



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105334462 A

(43) 申请公布日 2016. 02. 17

(21) 申请号 201410387958. 0

(22) 申请日 2014. 08. 07

(71) 申请人 华为技术有限公司

地址 518129 广东省深圳市龙岗区坂田华为  
总部办公楼

申请人 浙江大学

(72) 发明人 汪秋婷 姜银珠 陆赟豪 蒋建平

(74) 专利代理机构 广州三环专利代理有限公司  
44202

代理人 郝传鑫 熊永强

(51) Int. Cl.

G01R 31/36(2006. 01)

G06F 19/00(2011. 01)

权利要求书3页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

电池容量损失在线估算方法

(57) 摘要

一种电池容量损失在线估算方法，至少包括如下步骤：根据电池的电化学特征建立电化学模型，并根据所述电化学模型建立电池二阶电路模型，所述电池二阶电路模型的模型参数中包括电池的欧姆内阻和极化内阻；根据所述电池二阶电路模型，确定所述电池二阶电路模型的输出方程及估算欧姆内阻  $R_o$  的观测方程；对所述电池二阶电路模型中的模型参数进行辨识；确定关于欧姆内阻的状态量及状态方程，并利用抗差无迹卡尔曼滤波（UKF）算法对所述欧姆内阻的状态量进行迭代，以获得实时欧姆内阻估算值；及根据电池老化实验建立所述电池的循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_o$  的关系方程，并建立通过循环次数 N 来估算电池健康状况（SOH）的计算方程。

根据电池的电化学特征建立电化学模型，并根据所述电化学模型建立电池二阶电路模型，所述电池二阶电路模型的模型参数中包括电池的欧姆内阻和极化内阻。 101

根据所述电池二阶电路模型，确定所述电池二阶电路模型的输出方程及估算欧姆内阻  $R_o$  的观测方程。 102

对所述电池二阶电路模型中的模型参数进行辨识。 103

确定关于欧姆内阻的状态量及状态方程，并利用抗差无迹卡尔曼滤波（UKF）算法对所述欧姆内阻的状态量进行迭代，以获得实时欧姆内阻估算值。 104

根据电池老化实验建立所述电池的循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_o$  的关系方程，并建立通过循环次数 N 来估算电池健康状况（SOH）的计算方程。 105

1. 一种电池容量损失在线估算方法,其特征在于,至少包括如下步骤:

根据电池的电化学特征建立电化学模型,并根据所述电化学模型建立电池二阶电路模型,所述电池二阶电路模型的模型参数中包括电池的欧姆内阻和极化内阻;

根据所述电池二阶电路模型,确定所述电池二阶电路模型的输出方程及估算欧姆内阻  $R_0$  的观测方程;

对所述电池二阶电路模型中的模型参数进行辨识;

确定关于欧姆内阻的状态量及状态方程,并利用抗差无迹卡尔曼滤波(UKF)算法对所述欧姆内阻的状态量进行迭代,以获得实时欧姆内阻估算值;及

根据电池老化实验建立所述电池的循环次数N与所述欧姆内阻  $R_0$  的关系方程,并建立通过循环次数N来估算健康状况(SOH)的计算方程,其中,N为正整数。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述电池二阶电路模型的输出方程为: $U = U_{pa} + U_{pc} + I_L R_0$ ,其中, $U = U_{oc} - U_L$ , $U_{oc}$ 为电池的开路电压, $U_L$ 为电池的端电压, $U_{pa}$ 和 $U_{pc}$ 分别为极化内阻  $R_{pa}$  和  $R_{pc}$  上的电压, $R_0$ 为欧姆内阻, $I_L$ 为充放电电流。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述输出方程U在复频域的表达式为:

$$U(s) = I_L(s)(R_0 + \frac{R_{pc}}{1 + R_{pc}C_{pc}s} + \frac{R_{pa}}{R_{pa}C_{pa}s})$$

其中, $I_L(s)$  分别为充放电电流  $I_L$  在复频域的表达式,将上式转化为差分形式:

$$U(k) = -a_1 U(k-1) - a_2 U(k-2) + b_0 I(k) + b_1 I(k-1) + b_2 I(k-2),$$

并令  $\theta = [\alpha_1 \alpha_2 \beta_0 \beta_1 \beta_2]$ ,  $h^T(k) = [-U(k-1) -U(k-2) I(k) I(k-1) I(k-2)]$ ,  
获得估算欧姆内阻  $R_0$  的观测方程:

$$U(k) = h^T(k) \theta + v_k$$

其中, $\alpha_1$ , $\alpha_2$ , $\beta_0$ , $\beta_1$ , $\beta_2$ 均为与所述模型参数相关的系数, $U(k)$ , $U(k-1)$ , $U(k-2)$  分别为  $U(s)$  在k时刻,(k-1)时刻及(k-2)时刻的表达式, $I(k)$ , $I(k-1)$ , $I(k-2)$  分别为  $I_L(s)$  在k时刻,(k-1)时刻及(k-2)时刻的表达式, $v_k$ 为观测误差。

4. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述对所述电池二阶电路模型中的模型参数进行辨识具体为:对一单体电池进行放电,并测量端电压  $U_L$  与充放电电流  $I_L$ ,每隔一预定的时间,采集一次  $I_L$  与  $U_L$  的测量值,然后根据关系式  $U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L R_0$ ,并运用预定的算法处理所述采集到的测量值,获得所述电池二阶电路模型中的模型参数的初始值。

5. 根据权利要求3所述的方法,其特征在于,所述确定关于欧姆内阻的状态量及状态方程,并利用抗差无迹卡尔曼滤波(UKF)算法对所述欧姆内阻的状态量进行迭代,以获得实时欧姆内阻估算值,包括:

设置所述单体电池的初始电池荷电状态(SOC)与初始容量,并测量所述单体电池的充放电电流  $I_L$ ;

基于所述抗差UKF算法,根据输入的初始SOC、初始容量及充放电电流  $I_L$ ,对所述初始SOC进行更新,以获得实时SOC估算值;

根据所述实时SOC估算值,获得所述电池二阶电路模型的实时开路电压  $U_{oc}$  及模型参数的实时估算值;

根据计算获得的模型参数的实时估算值及充放电电流  $I_L$ ,计算开路电压的动态误差值

$U_{eq}$ , 并根据所述动态误差值  $U_{eq}$  对所述实时开路电压  $U_{oc}$  进行修正, 以获得最优的实时开路电压  $U_{oc}$ ; 及

根据所述最优的实时开路电压  $U_{oc}$ , 再次结合抗差 UKF 算法, 获得所述单体电池的实时欧姆内阻估算值。

6. 根据权利要求 5 所述的方法, 其特征在于, 根据所述最优的实时开路电压  $U_{oc}$ , 再次结合抗差 UKF 算法, 获得所述单体电池的实时欧姆内阻估算值, 包括:

建立欧姆内阻  $R_0$  的状态量和状态方程; 及

利用抗差 UKF 算法, 循环迭代得到状态量中的实时欧姆内阻  $R_0$  的估算值。

7. 根据权利要求 6 所述的方法, 其特征在于, 所述状态量为  $x_k = (R_0, U_{pc}, U_{pa}, U_L)^T$ , 所述状态量的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} R_{k+1} \\ U_{k+1}^{R_{pc}C_{pc}} \\ U_{k+1}^{R_{pa}C_{pa}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-\frac{T}{R_{pc}C_{pc}}) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-\frac{T}{R_{pa}C_{pa}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_k \\ U_k^{R_{pc}C_{pc}} \\ U_k^{R_{pa}C_{pa}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta R_k \\ R_{pc}(1-\exp(-\frac{T}{R_{pc}C_{pc}})) \\ R_{pa}(1-\exp(-\frac{T}{R_{pa}C_{pa}})) \end{bmatrix} I_k + \begin{bmatrix} w_{R_k} \\ w_{U_{pc}^{R_{pc}C_{pc}}} \\ w_{U_{pa}^{R_{pa}C_{pa}}} \end{bmatrix},$$

其中,  $\begin{bmatrix} w_{R_k} \\ w_{U_{pc}^{R_{pc}C_{pc}}} \\ w_{U_{pa}^{R_{pa}C_{pa}}} \end{bmatrix}$  为系统误差,  $T$  为采样周期。

8. 根据权利要求 7 所述的方法, 其特征在于, 所述利用抗差 UKF 算法, 循环迭代得到状态量中的实时欧姆内阻  $R_0$  的估算值, 包括:

取状态量  $x_k$  的  $2n+1$  个 sigma 点  $x_i(k)$ , 其中,  $n$  为大于等于 0 的整数,  $i = 1, 2, \dots, 2n+1$ , 然后利用 UT 变换方程, 对  $2n+1$  个 sigma 点进行 UT 变换;

根据 UT 变换方程的变换结果计算所述状态量  $x_k$  的一步预测值和估算协方差值;

根据所述观测方程、所述状态量  $x_k$  的 sigma 点值和所述权系数, 计算相应的观测向量一步预测值;

计算所述观测向量的协方差及抗差 UKF 算法的滤波增益;

根据所述滤波增益和所述协方差, 计算协方差误差值; 及

计算所述状态方程的估算值, 其中, 所述估算值为抗差 UKF 滤波算法一次迭代计算得到的估算值, 经过多次迭代, 直到前后两次迭代获得的估算值的差小于一设定的阈值, 则后一次迭代得到的估算值即为实时欧姆内阻估算值。

9. 根据权利要求 8 所述的方法, 其特征在于, 根据电池老化实验建立所述电池的循环次数  $N$  与所述欧姆内阻  $R_0$  的关系方程, 并建立通过循环次数  $N$  来估算健康状况 (SOH) 的计算方程, 包括:

测量所述电池在不同循环次数  $N$  下的欧姆内阻  $R_0$ , 通过拟合获得所述欧姆内阻  $R_0$  与循环次数  $N$  的拟合方程;

测量所述单体电池的剩余容量、欧姆内阻  $R_0$ 、计算基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值和基于剩余容量的 SOH 估算值；及

根据所述欧姆内阻  $R_0$  与循环次数 N 的拟合方程及基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值，建立根据循环次数 N 估算 SOH 的计算方程。

10. 根据权利要求 9 所述的方法，其特征在于，计算所述基于剩余容量的 SOH 估算值与所述基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值的估算误差，所述估算误差用以衡量所述基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值的准确性。

## 电池容量损失在线估算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电池技术领域，尤其涉及一种电池容量损失在线估算方法。

### 背景技术

[0002] 电池容量损失是衡量电池或电池组健康状况 (State Of Health, SOH) 的重要指标之一。检测和估算电池容量损失通常是在实验室中利用精密的仪器设备完成的，然而对于在线使用的电池来说，由于环境与条件的限制，一般很难直接对电池的特征参量进行检测。因此，通过在线检测或估算电池的残余容量进而估算电池的健康状态，是目前锂离子电池管理技术领域的一个难题。

[0003] 目前，电池或电池组残余容量的在线估算方法主要有以下两种：一是基于特征的预测，利用电池老化过程中所表现出来的特征参量的演变，建立特征量与电池寿命之间的对应关系用于寿命预测；二是基于数据驱动的预测，利用电池性能的测试数据，从数据中挖掘电池性能演变的规律用于寿命预测，由数据拟合得到解析模型，进而根据模型进行寿命预测。

[0004] 现有的在线估算方法之一为：通过改进戴维南电池等效模型，并运用卡尔曼滤波算法对电池等效模型的参数进行预测。其缺点在于，戴维南模型为一阶模型，在很大程度上无法模拟出电池的非线性特征，而采用卡尔曼滤波算法对电池模型参数进行预测的精度高度依赖于电池模型的精确度，因而这种方法的准确度很难保证。另外，该方法只考虑到在线估算或获取电池内阻和电池荷电状态 (state of charge, SOC) 信息，这些信息并不能直接指明电池的 SOH 或容量损失，无法满足使用要求。

### 发明内容

[0005] 针对上面问题，本发明的目的在于提供一种电池容量损失在线估算方法，通过建立电池二阶电路模型来估算电池的欧姆内阻，并通过数据驱动的方法获得所述欧姆内阻与电池循环次数的拟合方程，建立通过循环次数 N 来估计电池 SOH 的计算方程。

[0006] 本发明提供一种电池容量损失在线估算方法，至少包括如下步骤：

[0007] 根据电池的电化学特征建立电化学模型，并根据所述电化学模型建立电池二阶电路模型，所述电池二阶电路模型的模型参数中包括电池的欧姆内阻和极化内阻；

[0008] 根据所述电池二阶电路模型，确定所述电池二阶电路模型的输出方程及估算欧姆内阻  $R_0$  的观测方程；

[0009] 对所述电池二阶电路模型中的模型参数进行辨识；

[0010] 确定关于欧姆内阻的状态量及状态方程，并利用抗差无迹卡尔曼滤波 (UKF) 算法对所述欧姆内阻的状态量进行迭代，以获得实时欧姆内阻估算值；及

[0011] 根据电池老化实验建立所述电池的循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_0$  的关系方程，并建立通过循环次数 N 来估算健康状况 (SOH) 的计算方程，其中，N 为正整数。

[0012] 其中，所述电池二阶电路模型的输出方程为： $U = U_{pa} + U_{pe} + I_L R_0$ ，其中， $U = U_{oc} - U_L$ ， $U_{oc}$

为电池的开路电压,  $U_L$  为电池的端电压,  $U_{pa}$  和  $U_{pc}$  分别为极化内阻  $R_{pa}$  和  $R_{pc}$  上的电压,  $R_0$  为欧姆内阻,  $I_L$  为充放电电流。

[0013] 其中, 所述输出方程  $U$  在复频域的表达式为 :

$$[0014] U(s) = I_L(s)(R_0 + \frac{R_{pc}}{1 + R_{pc}C_{pc}s} + \frac{R_{pa}}{R_{pa}C_{pa}s})$$

[0015] 其中,  $I_L(s)$  分别为充放电电流  $I_L$  在复频域的表达式, 将上式转化为差分形式 :

$$[0016] U(k) = -a_1U(k-1) - a_2U(k-2) + b_0I(k) + b_1I(k-1) + b_2I(k-2),$$

[0017] 并令  $\theta = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \beta_0 \ \beta_1 \ \beta_2]$ ,  $h^T(k) = [-U(k-1) \ -U(k-2) \ I(k) \ I(k-1) \ I(k-2)]$ , 获得估算欧姆内阻  $R_0$  的观测方程 :

$$[0018] U(k) = h^T(k)\theta + v_k$$

[0019] 其中,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  均为与模型参数相关的系数,  $U(k)$ 、 $U(k-1)$ 、 $U(k-2)$  分别为  $U(s)$  在  $k$  时刻、 $(k-1)$  时刻及  $(k-2)$  时刻的表达式,  $I(k)$ 、 $I(k-1)$ 、 $I(k-2)$  分别为  $I_L(s)$  在  $k$  时刻、 $(k-1)$  时刻及  $(k-2)$  时刻的表达式,  $v_k$  为观测误差。

[0020] 其中, 所述对所述电池二阶电路模型中的模型参数进行辨识具体为 : 对一单体电池进行放电, 并测量端电压  $U_L$  与充放电电流  $I_L$ , 每隔一预定的时间, 采集一次  $I_L$  与  $U_L$  的测量值, 然后根据关系式  $U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L R_0$ , 并运用预定的算法处理所述采集到的测量值, 获得所述电池二阶电路模型中的模型参数的初始值。

[0021] 其中, 所述确定关于欧姆内阻的状态量及状态方程, 并利用抗差无迹卡尔曼滤波(UKF) 算法对所述欧姆内阻的状态量进行迭代, 以获得实时欧姆内阻估算值, 包括 :

[0022] 设置所述单体电池的初始电池荷电状态 (SOC) 与初始容量, 并测量所述单体电池的充放电电流  $I_L$ ;

[0023] 基于所述抗差 UKF 算法, 根据输入的初始 SOC、初始容量及充放电电流  $I_L$ , 对所述初始 SOC 进行更新, 以获得实时 SOC 估算值;

[0024] 根据所述实时 SOC 估算值, 获得所述电池二阶电路模型的实时开路电压  $U_{oc}$  及模型参数的实时估算值;

[0025] 根据计算获得的模型参数的实时估算值及充放电电流  $I_L$ , 计算开路电压的动态误差值  $U_{eq}$ , 并根据所述动态误差值  $U_{eq}$  对所述实时开路电压  $U_{oc}$  进行修正, 以获得最优的实时开路电压  $U_{oc}$ ; 及

[0026] 根据所述最优的实时开路电压  $U_{oc}$ , 再次结合抗差 UKF 算法, 获得所述单体电池的实时欧姆内阻估算值。

[0027] 其中, 根据所述最优的实时开路电压  $U_{oc}$ , 再次结合抗差 UKF 算法, 获得所述单体电池的实时欧姆内阻估算值, 包括 :

[0028] 建立欧姆内阻  $R_0$  的状态量和状态方程; 及

[0029] 利用抗差 UKF 算法, 循环迭代得到状态量中的实时欧姆内阻  $R_0$  的估算值。

[0030] 其中, 所述状态量为  $x_k = (R_0, U_{pc}, U_{pa}, U_L)^T$ , 所述状态量的状态方程为 :

[0031]

$$\begin{bmatrix} R_{k+1} \\ U_k^{R_{pc}C_{pc}} \\ U_k^{R_{pa}C_{pa}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-\frac{T}{R_{pc}C_{pc}}) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-\frac{T}{R_{pa}C_{pa}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_k \\ U_k^{R_{pc}C_{pc}} \\ U_k^{R_{pa}C_{pa}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta R_k \\ R_{pc}(1-\exp(-\frac{T}{R_{pc}C_{pc}}))I_k \\ R_{pa}(1-\exp(-\frac{T}{R_{pa}C_{pa}})) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{R_k} \\ w_{U_k^{R_{pc}C_{pc}}} \\ w_{U_k^{R_{pa}C_{pa}}} \end{bmatrix},$$

[0032] 其中， $\begin{bmatrix} w_{R_k} \\ w_{U_k^{R_{pc}C_{pc}}} \\ w_{U_k^{R_{pa}C_{pa}}} \end{bmatrix}$  为系统误差，T 为采样周期。

[0033] 其中，所述利用抗差 UKF 算法，循环迭代得到状态量中的实时欧姆内阻  $R_0$  的估算值，包括：

[0034] 取状态量  $x_k$  的  $2n+1$  个 sigma 点  $x_i(k)$ ，其中，n 为大于等于 0 的整数， $i = 1, 2, \dots, 2n+1$ ，然后利用 UT 变换方程，对  $2n+1$  个 sigma 点进行 UT 变换；

[0035] 根据 UT 变换方程的变换结果计算所述状态量  $x_k$  的一步预测值和估算协方差值；

[0036] 根据所述观测方程、所述状态量  $x_k$  的 sigma 点值和所述权系数，计算相应的观测向量一步预测值；

[0037] 计算所述观测向量的协方差及抗差 UKF 算法的滤波增益；

[0038] 根据所述滤波增益和所述协方差，计算协方差误差值；及

[0039] 计算所述状态方程的估算值，其中，所述估算值为抗差 UKF 滤波算法一次迭代计算得到的估算值，经过多次迭代，直到前后两次迭代获得的估算值的差小于一设定的阈值，则后一次迭代得到的估算值即为实时欧姆内阻估算值。

[0040] 其中，根据电池老化实验建立所述电池的循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_0$  的关系方程，并建立通过循环次数 N 来估算健康状况 (SOH) 的计算方程，包括：

[0041] 测量所述电池在不同循环次数 N 下的欧姆内阻  $R_0$ ，通过拟合获得所述欧姆内阻  $R_0$  与循环次数 N 的拟合方程；

[0042] 测量所述单体电池的剩余容量、欧姆内阻  $R_0$ 、计算基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值和基于剩余容量的 SOH 估算值；及

[0043] 根据所述欧姆内阻  $R_0$  与循环次数 N 的拟合方程及基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值，建立根据循环次数 N 估算 SOH 的计算方程。

[0044] 其中，计算所述基于剩余容量的 SOH 估算值与所述基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值的估算误差，所述估算误差用以衡量所述基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值的准确性。

[0045] 本发明实施例提供的电池容量损失在线估算方法，通过建立所述电池二阶电路模型，结合抗差 UKF 在线估算所述电池的欧姆内阻  $R_0$ ，然后根据电池老化试验，建立欧姆内阻  $R_0$  与 SOH 之间的关系，再根据估算的欧姆内阻  $R_0$ ，对电池容量损失进行在线预测，本方法具有模型精度高，可在线实时计算且计算结果精确，从而可据此估算对电池应用中可能发生的风险进行提前预警或及时进行维护。此外，本方法还具有易于对在线电池进行远程控制

及实现可视化管理等优点，节省成本，并提高可靠性。

## 附图说明

[0046] 为了更清楚地说明本发明的技术方案，下面将对实施方式中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施方式，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0047] 图 1 是本发明实施例提供的电池容量损失在线估算方法的流程示意图。

[0048] 图 2(a) 是本发明实施例提供电池电化学模型示意图。

[0049] 图 2(b) 是本发明实施例提供基于电化学模型的电池等效电路模型示意图。

[0050] 图 3 是本发明实施例提供电池电路二阶模型示意图。

[0051] 图 4 是本发明实施例提供的单体电池的工作电压随放电电流及放电时间的变化示意图。

[0052] 图 5 是本发明实施例提供的单体电池的欧姆内阻的测量值与拟合值的曲线示意图。

## 具体实施方式

[0053] 下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0054] 请参阅图 1，本发明实施例提供一种电池容量损失在线估算方法，用于在线估算电池的健康状态 (State Of Health, SOH)，其中，所述 SOH 是指电池的当前最大容量与初始 (出厂) 最大容量的比值，其小于等于 1，当所述 SOH 等于 1 时，其表示所述电池完全健康；然而，当所述电池使用一段时间后，由于存在容量损失，所述 SOH 将小于 1，且所述 SOH 越小，则表明所述电池的容量损失越大。所述电池容量损失在线估算方法至少包括如下步骤。

[0055] 101，根据电池的电化学特征建立电化学模型，并根据所述电化学模型建立电池二阶电路模型，所述电池二阶电路模型的模型参数中包括电池的欧姆内阻和极化内阻。

[0056] 在本发明实施例中，电池在工作时，电流流过该电池内部所受到的阻力，即为电池的内阻，所述电池的内阻包括欧姆内阻和极化内阻。其中，所述欧姆内阻主要是由电极材料、电解液、隔膜电阻及电池内部各零件的接触电阻组成，其与电池的尺寸、结构、装配等有关；所述极化内阻是指电池的正极与负极在进行电化学反应时极化所引起的内阻。所述电池在使用过程中，随着充放电循环次数 (即电池循环充放电的次数) 的增多，电池的欧姆内阻也会随之不断增大，因此电池在使用过程中会产生大量焦耳热，导致电池温度升高，电池放电工作电压降低，放电时间缩短等。电池的极化内阻在使用过程中一般变化不大。

[0057] 请一并参阅图 2 及图 3，其中，图 2(a) 为电池 (如锂离子电池或其他具有相变特性电极材料的电池) 的电化学模型。其中， $U_{soc}$  表示等效输出电压，其由电池荷电状态 (state of charge, SOC) 决定，并与所述电池的 SOC 具有固定的函数关系， $R_{self discharge}$  表示电池的自放电电阻、 $C_{capacity}$  表示电池的实际容量， $I_L$  为充放电电流。图 2(b) 为根据图 2(a) 的电化学模型建立的电池电路模型，其中， $U_{oc}$  (等效于图 2(a) 的  $U_{soc}$ ) 为电池的开路电压 (电池在开

路状态下的端电压称为电池的开路电压),其为所述电路模型的总电源, $U_L$  为端电压(即工作电压),内阻等效电路用于模拟电池的内阻(包括欧姆内阻和极化内阻)。图3为图2(b)中的内阻等效电路为二阶等效电路时得到的电池二阶电路模型,其中, $R_0$  为欧姆内阻、 $R_{pa}$  和  $R_{pc}$  为极化内阻, $C_{pa}$  和  $C_{pc}$  为与极化内阻  $R_{pa}$  和  $R_{pc}$  相对应的极间电容, $R_{pa}$  与  $C_{pa}$ (或者  $R_{pc}$  与  $C_{pc}$ ) 的并联用于模拟电池充放电极化过程中表现出的动态特征。

[0058] 102,根据所述电池二阶电路模型,确定所述电池二阶电路模型的输出方程及估算欧姆内阻  $R_0$  的观测方程。

[0059] 在本发明实施例中,所述电池二阶电路模型的输入为充放电电流  $I_L$ ,输出  $U$  为开路电压  $U_{oc}$  与端电压  $U_L$  之差,即输出  $U = U_{oc} - U_L$ ,且  $U_{oc}$  与  $U_L$  满足关系式  $U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L R_0$ ,即所述输出方程为: $U = U_{pa} + U_{pc} + I_L R_0$ ,其中,  $U_{pa}$  和  $U_{pc}$  分别为极化内阻  $R_{pa}$  和  $R_{pc}$  上的电压。根据图3建立的电池二阶电路模型,可得到如下方程式:

$$[0060] \frac{dU_{pa}}{dt} = \frac{1}{C_{pa}} I_L - \frac{1}{R_{pa} C_{pa}} U_{pa} \quad (1)$$

$$[0061] \frac{dU_{pc}}{dt} = \frac{1}{C_{pc}} I_L - \frac{1}{R_{pc} C_{pc}} U_{pc} \quad (2)$$

[0062] 对方程式(1)、(2)进行拉普拉斯变换,可得  $U_{pa}$  和  $U_{pc}$  在复频域(s域)的表达式为:

$$[0063] U_{pa}(s) = \frac{R_{pa}}{R_{pa} C_{pa}s + 1} I_L(s) \quad (3)$$

$$[0064] U_{pc}(s) = \frac{R_{pc}}{R_{pc} C_{pc}s + 1} I_L(s) \quad (4)$$

[0065] 所述开路电压  $U_{oc}$  与端电压  $U_L$  之差的输出  $U$  在 s 域的表达式为:

$$[0066] U(s) = I_L(s) \left( R_0 + \frac{R_{pc}}{1 + R_{pc} C_{pc}s} + \frac{R_{pa}}{R_{pa} C_{pa}s} \right) \quad (5)$$

[0067] 其中,  $I_L(s)$  分别为充放电电流  $I_L$  在 s 域的表达式。将表达式(5)转化为差分形式,可得:

$$[0068] U(k) = -a_1 U(k-1) - a_2 U(k-2) + b_0 I(k) + b_1 I(k-1) + b_2 I(k-2) \quad (6)$$

[0069] 其中,  $U(k)$ 、 $U(k-1)$ 、 $U(k-2)$  分别为  $U(s)$  在 k 时刻、(k-1) 时刻及 (k-2) 时刻的表达式,  $I(k)$ 、 $I(k-1)$ 、 $I(k-2)$  分别为  $I_L(s)$  在 k 时刻、(k-1) 时刻及 (k-2) 时刻的表达式,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  为与模型参数相关的系数,其可能包含  $R_{pa}$ 、 $R_{pc}$ 、 $C_{pa}$ 、 $C_{pc}$ 、 $U_{pa}$ 、 $U_{pc}$  及  $R_0$  中一个或多个,此处可令  $\theta = [a_1 \ a_2 \ b_0 \ b_1 \ b_2]$ ,  $h^T(k) = [-U(k-1) \ -U(k-2) \ I(k) \ I(k-1) \ I(k-2)]$ ,则可得到关于抗差无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF) 算法的观测方程  $U(k)$ :

$$[0070] U(k) = h^T(k) \theta + v_k \quad (7)$$

[0071] 其中,  $v_k$  为观测误差。

[0072] 103,对所述电池二阶电路模型中的模型参数进行辨识。

[0073] 请一并参阅图4，在本发明实施例中，在建立所述电池二阶电路模型并获得上述的抗差UKF算法的观测方程之后，还需要对所述电池二阶电路模型中的模型参数，如极化内阻 $R_{pa}$ 、 $R_{pc}$ 、极间电容 $C_{pa}$ 、 $C_{pc}$ 及欧姆内阻 $R_0$ 等模型参数进行辨识，以获得进行抗差UKF算法估算时所需的模型参数的初始值。具体为，图4为对一单体电池（如18650锂离子电池）进行放电时测量得到的端电压 $U_L$ 与充放电电流 $I_L$ 的关系曲线，其中，所述单体电池以 $I_L$ 进行放电，且 $I_L$ 随时间变化的关系由图4给出；随着对所述单体电池的不断放电，所述单体电池的端电压 $U_L$ 随之下降，并在持续放电2小时45分钟左右，其端电压 $U_L$ 达到一放电截止电压。在放电过程中，每隔一预定的时间（如1秒），通过一数据采集器采集一次 $I_L$ 与 $U_L$ 的测量值，并存储所获得的测量值，然后处理器装置根据关系式 $U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L R_0$ ，运用预定的算法，如线性回归算法，处理所述测量值，以获得所述电池二阶电路模型中的模型参数的初始值，从而实现对所述模型参数的辨识。

[0074] 104，确定关于欧姆内阻的状态量及状态方程，并利用抗差UKF算法对所述欧姆内阻的状态量进行迭代，以获得实时欧姆内阻估算值。

[0075] 在本发明实施例中，根据上述建立的电池二阶电路模型，结合抗差UKF算法，可对所述电池的欧姆内阻 $R_0$ 进行在线辨识，其具体可包括如下步骤：

[0076] (1) 设置所述单体电池的初始SOC与初始容量，并测量所述单体电池的充放电电流 $I_L$ ；

[0077] 在本发明实施例中，所述单体电池的初始SOC与初始容量可通过开路电压测量法获得，具体为，所述开路电压测量法是利用电池的开路电压与电池的放电深度的对应关系，通过测量所述单体电池的开路电压来估测所述单体电池的初始容量，进而获得所述单体电池的初始SOC。所述单体电池的充放电电流 $I_L$ 则可通过电流计等测量仪器测量获得。

[0078] (2) 基于所述抗差UKF算法，根据输入的初始SOC、初始容量及充放电电流 $I_L$ 进行对所述初始SOC进行更新，以获得实时SOC估算值；

[0079] 具体为，首先，建立基于电池SOC的状态变量、状态方程及观测方程，取状态变量的 $2n+1$ 个sigma点（ $n$ 为大于等于0的整数），利用UT变换（unscented transformation）方程，将 $2n+1$ 个sigma点进行UT变换，根据UT变换结果计算状态变量的一步预测值和估算协方差值，根据建立的观测方程、状态量的sigma点值和预先建立的权值函数，计算观测方程中的观测向量的一步预测值，计算所述观测向量的一步预测协方差及抗差UKF滤波增益，根据上述求得的滤波增益和一步预测协方差，计算协方差误差值，最后计算状态方程估算值。其中，所述估算值为抗差UKF滤波算法一次迭代计算得到的估算值，经过多次迭代，直到前后两次迭代（如第N-1次迭代和第N次迭代）获得的估算值的差小于一设定的阈值，则后一次迭代（第N次迭代）得到的估算值即为所述实时SOC估算值。

[0080] (3) 根据所述实时SOC估算值，获得所述电池二阶电路模型的实时开路电压 $U_{oc}$ 及模型参数的实时估算值。

[0081] 在本发明实施例中，所述SOC与开路电压 $U_{oc}$ 具有固定的函数关系，因而可根据上述获得的实时SOC估算值得到实时开路电压 $U_{oc}$ ，如可通过精确实验得到的SOC-开路电压（Open Circuit Voltage, OCV）查表系统，通过查表获得与所述实时SOC估算值对应的实时开路电压 $U_{oc}$ ，或根据所述SOC与开路电压 $U_{oc}$ 的函数关系，将所述实时SOC估算值代入所述函数中，获得所述实时开路电压 $U_{oc}$ 。此外，根据所述实时SOC估算值，并利用式(1)和式

(2), 还可计算获得所述电池二阶电路模型的模型参数的实时估算值, 如可获得所述电池模型的极化内阻  $R_{pa}$ 、 $R_{pc}$ 、极化内阻上的实时电容  $C_{pa}$ 、 $C_{pc}$  及欧姆内阻  $R_0$  等模型参数的实时估算值。

[0082] (4) 根据计算获得的模型参数的实时估算值及充放电电流  $I_L$ , 计算开路电压的动态误差值  $U_{eq}$ , 并根据所述动态误差值  $U_{eq}$  对所述实时开路电压  $U_{oc}$  进行修正, 以获得最优的实时开路电压  $U_{oc}$ ;

[0083] 具体为, 根据式 (1) 及上述获取的所述模型参数的实时估算值及所述充放电电流  $I_L$ , 可计算得到开路电压的动态误差值  $U_{eq}$ , 然后将所述动态误差值  $U_{eq}$  与所述实时开路电压  $U_{oc}$  进行叠加计算, 可获得最优的实时开路电压  $U_{oc}$ , 其中, 所述最优的开路电压  $U_{oc}$  可为与所述开路电压的实际值尽可能接近的预测值。

[0084] (5) 根据所述最优的实时开路电压  $U_{oc}$ , 再次结合所述抗差 UKF 算法, 获得所述单体电池的实时欧姆内阻估算值。

[0085] 在本发明实施例中, 根据上述获取到的最优开路电压  $U_{oc}$ , 即可对电池的欧姆内阻  $R_0$  进行实时的在线计算, 以获得实时欧姆内阻  $R_0$  的估算值, 其中, 在线计算的步骤为:

[0086] 51, 建立欧姆内阻  $R_0$  的状态量和状态方程;

[0087] 在本发明实施例中, 预设状态量为  $x_k = (R_0, U_{pc}, U_{pa}, U_L)^T$ , 则所述状态量的状态方程为:

[0088]

$$\begin{bmatrix} R_{k+1} \\ U_{k+1}^{R_{pc}C_{pc}} \\ U_{k+1}^{R_{pa}C_{pa}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-\frac{T}{R_{pc}C_{pc}}) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-\frac{T}{R_{pa}C_{pa}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_k \\ U_k^{R_{pc}C_{pc}} \\ U_k^{R_{pa}C_{pa}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta R_k \\ R_{pc}(1 - \exp(-\frac{T}{R_{pc}C_{pc}}))I_k \\ R_{pa}(1 - \exp(-\frac{T}{R_{pa}C_{pa}})) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{R_k} \\ w_{U_{R_{pc}C_{pc}}} \\ w_{U_{R_{pa}C_{pa}}} \end{bmatrix},$$

[0089] 其中,  $\begin{bmatrix} w_{R_k} \\ w_{U_{R_{pc}C_{pc}}} \\ w_{U_{R_{pa}C_{pa}}} \end{bmatrix}$  为系统误差,  $T$  为采样周期。

[0090] 52, 利用抗差 UKF 算法, 循环迭代得到状态量  $x_k$  中的实时欧姆内阻  $R_0$  的估算值;

[0091] 具体为, 可包括如下步骤:

[0092] 521, 取状态量  $x_k$  的  $2n+1$  个 sigma 点  $x_i(k)$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, 2n+1$ , 其中,  $n$  为大于等于 0 的整数, 然后利用 UT 变换方程, 对  $2n+1$  个 sigma 点进行 UT 变换, 表达式如下:

[0093]  $x_i(k+1/k) = UT[x_i(k/k), u(k), k]$ ,

[0094] 其中, 方程式  $UT[\cdot]$  表示 UKF 算法中的 UT 变换方程, 其表示对 [] 内的式子进行 UT 变换。

[0095] 522, 根据 UT 变换方程的变换结果计算所述状态量  $x_k$  的一步预测值和估算协方差值, 其中, 所述一步预测值为:

[0096]  $\hat{X}(k+1/k) = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \chi_i(k+1/k)$

[0097] 所述估算协方差值为：

[0098]  $P(k+1/k) = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\chi_i(k+1/k) - \hat{X}(k+1/k)]^T$

[0099] 式中的  $w^i[\cdot]$  表示累加方程的权系数。

[0100] 523, 根据所述观测方程、所述状态量  $x_k$  的 sigma 点值和所述权系数, 计算相应的观测向量一步预测值：

[0101] 其中, 所述观测方程由式 (7) 给出, 所述观测向量为所述观测方程中包含的向量。所述观测向量的一步预测值为：

[0102]  $U_i(k+1/k) = h[\hat{X}(k+1/k)]$

[0103]  $\hat{U}(k+1/k) = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} U_i(k+1/k) \chi(k+1/k)$

[0104] 524, 计算所述观测向量的协方差及所述抗差 UKF 算法的滤波增益；

[0105] 其中, 所述观测向量的协方差为：

[0106]  $P_{UU}(k+1/k) = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [U_i(k+1/k) - \hat{U}(k+1/k)][U_i(k+1/k) - \hat{U}(k+1/k)]^T + \bar{R}_k$ ,

[0107] 上式中,  $\bar{R}_k$  表示观测向量  $R_k$  的加权平均值, 其用于反应所述抗差 UKF 算法的精确性和有效性。

[0108] 所述抗差 UKF 算法的滤波增益为：

[0109]  $\tilde{K}(k+1) = P_{XU} P_{UU}^{-1}$  °

[0110] 525, 根据上述求得的所述滤波增益和所述协方差, 计算协方差误差值；

[0111] 其中, 所述协方差误差值为：

[0112]  $\tilde{P}(k+1/k+1) = P(k+1/k) - \tilde{K}(k+1) P_{XU} \tilde{K}(k+1)^T$  °

[0113] 526, 计算所述状态方程的估算值, 该估算值可通过所述抗差 UKF 滤波算法一次迭代计算得到；

[0114] 其中, 计算公式为：

[0115]  $\hat{X}'(k+1/k+1) = \hat{X}(k+1/k) + \tilde{K}(k+1)[U(k+1) - \hat{U}(k+1/k)]$  °

[0116] 经过多次迭代, 直到前后两次迭代 (如第 N-1 次迭代和第 N 次迭代) 获得的估算值的差小于一设定的阈值, 则后一次迭代 (第 N 次迭代) 得到的估算值即为欧姆内阻  $R_0$  的精确估算值, 即所述实时欧姆内阻  $R_0$  估算值。

[0117] 105、根据电池老化实验建立所述电池的循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_0$  的关系方程, 并建立通过循环次数 N 来估算 SOH 的计算方程, 其中 N 为正整数。

[0118] 请一并参阅图 5，在本发明实施例中，所述电池老化实验是指利用数据驱动（即黑盒测试）的方法确定所述电池在使用过程中电池的欧姆内阻  $R_0$  随电池的循环次数 N 的变化关系，其中，N 为正整数。所述根据电池老化实验建立所述电池的循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_0$  的关系方程，并建立循环次数 N 估算 SOH 的计算方程具体可包括如下步骤：

[0119] 首先，测量所述电池在不同循环次数 N 下的欧姆内阻  $R_0$ ，通过拟合来获得所述欧姆内阻  $R_0$  与循环次数 N 的拟合方程；

[0120] 在本发明实施例中，电池检测仪器在实验室环境下测得一组单体电池的循环次数 N 以及与在该循环次数 N 对应的欧姆内阻  $R_0$  的测量数据，随后通过拟合的方法处理所述测量数据，以获得所述电池的循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_0$  的关系方程。如图 5 所示，图 5 为所述电池循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_0$  的拟合关系曲线，处理器装置根据输入的测量数据进行拟合，并通过多次拟合结果获得一拟合曲线，测量数据进行拟合时，可通过选择适当的拟合函数，如可选择多次项函数、指数函数等拟合函数对所述测量数据进行拟合，以使得拟合出的拟合曲线与所述测量数据之间的误差尽可能小。作为一种可能的拟合结果，图 5 所示的电池的循环次数 N 与欧姆内阻  $R_0$  的关系方程可为：

$$R_0 = 0.0007N^2 - 0.0609N + 75.1117 \quad (8)$$

[0121] 需要说明的是，在本发明的实施例中，当所述单体电池的工作温度、环境温度或者放电倍率不同时，所述单体电池的循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_0$  的关系方程或拟合系数也可能不一样，因而，所述关系方程实际上应该为一组方程，其根据所述工作温度、环境温度或者放电倍率的不同具有不同的表达式。

[0122] 需要说明的是，在本发明的其他实施例中，当所述单体电池的结构或内部材料不一样时，所述单体电池循环次数 N 与所述欧姆内阻  $R_0$  的关系方程或拟合系数可能不一样，所述关系方程及拟合系数可根据实际的测量数据和拟合结果进行调整，在此不再赘述。

[0123] 然后，测量所述单体电池的剩余容量 (mAh)、欧姆内阻  $R_0$ ，并计算基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 值和基于剩余容量的 SOH 值。

[0124] 请参阅表 1，表 1 内包含了测量到的单体电池在循环次数 N 下的剩余容量 (mAh)、欧姆内阻  $R_0$ 、基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 值、基于剩余容量的 SOH 值以及基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 值与基于剩余容量的 SOH 的估算误差。其中，基于剩余容量的 SOH 值为所述单体电池在经过循环次数 N 后的剩余容量与单体电池的初始容量的比值，该 SOH 值具有最高的精确度，因此常常用以判断其他方法获得的 SOH 值的准确性。而基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 值，是利用所述单体电池在经过循环次数 N 后的欧姆电阻  $R_0$ ，并根据所述欧姆电阻  $R_0$  与 SOH 的关系来获得所述 SOH 值。

[0125] 表 1 电池容量估算值和估算误差

[0126]

| 循环次数 N | 剩余容量 (Ah) | 欧姆内阻 ( $R_0/m\Omega$ ) | 基于欧姆内阻的 SOH 估算值 (%) | 基于剩余容量的 SOH 测量值 (%) | SOH 的估算误差 |
|--------|-----------|------------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| 10     | 1.498     | 72.8                   | 99.98               | 98.06               | 0.0192    |
| 20     | 1.469     | 73.1                   | 99.02               | 97.93               | 0.0109    |
| 50     | 1.398     | 75.9                   | 96.52               | 93.2                | 0.0332    |
| 80     | 1.352     | 75.3                   | 93.85               | 90.13               | 0.0372    |
| 100    | 1.307     | 76.3                   | 92.76               | 87.13               | 0.0563    |
| 150    | 1.258     | 80.9                   | 88.65               | 83.87               | 0.0478    |
| 200    | 1.212     | 93.4                   | 78.55               | 80.8                | -0.0235   |
| 500    | 1.127     | 187.6                  | 74.19               | 75.13               | -0.0094   |
| 800    | 1.106     | 304.2                  | 74                  | 73.73               | 0.0036    |
| 1000   | 1.100     | 588.4                  | 73.86               | 73.33               | 0.0072    |

[0128] 从表 1 可以看出, 在相同的循环次数 N 下, 基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值与基于剩余容量的 SOH 测量值的估算误差很小, 因而可直接利用基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值来表征所述单体电池的 SOH 值。

[0129] 最后, 根据所述欧姆内阻  $R_0$  与循环次数 N 的拟合方程及基于欧姆内阻  $R_0$  的 SOH 估算值, 建立根据循环次数 N 估算 SOH 的计算方程。

[0130] 在本发明实施例中, 通过步骤 S104 估算所述单体电池的实时欧姆内阻  $R_0$  估算值, 获得与该实时欧姆内阻  $R_0$  对应的 SOH 值, 然后将所述实时欧姆内阻  $R_0$  代入所述拟合方程(8), 即可获得与该实时欧姆内阻  $R_0$  对应的循环次数 N, 从而可获得循环次数 N 与 SOH 值的关系, 即建立了根据循环次数 N 估算 SOH 的计算方程。

[0131] 需要说明的是, 本发明实施例提供的电池容量损失在线估算方法中, 所述抗差 UKF 算法的估算计算过程可在仿真软件, 如 Simulink 仿真程序上运行, 也可将其整合为一专用功能软件, 然后将所述专用功能软件嵌入到电池管理系统中应用。

[0132] 需要说明的是, 本发明实施例提供的电池容量损失在线估算方法并不限于在电池管理系统中应用, 还可以作为一种对时效性要求很强的电池老化状况测试方法, 该电池老化状况测试方法可以作为一种测试软件的形式植入测试设备, 以对电池的老化状况进行测试。

[0133] 需要说明的是, 本发明实施例提供的方法可同时用于检测单体电池或电池组的 SOH, 当用于测量电池组的 SOH 时, 只需通过设定一电子开关, 将电池组中的部分模组或单体电池进行分时隔离, 并采用本发明的方法逐一对单体电池的 SOH 进行判断, 这些检测方法均在本发明的保护范围之内。

[0134] 需要说明的是, 本发明实施例方法中的步骤可以根据实际需要进行顺序调整、合并和删减。

[0135] 综上所述, 本发明实施例提供的电池容量损失在线估算方法, 通过建立所述电池二阶电路模型, 结合抗差 UKF 在线估算所述电池的欧姆内阻  $R_0$ , 然后根据电池老化试验, 建立欧姆内阻  $R_0$  与 SOH 之间的关系, 再根据估算的欧姆内阻  $R_0$ , 对电池容量损失进行在线预测, 本方法具有模型精度高, 可在线实时计算且计算结果精确, 从而可据此估算对电池应用中可能产生的风险进行提前预警或及时进行维护。此外, 本方法还具有易于对在线电池进

行远程控制及实现可视化管理等优点，节省成本，并提高可靠性。

[0136] 以上所述是本发明的优选实施方式，应当指出，对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明原理的前提下，还可以做出若干改进和润饰，这些改进和润饰也视为本发明的保护范围。

根据电池的电化学特征建立电化学模型，并根据所述电化学模型建立电池二阶电路模型，所述电池二阶电路模型的模型参数中包括电池的欧姆内阻和极化内阻

101

根据所述电池二阶电路模型，确定所述电池二阶电路模型的输出方程及估算欧姆内阻 $R_0$ 的观测方程

102

对所述电池二阶电路模型中的模型参数进行辨识

103

确定关于欧姆内阻的状态量及状态方程，并利用抗差无迹卡尔曼滤波（UKF）算法对所述欧姆内阻的状态量进行迭代，以获得实时欧姆内阻估算值

104

根据电池老化实验建立所述电池的循环次数N与所述欧姆内阻 $R_0$ 的关系方程，并建立通过循环次数N来估算健康状况（SOH）的计算方程

105

图 1

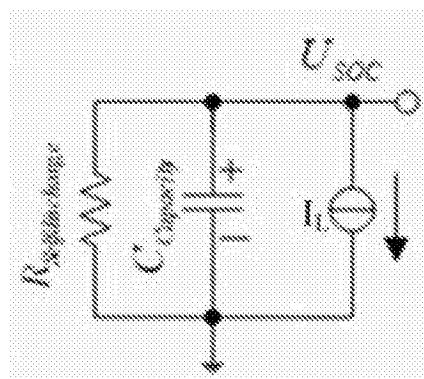


图 2(a)

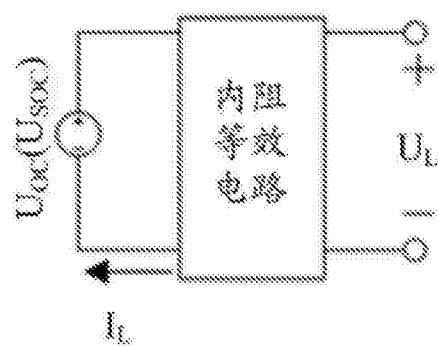


图 2(b)

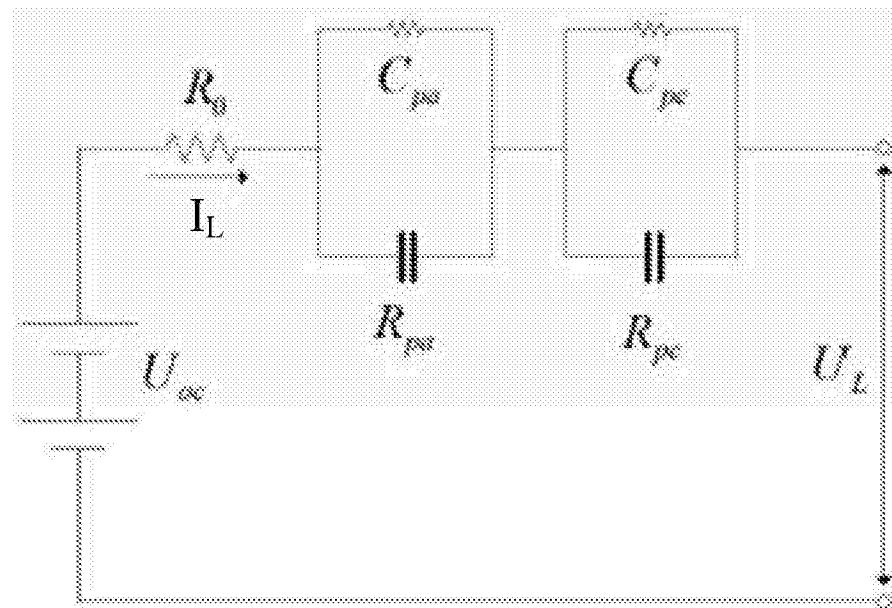


图 3

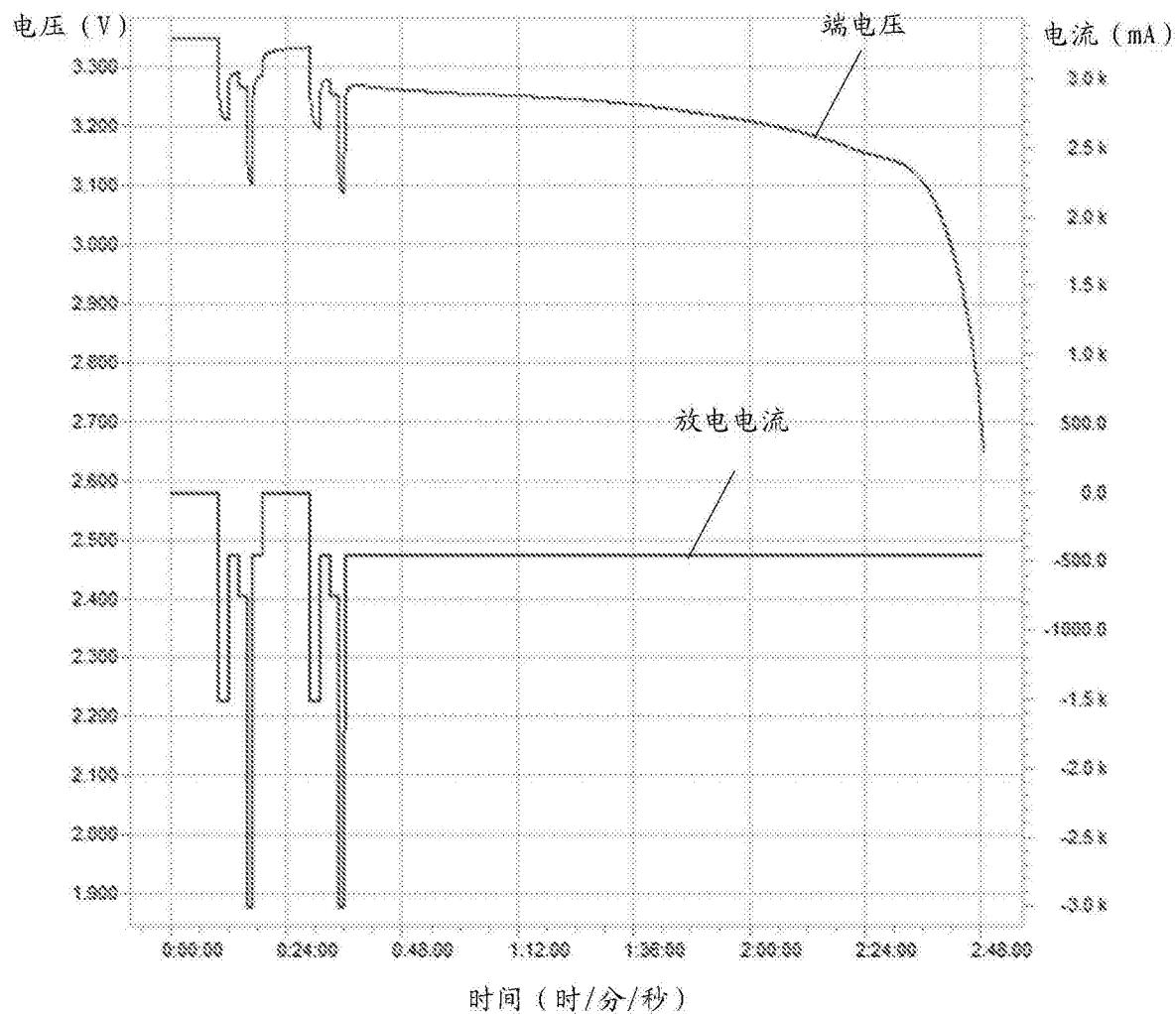


图 4

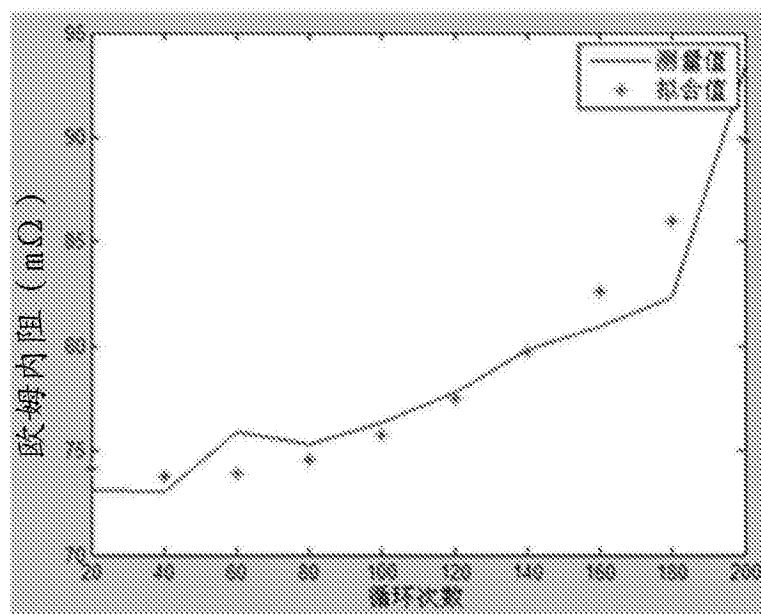


图 5