(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 104569844 A
(43)申请公布日 2015.04.29

(21)申请号 201410854379.2

(22)申请日 2014.12.31

(71)申请人 浙江大学宁波理工学院
地址 315100 浙江省宁波市钱湖南路1号

(72)发明人 刘仰光 马江敏

(74)专利代理机构 北京科亿知识产权代理事务所(普通合伙) 11350
代理人 汤东凤

(51)Int.Cl.
G01R 31/36(2006.01)

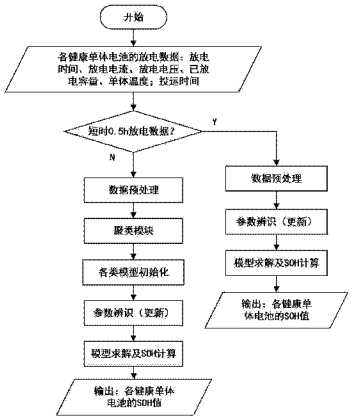
权利要求书4页 说明书13页 附图4页

(54)发明名称

阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法

(57)摘要

本发明公开了阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法，根据蓄电池端电压(V)与已放电容量(DOD)变化曲线拟合的数学模型，辨识模型中的参数后才可以通过二分法求解电池在全容量放电情况下已放电容量(DOD^*)，然后使用温度变量(T_t^i)将已放电容量(DOD^*)换算为标准温度25℃时的已放电容量(DOD_{25}^*)，最后根据蓄电池的健康状态(SOH)的定义即可计算电池的SOH值。本发明的有益效果是铅酸蓄电池健康状态监测准确度高，且可以进行在线预测。



CN 104569844 A

1. 阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法，其特征在于按照以下步骤进行：

步骤 1：建立蓄电池端电压 V 与已放电容量 DOD 的函数模型：

$V(DOD) = \alpha \times \exp[\beta * DOD] + \theta_0 + \theta_1 \times DOD + \theta_2 \times DOD^2 + \theta_3 \times DOD^3$，

式中，V 为蓄电池的放电端电压，DOD 为蓄电池的已放电容量，α，β，θ_0，θ_1，θ_2，θ_3为函数的待定参数；

步骤 2：对待估计电池的放电电压的数据预处理，处理过程如下：设要处理的数据使用 $u_1, u_2, \cdots, u_N$表示，预处理后的数据用 $u'_1, u'_2, \cdots, u'_N$表示，其中，N 表示处理的放电电压样本数，数据点表示待估计电池的放电电压，

(1) 数据的前 2 个数据点使用下面公式处理：

$u'_1 = (3 \times u_1 + 2 \times u_2 + 1 \times u_3 + 0 \times u_4 + (-1) \times u_5)/5$

$u'_2 = (4 \times u_1 + 3 \times u_2 + 2 \times u_3 + 1 \times u_4 + 0 \times u_5)/10$；

(2) 数据的第 3 个点至第 N-2 个点，即 i = 3, …, N-2 时使用以下步骤进行处理，考虑运用点 $u_{i-2}, u_{i-1}, u_i, u_{i+1}, u_{i+2}$来估计点 u'_i的值：

求 5 点的平均值 $\bar{u} = \frac{1}{5}\sum_{t=-2}^{t=2} u_{i+t}$，t 表示子序列下标，取值为 -2、-1、0、1、2，取 0 值时表示当前的第 i 个放电电压值；取 1 值时表示当前的第 i 个放电电压值的下一条放电电压值；取 -1 值时表示当前的第 i 个放电电压值的前一条放电电压值；

求 5 点的绝对误差 $\Delta_{i+t} = u_{i+t} - \bar{u}(t = -2 \sim 2)$，

求 5 点的平均绝对误差 $\bar{\Delta} = \frac{1}{5}\sum_{t=-2}^{t=2} |\Delta_{i+t}|$，

求 u_{i+t}的权值 w_{i+t}，u_{i+t}表示待估计电池的第 i+t 个放电电压值，$\bar{\Delta}$ 表示 5 点的平均绝对误差，如果条件 $|\Delta_{i+t}| \geq k_x * \bar{\Delta}$ 成立，则 $w_{i+t} = 0$，否则 $w_{i+t} = \frac{1}{|\Delta_{i+t}|}$，$k_x$表示系数，本发明中取值为 3，求 u_i的值，u_i表示待估计电池的第 i 个放电电压值，如果 $\sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t} \geq w_0$（$w_0$表示阈值，本发明中取值为 1000），则

$u'_i = \mathrm{med}\{u_{i-2}, \cdots, u_{i+2}\}$

如果 $0 < \sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t} < w_0$，则

$$u_i^* = \frac{\sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t} \times u_{i+t}}{\sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t}}$$；

(3) 数据的最后 2 个数据点使用下面公式进行处理：

$u'_{N-1}=(0\times u_{N-4}+1\times u_{N-3}+2\times u_{N-2}+3\times u_{N-1}+4\times u_N)/10$

$u'_{N-2}=(-1\times u_{N-4}+0\times u_{N-3}+1\times u_{N-2}+2\times u_{N-1}+3\times u_N)/5$；

步骤 3：对年检 10h 的放电电压数据按照步骤 2 进行数据预处理并进行聚类；首先提取年检时 10h 放电前 3h 放电数据的聚类特征：电池放电前期 CDF 区域的谷底电压 u_d、放电初始电压 u_s、短时放电截止电压 u_c、短时放电电压差 u_{vd}、短时放电过程放电电压的平均值 u_{va} 以及短时放电过程放电电压的中位值 u_{vm}，组成的数据 $F_i(u_d, u_s, u_c, u_{vd}, u_{va}, u_{vm})$ 表示电池组中第 i 个单体电池的数据点，使用 K-means 聚类算法对聚类特征进行计算；

步骤 4：对进行聚类的数据进行参数辨识；

设电池数学模型中的指数部分为 $e(DOD)=\alpha\times\exp[\beta\times DOD]$，多项式部分为 $p(DOD)=\theta_0+\theta_1\times DOD+\theta_2\times DOD^2+\theta_3\times DOD^3$，则电池数学模型写为 $u(DOD)=e(DOD)+p(DOD)$，设指数函数 e(DOD) 中的参数为 $A=[\alpha\ \ \beta]^T$，多项式函数 p(DOD) 中的参数为 $\Theta=[\theta_0\ \ \theta_1\ \ \theta_2\ \ \theta_3]^T$，采用基于递推最小二乘算法辨识模型参数；

步骤 5：经过参数辨识得到的参数，对模型 $f(DOD)=e(DOD)-p(DOD)-u_e=0$ 通过二分法求解待测电池预计放电到规定的终止电压 $u_e=1.8V$ 时电池的已放电容量 DOD^*；

式中，$u_e=1.8$ 为蓄电池全容量核对性放电时规定的放电终止电压，运用二分法求解函数 f(DOD) 的根，解 DOD^* 即为蓄电池在放电过程中放电至规定放电终止电压 u_e 时放出的容量。

2. 按照权利要求 1 所述阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法，其特征在于：所述蓄电池组在年检时进行 10h 全容量核对性放电或者 5h 半容量核对性放电数据时，放电电压数据经过步骤 2 后进入步骤 3，在进行步骤 4 的参数辨识；在月检或者季检，即处理的 0.5h 的恒流短时放电数据时，放电电压数据经过步骤 2 直接进行步骤 4 的参数辨识。

3. 按照权利要求 1 所述阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法，其特征在于：所述步骤 4 中基于递推最小二乘算法辨识模型参数方法为：

Step 1: 设多项式参数 $\Theta_0=0$，即 $p(DOD)=0$，指数参数 $A_0=0$；

Step2: 重复 (1) 和 (2)，

(1) 电池数学模型变形为 $e_k(DOD)=u-p_{k-1}(DOD)$，根据指数部分参数辨识方法从上一次指数参数值 A_{k-1} 得到更新值 A_k；

(2) 电池数学模型变形为 $p_{k+1}(DOD)=u-e_k(DOD)$，根据多项式参数辨识方法从上一次多项式参数值 Θ_k 得到更新值 Θ_{k+1}；

直到指数参数与多项式参数满足以下收敛条件：$\begin{vmatrix}A_n-A_{n-1}\end{vmatrix}\le\varepsilon_e$ $\begin{vmatrix}\Theta_n-\Theta_{n-1}\end{vmatrix}\le\varepsilon_p$，其中，$\varepsilon_e=1\times10^{-6}$，$\varepsilon_p=1\times10^{-6}$，n 表示迭代的是第 n 次。

4. 按照权利要求 1 所述阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法，其特征在于：所述指数部分参数估计方法：假设已知多项式函数为 $p_n(DOD)$，则电池数学模型改写为

$e(DOD)\equiv\alpha\times\exp[\beta\times DOD]=u(DOD)-p_n(DOD)$，

$p_n(DOD)$ 电池模型函数迭代第 n 次后已知的多项式部分函数，

上式两边取自然对数，得到

$\ln(u(DOD)-p_n(DOD))=\ln\alpha+\beta\times DOD$

设 u′ (DOD) = ln[u(DOD)-p_n(DOD)], α′ = ln(α), γ = [α′ β]^T, φ = [1 DOD]^T,上式变形为

u′ (DOD) = γ^T*φ

参数 α′ ,β 由下面的递推更新算法得到：

$$\Phi_{N+1}=\frac{Q_N\times\phi_{N+1}}{1+\phi_{N+1}^T\times Q_N\times\phi_{N+1}}$$

$$\hat{\gamma}_{N+1}=\hat{\gamma}_N+\Phi_{N+1}\times\left(y'_{N+1}-\phi_{N+1}^T\times\hat{\gamma}_N\right)$$

$$Q_{N+1}=\left(I-\Phi_{N+1}\times\phi_{N+1}^T\right)\times Q_N$$

公式符号说明：

① Φ_{N+1}- 单体电池在放电过程中的第 N+1 个观测值,数值为$\begin{bmatrix}1\\ DOD(t_{N+1})\end{bmatrix}$,其中 t_{N+1}是放电过程中的放电时间；

② Q_N- 为 2 阶矩阵；

③$\hat{\gamma}_N$ - 单体电池在放电过程中的第 N 个估计参数；

④ I- 为 2 阶单位矩阵,即$I=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}$;

⑤ Φ_{N+1}- 为 2×1 向量；

最后计算出参数 α,β 的估计值为

$\hat{\alpha}=\exp(\hat{\alpha}),\hat{\beta}=\hat{\beta}$。

5.按照权利要求 4 所述阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法,其特征在于：多项式部分参数估计方法,将已辨识出的指数函数记为 e_n(DOD),根据电池数学模型得到下列公式

u(DOD)-e_n(DOD) = $\theta_0+\theta_1\times DOD+\theta_2\times DOD^2+\theta_3\times DOD^3$

在上式中一旦时间确定了,蓄电池端电压和指数函数 e_n(DOD) 也是已知的,记 Δu(DOD) = u(DOD)-e_n(DOD), θ = [θ_0 θ_1 θ_2 θ_3]^T, $\varphi=\begin{bmatrix}1 & DOD & DOD^2 & DOD^3\end{bmatrix}^T$,上式写为

$$\Delta u(\mathrm{DOD})=\theta^T*\varphi$$

参数 θ_0, θ_1, θ_2, θ_3由下面的递推更新算法得到：

$$K_{N+1}=\frac{P_N\times\varphi_{N+1}}{1+\varphi_{N+1}^T\times P_N\times\varphi_{N+1}}$$

$$\hat{\theta}_{N+1}=\hat{\theta}_N+K_{N+1}\times\left(y_{N+1}-\varphi_{N+1}^T\times\hat{\theta}_N\right)$$

$$P_{N+1}=\left(E-K_{N+1}\times\varphi_{N+1}^T\right)\times P_N$$

公式符号说明：

①φ_{N+1}－单体电池在放电过程中的第N+1个观测值，数值为$\begin{bmatrix}1\\DOD(t_{N+1})\\DOD(t_{N+1})^2\\DOD(t_{N+1})^3\end{bmatrix}$，其中$t_{N+1}$是放电过程中的放电时间

②P_N－为4阶矩阵；

③$\hat{\theta}_N$－单体电池在放电过程中的第N个估计参数；

④E－为4阶单位矩阵，即$I=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$；

⑤K_{N+1}－为4×1向量。

6.按照权利要求1所述阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法，其特征在于：所述步骤5中，若蓄电池表面平均温度不是25℃，则蓄电池的实际容量应按下式换算：

$DOD_{25}^{*}=\frac{DOD^{*}}{K_T}$，式中，$DOD_{25}^{*}$为换算为标准温度25℃时的容量的数值，单位为A·h；DOD^{*}为实际情况下蓄电池已放电容量的预测值，单位为A·h；K_T为不同环境温度系数修正因子；使用下式计算VRLA蓄电池组中单体电池的健康状态SOH值：

$SOH=\frac{DOD_{25}^{*}}{C_N}\times 100\%$，其中，$C_N$为待测单体电池的额定容量。

阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法

技术领域

[0001] 本发明属于电池技术领域，涉及阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法。

背景技术

[0002] 健康状态——蓄电池在完全充电状态下，电池实际容量和额定容量的比值，用 SOH 表示，表征了电池性能的衰减程度；

[0003] 蓄电池在线监测技术——在蓄电池组不退出电源系统的正常运行条件下，使用在线监测装置对蓄电池性能参数进行测试，并采用一定的计算方法或者数学模型，对数据进行分析，得出蓄电池健康状态的一种方法。

[0004] 短时放电——利用蓄电池在线监测装置，不断开充电电源使蓄电池处于放电状态，时间为 0.5 小时，采样收集放电过程中的蓄电池电流、蓄电池已放电容量和各蓄电池电压等数据，用于监测蓄电池的健康状态。

[0005] 本发明主要针对应用于变电站直流系统中的阀控密封式铅酸蓄电池在维护过程中，由于蓄电池特殊的阀控密封结构，使得维护人员在短时放电过程中难以准确获取蓄电池的健康状态的问题，采用阀控密封式铅酸蓄电池健康状态在线监测方法使用蓄电池的短时放电数据在线预测电池的健康状态。

[0006] 现有使用放电过程数据预测蓄电池的健康状态方法主要使用核对性放电或者半容量核对性放电评估蓄电池的性能，该方法具有操作复杂、需要离线操作、时间过长、耗费大量的人力物力并且影响蓄电池的使用寿命的缺点；使用放电初期的 CDF 现象探索蓄电池的健康状态，由于影响 CDF 现象有许多因素，因此单一使用 CDF 现象预测蓄电池的健康状态的准确度不高。

[0007] 本方法的目的是公开阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法，该方法使用蓄电池的短时放电数据预测电池的健康状态，且具有小于等于 6％相对误差的准确度、可以进行在线预测，从而避免了对蓄电池进行长时间放电，因此不会影响蓄电池的循环寿命。

发明内容

[0008] 本发明的目的在于提供阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法，解决了目前铅酸蓄电池健康状态监测准确度差，且难于进行在线预测的问题。

[0009] 本发明所采用的技术方案是按照以下步骤进行：

[0010] 步骤 1：建立蓄电池端电压 V 与已放电容量 DOD 的函数模型如下：$V(DOD) = \alpha \times \exp[\beta * DOD] + \theta_0 + \theta_1 \times DOD + \theta_2 \times DOD^2 + \theta_3 \times DOD^3$；

[0011] 式中，V 为蓄电池的放电端电压，DOD 为蓄电池的已放电容量，α，β，θ_0，θ_1，θ_2，θ_3为函数的待定参数；

[0012] 步骤 2：对待估计电池的放电电压的数据预处理，处理过程如下：设要处理的数据使用 $u_1, u_2, \cdots, u_N$表示，预处理后的数据用 $u'_1, u'_2, \cdots, u'_N$表示，其中，N 表示处理的放电电压样本数，数据点表示待估计电池的放电电压；

[0013] (1)数据的前 2 个数据点使用下面公式处理：

[0014] $u'_1 = (3\times u_1+2\times u_2+1\times u_3+0\times u_4+(-1)\times u_5)/5$

[0015] $u'_2 = (4\times u_1+3\times u_2+2\times u_3+1\times u_4+0\times u_5)/10$

[0016] (2)数据的第 3 个点至第 N-2 个点，即 i = 3,…,N-2 时使用以下步骤进行处理，考虑运用点 $u_{i-2}, u_{i-1}, u_i, u_{i+1}, u_{i+2}$来估计点 u_i' 的值（i 表示待处理电池的第 i 个放电电压）：

[0017] ①求 5 点的平均值 $\bar{u} = \frac{1}{5}\sum_{t=-2}^{t=2} u_{i+t}$，t 表示子序列下标，取值为 -2、-1、0、1、2，取 0 值时表示当前的第 i 个放电电压值；取 1 值时表示当前的第 i 个放电电压值的下一条放电电压值；取 -1 值时表示当前的第 i 个放电电压值的前一条放电电压值；

[0018] ②求 5 点的绝对误差 $\Delta_{i+t} = u_{i+t} - \bar{u}(t=-2\sim 2)$；

[0019] ③求 5 点的平均绝对误差 $\bar{\Delta} = \frac{1}{5}\sum_{t=-2}^{t=2} |\Delta_{i+t}|$；

[0020] ④求 u_{i+t}的权值 w_{i+t}，u_{i+t}表示待估计电池的第 i+t 个放电电压值，$\bar{\Delta}$ 表示 5 点的平均绝对误差，

[0021] 如果条件 $|\Delta_{i+t}| > k_x * \bar{\Delta}$ 成立（k_x表示系数，本发明中取值为 3），则 $w_{i+t} = 0$；否则 $w_{i+t} = \frac{1}{|\Delta_{i+t}|}$；

[0022] ⑤求 u_i的值，u_i表示待估计电池的第 i 个放电电压值，如果 $\sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t} \geq w_0$（$w_0$ 表示阈值，本发明中取值为 1000），则

[0023] $u'_i = \mathrm{med}\{u_{i-2}, \cdots, u_{i+2}\}$；如果 $0 < \sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t} < w_0$，则 $u_i' = \frac{\sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t}\times u_{i+t}}{\sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t}}$；

[0024] (3)数据的最后 2 个数据点使用下面公式进行处理：

[0025] $u'_{N-1} = (0\times u_{N-4}+1\times u_{N-3}+2\times u_{N-2}+3\times u_{N-1}+4\times u_N)/10$

[0026] $u'_{N-2} = (-1\times u_{N-4}+0\times u_{N-3}+1\times u_{N-2}+2\times u_{N-1}+3\times u_N)/5$；

[0027] 步骤 3：对年检 10h 的放电电压数据先按照步骤 2 进行数据预处理后再对待测电池进行聚类；

[0028] 首先提取年检时 10h 放电前 3h 放电数据的聚类特征：电池放电前期 CDF 区域的谷底电压 u_d、放电初始电压 u_s、短时放电截止电压 u_c、短时放电电压差 u_{vd}、短时放电过程放电电压的平均值 u_{va}以及短时放电过程放电电压的中位值 u_{vm}，组成的数据 $F_i(u_d, u_s, u_c, u_{vd}, u_{va}, u_{vm})$ 表示电池组中第 i 个单体电池的数据点，使用 K-means 聚类算法对聚类特征进行计算；

[0029] 步骤 4：使用各聚类类别中的电池数据进行模型参数辨识；

[0030] 设电池数学模型中的指数部分为 $e(DOD) = \alpha \times \exp[\beta \times DOD]$，多项式部分为 $p(DOD) = \theta_0 + \theta_1 \times DOD + \theta_2 \times DOD^2 + \theta_3 \times DOD^3$，则电池数学模型可以写为 $u(DOD) = e(DOD) + p(DOD)$，设指数函数 $e(DOD)$ 中的参数为 $A = [\alpha \quad \beta]^T$，多项式函数 $p(DOD)$ 中的参数为 $\Theta = [\theta_0 \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^T$，采用基于递推最小二乘算法辨识模型参数；

[0031] 步骤 5：经过参数辨识得到模型参数，对模型 $f(DOD) = e(DOD) - p(DOD) - u_e = 0$ 通过二分法求解待测电池放电到规定的终止电压 $u_e = 1.8V$ 时电池的已放电容量 DOD^*；

[0032] 式中，$u_e = 1.8$ 为规定的蓄电池的放电终止电压，模型的解 DOD^* 即为蓄电池放电至规定放电终止电压 u_e 时放出的容量；

[0033] 进一步，在年检时，即处理的是蓄电池组进行 10h 全容量核对性放电或者 5h 半容量核对性放电数据时，放电电压数据经过步骤 2（数据预处理）后进入步骤 3（聚类算法）再进行步骤 4（参数辨识）；在月检或者季检时，即处理的 0.5h 的恒流短时放电数据时，放电电压数据经过步骤 2（数据预处理）直接进行步骤 4（参数辨识）。

[0034] 进一步，所述步骤 4 中基于递推最小二乘算法辨识模型参数方法为：

[0035] Step 1：设多项式参数 $\Theta_0 = 0$，即 $p(DOD) = 0$，指数参数 $A_0 = 0$；

[0036] Step2：重复 (1) 和 (2)，

[0037] (1) 电池数学模型变形为 $e_k(DOD) = u - p_{k-1}(DOD)$，根据指数部分参数辨识方法从上一次指数参数值 A_{k-1} 得到更新值 A_k；

[0038] (2) 电池数学模型变形为 $p_{k+1}(DOD) = u - e_k(DOD)$，根据多项式参数辨识方法从上一次多项式参数值 Θ_k 得到更新值 Θ_{k+1}；

[0039] 直到指数参数与多项式参数满足以下收敛条件：$\begin{cases} |A_n - A_{n-1}| \le \varepsilon_e \\ |\Theta_n - \Theta_{n-1}| \le \varepsilon_p \end{cases}$，其中，$\varepsilon_e = 1 \times 10^{-6}$，$\varepsilon_p = 1 \times 10^{-6}$，n 表示迭代的是第 n 次；

[0040] 进一步，所述指数部分参数估计方法：假设已知多项式函数为 $p_n(DOD)$，则电池数学模型可以改写为

[0041] $e(DOD) \equiv \alpha \times \exp[\beta \times DOD] = u(DOD) - p_n(DOD)$

[0042] $p_n(DOD)$ 是将电池模型函数迭代第 n 次后的多项式部分函数。

[0043] 上式两边取自然对数，得到

[0044] $\ln(u(DOD) - p_n(DOD)) = \ln\alpha + \beta \times DOD$

[0045] 设 $u'(DOD) = \ln[u(DOD) - p_n(DOD)]$，$\alpha' = \ln(\alpha)$，$\gamma = [\alpha' \quad \beta]^T$，

[0046] $\phi = [1 \quad DOD]^T$，上式变形为

[0047] $u'(DOD) = \gamma^T * \phi$

[0048] 参数 α'，β 可以由下面的递推更新算法得到：

[0049] $$\Phi_{N+1} = \frac{Q_N \times \phi_{N+1}}{1 + \phi_{N+1}^T \times Q_N \times \phi_{N+1}}$$

[0050] $$\hat{\gamma}_{N+1} = \hat{\gamma}_N + \Phi_{N+1} \times \left(y'_{N+1} - \phi_{N+1}^T \times \hat{\gamma}_N \right)$$

[0051] $$Q_{N+1} = \left(I - \Phi_{N+1} \times \phi_{N+1}^T \right) \times Q_N$$

[0052] 公式符号说明：

[0053] ① Φ_{N+1}- 单体电池在放电过程中的第 N+1 个观测值，数值为

[0054] $\begin{bmatrix} 1 \\ DOD(t_{N+1}) \end{bmatrix}$，其中 t_{N+1}是放电过程中的放电时间。

[0055] ② Q_N- 为 2 阶矩阵；

[0056] ③$\hat{\gamma}_N$ - 单体电池在放电过程中的第 N 个估计参数；

[0057] ④ I- 为 2 阶单位矩阵，即 $I=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$；

[0058] ⑤ Φ_{N+1}- 为 2×1 向量。

[0059] 最后计算出参数 α，β 的估计值为

[0060] $\hat{\alpha}=\exp(\hat{a}),\hat{\beta}=\hat{\beta}$

[0061] 进一步，多项式部分参数估计方法：

[0062] 将已辨识出的指数函数记为 $e_n(DOD)$，根据电池数学模型可以得到下列公式

[0063] $u(DOD)-e_n(DOD) = \theta_0+\theta_1\times DOD+\theta_2\times DOD^2+\theta_3\times DOD^3$

[0064] 上式中一旦时间确定了，蓄电池端电压和指数函数 $e_n(DOD)$ 也是已知的。记 $\Delta u(DOD) = u(DOD)-e_n(DOD)$，$\theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$，$\varphi=\begin{bmatrix} 1 & DOD & DOD^2 & DOD^3 \end{bmatrix}^T$，上式可以写为

[0065]

$$\Delta u(\mathrm{DOD})=\theta^T*\varphi$$

[0066] 参数 θ_0，θ_1，θ_2，θ_3可以由下面的递推更新算法得到：

[0067]

$$K_{N+1}=\frac{P_N\times\varphi_{N+1}}{1+\varphi_{N+1}^T\times P_N\times\varphi_{N+1}}$$

[0068]

$$\hat{\theta}_{N+1}=\hat{\theta}_N+K_{N+1}\times\left(y_{N+1}-\varphi_{N+1}^T\times\hat{\theta}_N\right)$$

[0069]

$$P_{N+1}=\left(E-K_{N+1}\times\varphi_{N+1}^T\right)\times P_N$$

[0070] 公式符号说明：

[0071] ①φ_{N+1} - 单体电池在放电过程中的第 N+1 个观测值，数值为

[0072] $\begin{bmatrix} 1 \\ DOD(t_{N+1}) \\ DOD(t_{N+1})^2 \\ DOD(t_{N+1})^3 \end{bmatrix}$，其中 t_{N+1}是放电过程中的放电时间。

[0073] ② P_N- 为 4 阶矩阵；

[0074] ③$\hat{\theta}_N$ - 单体电池在放电过程中的第 N 个估计参数；

[0075] ④ E- 为 4 阶单位矩阵，即$I=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$；

[0076] ⑤ K_{N+1}- 为 4×1 向量。

[0077] 进一步，所述步骤 5 中，若蓄电池表面平均温度不是 25℃，则蓄电池的实际容量应按下式换算：$DOD_{25}^{*}=\frac{DOD^{*}}{K_T}$，式中，$DOD_{25}^{*}$ 为换算为标准温度 25℃时的容量的数值，单位为 A·h；DOD^{*}为实际情况下蓄电池已放电容量的预测值，单位为 A·h；K_T为不同环境温度系数修正因子，温度系数查询表见表 2；使用下式计算 VRLA 蓄电池组中单体电池的健康状态 SOH 值：

[0078] $SOH=\frac{DOD_{25}^{*}}{C_N}\times 100\%$，其中，$C_N$为待测单体电池的额定容量。

[0079] 本发明的有益效果是铅酸蓄电池健康状态监测准确度高，且可以进行在线预测。

附图说明

[0080] 图 1 是本发明阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法步骤示意图；

[0081] 图 2 是本发明聚类算法步骤流程示意图；

[0082] 图 3 是本发明数据预处理效果图；

[0083] 图 4 是 2 号电池在放电过程中 SOH 估计值的跟踪曲线；

[0084] 图 5 是 2 号电池在放电过程中 SOH 估计值的相对误差的绝对值曲线；

[0085] 图 6 是运用 10h 数据估计 2 号电池—6 号电池的 SOH 值、各电池实际 SOH 值以及相对误差的绝对值结果图；

[0086] 图 7 是运用 0.5h 数据估计 2 号电池—6 号电池的 SOH 值、各电池实际 SOH 值以及相对误差的绝对值结果图。

具体实施方式

[0087] 下面结合具体实施方式对本发明进行详细说明。

[0088] 本发明阀控密封式铅酸蓄电池健康状态监测方法步骤如图 1 所示，按照以下步骤进行：

[0089] 步骤 1：电池数学模型：蓄电池内部反应非常复杂，各个参数之间是呈高度非线性的，而且在不同的工作环境下，这些参数又是不断变化的。所以，通过蓄电池内部反应关系式来建立蓄电池模型基本上是异常复杂不现实的。在蓄电池实际运用中，通常测量电池的外部特性参数，因此根据蓄电池放电端电压变化曲线，分析放电曲线的形状及变化特征，从而建立蓄电池端电压 V 与已放电容量 DOD 的函数模型如下：

[0090] $V(DOD) = \alpha \times \exp[\beta \times DOD] + \theta_0 + \theta_1 \times DOD + \theta_2 \times DOD^2 + \theta_3 \times DOD^3$

[0091] 式中，V 为蓄电池的放电端电压；

[0092] DOD 为蓄电池的已放电容量；

[0093] α，β，θ_0，θ_1，θ_2，θ_3为函数的待定参数。

[0094] 步骤 2：数据预处理；本发明进行数据预处理的数据是待估计电池的放电电压；数据预处理的目的：蓄电池外部参数在线监测设备在对放电过程中的蓄电池进行数据采集时，由于传感器精度、噪声等其他因素的影响，使采集到的数据存在失真，因此数据预处理以保证采集数据的质量。经过数据预处理得到平滑后的待测电池放电电压数据，用于后续的步骤 3 的聚类算法以及步骤 4 的参数辨识。

[0095] 本方法综合 5 点线性平滑方法、移动窗口中位数方法以及移动窗口数据加权平均方法来完成蓄电池的放电过程端电压数据的平滑处理。假设要处理的数据使用 $u_1, u_2, \cdots, u_N$ 表示，预处理后的数据用 $u'_1, u'_2, \cdots, u'_N$ 表示，N 表示处理的放电电压样本数；数据点表示待估计电池的放电电压；数据点的采集标准如下：

[0096] ★数据采集分辨率要求

[0097] ①蓄电池组放电电流 (I) 采集分辨率 0.01A；

[0098] ②蓄电池组已放电容量 (DOD) 采集分辨率 1mA·h；

[0099] ③单体电池放电电压 (V) 采集分辨率为 1mV；

[0100] ④单体电池表面温度 (T) 采集分辨率为 0.1℃。

[0101] ★数据采集频率要求

[0102] A、VRLA 蓄电池组在 0.5h 短时放电状态（放电时间为 0min——30min）采集频率要求如下：

[0103] ①蓄电池组放电电流的采集频率为 1smp/1min；

[0104] ②蓄电池组已放电容量采集频率为 1smp/1min；

[0105] ③单体电池电压采集频率为 1smp/1min；

[0106] ④单体电池表面温度的采集频率为 1smp/1min；

[0107] B、VRLA 蓄电池组经过在 0.5h 后（放电时间为 31min——放电终止时）采集频率要求如下：

[0108] ①蓄电池组放电电流的采集频率为 1smp/5min；

[0109] ②蓄电池组已放电容量采集频率为 1smp/5min；

[0110] ③单体电池电压采集频率为 1smp/5min；

[0111] ④单体电池表面温度的采集频率为 1smp/5min；

[0112] ★数据实时性要求

[0113] VRLA 蓄电池组在进行 10h 全容量核对性放电状态或者 0.5h 短时放电状态采集的每一条数据须在同一“时刻”，即要求每 1min 采集一条数据时，时间跨度不得超过 1min；要求每 5min 采集一条数据时，时间跨度不得超过 5min。

[0114] ★数据完整性要求

[0115] VRLA 蓄电池组在进行 10h 全容量核对性放电状态或者 0.5h 短时放电状态时采集的每一条数据要包含放电时间、已放电容量、放电电流、放电电压、电池表面温度，若某条记录中存在缺失数据时，采用该变量前一时刻采集的数值进行填补。

[0116] 数据预处理具体步骤如下：

[0117] (1)数据的前 2 个数据点使用下面公式处理：

[0118] $u'_1 = (3\times u_1+2\times u_2+1\times u_3+0\times u_4+(-1)\times u_5)/5$

[0119] $u'_2 = (4\times u_1+3\times u_2+2\times u_3+1\times u_4+0\times u_5)/10$

[0120] (2)数据的第 3 个点至第 N-2 个点，即 i = 3,…,N-2 时使用以下步骤进行处理，考虑运用点 $u_{i-2}, u_{i-1}, u_i, u_{i+1}, u_{i+2}$来估计点 u_i' 的值（i 表示待处理电池的第 i 个放电电压），

[0121] ①求 5 点的平均值

[0122] $$\bar{u} = \frac{1}{5}\sum_{t=-2}^{t=2} u_{i+t}$$

[0123] 平均值表示 $u_{i-2}, u_{i-1}, u_i, u_{i+1}, u_{i+2}$个电压值的算术平均值；t 表示子序列下标，取值为 -2-1012，取 0 值时表示当前的第 i 个放电电压值；取 1 值时表示当前的第 i 个放电电压值的下一条放电电压值；取 -1 值时表示当前的第 i 个放电电压值的前一条放电电压值。

[0124] ②求 5 点的绝对误差

[0125] $$\Delta_{i+t} = u_{i+t} - \bar{u}(t=-2\sim 2)$$

[0126] ③求 5 点的平均绝对误差

[0127] $$\bar{\Delta} = \frac{1}{5}\sum_{t=-2}^{t=2} |\Delta_{i+t}|$$

[0128] ④求 u_{i+t}的权值 w_{i+t}

[0129] u_{i+t}表示待估计电池的第 i+t 个放电电压值，$\bar{\Delta}$ 表示③中的 5 点的平均绝对误差。如果条件 $|\Delta_{i+t}| \geq k_x * \bar{\Delta}$（$k_x$表示系数，本发明中取值为 3）成立，则 $w_{i+t} = 0$；否则

[0130] $$w_{i+t} = \frac{1}{|\Delta_{i+t}|}$$

[0131] ⑤求 u_i的值

[0132] u^i表示待估计电池的第 i 个放电电压值。

[0133] 如果 $\sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t} \geq w_0$（$w_0$表示阈值，本发明中取值为 1000），则

[0134] $u'_i = \mathrm{med}\{u_{i-2}, \cdots, u_{i+2}\}$

[0135] 将所给的 5 点放电电压值（$u_{i-2}, u_{i-1}, u_i, u_{i+1}, u_{i+2}$）从小到大或从大到小排列，中间的电压值就是 u_i'。

[0136] 如果 $0 < \sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t} < w_0$，则

[0137] $$u_i' = \frac{\sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t}\times u_{i+t}}{\sum_{t=-2}^{t=2} w_{i+t}}$$

[0138] (3)数据的最后 2 个数据点使用下面公式进行处理：

[0139] $u'_{N-1}=(0\times u_{N-4}+1\times u_{N-3}+2\times u_{N-2}+3\times u_{N-1}+4\times u_N)/10$

[0140] $u'_{N-2}=(-1\times u_{N-4}+0\times u_{N-3}+1\times u_{N-2}+2\times u_{N-1}+3\times u_N)/5$。

[0141] 步骤 3：聚类算法如图 2 所示；聚类算法目的：对年检 10h 的放电电压数据按照步骤 2 进行数据预处理并进行聚类，即将待测电池组中的单体电池根据电池的健康性能进行聚成不同的类；聚类算法结果：待测电池组中单体电池的类别号；数据预处理与聚类算法的关系：待测电池的放电电压数据经过数据预处理后才进入聚类算法模块。聚类算法具体步骤如下：

[0142] 1. 提取年检时 10h 放电前 3h 放电数据的聚类特征：电池放电前期 CDF 区域的谷底电压 u_d、放电初始电压 u_s、短时放电截止电压 u_c、短时放电电压差 u_{vd}、短时放电过程放电电压的平均值 u_{va} 以及短时放电过程放电电压的中位值 u_{vm}。以上特征组成的数据 $F_i(u_d, u_s, u_c, u_{vd}, u_{va}, u_{vm})$ 表示电池组中第 i 个单体电池的数据点。

[0143] 一般情况下变电站使用的蓄电池组每年会进行一次 5h 恒电流放电测试（即半容量核对性放电）或者进行一次 10h 恒电流放电测试（即全容量核对性放电），本发明聚类算法使用半容量核对性放电或者是全容量核对性放电的前 3h 放电数据可以正确的根据单体电池的健康性能聚成不同的类；

[0144] 其中，聚类算法中的短时放电过程指的是：半容量核对性放电或者全容量核对性放电的前 3h 放电过程。

[0145] 聚类特征说明：

[0146] ①放电前期 CDF 区域谷底电压 (u_d)：CDF 区域的谷底电压指的是充足电的蓄电池在开始放电的几十秒到十几分钟的时间内，出现电池电压很快下降到某个数值，这个数值称为谷底电压。

[0147] ②放电初始电压 (u_s)：短时放电过程的第一个电压值；

[0148] ③短时放电结束电压 (u_c)：短时放电过程最后电压值；

[0149] ④短时放电电压差 (u_{vd})：即放电初始电压 - 短时放电结束电压；

[0150] ⑤短时放电过程放电电压的平均值 (u_{va})：即短时放电过程中电池放电电压算术平均值；

[0151] ⑥短时放电过程放电电压的中位值 (u_{vm})。

[0152] 2. 本发明使用 K-means 聚类算法。K-means 聚类算法步骤如下：

[0153] Step 1：根据蓄电池组的投运时间确定电池组的聚类数目 k，随机选取 k 各中心点；

[0154] 聚类数目 k 是由蓄电池组投运时间 T_{com} 确定的，投运时间 T_{com} 指的是从蓄电池组正式投入现场使用开始计时到电池组监测的时间，投运时间 T_{com} 在蓄电池组进行 10h 全容量核对性放电或者 5h 半容量核对性放电时进行记录的。投运时间 T_{com} 与聚类数目 k 的关系如下表所示：

[0155] 投运时间与聚类算法聚类个数关系如表 1 所示。

[0156] 表 1

[0157]

投运时间（年）	聚类个数
≤2 年	1
>2 以及≤6 年	2
>6 年	3

[0158] Step 2: 遍历所有数据，将每个数据划分到最近的中心点中；

[0159] 所有数据指的是数据点 $F_i(i=1,2,\cdots,n)$，n 是电池组中单体电池的节数；最近是指，数据点 F_i 划分到 F_i 与各类中心点的欧式距离最小的那一类中。

[0160] Step 3: 计算每个聚类的平均值，并作为新的中心点；这里中心点指的是类的质心。

[0161] Step 4: 重复 Step 2—Step 3，直到这 k 个中线点不再变化（收敛了），或执行了足够多的迭代。

[0162] 步骤 4：参数辨识，对数学模型中的 $[\alpha,\beta]$ 和 $[\theta_0,\theta_1,\theta_2,\theta_3]$ 进行参数辨识，然后通过使用二分法与 SOH 的定义计算电池的健康状态（SOH 值）；

[0163] 在年检时，即处理的是蓄电池组进行 10h 全容量核对性放电或者 5h 半容量核对性放电数据时，放电电压数据经过步骤 2（数据预处理）后进入步骤 3（聚类算法）在进行步骤 4（参数辨识）；

[0164] 在月检或者季检，即处理的 0.5h 的恒流短时放电数据时，放电电压数据经过步骤 2（数据预处理）直接进行步骤 4（参数辨识）。

[0165] 模型参数估计总体思路：

[0166] 设电池数学模型中的指数部分为 $e(DOD)=\alpha\times\exp[\beta\times DOD]$，多项式部分为 $p(DOD)=\theta_0+\theta_1\times DOD+\theta_2\times DOD^2+\theta_3\times DOD^3$，则电池数学模型可以写为 $u(DOD)=e(DOD)+p(DOD)$，设指数函数 e(DOD) 中的参数为

[0167] $A=[\alpha\ \ \beta]^T$，多项式函数 p(DOD) 中的参数为 $\Theta=[\theta_0\ \ \theta_1\ \ \theta_2\ \ \theta_3]^T$。基于递推最小二乘算法辨识模型参数的基本步骤是：

[0168] Step 1: 设多项式参数 $\Theta_0=0$，即 $p(DOD)=0$，指数参数 $A_0=0$；

[0169] Step2: 重复 (1) 和 (2)，

[0170] (1) 电池数学模型变形为 $e_k(DOD)=u-p_{k-1}(DOD)$，根据指数部分参数辨识方法从上一次指数参数值 A_{k-1} 得到更新值 A_k；

[0171] (2) 电池数学模型变形为 $p_{k+1}(DOD)=u-e_k(DOD)$，根据多项式参数辨识方法从上一次多项式参数值 Θ_k 得到更新值 Θ_{k+1}；

[0172] 直到指数参数与多项式参数满足以下收敛条件：$\begin{vmatrix}A_n-A_{n-1}\end{vmatrix}\le\varepsilon_e$ $\begin{vmatrix}\Theta_n-\Theta_{n-1}\end{vmatrix}\le\varepsilon_p$，其中，$\varepsilon_e=1\times10^{-6}$，$\varepsilon_p=1\times10^{-6}$，n 表示迭代的是第 n 次；

[0173] A、指数部分参数估计，假设已知多项式函数为 $p_n(DOD)$，则电池数学模型可以改写为

[0174] $e(DOD)\equiv\alpha\times\exp[\beta\times DOD]=u(DOD)-p_n(DOD)$，

[0175] $p_n(DOD)$ 电池模型函数迭代第 n 次后已知的多项式部分函数。

[0176] 上式两边取自然对数，得到

[0177] $\ln(u(DOD)-p_n(DOD)) = \ln\alpha+\beta\times DOD$

[0178] 设 $u'(DOD) = \ln[u(DOD)-p_n(DOD)]$，$\alpha' = \ln(\alpha)$，$\gamma = [\alpha' \ \beta]^T$，

[0179] $\phi = [1 \ DOD]^T$，上式变形为

[0180] $u'(DOD) = \gamma^T * \phi$

[0181] 参数 α'，β 可以由下面的递推更新算法得到：

[0182] $$\Phi_{N+1}=\frac{Q_N\times\phi_{N+1}}{1+\phi_{N+1}^T\times Q_N\times\phi_{N+1}}$$

[0183] $$\hat{\gamma}_{N+1}=\hat{\gamma}_N+\Phi_{N+1}\times\left(y_{N+1}-\phi_{N+1}^T\times\hat{\gamma}_N\right)$$

[0184] $$Q_{N+1}=\left(I-\Phi_{N+1}\times\phi_{N+1}^T\right)\times Q_N$$

[0185] 公式符号说明：

[0186] ① Φ_{N+1}- 单体电池在放电过程中的第 N+1 个观测值，数值为

[0187] $\begin{bmatrix}1\\ DOD(t_{N+1})\end{bmatrix}$，其中 t_{N+1}是放电过程中的放电时间。

[0188] ② Q_N- 为 2 阶矩阵；

[0189] ③$\hat{\gamma}_N$ - 单体电池在放电过程中的第 N 个估计参数；

[0190] ④ I- 为 2 阶单位矩阵，即 $I=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}$；

[0191] ⑤ Φ_{N+1}- 为 2×1 向量。

[0192] 最后计算出参数 α，β 的估计值为

[0193] $$\hat{\alpha}=\exp(\hat{\alpha}'),\hat{\beta}=\hat{\beta}$$

[0194] B、多项式部分参数估计

[0195] 将 A 部分已辨识出的指数函数记为 $e_n(DOD)$，根据电池数学模型可以得到下列公式

[0196] $u(DOD)-e_n(DOD) = \theta_0+\theta_1\times DOD+\theta_2\times DOD^2+\theta_3\times DOD^3$

[0197] 在上式中一旦时间确定了，蓄电池端电压和指数函数 $e_n(DOD)$ 也是已知的。记 $\Delta u(DOD) = u(DOD)-e_n(DOD)$，$\theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$，

[0198] $\varphi=\begin{bmatrix}1 & DOD & DOD^2 & DOD^3\end{bmatrix}^T$，上式可以写为

[0199]

$$\Delta u(DOD)=\theta^T*\varphi$$

[0200] 参数 θ_0，θ_1，θ_2，θ_3可以由下面的递推更新算法得到：

[0201]

$$K_{N+1}=\frac{P_N\times\varphi_{N+1}}{1+\varphi_{N+1}^T\times P_N\times\varphi_{N+1}}$$

[0202]

$$\hat{\theta}_{N+1}=\hat{\theta}_N+K_{N+1}\times\left(y_{N+1}-\varphi_{N+1}^T\times\hat{\theta}_N\right)$$

[0203]

$$P_{N+1}=\left(E-K_{N+1}\times\varphi_{N+1}^T\right)\times P_N$$

[0204] 公式符号说明：

[0205] ①φ_{N+1} -单体电池在放电过程中的第 N+1 个观测值，数值为

[0206] $\begin{bmatrix}1\\DOD(t_{N+1})\\DOD(t_{N+1})^2\\DOD(t_{N+1})^3\end{bmatrix}$，其中 t_{N+1}是放电过程中的放电时间。

[0207] ②P_N-为 4 阶矩阵；

[0208] ③$\hat{\theta}_N$ -单体电池在放电过程中的第 N 个估计参数；

[0209] ④E-为 4 阶单位矩阵，即 $I=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$；

[0210] ⑤K_{N+1}-为 4×1 向量。

[0211] 步骤 5：模型求解：

[0212] 经过步骤 4（参数辨识）部分，电池数学模型中的参数估计出来后通过步骤 5（模型求解）中的二分法求解待测电池预计放电到规定的终止电压 u_e= 1.8V 时电池的已放电容量 DOD^*；

[0213] 改写电池数学模型，可以得到有下面的函数

[0214] f(DOD) = e(DOD)-p(DOD)-u_e= 0

[0215] 式中，u_e= 1.8，为蓄电池全容量核对性放电时规定的放电终止电压。运用二分法求解函数 f(DOD) 的根，解 DOD^*即为蓄电池放电至规定放电终止电压 u_e时可以放出的容量。

[0216] 步骤 6：SOH 预测；

[0217] ◆待测蓄电池组放电测试时，若蓄电池表面平均温度不是 25℃，则蓄电池的实际容量应按下式换算：

[0218] $$DOD_{25}^*=\frac{DOD^*}{K_T}$$

[0219] 式中，DOD_{25}^*——换算为标准温度 25℃时的容量的数值，单位为 A·h；

[0220] DOD^*——实际情况下蓄电池已放电容量的预测值，单位为 A·h；

[0221] K_T——不同环境温度系数修正因子，温度系数查询表见表 2。

[0222] ◆使用下式计算 VRLA 蓄电池组中单体电池的健康状态 SOH 值：

[0223] $$SOH = \frac{DOD_{25}^{*}}{C_N} \times 100\%$$

[0224] 其中，C_N——为待测单体电池的额定容量。

[0225] 表 2

[0226]

初始温度（℃）	温度修正因子（K_T）	初始温度（℃）	温度修正因子（K_T）
4.4	0.670	26.1	1.007
7.2	0.735	26.7	1.011
10.0	0.790	27.2	1.017
12.8	0.840	27.8	1.023
15.6	0.882	28.3	1.030
18.3	0.920	28.9	1.035
18.9	0.927	29.4	1.040
19.4	0.935	30.0	1.045
20.0	0.942	30.6	1.050
20.6	0.948	31.1	1.055
21.1	0.955	31.6	1.060
21.7	0.960	32.2	1.065
22.2	0.970	35.0	1.090
22.8	0.975	37.8	1.112
23.4	0.980	40.6	1.140
23.9	0.985	43.3	1.162
24.5	0.990	46.1	1.210
25.0	1.000	——	——
25.6	1.002	——	——

[0227]

[0228] 本发明数据预处理效果图如图 3 所示。图 4 是 2 号电池在放电过程中 SOH 估计值的跟踪曲线。图 5 是 2 号电池在放电过程中 SOH 估计值的相对误差的绝对值曲线。图 6 是运用 10h 数据估计 2 号电池—6 号电池的 SOH 值、各电池实际 SOH 值以及相对误差的绝对值结果图。图 7 是运用 0.5h 数据估计 2 号电池—6 号电池的 SOH 值、各电池实际 SOH 值以及相对误差的绝对值结果图。表 3 是使用 1 号电池 -6 号电池做了 3 次放电实验，运用 0.5h 数据估计的 SOH 值以及相对误差绝对值的运行结果。

[0229] 表 3

[0230]

	实验 1		实验 2		实验 3	
	SOH 估计值	估计误差	SOH 估计值	估计误差	SOH 估计值	估计误差
1#	120.48%	3.79%	119.97%	3.54%	118.49%	2.08%
2#	123.34%	2.7%	123%	2.98%	121.08%	4.5%
3#	123.28%	3.91%	123.06%	4.08%	120.98%	5.7%
4#	123.47%	2.61%	122.83%	3.12%	120.97%	4.59%
5#	123.14%	1.1%	123.21%	1.05%	121.53%	2.4%
6#	123.69%	3.49%	122.88%	4.11%	121.31%	5.34%

[0231] 综上实验结果可见，本发明方法有效克服了以往以全容量核对性放电数据或者半容量核对性放电数据，放电时间长、成本高的方法以及单一使用 CDF 现象预测蓄电池的健康状态的准确度不高的缺点，本发明方法仅使用蓄电池的 0.5h 放电数据估计电池的健康状态，具有 6％以内的准确度，可以进行在线预测以便对电池性能实时监测，从而避免了对蓄电池进行长时间放电，不会影响蓄电池的循环寿命。

[0232] 以上所述仅是对本发明的较佳实施方式而已，并非对本发明作任何形式上的限制，凡是依据本发明的技术实质对以上实施方式所做的任何简单修改，等同变化与修饰，均属于本发明技术方案的范围内。

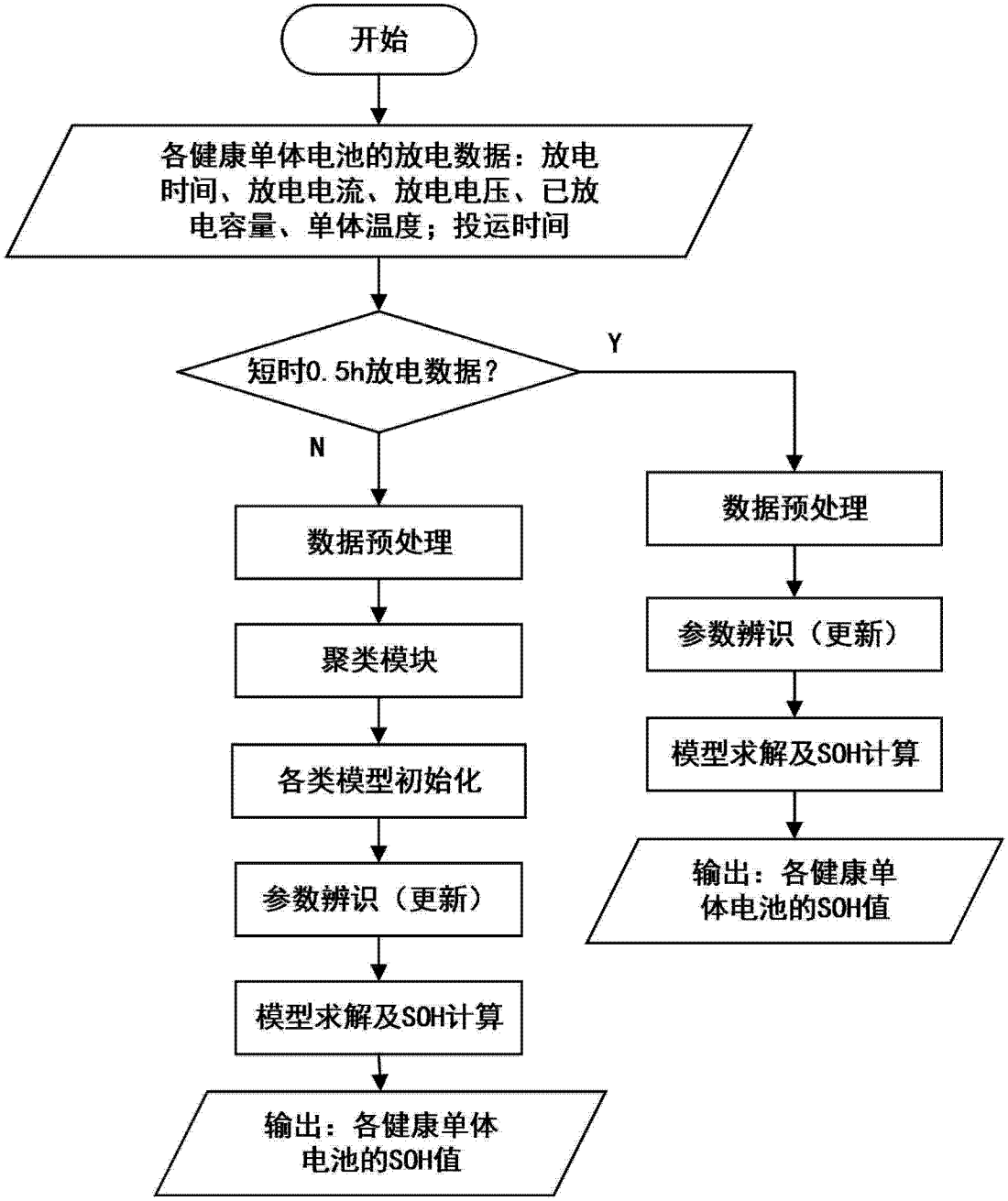

开始
各健康单体电池的放电数据：放电时间、放电电流、放电电压、已放电容量、单体温度；投运时间
短时0.5h放电数据？
Y
N
数据预处理
聚类模块
各类模型初始化
参数辨识（更新）
模型求解及SOH计算
输出：各健康单体电池的SOH值
数据预处理
参数辨识（更新）
模型求解及SOH计算
输出：各健康单体电池的SOH值

图 1

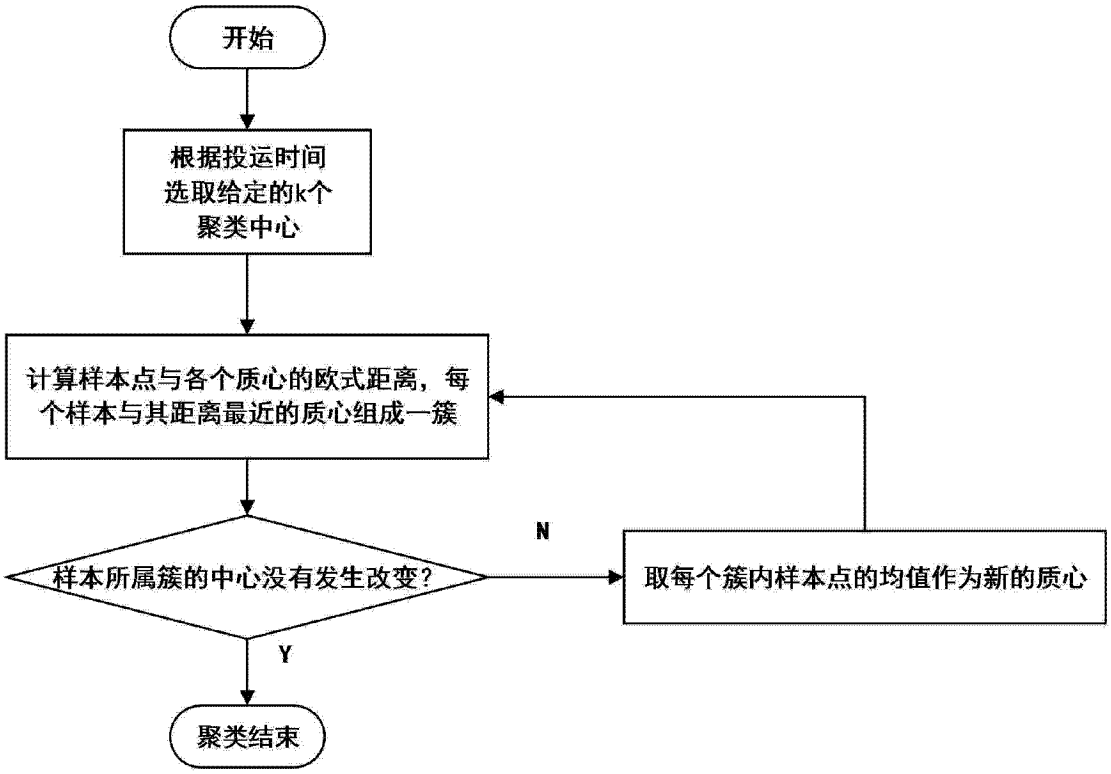

开始
根据投运时间
选取给定的k个
聚类中心
计算样本点与各个质心的欧式距离，每
个样本与其距离最近的质心组成一簇
样本所属簇的中心没有发生改变？
N
取每个簇内样本点的均值作为新的质心
Y
聚类结束

图 2

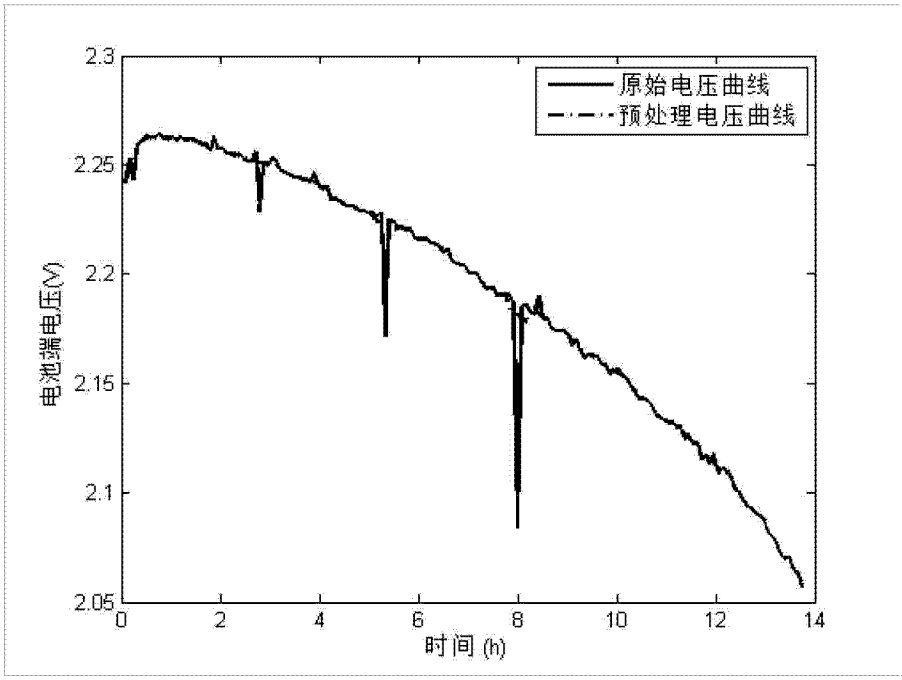

原始电压曲线
预处理电压曲线
电池端电压(V)
时间 (h)
2.3
2.25
2.2
2.15
2.1
2.05
0
2
4
6
8
10
12
14

图 3

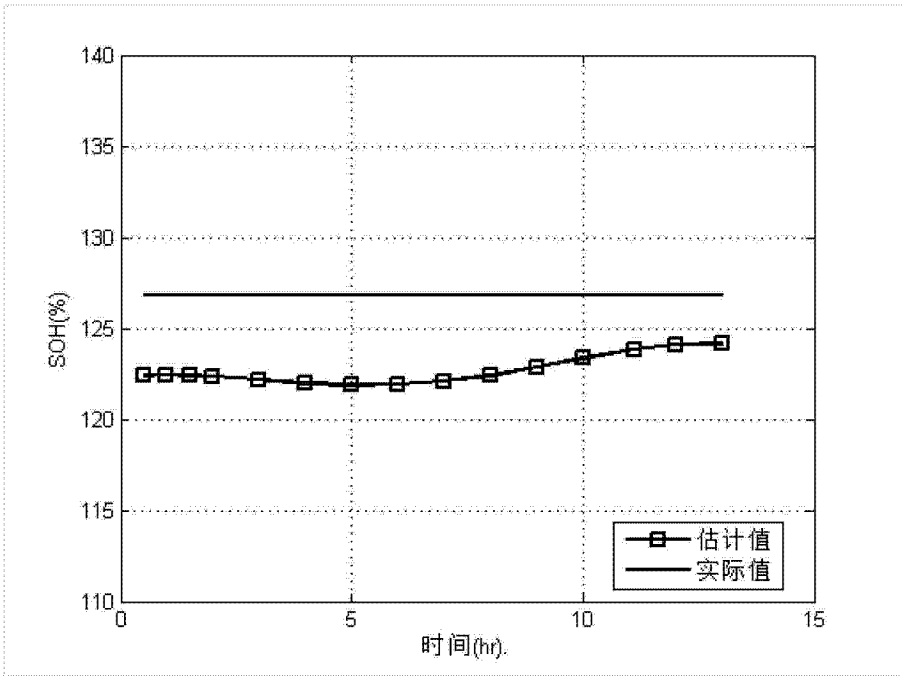

140
135
130
125
120
115
110
SOH(%)
0
5
10
15
时间(hr).
估计值
实际值

图 4

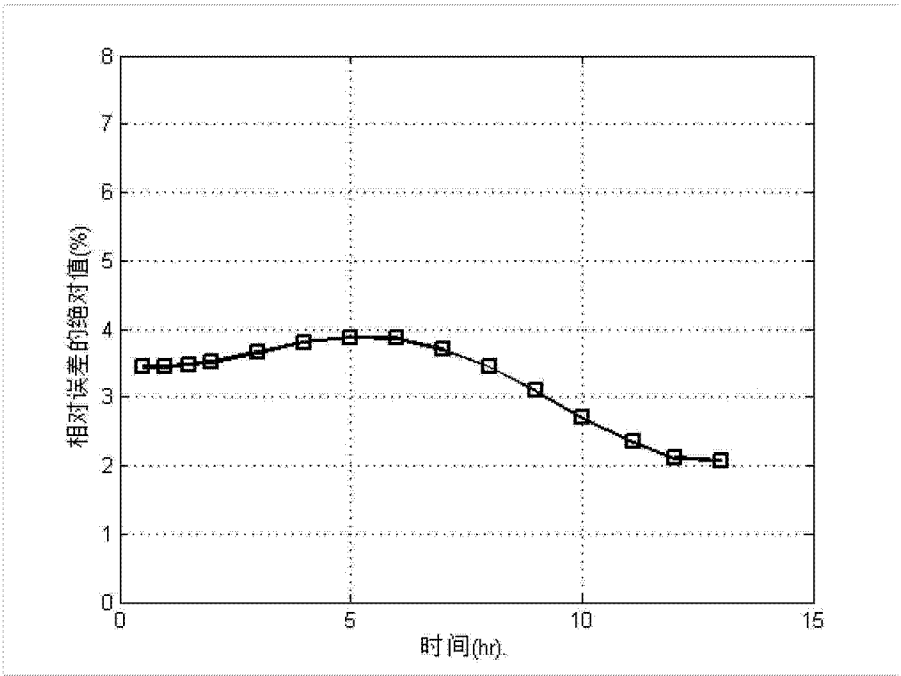

8
7
6
5
4
3
2
1
0
相对误差的绝对值(%)
0
5
10
15
时间(hr).

图 5

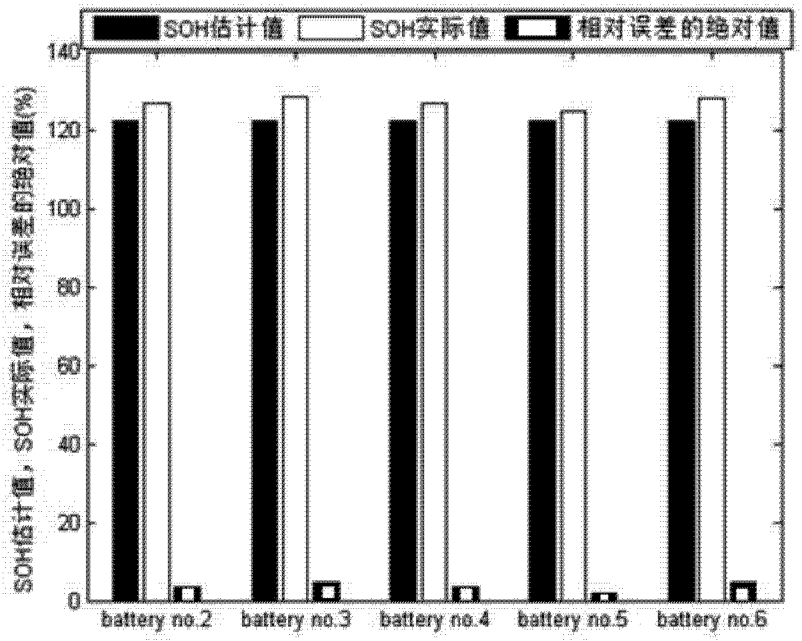

SOH估计值
SOH实际值
相对误差的绝对值
SOH估计值，SOH实际值，相对误差的绝对值(%)
0
20
40
60
80
100
120
140
battery no.2
battery no.3
battery no.4
battery no.5
battery no.6

图 6

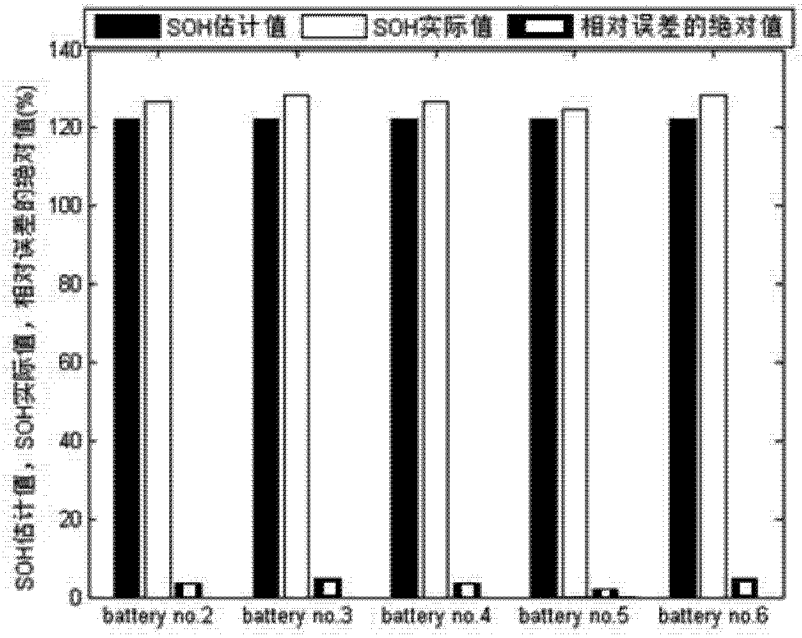

SOH估计值
SOH实际值
相对误差的绝对值
SOH估计值，SOH实际值，相对误差的绝对值(%)
0
20
40
60
80
100
120
140
battery no.2
battery no.3
battery no.4
battery no.5
battery no.6

图 7