(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
2018 年 8 月 30 日 (30.08.2018)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2018/153116 A1

(51) 国际专利分类号:
G01R 31/36 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/106912

(22) 国际申请日: 2017 年 10 月 19 日 (19.10.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201710093350.0 2017年2月21日 (21.02.2017) CN

(71) 申请人: 山 东 大 学 (SHANDONG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。

(72) 发明人: 张承慧 (ZHANG, Chenghui); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 商云龙 (SHANG, Yunlong); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 张奇 (ZHANG, Qi); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 段彬 (DUAN, Bin); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 崔纳新 (CUI, Naxin); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。 周忠凯 (ZHOU, Zhongkai); 中国山东省济南市历下区经十路17923号, Shandong 250061 (CN)。

(74) 代理人: 济南圣达知识产权代理有限公司 (JINAN SHENGDA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO.,LTD); 中国山东省济南市历下区经十路17703号华特广场B308, Shandong 250061 (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, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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,

(54) **Title:** FRACTIONAL-ORDER KIBAM BATTERY MODEL FACTORING IN NONLINEAR CAPACITY CHARACTERISTICS AND PARAMETER RECOGNITION METHOD

(54) 发明名称: 计及非线性容量特性的分数阶KiBaM电池模型及参数辨识方法

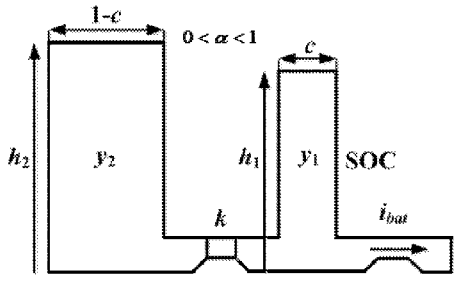


图 1

(57) **Abstract:** A fractional-order KiBaM battery model factoring in nonlinear capacity characteristics and a parameter recognition method. The model comprises a temporary capacity (y_1) part used for describing the nonlinear capacity characteristics of a battery and an acquirable capacity ($y_2$2) part. The temporary capacity (y_1) part expresses the amount of power that can be acquired directly when discharging and expresses the state of charge (SOC) of the battery. The acquirable capacity (y_2) part expresses the amount of power that cannot be acquired directly. The two parts are connected with each other. When the battery is discharging, load current i flows out of the temporary capacity (y_1) part. At the same time, the power pass rate coefficient (k) of the acquirable capacity (y_2) part, by utilizing the height ratio of the temporary capacity (y_1) part to the acquirable capacity (y_2) part and combined with the size of the battery capacity characteristic fractional order (α), expresses the nonlinear capacity effect and battery recovery effect of the battery. The fractional-order KiBaM battery model factoring in nonlinear capacity characteristics and the parameter recognition method allow great description of the nonlinear capacity effect of the battery and internal characteristics such as running time.

WO 2018/153116 A1

[见续页]

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))。

(57) 摘要: 一种计及非线性容量特性的分数阶KiBaM电池模型及参数辨识方法，模型包括用于描述电池的非线性容量特性的临时容量(y_1)与可获得容量(y_2)部分，临时容量(y_1)部分表示放电时可直接获得的电量，表示电池的荷电状态SOC；可获得容量(y_2)部分表示不能直接获取的电量，两部分相连通，当电池放电时，负载电流i从临时容量(y_1)部分流出，同时可获得容量(y_2)部分的电量通过速率系数(k)，利用临时容量(y_1)与可获得容量(y_2)部分的高度比、结合电池容量特性分数阶阶次(α)的大小，表达电池的非线性容量效应和电池恢复效应。计及非线性容量特性的分数阶KiBaM电池模型及参数辨识方法能够很好地描述电池的非线性容量效应及运行时间等内部特征。

计及非线性容量特性的分数阶KiBaM电池模型及参数辨识方法

技术领域

本发明涉及一种计及非线性容量特性的分数阶 KiBaM 电池模型及参数辨识方法。

背景技术

随着能源危机和环境污染日益严重，电动汽车已成为最具发展前景的汽车产业。目前动力电池是制约电动汽车规模发展的最主要瓶颈，对整车性能至关重要。锂离子电池由于具有能量密度高、使用寿命长、性价比好和单体电压高等诸多优势，逐步成为电动汽车应用最广的一种动力电池。

电池模型对动力电池及其电池管理系统的合理设计和安全运行意义非凡，是电池荷电状态（SOC）估计、健康状态（SOH）估计、剩余寿命（RUL）预测等方法的基础。然而，建立一个精确且结构简单的电池模型绝非易事，究其原因，其内部化学反应十分复杂，具有高度的非线性和不确定性。电池模型发展到现阶段，按照建模机理的不同可以划分为表现电池内部特征的电化学模型、简化的电化学模型、热模型等，以及描述电池外部特征的随机模型、神经网络模型、等效电路模型等。其中，电化学模型使用复杂非线性微分方程描述电池内部化学过程，模型虽然精确，但太过抽象；热模型主要研究电池的生热、传热过程；随机模型主要关注电池的恢复特性，将电池行为描述为一个马尔科夫过程，能够描述电池的脉冲放电特性，但无法适用于变电流情况；神经网络模型具有良好的非线性映射能力、快速的并行处理能力、较强的自学习和自组织能力等优点，但需要大量的实验来获取训练数据，且模型误差易受训练数据和训练方法的影响。等效电路模型根据电池的物理特性，使用不同物理元器件如电压源、电流源、电容和电阻等构成等效电路来模拟电池的 I-V 输出外特性，因其简单直观的形式，以及适宜于电气设计与仿真等优点，已成为应用最为广泛的一种模型。

然而，等效电路模型虽可以准确描述电池的 I-V 输出外特性，但难以表现电池的非线性容量效应及运行时间等内部特征。与通常的认识不同，锂离子电池的可用电量并不是像水桶中的水一样，你用多少电量就下降多少，而是带有一定的非线性特性。因此，不可能将电池的所有电量全部取出，具体得到的电量与电池负载及使用情况有关。这种非线性特性主要表现在两个方面：容量效应和恢复效应。其中，容量效应是指放电电流越大，得到的电量越小，比如用1A的电流放电要比用0.5A的电流放电所能得到的总放电量要小；恢复效应是指当电池不再放电时，电池的电量会有所回升。

而KiBaM电化学模型（KiBaM，全称为Kinetic Battery Model）很巧妙的解决了这一难题。不同于其他模型直接用微分方程描述电池的两个特性或对电池的内部物理特点进行严格精确的描述，KiBaM电化学模型是一种比较基于感性认识的模型，因此模型比较直观、易于理解和简单好用，其采用一个降阶方程来表征电池的非线性容量效应及运行时间，能够很好地描述电池的放电特性。KiBaM电化学模型考虑了电池的恢复效应和容量效应，可以准确表现电池的内部特征。

事实上，电池内部电化学反应过程极其复杂，包括导电离子转移、内部电化学反应、充放电迟滞效应以及浓差扩散效应等，表现出较强的非线性特性，更适合用分数阶模型来模拟。对比整数阶模型，分数阶模型在设计上具有更多的自由度、更大的柔性和新意。同时，通过引入分数阶微积分，也增加了许多新的现象和规律，具有常规整数阶电池模型无法实现的优势。实际上，流体运动特性，包括电池内部锂离子、电子等运动特性，仍然表现出很强的分数阶微积分特性。目前还未发现采用分数阶微积分研究 KiBaM 电化学模型的成果。

发明内容

本发明为了解决上述问题，提出了一种计及非线性容量特性的分数阶 KiBaM 电池模型及参数辨识方法，本发明考虑了电池的恢复效应和比容量效应，能够精确描述电池的非线性容量效应及运行时间，很好地描述电池的放电特性，实现对动力电池内部特征的精确模拟，具有较高的应用价值。解决现有电池模型难以表现电池的非线性容量效应及运行时间等内部特征的缺点和不足。

本发明提供一种计及非线性容量特性的分数阶KiBaM电池模型及参数辨识方法，采用分数阶微积分原理，将传统KiBaM电池模型推广到分数阶（非整数阶），使模型获得了更多的自由度、更大的柔性和新意，同时分数阶的引入也增加了许多新的现象和规律，具有常规整数阶电池模型无法实现的优越性。

为了实现上述目的，本发明采用如下技术方案：

一种计及非线性容量特性的分数阶 KiBaM 电池模型，包括用于描述电池的非线性容量特性的临时容量与可获得容量部分，所述的临时容量部分表示放电时可直接获得的电量，表示电池的荷电状态 SOC；所述的可获得容量部分表示不能直接获取的电量，两部分相连通，当电池放电时，负载电流 i 从临时容量部分流出，同时获得容量部分的电量通过速率系数，利用临时容量与可获得容量部分的高度比、结合电池容量特性分数阶阶次的大小，表达电池的非线性容量效应和电池恢复效应。

所述的临时容量部分与可获得容量部分之和为电池的总容量。

当电池完全放电结束后，临时容量部分的高度为零。

所述的临时容量记为 y_1，表示放电时可直接获得的电量，其高度记为 h_1，表示电池的荷电状态 SOC；所述的可获得容量记为 y_2，表示不能直接获取的电量，其高度记为 h_2；并且，y1 与 y_2 之和是电池的总容量；c 代表两部分之间电池容量的分配比例，且存在以下关系：

$$\begin{cases} h_1(t)=\dfrac{y_1(t)}{c} \\ h_2(t)=\dfrac{y_2(t)}{1-c} \end{cases}。$$

临时容量y_1和可获得容量y_2与代表电池荷电状态SOC的h_1和h_2之间关系表示为：

$$\begin{cases} \dfrac{dy_1^{\alpha}}{dt^{\alpha}}=-i(t)+k[h_2(t)-h_1(t)]=-i(t)+k[\dfrac{y_2(t)}{1-c}-\dfrac{y_1(t)}{c}] \\ \dfrac{dy_2^{\alpha}}{dt^{\alpha}}=-k[h_2(t)-h_1(t)]=-k[\dfrac{y_2(t)}{1-c}-\dfrac{y_1(t)}{c}] \end{cases} \quad (2)$$

式中，临时容量记为y_1，表示放电时可直接获得的电量，其高度记为h_1，表示电池的荷电状态SOC；所述的可获得容量记为y_2，表示不能直接获取的电量，其高度记为h_2；并且，y_1与y_2之和是电池的总容量；c代表两个部分之间电池容量的分配比例；k表示从临时容量流到可获得容量的速率系数；α表示电池容量特性分数阶阶次的大小，且有：$0<\alpha<1$。

通过建立的分数阶 KiBaM 电池模型，获取当前的电池总剩余容量 $y(t)$、可用容量 $C_{avail}(t)$、不可用容量 $C_{unavail}(t)$ 和电池荷电状态 SOC，以捕获电池运行时间和动力电池非线性容量内特征。

动力电池的荷电状态SOC表示为：

$$SOC(t)=\frac{C_{avail}(t)}{C_{init}}=SOC_0-\frac{1}{C_{init}}[\int i_{bat}(t)dt+C_{unavail}(t)]$$

其中，电池的不可用容量 $C_{unavail}$ 表示为：

$$C_{unavail}(t)=(1\text{-}c)\delta_h(t)=(1\text{-}c)(2C-\frac{I}{c})t^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't^{\alpha}) \quad (10)$$

动力电池的容量关系式表示为：

$C_{avail}(t)=C_{init}-\int i_{bat}(t)dt-C_{unavail}(t)$，$c$ 代表电池容量的分配比例；k 表示从临时容量流到可获得容量的速率系数；α 表示电池容量特性分数阶阶次的大小，且有：$0<\alpha<1$，系数 $k'=\frac{k}{c(1-c)}$，SOC_0 为初始 SOC。

一种应用上述分数阶 KiBaM 电池模型的辨识方法，包括以下步骤：

步骤一：对动力电池进行恒流充放电实验，使动力电池恢复到充满电的状态，作为电池的初始状态；

步骤二：对动力电池进行小电流恒流放电实验，得到动力电池的初始容量 C_{init}；

步骤三：对动力电池充满电，进行大电流恒流放电实验，由于放电电流很大，很短时间就放电到放电截止电压，得到大电流下动力电池的容量 C_1，计算电池容量的分配比例；

步骤四：对动力电池进行两组不同倍率的恒流放电测试，获取此放电倍率下电池的不可用容量 $C_{unavail}$、放电时间 t_d 数据，依据电池放电结束判定条件，计算得到可辨识出参数 k' 和阶次的大小 α；

步骤五：通过以上测试和实验，得到被测动力电池的分数阶KiBaM电化学模型的参数。

所述辨识方法，还包括步骤六对动力电池进行其他倍率的恒流放电测试，获取此放电倍率下电池的不可用容量、放电时间数据；并与模型计算得到的不可用容量、放电时间做比较，验证模型的精确度。

电池放电结束判定条件为：

$$\begin{cases} y(t)=(C-I)\dfrac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \\ \delta_h(t)=(2C-\dfrac{I}{c})t^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't^{\alpha}) \end{cases} \quad (8)。$$

与现有技术相比，本发明的有益效果为：

（1） 本发明涉及的一种动力电池分数阶 KiBaM 电化学模型，考虑了电池的恢复效应和比容量效应，综合考虑动力学特性、电化学机理等特征因素，建立动力电池分数阶电化学模型，精确捕获动力电池的非线性容量特性和电池放电特性；能够很好地描述电池的非线性容量效应及运行时间等内部特征；

（2） 动力电池因其特殊的材料和化学特性，展现出了分数阶动力学行为，用整数阶描述电池特性其精度受到很大的限制，而采用分数阶微积分描述那些本身带有分数阶特性的对

象时，能更好地描述对象的本质特性及其行为；本发明首次将分数阶微积分应用在 KiBaM 电化学模型中，见解独到、极具创新；

（3） 分数阶微积分具有一定的记忆功能，更符合自然界普遍连续的朴素哲学观点，由于增加了分数阶阶数这一未知参数，模型获得了更多的自由度、更大的柔性和新意，因此动力电池分数阶 KiBaM 电化学模型获得了更高的精度、更好的动态性能和稳定性，为 SOC 估计提供了一个精确且易实现的电池模型。

附图说明

构成本申请的一部分的说明书附图用来提供对本申请的进一步理解，本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请，并不构成对本申请的不当限定。

图 1 为本发明动力电池分数阶 KiBaM 电化学模型结构示意图。

具体实施方式：

下面结合附图与实施例对本发明作进一步说明。

应该指出，以下详细说明都是例示性的，旨在对本申请提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本申请所属技术领域的普通技术人员通常理解的相同含义。

需要注意的是，这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式，而非意图限制根据本申请的示例性实施方式。如在这里所使用的，除非上下文另外明确指出，否则单数形式也意图包括复数形式，此外，还应当理解的是，当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时，其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

如图 1 所示为本发明公开的一种动力电池分数阶 KiBaM 电化学模型；所述分数阶 KiBaM 电池模型，包含两个部分，可以将其视作两个具有连通路的具有一定容积的容器，例如井。用于描述电池的非线性容量特性，分别叫做“临时容量”和“可获得容量”；所述的“临时容量”记为 y_1，表示放电时可直接获得的电量，其高度记为 h_1，表示电池的荷电状态 SOC；所述的“可获得容量”记为 y_2，表示不能直接获取的电量，其高度记为 h_2；并且，y_1 与 y_2 之和是电池的总容量；c 代表两个“井”之间电池容量的分配比例，显然存在以下关系：

$$\begin{cases} h_1(t) = \dfrac{y_1(t)}{c} \\ h_2(t) = \dfrac{y_2(t)}{1-c} \end{cases}; \quad (1)$$

所述分数阶 KiBaM 电池模型，当电池放电时，负载电流 i 从表示“临时容量”的 y_1 右下角

的管道流出，同时“可获得容量”y_2的电量通过 k 慢慢流入 y_1，且流出的速度要比从 y_2 流入 y_1 的速度快，y_1 下降更快，y_1 和 y_2 高度差随之增加；当电池停止放电时，y_1 的电量会有所回升，直到 y_1 和 y_2 高度相等，是电池恢复效应的体现；同时也说明了当放电电流越大时，所放出的电量就越小，体现了电池的非线性容量效应；

所述分数阶KiBaM电池模型，“临时容量”y_1和“可获得容量”y_2与代表电池荷电状态SOC的h_1和h_2之间关系可表示为：

$$\begin{cases} \dfrac{dy_1^{\alpha}}{dt^{\alpha}} = -i(t) + k[h_2(t) - h_1(t)] = -i(t) + k[\dfrac{y_2(t)}{1-c} - \dfrac{y_1(t)}{c}] \\ \dfrac{dy_2^{\alpha}}{dt^{\alpha}} = -k[h_2(t) - h_1(t)] = -k[\dfrac{y_2(t)}{1-c} - \dfrac{y_1(t)}{c}] \end{cases} \quad (2)$$

式中，“临时容量”记为y_1，表示放电时可直接获得的电量，其高度记为h_1，表示电池的荷电状态SOC；所述的“可获得容量”记为y_2，表示不能直接获取的电量，其高度记为h_2；并且，y_1与y_2之和是电池的总容量；c代表两个“井”之间电池容量的分配比例；k表示从“临时容量”流到“可获得容量”的速率系数；α 表示电池容量特性分数阶阶次的大小，且有：$0<\alpha<1$。

定义代表两个“井”的高度差为$\delta_h(t)$，显然：

$$\delta_h(t) = h_2(t) - h_1(t) \quad (3)$$

电池的不可用容量可以表示为：

$$C_{unavail}(t) = (1-c)\delta_h(t) \quad (4)$$

假设电池“临时容量”y_1和“可获得容量”y_2初始状态的容量y_{10}和y_{20}分别为：

$$\begin{cases} y_{10} = y_1(t_0) = cC; \\ y_{20} = y_2(t_0) = (1-c)C; \\ y_0 = y_{10} + y_{20} \end{cases} \quad (5)$$

式中，C表示电池的总容量。

当首次以电流I对电池进行恒电流放电，且放电时间区间$t_0 \le t \le t_d$，若取初始条件t_0=0，即高度差初始为零，然后静置一段时间$t_d < t \le t_r$，则公式（2）经拉氏变换和反拉氏变换，变换过程省略，整理可得：

$$\begin{cases} y_1(t) = c[y_1(0)+y_2(0)-I]\dfrac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}+[(1-c)(y_1(0)-I)-cy_2(0)]t^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't^{\alpha}) \\ y_2(t) = (1-c)[y_1(0)+y_2(0)-I]\dfrac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}-[(1-c)(y_1(0)-I)-cy_2(0)]t^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't^{\alpha}) \end{cases} \quad (6)$$

式中，$\Gamma(\alpha)$ 和 $E_{\alpha,\alpha}(z)$ 分别为分数阶微积分计算里常用的Gamma函数和Mittag-Leffler函数；且系数 $k' = \dfrac{k}{c(1-c)}$。

整理可得：

$$\begin{cases} y(t) = [y_1(0)+y_2(0)-I]\dfrac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \\ \delta_h(t) = [\dfrac{y_1(0)-I}{c}+\dfrac{y_2(0)}{1-c}]t^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't^{\alpha}) \end{cases} \quad (7)$$

代入初始条件（2），可化简为：

$$\begin{cases} y(t) = (C-I)\dfrac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \\ \delta_h(t) = (2C-\dfrac{I}{c})t^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't^{\alpha}) \end{cases} \quad (8)$$

由前面分析可知，电池完全放完电时，高度 $h_1 = 0$；此时电池的总剩余容量等于不可用容量：

$$y(t) = C_{unavail}(t) = (1-c)\delta_h(t) \quad (9)$$

电池的不可用容量 $C_{unavail}$ 可表示为：

$$C_{unavail}(t) = (1\text{-}c)\delta_h(t) = (1\text{-}c)(2C-\frac{I}{c})t^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't^{\alpha}) \quad (10)$$

动力电池的容量关系式可表示为：

$$C_{avail}(t) = C_{init} - \int i_{bat}(t)dt - C_{unavail}(t) \quad (11)$$

式中，$C_{\max}$、C_{avail}、$C_{unavail}$ 分别代表电池的初始容量、可用容量和不可用容量；其中不可用容量 $C_{unavail}$ 代表了由于电池非线性容量特性影响的电池非线性SOC变量；

显然，动力电池的荷电状态SOC可表示为：

$$SOC(t)=\frac{C_{avail}(t)}{C_{init}}=SOC_0-\frac{1}{C_{init}}[\int i_{bat}(t)dt+C_{unavail}(t)] \quad (12)$$

所述分数阶 KiBaM 电池模型，可以得到当前的电池总剩余容量 y(t)、可用容量$C_{avail}(t)$、不可用容量$C_{unavail}(t)$和电池荷电状态 SOC，因此可以精确捕获电池运行时间和动力电池非线性容量内特征。

一种应用上述分数阶 KiBaM 电池模型及其辨识方法，由电池模型可知，参数辨识主要包括电池的初始容量 y_0，代表两个“井”之间电池容量的分配比例 c，表示从“临时容量”流到“可获得容量”的速率系数 k；以及表示电池容量特性分数阶阶次的大小α，主要包括以下步骤：

步骤一：对动力电池进行恒流充放电实验，使动力电池恢复到充满电的状态，作为电池的初始状态；

步骤二：对动力电池进行小电流恒流放电实验，得到动力电池的初始容量C_{init}；

步骤三：对动力电池充满电，进行大电流恒流放电实验，由于放电电流很大，很短时间就放电到放电截止电压，得到大电流下动力电池的容量C_1；则电池模型的参数$c=\frac{C_1}{C_{init}}$；

步骤四：对动力电池进行两组不同倍率的恒流放电测试，获取此放电倍率下电池的不可用容量C_{unav}、放电时间t_d等数据；根据判断电池放电结束的公式（8）$C_{unavail}=(1-c)\delta_h(t_d)=(1-c)(2C-\frac{I}{c})t_d^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't_d^{\alpha})$，可辨识出参数$k'$和阶次的大小$\alpha$；

步骤五：通过以上测试和实验，可以得到被测动力电池的分数阶KiBaM电化学模型的参数；

步骤六：对动力电池进行其他倍率的恒流放电测试，获取此放电倍率下电池的不可用容量、放电时间等数据；并与模型计算得到的不可用容量、放电时间做比较，验证模型的精确度。

以上所述仅为本申请的优选实施例而已，并不用于限制本申请，对于本领域的技术人员来说，本申请可以有各种更改和变化。凡在本申请的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本申请的保护范围之内。

上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述，但并非对本发明保护范围的限制，所属领域技术人员应该明白，在本发明的技术方案的基础上，本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

1、一种计及非线性容量特性的分数阶 KiBaM 电池模型，其特征是：包括用于描述电池的非线性容量特性的临时容量与可获得容量部分，所述的临时容量部分表示放电时可直接获得的电量，表示电池的荷电状态 SOC；所述的可获得容量部分表示不能直接获取的电量，两部分相连通，当电池放电时，负载电流 i 从临时容量部分流出，同时获得容量部分的电量通过速率系数，利用临时容量与可获得容量部分的高度比、结合电池容量特性分数阶阶次的大小，表达电池的非线性容量效应和电池恢复效应。

2、如权利要求 1 所述的一种计及非线性容量特性的分数阶 KiBaM 电池模型，其特征是：所述的临时容量部分与可获得容量部分之和为电池的总容量。

3、如权利要求 1 所述的一种计及非线性容量特性的分数阶 KiBaM 电池模型，其特征是：当电池完全放电结束后，临时容量部分的高度为零。

4、如权利要求 1 所述的一种计及非线性容量特性的分数阶 KiBaM 电池模型，其特征是：所述的临时容量记为 y_1，表示放电时可直接获得的电量，其高度记为 h_1，表示电池的荷电状态 SOC；所述的可获得容量记为 y_2，表示不能直接获取的电量，其高度记为 h_2；并且，y1 与 y_2 之和是电池的总容量；c 代表两部分之间电池容量的分配比例，且存在以下关系：

$$\begin{cases} h_1(t)=\dfrac{y_1(t)}{c} \\ h_2(t)=\dfrac{y_2(t)}{1-c} \end{cases}。$$

5、如权利要求1所述的一种计及非线性容量特性的分数阶KiBaM电池模型，其特征是：临时容量y_1和可获得容量y_2与代表电池荷电状态SOC的h_1和h_2之间关系表示为：

$$\begin{cases} \dfrac{dy_1^{\alpha}}{dt^{\alpha}}=-i(t)+k[h_2(t)-h_1(t)]=-i(t)+k[\dfrac{y_2(t)}{1-c}-\dfrac{y_1(t)}{c}] \\ \dfrac{dy_2^{\alpha}}{dt^{\alpha}}=-k[h_2(t)-h_1(t)]=-k[\dfrac{y_2(t)}{1-c}-\dfrac{y_1(t)}{c}] \end{cases} \quad (2)$$

式中，临时容量记为y_1，表示放电时可直接获得的电量，其高度记为h_1，表示电池的荷电状态SOC；所述的可获得容量记为y_2，表示不能直接获取的电量，其高度记为h_2；并且，y_1与y_2之和是电池的总容量；c代表两个部分之间电池容量的分配比例；k表示从临时容量流到可获得容量的速率系数；α表示电池容量特性分数阶阶次的大小，且有：$0<\alpha<1$。

6、如权利要求 1 所述的一种计及非线性容量特性的分数阶 KiBaM 电池模型，其特征是：通过建立的分数阶 KiBaM 电池模型，获取当前的电池总剩余容量 $y(t)$、可用容量 $C_{avail}(t)$、不

可用容量$C_{unavail}(t)$和电池荷电状态SOC，以捕获电池运行时间和动力电池非线性容量内特征。

7、如权利要求1所述的一种计及非线性容量特性的分数阶KiBaM电池模型，其特征是：动力电池的荷电状态SOC表示为：

$$SOC(t)=\frac{C_{avail}(t)}{C_{init}}=SOC_0-\frac{1}{C_{init}}[\int i_{bat}(t)dt+C_{unavail}(t)]$$

其中，电池的不可用容量$C_{unavail}$表示为：

$$C_{unavail}(t)=(1-c)\delta_h(t)=(1-c)(2C-\frac{I}{c})t^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't^{\alpha}) \quad (10)$$

动力电池的容量关系式表示为：

$C_{avail}(t)=C_{init}-\int i_{bat}(t)dt-C_{unavail}(t)$，$c$代表电池容量的分配比例；$k$表示从临时容量流到可获得容量的速率系数；$\alpha$表示电池容量特性分数阶阶次的大小，且有：$0<\alpha<1$，系数$k'=\frac{k}{c(1-c)}$。

8、一种应用如权利要求 1-7 中任一项所述的分数阶 KiBaM 电池模型的参数辨识方法，其特征是：包括以下步骤：

步骤一：对动力电池进行恒流充放电实验，使动力电池恢复到充满电的状态，作为电池的初始状态；

步骤二：对动力电池进行小电流恒流放电实验，得到动力电池的初始容量C_{init}；

步骤三：对动力电池充满电，进行大电流恒流放电实验，由于放电电流很大，很短时间就放电到放电截止电压，得到大电流下动力电池的容量C_1，计算电池容量的分配比例；

步骤四：对动力电池进行两组不同倍率的恒流放电测试，获取此放电倍率下电池的不可用容量$C_{unavail}$、放电时间t_d数据，依据电池放电结束判定条件，计算得到可辨识出参数k'和阶次的大小α；

步骤五：通过以上测试和实验，得到被测动力电池的分数阶KiBaM电化学模型的参数。

9、如权利要求8所述的参数辨识方法，其特征是：还包括步骤六对动力电池进行其他倍率的恒流放电测试，获取此放电倍率下电池的不可用容量、放电时间数据；并与模型计算得

到的不可用容量、放电时间做比较，验证模型的精确度。

10、如权利要求 8 所述的参数辨识方法，其特征是：电池放电结束判定条件为：

$$\begin{cases} y(t) = (C - I)\dfrac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \\ \delta_h(t) = (2C - \dfrac{I}{c})t^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-k't^{\alpha}) \end{cases} \quad (8)。$$

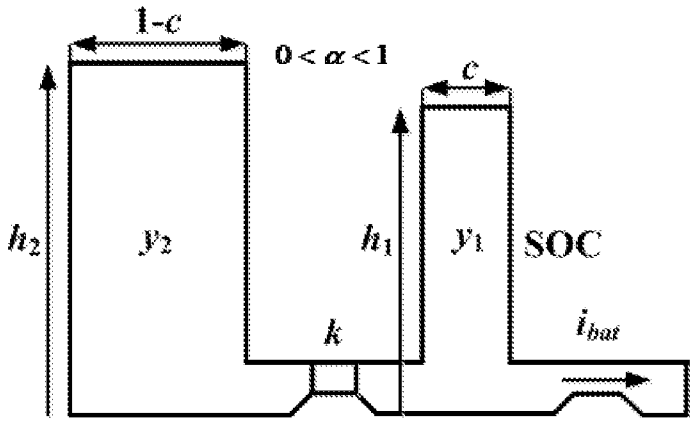


图 1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/106912

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 31/36 (2006.01) 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)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, USTXT, EPTXT, WOTXT: 山东大学, 张承慧, 商云龙, 张奇, 段彬, 崔纳新, 周忠凯, 电池, 模型, 恢复, 井, 动力, 分数, KiBam, cell, battery, model, well, recover+, kinetic, fraction+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 106855612 A (SHANDONG UNIVERSITY), 16 June 2017 (16.06.2017), claims 1-10, description, paragraphs [0007]-[0079], and figure 1	1-10
PX	CN 106896327 A (SHANDONG UNIVERSITY), 27 June 2017 (27.06.2017), description, paragraphs [0010]-[0178], and figure 1	1-10
A	JONGERDEN, M. R. et al., "Which Battery Model to Use?", IET Softw., 31 December 2009 (31.12.2009), 3(6), ISSN: 1751-8806, pages 445-457, section 3	1-10
A	CN 104392080 A (SHANDONG UNIVERSITY), 04 March 2015 (04.03.2015), entire document	1-10
A	CN 104361405 A (GPGC ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE), 18 February 2015 (18.02.2015), entire document	1-10
A	CN 103473446 A (STATE GRID CORPORATION OF CHINA et al.), 25 December 2013 (25.12.2013), entire document	1-10
A	CN 104112036 A (HUNAN UNIVERSITY OF ARTS AND SCIENCE), 22 October 2014 (22.10.2014), entire document	1-10

☒ 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	Date of mailing of the international search report
03 January 2018	18 January 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer TANG, Shaliang Telephone No. (86-10) 010-53962383

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/106912

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2013241467 A1 (SAHINOGLU, Z. et al.), 19 September 2013 (19.09.2013), entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/106912

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 106855612 A	16 June 2017	None	
CN 106896327 A	27 June 2017	None	
CN 104392080 A	04 March 2015	CN 104392080 B	11 July 2017
CN 104361405 A	18 February 2015	None	
CN 103473446 A	25 December 2013	None	
CN 104112036 A	22 October 2014	CN 104112036 B	01 March 2017
US 2013241467 A1	19 September 2013	US 8933673 B2	13 January 2015

国际检索报告

国际申请号 PCT/CN2017/106912

A. 主题的分类

G01R 31/36(2006.01)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）)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, USTXT, EPTXT, WOTXT: 山东大学，张承慧，商云龙，张奇，段彬，崔纳新，周忠凯，电池，模型，恢复，井，动力，分数，KiBam，cell, battery, model, well, recover+, kinetic, fraction+

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
PX	CN 106855612 A (山东大学) 2017年 6月 16日 (2017-06-16) 权利要求1-10，说明书第[0007]-[0079]段，图1	1-10
PX	CN 106896327 A (山东大学) 2017年 6月 27日 (2017-06-27) 说明书第[0010]-[0178]段，图1	1-10
A	JONGERDEN, M.R. 等. "Which battery model to use?" IET Softw., 第3卷，第6期，2009年 12月 31日 (2009-12-31), ISSN：1751-8806, 第445-457页，第3部分	1-10
A	CN 104392080 A (山东大学) 2015年 3月 4日 (2015-03-04) 全文	1-10
A	CN 104361405 A (广东电网有限责任公司电力科学研究院) 2015年 2月 18日 (2015-02-18) 全文	1-10
A	CN 103473446 A (国家电网公司 等) 2013年 12月 25日 (2013-12-25) 全文	1-10
A	CN 104112036 A (湖南文理学院) 2014年 10月 22日 (2014-10-22) 全文	1-10

☑ 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	国际检索报告邮寄日期
2018年 1月 3日	2018年 1月 18日

ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员
中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	汤莎亮
传真号 (86-10)62019451	电话号码 (86-10)010-53962383

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2017/106912

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
A	US 2013241467 A1 (SAHINOGLU, ZAFER 等) 2013年 9月 19日 (2013-09-19) 全文	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2017/106912

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	106855612	A	2017年 6月 16日	无			
CN	106896327	A	2017年 6月 27日	无			
CN	104392080	A	2015年 3月 4日	CN	104392080	B	2017年 7月 11日
CN	104361405	A	2015年 2月 18日	无			
CN	103473446	A	2013年 12月 25日	无			
CN	104112036	A	2014年 10月 22日	CN	104112036	B	2017年 3月 1日
US	2013241467	A1	2013年 9月 19日	US	8933673	B2	2015年 1月 13日