

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 8 月 4 日 (04.08.2022)



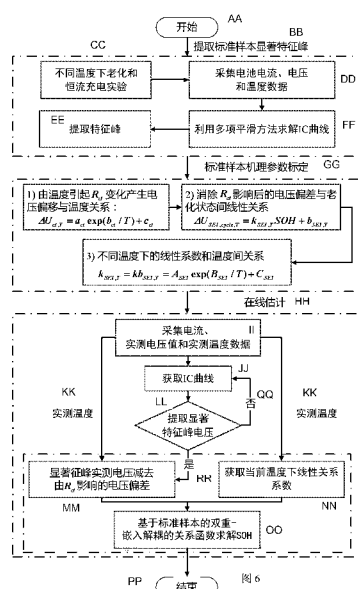
(10) 国际公布号
WO 2022/160147 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01R 31/392 (2019.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2021/074051
- (22) 国际申请日: 2021 年 1 月 28 日 (28.01.2021)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202110105834.9 2021年1月26日 (26.01.2021) CN
- (71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。
- (72) 发明人: 王丽梅 (WANG, Limei); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

乔思秉 (QIAO, Sibing); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 赵秀亮 (ZHAO, Xiuliang); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 陆东 (LU, Dong); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 汪若尘 (WANG, Ruochen); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 徐莹 (XU, Ying); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 张迎 (ZHANG, Ying); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 盘朝奉 (PAN, Chaofeng); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 何志刚 (HE, Zhigang); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 蔡英凤 (CAI, Yingfeng); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(54) Title: BATTERY STATE OF HEALTH ESTIMATION METHOD BASED ON STANDARD SAMPLE AND DUAL-EMBEDDED DECOUPLING

(54) 发明名称: 基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法



- 1) A relationship between a voltage offset, which is generated by the change in R_{ct} caused by temperature, and the temperature;
 - 2) A linear relationship between the voltage offset, from which the influence of R_{ct} is eliminated, and an aging state;
 - 3) A relationship between a linear coefficient under different temperatures and the temperature
- AA Start
BB Extract a salient characteristic peak of a standard sample
CC Constant-current charging experiments under different temperatures and different aging states
DD Collect current, voltage and temperature data of batteries
EE Extract a characteristic peak
FF Solve an IC curve by using a polynomial smoothing method
GG Calibrate a mechanism parameter of the standard sample
HH Online estimation
II Collect current, actually measured voltage value and actually measured temperature data
JJ Acquire the IC curve
KK Actually measured temperature
LL Extract a salient characteristic peak voltage
MM Subtract from an actually measured salient characteristic peak voltage, the voltage offset influenced by R_{ct}
NN Acquire a linear relationship coefficient at the current temperature
OO Solve an SOH according to a relationship function of the standard sample based on dual-embedded decoupling
PP End
QQ No
RR Yes

(57) Abstract: Disclosed is a battery state of health estimation method based on a standard sample and dual-embedded decoupling. The method comprises the steps of extracting a salient characteristic peak of a standard sample, calibrating a mechanism parameter of the standard sample, performing online evaluation on the SOH of a battery to be tested, etc. The present invention has the following beneficial effects: according to the present invention, a dual-coupling relationship of the influences of temperature and aging on a characteristic peak voltage of an IC curve is elaborated on from the perspective of impedance characteristic mechanism analysis, and

(CN)。陈龙(CHEN, Long); 中国江苏省镇江市京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 南京智造力知识产权代理有限公司(NANJING DOYES INTELLECTUAL PROPERTY CO., LTD.); 中国江苏省南京市江宁区芝兰路18号4幢1202室, Jiangsu 211100 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

it is proposed that a voltage offset caused by a charge transfer resistor which is most sensitive to temperature is eliminated on the basis of "a standard sample", thereby realizing first-layer decoupling; further, when it is set that an SEI film resistor influenced by aging and temperature coupling accords with an aging linear relationship as a whole, a linear relationship coefficient is only related to the temperature, so as to realize embedded decoupling; and by means of the present invention, the high-efficiency characteristic of estimating a battery SOH on the basis of an IC curve characteristic is inherited, and from the perspective of mechanism analysis, the problem of a low accuracy of solving, in a wide temperature range, a battery SOH on the basis of an IC curve is solved.

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法, 包括提取标准样本显著特征峰, 标准样本机理参数标定, 待测电池SOH在线估计等步骤。有益效果: 本发明从阻抗特征机理分析角度阐述了温度和老化对于IC曲线特征峰电压影响双重耦合关系, 提出了基于"标准样本"消除对温度最为敏感的电荷转移电阻引起电压偏移, 实现首层解耦, 进一步, 设定受老化和温度耦合影响的SEI膜电阻整体符合老化线性关系下, 该线性关系系数只与温度相关的方式实现嵌入解耦; 本发明不仅承袭了基于IC曲线特征估计电池SOH高效率的特征, 并从机理分析角度解决了以往IC曲线求解电池SOH在宽温度范围内的精度不高的问题。

基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法

技术领域

本发明涉及一种电池性能的估计方法，特别涉及一种基于“标准样本”及“双重-嵌入解耦”的宽温度范围下电池健康状态的估计方法，属于动力电池技术领域。

背景技术

近年来电动汽车发展迅猛，作为电动汽车主要动力源的动力电池越来越受到人们关注。其中，锂离子电池以其较高的比能量和比功率被普遍应用于电动汽车中。然而，随着循环次数增加，电池电极活性材料会逐渐消耗，最终导致电池老化及健康状态(State of Health, SOH)降低。随着电池不断老化，内阻升高与容量降低会造成电池性能下降，电动汽车故障发生率也会随之增加。因此，准确估计电池 SOH 能够保证电池使用安全性，提高电动汽车使用性能。

电池 SOH 估计方法大体上可以分为两大类：基于模型驱动的方法和基于数据驱动的方法。基于模型驱动的方法都需要首先建立电池模型，得到模型数学表达式，然后通过一些智能算法求解模型参数。该方法普遍存在计算复杂，实用性低的问题，而基于数据驱动的电池老化研究不需要建立电池模型，可以有效克服这些不足。常用的数据驱动方法主要有人工神经网络，支持向量机，高斯回归等。这些方法都比较类似，只需要给定样本电池使用过程的数据（如充放电电流、电压和温度等）及对应的老化状态数据，便可达到预测电池 SOH 的目的。但是一方面这些方法容易陷入过拟合状况，另一方面在输入数据预处理环节需要耗费大量时间。

近年来，研究者倾向于基于容量增量法(Incremental Capacity Analysis, ICA)的电池健康状态估计。电池 IC 曲线，即电池容量-电压曲线的微分曲线，将充放电过程中内部反应剧烈的电压平台转化为多个峰，通过对曲线特征的分析，可推导得到老化衰退的模式和机理，进而判断电池健康状态。实际使用过程中动力电池工况较为复杂，长时间的充放电状态会释放出大量热量，积聚的热量难以快速散发到外界，最终造成电池温度远高于外界温度，但以往的研究大部分都是基于某一特定温度下进行，而温度会直接影响到电池内部化学反应。不同温度下电池许多基本性能参数如容量和内阻等都会发生变化，IC 曲线也会发生不同程度偏移，最终导致 IC 曲线求 SOH 在不同温度下准确度相差较大。

发明内容

发明目的：针对现有技术中存在的问题，本发明提供了一种基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法。本发明通过研究温度及老化对 IC 曲线特征影响机制，实现温度及老化对 IC 曲线特征影响的解耦，拓宽 IC 曲线求解电池 SOH 的温度范围，最终基于“标准

电池”及“双重-嵌入解耦”实现宽温度范围下电池 SOH 的估计。

技术方案：一种基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法，包括以下步骤：

步骤一、提取标准样本显著特征峰，选取同一类型不同老化状态的电池在同一温度下进行恒流充电实验，再选择上述任意一块电池在不同温度下进行恒流充电实验，分别采集各组实验中电池的电流、电压和温度数据，根据上述数据分别绘制不同老化状态电池的 IC 曲线图和不同温度下所测电池的 IC 曲线图，结合上述两张 IC 曲线图选定样本显著特征峰；

步骤二、标准样本机理参数标定，基于双重-嵌入解耦得到标准样本关系函数：

关系函数一，电池未老化时，由温度引起电荷转移电阻 R_{ct} 变化产生电压偏差 $\Delta U_{ct,T}$ 与温度的关系函数；

关系函数二，同一温度下，消除电荷转移电阻 R_{ct} 影响后由 SEI 膜电阻影响引起的电压偏差 $\Delta U_{SEI,cycle,T}$ 与老化状态的线性关系函数；

关系函数三，不同温度下的线性关系系数和温度间的关系函数；

步骤三、待测电池 SOH 在线估计，对待测电池进行恒流充电实验，同时采集电流、电压和实测温度 T_{peak} 数据，绘制待测电池的 IC 曲线，提取与样本显著特征峰对应的显著特征峰的实测电压值 U_{peak} ，根据步骤二中基于标准样本的双重-嵌入解耦的关系函数求解 SOH。

进一步，所述显著特征峰是相对变化明显且位于电压中值点附近的特征峰。

进一步，所述步骤二中的关系函数一，电池未老化时，由温度引起 R_{ct} 变化产生的电压偏差为 SOH 为 100% 的标准样本电池由温度引起的在显著特征峰处电压偏差值 $\Delta U_{ct,T}$ ； $\Delta U_{ct,T}$ 与电池工作的实际温度 T 的关系用 Arrhenius 函数描述为：

$$\Delta U_{ct,T} = a_{ct} \exp(b_{ct} / T) + c_{ct}$$

式中 a_{ct} ， b_{ct} ， c_{ct} 为与电荷转移电阻 R_{ct} 有关的温度拟合参数。

进一步，所述 SOH 为 100% 的标准样本电池为至少三块满足出厂要求的 SOH 为 100% 电池平均后的虚拟电池，且通过决定系统 R^2 定量评估拟合结果，具体评估公式为：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V_i^{\%})^2}{\sum_{i=1}^N (V_i - \hat{V}_{mean})^2}, \hat{V}_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i$$

其中， V_i 代表电压测量值， $V_i^{\%}$ 代表电压拟合值， $\hat{V}_{mean}$ 代表测量电压平均值， N 代表数据量， R^2 越接近 1，表明拟合度越优。

进一步, 所述步骤二中关系函数二, 同一温度下, 消除电荷转移电阻 R_{ct} 影响后由 SEI 膜电阻影响引起的电压偏差 $\Delta U_{SEI, cycle, T}$ 与老化状态的线性关系函数可以描述为:

$$\Delta U_{SEI, cycle, T} = k_{SEI, T} SOH + b_{SEI, T}$$

式中 $k_{SEI, T}$, $b_{SEI, T}$ 为与 SEI 膜电阻有关的线性拟合参数。

进一步, 获得所述消除 R_{ct} 影响后的电压偏差与老化状态的线性关系函数的方法为通过选取至少三块 SOH 为 100%-80% 之间的已知 SOH 值的单体电池样本, 再根据所选取的单体电池样本拟合出电压偏差 $\Delta U_{SEI, cycle, T}$ 与老化状态 SOH 线性函数关系; 得出线性拟合参数 $k_{SEI, T}$ 与 $b_{SEI, T}$ 的关系; 所述 $k_{SEI, T} = -0.01 b_{SEI, T}$, 则 $\Delta U_{SEI, cycle, T} = -0.01 b_{SEI, T} SOH + b_{SEI, T}$ 。

进一步, 所述步骤二中关系函数三, 不同温度下的线性关系系数和电池工作的实际温度 T 间的关系函数可以描述为:

$$k_{SEI, T} = kb_{SEI, T} = A_{SEI} \exp(B_{SEI} / T) + C_{SEI}$$

式中 A_{SEI} , B_{SEI} , C_{SEI} 为与 SEI 膜电阻有关的温度拟合参数。

进一步, 所述步骤三中 SOH 的求解方法为:

首先、以实测温度 T_{peak} 作为输入并且根据步骤二中 $\Delta U_{ct, T}$ 与温度的关系得到 $\Delta U_{ct, T}$;

其次、根据 $\Delta U_{SEI, cycle, T} = U_{peak} - \Delta U_{ct, T}$, 以实测电压值 U_{peak} 作为输入得到 $\Delta U_{SEI, cycle, T}$,

然后、根据步骤二中不同温度下的线性关系系数和温度间的关系以实测温度 T_{peak} 作为输入获得当前温度下线性关系系数,

最后、根据 $\Delta U_{SEI, cycle, T}$ 与老化状态的线性关系函数以 $\Delta U_{SEI, cycle, T}$ 和当前温度下线性关系系数获得所测电池的 SOH 估计结果。

有益效果: 本发明从阻抗特征机理分析角度阐述了温度和老化对于 IC 曲线特征峰电压影响双重耦合关系, 提出了基于“标准样本”消除对温度最为敏感的 R_{ct} 内阻引起电压偏移, 实现首层解耦; 进一步, 针对受老化和温度耦合影响 $\Delta R_{SEI, cycle, T}$ 内阻引起电压偏差, 设定整体符合老化线性关系的情况下, 该线性关系系数 $k_{SEI, T}$ 只与温度相关的方式实现嵌入解耦, 最终基于首层解耦与嵌入解耦相结合的双重解耦实现了宽温度范围下基于 IC 曲线特征的电池 SOH 估计; 本发明不仅承袭了基于 IC 曲线特征估计电池 SOH 高效率的特征, 并克服了数据驱动型方法机理不明确的缺陷, 从机理分析角度解决了以往 IC 曲线求解电池 SOH 在宽温度范围内的精度不高的问题。

附图说明

图 1 为本发明不同老化状态电池 IC 曲线图;

图 2 为本发明不同温度下某电池 IC 曲线图;

图 3 为本发明标准电池第二特征峰电压与温度关系图；

图 4 为本发明不同温度下老化状态与电压偏移关系图；

图 5 为本发明老化线性关系系数与温度关系图；

图 6 为本发明的估计方法的流程图。

具体实施方式

下面结合附图以及具体实施例对本发明作进一步的说明，但本发明的保护范围并不限于此。

本发明提出了一种基于“标准样本”及“双重-嵌入解耦”的宽温度范围下电池健康状态估计方法，主要包括：阻抗特征分析，温度与老化双重-嵌入解耦，IC 曲线求解及特征分析，基于“标准样本”的电池 SOH 在线估计。

上述阻抗特性分析中电池阻抗主要包含电解质、隔膜、电极的体电阻 (R_{bulk})，电极与电解质间的 SEI (solid electrolyte interface film) 膜电阻 (R_{SEI}) 和电荷转移电阻 (R_{ct})，具体表达式如下：

$$R = R_{bulk} + R_{SEI} + R_{ct} \quad (1)$$

其中， R 为电池阻抗， R_{bulk} 表示体电阻， R_{SEI} 为 SEI 膜电阻， R_{ct} 表示电荷转移电阻。

电池老化引起阻抗变化，老化模式主要包含可循环锂损失 (loss of lithium inventory, LLI) 与活性材料损失 (loss of active material, LAM)。电动汽车用锂离子电池容量损失率一般小于 20%，在此使用区间内电极和电解液间的 SEI 膜的形成、生长导致可循环锂损失占主导，SEI 膜生成过程中其体积的增加与可循环锂的消耗量成正比关系。考虑到活性粒子的半径远远大于其上所生产的 SEI 膜的厚度，可认为在老化初期覆盖在活性粒子表面的 SEI 膜面积并不发生改变，可循环锂的消耗量正比于 SEI 膜厚度的变化，且 SEI 膜厚度增加正比于 R_{SEI} 阻值增加。由此可知， R_{SEI} 阻值变化和老化程度（可循环锂损失）可近似认为呈线性关系，表现为在某一温度下 IC 曲线整体向右偏移。同时，在老化的初期，温度恒定的情况下电池体电阻 R_{bulk} 和电荷转移电阻 R_{ct} 基本保持不变。因此，因老化引起的阻抗变化如下：

$$\Delta R_{cycle} = \Delta R_{bulk, cycle} + \Delta R_{SEI, cycle} + \Delta R_{ct, cycle} \approx \Delta R_{SEI, cycle} \quad (2)$$

ΔR_{cycle} ——由于老化变化引起电池阻抗的增量；

$\Delta R_{bulk, cycle}$ ——由于老化变化引起电池体电阻的增量；

$\Delta R_{SEI, cycle}$ ——由于老化变化引起电池 SEI 膜电阻的增量；

$\Delta R_{ct, cycle}$ ——由于老化变化引起电荷转移电阻的增量。

锂电池的电解液为锂盐电解质和有机溶剂，该电解液中电解质导电主要依靠离子运动。在一定的温度范围内，随着温度的降低，电池内离子活性较低，离子迁移速度降低，电荷转移电阻 R_{ct} 增大，且该阻抗对低温更为敏感。在 IC 曲线中直观表现为高温下曲线横向偏移较小，且低温下曲线偏移较大。另一方面，温度不仅影响电解液内离子电导率，而且也会影响 SEI 膜内离子电导率，随着温度升高，SEI 膜内离子电导率同样升高，表现为 SEI 膜内阻抗的减少。由此可知，温度和老化对 SEI 膜的阻抗影响互相耦合。相对而言，体电阻与电池本体有关，对温度并不敏感。因此，温度变化引起的电池总电阻变化可表示为：

$$\Delta R_T = \Delta R_{bulk,T} + \Delta R_{SEI,T} + \Delta R_{ct,T} \approx \Delta R_{SEI,T} + \Delta R_{ct,T} \quad (3)$$

ΔR_T ——由于温度变化引起电池总阻抗的增量；

$\Delta R_{bulk,T}$ ——由于温度变化引起电池体电阻的增量；

$\Delta R_{SEI,T}$ ——由温度变化引起 SEI 膜电阻的增量；

$\Delta R_{ct,T}$ ——由于温度变化引起电荷转移电阻的增量。

结合式（2）和式（3）可知，由老化及温度变化引起的电池总阻抗的增加可描述为：

$$\Delta R = \Delta R_{SEI,T} + \Delta R_{SEI,cycle} + \Delta R_{ct,T} \quad (4)$$

从上述分析可知，电池电荷转移电阻 R_{ct} 仅受温度影响而对老化并不敏感；但 SEI 膜电阻 R_{SEI} 既受老化影响又与温度变化关联，因此，式（4）可进一步表示为：

$$\Delta R = \Delta R_{SEI,cycle,T} + \Delta R_{ct,T} \quad (5)$$

$\Delta R_{SEI,cycle,T}$ ——由温度和老化变化耦合引起电阻的增量。

上述温度与老化双重-嵌入解耦中认为由温度引起的电荷转移内阻 R_{ct} 可用 Arrhenius 函数描述。同时，同一温度下， R_{SEI} 阻值变化和老化程度（可循环锂损失）可近似认为呈线性关系；而在不同温度下， R_{SEI} 又与温度变化关联，但由于 SEI 膜电阻厚度约 20 ~ 120 nm，相对离子迁移路径较短，其对老化更为敏感。因此，由老化和温度耦合引起的 $\Delta R_{SEI,cycle,T}$ 在整体符合老化线性关系的情况下，其线性关系系数 $k_{SEI,T}$ 又可以采用 Arrhenius 函数描述。因此，式（5）可进一步描述成：

$$\begin{cases} \Delta R_{SEI, cycle, T} = k_{SEI, T} SOH + b_{SEI, T} \\ \Delta R_{ct, T} = a_{ct} \exp(b_{ct} / T) + c_{ct} \\ k_{SEI, T} = kb_{SEI, T} = A_{SEI} \exp(B_{SEI} / T) + C_{SEI} \end{cases} \quad (6)$$

T ——电池工作的实际温度；

$k_{SEI, T}, b_{SEI, T}$ ——与 SEI 膜电阻有关的线性拟合参数；

a_{ct}, b_{ct}, c_{ct} ——与电荷转移电阻有关的温度拟合参数；

$A_{SEI}, B_{SEI}, C_{SEI}$ ——与 SEI 膜电阻有关的温度拟合参数。

结合式 (6)，恒流充电阶段电池 IC 曲线电压偏移可描述为：

$$\begin{cases} \Delta U_{SEI, cycle, T} = k_{SEI, T} SOH + b_{SEI, T} \\ \Delta U_{ct, T} = a_{ct} \exp(b_{ct} / T) + c_{ct} \\ k_{SEI, T} = kb_{SEI, T} = A_{SEI} \exp(B_{SEI} / T) + C_{SEI} \end{cases} \quad (7)$$

$\Delta U_{ct, T}$ ——由温度影响转移电阻引起的电压偏差；

$\Delta U_{SEI, cycle, T}$ ——由 SEI 膜电阻影响引起的电压偏差。

由式 (7) 可知，针对不同温度下电池，可尝试先消除对温度最为敏感的 R_{ct} 内阻引起电压偏移，进而得到受老化和温度耦合影响 $\Delta R_{SEI, cycle, T}$ 内阻引起电压偏差。利用线性关系描述该电压偏差，并采用 Arrhenius 方程描述相关线性关系系数，进一步得到单独因 $\Delta R_{SEI, cycle}$ 内阻引起的电压偏差，进而实现温度及老化对 IC 曲线特征的双重-嵌入解耦。

上述 IC 曲线求解及特征分析中 IC 曲线求解可以通过常规数值微分求解，也可以通过多项式拟合及概率密度函数法求解，也可参考发明专利 (CN 109632138 A) 中方法进行求解。本发明仅给出示例，不对求解方法进行具体限定。

上述 IC 曲线特征分析：图 1 为不同老化状态电池 IC 曲线，图 2 为不同温度下某电池 IC 曲线。从图 1 中可看出随着老化程度的加剧，IC 曲线特征峰横向向右偏移，且峰值高度下降；从图 2 中可以看出随着温度升高，IC 曲线特征峰横向向左偏移，且峰值高度上升。在恒流充电阶段，电池 IC 曲线电压偏移可近似归因于阻抗的影响，温度降低及老化程度加剧引起阻抗增大进而导致横向电压的右移。在 IC 曲线三个主要特征峰中，第二特征峰相对变化明显，且其位于电压中值点附近，因此，本发明选取第二特征峰作为显著特征峰来研究其特征变化与老化/温度关联性。

上述基于“标准样本”的电池 SOH 在线估计主要分为机理参数标定阶段及在线估计阶段。

上述机理参数标定阶段：首先，进行不同温度和老化试验，实测电池电压、电流及温度数据；然后求取 IC 曲线；最后，利用 IC 曲线第二特征峰电压值，通过式 (7) 进行机理参数标定，主要标定三个关系 1) 电池未老化时，温度引起 R_{ct} 变化产生的电压偏移；2) 同一温

度下，消除 R_{ct} 影响后的电压偏差与老化状态的线性关系；3）不同温度下的线性关系系数和温度间的关系。

上述标定关系 1) 电池未老化时，温度引起 R_{ct} 变化产生的电压偏移需基于“标准样本”实现，“标准样本”为至少三块满足出厂要求的电池（SOH 为 100%）平均后的虚拟电池，本发明所用电池基本参数如表 1 所示，当然这里只是为了阐述相关理论，针对电池数量及电池基本参数并不仅仅局限于此。不同温度下标准样本电池的 SOH 为 100%，即电池并未老化，此时温度引起第二特征峰电压的偏移理论上是由电荷转移电阻 R_{ct} 阻抗变化影响。图 3 中统计了不同温度下标准样本电池第二特征峰电压，同时还给出了基于 Arrhenius 函数拟合结果。表 2 给出标准样本电池由温度引起电压偏移 Arrhenius 方程拟合参数。为了定量的评估拟合结果的优劣，本发明引入决定系数 R^2 ，具体可表示为：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (V_i - \hat{V}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (V_i - \hat{V}_{\text{mean}})^2}, \hat{V}_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (8)$$

其中， V_i 代表电压测量值， $\hat{V}_i$ 代表电压拟合值， $\hat{V}_{\text{mean}}$ 代表测量电压平均值， N 代表数据量。 R^2 越接近 1，表明拟合度越优。当然这不是发明的重点，只是引入通用指标阐述拟合的效果。从表中可以看 $R^2 = 0.996$ ，显然 Arrhenius 方程能够较好描述了由温度引起的电压偏移。

针对不同老化状态的电池，将实测的温度值带入该拟合函数便可得到因温度变化引起的 IC 曲线电压偏移值，然后将特征峰测量电压值减去对应的温度引起的电压偏移值，便可消除温度变化导致的 R_{ct} 阻抗的影响。

表 1 电池基本参数

参数	数值
额定容量	1.3 Ah
额定电压	3.2 V
使用电压范围	2.5 ~ 3.65 V
尺寸	18 mm(D)*65 mm(T)

表 2 由温度引起电压偏移 Arrhenius 方程拟合参数

a_{ct}	b_{ct}	c_{ct}	R^2
3.444×10^{-14}	6313.57	3.331	0.996

上述标定关系 2) 消除 R_{ct} 影响后的电压偏差与老化状态的线性关系：本发明选取 SOH 分别是 100%，88%和 82%的 3 块单体电池来分析电压偏差与老化状态线性关系。当然这里只是为了阐述相关理论，有关电池数量及 SOH 选择并不仅仅局限于此。其中电压偏差是消除温度变化导致的 R_{ct} 阻抗变化的影响后的结果，如图 4 所示。电池处于老化初期时，其老化状态与阻抗近似呈线性关系，但实际中存在微小的差别主要可能来自于对于 SEI 膜复杂成分的简化处理。图 4 中还给出了相应的线性拟合曲线。表 3 中给出了不同温度下的线性拟合系数。

从表可以看出, $k_{SEI,T}$ 与 $b_{SEI,T}$ 具有一定的关系, $k_{SEI,T} = -0.01 b_{SEI,T}$, 从而可以对上述线性拟合函数进一步简化如下:

$$\Delta U_{SEI, cycle, T} = -0.01 b_{SEI, T} SOH + b_{SEI, T} \quad (9)$$

表 3 不同温度下的线性拟合系数

温度/K	参数 $k_{SEI, T}$	参数 $b_{SEI, T}$	R^2
268	-0.00231	0.22964	0.955
273	-0.00182	0.18077	0.984
278	-0.00134	0.13303	0.956
283	-9.25E-04	0.09193	0.970
288	-6.88E-04	0.06835	0.962
293	-5.90E-04	0.05852	0.937
298	-4.52E-04	0.04482	0.942
303	-3.89E-04	0.03866	0.960
308	-3.22E-04	0.03209	0.990
313	-3.01E-04	0.03007	0.999
318	-3.30E-04	0.03293	0.992
323	-2.91E-04	0.02909	0.999
328	-2.71E-04	0.0272	0.993

上述标定关系 3) 不同温度下的线性关系系数和温度间的关系: 从上述温度与老化双重-嵌入解耦分析中可知线性关系系数 $k_{SEI, T}$, $b_{SEI, T}$ 与温度符合 Arrhenius 方程, 为此, 对表 3 中的系数 $b_{SEI, T}$ 进行拟合, 具体结果如图 5 所示, 其中拟合参数如表 4 所示, 决定系数 $R^2 = 0.994$, 接近 1, 表明该曲线具有较好的拟合度。

表 4 线性关系系数 $b_{SEI, T}$ 拟合参数

A_{SEI}	B_{SEI}	C_{SEI}	R^2
7.6246×10^{-10}	5218.66	0.0179	0.994

上述在线估计阶段: 利用电池管理系统 (Battery Management System, BMS) 采集充电过程中的电压、电流和温度数据, 求解电池 IC 曲线寻求第二特征峰电压。基于采集的第二特征峰电压及机理参数标定阶段得到的离线标定函数, 首先, 将温度作为输入求取由 R_{ct} 引起电压偏差, 得到第二特征峰实测电压减去温度电压偏差后的标准电压值; 接着, 将温度带入计算线性关系系数 $k_{SEI, T}$ 和 $b_{SEI, T}$; 最终基于线性关系系数和标准电压值间标定的线性方程求解 SOH, 实现宽温度范围下电池 SOH 估计, 具体流程如图 6 所示。这里为了阐述方面, 举例说明一下。

将第二特征峰的实测电压值 U_{peak} 和实测温度 T_{peak} 作为输入, 将电池 SOH 作为输出, 估计式如下:

$$\begin{cases} \Delta U_{SEI, cycle, T} = U_{peak} - U_{ct, T} \\ U_{ct, T} = 3.444 \times 10^{-14} \cdot \exp\left(\frac{6313.57}{T}\right) + 3.331 \\ b_{SEI, T} = -100 \cdot k_{SEI, T} = 7.6246 \times 10^{-10} \cdot \exp\left(\frac{5218.66}{T}\right) + 0.0179 \\ SOH = \frac{\Delta U_{SEI, cycle, T} - b_{SEI, T}}{-0.01b_{SEI, T}} \end{cases} \quad (10)$$

求取不同温度下的 1~3 号电池 SOH, 估计 SOH 结果如表 5 所示。从表中可以看出求取 SOH 的最大绝对误差为 4.03 %, 估计 SOH 为 88 % 的 2 号电池平均绝对误差为 2.41 %, 估计 SOH 为 82 % 的 3 号电池平均绝对误差为 1.21 %, 表明所提方法可实现宽温度范围下的电池 SOH 估计。

表 5 不同老化电池估计 SOH

温度 /K	预测 SOH (实测 88 %)	偏差	预测 SOH (实测 82 %)	偏差
268	91.21 %	3.21 %	81.63%	-0.37 %
273	89.10 %	1.10 %	80.39%	-1.61 %
278	90.42 %	2.42 %	80.10%	-1.90 %
283	90.77 %	2.77 %	82.01%	0.01 %
288	91.45 %	3.45 %	82.70%	0.70 %
293	91.64 %	3.64 %	81.20%	-0.80 %
298	92.03 %	4.03 %	82.47%	0.47 %
303	91.29%	3.29 %	82.20%	0.20 %
308	90.30 %	2.30 %	83.28%	1.28 %
313	88.57 %	0.57 %	82.60%	0.60 %
318	87.32 %	-0.68 %	78.50%	-3.50 %
323	86.91 %	-1.09 %	79.59%	-2.41 %
328	85.20 %	-2.80 %	80.06 %	-1.94 %

所述实施例为本发明的优选的实施方式, 但本发明并不限于上述实施方式, 在不背离本发明的实质内容的情况下, 本领域技术人员能够做出的任何显而易见的改进、替换或变型均属于本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1、一种基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤一、提取标准样本显著特征峰，选取同一类型不同老化状态的电池在同一温度下进行恒流充电实验，再选择上述任意一块电池在不同温度下进行恒流充电实验，分别采集各组实验中电池的电流、电压和温度数据，根据上述数据分别绘制不同老化状态电池的 IC 曲线图和不同温度下所测电池的 IC 曲线图，结合上述两张 IC 曲线图选定样本显著特征峰；

步骤二、标准样本机理参数标定，基于双重-嵌入解耦得到标准样本关系函数：

关系函数一，电池未老化时，由温度引起电荷转移电阻 R_{ct} 变化产生电压偏差 $\Delta U_{ct,T}$ 与温度的关系函数；

关系函数二，同一温度下，消除电荷转移电阻 R_{ct} 影响后由 SEI 膜电阻影响引起的电压偏差 $\Delta U_{SEI, cycle, T}$ 与老化状态的线性关系函数；

关系函数三，不同温度下的线性关系系数和温度间的关系函数；

步骤三、待测电池 SOH 在线估计，对待测电池进行恒流充电实验，同时采集电流、电压和实测温度 T_{peak} 数据，绘制待测电池的 IC 曲线，提取与样本显著特征峰对应的显著特征峰的实测电压值 U_{peak} ，根据步骤二中基于标准样本的双重-嵌入解耦的关系函数求解 SOH。

2、根据权利要求 1 所述的基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法，其特征在于：所述显著特征峰是相对变化明显且位于电压中值点附近的特征峰。

3、根据权利要求 1 所述的基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法，其特征在于：所述步骤二中的关系函数一，电池未老化时，由温度引起 R_{ct} 变化产生的电压偏差为 SOH 为 100% 的标准样本电池由温度引起的在显著特征峰处电压偏差值 $\Delta U_{ct,T}$ ； $\Delta U_{ct,T}$ 与电池工作的实际温度 T 的关系用 Arrhenius 函数描述为：

$$\Delta U_{ct,T} = a_{ct} \exp(b_{ct}/T) + c_{ct}$$

式中 a_{ct} ， b_{ct} ， c_{ct} 为与电荷转移电阻 R_{ct} 有关的温度拟合参数。

4、根据权利要求 3 所述的基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法，其特征在于：所述 SOH 为 100% 的标准样本电池为至少三块满足出厂要求的 SOH 为 100% 电池平均后的虚拟电池，且通过决定系统 R^2 定量评估拟合结果，具体评估公式为：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V_i^0)^2}{\sum_{i=1}^N (V_i - \hat{V}_{mean})^2}, \hat{V}_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i$$

其中， V_i 代表电压测量值， V_i^0 代表电压拟合值， $\hat{V}_{mean}$ 代表测量电压平均值， N 代表数据量， R^2 越接近 1，表明拟合度越优。

5、根据权利要求 1 所述的基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法，其特征在于：所述步骤二中关系函数二，同一温度下，消除电荷转移电阻 R_{ct} 影响后由 SEI 膜电阻影响引起的电压偏差 $\Delta U_{SEI,cycle,T}$ 与老化状态的线性关系函数可以描述为：

$$\Delta U_{SEI,cycle,T} = k_{SEI,T} SOH + b_{SEI,T}$$

式中 $k_{SEI,T}$, $b_{SEI,T}$ 为与 SEI 膜电阻有关的线性拟合参数。

6、根据权利要求 5 所述的基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法，其特征在于：获得所述消除 R_{ct} 影响后的电压偏差与老化状态的线性关系函数的方法为通过选取至少三块 SOH 为 100%-80%之间的已知 SOH 值的单体电池样本，再根据所选取的单体电池样本拟合出电压偏差 $\Delta U_{SEI,cycle,T}$ 与老化状态 SOH 线性函数关系；得出线性拟合参数 $k_{SEI,T}$ 与 $b_{SEI,T}$ 的关系；所述 $k_{SEI,T} = -0.01 b_{SEI,T}$ ，则 $\Delta U_{SEI,cycle,T} = -0.01 b_{SEI,T} SOH + b_{SEI,T}$ 。

7、根据权利要求 1 所述的基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法，其特征在于：所述步骤二中关系函数三，不同温度下的线性关系系数和电池工作的实际温度 T 间的关系函数可以描述为：

$$k_{SEI,T} = kb_{SEI,T} = A_{SEI} \exp(B_{SEI} / T) + C_{SEI}$$

式中 A_{SEI} , B_{SEI} , C_{SEI} 为与 SEI 膜电阻有关的温度拟合参数。

8、根据权利要求 1 所述的基于标准样本及双重-嵌入解耦的电池健康状态估计方法，其特征在于，所述步骤三中 SOH 的求解方法为：

首先、以实测温度 T_{peak} 作为输入并且根据步骤二中 $\Delta U_{ct,T}$ 与温度的关系得到 $\Delta U_{ct,T}$ ；

其次、根据 $\Delta U_{SEI,cycle,T} = U_{peak} - \Delta U_{ct,T}$ ，以实测电压值 U_{peak} 作为输入得到 $\Delta U_{SEI,cycle,T}$ ，

然后、根据步骤二中不同温度下的线性关系系数和温度间的关系以实测温度 T_{peak} 作为输入获得当前温度下线性关系系数，

最后、根据 $\Delta U_{SEI,cycle,T}$ 与老化状态的线性关系函数以 $\Delta U_{SEI,cycle,T}$ 和当前温度下线性关系系数获得所测电池的 SOH 估计结果。

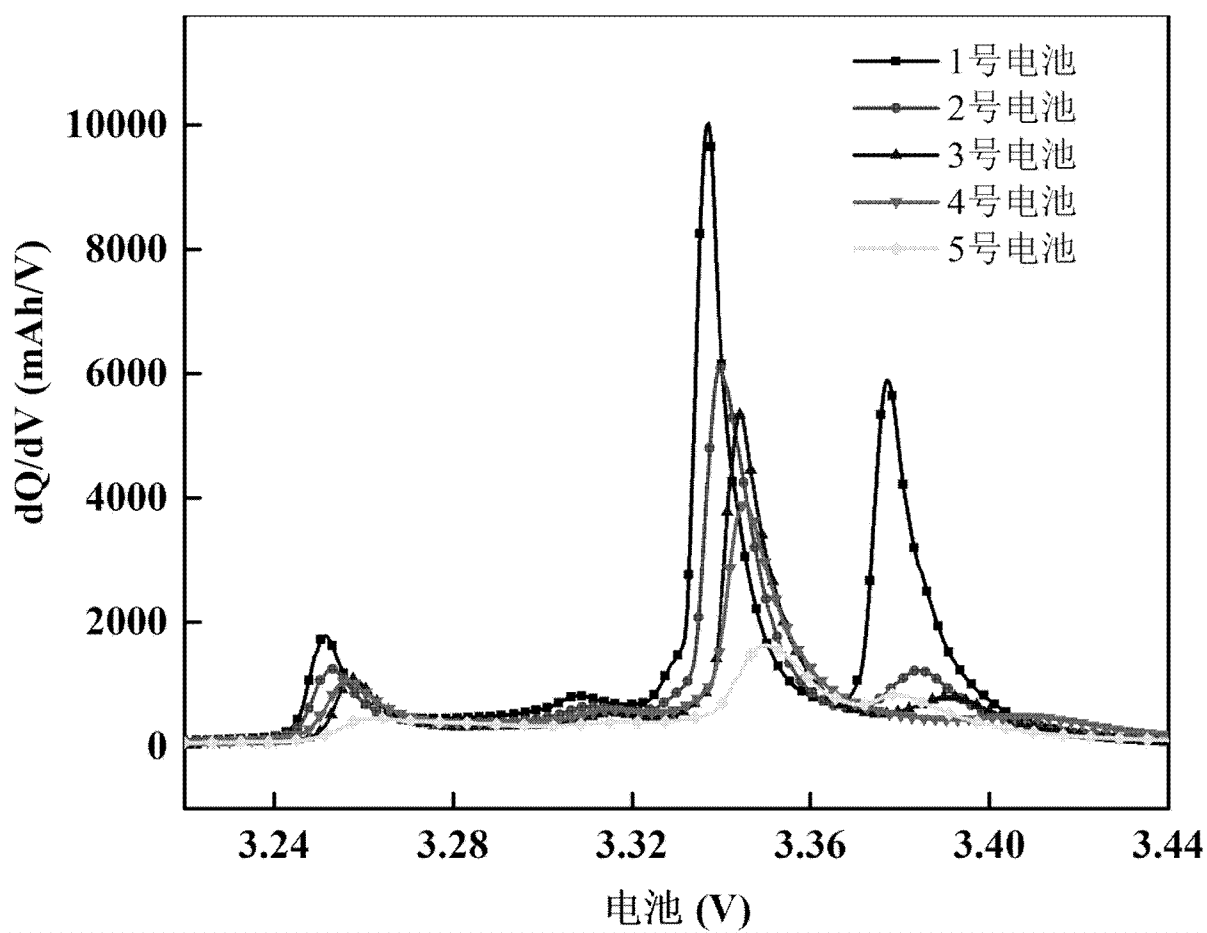


图 1

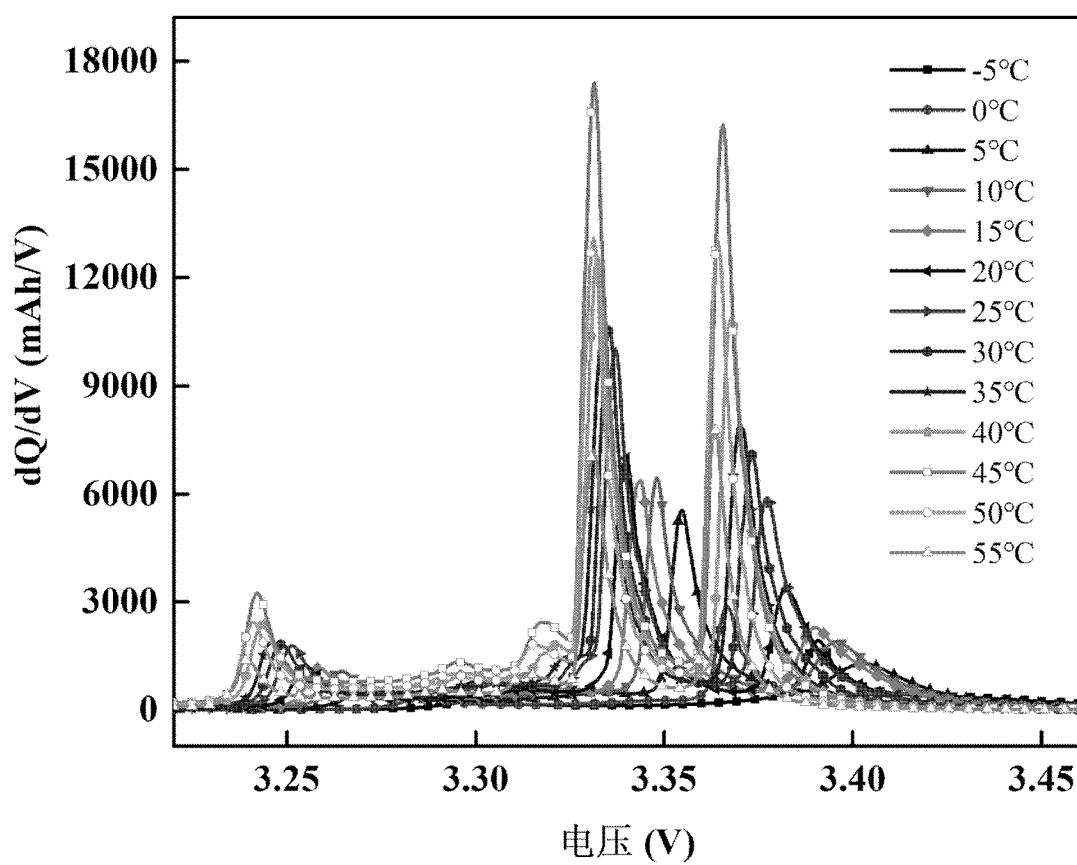


图 2

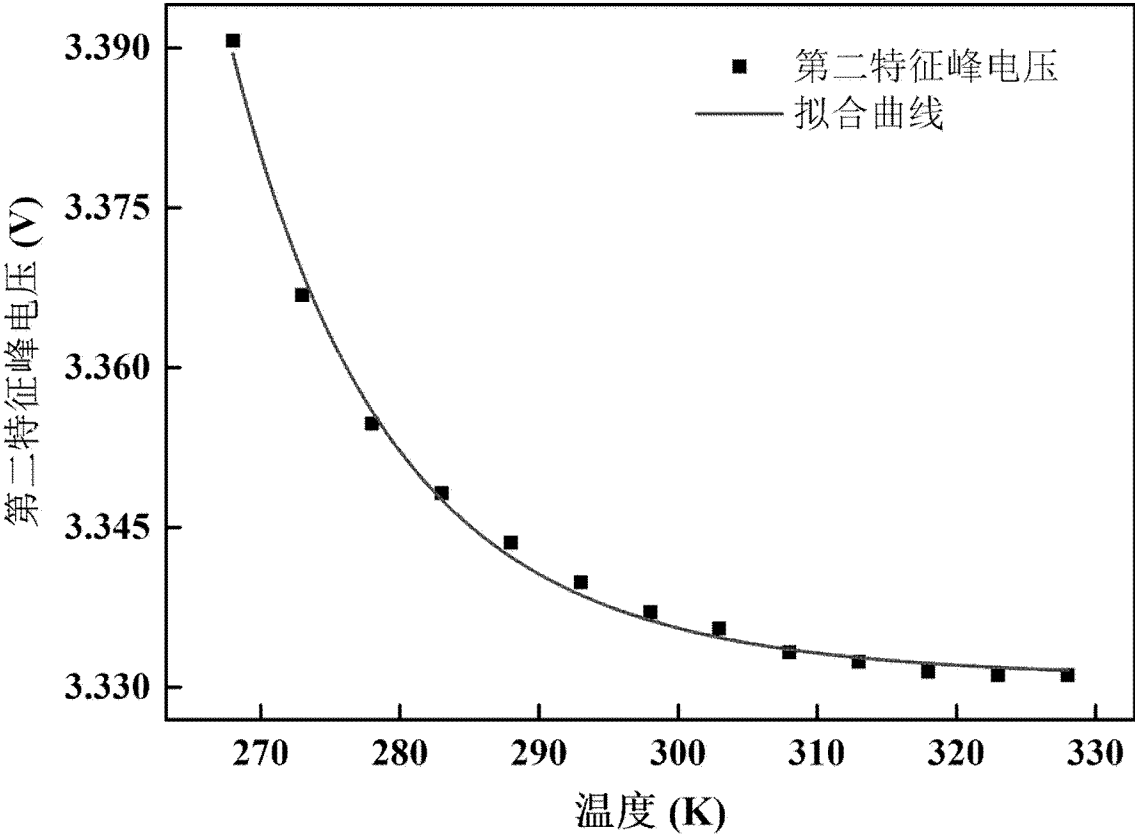


图 3

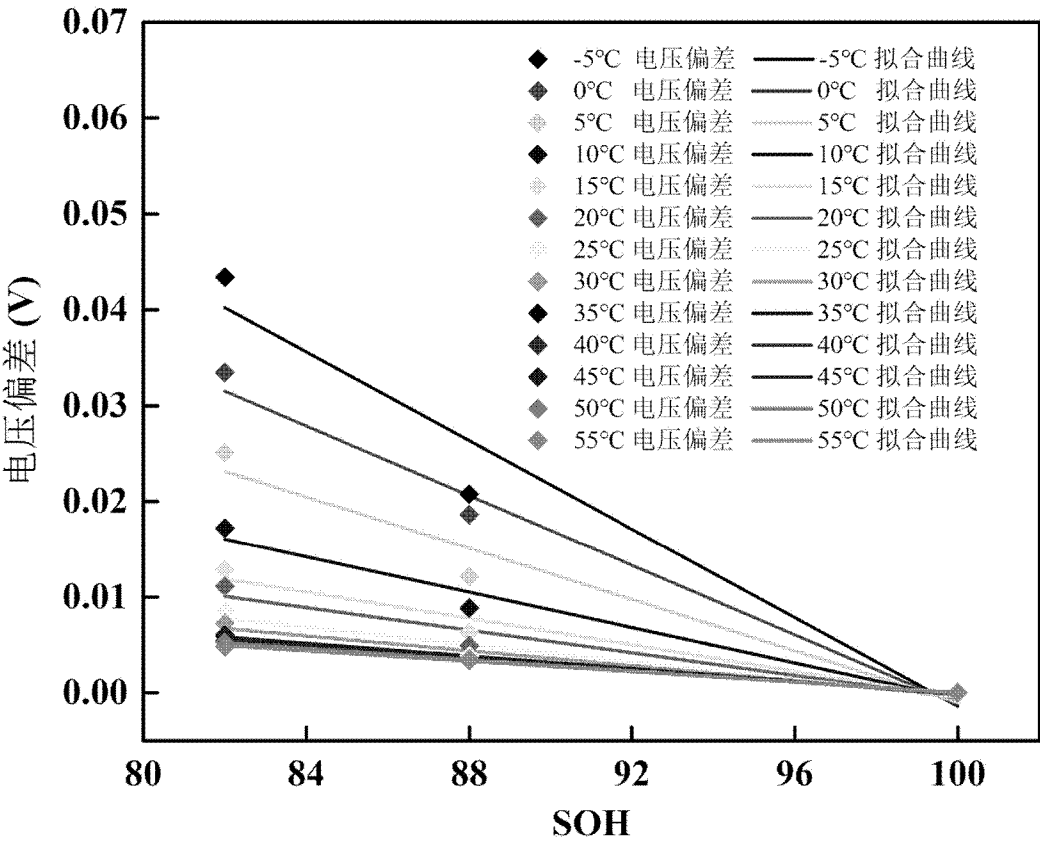


图 4

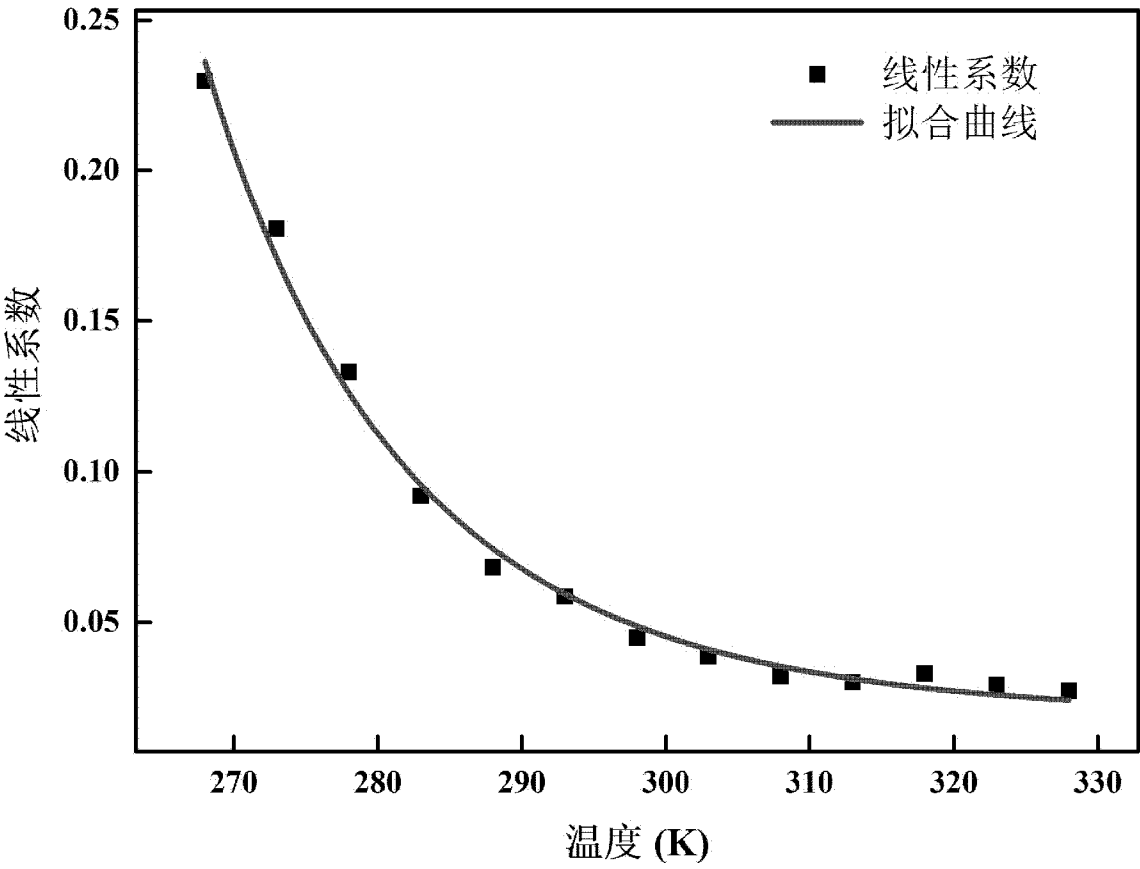


图 5

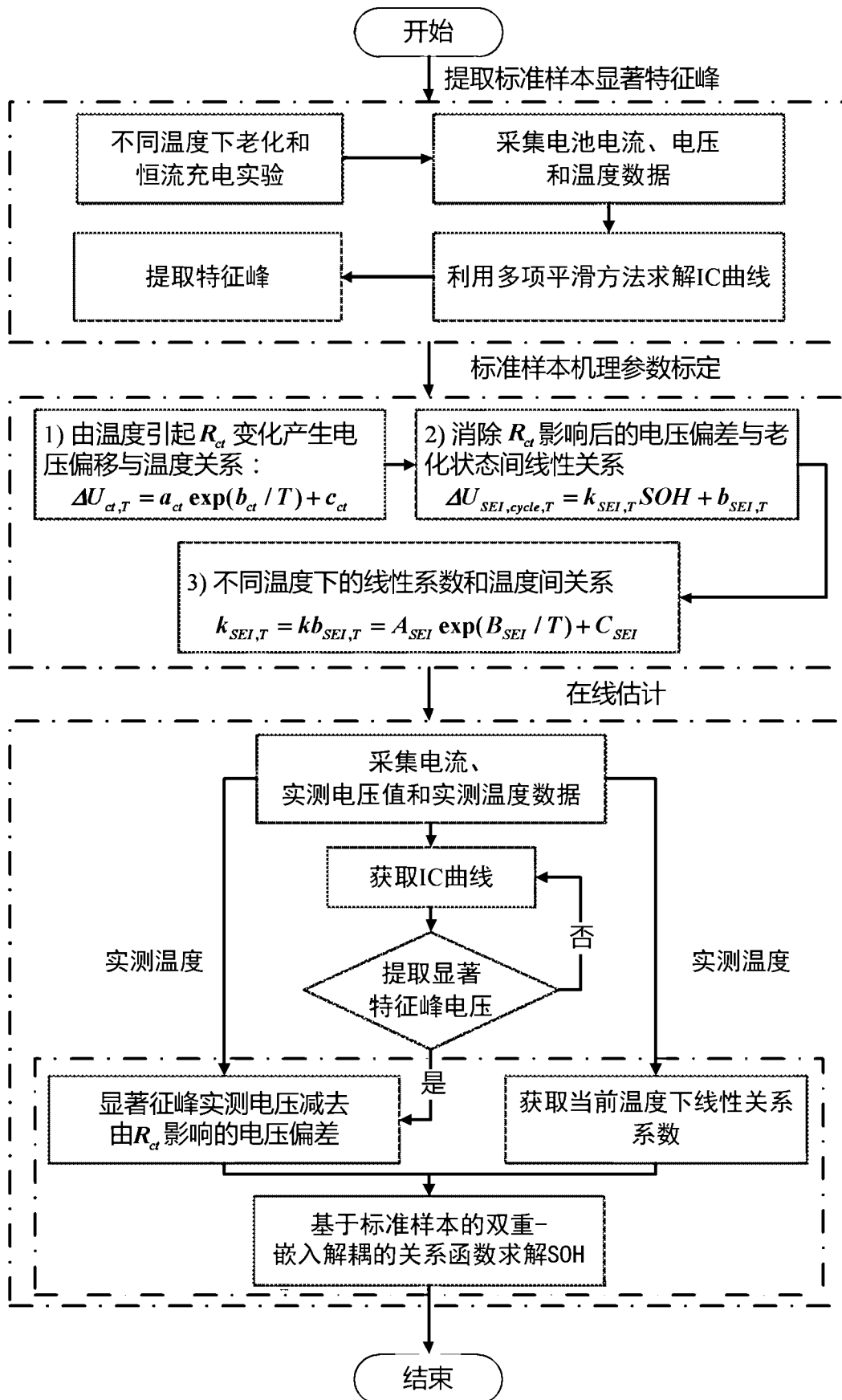


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/074051

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01R 31/392(2019.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01R Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) DWPI, SIPOABS, CNABS, WOTXT, CNTXT, CNKI, IEEE: 电池, 健康状态, 估计, 老化, 标准样本, 双重-嵌入解耦, 容量增量分析, 显著特征峰, 恒流充电, 电流, 电压, 温度, 关系函数, 电荷转移电阻, 电压偏差, SEI膜电阻, 关系函数, 线性关系, 决定系统, 阿伦尼乌兹, 阿伦尼乌斯, battery, State of Health, SOH, estimation, aging, standard sample, dual-embedding decoupling, Incremental Capacity Analysis, ICA, significant characteristic peak, constant current charging, current, voltage, temperature, relationship function, charge transfer resistance, voltage deviation, SEI film resistance, relationship function, linear relationship, decision system, Arrhenius		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 111693881 A (JIANGSU UNIVERSITY) 22 September 2020 (2020-09-22) claims 1-3	1-8
Y	CN 110635187 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY) 31 December 2019 (2019-12-31) claims 1-5	1-8
Y	王天鹭 (WANG, Tiansi). "锂离子电池容量损失预测及健康状态估计研究 (Capacity-loss Prediction and State-of-health Estimation in Lithium-ion Batteries)" 中国博士学位论文全文数据库 工程科技II辑, 2018年第01期, C042-122 (Chinese Doctoral Dissertations Full-text Database, Engineering Technology II, 2018, Vol. 01, C042-122), 15 January 2018 (2018-01-15), pp. 103-106	1-8
A	JP 2019138673 A (FURUKAWA AUTOMOTIVE SYSTEMS INC et al.) 22 August 2019 (2019-08-22) entire document	1-8
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 16 April 2021		Date of mailing of the international search report 28 April 2021
Name and mailing address of the ISA/CN China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10)62019451		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/074051

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)
CN	111693881	A	22 September 2020	None		
CN	110635187	A	31 December 2019	CN	110635187	B 12 February 2021
JP	2019138673	A	22 August 2019	None		

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/074051

A. 主题的分类

G01R 31/392(2019.01) i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01R

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

DWPI, SIPOABS, CNABS, WOTXT, CNTXT, CNKI, IEEE: 电池, 健康状态, 估计, 老化, 标准样本, 双重-嵌入解耦, 容量增量分析, 显著特征峰, 恒流充电, 电流, 电压, 温度, 关系函数, 电荷转移电阻, 电压偏差, SEI膜电阻, 关系函数, 线性关系, 决定系统, 阿伦尼乌兹, 阿伦尼乌斯, battery, State of Health, SOH, estimation, aging, standard sample, dual-embedding decoupling, Incremental Capacity Analysis, ICA, significant characteristic peak, constant current charging, current, voltage, temperature, relationship function, charge transfer resistance, voltage deviation, SEI film resistance, relationship function, linear relationship, decision system, Arrhenius

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 111693881 A (江苏大学) 2020年 9月 22日 (2020 - 09 - 22) 权利要求1-3	1-8
Y	CN 110635187 A (南京理工大学) 2019年 12月 31日 (2019 - 12 - 31) 权利要求1-5	1-8
Y	王天鹭. “锂离子电池容量损失预测及健康状态估计研究” 中国博士学位论文全文数据库 工程科技 II 辑, 2018年第01期, C042-122, 2018年 1月 15日 (2018 - 01 - 15), 第103-106页	1-8
A	JP 2019138673 A (古河AS株式会社 等) 2019年 8月 22日 (2019 - 08 - 22) 全文	1-8

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2021年 4月 16日

国际检索报告邮寄日期

2021年 4月 28日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

李昕宇

电话号码 (86-10)62089924

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/074051

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	111693881	A	2020年 9月 22日	无	
CN	110635187	A	2019年 12月 31日	CN 110635187	B 2021年 2月 12日
JP	2019138673	A	2019年 8月 22日	无	