



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113238157 B

(45) 授权公告日 2022. 11. 22

(21) 申请号 202110495066.2

(22) 申请日 2021.05.07

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113238157 A

(43) 申请公布日 2021.08.10

(66) 本国优先权数据  
202011449312.2 2020.12.09 CN

(73) 专利权人 北京大学深圳研究生院  
地址 518055 广东省深圳市南山区西丽深圳大学城北大园区

(72) 发明人 金鹏 马晓明 孙魏 廖夏伟 王创社

(74) 专利代理机构 深圳鼎合诚知识产权代理有限公司 44281  
专利代理师 郭燕

(51) Int. Cl.  
G01R 31/387 (2019.01)  
G01R 31/385 (2019.01)

(56) 对比文件  
CN 110504501 A, 2019.11.26

CN 110187287 A, 2019.08.30

CN 110824375 A, 2020.02.21

CN 110596612 A, 2019.12.20

CN 111906036 A, 2020.11.10

CN 109530275 A, 2019.03.29

CN 110614236 A, 2019.12.27

CN 108199109 A, 2018.06.22

US 2019383878 A1, 2019.12.19

US 2014009122 A1, 2014.01.09

US 2016178706 A1, 2016.06.23

李济飞. 电动汽车退役电池剩余容量估计与分选方法研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技II辑》.2021, (第2期),  
Xin Lai et al..Rapid Sorting and Regrouping of Retired.《IEEE Transactions on Vehicular Technology》.2021, 第70卷(第2期), (续)

审查员 赵娟娟

权利要求书2页 说明书9页 附图6页

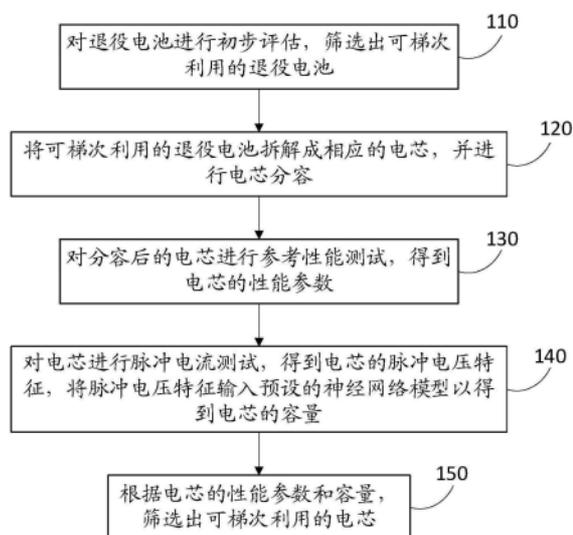
## (54) 发明名称

一种通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法

## (57) 摘要

一种通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法, 首先对退役电池进行初步评估, 筛选出可梯次利用的退役电池, 然后将可梯次利用的退役电池拆解成相应的电芯, 并进行电芯分容, 对分容后的电芯进行参考性能测试, 得到电芯的性能参数, 还对电芯进行脉冲电流测试, 得到电芯的脉冲电压特征, 将电芯的脉冲电压特征输入预设的神经网络模型以得到电芯的容量, 最后根据电芯的性能参数和容量, 筛选出可梯次利用的电芯。由于引入人工智能来辅助进行电芯的检测, 从而减少了检测时间和工作量, 提高了检测精度。

测精度。



CN 113238157 B

[接上页]

(56) 对比文件

Ning Yan et al..Sorting Method for Retired Power Battery Module Considering Consistent Static and Dynamic

Characteristics.《2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)》.2020,

1. 一种通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法,其特征在于,包括:

对退役电池进行初步评估,筛选出可梯次利用的退役电池;

将可梯次利用的退役电池拆解成相应的电芯,并进行电芯分容;

对分容后的电芯进行参考性能测试,得到电芯的性能参数;

对电芯进行脉冲电流测试,得到电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ ,其中 $i$ 为电芯序号,由电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ 计算得到电芯的脉冲电压特征,将脉冲电压特征输入预设的神经网络模型以得到电芯的容量;

根据电芯的性能参数和容量,筛选出可梯次利用的电芯;

其中所述对电芯进行脉冲电流测试,得到电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ ,其中 $i$ 为电芯序号,由电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ 计算得到电芯的脉冲电压特征,包括:

将电池中的模组充分静置得到初始电压 $V_0$ ,将 $V_0$ 作为同一模组中各个电芯的初始电压;

对电芯进行1/2C恒流充电5min,再充分静置1h;

记充电开始后0.01s时电芯的电压为突增电压 $V_{i1}$ ;

记充电5min后电芯电压稳定时的最高值为渐增电压 $V_{i2}$ ;

记断电后0.01s时电芯的电压为突减电压 $V_{i3}$ ;

记断电1h后电芯电压稳定时的最低值为渐减电压 $V_{i4}$ ;

计算 $V_{i1}-V_0$ 、 $V_{i2}-V_{i1}$ 、 $V_{i3}-V_{i2}$ 和 $V_{i4}-V_{i3}$ 的结果作为电芯的脉冲电压特征。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述对退役电池进行初步评估,筛选出可梯次利用的退役电池,包括:

对电池的历史数据进行评估,对于历史数据出现异常的,直接剔除;

对电池、电池中各个模组和各个模组中的电芯进行外观检测,对于出现胀气、破损和鼓包的,直接剔除;

对电池、电池中各个模组和各个模组中的电芯进行绝缘检测,对于出现短路的,直接剔除;

打开电池箱盖检查箱内结构及组件的完整性,对于出现锈蚀或残缺的,直接剔除。

3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述将可梯次利用的退役电池拆解成相应的电芯,并进行电芯分容,包括:

将可梯次利用的退役电池机械拆解成一个个独立的单体电芯,使用多通道电芯检测分容设备测得各个电芯的分容容量,得到各个容量水平的电芯。

4. 如权利要求3所述的方法,其特征在于,所述使用多通道电芯检测分容设备测得各个电芯的分容容量包括对电芯进行以下步骤:

恒流恒压充电1min,并循环5次,其中充电电流0.6A,充电电压3.7V;

恒流恒压充电5min,其中充电电流2.95A,充电电压3.65V;

恒流放电3min,其中放电电流1A;

恒流恒压充电150min,其中充电电流2.95A,充电电压3.65V,截止电流为0.2A;

搁置3min;

恒流恒压充电30min,其中充电电流1A,充电电压3.65V,截止电流为0.2A;

搁置5min;

恒流放电150min,其中放电电流2.95A,截止电压为2.6V;

恒流放电30min,其中放电电流1A,截止电压为2.6V;

其中最后两个步骤的放电容量之和即为电芯的分容容量。

5.如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述对分容后的电芯进行参考性能测试,得到电芯的性能参数,包括:

根据USABC电池测试标准,以1/3C速率对分容后的电芯进行容量校正;

对电芯进行HPPC混合脉冲测试以得到电芯的内阻;

对电芯进行不同充放电速率的充放电测试,得到电芯在不同充放电速率下的充放电容量,据此计算电芯在不同充放电速率下的库伦效率和能量效率;所述电芯的性能参数包括电芯的内阻、库伦效率和能量效率。

6.如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:在对电芯进行脉冲电流测试前,对电芯进行增量容量分析和电化学阻抗谱分析。

7.如权利要求6所述的方法,其特征在于,所述增量容量分析包括:

对电芯进行0.1C的充放电测试,测试中对电芯电压和容量进行等时间间隔采样得到电压序列 $\{V_{i,j} | i=m, j=1, 2, \dots, n\}$ 和容量序列 $\{Q_{i,j} | i=m, j=1, 2, \dots, n\}$ ,其中V表示电压,Q表示容量,i表示电芯序号,j表示电压或容量采样数据时间序号,m和n为大于0的整数;

对电压序列和容量序列进行线性样条插值处理,得到线性样条插值函数 $Q=f(V)$ ,线性样条插值函数 $Q=f(V)$ 由n-1个多项式组成,其中第k个多项式的表达式为:

$$\frac{Q - Q_{m,k+1}}{Q_{m,k} - Q_{m,k+1}} = \frac{V - V_{m,k+1}}{V_{m,k} - V_{m,k+1}}, k=1, 2, \dots, n-1;$$

记电压序列中的最小值为 $V_{\min}$ ,最大值为 $V_{\max}$ ,将 $V_{\min}$ 到 $V_{\max}$ 范围内的电压等间隔划分,得到由1000个等间隔电压组成的新电压序列 $\{V_{i,j}^* | i=m, j=1, 2, \dots, 1000\}$ ,将新电压序列代入线性样条插值函数 $Q=f(V)$ 得到新容量序列 $\{Q_{i,j}^* | i=m, j=1, 2, \dots, 1000\}$ ;

对于新电压序列和新容量序列,计算 $IC_{i,j} = \Delta Q_{i,j}^* / \Delta V_{i,j}^* = (Q_{i,j+1}^* - Q_{i,j}^*) / (V_{i,j+1}^* - V_{i,j}^*)$ ,得到增量容量序列 $\{IC_{i,j} | i=m, j=1, 2, \dots, 999\}$ 。

8.如权利要求6所述的方法,其特征在于,所述电化学阻抗谱分析包括:

建立电芯的交流等效电路,使用电化学工作站对电芯施加10mHz-100kHz频率的交流电,根据电芯的响应拟合交流等效电路中的元件参数;

其中所述交流等效电路包括串联的高频等效电路、中频等效电路和低频等效电路,所述高频等效电路包括电阻R0,所述中频等效电路包括电容C1和电阻R1,电容C1和电阻R1并联,所述低频等效电路包括电容C2、电阻R2和Warburg阻抗,电阻R2和Warburg阻抗串联后与电容C2并联。

## 一种通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电动汽车退役电池梯次利用技术领域,具体涉及一种通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法。

### 背景技术

[0002] 近年来,诸如电动汽车等的新能源汽车因为其低排放、低污染、不使用化石燃料等优点被大力推广,但是电动汽车的退役电池却会对环境造成污染,大量的电动汽车退役电池带来了巨大的环境压力,因此有必要对电动汽车退役电池进行回收再利用。目前的电池回收途径主要有梯次利用和化学回收。与化学回收相比,退役电池梯次利用可以挖掘和利用电池的剩余价值,且无需拆卸、破坏或翻新电池,是一种简单廉价且环保的回收方式。当电动汽车电池服役了若干年后,由于电池间的温度、连接阻抗、震荡程度等因素的差异,电池的容量、内阻等性能的不一致性逐渐加剧,这给退役电池的梯次利用带来了一定的挑战,因此准确、快速的退役电池性能检测方法对于退役电池的筛选是十分重要的。

[0003] 目前,对于电动汽车退役电池的性能检测主要集中在电压和容量的检测,现有的检测方法大都周期较长、成本较高,而且检测精确度也难以达到理想效果,甚至会导致退役电池后续再利用阶段的安全隐患。

### 发明内容

[0004] 本申请提供一种通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法,旨在解决现有电动汽车退役电池检测方法周期较长、成本较高的问题。

[0005] 根据第一方面,一种实施例中提供一种通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法,包括:

[0006] 对退役电池进行初步评估,筛选出可梯次利用的退役电池;

[0007] 将可梯次利用的退役电池拆解成相应的电芯,并进行电芯分容;

[0008] 对分容后的电芯进行参考性能测试,得到电芯的性能参数;

[0009] 对电芯进行脉冲电流测试,得到电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ ,其中 $i$ 为电芯序号,由电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ 计算得到电芯的脉冲电压特征,将脉冲电压特征输入预设的神经网络模型以得到电芯的容量;

[0010] 根据电芯的性能参数和容量,筛选出可梯次利用的电芯。

[0011] 一种实施例中,所述对退役电池进行初步评估,筛选出可梯次利用的退役电池,包括:

[0012] 对电池的历史数据进行评估,对于历史数据出现异常的,直接剔除;

[0013] 对电池、电池中各个模组和各个模组中的电芯进行外观检测,对于出现胀气、破损和鼓包的,直接剔除;

[0014] 对电池、电池中各个模组和各个模组中的电芯进行绝缘检测,对于出现短路的,直

接剔除；

[0015] 打开电池箱盖检查箱内结构及组件的完整性,对于出现锈蚀或残缺的,直接剔除。

[0016] 一种实施例中,所述将可梯次利用的退役电池拆解成相应的电芯,并进行电芯分容,包括:

[0017] 将可梯次利用的退役电池机械拆解成一个个独立的单体电芯,使用多通道电芯检测分容设备测得各个电芯的分容容量,得到各个容量水平的电芯。

[0018] 一种实施例中,所述使用多通道电芯检测分容设备测得各个电芯的分容容量包括对电芯进行以下步骤:

[0019] 恒流恒压充电1min,并循环5次,其中充电电流0.6A,充电电压3.7V;

[0020] 恒流恒压充电5min,其中充电电流2.95A,充电电压3.65V;

[0021] 恒流放电3min,其中放电电流1A;

[0022] 恒流恒压充电150min,其中充电电流2.95A,充电电压3.65V,截止电流为0.2A;

[0023] 搁置3min;

[0024] 恒流恒压充电30min,其中充电电流1A,充电电压3.65V,截止电流为0.2A;

[0025] 搁置5min;

[0026] 恒流放电150min,其中放电电流2.95A,截止电压为2.6V;

[0027] 恒流放电30min,其中放电电流1A,截止电压为2.6V;

[0028] 其中最后两个步骤的放电容量之和即为电芯的分容容量。

[0029] 一种实施例中,所述对分容后的电芯进行参考性能测试,得到电芯的性能参数,包括:

[0030] 根据USABC电池测试标准,以1/3C速率对分容后的电芯进行容量校正;

[0031] 对电芯进行HPPC混合脉冲测试以得到电芯的内阻;

[0032] 对电芯进行不同充放电速率的充放电测试,得到电芯在不同充放电速率下的充放电容量,据此计算电芯在不同充放电速率下的库伦效率和能量效率;所述电芯的性能参数包括电芯的内阻、库伦效率和能量效率。

[0033] 一种实施例中,所述对电芯进行脉冲电流测试,得到电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ ,包括:

[0034] 将电池中的模组充分静置得到初始电压 $V_0$ ,将 $V_0$ 作为同一模组中各个电芯的初始电压;

[0035] 对电芯进行1/2C恒流充电5min,再充分静置1h;

[0036] 记充电开始后0.01s时电芯的电压为突增电压 $V_{i1}$ ;

[0037] 记充电5min后电芯电压稳定时的最高值为渐增电压 $V_{i2}$ ;

[0038] 记断电后0.01s时电芯的电压为突减电压 $V_{i3}$ ;

[0039] 记断电1h后电芯电压稳定时的最低值为渐减电压 $V_{i4}$ 。

[0040] 一种实施例中,所述由电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ 计算得到电芯的脉冲电压特征包括:

[0041] 计算 $V_{i1}-V_0$ 、 $V_{i2}-V_{i1}$ 、 $V_{i3}-V_{i2}$ 和 $V_{i4}-V_{i3}$ 的结果作为电芯的脉冲电压特征。

[0042] 一种实施例中,所述通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法还包括:在对电芯进行脉冲电流测试前,对电芯进行增量容量分析和电化学阻抗谱分析。

[0043] 一种实施例中,所述增量容量分析包括:

[0044] 对电芯进行0.1C的充放电测试,测试中对电芯电压和容量进行等时间间隔采样得到电压序列 $\{V_{i,j} | i=m, j=1, 2, \dots, n\}$ 和容量序列 $\{Q_{i,j} | i=m, j=1, 2, \dots, n\}$ ,其中V表示电压,Q表示容量,i表示电芯序号,j表示电压或容量采样数据时间序号,m和n为大于0的整数;

[0045] 对电压序列和容量序列进行线性样条插值处理,得到线性样条插值函数 $Q=f(V)$ ,线性样条插值函数 $Q=f(V)$ 由n-1个多项式组成,其中第k个多项式的表达式为:

$$[0046] \quad \frac{Q - Q_{m,k+1}}{Q_{m,k} - Q_{m,k+1}} = \frac{V - V_{m,k+1}}{V_{m,k} - V_{m,k+1}}, k=1, 2, \dots, n-1;$$

[0047] 记电压序列中的最小值为 $V_{\min}$ ,最大值为 $V_{\max}$ ,将 $V_{\min}$ 到 $V_{\max}$ 范围内的电压等间隔划分,得到由1000个等间隔电压组成的新电压序列 $\{V_{i,j}^* | i=m, j=1, 2, \dots, 1000\}$ ,将新电压序列代入线性样条插值函数 $Q=f(V)$ 得到新容量序列 $\{Q_{i,j}^* | i=m, j=1, 2, \dots, 1000\}$ ;

[0048] 对于新电压序列和新容量序列,计算 $IC_{i,j} = \Delta Q_{i,j}^* / \Delta V_{i,j}^* = (Q_{i,j+1}^* - Q_{i,j}^*) / (V_{i,j+1}^* - V_{i,j}^*)$ ,得到增量容量序列 $\{IC_{i,j} | i=m, j=1, 2, \dots, 999\}$ 。

[0049] 一种实施例中,所述电化学阻抗谱分析包括:

[0050] 建立电芯的交流等效电路,使用电化学工作站对电芯施加10mHz-100kHz频率的交流电,根据电芯的响应拟合交流等效电路中的元件参数;

[0051] 其中所述交流等效电路包括串联的高频等效电路、中频等效电路和低频等效电路,所述高频等效电路包括电阻R0,所述中频等效电路包括电容C1和电阻R1,电容C1和电阻R1并联,所述低频等效电路包括电容C2、电阻R2和Warburg阻抗,电阻R2和Warburg阻抗串联后与电容C2并联。

[0052] 依据上述实施例的通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法,首先对退役电池进行初步评估,筛选出可梯次利用的退役电池,然后将可梯次利用的退役电池拆解成相应的电芯,并进行电芯分容,对分容后的电芯进行参考性能测试,得到电芯的性能参数,还对电芯进行脉冲电流测试,得到电芯的脉冲电压特征,将电芯的脉冲电压特征输入预设的神经网络模型以得到电芯的容量,最后根据电芯的性能参数和容量,筛选出可梯次利用的电芯。由于引入人工智能来辅助进行电芯的检测,从而减少了检测时间和工作量,提高了检测精度;同时将退役电池拆解成易于梯次利用的最小单元电芯,并对电芯进行性能检测和筛选,方便后续利用电芯进行梯次利用,有利于促进电动汽车退役电池的梯次利用。

## 附图说明

[0053] 图1为一种实施例的通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法的流程图;

[0054] 图2为对一个电动汽车退役电池进行电芯分容得到的电芯容量分布图;

[0055] 图3为一种实施例中电芯的库伦效率、能量效率与不同充放电速率的关系图;

[0056] 图4为一种实施例中得到的电芯的容量关于电压的微分曲线图;

[0057] 图5为电芯的电化学阻抗谱的示意图;

[0058] 图6为电芯的交流等效电路的结构示意图;

[0059] 图7为一种实施例中等效电路中各元件参数与电芯容量的关系图;

- [0060] 图8为一种实施例中神经网络模型的构建流程图；
- [0061] 图9为对电芯进行脉冲电流测试的过程中，电芯的电压随时间的变化曲线图；
- [0062] 图10为电芯容量的预测值与真实值的对比图。

### 具体实施方式

[0063] 下面通过具体实施方式结合附图对本发明作进一步详细说明。其中不同实施方式中类似元件采用了相关联的类似的元件标号。在以下的实施方式中，很多细节描述是为了使得本申请能被更好的理解。然而，本领域技术人员可以毫不费力的认识到，其中部分特征在不同情况下是可以省略的，或者可以由其他元件、材料、方法所替代。在某些情况下，本申请相关的一些操作并没有在说明书中显示或者描述，这是为了避免本申请的核心部分被过多的描述所淹没，而对于本领域技术人员而言，详细描述这些相关操作并不是必要的，他们根据说明书中的描述以及本领域的一般技术知识即可完整了解相关操作。

[0064] 另外，说明书中所描述的特点、操作或者特征可以以任意适当的方式结合形成各种实施方式。同时，方法描述中的各步骤或者动作也可以按照本领域技术人员所能显而易见的方式进行顺序调换或调整。因此，说明书和附图中的各种顺序只是为了清楚描述某一个实施例，并不意味着是必须的顺序，除非另有说明其中某个顺序是必须遵循的。

[0065] 本文中为部件所编序号本身，例如“第一”、“第二”等，仅用于区分所描述的对象，不具有任何顺序或技术含义。而本申请所说“连接”、“联接”，如无特别说明，均包括直接和间接连接(联接)。

[0066] 本发明提供的通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法，首先对电动汽车退役电池进行由外观到内部构造的初步筛选，将筛选出来的退役电池拆解成相应的电芯，对拆解出来的电芯进行参考性能测试得到电芯的性能参数，还对电芯进行脉冲电流测试，得到电芯的脉冲电压特征，利用电芯的脉冲电压特征与电芯的容量间的关系构建神经网络模型，从而可以利用构建好的神经网络模型，通过电芯的脉冲电压特征来计算电芯的容量，根据电芯的性能参数和容量，就可以筛选出可梯次利用的电芯，由此能够快速、准确地剔除衰退严重的退役电池。

[0067] 请参考图1，本申请一种实施例中，对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法包括步骤110~150，下面具体说明。

[0068] 步骤110：对退役电池进行初步评估，筛选出可梯次利用的退役电池。对退役电池的初步评估可以从退役电池的历史数据、外观、绝缘性、内部结构的完整性等方面进行。具体的，对电池的历史数据进行评估，对于历史数据出现异常的，直接剔除；对电池、电池中各个模组和各个模组中的电芯进行外观检测，对于出现胀气、破损和鼓包的，直接剔除；对电池、电池中各个模组和各个模组中的电芯进行绝缘检测，对于出现短路的，直接剔除；打开电池箱盖检查箱内结构及组件的完整性，对于出现锈蚀或残缺的，直接剔除。

[0069] 步骤120：将步骤110中得到的可梯次利用的退役电池拆解成相应的电芯，并进行电芯分容。电动汽车的电池通常是由许多电池模组串联组成，电池模组中又包含了许多并联的电芯，例如某个电动汽车的电池中，包含了42个电池模组，每个模组内部又包含了28个32700型号(直径32mm，高70mm)的圆柱形磷酸铁锂单体电芯，因此这个电池总共包含了1176个电芯。电芯易于进行梯次利用，因此如果能对电芯进行性能检测并筛选出可梯次利用的

电芯,则有助于对电动汽车退役电池的梯次利用。

[0070] 将电池拆解成电芯,可以是将电池机械拆解成一个个独立的单体电芯,对电芯进行分容,可以是使用多通道电芯检测分容设备来测得各个电芯的分容容量,得到各个容量水平的电芯。以额定电压为3.2V、额定容量为5.5AH的磷酸铁锂电芯为例,使用多通道电芯检测分容设备测量电芯的分容容量可以对电芯执行以下步骤:

[0071] 恒流恒压充电1min,并循环5次,其中充电电流0.6A,充电电压3.7V;

[0072] 恒流恒压充电5min,其中充电电流2.95A,充电电压3.65V;

[0073] 恒流放电3min,其中放电电流1A;

[0074] 恒流恒压充电150min,其中充电电流2.95A,充电电压3.65V,截止电流为0.2A;

[0075] 搁置3min;

[0076] 恒流恒压充电30min,其中充电电流1A,充电电压3.65V,截止电流为0.2A;

[0077] 搁置5min;

[0078] 恒流放电150min,其中放电电流2.95A,截止电压为2.6V;

[0079] 恒流放电30min,其中放电电流1A,截止电压为2.6V;

[0080] 其中最后两个步骤的放电容量之和即为电芯的分容容量。

[0081] 请参考图2,图2示出了对一个电动汽车退役电池进行电芯分容的结果,可以看到,电芯的容量分布近似符合均值为4484、方差为53的Weibull分布。

[0082] 步骤130:对分容后的电芯进行参考性能测试,得到电芯的性能参数,电芯的性能参数包括电芯的内阻、库伦效率、能量效率等。首先,根据USABC(United States Advanced Battery Consortium,美国先进电池联盟)电池测试标准,以1/3C速率对分容后的电芯进行容量校正。其中C为电池充放电速率的表示单位,以1C的速率将电芯从0充满需要1小时,以1/3C速率将电芯从0充满需要3小时。根据相关标准,电芯在1/3C速率下的放电容量可认为是该电芯的实时容量,因此可以以1/3C速率对电芯进行容量校正。

[0083] 进行容量校正后,对电芯进行HPPC(Hybrid Pulse Power Characteristic,混合动力脉冲能力特性)混合脉冲测试以得到电芯的内阻,进行不同充放电速率的充放电测试以得到电芯的倍率性能。HPPC混合脉冲测试的过程主要由10秒的2C快速放电、40秒的静置以及10秒的1C快速充电组成,计算电芯直流内阻的公式为:

$$[0084] \quad R_{dc} = \frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2},$$

[0085] 其中 $V_1$ 、 $V_2$ 可以是任意工步中测得的电压曲线上的两个采样点, $I_1$ 、 $I_2$ 是和 $V_1$ 、 $V_2$ 对应的电流值。

[0086] 电芯的倍率性能测试包括对电芯进行0.1C、1/3C、2/3C、1C等不同速率的充放电测试,得到电芯在不同充放电速率下的充放电容量,据此计算电芯在不同充放电速率下的库伦效率和能量效率。电芯的库伦效率和能量效率只有达到一定水平才能用于梯次利用。请参考图3,图3示出了对某个电芯进行倍率性能测试的结果,可以看到,在4种倍率下,电芯的能量效率均在80%以上,库伦效率均在95%以上,那么该电芯老化程度不严重,可以用于梯次利用。

[0087] 步骤140:对电芯进行脉冲电流测试,得到电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ ,其中i为电芯序号,由电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$

和渐减电压 $V_{i4}$ 计算得到电芯的脉冲电压特征,将脉冲电压特征输入预设的神经网络模型以得到电芯的容量。

[0088] 申请人对电芯进行了老化测试,经研究发现电芯的老化程度与电芯的脉冲电压特征密切相关。电芯的容量一定程度上反映了电芯的老化程度,容量大的电芯老化程度较小,容量小的电芯老化程度较大,因此申请人对不同容量的电芯进行了老化测试,比较不同容量的电芯间的老化差异,发现电芯的容量与电芯的脉冲电压特征密切相关,因此提出了用神经网络模型拟合电芯的脉冲电压特征和电芯的容量之间的关系,通过电芯的脉冲电压特征来计算电芯的容量的方法。电芯的老化测试包括对电芯进行增量容量分析和电化学阻抗谱分析,下面具体说明。

[0089] 对电芯进行增量容量分析,首先对电芯进行0.1C速率的充放电测试,测试中对电芯的电压和容量进行等时间间隔采样得到电压序列 $\{V_{i,j} | i=m, j=1, 2, \dots, n\}$ 和容量序列 $\{Q_{i,j} | i=m, j=1, 2, \dots, n\}$ ,其中V表示电压,Q表示容量,i表示电芯序号,j表示电压或容量采样数据时间序号,m和n为大于0的整数。然后对电压序列和容量序列进行线性样条插值处理,得到线性样条插值函数 $Q=f(V)$ ,线性样条插值函数 $Q=f(V)$ 由n-1个多项式组成,其中第k个多项式的表达式为:

$$[0090] \quad \frac{Q - Q_{m,k+1}}{Q_{m,k} - Q_{m,k+1}} = \frac{V - V_{m,k+1}}{V_{m,k} - V_{m,k+1}}, \quad k=1, 2, \dots, n-1,$$

[0091] 任意的两个相邻的多项式在连接点处都是连续的,因此 $Q=f(V)$ 是一个连续函数。记电压序列中的最小值为 $V_{\min}$ ,最大值为 $V_{\max}$ ,将 $V_{\min}$ 到 $V_{\max}$ 范围内的电压等间隔划分,得到由1000个等间隔电压组成的新电压序列 $\{V_{i,j}^* | i=m, j=1, 2, \dots, 1000\}$ ,将新电压序列代入线性样条插值函数 $Q=f(V)$ 得到新容量序列 $\{Q_{i,j}^* | i=m, j=1, 2, \dots, 1000\}$ 。

[0092] 对于所获得的新电压序列和新容量序列,进行容量关于电压的微分处理以得到增量容量序列。由于 $V_{i,j+1}^* - V_{i,j}^*$ 为一较小值,因此,可以使用新电压序列相邻两点的差值来做微分的近似计算,具体的,可以计算 $IC_{i,j} = \Delta Q_{i,j}^* / \Delta V_{i,j}^* = (Q_{i,j+1}^* - Q_{i,j}^*) / (V_{i,j+1}^* - V_{i,j}^*)$ ,从而得到增量容量序列 $\{IC_{i,j} | i=m, j=1, 2, \dots, 999\}$ 。由增量容量序列可以拟合得到容量关于电压的微分曲线,以 $\text{LiFePO}_4$ 电池为例,得到的容量关于电压的微分曲线如图4所示,曲线峰值对应于正负极活性材料的相变过程。对于 $\text{LiFePO}_4$ 电池来说,电池充电过程中,正极材料由 $\text{LiFePO}_4$ 逐渐转化为 $\text{FePO}_4$ ,正极发生了由 $\text{LiFePO}_4$ 到 $\text{FePO}_4$ 的两相相变过程,从而在正极上形成一个充电电压平台,对应于曲线中的峰值P1;负极在电池充电时,随着 $\text{Li}^+$ 嵌入,负极上的石墨材料会有三个相变过程,表现出三个明显的电势平台,分别对应于曲线中的峰值P1、P2和P5。

[0093] 对电芯进行电化学阻抗谱分析,首先要建立电芯的交流等效电路。电芯的电化学阻抗谱如图5所示,可以分为三个区域:高频区半圆,中频区凹弧和低频区斜线,电芯的交流等效电路可以用来拟合电化学阻抗谱。请参考图6,电芯的交流等效电路包括串联的高频等效电路、中频等效电路和低频等效电路。高频等效电路包括电阻 $R_0$ ,中频等效电路包括电容 $C_1$ 和电阻 $R_1$ ,电容 $C_1$ 和电阻 $R_1$ 并联,低频等效电路包括电容 $C_2$ 、电阻 $R_2$ 和Warburg阻抗 $w$ ,电阻 $R_2$ 和Warburg阻抗 $w$ 串联后与电容 $C_2$ 并联。电芯内部在工作时,在不同频率的交流电下发生着不同的电化学过程,在高频区发生的是电子的转移,在等效电路中用电阻 $R_0$ 来表示;在

中频区发生的是离子在SEI膜(Solid Electrolyte Interface, 固体电解质界面膜)的迁移,在等效电路中用电容C1和电阻R1来表示;在低频区发生的是电荷的转移和离子的扩散,在等效电路中用电容C2和电阻R2来表示电荷的转移,用Warburg阻抗 $w$ 来表示离子的扩散。建立电芯的交流等效电路后,使用电化学工作站对电芯施加10mHz-100kHz频率的交流电,根据电芯的响应通过相关软件拟合交流等效电路中的元件参数。申请人对不同容量的电芯进行了电化学阻抗谱分析,得到的等效电路中各元件参数与电芯容量的关系如图7所示。

[0094] 综合上述分析可以看到,Warburg阻抗 $w$ 与电芯的容量具有一定的负相关性,随着电芯容量的减小而显著增大,也就是说随着电芯老化程度的加深Warburg阻抗 $w$ 显著增大,表明低频区离子扩散受到的阻抗随着电芯老化程度的加深而加大,电芯中锂离子迁移速率随着电芯老化程度的加深而减慢。而对电芯进行脉冲电流测试得到的脉冲电压特征,是电芯老化导致的锂离子迁移速率降低和正极材料相变的外在表现,因此电芯的脉冲电压特征与电芯的老化程度密切相关,从而与电芯的容量也是密切相关的,据此申请人提出用神经网络模型拟合电芯的脉冲电压特征和电芯的容量之间的关系,通过电芯的脉冲电压特征来计算电芯的容量的方法。请参考图8,神经网络模型的构建流程包括步骤141~148,下面具体说明。

[0095] 步骤141:对电芯进行脉冲电流测试,得到电芯的脉冲电压特征。对电芯的脉冲电流测试可以包括:

[0096] 将电池中的模组充分静置得到初始电压 $V_0$ ,由于同一模组内的电芯是相互并联的,它们的初始电压近似相同,因此可以将 $V_0$ 作为同一模组中各个电芯的初始电压;

[0097] 对电芯进行1/2C恒流充电5min,再充分静置1h;

[0098] 记充电开始后0.01s时电芯的电压为突增电压 $V_{i1}$ ;

[0099] 记充电5min后电芯电压稳定时的最高值为渐增电压 $V_{i2}$ ;

[0100] 记断电后0.01s时电芯的电压为突减电压 $V_{i3}$ ;

[0101] 记断电1h时电芯电压稳定时的最低值为渐减电压 $V_{i4}$ 。

[0102] 请参考图9,图9给出了对电芯进行脉冲电流测试的过程中,电芯的电压随时间的变化曲线,以及突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ 在曲线中的大致位置。电芯的脉冲电压特征可以由电芯的突增电压 $V_{i1}$ 、渐增电压 $V_{i2}$ 、突减电压 $V_{i3}$ 和渐减电压 $V_{i4}$ 计算得到,在一些实施例中可以将 $V_{i1}-V_0$ 、 $V_{i2}-V_{i1}$ 、 $V_{i3}-V_{i2}$ 和 $V_{i4}-V_{i3}$ 的结果作为电芯的脉冲电压特征,用作神经网络模型的输入数据。

[0103] 步骤142:数据归一化。通过适当的数据归一化,能够使训练具有更高的效率和更强的鲁棒性,从而提高收敛速度。这里,将输入数据标准化到-1到1的范围,用公式表示如下:

$$[0104] \quad x' = \frac{2(x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} - 1,$$

[0105] 其中 $x$ 为归一化前的数据, $x'$ 为归一化后的数据, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别表示输入数据中的最大值和最小值。

[0106] 步骤143:获取隐藏层的输出值。隐藏层的输出值可以表示为:

$$[0107] \quad H_j = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i - a_j\right), j = 1, 2, \dots, l_H,$$

[0108] 其中 $x_i$ 为第 $i$ 个输入数据, $n$ 为输入数据数, $H_j$ 为第 $j$ 个隐藏层节点的输出值, $l_H$ 为隐藏层的节点数, $w_{ij}$ 为网络权重, $a_j$ 为隐含层的阈值, $f$ 为激活函数,具体公式为:

$$[0109] \quad f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}.$$

[0110] 步骤144:获取输出层的输出值。输出层的输出值可以表示为:

$$[0111] \quad O_p = \sum_{j=1}^{l_H} H_j w_{jp} - b_p, p = 1, 2, \dots, m_o,$$

[0112] 其中 $O_p$ 为第 $p$ 个输出层节点的输出值, $m_o$ 为输出层的节点数, $w_{jp}$ 为网络权重, $b_p$ 为输出层的阈值。这里可以将输出层的节点设置为一个,将输出值作为电芯容量的预测值。

[0113] 步骤145:误差计算。将电芯容量的预测值 $O_p$ 和实际值 $Y_p$ 进行比较,得到误差值 $e_p$ ,具体公式为:

$$[0114] \quad e_p = Y_p - O_p, p = 1, 2, \dots, m_o.$$

[0115] 步骤146:权重值更新。根据误差值 $e_p$ 对网络权重值 $w_{ij}$ 和 $w_{jp}$ 进行实时更新。具体公式为:

$$[0116] \quad \begin{cases} w'_{ij} = w_{ij} + \eta H_j (1 - H_j) x_i \sum_{p=1}^{m_o} w_{jp} e_p, & i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, l_H; p = 1, 2, \dots, m_o, \\ w'_{jp} = w_{jp} + \eta H_j e_p \end{cases}$$

[0117] 其中 $\eta$ 为学习速率, $w'_{ij}$ 和 $w'_{jp}$ 为更新后的权重值。

[0118] 步骤147:阈值更新。根据误差值 $e_p$ 对阈值 $a_j$ 和 $b_p$ 进行实时更新。具体公式为:

$$[0119] \quad \begin{cases} a'_j = a_j + \eta H_j (1 - H_j) x_i \sum_{p=1}^{m_o} w_{jp} e_p, & j = 1, 2, \dots, l_H; p = 1, 2, \dots, m_o. \\ b'_p = b_p + e_p \end{cases}$$

[0120] 步骤148:重复执行步骤143~147,直至达到预设的停止条件,例如达到设定的精度要求或最大迭代次数,此时就完成了神经网络模型的构建。

[0121] 对需要被检测的电芯进行步骤141中所述的脉冲电流测试,得到脉冲电压特征,输入到构建好的神经网络模型中,就可以得到电芯的容量,所得到的电芯的容量值可以称为电芯容量的预测值,图9给出了电芯容量的预测值与真实值的对比图,可以看到,大部分情况下电芯容量的预测值和真实值是比较接近的。

[0122] 步骤150:根据电芯的性能参数和容量,筛选出可梯次利用的电芯。根据电芯的性能参数和容量可以对电芯的老化程度进行评估,剔除掉老化严重、不适于进行梯次利用的电芯,筛选出可梯次利用的电芯,还可以根据电芯的性能参数和容量对电芯进行分级,将不同级别的电芯应用于不同的领域,实现梯次利用。

[0123] 依据上述实施例的通过对电动汽车退役电池进行AI检测来筛选的方法,首先对电动汽车退役电池进行由外观到内部构造的初步筛选,将筛选出来的退役电池拆解成相应的电芯,对拆解出来的电芯进行参考性能测试得到电芯的性能参数;同时引入人工智能来辅助进行电芯容量的检测,即对电芯进行脉冲电流测试,得到电芯的脉冲电压特征,将电芯的脉冲电压特征输入预设的神经网络模型以得到电芯的容量;最后根据电芯的性能参数和容量,筛选出可梯次利用的电芯,由此能够快速、准确地剔除衰退严重的退役电池,减少了检测时间和工作量,提高了检测精度;同时将退役电池拆解成易于梯次利用的最小单元电芯,并对电芯进行性能检测和筛选,方便后续利用电芯进行梯次利用,有利于促进电动汽车退役电池的梯次利用。

[0124] 本文参照了各种示范实施例进行说明。然而,本领域的技术人员将认识到,在不脱离本文范围的情况下,可以对示范性实施例做出改变和修正。例如,各种操作步骤以及用于执行操作步骤的组件,可以根据特定的应用或考虑与系统的操作相关联的任何数量的成本函数以不同的方式实现(例如一个或多个步骤可以被删除、修改或结合到其他步骤中)。

[0125] 虽然在各种实施例中已经示出了本文的原理,但是许多特别适用于特定环境和操作要求的结构、布置、比例、元件、材料和部件的修改可以在不脱离本披露的原则和范围内使用。以上修改和其他改变或修正将被包含在本文的范围之内。

[0126] 前述具体说明已参照各种实施例进行了描述。然而,本领域技术人员将认识到,可以在不脱离本披露的范围的情况下进行各种修正和改变。因此,对于本披露的考虑将是说明性的而非限制性的意义上的,并且所有这些修改都将被包含在其范围内。同样,有关于各种实施例的优点、其他优点和问题的解决方案已如上所述。然而,益处、优点、问题的解决方案以及任何能产生这些的要素,或使其变得更明确的解决方案都不应被解释为关键的、必需的或必要的。本文中所用的术语“包括”和其任何其他变体,皆属于非排他性包含,这样包括要素列表的过程、方法、文章或设备不仅包括这些要素,还包括未明确列出的或不属于该过程、方法、系统、文章或设备的其他要素。此外,本文中所使用的术语“耦合”和其任何其他变体都是指物理连接、电连接、磁连接、光连接、通信连接、功能连接和/或任何其他连接。

[0127] 具有本领域技术的人将认识到,在不脱离本发明的基本原理的情况下,可以对上述实施例的细节进行许多改变。因此,本发明的范围应仅由权利要求确定。

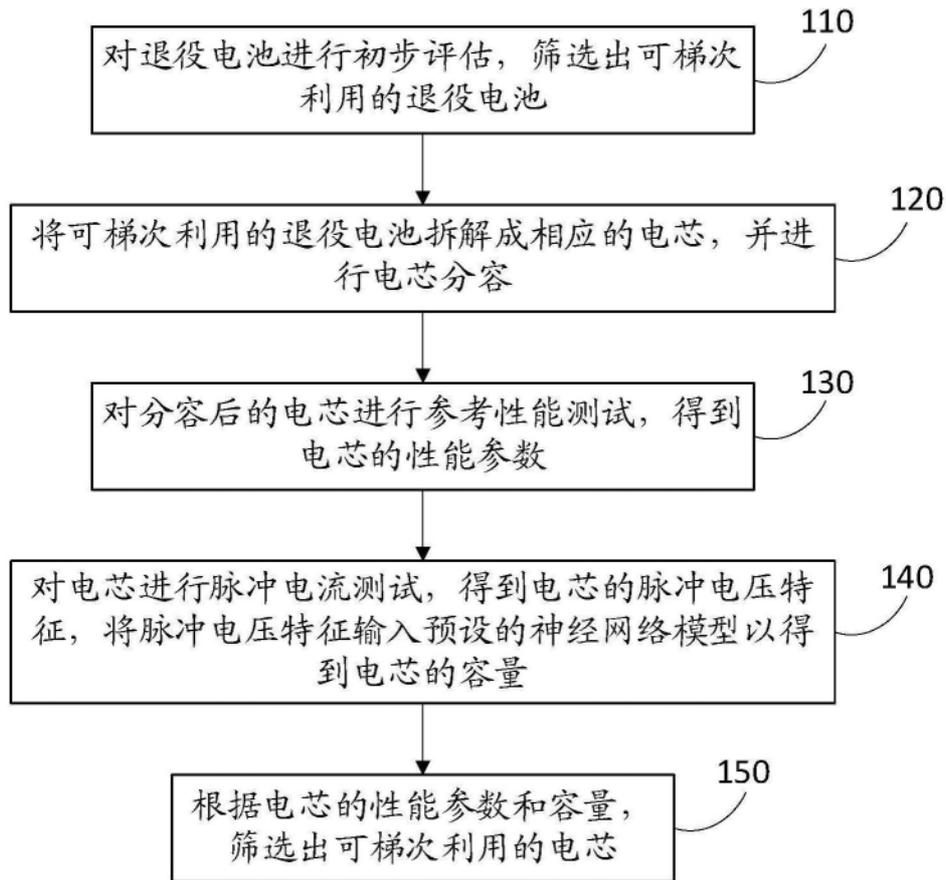


图1

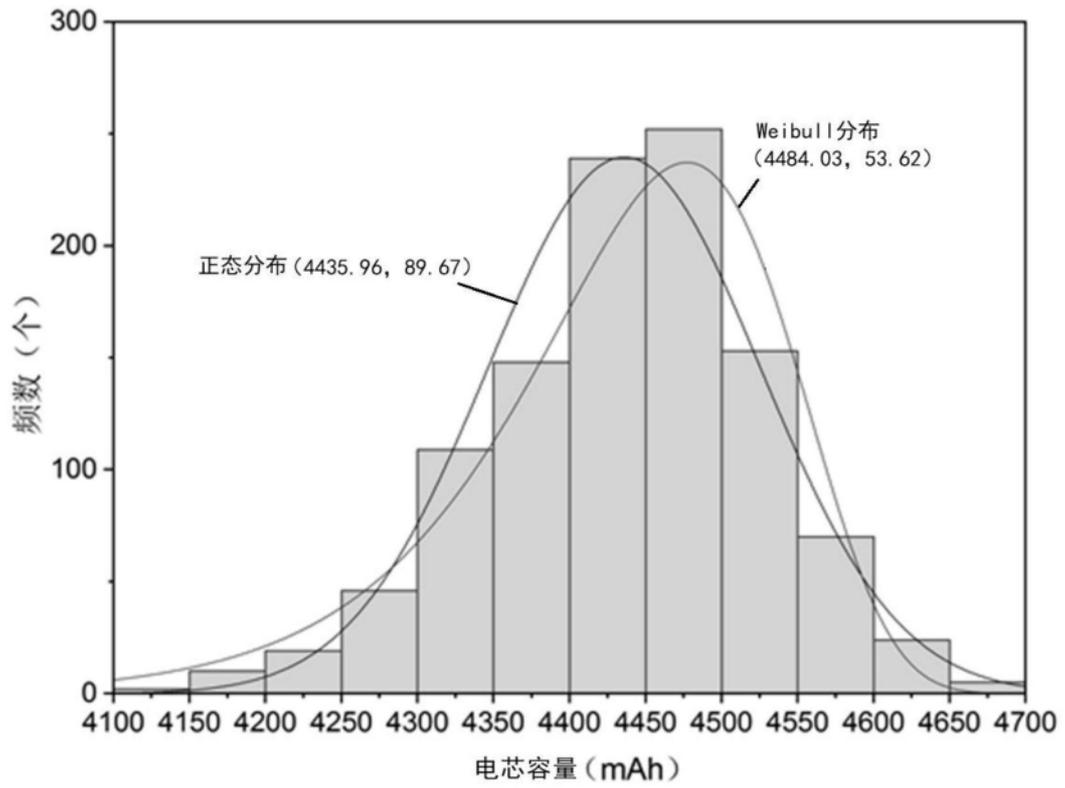


图2

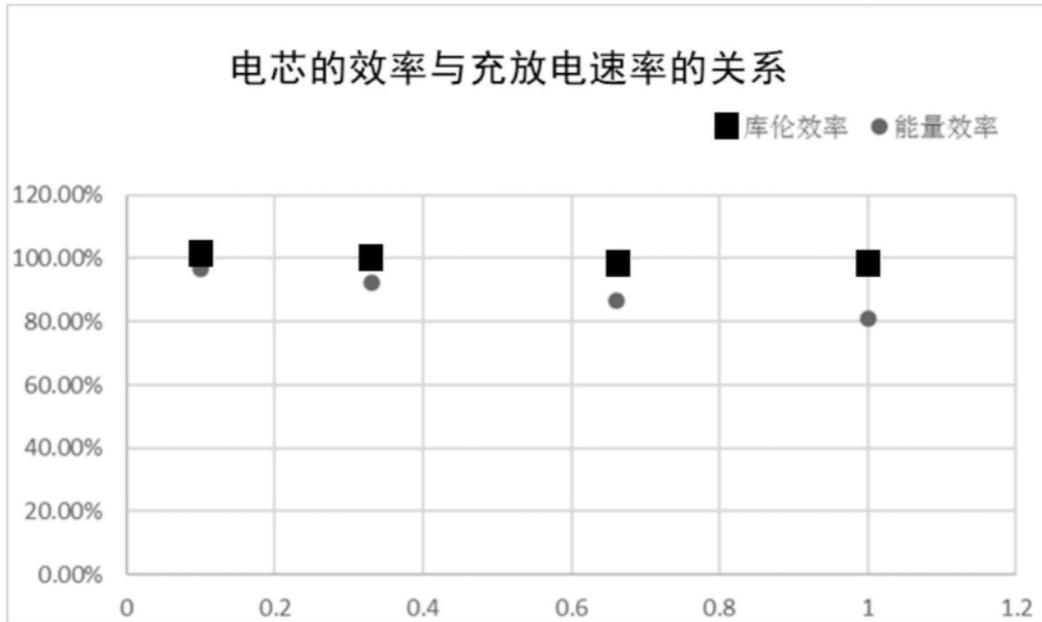


图3

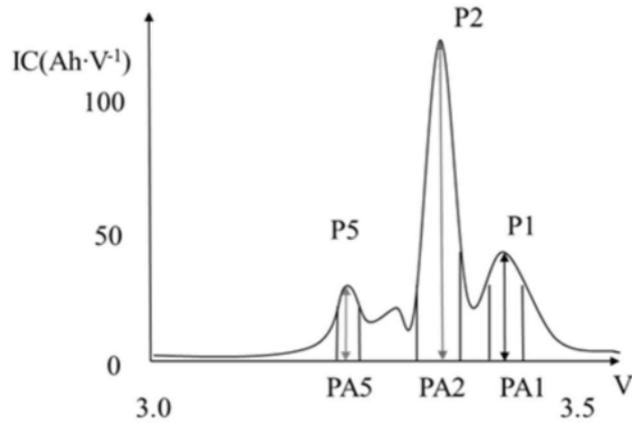


图4

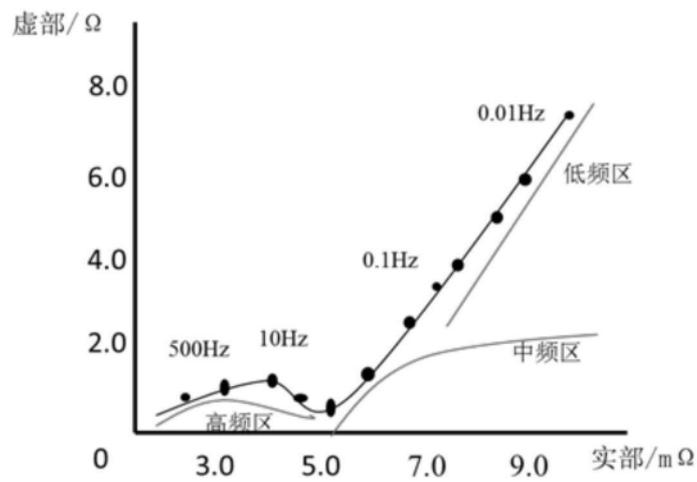


图5

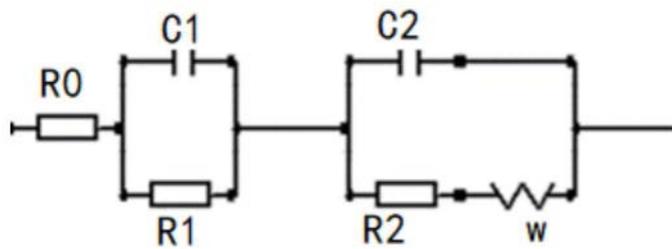


图6

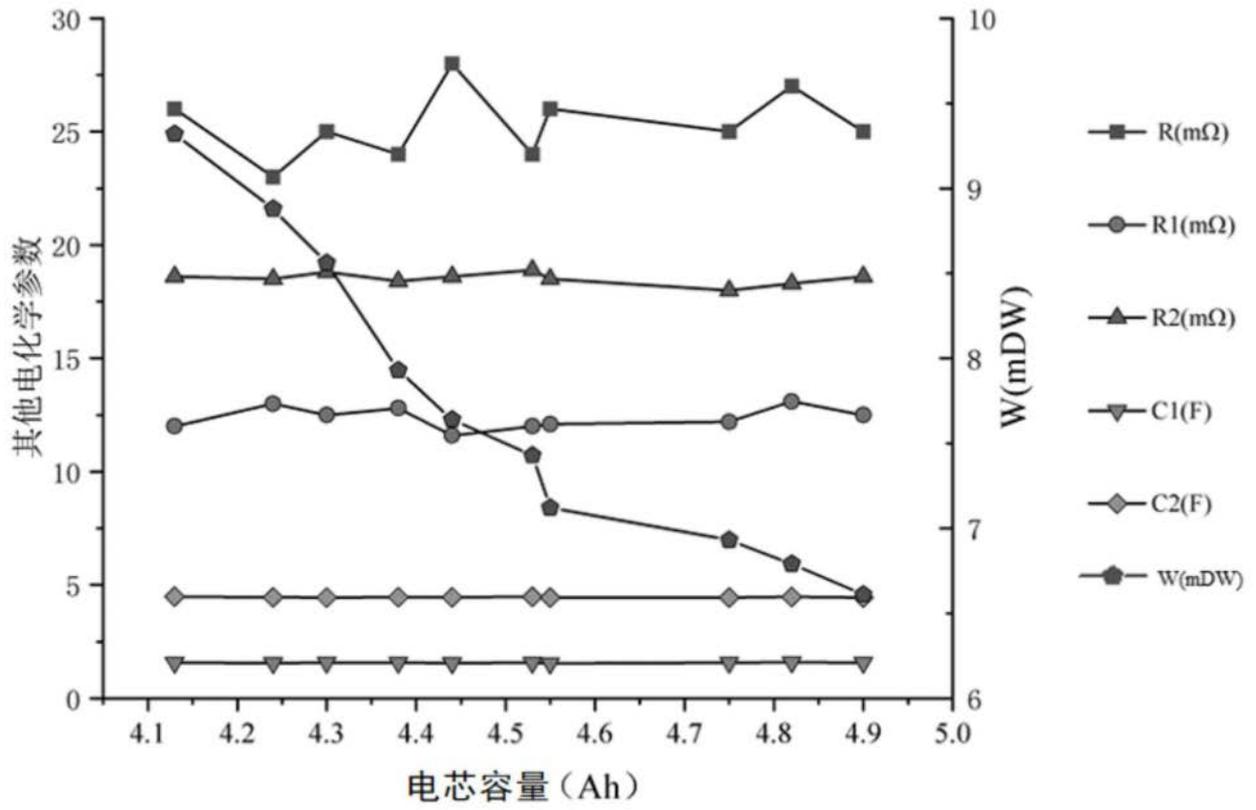


图7

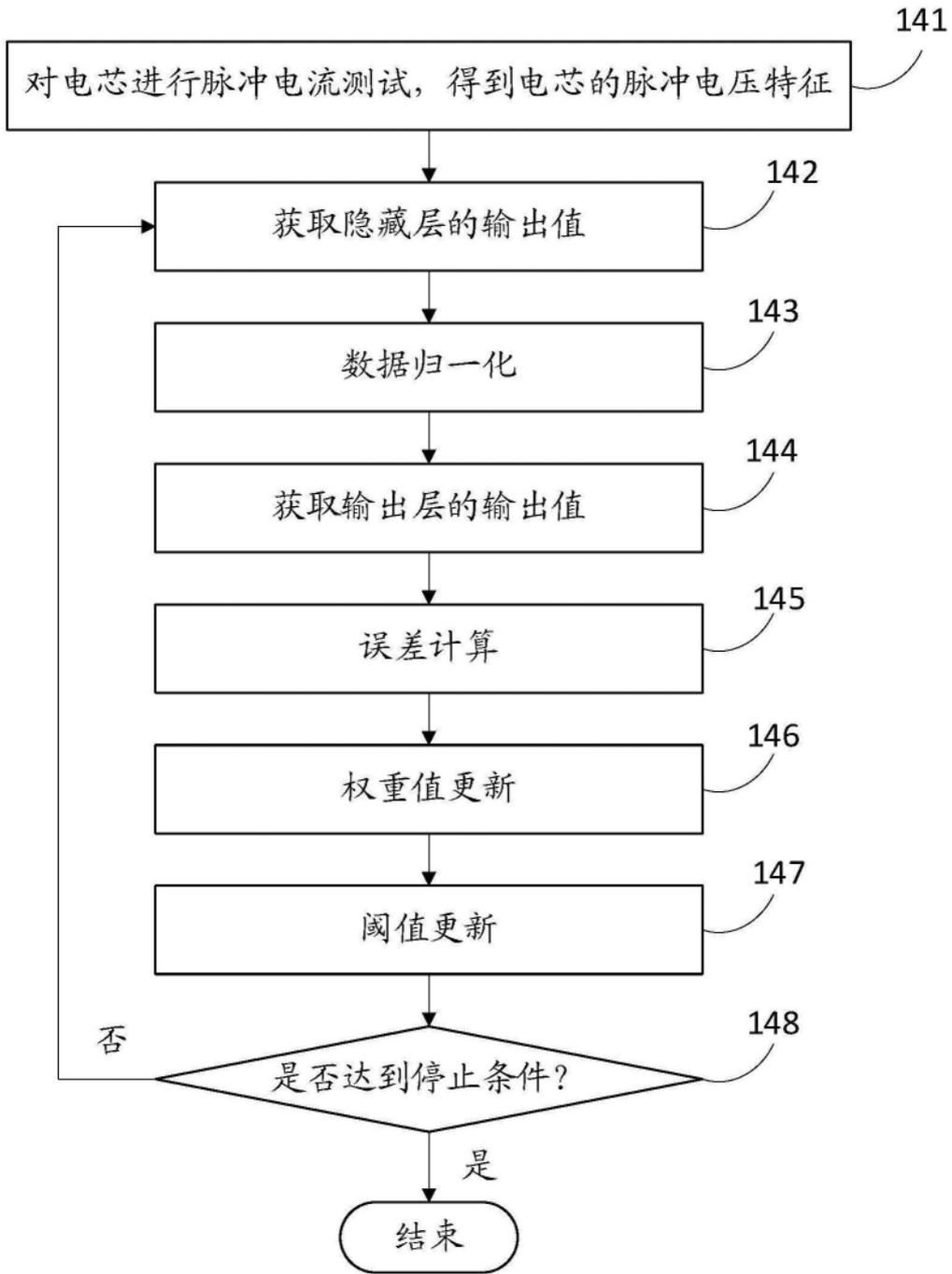


图8

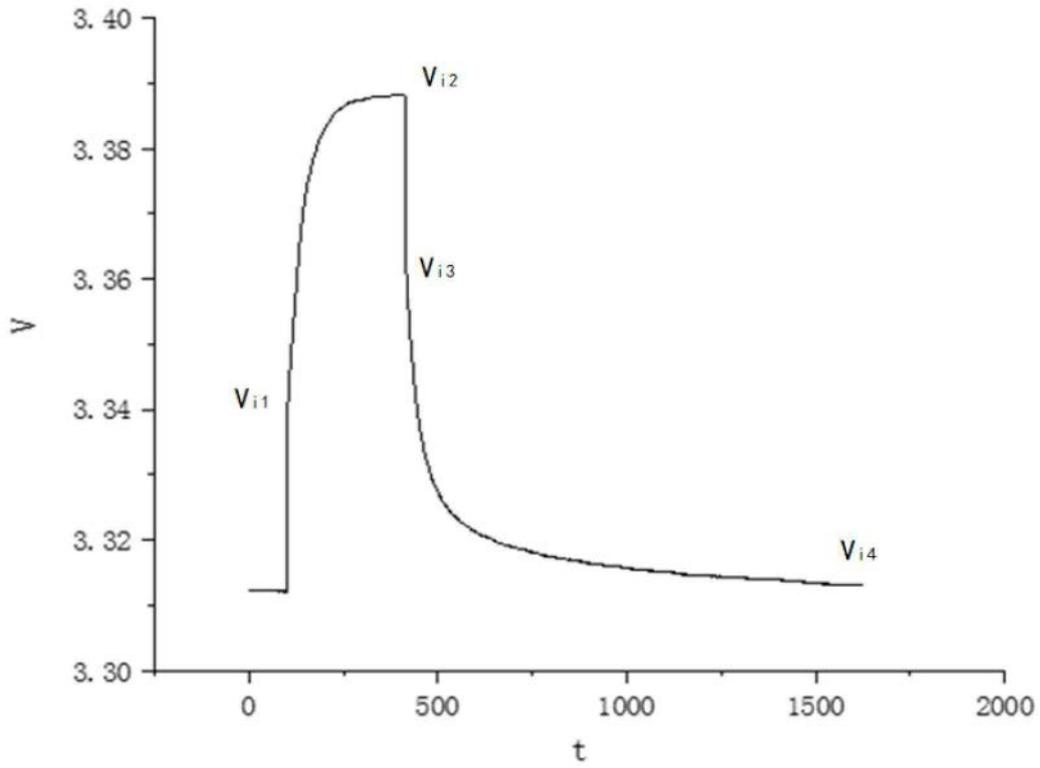


图9

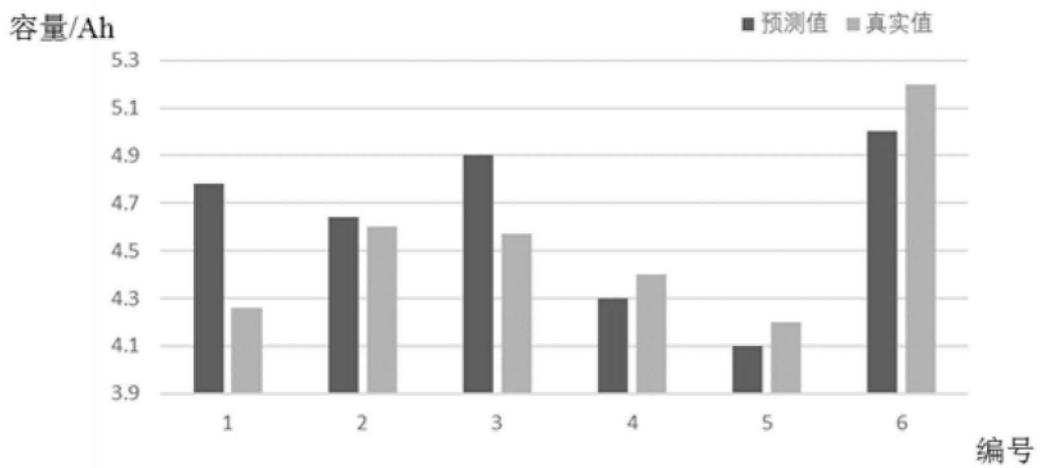


图10