

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210891

# 基于储能电池电化学阻抗谱宽频测量方法的研究\*

黄海宏, 罗磊

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

**摘要:**电化学阻抗谱(EIS)可以较为准确地反应储能电池内部的电化学参数。为解决传统测量方法耗时长问题,采用了宽频激励信号测量储能化学电池阻抗信息的方法,并基于 MATLAB-Simulink 仿真平台和 EIS 测量试验平台进行验证,该测量方法将宽频交流扰动信号注入储能电池,并通过快速傅里叶变换方法分解处理宽频激励和响应信号来获取各频点的电池阻抗信息,以此大幅节省电池 EIS 的测量时间。采用两种宽频激励方法测量了电池等效电路模型和储能电池,相较电化学工作站扫频测量方法,可分别节省 60% 和 78% 的测量时间,且测量结果误差较小。用宽频激励方法实现电池 EIS 快速测量,可为电池管理系统的实时诊断和线上检测等更为广阔的应用场景提供技术支撑。

**关键词:** EIS; 储能化学电池; 宽频激励信号; 快速傅里叶变换

**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

## Research on the broadband measurement method based on electrochemical impedance spectrum of energy storage battery

Huang Haihong, Luo Lei

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

**Abstract:** Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) can reflect the electrochemical parameters inside the energy storage cell more accurately. To solve the time-consuming problem of traditional measurement methods, a method of measuring impedance information of energy storage battery with broadband excitation signal is adopted and validated by simulation based on MATLAB Simulink platform and EIS measurement test platform. This method injects a broadband AC signal into the battery. Fast Fourier transform decomposition of broadband AC signals is utilized to obtain battery impedance information at each frequency point to significantly reduce the measurement time of electrochemical impedance spectroscopy. In this article, two broadband excitation methods are used to measure the battery equivalent circuit model and the energy storage battery. Compared with electrochemical workstation sweep measurement methods, measurement time can be saved by 60% and 78%, respectively, and the measurement result error is small. The rapid measurement of battery EIS with broadband excitation measurement method can provide technical support for broader application scenarios such as real-time diagnosis and on-line inspection of battery management systems.

**Keywords:** energy storage chemical battery; broadband excitation signal; electrochemical impedance spectroscopy; fast Fourier transform

## 0 引言

随着储能电池被广泛应用于新能源发电和电网调峰调频等诸多领域,由储能电池健康状况所引发的系列问题可能会导致用电设备的性能下降或完全失效,产生巨大的危害<sup>[1]</sup>。如何实现电池健康状况科学而快速的估计

和预测,对于进一步构建电池的状态监测和健康管理系  
统,有着重要意义。

目前化学储能电池的监测方法有容量增量分析法、差分电压分析法、放电电压平台法、内阻-容量轨迹法、静置时间分布法等<sup>[2-3]</sup>,测量周期较长,限制了其工程应用范围。此外极化曲线法、电流中断法、循环伏安法和电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)法

等也有广泛应用场合。电池的运行伴随着其内部物质副反应物不断累积,会发生不可逆的老化和阻抗增加<sup>[4]</sup>,而EIS检测可更有效的将此复杂的电化学过程分解为一系列基于不同弛豫时间的基本过程,所以在电池电化学研究中应用较为广泛。

目前EIS测量普遍采用扫频法,即依次注入不同频率的正弦激励信号,扫频法具有激励信号易获取、信噪比高、数据解析准确性高等优点,但由于测量耗时长,电池状态可能会在测量过程中发生变化,从而难以获得实时信息,且会限制其在实时诊断和线上监测等场景下的应用<sup>[5-6]</sup>。文献[7]使用了双脉冲激励信号测算阻抗谱。文献[8]提出了基于神经网络算法,获取300、60和1 Hz频点处的阻抗信息估算退役电池的SOH,这些研究普遍关注在1 Hz以上频域内的电池阻抗信息,而在(0.01~1 Hz)频域内的阻抗信息同样含有的大量与电池荷电状态、健康度和剩余寿命相关的特征信息<sup>[9]</sup>。在宽频信号测量方法方面,离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)及其改进算法,具有计算量小、可靠性高、装置易实现等优点<sup>[10]</sup>,然而在数据处理量较大时,DFT运算耗时较长。最大熵谱估计、旋转不变技术<sup>[11]</sup>等新算法也被用于宽频信号处理中,具有较强时域动态特性和超分辨率特性,但由于计算过程复杂,硬件性能要求过高,限制了其应用场景。文献[12]采用方波信号作为宽频激励进行检测,然而信号处理后各频率分量幅值差异较大,会影响EIS测量精度。

为了实现在缩减EIS测量时间的同时保证较高测量精度,本文采用宽频合成激励信号,以减少激励次数和测量时间,并采用还原度较高的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分解处理,以实现EIS快速检测,并通过仿真和试验验证该方法的有效性,给出结论。

## 1 快速阻抗谱测试

### 1.1 宽频激励EIS测量

EIS是一种将不同频率的小幅度正弦波干扰信号施加在电化学系统上的非侵入式测量技术,可用来研究电化学系统的老化现象,同时可提供关于电极界面的动力学和结构的丰富信息,非常适合电池系统的检测。电极反应过程中快速步骤的响应由高频部分的阻抗谱反映,而慢速步骤的响应由低频部分的阻抗谱反映,由此可以从阻抗谱中显示的弛豫过程的时间常数的个数及其数值大小,获得各步骤的动力学信息和电极表面状态变化的信息<sup>[13-15]</sup>。目前电池EIS测量多采用扫频法,即依次注入不同频率的单频正弦测量信号,测量频域普遍选择0.01 Hz~1 kHz,该方法具有尺度好、精度高等优点,但由于各频率点的阻抗信息需分别检测,导致累计测量时间较长。为实现

EIS快速检测,同时保证测量精度,本文采用宽频激励信号测量法,将多频率检测信号合成为一个宽频检测信号,再通过傅里叶变换方法处理运算,以获取各频率点下的阻抗谱,实现单次激励获得全频域下的阻抗信息,以此大幅缩减测量时间,实现电池EIS快速测量。

### 1.2 等效电路模型

等效电路模型(equivalent circuit model, ECM)是使用简单的电路元件来等效从化学储能电池中测量提取的EIS数据以及奈奎斯特图趋势,以表征电池内部的复杂化学过程<sup>[16]</sup>。模型中常用电解电阻 $R_s$ 、电感 $L_s$ 、双层电容 $C_{dl}$ 、转移电阻 $R_{ct}$ 、扩散阻抗等参数来对应不同频域的阻抗变化趋势,以表达电池内部不同频域内的化学性质<sup>[17]</sup>。本文在文献[18-19]介绍的电池ECM基础上搭建宽频激励测量模型。

### 1.3 傅里叶分解

傅里叶变换能够实现时域到频域相互转换,可以从原始信号中提取出各频点的信号分量信息,把对原始信号的研究转化为对不同频率信号分量的研究,符合宽频激励测量EIS的高精度要求。为了避免周期延拓分量相互重叠,需保证较高的信号采样频率,在0.01~1 kHz频域的应用场景中,当采样频率高于10 kHz时可获得较高的精度,而此量级下的数据处理,FFT相较于DFT所占用的运算资源对比如表1所示,可知FFT在处理大量数据时会大幅节省运算资源和时间,本文采用FFT算法处理宽频信号。

表1 DFT与FFT运算量对比

Table 1 Comparison of DFT and FFT operations

复数运算次数	DFT	FFT
加法	$N \times (N-1)$	$N \times \log_2 N$
乘法	$N^2$	$(N \times \log_2 N) / 2$

注: $N$ 为采样点数

### 1.4 方波激励信号测量法

由傅里叶公式(式(1))可知方波信号可以分解为1、3、5、7、9、11次等奇次谐波,且在每个数量级频域内可均匀获取5个频点处的信号分量,具有较好的尺度特性。将宽频激励测量信号注入电池等效电路模型,得到对应的响应信号,通过FFT分解,可均匀获取0.01 Hz~1 kHz频域内的阻抗谱信息如图1所示。

$$f(t) = \frac{4a}{\pi} \left( \sin\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \frac{1}{7}\sin 7\omega t + \dots \right) = \frac{4a}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{2n-1} \right) \sin[(2n-1)\omega t] \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为方波信号函数; $a$ 为方波幅值; $\omega$ 为信号角频率。

电池 EIS 测量频域区间始于 0.01 Hz, 所以将方波激励信号周期设为 100 s。由式 (1) 可知, 经 FFT 分解获得高次谐波分量的幅值较小, 于是将方波激励信号幅值设为 10 V, 分解获取信号幅频信息如图 1 所示, 基次谐波幅值为 12.7 V, 而在 498.9 Hz 频点处的信号分量幅值仅为 0.025 6 V。由于电池的内阻值很小, 激励幅值差异过大, 不但给幅值很小的高次谐波分量的提取与处理环节带来很大困难, 且会严重影响测量精度。于是以频域尺度下的每个数量级为标准来设定方波信号频率的方法进行测量。电池在 0.01 ~ 0.09 Hz 频域内的阻抗信息通过 0.01 Hz 的方波激励信号测取, 激励和响应信号分解情况如图 2 和 3 所示, 依次递推可获取 0.1 ~ 0.9 Hz、1 ~ 9 Hz 等频域内的阻抗信息。如此, 方波激励测量法可以通过减少测量激励次数, 来实现电池 EIS 快速检测。

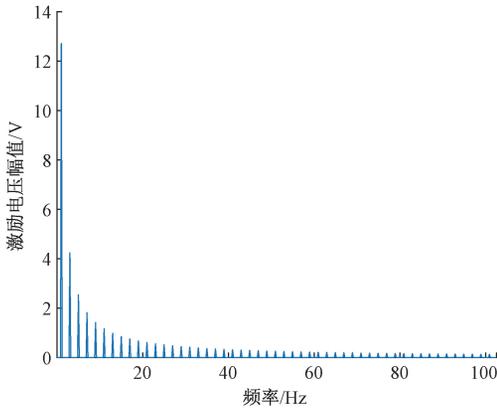


图 1 方波激励信号 FFT 分解幅频图

Fig. 1 Square wave excitation signal FFT decomposition amplitude and frequency diagram

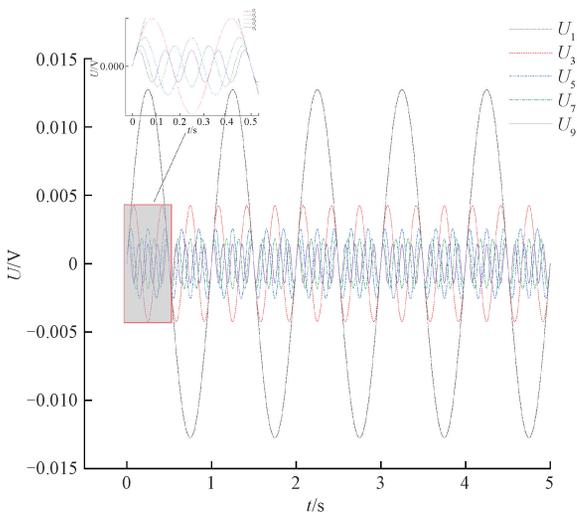


图 2 方波激励电压信号 FFT 分解 1、3、5、7、9 次谐波信号  
Fig. 2 FFT decomposition of the 1st, 3rd, 5th, 7th and 9th harmonics of the square wave excitation voltage signal

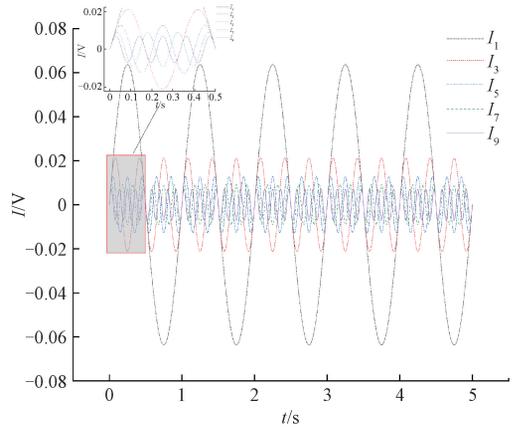


图 3 方波激励响应信号 FFT 分解各次谐波信号  
Fig. 3 Square wave excitation response signal FFT decomposition of each harmonic signal

### 1.5 等幅宽频合成激励信号测量法

为进一步压缩 EIS 检测时间, 将 0.01 ~ 1 kHz 频域内所有频点下等幅激励信号压缩为一个宽频激励信号如图 4 所示, 将其注入等效电路模型, 可获得一个相应的宽频响应信号。采用 FFT 分解宽频激励和响应信号, 可以很好的获取 0.01 Hz ~ 1 kHz 频域内各频点下的信号分量信息, 幅频信息如图 5 和 6 所示。

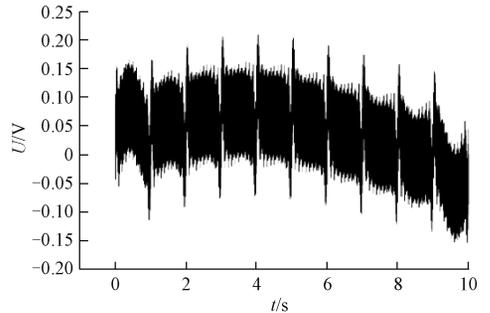


图 4 等幅宽频合成激励信号

Fig. 4 Equal amplitude and wide frequency synthesized excitation signal

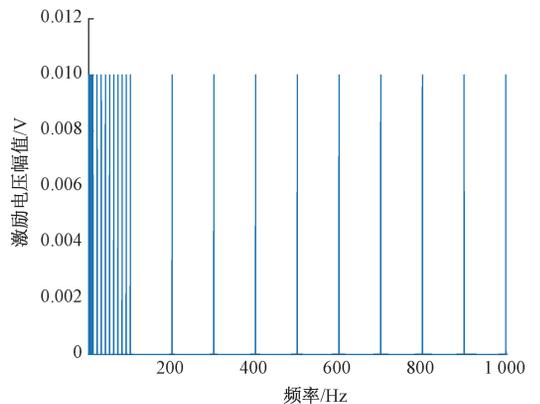


图 5 宽频激励电压信号分解幅频图  
Fig. 5 Wide-band excitation voltage signal decomposition amplitude and frequency diagram

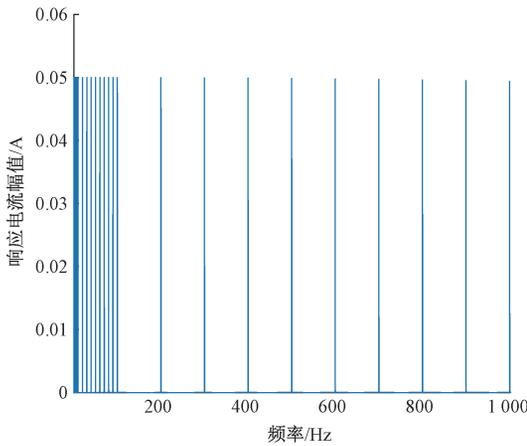


图6 宽频响应电流信号分解幅频图

Fig. 6 Wide-band response current signal decomposition amplitude frequency diagram

可知,各频点处信号分量的幅值差异较小,可准确的获取各频点的阻抗信息,且该方法仅需单次注入激励,可进一步提升电池 EIS 检测速度。

## 2 仿真及结果分析

### 2.1 仿真方案设计

本文基于 MATLAB-Simulink 软件,仿真试验流程如图 7 所示。首先采用传统扫频测量方式,直接获得各频点阻抗信息;再分别采用等幅宽频激励信号和方波激励信号方法测量测量阻抗,并通过 FFT 分解激励和响应信号,获取各频点阻抗信息,对比误差。

### 2.2 方波激励信号测量仿真

将 0.01、0.1、1、10、100 Hz 等频率的方波激励信号,依次注入电池一阶等效电路模型,通过 FFT 分解运算获取各方波激励信号的 1、3、5、7、9 次谐波分量对应频点处的阻抗信息。其次将各频率的方波电压激励信号逐个分解处理,并分别选取如表 2 所示的 1、3、5、7、9 次谐波分量的幅值,作为扫频测量法的激励幅值,依次将合计 26 个频点的正弦激励信号以扫频法注入一阶等效电路模型测取阻抗信息。

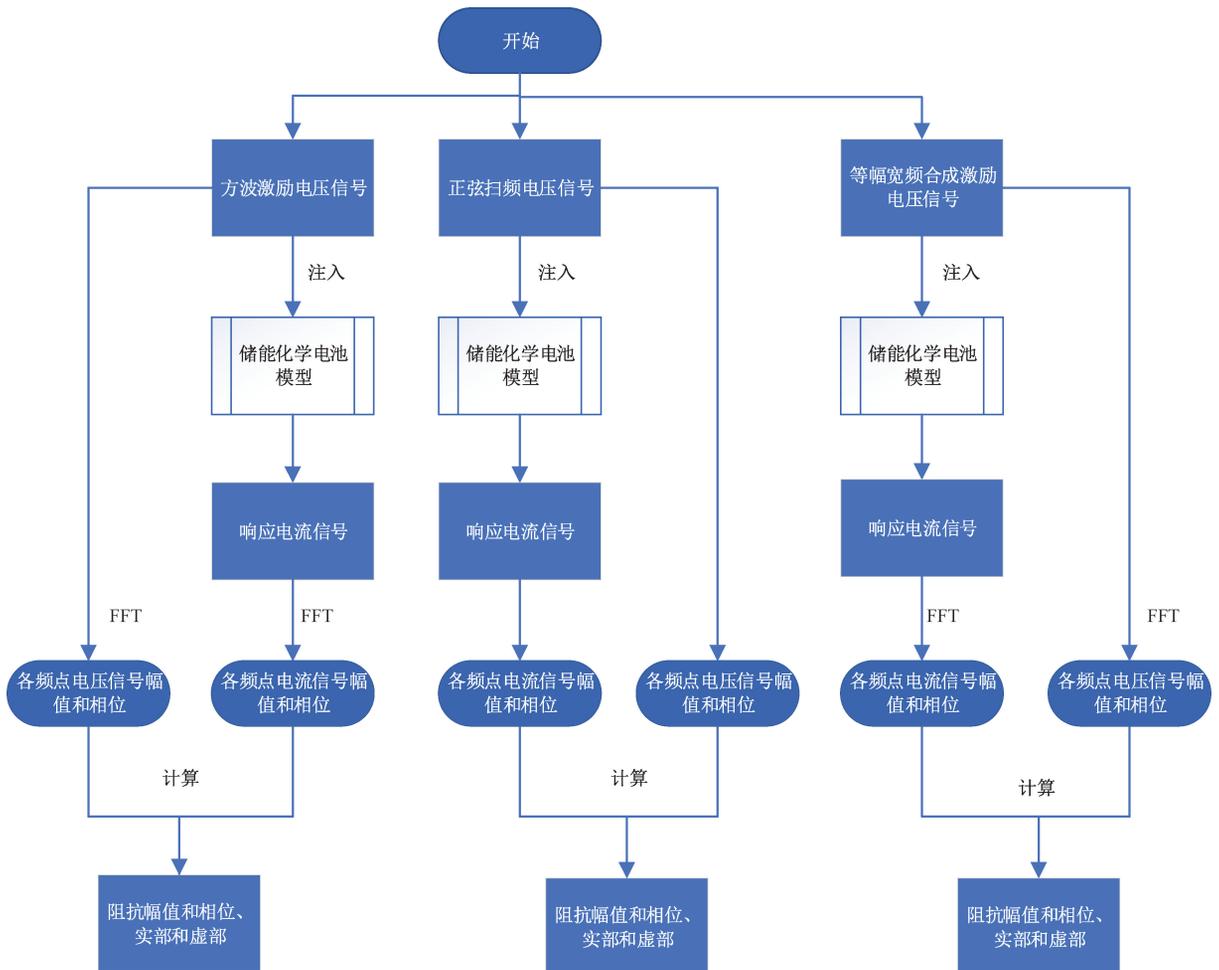
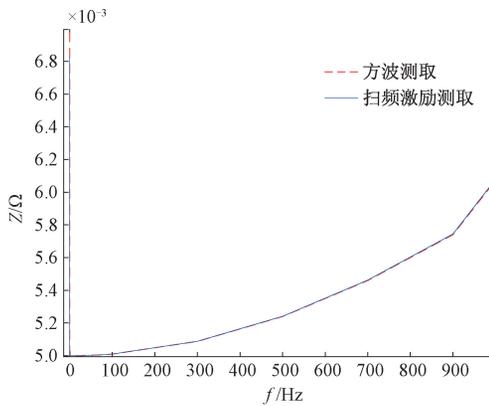


图7 宽频激励测量对比试验流程

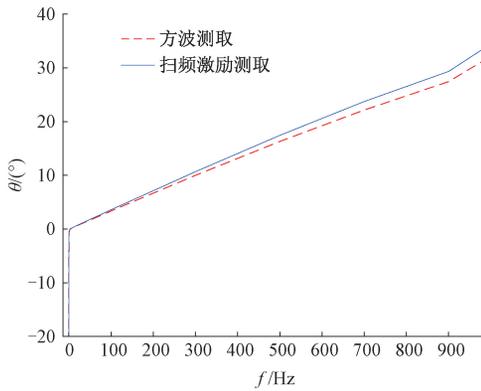
Fig. 7 Flow chart of the comparison test for broadband excitation measurement

表 2 方波电压激励信号 FFT 分解幅值  
Table 2 FFT decomposition amplitude of square wave voltage excitation signal

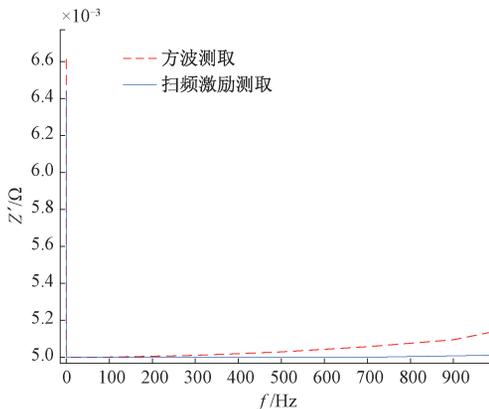
谐波次数	各次谐波幅值/V
1	0.012 732 427
3	0.004 244 142
5	0.002 546 485
7	0.001 818 918
9	0.001 414 714



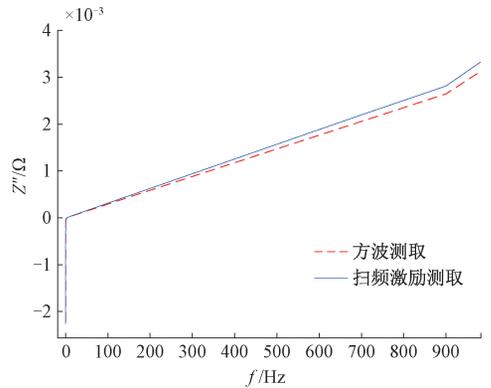
(a) 幅值对比  
(a) Comparison of impedance amplitude



(b) 相角对比  
(b) Comparison of impedance phase angle



(c) 实部对比  
(c) Comparison of the real part of impedance



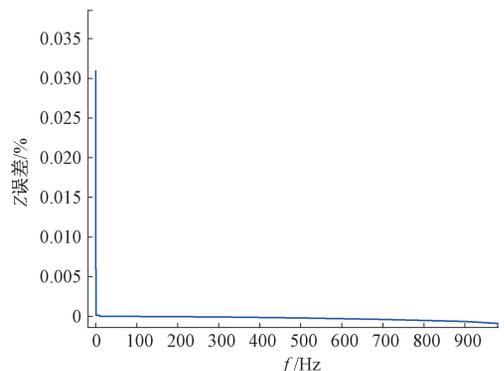
(d) 虚部对比  
(d) Comparison of impedance imaginary part

图 8 两种方法测量一阶等效电路模型阻抗信息对比

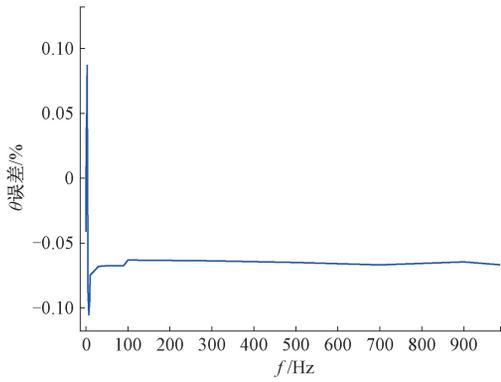
Fig. 8 Comparison of the impedance information of the first-order equivalent circuit model measured by two methods

两种方法测得的阻抗幅值、相角、实部和虚部对比如图 8 所示,其中虚线为方波测取的阻抗结果曲线;实线为扫频激励测取的阻抗结果曲线,可见两种方法测取的阻抗结果非常接近,阻抗幅值曲线基本重合。

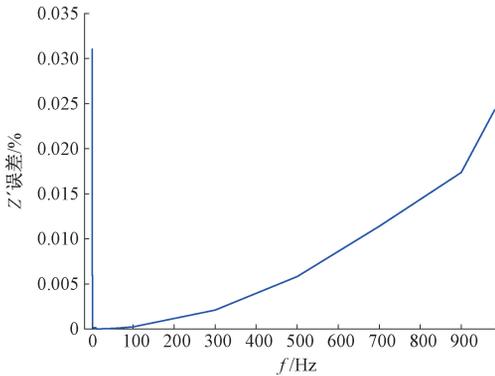
两种测量方法获取的阻抗信息误差如图 9 所示,可知阻抗的幅值和实部信息基本吻合,误差在 3% 以内;阻抗相位和虚部误差仅在 7 Hz 时达到了 10%,其余 25 个频点处的阻抗信息误差均在 5% 以内。以同样的方法对比测量二阶和三阶等效电路模型,二阶模型阻抗幅值和实部的相对误差均在 0.5% 以内,相位和虚部相对误差在 3、5、7、9 Hz 等 4 个频点处较大峰值达到 62%,其余 22 个频点的误差值均在 9% 以内;三阶模型阻抗的幅值误差均在 5% 以内,阻抗实部误差均在 10% 以内,阻抗相位和虚部误差在 3 Hz 频点处达到 33%,其余 25 个频点均在 10% 以内。由于个别频点的阻抗虚部几乎趋近于 0,过小的虚部绝对值会使相对误差结果偏高。在仿真过程中,还可以通过提高采样频率或抓取更多的采样周期来进一步降低测量误差,但同时也会增大基础数据量和运算时间,甚至会有超出 MATLAB 程序运算空间的风险。由方波



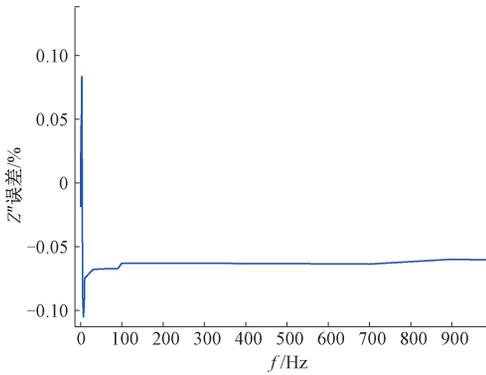
(a) 幅值误差  
(a) Error in impedance amplitude



(b) 相角误差  
(b) Error in impedance phase angle



(c) 实部误差  
(c) Error in the real part of the impedance



(d) 虚部误差  
(d) Error in the imaginary part of the impedance

图9 两种方法测量一阶等效电路模型阻抗误差  
Fig. 9 Two methods to measure the impedance error of the first-order equivalent circuit model

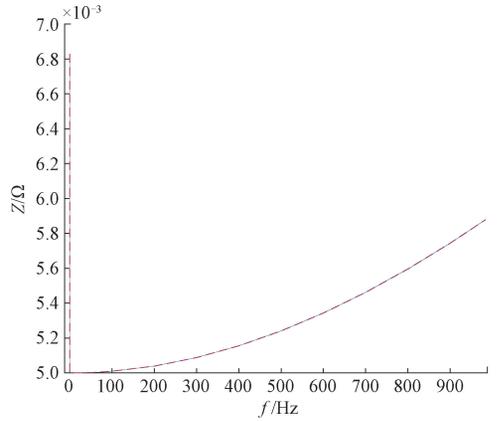
信号分解特性可知,在 0.01~1 100 Hz 频域内可均匀的获取 26 个频点处的阻抗信息。两种测量法所耗时长对比结果如表 3 所示,方波激励测量可省时 60% 以上,说明该方法对于实现电池 EIS 快速检测具有一定参考价值。

2.3 等幅宽频合成激励信号测量仿真

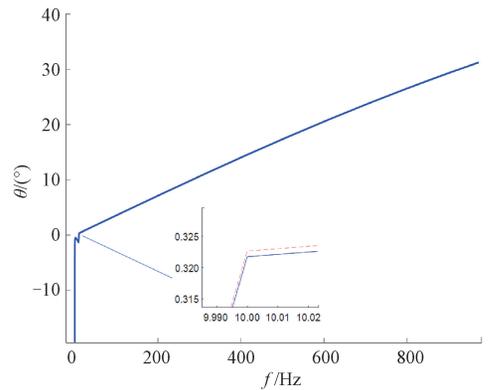
建立等幅宽频合成激励和扫频测量仿真平台,两种测量方法获取的等效电路模型阻抗的幅值、相角、实部和虚部对比如图 10,虚线为等幅宽频激励测取的阻抗结

表3 扫频测量法和方波激励测量法耗时对比  
Table 3 Comparison of time consumption between the swept frequency measurement method and the square wave excitation measurement method

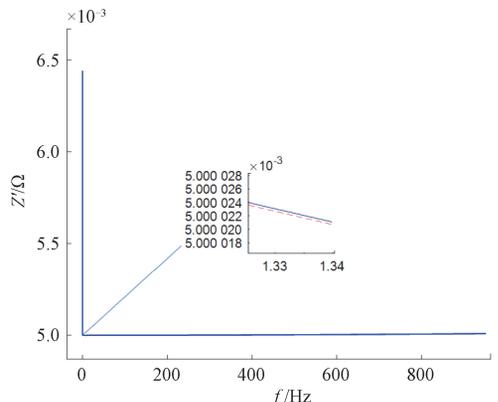
等效电路模型	扫频测量耗时	方波激励测量耗时
一阶电路模型	387.59	149.61
二阶电路模型	386.59	150.81
三阶电路模型	382.59	155.11



(a) 幅值对比  
(a) Comparison of impedance amplitude



(b) 相角对比  
(b) Comparison of impedance phase angle



(c) 实部对比  
(c) Comparison of the real part of impedance

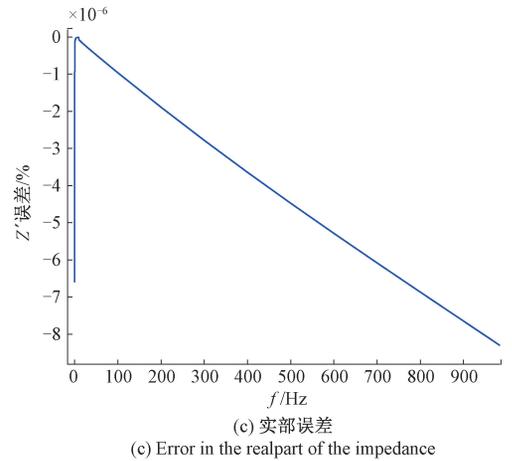
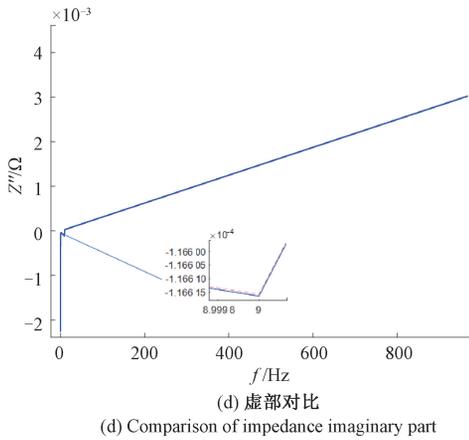


图 10 两种方法测量一阶等效电路模型阻抗信息对比  
 Fig. 10 Comparison of the impedance information of the first-order equivalent circuit model measured by two methods

果,实线为扫频法测取的阻抗结果,可见两阻抗结果曲线基本重合。误差范围均在  $10 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-11}$  区间内,结果如图 11 所示,可知等幅宽频激励信号测量法应用于电池一阶等效电路模型时具有很好的准确性。

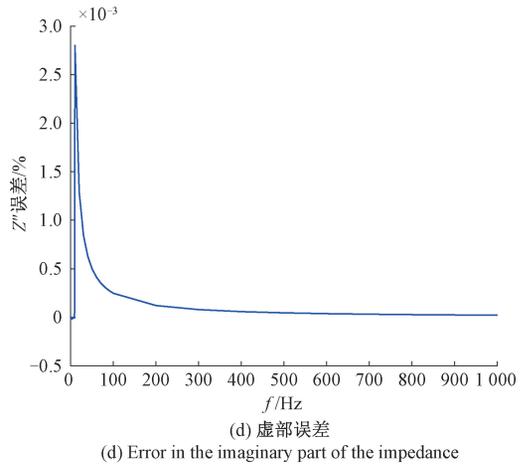
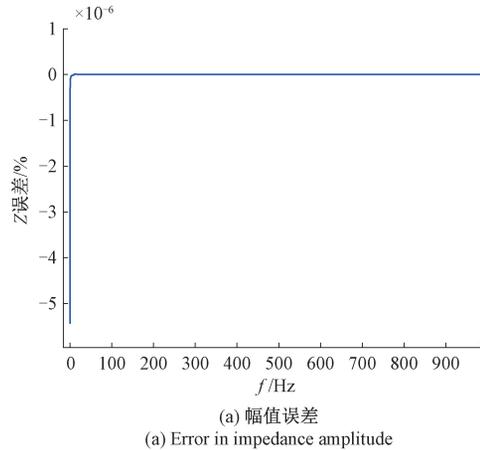
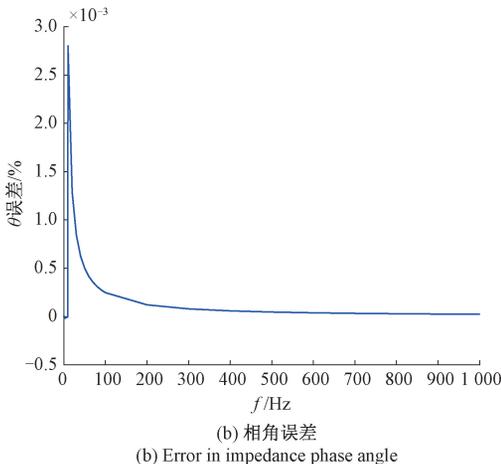


图 11 两种方法测量一阶等效电路模型阻抗误差  
 Fig. 11 Two methods to measure the impedance error of the first-order equivalent circuit model



以同样的两种方法对比测量电池的二阶和三阶等效电路模型。测得二阶模型阻抗信息的幅值误差均在  $10 \times 10^{-7} \sim 10 \times 10^{-12}$  区间以内,阻抗实部误差均在  $10 \times 10^{-7} \sim 10 \times 10^{-10}$  以内,相位和虚部误差在  $10 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-6}$  以内;三阶模型阻抗幅值和实部误差均在  $10 \times 10^{-5} \sim 10 \times 10^{-8}$  以内,相位和虚部误差均在  $10 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-10}$  以内,可知等幅宽频激励测量法应用于二阶和三阶等效电路模型时具有很好的准确性,且在  $0.01 \sim 1$  kHz 频域内有良好的尺度特性和测量精度,可完整获得 46 个频点的阻抗信息。两种方法所耗时长对比结果如表 4 所示,等幅宽频激励测量可省时 78% 以上,说明该方法对于实现电池 EIS 快速检测具有较大参考价值。

对比方波激励测量法需分 5 次注入频率为 0.01、0.1、1、10、100 Hz 的方波激励,等幅宽频合成激励法只需单次激励,整体耗时更短,且该测量法拥有更好的频域尺度和精度,但该方法相较于方波激励测量在工程应用上实现难度更大。

表4 扫频测量和等幅宽频合成激励测量法耗时对比  
Table 4 Comparison of measurement time between sweep excitation measurement method and equal amplitude and wide frequency synthetic excitation

等效电路模型	measurement method		s
	扫频测量	等幅宽频合成激励耗时	
一阶电路模型	634.33	114	
二阶电路模型	510.33	111	
三阶电路模型	505.33	110	

### 3 试验及讨论

#### 3.1 实验方案

为了验证上述宽频测量方法可行性,设计试验平台如图12所示,包括新威公司生产的电池充放电装置和高性能电池检测装置、武汉科思特公司生产的CS350H电化学工作站、恒温箱、磷酸铁锂电池等。

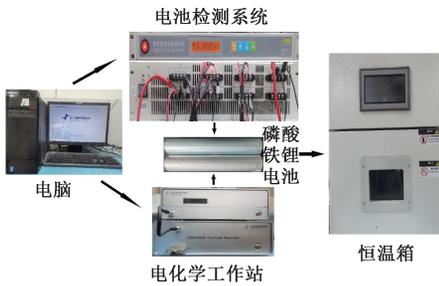


图12 阻抗谱测量试验平台  
Fig. 12 EIS measurement test platform

为排除温度变化对电池内部化学特性造成影响,将试验环境温度控制在25℃。通过电池充放电装置发出方波激励电流信号注入待测电池,并用高性能电池检测系统记录激励和响应信号。通过程序将激励和响应信号FFT分解并获取设定频域内的信号信息,进而得出阻抗信息。将宽频激励信号分解在各频点处的信号分量幅值作为扫频励幅值,用电化学工作站再次测量,并对比两种方法测取各频点处的阻抗。用方波激励测量电池在不同荷电状态下的EIS,对比变化规律。

#### 3.2 实验与讨论

##### 1) 方波激励测量与扫频激励测量对比试验

测量频域区间取为0.01~0.9 Hz,选取4节一致性较好的磷酸铁锂电池,采用0.01和0.1 Hz方波激励测取电池在0.01~0.9 Hz处的阻抗信息,与同频点处扫频测量法测取的阻抗信息对比,电池的EIS检测通常在稳

态条件下,即在给定荷电状态(state of charge, SOC)下进行检测<sup>[20]</sup>,对比两种测量方法在电池满电状态下#22测取的阻抗实部、虚部信息随频率变化趋势如图13所示,均具有较好的一致性。

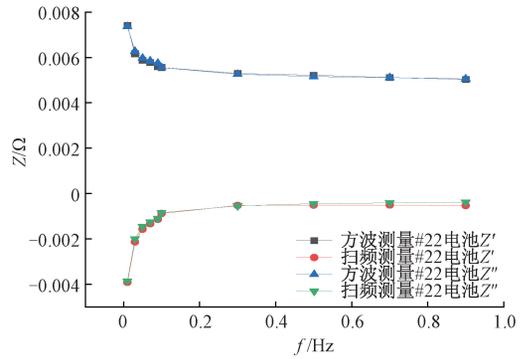


图13 两种方法测量阻抗实部和虚部随频率变化趋势对比  
Fig. 13 Comparison of the trend of the real and imaginary parts of the impedance measured by the two methods with frequency

由于电池内阻很小,测量阻抗较易受到测量导线阻抗以及空间辐射环境影响,且电化学工作站频域精度有限,需稍作补偿运算。测量4节电池阻抗的绝对误差如图14所示,相对误差如图15所示。

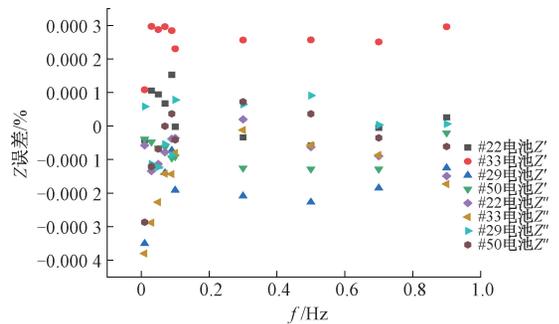
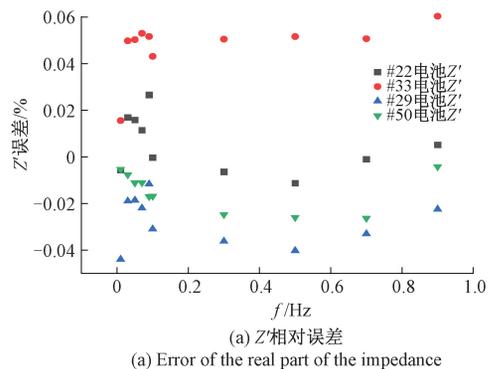


图14 两种方法测量电池在满电状态下Z'和Z''绝对误差  
Fig. 14 The absolute error of the impedance of the battery at full charge is measured separately by two methods



(a) Z'相对误差  
(a) Error of the real part of the impedance

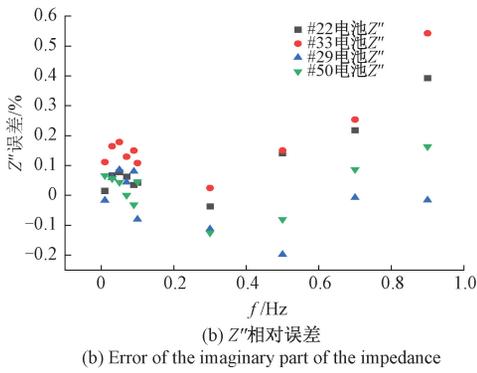


图 15 两种方法测量阻抗相对误差

Fig. 15 Relative error of the imaginary part of the impedance measured by two methods

可知,两种方法测量 4 节锂电池阻抗实部和虚部的绝对误差范围在  $-0.4 \sim 0.3 \text{ m}\Omega$ ; 阻抗实部相对误差在  $-5\% \sim 6\%$ , 虚部相对误差基本在  $-15\% \sim 15\%$ , 由于个别频点处阻抗虚部绝对值趋近于 0, 导致了个别阻抗虚部值相对误差偏高情况。

2) 方波激励测量不同荷电状态下 EIS 对比试验

由于健康的电池在放电过程中, 电池的化学反应会引起电极材料的膨胀和收缩, 导致电池内部的结构变化, 会影响电池内部的离子传输和电荷传输, 当 SOC 下降时, 电池内部的化学反应速率会减慢, 从而导致电池的内阻增加。据此特性, 使用方波激励检测电池在放电过程中不同 SOC 状态下的 EIS 进行对比验证, 检测结果如图 16 所示。

测得电池阻抗随 SOC 降低而整体升高, 可知通过方波激励测量法获取的 EIS 信息可以很好地跟踪电池所处的不同荷电状态。

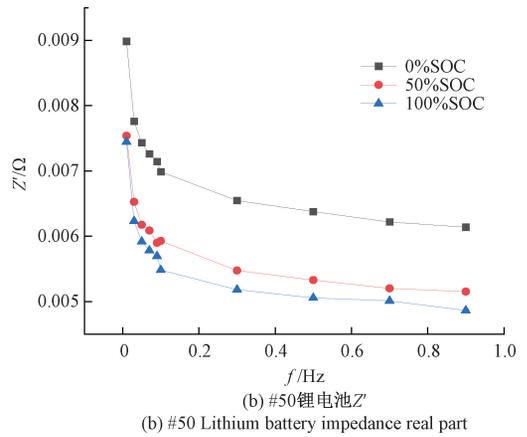
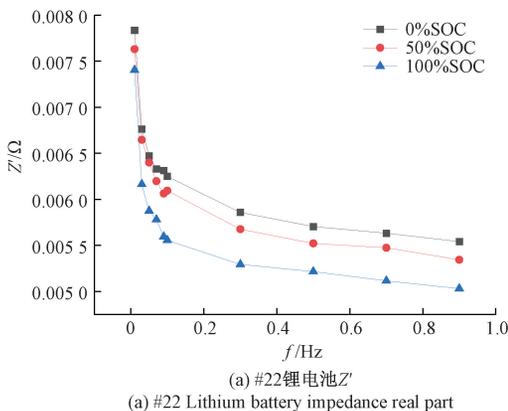


图 16 方波激励测量锂电池在不同荷电状态下阻抗谱

Fig. 16 Impedance spectra of lithium batteries under different charge states measured by square wave excitation

4 结 论

本文介绍了两种基于 FFT 分解的宽频激励测量 EIS 的方法, 通过仿真和试验验证了宽频激励信号方法进行储能化学电池快速 EIS 检测的可行性和准确性。实验结果表明, 宽频检测法可以大幅缩减检测时间, 且误差均在一定范围内。电池 EIS 在线快速检测在电池的生产、使用和回收等各环节的多个领域均有很好的应用前景, 接下来将优化算法提高 EIS 检测精度, 并在此基础上探索退役电池 SOH 快速估计的方法。

参考文献

[ 1 ] 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. State of health prediction of lithium-ion batteries based on energy-weighted Gaussian process regression [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(6): 63-69.

[ 2 ] 董鹏, 张剑波, 王震坡, 等. 基于电化学阻抗谱的锂离子电池析锂检测方法[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(4): 570-579.  
DONG P, ZHANG J B, WANG ZH P, et al. Lithium plating identification based on electrochemical impedance spectra of lithium-ion batteries [ J ]. Automotive Safety and Energy, 2021, 12(4): 570-579.

[ 3 ] CHEN X, LI L Y, LIU M M, et al. Detection of lithium

- plating in lithium-ion batteries by distribution of relaxation times [J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 496: 229867-229876.
- [ 4 ] CHOI W, SHIN H C, KIM J M, 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.
- [ 5 ] BEER C D, BARENDSE P S, PILLAY P. Fuel cell condition monitoring using optimized broadband impedance spectroscopy [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(8): 5306-5316.
- [ 6 ] DELEEBEECK L, VELTZE S. Electrochemical impedance spectroscopy study of commercial Li-ion phosphate batteries: A metrology perspective [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(9): 7158-7182.
- [ 7 ] ITAGAKI M, UENO M, HOSHI Y, et al. Simultaneous determination of electrochemical impedance of lithium-ion rechargeable batteries with measurement of charge-discharge curves by wavelet transformation [J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 235: 384-389.
- [ 8 ] 耿萌萌, 范茂松, 杨凯, 等. 基于 EIS 和神经网络的退役电池 SOH 快速估计 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(2): 673-678.
- GENG M M, FAN M S, YANG K, et al. Fast estimation method for state-of-health of retired batteries based on electrochemical impedance spectroscopy and neural network [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(2): 673-678.
- [ 9 ] 孙丙香, 苏晓佳, 马仕昌, 等. 基于低频阻抗谱和健康特征融合的锂离子电池健康状态主动探测方法研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 23-30.
- SUN B X, SU X J, MA SH CH, et al. Anactive detection method of li-ion battery health state based on low-frequency EIS and health feature fusion [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 23-30.
- [ 10 ] 吴艳平, 姚建国, 常乃超, 等. 多功能宽频测量装置的设计与实现 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(20): 136-141.
- WU Y P, YAO J G, CHANG N CH, et al. Design and implementation of a multifunctional broadband measurement device [J]. *Power System Automation*, 2020, 44(20): 136-141.
- [ 11 ] 刘灏, 任小伟, 田建南, 等. 基于 K-ESPRIT 的快速宽频测量方法 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 186-192.
- LIU H, REN X W, TIAN J N, et al. Fast wide frequency measurement method based on Kurtosis-estimation of signal parameters via rotation invariance technique [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(10): 186-192.
- [ 12 ] BULLECKS B, SURESH R, RENGASWAMY R. Rapid impedance measurement using chirp signals for electrochemical system analysis [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, 106: 421-436.
- [ 13 ] 庄全超, 杨梓, 张蕾, 等. 锂离子电池的电化学阻抗谱分析研究进展 [J]. *化学进展*, 2020, 32(6): 761-791.
- ZHUANG Q CH, YANG Z, ZHANG L, et al. Diagnosis of electrochemical impedance spectroscopy in lithium ion batteries [J]. *Progress in Chemistry*, 2020, 32(6): 761-791.
- [ 14 ] 李伟恒, 黄秋安, 杨维明, 等. 基于伪随机二进制序列的阻抗谱快速重构及其在电化学能源领域的应用 [J]. *电化学*, 2020, 26(3): 370-388.
- LI W H, HUANG Q AN, YANG W M, et al. Recent advancement in pseudo-random binary sequence signals-based fast reconstruction of Impedance spectrum and Its applications in electrochemical energy sources [J]. *Journal of Electrochemistry*, 2020, 26(3): 370-388.
- [ 15 ] 骆凡, 黄海宏, 王海欣. 基于短时脉冲放电与电化学阻抗谱的退役动力电池快速分选与重组方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(1): 229-238.
- LUO F, HUANG H H, WANG H X. A fast screening and recombinant method based on short-time pulse discharge and electrochemical impedance spectroscopy for decommissioned power batteries [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(1): 229-238.
- [ 16 ] 黄秋安, 李伟恒, 汤哲鹏, 等. 电化学阻抗谱基础 [J]. *自然杂志*, 2020, 1(2): 12-26.
- HUANG Q AN, LI W H, TANG ZH P, et al.

Fundamentals of electrochemical impedance spectroscopy[J]. Chinese Journal of Nature, 2020, 1(2): 12-26.

- [17] 黄海宏, 汪宇航, 王海欣. 基于锂电池等效电路模型的阻抗曲线拟合算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(8): 70-77.

HUANG H H, WANG Y H, WANG H X. A novel impedance curve fitting algorithm for lithium batteries[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(8): 70-77.

- [18] 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 Y W, ZHAO Y, HUA D, 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.

- [19] 王维强, 张吉, 张力, 等. 基于三阶 RC 网络的等效电路电池模型[J]. 电池, 2019, 3(6): 212-216.

WANG W Q, ZHANG J, ZHANG L, et al. Equivalent circuit model for battery based on third-order RC network[J]. Battery Bimonthly, 2019, 3(6): 212-216.

- [20] LI S Y, HAN Y M, GENG T T, et al. Investigation on the temperature tolerance of LiMn2O4 in lithium-ion batteries [J]. New Journal of Chemistry, 2020, 44(22): 9540-9545.

## 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 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 main research interests include power electronics and automation.



**罗磊**, 于 2010 年获得安徽理工大学学士学位, 于 2016 年获得合肥工业大学工程硕士学位, 现为合肥工业大学博士研究生, 主要研究方向为电气测量与系统智能控制。

E-mail: luolei6577@163.com

**Luo Lei** received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2010 and M. Sc. degree in engineering from Hefei University of Technology in 2016. He is currently a Ph. D. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests are electrical measurement and system intelligent control.