



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107037363 A

(43)申请公布日 2017.08.11

(21)申请号 201610973053.0

(22)申请日 2016.10.28

(71)申请人 四川普力科技有限公司

地址 629200 四川省遂宁市射洪经济开发区河东大道88号

(72)发明人 向俊杰 向勇 冯雪松 王健翔

(74)专利代理机构 成都玖和知识产权代理事务所(普通合伙) 51238

代理人 黎祖琴

(51) Int. Cl.

G01R 31/36(2006.01)

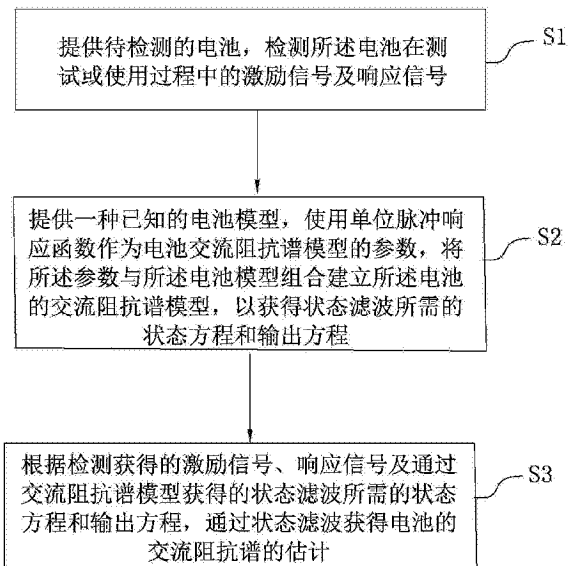
权利要求书1页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,包括以下步骤:提供待检测的电池,检测所述电池在测试或使用过程中的激励信号及响应信号;提供一种已知的电池模型,使用单位脉冲响应函数作为电池交流阻抗谱模型的参数,将所述参数与所述电池模型组合建立所述电池的交流阻抗谱模型,以获得状态滤波所需的状态方程和输出方程;根据检测获得的激励信号、响应信号及通过交流阻抗谱模型获得的状态滤波所需的状态方程和输出方程,通过状态滤波获得电池的交流阻抗谱的估计。本发明具有更精确地获得任意频率下电池交流阻抗谱的参数,从而得到的交流阻抗谱能更准确的估计电池SOC、分析电池SOH和电池的电化学特性等特征的有益效果。



1. 一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤S1:提供待检测的电池,检测所述电池在测试或使用过程中的激励信号及响应信号;

步骤S2:提供一种已知的电池模型,使用单位脉冲响应函数作为电池交流阻抗谱模型的参数,将所述参数与所述电池模型组合建立所述电池的交流阻抗谱模型,以获得状态滤波所需的状态方程和输出方程;

步骤S3:根据检测获得的激励信号、响应信号及通过交流阻抗谱模型获得的状态滤波所需的状态方程和输出方程,通过状态滤波获得电池的交流阻抗谱的估计。

2. 如权利要求1所述的一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,其特征在于:步骤S2包括以下步骤:

步骤S21:基于电池SOC与电池开路电压关系的线性模型,将单位脉冲响应函数和所述线性模型组合,建立电池的交流阻抗谱模型,以通过交流阻抗谱模型获得状态滤波所需的状态方程和输出方程。

3. 如权利要求1所述的一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,其特征在于:步骤S3包括以下步骤:

步骤S31:基于步骤2中得到的交流阻抗谱模型,对电池状态和单位脉冲响应函数的初始状态做出初始估计,并将该初始估计作为电池状态和单位脉冲响应函数的先验估计;

步骤S32:根据所述先验估计,以及检测获得的激励信号和响应信号,通过状态滤波获得电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计,并通过对单位脉冲响应函数的后验估计进行离散傅里叶变换,得到电池交流阻抗谱的估计。

4. 如权利要求3所述的一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,其特征在于:步骤S3进一步包括以下步骤:

步骤S33:根据电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计,计算得到下一时刻的电池状态和单位脉冲响应函数的先验估计,以通过状态滤波获得下一时刻的电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计;

步骤S34:重复步骤S32、S33,以获得随时间变化的电池交流阻抗谱的估计。

5. 如权利要求1所述的一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,其特征在于:所述激励信号为电池电流,所述响应信号为电池端电压。

6. 如权利要求1所述的一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,其特征在于:所述状态滤波为卡尔曼滤波。

## 一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法

### 【技术领域】

[0001] 本发明涉及一种电池的交流阻抗谱的测量方法,特别涉及到一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法。

### 【背景技术】

[0002] 二次电池又称为充电电池或蓄电池,是指在电池放电后可通过充电的方式使活性物质激活而继续使用的电池。以下所称电池均为二次电池。电池SOC全称为State of Charge,即荷电状态,也叫剩余电量,代表的是电池使用一段时间或长期搁置不用后的剩余容量与其完全充电状态的容量的比值,常用百分数表示,其取值范围为0~1,当SOC=0时表示电池完全放电,当SOC=1时表示电池完全充满。一般用电池SOH(State of Health)表示电池的健康状态,当电池使用一段时间后,电池充满电时的容量低于电池额定容量的80%后,电池就应该被更换。在电池的应用中,通过获得电池的交流阻抗谱,可以直接用于电池SOC估计,或者用于分析电池SOH,也可以用于分析电池内部电化学特征等。交流阻抗谱是常用的一种电化学测试技术,它的原理是:对电池体系施加小幅度扰动,测量得到的电化学响应,在每个频率点测量得到的原始数据中,都包含了施加扰动信号后测得的响应的相位移及阻抗的幅值,从这些数据可以计算出电化学响应的实部和虚部。交流阻抗谱中涉及的参数有阻抗幅值( $|Z|$ )、阻抗实部( $Z_{Re}$ )、阻抗虚部( $Z_{Im}$ )、相位移( $\theta$ )、频率( $\omega$ )等变量。因而交流阻抗谱可以通过多种方式表示出来,根据实际的需要,可以选择不同的图谱形式进行数据解析。

[0003] 目前已有不同方法用于获得电池的交流阻抗谱。例如,通过给电池施加特定的电流扰动信号,并测量得到相应的电压信号以获得电池的交流阻抗谱。这类方法的局限性在于由于扰动信号必须是特定的,无法应用于电流不确定的在线电池系统(使用过程中的电池系统称为在线电池系统)。目前也有方法通过状态滤波对在线电池系统的交流阻抗谱的参数进行估计,但其采用的模型如韦伯阻抗模型的局限性在于其估计出来的参数只能描述电池交流阻抗谱的部分特征,即得到的交流阻抗谱的参数是不完整的,不能获得任意频率下电池交流阻抗谱的参数,用该交流阻抗谱估计电池SOC、分析电池SOH等也是不够准确的。

### 【发明内容】

[0004] 为克服现有在测量电池交流阻抗谱中出现的难题,本发明提供了一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法。

[0005] 本发明解决技术问题的方案是提供一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤S1:提供待检测的电池,检测所述电池在测试或使用过程中的激励信号及响应信号;

[0007] 步骤S2:提供一种已知的电池模型,使用单位脉冲响应函数作为电池交流阻抗谱模型的参数,将所述参数与所述电池模型组合建立所述电池的交流阻抗谱模型,以获得状

态滤波所需的状态方程和输出方程；

[0008] 步骤S3:根据检测获得的激励信号、响应信号及通过交流阻抗谱模型获得的状态滤波所需的状态方程和输出方程,通过状态滤波获得电池的交流阻抗谱的估计。

[0009] 优选地,步骤S2包括以下步骤:

[0010] 步骤S21:基于电池SOC与电池开路电压关系的线性模型,将单位脉冲响应函数和所述线性模型组合,建立电池的交流阻抗谱模型,以通过交流阻抗谱模型获得状态滤波所需的状态方程和输出方程。

[0011] 优选地,步骤S3包括以下步骤:

[0012] 步骤S31:基于步骤2中得到的交流阻抗谱模型,对电池状态和单位脉冲响应函数的初始状态做出初始估计,并将该初始估计作为电池状态和单位脉冲响应函数的先验估计;

[0013] 步骤S32:根据所述先验估计,以及检测获得的激励信号和响应信号,通过状态滤波获得电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计,并通过对单位脉冲响应函数的后验估计进行离散傅里叶变换,得到电池交流阻抗谱的估计。

[0014] 优选地,步骤S3进一步包括以下步骤:

[0015] 步骤S33:根据电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计,计算得到下一时刻的电池状态和单位脉冲响应函数的先验估计,以通过状态滤波获得下一时刻的电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计;

[0016] 步骤S34:重复步骤S32、S33,以获得随时间变化的电池交流阻抗谱的估计。

[0017] 优选地,所述激励信号为电池电流,所述响应信号为电池端电压。

[0018] 优选地,所述状态滤波为卡尔曼滤波。

[0019] 与现有技术相比,本发明的一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,使用电池交流阻抗谱的单位脉冲响应函数作为模型参数,建立电池的交流阻抗谱模型,根据测量获得的激励信号及响应信号,通过状态滤波器获得电池交流阻抗谱的估计。该方法在离线或在线系统中均可以更精确地获得任意频率下电池交流阻抗谱的参数,从而得到的交流阻抗谱能更准确的估计电池SOC、分析电池SOH和电池的电化学特性等特征。

#### 【附图说明】

[0020] 图1是一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法的步骤流程图。

[0021] 图2是一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法步骤S3中的具体步骤流程图。

[0022] 图3是一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法的实施例获得的各电压值示意图。

[0023] 图4是通过一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法的获得的交流阻抗谱的奈奎斯特图。

#### 【具体实施方式】

[0024] 为了使本发明的目的,技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施实例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,

并不用于限定本发明。

[0025] 请参阅图1,一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法可分为以下步骤:

[0026] 步骤S1:提供待检测的电池,检测所述电池在测试或使用过程中的激励信号及响应信号。所述待检测的电池只要是二次电池即可,本发明实施例中,使用阀控密闭式铅酸电池作为待检测交流阻抗谱的电池,当然也可以根据实际需要检测的电池采用其它类型的电池,如锂离子电池。激励信号作为背景技术中提到的为获得交流阻抗谱而施加的扰动信号。响应信号为电池在激励信号的扰动下得到的电化学响应。激励信号和响应信号均可通过常规手段检测获得。激励信号可为电池端电压或者电池电流,对应的响应信号则为电池电流或者电池端电压。电池电流是从电池两端流过的外加电流,电池端电压是电池两端的电压差。激励信号也可以是功率,响应信号为电池电流或者电池端电压。激励信号和响应信号的具体量可视工程实际需要进行选取,本发明实施例中,使用电池电流作为激励信号,电池端电压作为响应信号。

[0027] 步骤S2:提供一种已知的电池模型,使用单位脉冲响应函数作为电池交流阻抗谱模型的参数,将所述参数与所述电池模型组合建立所述电池的交流阻抗谱模型,以获得状态滤波所需的状态方程和输出方程。本发明实施例中,状态滤波的使用需要先提供电池的状态方程和输出方程,通过建立电池的交流阻抗谱模型可以得到所需状态方程和输出方程。建立电池交流阻抗谱模型的所需的参数包括电池交流阻抗谱对应的离散的单位脉冲响应函数。将单位脉冲响应函数作为参数与已知电池模型组合共同建立起交流阻抗谱模型。所以,步骤S2具体还包括步骤S21:

[0028] 步骤S21:基于电池SOC与电池开路电压关系的线性模型,将单位脉冲响应函数和所述线性模型组合,建立电池的交流阻抗谱模型,以通过交流阻抗谱模型获得状态滤波所需的状态方程和输出方程。也可视实际情况基于其它电池模型建立电池的交流阻抗谱模型。比如通过测量电池开路电压与电池SOC关系得到的OCV-SOC关系曲线模型。采用不同的电池模型建立不同的交流阻抗谱模型,得到的交流阻抗谱的估计精度不同,本发明采用电池SOC与电池开路电压关系的线性模型只为说明本发明,并不对已知电池模型的种类进行限制。

[0029] 具体的,本发明实施例中,得到电池交流阻抗谱模型的状态方程和输出方程的过程如下:基于电池SOC与电池开路电压关系的线性模型及单位脉冲响应函数,可以得到电池的交流阻抗谱模型的模型状态方程,式(1):

$$[0030] \quad \begin{cases} u_{k+1} = u_k + \rho_k i_k \Delta t + w_u \\ \rho_{k+1} = \rho_k + w_\rho \\ a_{k+1,j} = a_{k,j} + w_{a,j}, j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (1)$$

[0031] 及模型输出方程,式(2):

$$[0032] \quad y_k = u_k + \sum_{j=0}^p a_{k,j} i_{k-j} + v \quad (2)$$

[0033] 上述各式中,k是采样点编号,下标为k+1的量值是通过下标为k的量值得到的下一时刻的对应量值。 $u_k$ 是电池开路电压, $\rho_k$ 是单位电流下电池开路电压 $u_k$ 随时间的变化率。 $a_{k,0}$ 、 $a_{k,1}$ 、 $\dots$ 、 $a_{k,p}$ 是电池交流阻抗谱对应的离散的单位脉冲响应函数, $a_{k,0}$ 是电池端电压对



[0053] 步骤S31:基于步骤2中得到的交流阻抗谱模型,对电池状态和单位脉冲响应函数的初始状态做出初始估计,并将该初始估计作为电池状态和单位脉冲响应函数的先验估计。电池状态可以包含电池SOC,或者电池开路电压 $u_k$ ,也可以包含除单位脉冲响应函数之外的参数。本发明实施例中,电池状态包含电池开路电压 $u_k$ 和单位电流下电池开路电压 $u_k$ 随时间的变化率 $\rho_k$ 。先验估计即根据电池状态和单位脉冲响应函数的现有的已知的信息对电池状态和单位脉冲响应函数的状态进行尽可能准确的估计。

[0054] 本发明实施例中,电池状态和单位脉冲响应函数的先验估计表示为 $\bar{x}_k$ 。将电池状态和单位脉冲响应函数的初始估计表示为 $\bar{x}_0$ ,即零时刻的式(3)中的状态向量的先验估计。

本发明实施例中, $\bar{x}_0 = [u_0 \quad \rho_0 \quad a_{0,0} \quad a_{0,1} \quad \dots \quad a_{0,p}]^T$ ,其中各分量为对应值在零时刻的先验估计。其中, $u_0$ 取电池初始状态下的电池开路电压,通过静置电池一段时间后,测量电池两端电压得到。 $\rho_0$ 取电池初始状态下,单位电流下电池开路电压 $u_k$ 随时间的变化率,通过电池历史放电数据计算获得。 $a_{0,0}$ 、 $a_{0,1}$ 、 $\dots$ 、 $a_{0,p}$ 则根据电池历史放电数据,通过拟合算法对2阶RC模型进行拟合,根据所得的2阶RC模型计算获得。这样计算得到的初始估计充分利用了已有信息。所谓已有信息即电池初始状态的电池开路电压 $u_0$ 、单位电流下电池开路电压 $u_k$ 随时间的变化率 $\rho_0$ 和通过2阶RC模型计算获得的 $a_{0,0}$ 、 $a_{0,1}$ 、 $\dots$ 、 $a_{0,p}$ ,利用已有信息有利于状态滤波的快速收敛。

[0055] 本发明实施例中,获得 $\rho_0$ 的具体方法为,若电池历史放电数据中,已知电池电流恒为 $i_d$ , $i_d < 0$ ,一段时间内时间经过了 $T$ ,电池端电压下降了压降 $\Delta y$ , $\Delta y > 0$ ,则得到,式(9)

$$[0056] \quad \rho_0 = -\frac{\Delta y}{i_d T} \quad (9)$$

[0057] 本发明实施例中,获得 $a_{0,0}$ 、 $a_{0,1}$ 、 $\dots$ 、 $a_{0,p}$ 的具体方法为,若电池历史放电数据中某一时刻电池开始放电,放电电流为 $i$ , $i < 0$ ,设这一时刻 $t=0$ ,则对于之后任意时刻 $t$ ,有放电电池端电压 $y(t)$ ,式(10):

$$[0058] \quad y(t) = y(0^-) + \rho_0 i t + \Delta y(t)$$

$$[0059] \quad \Delta y(t) = Ri + \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_1 C_1}\right) \right] R_1 i + \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_2 C_2}\right) \right] R_2 i \quad (10)$$

[0060]  $y(0^-)$ 为电池开始放电前电池端电压, $\Delta y(t)$ 为任意时刻 $t$ 时电池内阻 $R$ 和二阶RC回路产生的压降值。根据电池历史放电数据中电池开始放电前电池端电压 $y(0^-)$ 、放电电池端电压 $y(t)$ 和放电电流 $i$ ,对参数 $R$ 、 $R_1$ 、 $C_1$ 、 $R_2$ 、 $C_2$ 进行拟合(其中 $R$ 是电池内阻, $R_1$ 、 $R_2$ 是二阶RC回路电阻, $C_1$ 、 $C_2$ 是二阶RC回路电容),得到 $R$ 、 $R_1$ 、 $C_1$ 、 $R_2$ 、 $C_2$ 后,通过以下公式获得

$$a_{0,0}、a_{0,1}、\dots、a_{0,p} \quad (11):$$

$$[0061] \quad a_{0,0} = R$$

$$\begin{aligned}
 [0062] \quad a_{0,j}^- &= \frac{\Delta y(j\Delta t) - \Delta y((j-1)\Delta t)}{i} \\
 &= \sum_{k=1}^2 (1 - \alpha_k) R_k \alpha_k^{j-1}, j=1, 2, \dots, p \quad (11)
 \end{aligned}$$

[0063] 若还考虑  $a_{0,0}^-$ 、 $a_{0,1}^-$ 、...  $a_{0,p}^-$  截断的影响, 则对  $a_{0,j}^-$ ,  $j=1, 2, \dots, p$  进行修正得到

$$[0064] \quad a_{0,j}^- = \sum_{k=1}^2 \frac{1 - \alpha_k}{1 - \alpha_k^p} R_k \alpha_k^{j-1}, j=1, 2, \dots, p \quad (12)$$

$$[0065] \quad \text{其中, } \alpha_k = \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_k C_k}\right), k=1, 2$$

[0066] 同时, 本发明实施例中, 考虑到电池的交流阻抗谱模型存在噪声和干扰的影响, 造成不准确性, 而状态滤波就是在交流阻抗谱模型存在噪声和干扰的情形下进行滤波从而降低噪声和干扰得到最优的估计。所以为了使用状态滤波, 需要同时对状态向量式 (3) 中各分量误差的协方差进行估计, 得到状态误差协方差矩阵。状态误差协方差矩阵以  $E_{x,k}$  表示, 是阶数与状态向量 (3) 长度相同的方阵。本发明实施例中, 为简便起见,  $E_{x,k}$  的初始估计  $E_{x,0}^-$  为对角阵, 根据状态向量初始估计  $x_0^-$  对应分量的精确度估计初始估计  $E_{x,0}^-$  对角元素的值, 即, 初始估计  $E_{x,0}^-$  对角元素的值为状态向量初始估计  $x_0^-$  对应分量误差的协方差的初始估计。将  $E_{x,0}^-$  作为状态误差协方差矩阵的先验估计。

[0067] 上述步骤 S31 中各值也可根据需要, 做出不同类型和精度的初始估计, 从而得到不同类型和精度的先验估计。

[0068] 步骤 S32: 根据所述先验估计, 以及检测获得的激励信号和响应信号, 通过状态滤波获得电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计, 并通过单位脉冲响应函数的后验估计进行离散傅里叶变换, 得到电池交流阻抗谱的估计。

[0069] 本发明实施例中, 采用卡尔曼滤波器作为状态滤波过程所用的算法。卡尔曼滤波 (Kalman Filtering) 是一种利用线性系统状态方程, 通过系统输入输出观测数据, 对系统状态进行最优估计的算法。由于观测数据中包括系统中的噪声和干扰的影响, 所以最优估计也可看作是滤波过程, 滤除无用的噪声和干扰的影响, 故叫做状态滤波器。通过卡尔曼滤波器获得电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计的公式如下:

$$[0070] \quad y_k^- = C_k x_k^- \quad (13)$$

$$[0071] \quad L_k = E_{x,k}^- C_k^T [C_k E_{x,k}^- C_k^T + E_v]^{-1} \quad (14)$$

[0072] 由式 (13) 和式 (14) 得到后验估计, 如式 (15) 和式 (16) 所示:

$$[0073] \quad x_k^+ = x_k^- + L_k (y_k^* - y_k^-) \quad (15)$$

$$[0074] \quad E_{x,k}^+ = (I - L_k C_k) E_{x,k}^- \quad (16)$$

[0075] 其中,  $y_k^-$  是输出向量估计, 即对电池端电压  $y_k$  的估计,  $L_k$  是卡尔曼增益向量,  $E_{x,k}^-$  是状态误差协方差矩阵的先验估计,  $E_v$  是输出噪声协方差矩阵, 是对输出噪声  $v$  的协方差的估



计,  $y_k^*$  是测量获得的电池端电压,  $x_k^+$  是状态向量的后验估计,  $E_{x,k}^+$  是状态误差协方差矩阵的后验估计,  $I$  是单位对角阵。

[0076] 其中,  $E_v$  为一经验常数, 通过综合考察电池端电压测量精确度、电池电流测量精确度、以及输出方程精确度确定。本发明实施例中, 通过测量零电流下电池端电压样本, 通过计算电池端电压的方差得到该常数, 其计算式为 (17)

$$[0077] \quad E_v = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (y_m - \bar{y})^2 \quad (17)$$

[0078] 其中,  $N$  是样本数量,  $m$  是样本编号,  $y_m$  是电池端电压,  $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m$  为电池端电压平均值。

[0079] 最后, 通过对  $x_k^+$  中, 单位脉冲响应函数的后验估计  $a_{k,0}^+$ 、 $a_{k,1}^+$ 、... ..  $a_{k,p}^+$  进行离散傅里叶变换, 最终得到电池交流阻抗谱的估计。

[0080] 本发明实施例中, 为了获得任意频率下电池交流阻抗谱的参数, 将单位脉冲响应函数的后验估计以 0 补齐至  $q$  ( $q > p+1$ ) 个元素后进行离散傅里叶变换。否则令  $q = p+1$  直接进行离散傅里叶变换, 最后取该离散傅里叶变换的结果作为电池交流阻抗谱的估计。离散傅里叶变换的公式为式 (18):

$$[0081] \quad A_{k,j} = \sum_{n=0}^{q-1} a_{k,n}^+ \exp\left[\frac{-2\pi i j n}{q}\right], j = 0, 1, \dots, q-1 \quad (18)$$

[0082] 因采样周期为  $\Delta t$ , 故最终得到的电池交流阻抗谱的估计的各分量  $A_{k,j}$  对应的频率  $f_j$  为 (19)

$$[0083] \quad f_j = \frac{j}{q\Delta t} \quad (j = 0, 1, \dots, q-1)。 \quad (19)$$

[0084] 当  $j = 0, 1, \dots, q-1$  时, 频率  $f_j$  对应的各分量  $A_{k,j}$  包含了阻抗实部和阻抗虚部的值, 对应的幅值和相位移可以直接用阻抗实部和阻抗虚部计算出来, 得到的频率  $f_j$ 、阻抗实部、阻抗虚部、幅值和相位移可以形成不同的图谱以表现电池的交流阻抗谱。

[0085] 进一步地, 步骤 S3 还可以包括步骤 S33-S34:

[0086] 步骤 S33: 根据电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计, 计算得到下一时刻的电池状态和单位脉冲响应函数的先验估计, 以通过状态滤波获得下一时刻的电池状态和单位脉冲响应函数的后验估计。本发明实施例中, 下一时刻的电池状态和单位脉冲响应函数的先验估计表示为  $\bar{x}_{k+1}$ , 则下一时刻的状态向量的先验估计的计算公式为式 (20):

$$[0087] \quad \bar{x}_{k+1} = A_k x_k^+ \quad (20)$$

[0088] 下一时刻状态误差协方差矩阵  $E_{x,k+1}^-$  的先验估计的计算公式为式 (21):

$$[0089] \quad E_{x,k+1}^- = A_k E_{x,k}^+ A_k^T + E_w \quad (21)$$

[0090] 其中,  $E_w$  是状态噪声协方差矩阵, 即对状态噪声  $w$  的协方差的估计, 是阶数与状态误差协方差矩阵相同的方阵, 其各分量的值根据状态方程 (3) 的精确度确定。本发明实施例中, 为了简便起见, 将  $E_w$  取为对角阵。

[0091] 步骤 S34: 重复步骤 S32、S33, 以获得随时间变化的电池交流阻抗谱的估计。重复一

次步骤S32、S33,只能获得某一时刻的电池交流阻抗谱的估计。但是在使用过程中电池系统是不断变化的,多次重复步骤S32、S33,以获得随时间变化的电池交流阻抗谱的估计,从而动态的,全面的反映电池系统的状态。

[0092] 请参阅图3,图3为本发明待检测电池为一组12节串联阀控密闭铅酸电池组,在电池电流为阶跃放电电流时,获得的各电压值图,图3中横轴表示时间,纵轴表示电压值(单位为V),A代表电池开路电压 $u_k$ 估计,B代表电池开路电压95%置信上限,C代表电池开路电压95%置信下限,(电池开路电压95%置信上下限由状态误差协方差矩阵中电池开路电压对应的对角分量求得),D代表电池端电压估计 $\hat{y}_k$ (即输出向量估计),E代表电池端电压测量值 $y_k^*$ 。可以看出,电池开路电压 $u_k$ 估计波动较小,且下降趋势与电池端电压测量值 $y_k^*$ 吻合,而电池端电压估计 $\hat{y}_k$ 和电池端电压测量值 $y_k^*$ 相等或相近,表明本发明实施例中利用卡尔曼滤波进行状态估计是有效的,说明可以采用状态滤波获得电池交流阻抗谱的估计。

[0093] 请参阅图4,本发明实施例获得的交流阻抗谱的奈奎斯特图中,以奈奎斯特图的形式表示了本发明实施例获得的交流阻抗谱。奈奎斯特图上每一点都是对应一特定频率下的频率响应,该点相对于原点的角度表示相位,而和原点之间的距离表示增益,因此奈奎斯特图将振幅及相位的波德图综合在一张图中。图中 $Z_{Re}$ 表示阻抗实部、 $Z_{Im}$ 表示阻抗虚部。可以看出,使用本发明的方法可以在离线或在线系统中估计出任意频率下电池的交流阻抗谱的参数,从而更精确的表现电池的特征。

[0094] 与现有技术相比,本发明的一种基于状态滤波的电池交流阻抗谱测量方法,使用电池交流阻抗谱的单位脉冲响应函数作为模型参数,建立电池的交流阻抗谱模型,根据测量获得的激励信号及响应信号,通过状态滤波器获得电池交流阻抗谱的估计。该方法在离线或在线系统中均可以更精确地获得任意频率下电池交流阻抗谱的参数,从而得到的交流阻抗谱能更准确的估计电池SOC、分析电池SOH和电池的电化学特性等特征。

[0095] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的原则之内所作的任何修改,等同替换和改进等均应包含在本发明的保护范围之内。

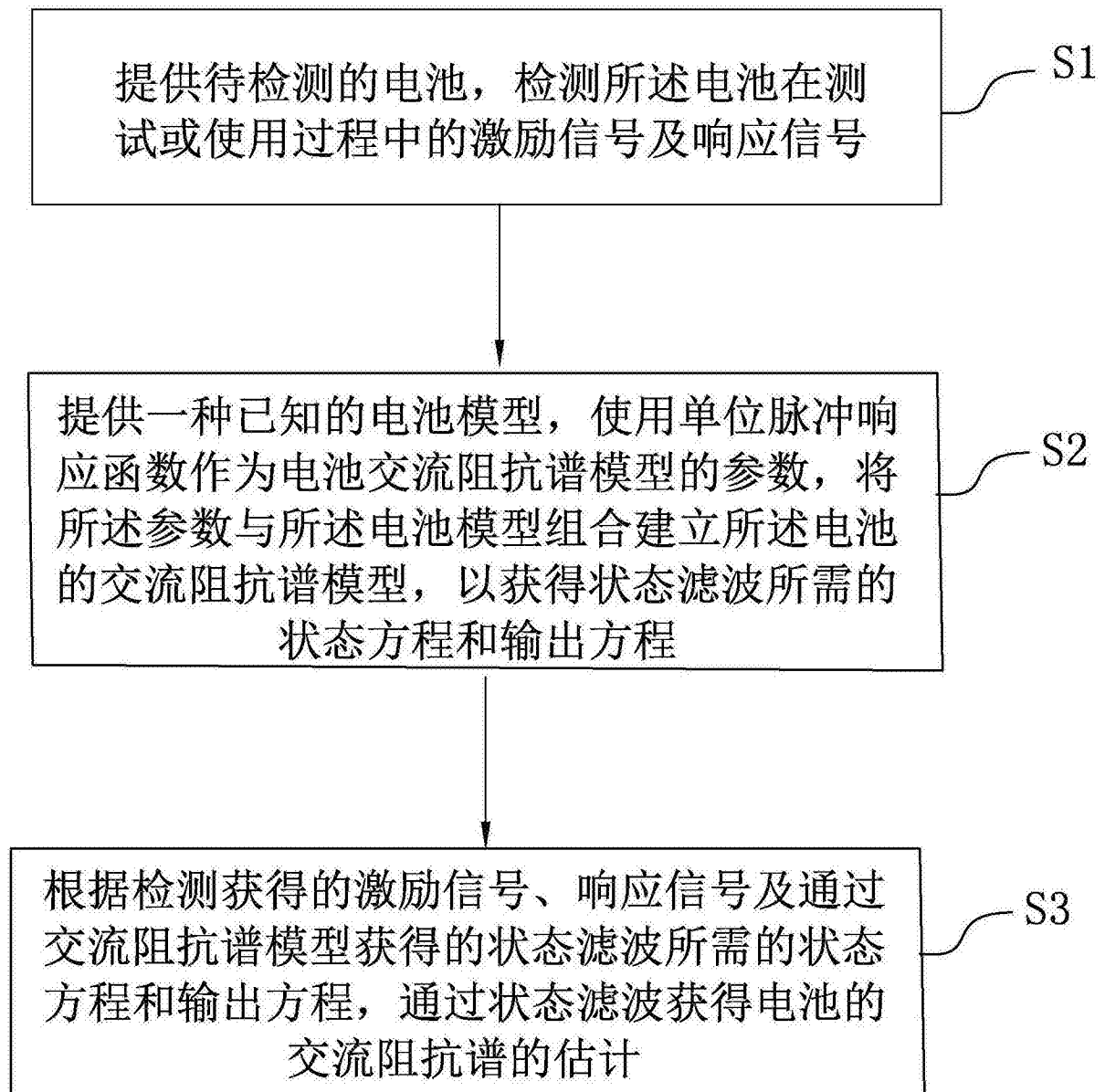


图1

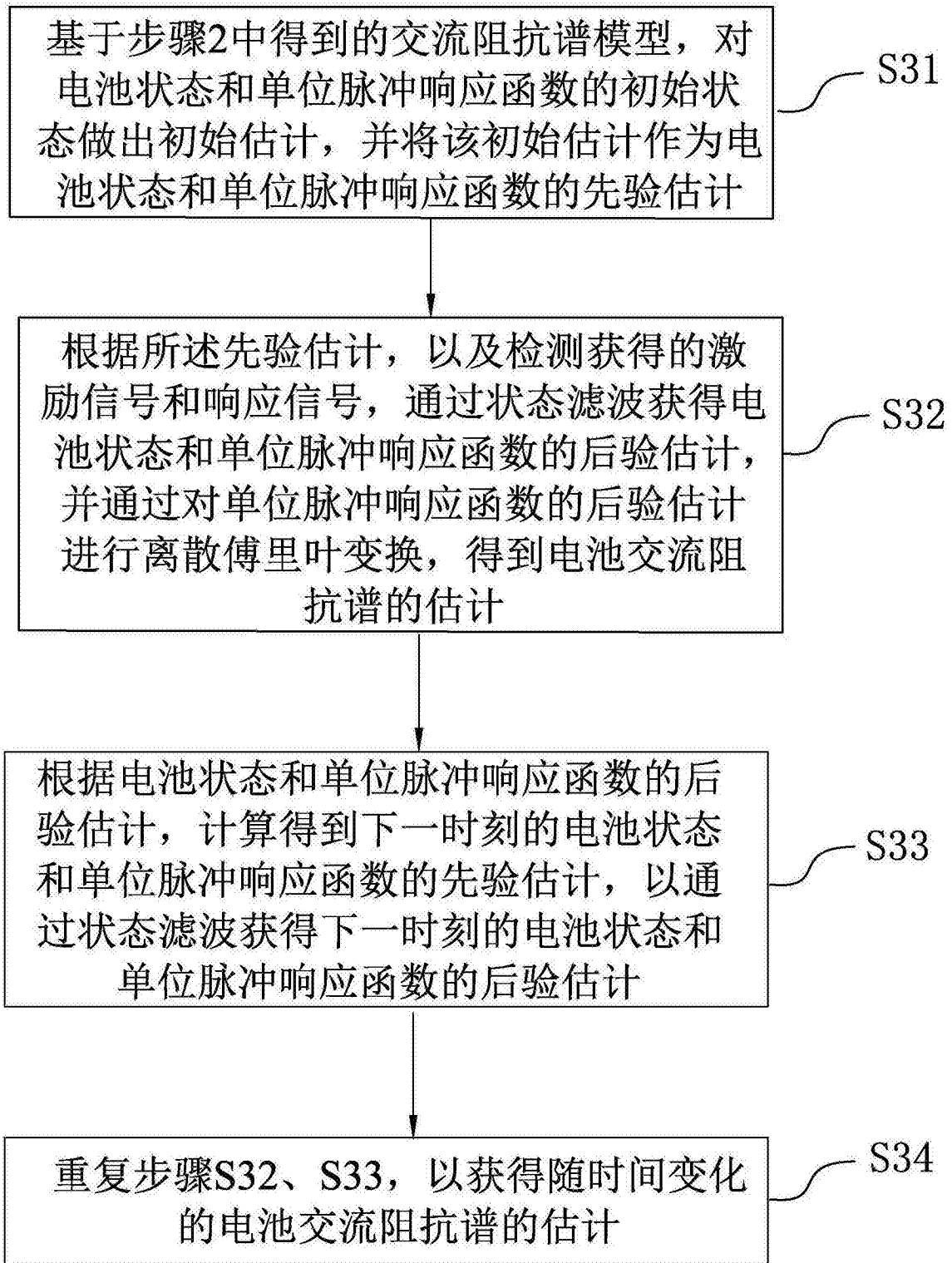


图2

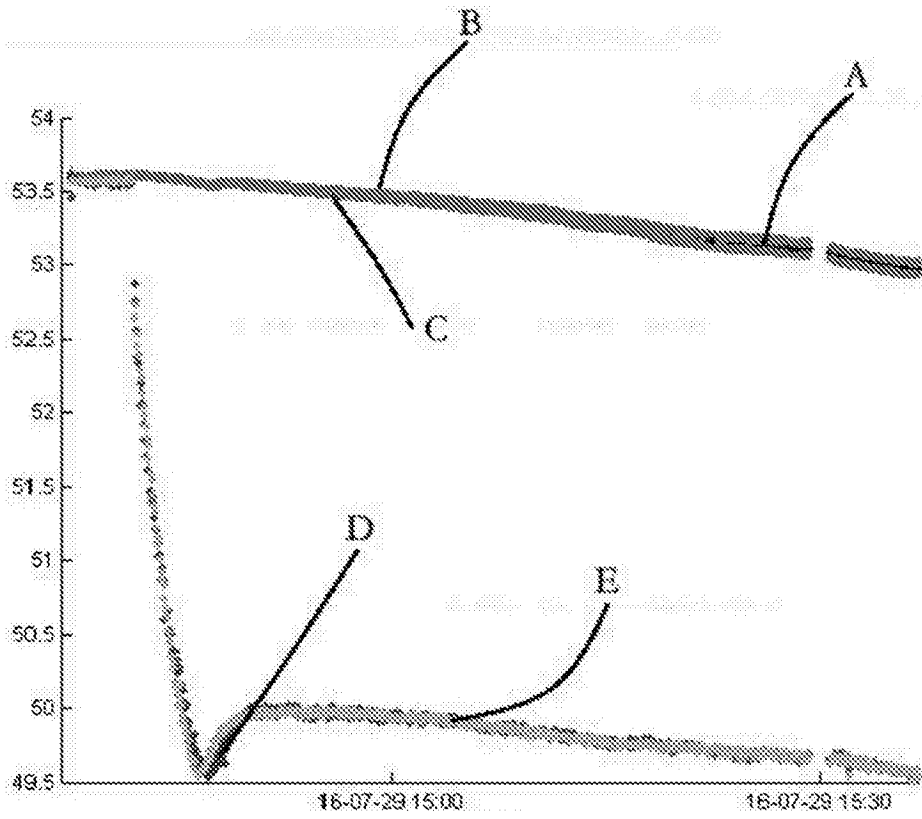


图3

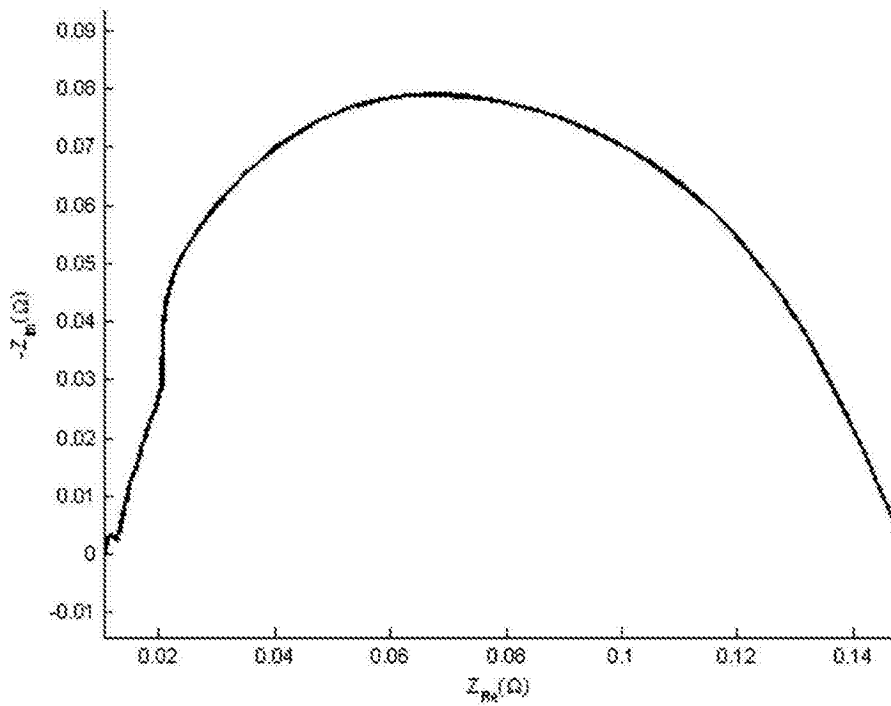


图4