交点;  $R_{sfit}$  是拟合阻抗谱曲线与实轴交点;  $c_1$  为迭代选取的系数, 介于 0~1 之间。  $c_1$  值越大, 算法的收敛速度越快, 但同时也会带来精度下降以及增加迭代发散的可能性。

$$R_{ct} = R_{ct} + c_2 \times (R_{diff1} - R_{diff2}) \quad (17)$$

其中,  $R_{diff1}$  是真实阻抗谱曲线与实轴交点;  $R_{diff2}$  是拟合阻抗谱曲线与实轴交点;  $c_2$  为迭代选取的系数, 介于 0~1 之间。

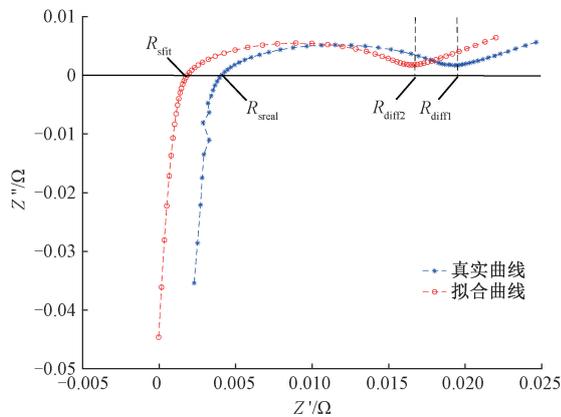


图 6 曲线迭代示意图

Fig. 6 Diagram of curve iteration

在理论计算获得 ECM 参数初值后, 根据式 (16)~(20) 展开算法迭代直至满足设置的收敛条件, 由于阻抗谱曲线拟合中电荷转移区域的拟合对 SOC、SOH 的参考意义较大, 所以本文提出的收敛条件中加入了  $R_s$  精度是否满足要求。此外, 算法的收敛条件中还需要考虑整体的拟合效果, 可以利用均方根误差作为判断收敛的条件之一。

$$F = \frac{Z' - R_s}{Z''} \quad (18)$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^k \log F_i + n \sum_{i=1}^k \log f_i}{m} \quad (19)$$

$$Y = \frac{1}{(2\pi)^n R_{ct} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) e^c} \quad (20)$$

其中,  $Z'$  为测得的真实电荷转移区阻抗实部;  $Z''$  为测得的真实电荷转移区阻抗虚部的相反数;  $k$  是指电荷转移区所测得的阻抗数目。

图 7 为拟合结果, 其中圆形点为拟合曲线, 星形点为真实曲线, 实际阻抗与等效模型的阻抗之间的误差较小。这验证了本文所选取模型和本文所提出的拟合算法的正确性。

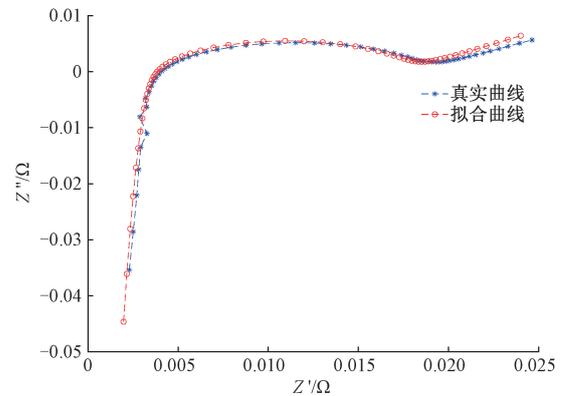


图 7 拟合结果

Fig. 7 Fitting results

### 4 实验与讨论

如图 8 所示, 采用新威公司生产的电池充放电装置对磷酸铁锂电池进行充放电实验, 在不同的 SOC 状态下利用武汉科思特公司生产的 CS350H 电化学工作站 (电位分辨率: 10  $\mu$ V, 电流分辨率: 1 pA) 测量其阻抗谱曲线, 并编写出 VB.net 上位机拟合程序。

为了验证算法的有效性, 需要验证算法对参数提取的准确程度, 为此设计了如下实验:

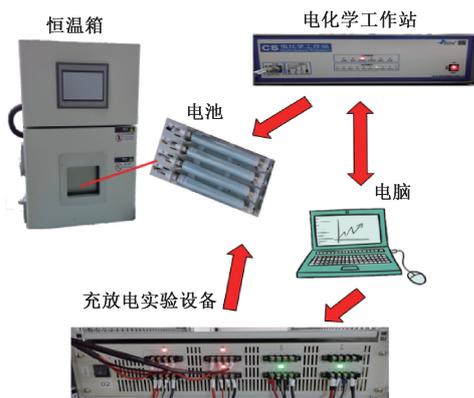


图8 阻抗谱测量平台

Fig. 8 EIS measurement platform

1) 选取一组 ECM 参数值,利用式(6)计算 ECM 在不同频率下的阻抗值,获得 EIS 数据。

2) 利用编写的 VB.net 程序从获得的 EIS 数据中提取 ECM 参数与直接 ECM 参数等效方法进行对比。

其中,恒相位元件是本文选取的 ECM 模型所主要关注的参数。如表 1 所示, $R_s$ 、 $R_{ct}$ 、 $Y$  和  $N_T$  的提取效果相比 ECM 直接等效方法所获得的 ECM 参数更加精准。这是由于在算法迭代部分对  $R_s$ 、 $R_{ct}$ 、 $Y$  和  $N_T$  参数进行了修正。并且本文算法由于不需要进行繁杂的矩阵运算,能够避免拟合过程中矩阵不可逆时的拟合失败问题。根据需求选取对应的参数进行修正,但是需要考虑修正的顺序及修正参数之间的联系。

表 1 ECM 实际参考值和算法拟合值

Table 1 Actual reference value and algorithm fitting value of ECM

	$R_s/\Omega$	$R_{ct}/\Omega$	$Y$	$W$	$L/H$	$N_T$
参考值	0.003 38	0.002 3	5.662	0.001 393	$1.55 \times 10^{-6}$	0.745 9
改进算法提取值	0.003 49	0.002 2	5.622	0.003 601	$4.63 \times 10^{-7}$	0.739 9
ECM 直接提取值	0.003 72	0.003 1	1.926	0.003 601	$4.63 \times 10^{-7}$	0.619 0

为了获得 SOC 与 ECM 参数之间的变化趋势,选取一节容量为 14.85 AH 的磷酸铁锂电池开展实验。

1) 首先,将获得的电池进行完整的充放电至 SOC = 10%,然后静置 1 h 后利用电化学工作站测量阻抗谱数据。

2) 测量结束后继续将电池以 10 A 电流充电至 SOC = 20%,再静置 1 h 后测量阻抗谱数据。如此循环直到获得 SOC = 90% 时阻抗谱数据。

将测量所得的阻抗谱数据导入 VB.net 程序中进行电路等效模型拟合。图 9 为利用 VB.net 程序拟合获得等效电路参数后利用 Origin 软件绘制的拟合结果示意图,方形点为电化学工作站测得的真实阻抗谱数据曲线,圆形点为拟合后的阻抗谱曲线。如图 9 所示,真实阻抗谱数据曲线得到了很好的拟合。

通过计算均方根误差来验证算法的拟合程度,即:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{Z_{fit}(i)}{Z_{real}(i)}\right)^2} \quad (21)$$

其中, $N$  是指采样阻抗的总数目, $N = 60$ ;  $Z_{fit}$  为拟合产生的阻抗值; $Z_{real}$  为真实的阻抗值。图 9 中拟合后的均方根误差值为 0.07,从而验证了本文提出算法的可行性。

表 2 为本文选用的磷酸铁锂电池在不同 SOC 状态下的 ECM 参数拟合结果。图 10 为等效电路参数与 SOC 之间关系曲线,图 10(a)中,欧姆内阻  $R_s$  随 SOC 增大有

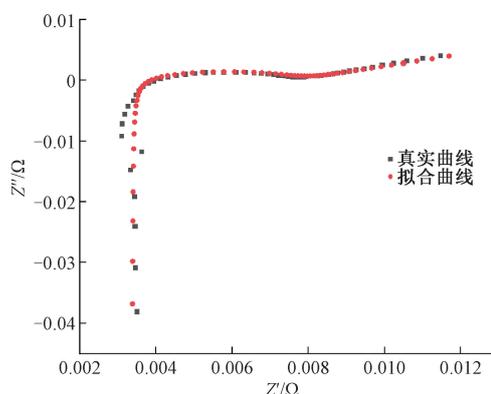


图9 VB.net 程序 EIS 曲线拟合结果

Fig. 9 Fitting results of EIS curve with VB.net program

增大的趋势,欧姆电阻  $R_s$  与锂电池的容量存在一定的线性关系。同时,电池表面接触部分会随着使用次数的增加而产生磨损氧化最终导致欧姆电阻  $R_s$  增加。但是由于  $R_s$  和接触电阻大小都是毫欧级, $R_s$  十分容易受到接触电阻的影响,这造成了准确测量  $R_s$  存在困难。电荷转移区所对应的等效元件为极化内阻和恒相位元件,这个区域受到接触电阻的影响较小。 $R_{ct}$  的物理意义可以理解锂离子通过固体电解质膜(solid electrolyte interphase, SEI)的电阻。根据电池老化的机理,在循环过程中,SEI 膜的不断分解与重构会导致 SEI 膜增厚,从而导致  $R_{ct}$  的变化。由于 SEI 膜等效的双层电容的迁徙,引入了恒相

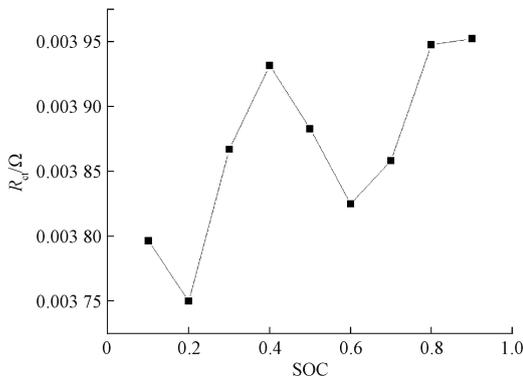
位元件。 $R_{ct}$  会随着电池的老化而增大,同时, $Y$ 、 $N_f$  会随着电池的老化而降低,所以  $R_{ct}$  和恒相位元件是分析电池状态的重要参数<sup>[6]</sup>。Warburg 阻抗反映了锂离子的扩散过程,包括固体扩散和液体扩散。由于本文未对 Warburg 阻抗进行修正,所以 Warburg 阻抗的提取效果较差。不同的容量和不同 SOC 状态下的锂电池 EIS 曲线的半圆的

半径、扁平程度会存在差异,这是造成极化内阻和恒相位元件参数值变化的原因。图 10(b) 中  $R_{ct}$  在 SOC = 50% 左右增大趋势开始缓和,从图 10(c) 和(f) 可以看出,恒相位元件与 SOC 在 10% ~ 80% 之间存在一定程度的线性关系。电感  $L$  与 EIS 曲线的虚部的最小值有关,与 SOC、SOH 联系并不紧密,所以提取的准确性要求不高。

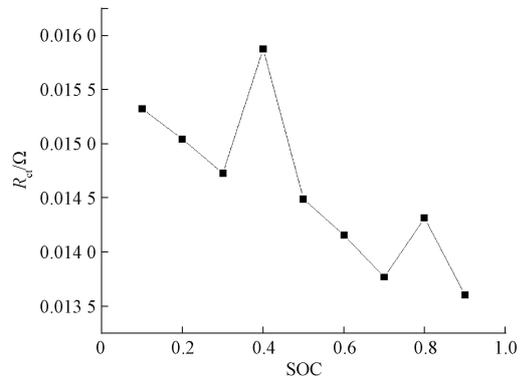
表 2 磷酸铁锂电池 14.85 AH 在 10°C 拟合结果

Table 2 Fitting results of 14.85 AH lithium iron phosphate battery at 10°C

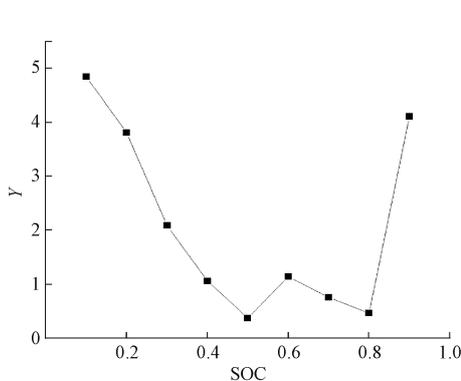
SOC	$R_s/\Omega$	$R_{ct}/\Omega$	$Y$	$W$	$L/H$	$N_f$
0.1	0.003 80	0.015 33	4.849 41	0.002 17	$4.28 \times 10^{-7}$	0.789 23
0.2	0.003 75	0.015 04	3.811 07	0.001 94	$1.37 \times 10^{-6}$	0.798 00
0.3	0.003 87	0.014 73	2.086 70	0.001 97	$5.93 \times 10^{-7}$	0.809 73
0.4	0.003 93	0.015 88	1.060 33	0.002 16	$2.74 \times 10^{-6}$	0.817 42
0.5	0.003 88	0.014 49	0.371 58	0.001 92	$4.82 \times 10^{-7}$	0.825 27
0.6	0.003 83	0.014 16	1.141 88	0.001 80	$1.20 \times 10^{-6}$	0.819 65
0.7	0.003 86	0.013 77	0.757 86	0.001 83	$7.19 \times 10^{-7}$	0.822 80
0.8	0.003 95	0.014 32	0.464 19	0.001 99	$3.66 \times 10^{-7}$	0.833 38
0.9	0.003 95	0.013 60	4.110 90	0.001 94	$1.76 \times 10^{-6}$	0.802 21



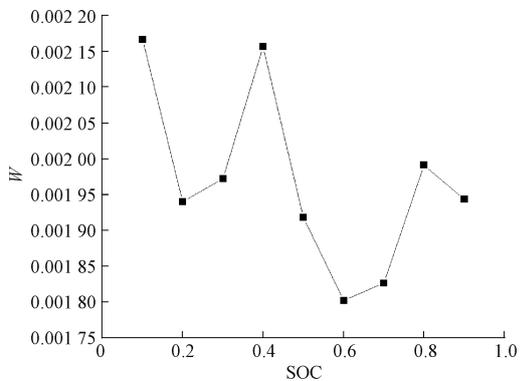
(a) 欧姆内阻  $R_s$  与 SOC 关系  
(a) Relationship between  $R_s$  and SOC



(b) 极化内阻  $R_{ct}$  与 SOC 关系  
(b) Relationship between  $R_{ct}$  and SOC



(c) 恒相位元件  $Y$  与 SOC 关系  
(c) Relationship between  $Y$  and SOC



(d) Warburg 阻抗与 SOC 关系  
(d) Relationship between Warburg and SOC

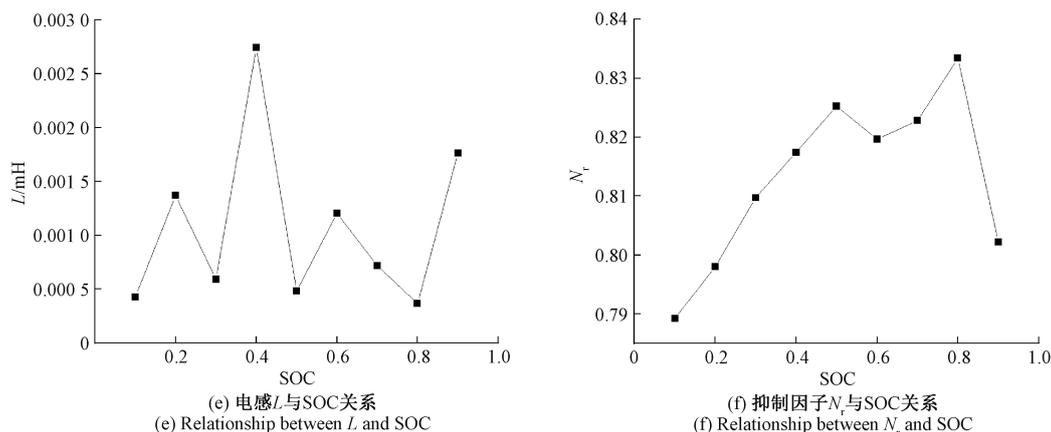


图 10 等效电路参数与 SOC 关系

Fig. 10 Relationship between equivalent circuit parameters and SOC

表征锂电池内部状态的 SOC 和 SOH 的准确估计一直受到广泛关注<sup>[19-20]</sup>。近些年,不同学者对利用锂电池的 ECM 阻抗参数估算锂电池状态进行了广泛研究<sup>[21]</sup>。在恒定温度下,ECM 的元件参数与 SOC 呈现一定的相关性,准确的拟合电路等效模型有利于 SOC 与模型参数关系的准确建模,从而更加准确的依据模型参数对退役电池 SOC 进行估计。相应的,从图 10 中可以看到,仅依靠某一特定的 ECM 参数对退役电池状态的估算较为困难,有学者提出了考虑多种 ECM 参数对退役电池状态的 SOC 的估算方法<sup>[22]</sup>。同时,为了实现通过 ECM 参数估算退役电池 SOH 的状态,需要将温度、ECM 参数、SOC 因素综合考虑,结合本文参数提取算法建立退役电池的 SOH 的综合估算模型,从而易于通过 EIS 实现退役电池的快速分类,这将是本文后续的研究方向。

## 5 结 论

本文介绍了等效电路模型的选取、模型初值的选取、迭代算法以及通过实验验证了拟合算法的可行性和描述了等效电路模型准确拟合的意义。同时,对于不同的应用环境需求,使用者可以根据目的选择不同的收敛。本文提出的算法也存在一定缺陷,针对不同的电路模型,其初值选取、迭代原则存在差异,参数提取的精度也存在提高的空间,但为阻抗谱曲线的拟合提供了新的思路。

### 参考文献

[1] 郑岳久,李家琦,朱志伟,等. 基于快速充电曲线的退役锂电池模块快速分选技术[J]. 电网技术, 2020, 44(5):1664-1673.  
ZHENG Y J, LI J Q, ZHU ZH W, et al. Fast sorting technology of retired lithium battery module based on fast charging curve [J]. Power Grid Technology, 2020,

44 (5): 1664-1673.

- [2] LVOVICH V, WU J, BENNETT W, et al. Applications of AC impedance spectroscopy as characterization and diagnostic tool in li-metal battery cells [J]. The Electrochemical Society Transactions, 2014, 58 (22): 1-14.
- [3] ISLAM S M R, PARK S Y. Precise online electrochemical impedance spectroscopy strategies for Li-Ion batteries [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1661-1669.
- [4] XIA Z, QAHOUQ J A A. Evaluation of parameter variations of equivalent circuit model of lithium-ion battery under different SOH conditions[C]. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2020:1519-1523.
- [5] 张连德. 基于电化学阻抗谱的三元锂离子电池状态估计研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.  
ZHANG L D. State estimation of ternary lithium-ion battery based on electrochemical impedance spectroscopy [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [6] 戴海峰,王冬晨,姜波. 基于电化学阻抗谱的电池荷电状态估计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(S1):95-98.  
DAI H F, WANG D CH, JIANG B. Estimation of battery state of charge based on electrochemical impedance spectroscopy [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2019, 47 (S1): 95-98.
- [7] WESTERHOFF U, KROKER T, KURBACH K, et al. Electrochemical impedance spectroscopy based estimation of the state of charge of lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 8:244-256.
- [8] CHOI W, SHIN H C, JI M K, et al. Modeling and applications of electrochemical impedance spectroscopy

- (EIS) for lithium-ion batteries [J]. Journal of Electrochemical Science and Technology, 2020, 11(1): 1-13.
- [ 9 ] PASTOR-FERNANDEZ C, WIDANAGE W D, MARCO J, et al. Identification and quantification of ageing mechanisms in lithium-ion batteries using the EIS technique[C]. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2016:1-6.
- [10] MESSING M, SHOA T, AHMED R, et al. Battery SOC estimation from EIS using neural nets[C]. 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), 2020: 588-593.
- [11] ALAVI S, BIRKL C R, HOWEY D A. Time-domain fitting of battery electrochemical impedance models[J]. Journal of Power Sources, 2015, 288:345-352.
- [12] VYROUBAL P, KAZDA T. Equivalent circuit model parameters extraction for lithium-ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 15:23-31.
- [13] CHOI W, SHIN H C, JI M K, et al. Modeling and applications of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for lithium-ion batteries [J]. Journal of Electrochemical Science and Technology, 2020, 11(1): 1-13.
- [14] 邝文静. 基于 MFC 的交流阻抗数据处理软件[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
- KUANG W J. AC impedance data processing software based on MFC [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [15] SIHVO J, ROINILA T, MESSO T, et al. Novel online fitting algorithm for impedance-based state estimation of Li-ion batteries [C]. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2019: 4531-4536.
- [16] ISLAM S M R, PARK S Y, BALASINGAM B. Circuit parameters extraction algorithm for a lithium-ion battery charging system incorporated with electrochemical impedance spectroscopy[C]. 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2018: 3353-3358.
- [17] MUELLER K, TITTEL D, GRAUBE L, et al. Optimizing BMS operating strategy based on precise SOH determination of lithium-ion battery cells [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013, 192:807-819.
- [18] MURARIU T, MORARI C. Time-dependent analysis of the state-of-health for lead-acid batteries: An EIS study [J]. The Journal of Energy Storage, 2019, 21: 87-93.
- [19] 郑雪莹, 邓晓刚, 曹玉苹. 基于能量加权高斯过程回归的锂离子电池健康状态预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 63-69.
- ZHENG X Y, DENG X G, CAO Y P. Prediction of lithium-ion battery health status based on energy weighted Gaussian process regression [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 ( 6 ): 63-69.
- [20] 赵天意, 彭喜元, 彭宇, 等. 改进卡尔曼滤波的融合型锂离子电池 SOC 估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7):1441-1448.
- ZHAO T Y, PENG X Y, PENG Y, et al. SOC estimation method of fusion lithium-ion battery based on improved Kalman filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 ( 7 ): 1441-1448.
- [21] 刘大同, 宋宇晨, 武巍, 等. 锂离子电池组健康状态估计综述[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11):1-18.
- LIU D T, SONG Y CH, WU W, et al. Review of health state estimation of lithium-ion batteries [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41 ( 11 ): 1-18.
- [22] XIA Z, ABU QAHOUC J A. Adaptive and fast state of health estimation method for lithium-ion batteries using online complex impedance and artificial neural network[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2019: 3361-3365.

## 作者简介



**黄海宏**(通信作者),分别于1996年和1999年获合肥工业大学学士和硕士学位,2011年从中国科学院合肥物质科学研究院获得博士学位,现为合肥工业大学教授,主要研究方向为电力电子技术和自动控制。  
E-mail: hhaihong741@126.com

**Huang Haihong** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hefei University of Technology in 1996 and 1999, and received his Ph. D. degree from Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences in 2011. He is currently a professor at Hefei University of Technology. His research interests include power electronics and automation.



**汪宇航**,2019年于合肥工业大学获得学士学位,现为合肥工业大学硕士研究生,主要研究方向为电工理论与新技术。  
E-mail: 1298764646@qq.com

**Wang Yuhang** received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2019. He is currently a master student at Hefei University of Technology. His main research interests include electrical theory and new technology.