

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108665

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*

骆 凡, 黄海宏, 王海欣

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘 要:针对现阶段退役动力电池筛选效率低、能耗大和成组率低等问题,提出了一种基于短时脉冲放电与电化学阻抗谱(EIS)相结合的退役动力电池快速分选与重组方法。通过对 200 节同类型不同批次的退役磷酸铁锂动力电池进行短时脉冲放电与阻抗谱测试和分析后,将获取的脉冲电压差、直流内阻、EIS 曲线形状特征以及 EIS 等效电路模型参数作为筛选指标并建立数学模型,实现了对退役动力电池快速有效的分选与重组。验证实验结果表明:该方法能有效地降低能耗,且单节电芯的平均测试时间短至 20 min 以内,同时成组后的模组一致性指标较好,在工程上具有较大的实用价值。

关键词:退役动力电池;电化学阻抗谱;等效电路模型;短时脉冲放电;快速分选;重组

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 fast screening and recombinant method based on short-time pulse discharge and electrochemical impedance spectroscopy for decommissioned power batteries

Luo Fan, Huang Haihong, Wang Haixin

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

Abstract: At present, the decommissioned power batteries have problems of low screening efficiency, high energy consumption and low grouping rate. To address these issues, a fast screening and recombinant method is proposed, which is based on short-time pulse discharge and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for decommissioned power batteries. Through the short-time pulse discharge, EIS test and analysis of 200 decommissioned lithium iron phosphate power batteries of the same type and different batches, the obtained pulse voltage difference, DC internal resistance, EIS curve shape characteristics and EIS equivalent circuit model parameters are taken as screening indicators. Then, a mathematical model is formulated to realize the rapid and effective sorting and reorganization of decommissioned power batteries. Experimental results show that this method can effectively reduce energy consumption. The average test time of a single cell is less than 20 min. Meanwhile, the module consistency index after grouping is good, which has great practical value in engineering.

Keywords: decommissioned power battery; electrochemical impedance spectroscopy; equivalent circuit model; short-time pulse discharge; fast screening; recombinant

0 引 言

随着新能源汽车产业的迅猛发展,常用车载能源之一的锂离子动力电池的生产规模和退役规模也在逐年增加^[1]。据有关部门推测,2025 年动力电池退役量将从现有的 36 万吨激增至百万吨级,这使得电池制造商和地方

政府将面临巨大的处置和回收压力^[2]。所幸已有大量的研究和成功案例表明,退役的动力电池仍有 80% 以上正常容量,足够用于其他需要更低能量和功率的电力系统,如通信基站、电动自行车、智能电网、场地车辆、风光发电储能、和路灯等^[3]。

尽管梯次利用具有重大的经济和社会价值,但由于退役电池普遍存在的老化差异而导致的 inconsistency 使得其

不能直接用于储能系统^[4]。这首先是因为动力电池本身是一个复杂的电化学系统,其容量衰退机理受电池材料、自放电、内部结构以及生产工艺等多因素共同的影响;然后由于使用环境的不同,动力电池也容易受到诸如充放电倍率、放电深度、充放电截止电压、温度、振动以及各种原因导致的电池滥用而造成的不一致性^[5]。电池组中部分电芯的过充和过放是一致性差的典型表现,这会导致不同的容量衰减模式和电池寿命缩短,并形成恶性循环^[6]。同时,由于木桶效应,电池组的最大可用容量主要由可用容量最小的电池决定^[7-8]。因此,如何实现快速准确的分选是退役电池重组后能否提高容量利用率并延长使用寿命的关键步骤。

目前应用较为普遍的分选方法主要依据退役电池的开路电压(open circuit voltage, OCV)、健康状态(state of health, SOH)以及内阻等直接通过测试可以得到的参数或者间接表征退役电池 SOH 的性能参数^[9-10]。例如文献[11]直接根据直流电阻对电池进行分类,然后通过普通筛选方法对它们进行标记和评估;同样,文献[12]根据充电曲线和串联电池的充放电策略实现了容量估计和设计了电池内阻的筛选方法。然而,这种直接筛选通过测试电池的基本参数对电池进行分类的方法耗费时间长、所用成本较高;此外,文献[13]通过线性回归分析对锂离子电池在日历和循环寿命期间的容量和阻抗之间的相关性进行了研究,发现有可能通过基于相关的 SOH 快速测试来替代耗时的常规容量测量;文献[14]从电化学角度出发,分析库仑效率与电池容量衰减之间的内在关系,并就此提出基于库仑效率对退役锂离子动力电池储能梯次利用进行筛选的方法;文献[15]基于不同老化程度的电池具有不同的充电/放电电压曲线的现象,分析了退役电芯特征电压与剩余容量之间的映射关系,并结合支持向量机器学习算法,提出了一种退役电池电芯的快速筛选测试方法,以提高电池分选过程的综合效率。文献[16]根据电池管理系统(battery management system, BMS)记录的电池数据,计算单体电池电压数据得到电池最大可用容量。以脉冲功率测试(hybrid pulse power characteristic, HPPC)一次放电脉冲提取的电池开路电压、欧姆内阻、极化电阻以及浓差电阻作为特征变量,并通过聚类算法完成电池分选与重组。不过,这些间接基于测试结果和相关算法对电池进行分类的方法也需要长时间的测试,效率的提升也有限^[17]。

然而目前文献中的退役动力电池分选方法在实际回收工厂中并不常见,有如下几点原因:1)精确的分选模型需要大量的退役电池数据^[18];2)回收的退役动力电池普遍处于低荷电状态(state of charge, SOC),不利于分类方法的进行^[19-20];3)分选方法仍存在检测时间长、能耗大、成本高以及效率低等问题^[21]。

为了改善上述缺点,本文根据以往的研究工作进一步提出了一种基于短时脉冲放电与电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)^[22]相结合的退役动力电池快速分选与重组方法。首先,本文阐明了 EIS 与脉冲放电方法的基本原理;然后,随机选取 200 节退役电池按照预先设计的实验流程进行检测并分析实验结果;之后,提取脉冲电压差、直流内阻、EIS 曲线形状特征以及 EIS 等效电路模型参数等作为筛选指标并建立数学模型;最后,通过验证实验说明该方法的有效性并给出结论。

1 方法依据

1.1 电化学阻抗谱法

EIS 是一种将不同频率的小幅度正弦波电流(或电位)干扰信号施加在电化学系统上的非侵入式测量技术,可以用来研究电化学系统的老化现象,同时也可以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。

图 1 显示了磷酸铁锂动力电池典型的电化学阻抗谱曲线。根据形状与扫描频率的范围,阻抗谱曲线可以分为 3 个部分:首先是左侧一条近似直线的高频区,它主要是由连接引线、电极的多孔性以及表面不均匀等引起的,一般可用单独的电感 L 或者电感 L 与电阻 R 的并联表示;其次是半圆弧的中频区,它是由 Li^+ 在电极与电解液界面上的电荷传递阻抗引起的,该过程通常用电荷传递内阻 R_{ct} 和双电层电容 C_{dl} 的并联电路表示;最后是斜率接近于 1 的低频区,此部分是与 Li^+ 在电极活性材料中的固态扩散阻抗相关的一条斜线,理论上倾角为 45° ,一般用 Warburg 阻抗 W 表示。

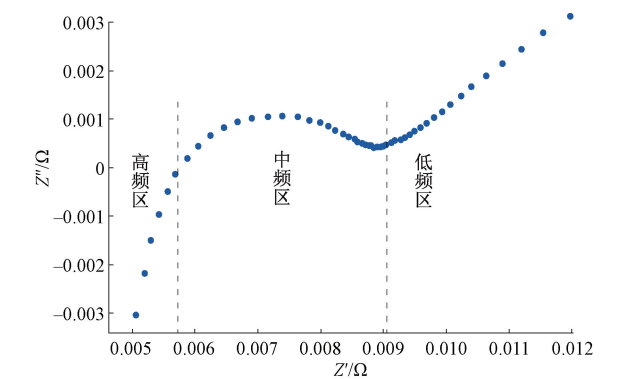


图 1 25℃时 SOC 为 95%的磷酸铁锂退役动力电池阻抗谱图

Fig. 1 Impedance spectrum of decommissioned lithium iron phosphate power battery with 95% SOC at 25℃

通常经过测量得到的 EIS 曲线,需要建立等效电路模型进行参数量化分析。该方法能够通过不同的等效元件来代表电极反应过程中的物理现象,即等效电路具有实际的物理意义。通过等效元件组成的复合元件来拟合各个频段的 EIS 曲线,当综合得到的频响曲线与所测电池 EIS 曲线一致性较好时,就可以称此电路为所测电池系统的等效电路模型。

等效元件基本由常见电学元件中的电感 L 、电阻 R 和电容 C ,还有恒相位元件 Q 和 Warburg 阻抗 W 。 Q 的阻抗和相角以及韦伯阻抗 W 的阻抗表达式如式(1)~(3)所示。

$$Z_Q = \frac{1}{Y_o} (j\omega)^{-n} = \frac{1}{Y_o} \omega^{-n} \left[\cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) - j \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right] \tag{1}$$

$$\tan \varphi = \tan\left(\frac{n\pi}{2}\right), \varphi = \frac{n\pi}{2} \tag{2}$$

$$Z_W = \sigma \omega^{-\frac{1}{2}} (1 - j) \tag{3}$$

其中, Q 的量纲为 $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n}$,总取为正值。 j 表示虚部符号, ω 表示角频率, n 表示常相位元件指数,取值为 $0 < n < 1$; φ 表示相位角; σ 为韦伯常数。

结合式(1)和(3)可知,只要常相角元件阻抗表达式中的 n 取值 $1/2$ 就可以代替韦伯阻抗,因此为了提高等效电路拟合精度,可以用电双层元件 Q 代替韦伯阻抗 W 。同时,由于一般情况下实际检测的曲线在圆弧部分是一个压扁的半圆,表明该电双层电容不是纯电容,于是可将 C 替换为电双层元件 Q ,也即 CPE。因此,得到了如图 2 的等效电路模型。值得注意的是,此处的欧姆内阻 R_s 并不是单纯的欧姆内阻,包含电路连接时的线阻和接触电阻。

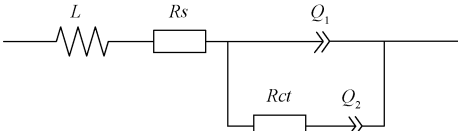


图 2 LR(Q(RQ)) 等效电路结构
Fig. 2 LR(Q(RQ)) equivalent circuit structure

1.2 短时脉冲放电法

短时脉冲放电法是基于 Coleman 等^[23]提出并运用于阀控式铅酸蓄电池(valve-regulated lead-acid battery, VRLA)的 SOC 和 SOH 估算上的双脉冲测试法,同时文献附录简短的表明,锂离子电池也同样适用此种双脉冲方法。

本文以双脉冲测试法为基础对现有的不同老化程度的退役动力电池进行了类似的多脉冲放电实验,并结合分析每个脉冲的起始电压、结束电压、脉冲跌落电压以及脉冲起始与结束瞬间等效内阻与 SOH 的变化关系,最终确定了短时脉冲放电法,也即四脉冲测试法。

图 3 显示了退役电池充电后短暂静置开始脉冲测试的电流电压变化,其中 ΔV_1 、 ΔV_2 、 ΔV_3 和 ΔV_4 即为脉冲跌落电压。从跌落电压的大小变化可以看出, ΔV_1 最大, ΔV_2 快速减小, ΔV_3 和 ΔV_4 大小基本相同,且与 ΔV_2 相差不大。事实上,文献采用双脉冲测试法就是因为第 2 个脉冲跌落电压与后面的跌落电压值基本一致且此值与电池的 SOH 有关。而本文采用四脉冲一方面是因为与电化学阻抗谱法相配合,另一方面是实验发现第三脉冲开始的后续跌落电压值基本一致且与退役动力电池的 SOH 相关。

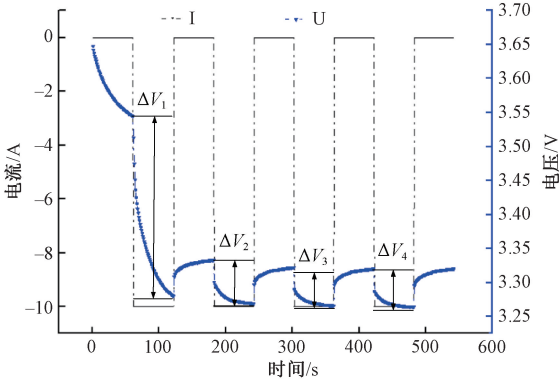


图 3 脉冲测试
Fig. 3 Pulse test

2 实验及结果分析

2.1 电池测试平台

电池测试平台如图 4 所示,由用于充电和放电的电池充放电设备 CT-4008-5V20A-A、控制环境温度的高低温试验箱 DY-T-20C、进行阻抗测量的双通道电化学工作站 CS2350H 以及处理分析数据的中位机和上位机组成。

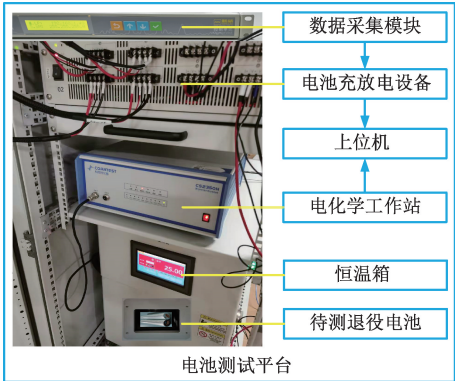


图 4 电池测试平台
Fig. 4 Battery test platform

芯大部分;而 II 类图具有中频区与低频区表现异常的特征,也占有一定比例。值得注意的是,两类图不仅在形状上有差异,在容量分布与等效电路拟合参数上也存在明显差异。

图 8 所示为等效电路模型参数 Q_2 与剩余容量的关系图,其中包含了阻抗谱曲线形状分类的信息。从水平方向可以看出,I 类曲线的退役动力电池的容量基本在 15 Ah 以上,而 II 类绝大部分在 14~15 Ah 之间;从竖直方向看,等效电路参数 Q_2 也可以比较好的区分 I 类与 II 类退役电池。因此,结合以往研究,将等效电路参数 Q_2 与曲线类别选取为退役电池分选与重组两个重要因素。

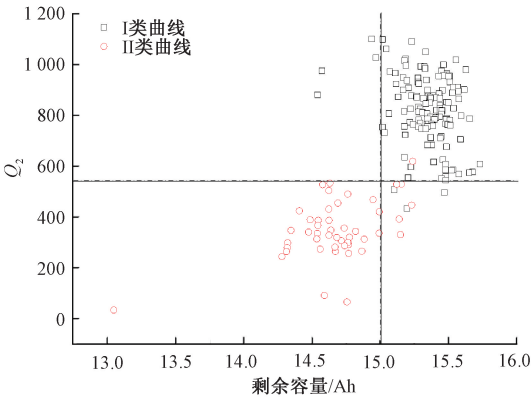


图 8 等效电路模型参数 Q_2 与剩余容量关系
Fig. 8 Relationship between equivalent circuit model parameter Q_2 and residual capacity

2) 部分电芯老化测试结果

值得注意的是,大批量实验步骤中的短时脉冲放电测试有两个重要作用,1)使满充的退役电芯 SOC 在 95% 左右;2)提取其中的脉冲电压差 ΔV 和直流等效电阻 R 。由于以往的研究已经分析了不同老化阶段等效电路参数 Q_2 与退役电池容量的关系,这里重点分析短脉冲测试中脉冲电压差 ΔV 和直流等效电阻 R 与退役电芯容量的关系。

图 9 显示了 I 类且等效电路参数 Q_2 值较大时的退役电芯的老化实验,可以看出,前 40 次循环的容量衰减很小;图 10 显示了不同类曲线且等效电路参数 Q_2 值差异较大时电池循环次数与剩余容量之间的关系图,可以看出 II 类曲线 S7、S31 和 B3 在 80 次循环周期内容量衰减幅度较大。

图 11 显示了脉冲初始瞬间等效直流内阻 R_1 、 R_3 、 R_5 和 R_7 与脉冲结束瞬间等效直流内阻 R_2 、 R_4 、 R_6 和 R_8 变化趋势基本与脉冲跌落电压一致,均与剩余容量有线性关系。值得注意的是,各退役电芯的 R_1 、 R_3 、 R_5 和 R_7 均比 R_2 、 R_4 、 R_6 和 R_8 要略大。

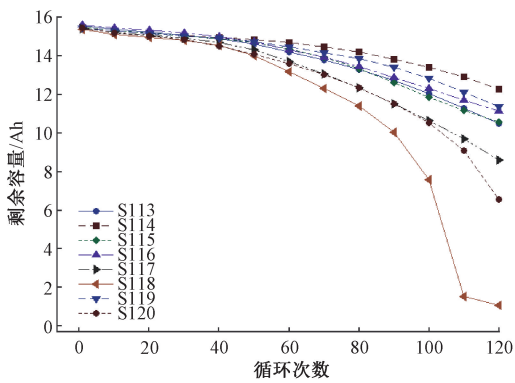


图 9 I 类退役电池循环次数与剩余容量关系图
Fig. 9 Relationship between cycle times and residual capacity of class I decommissioned batteries

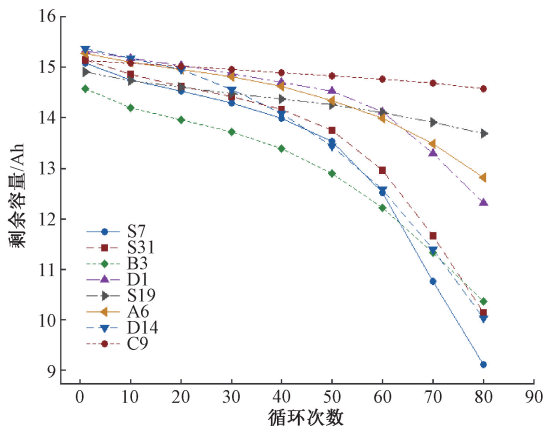


图 10 不同曲线类和 Q_2 范围循环次数与剩余容量关系图
Fig. 10 Relationship between cycle times and residual capacity in different curve classes and Q_2 range

图 12 可以看出脉冲跌落电压如前所述, ΔV_1 和 ΔV_2 随着电池的老化程度加深并没有表现出相应的变化趋势,而 ΔV_3 和 ΔV_4 显示了随着剩余容量的减小跌落电压值增大,具有明显的线性变化趋势。值得注意的是,某些退役电芯尽管经历了 80 次老化循环,剩余容量仍然较大,而其跌落电压值变化趋势不明显。这说明了脉冲跌落电压和剩余容量存在一定的关系,但是剩余容量不一定能明确的表明退役电池此时的健康状态。因为图 9 表明了即使初始剩余容量一致,但经历过相同的循环老化周期后,电池的剩余容量也会出现较大差异。

3 退役动力电池分选与重组方法

基于上述的实验结果及分析,提出了下述的退役动力电池分选与重组方法。首先,对未分类电芯进行适当充电;然后,进行脉冲放电,同时提取相关参数输入模型

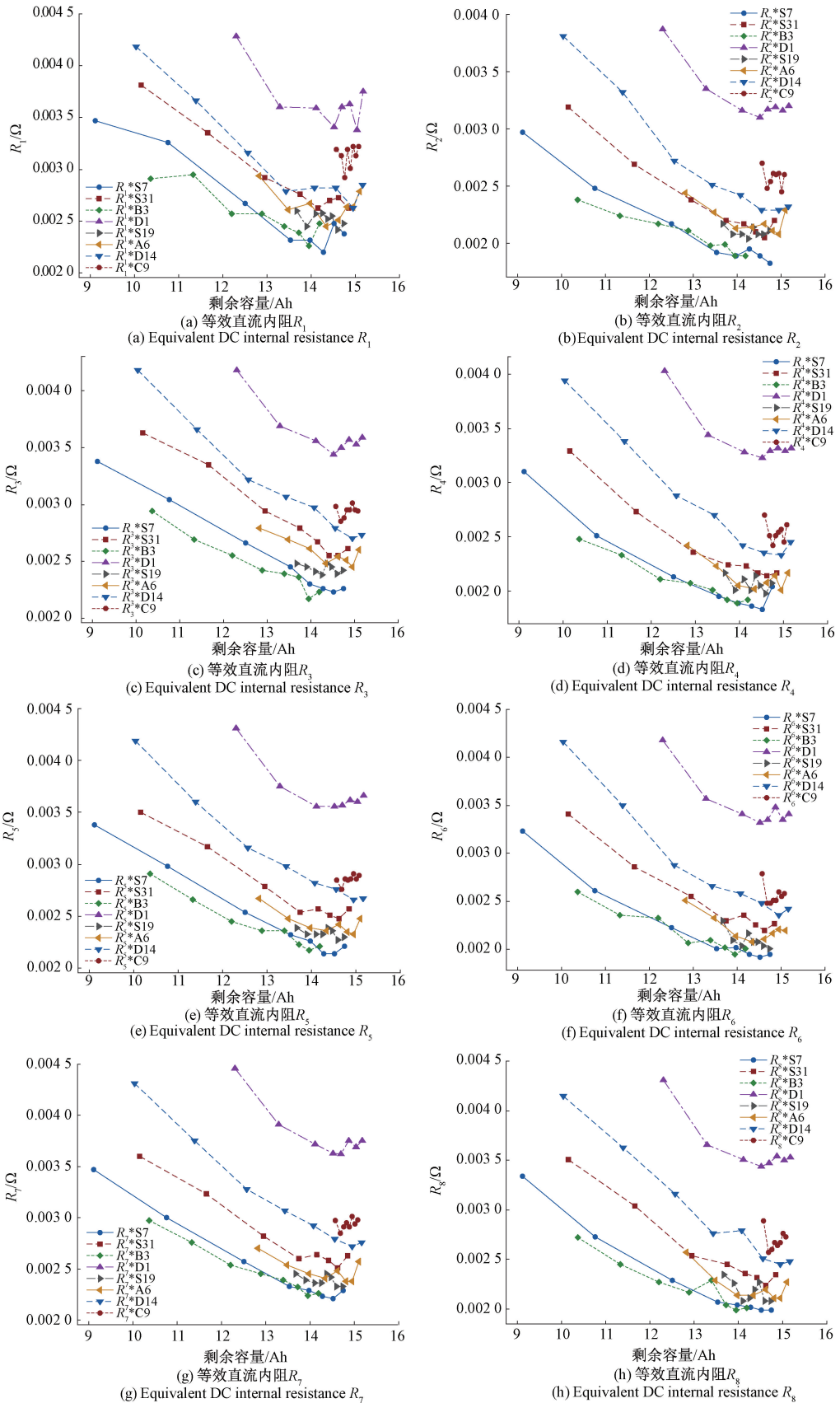


图 11 退役电芯直流内阻老化实验变化趋势图

Fig. 11 Change trend of DC internal resistance aging test of decommissioned cells

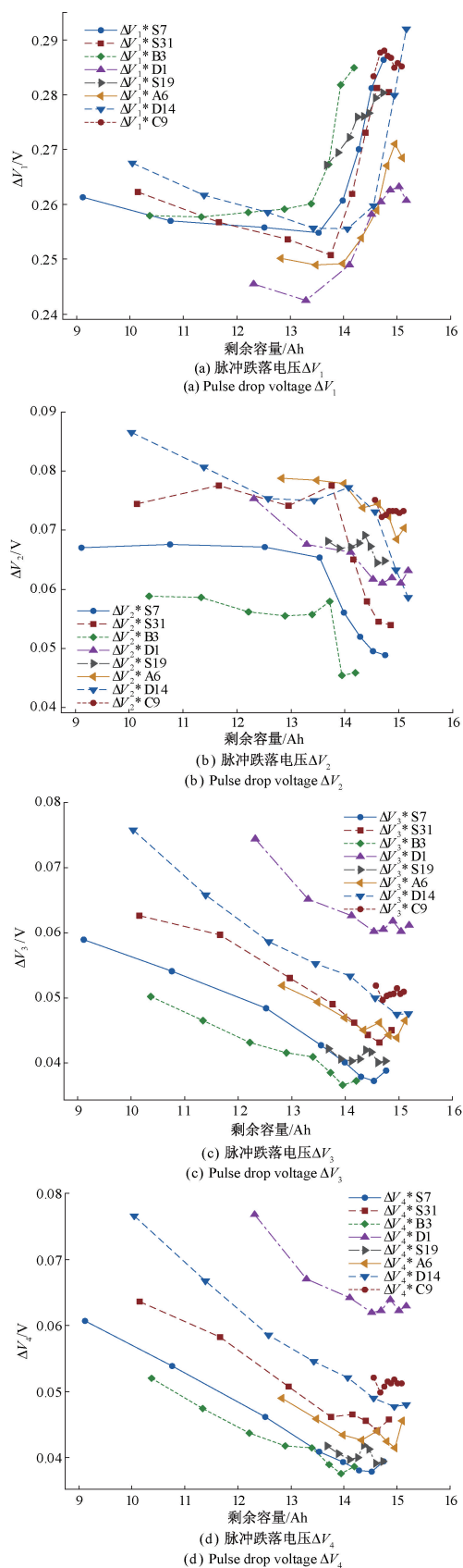


图 12 退役电芯脉冲电压差老化实验变化趋势
Fig. 12 Change trend of retired cell pulse voltage difference aging experiment

数据库;短暂静置后接着进行 EIS 测试,通过测试曲线的形状进行类别区分;之后,对阻抗曲线进行等效电路拟合,将得到的等效参数也输入模型数据库待用;最后,在进行电池重组前,按照分组标准在模型数据库中检索,搜寻到指定范围内的退役电池后即可重组实现梯次利用。

3.1 基于特征提取的阻抗曲线形状分类方法

由前述可知,所检测的上百节退役动力电池存在图 7 所示的两类曲线。为了更好的进行梯次利用,需要在 EIS 测试后进行曲线分类。本文采用了基于特征提取的阻抗曲线形状分类方法。鉴于 II 类曲线与 I 类曲线的差别在中频区与低频区,因此提取半圆弧与斜线两个特征。图 7 可以观察到 I 类曲线圆弧较为完整,先上升后下降;而 II 类曲线仅有上升段,此外,II 类曲线先到达斜线部分的低频区且曲线有波动。据此,可利用 LabVIEW 简单快速的对测试的阻抗谱曲线进行准确的分类。

3.2 基于多因子的重组方法

经过大批量实验与上述的曲线分类、阻抗数据拟合以及脉冲参数提取后,退役动力电池的各类数据均存在于分类数据库中。基于多因子的退役动力电池重组方法即根据成组需求动态选择分类标准,例如要求较为苛刻时可以设置如下成组标准:1)选择 I 类曲线;2)等效电路参数 Q_2 值大于 1 000 小于 1 100;3)跌落电压 ΔV_3 组内差值 1 mV 以内;4)等效内阻如 R_2 组内 0.1 mΩ 差值以内;5)电池端电压差值不超过 0.02 V。

这样重组出来的退役电池模组具有一致性强、健康状况良好以及成组率高的优势,此外 II 类曲线的退役电芯也可按照一定标准组成容量较低的模型,如按照等效电路参数 Q_2 值区间分类。

4 方法验证及结果讨论

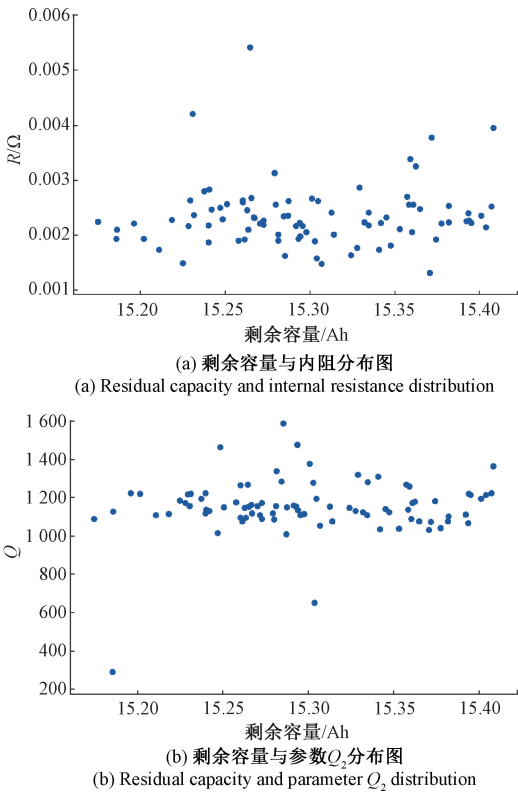
为了验证提出的基于短时脉冲放电与 EIS 相结合的退役动力电池快速分选与重组方法,本文设计了两组验证实验。

4.1 EIS 验证测试

前述可知,具有 I 类曲线的退役动力电池一般健康状况较好,并且等效电路参数 Q_2 值较大。为了验证这个结论,本文拆解了一件几乎全新含有 90 节电芯模组,并对其进行定容与 EIS 测试。

图 13 显示了模组中单节电芯的剩余容量与内阻及等效电路参数 Q_2 值分布图。由图可知:首先,电芯的容量均在 15.15~15.45 Ah 之间;其次,其内阻绝大部分分布在 2 mΩ 左右;最后,经过等效电路拟合得到的参数 Q_2 值仅有极少数参数值小于 1 000,且大部分分布在 1 000~1 200 之间。以上 3 点充分表明:一致性较强的模组其容

量、内阻以及等效电路参数 Q_2 值的分布是有界且均匀的。值得注意的是,90 节电芯的阻抗谱曲线类型均为典型的 I 类曲线。因此,可以说明内阻以及等效电路参数 Q_2 值对电芯成组是重要参数。



(a) 剩余容量与内阻分布图
(a) Residual capacity and internal resistance distribution

(b) 剩余容量与参数 Q_2 分布图
(b) Residual capacity and parameter Q_2 distribution

图 13 90 节电池剩余容量与内阻及 Q_2 值分布图

Fig. 13 Distribution diagram of residual capacity, internal resistance and Q_2 value of 90 batteries

4. 2 退役电池重组验证实验

根据提出的重组方法,结合现有的保护电路板,成组了 4 个四串模组,并进行了充放电循环实验。

如表 2 显示了模组中各节电芯的曲线类别及相关参数。可以根据表中数据对各模组做出如下推测:1) 模组 1 由 4 节 I 类阻抗曲线和高参数 Q_2 值串联重组而成,应具有最好的重组特性;2) 模组 2 相对于模组 1 参数 Q_2 值小很多,容量衰减应大于模组 1;3) 模组 3 相对模组 1 和模组 2 含有 1 节 II 类电芯曲线和 1 节 Q_2 值较小的 I 类曲线,推测容量衰减较模组 2 大;4) 模组 4 全部由 II 类电芯组成,容量衰减应该最大。

图 14 显示了对 4 个模组进行 20 次充放电循环后,4 个模组容量的变化趋势;图 15 则显示了各个模组每经历一次充放电后容量衰减的累积量,表明随着循环次数的增加,模组 4 衰减的越来越多,模组 3、2 和 1 依次次之,因此初步验证了上述的推测。

表 2 各模组相关参数
Table 2 Relevant parameters of each module

模组 1			模组 2		
编号	容量/Ah	Q_2	编号	容量/Ah	Q_2
I-S72	15.333 9	1 047	I-S77	15.226 7	596.3
I-D27	15.189 3	1 020	I-D15	15.677 7	575.4
I-D5	15.557 2	1 017	I-S40	15.104 2	505.8
I-S9	15.180 4	1 013	I-S81	15.473 5	495.4
模组 3			模组 4		
编号	容量/Ah	Q_2	编号	容量/Ah	Q_2
II-S34	14.995 1	335.5	II-S53	14.822 5	342.6
I-C4	15.021 2	1 097	II-B5	14.628 6	385.5
I-C3	14.971 9	1 025	II-S8	14.547 0	365.9
I-S32	15.453 1	550	II-S65	14.349 7	346.6

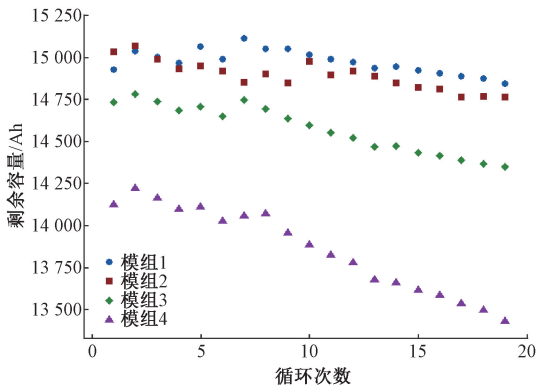


图 14 4 个模组循环老化容量变化

Fig. 14 Change of cyclic aging capacity of four modules

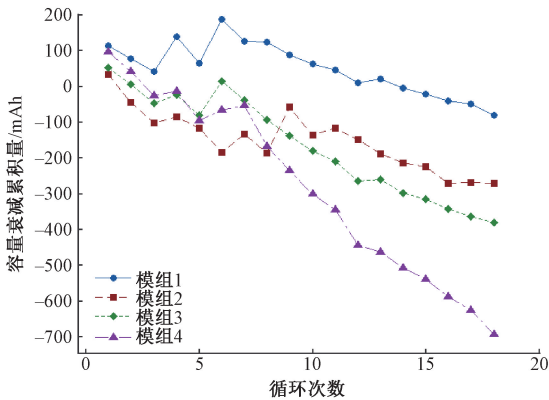


图 15 4 个模组循环老化容量衰减累积量变化

Fig. 15 Change of cumulative attenuation of cyclic aging capacity of four modules

4.3 讨 论

虽然模组老化循环实验的充放电次数有限,但是从初步结果来看,提出的退役动力电池快速分选与重组方法是有效且有意义的。相对于当前普遍使用的循环充放电静置法,即对每节退役电芯先进行多次充放电测试定容,然后静置多日,最后严格筛选出剩余容量、端电压以及直流内阻非常接近的电芯重组进行梯次利用,新方法节省了大量的充放电定容和漫长的静置时间。

此外,短脉冲和 EIS 测试也为分类重组的筛选标准提供了更多的一致性参数。同时,短脉冲相当于给满电量的电池放电 4 min,使其 SOC 在 95% 附近,因此为 EIS 检测时提供了便利。实际上,对于单节电芯而言,短脉冲与阻抗谱测试耗费的时间不超过 20 min。

5 结 论

本文通过对 200 节退役磷酸铁锂动力电池的多项实验和分析,提出了一种符合实际需求且快速有效的电芯分类与重组的方法。两组验证实验结果表明:该方法大幅度减少了传统分类和重组流程时间、人工成本以及能源消耗,同时成组后一致性指标较好,在工程上具有较大的实用价值。总的来说,本文提供了一种快速检测退役动力电池现有状态以及快速分类重组的新思路和方法。

参考文献

[1] BRACO E, IDOIA SAN MARTÍN, BERRUETA A, et al. Experimental assessment of cycling ageing of lithium-ion second-life batteries from electric vehicles[J]. The Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101695.

[2] MUHAMMAD M, AHMEID M, ATTIDEKOU P S, et al. Assessment of spent EV batteries for second-life application [C]. 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), 2019: 1-5.

[3] OPITZ A, BADAMI P, SHEN L, et al. Can Li-Ion batteries be the panacea for automotive applications? [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 68: 685-692.

[4] 王琪, 孙玉坤, 倪福银, 等. 一种混合动力电动汽车电池荷电状态预测的新方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 189-196.

WANG Q, SUN Y K, NI F Y, et al. A new method for predicting the state of charge of hybrid electric vehicle batteries[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 189-196.

[5] ZHOU L, GARG A, ZHENG J, et al. Battery pack recycling challenges for the year 2030: Recommended

solutions based on intelligent robotics for safe and efficient disassembly, residual energy detection, and secondary utilization[J]. Energy Storage, 2020: e190.

[6] 张宁, 汤建林, 彭发豫, 等. 磷酸铁锂动力电池循环寿命预测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 33-39.

ZHANG N, TANG J L, PENG F Y, et al. Prediction method of cycle life of lithium iron phosphate power battery [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(1): 33-39.

[7] 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. Summary of health status estimation of lithium-ion battery packs[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 1-18.

[8] CUMA M U, KOROGLU T. A comprehensive review on estimation strategies used in hybrid and battery electric vehicles[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42:517-531.

[9] 吴鸣, 孙丽敬, 寇凌峰, 等. 考虑需求侧响应的主动配电网电池梯次储能的容量配置方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 71-79.

WU M, SUN L J, KOU L F, et al. Capacity configuration method for second-use electric vehicle batteries of active distribution network based on demand side response [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 71-79.

[10] SCHNEIDER E L, OLIVEIRA C T, BRITO R M, et al. Classification of discarded NiMH and Li-Ion batteries and reuse of the cells still in operational conditional conditions in prototypes[J]. Journal of Power Sources, 2014, 262: 1-9.

[11] ENACHE B A, SERITAN G C, GRIGORESCU S D, et al. A battery screening system for second life LiFePO₄ batteries [C]. 2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), 2020: 298-301.

[12] LIU W, LI H, DENG Y, et al. Fast screening of capacity and internal resistance for cascade utilization of the retired power lithium-ion batteries [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1678(1): 012067.

[13] SCHUSTER S F, BRAND M J, CAMPESTRINI C, et al. Correlation between capacity and impedance of lithium-ion cells during calendar and cycle life [J]. Journal of Power Sources, 2016, 305 (Feb. 15): 191-199.

[14] 郑志坤, 赵光金, 金阳, 等. 基于库仑效率的退役锂离子

子动力电池储能梯次利用筛选[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1):388-395.

ZHENG ZH K, ZHAO G J, JIN Y, et al. Screening of energy storage echelon utilization of retired lithium ion power batteries based on coulomb efficiency [J]. Journal of Electrotechnics, 2019, 34(S1):388-395.

[15] 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 separation technology of retired lithium battery modules based on fast charging curve [J]. Power Grid Technology, 2020, 44(5):1664-1673.

[16] 张朝龙, 赵筛筛, 章博. 基于因子分析与 K-means 聚类的退役动力电池快速分选方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12):41-47.

ZHANG CH L, ZHAO SH SH, ZHANG B, et al. Fast sorting method of decommissioned power batteries based on factor analysis and K-means clustering [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 41-47.

[17] SCHUSTER S F, BRAND M J, CAMPESTRINI C, et al. Correlation between capacity and impedance of lithium-ion cells during calendar and cycle life [J]. Journal of Power Sources, 2016, 305 (Feb. 15): 191-199.

[18] LAI X, QIAO D D, ZHENG Y J, et al. A rapid screening and regrouping approach based on neural networks for large-scale retired lithium-ion cells in second-use applications [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 776-791.

[19] CUMA M U, KOROGLU T. A comprehensive review on estimation strategies used in hybrid and battery electric vehicles[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42:517-531.

[20] MOVASSAGH K, RAIHAN S A, BALASINGAM B. Performance analysis of coulomb counting approach for state of charge estimation [C]. 2019 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2019: 1-6.

[21] JIANG Y, JIANG J, ZHANG C, et al. Recognition of battery aging variations for LiFePO4 batteries in 2nd use applications combining incremental capacity analysis and statistical approaches [J]. Journal of Power Sources, 2017, 360:180-188.

[22] LUO F, HUANG H H, NI L P, et al. Rapid prediction of the state of health of retired power batteries based on electrochemical impedance spectroscopy[J]. The Journal of Energy Storage, 2021, 41(3):102866.

[23] COLEMAN M, HURLEY W G, LEE C K. An improved battery characterization method using a two-pulse load test[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2):708-713.

作者简介



骆凡, 2016 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学博士研究生, 主要研究方向为新能源发电与储能系统。
E-mail: 2449726038@qq.com

Luo Fan received his B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 2016. He is currently a Ph. D. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include new energy power generation and energy storage system.



黄海宏, 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 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.