(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
2016 年 7 月 7 日 (07.07.2016)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2016/106501 A1

(51) 国际专利分类号:
G01R 31/36 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2014/095317

(22) 国际申请日: 2014 年 12 月 29 日 (29.12.2014)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: **中国科学院深圳先进技术研究院 (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY,CHINESE ACADEMY OF SCIENCES)** [CN/CN]; 中国广东省深圳市深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。 **前海中科协德科技(深圳)有限公司 (QIANHAI CHINESE-ACADEMY-OF-SCIENCES COOPERATION-INTEGRITY-COOPERATION TECHNOLOGY (SHENZHEN) CO., LTD)** [CN/CN]; 中国广东省深圳市宝安区兴业路互联网基地 B 区 2018, Guangdong 518000 (CN)。

(72) 发明人: **吴正斌 (WU, Zhengbin)**; 中国广东省深圳市深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。 **翁荣成 (WENG, Rongcheng)**; 中国广东省深圳市深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。 **孙嘉遥 (SUN, Jiayao)**; 中国广东省深圳市深圳大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。

(74) 代理人: **深圳市顺天达专利商标代理有限公司 (SHENZHEN STANDARD PATENT & TRADEMARK AGENT LTD.)**; 中国广东省深圳市福田区深南大道 1056 号银座国际大厦 810-815 室, Guangdong 518040 (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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, 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,

[见续页]

(54) **Title**: EQUIVALENT CIRCUIT MODEL OF BATTERY

(54) **发明名称** : 一种电池等效电路模型

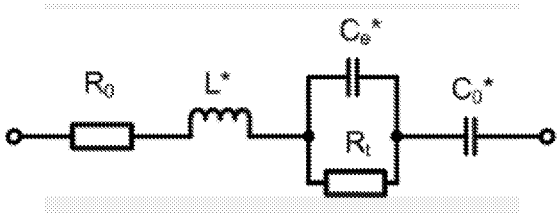


图 3 / FIG. 3

(57) **Abstract**: Provided is an equivalent circuit model of a battery, which is used for simulating an electrochemical impedance spectrum and dynamic charge and discharge characteristics of a battery. The equivalent circuit model comprises an electrical element having a complex parameter. The imaginary part of the complex parameter indicates loss characteristics related to frequency. An inductance element and a capacitor element have complex parameters. The result of the electrochemical impedance spectrum and the dynamic charge and discharge characteristics of a lithium iron phosphate battery that are calculated by using the equivalent circuit model have high accuracy with the error rate less than 5%.

(57) **摘要**: 提供一种电池等效电路模型，用于模拟电化学阻抗谱以及电池动态充放电特性，包括具有复数参数的电气元件，复数参数里的虚部表示与频率有关的损耗特性。电感元件和电容元件具有复数参数。采用所述等效电路模型计算磷酸铁锂电池电化学阻抗谱的结果以及动态充放电特性精度高，所有误差均小于 5%。

WO 2016/106501 A1

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))。

一种电池等效电路模型

技术领域

本发明涉及以锂离子电池为代表的电池技术领域，更具体的说，涉及一种电池等效电路模型。

背景技术

由于锂电池的使用寿命较长，并具有较高的能量密度以及安全性，因此对于新能源车辆、电网储能系统以及消费性电子产品而言，锂离子电池的需求日益增长。在实际应用中，获得锂离子电池精确的动态特性非常重要。一方面，在不同的实际工况（工作负载）和工作环境下，精确的动态电池模型对于电池的监测、诊断以及管理都是非常必要的。另一方面，复杂电气系统中的运行策略和结构优化，都取决于电池动态性能的模拟。与电化学模型相比，电池的等效电路模型的计算效率往往更高，因为电化学模型需要彻底理解和描述复杂的电化学过程和特征，而这样做有时并不完全可行。而将等效电路模型植入电池管理系统和网络中，对于电池系统产品应用则实际可行。

测量电化学阻抗（EI）谱被认为是在不破坏电池的前提下，宽频率范围内检测电池内部不同过程和特性的有效方法，。采用适当开发的等效电路模型来研究锂离子电池的电化学阻抗特性是至关重要的，可以用以研究锂离子电池中各部分及其界面的不同特性。最典型的等效电路模型包括直流内阻、RC单元（与电阻并联的恒相位元件或电容）、以及 Warburg（瓦尔堡）元件，分别表示欧姆电阻、双电层结构的效应以及嵌入电极中锂离子扩散所产生的效应。一些等效电路模型具有额外的电感元件，用于表征导线和电极之间的连接。更多的 RC 单元电路也可以用于更详细和精确地表征不同部分的不同影响。在至今为止已经报道的模型中，作为非电气元件的恒相位元件（CPE）通常用于计算电化学阻抗谱，以获得更精确的结果。然而，这会导致无法清楚

地解释其物理实质以及对于电池整体性能的影响。同时，在现有的等效电路模型中，并未考虑到与频率相关的电气损耗、以及电气耗损对电化学阻抗和锂离子电池的充放电特性的影响。

发明内容

本发明所要解决的技术问题在于：提供一种电池等效电路模型，以锂离子电池为代表的电池，解决了现有的电池等效电路模型无法准确解释非电气元件的物理实质、无法表征非电气元件对于电池整体性能的影响、并未考虑到与频率相关的电气损耗及其对电化学阻抗和电池的充放电特性的影响等问题。

本发明解决上述问题的技术方案在于：提供一种电池的等效电路模型，用于模拟电化学阻抗谱以及电池动态充放电特性，其特征在于，包括具有复数参数的电气元件，复数参数里的虚部表示与频率有关的损耗特性，其中，所述具有复数参数的电气元件包括电容元件。

优选的，在本发明提供的等效电路模型中，所述电容元件包含在电容单元中，所述等效电路模型包括至少一个所述电容单元，其中电容元件表示电池电极/电解液界面形成的双电层效应。每个所述电容单元中电容元件的复数参数的虚部表示其对应的损耗。

优选的，在本发明提供的等效电路模型中，所述电容单元的数量大于一个时，各个所述电容单元串联或者并联连接；所述电容单元中的中的至少一个还包括与其相并联的第一电阻元件，表示电池的自放电效应，所述第一电阻元件具有实数参数。

优选的，在本发明提供的等效电路模型中，所述第一电阻元件为一个电阻。

优选的，在本发明提供的等效电路模型中，还包括第二电阻，所述第二电阻具有实数参数，表示所述电池不随频率变化而改变的直流内阻。

优选的，在本发明提供的等效电路模型中，所述具有复数参数的电气元件还包括电感元件。

优选的，在本发明提供的等效电路模型中，所述电感元件包含在电感单元中，所述等效电路模型包括至少一个所述电感单元，所述电感单元与所述电容单元串联或者并联连接。

优选的，在本发明提供的等效电路模型中，所述电感单元中电感元件表示电池中导线和电极连接等方面的效应，其复数参数的虚部表示其对应的损耗。

优选的，在本发明提供的等效电路模型中，所述电感单元的数量大于一个时，各个所述电感单元串联或者并联连接；至少一个所述电感单元还包括与其相并联或者串联的第三电阻元件，所述第三电阻元件具有实数参数。

优选的，在本发明提供的等效电路模型中，所述第三电阻为一个电阻。

实施本发明，具有如下有益效果：本发明的等效电路模型包括的电感元件和电容元件具有复数参数，这些复数参数对应的虚部表示在该电池模型中的电气元件与频率有关的损耗特性。该等效电路模型不包括 Warburg（瓦尔堡）元件或恒相位元件（CPE），所有的电气元件具有物理意义；通过所提出的模型模拟锂离子电池的电化学阻抗谱，在频率从 0.01Hz 到 10kHz 的范围内，阻抗的误差小于 2mΩ；计算并分析所提出模型的电气元件参数，通过拟合计算得出的复数元件参数，使得可以通过所提出的等效电路模型对锂离子电池的动态充放电性能进行模拟，且模拟精度较高。

附图说明

为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述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例，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。

图 1 示出了本发明第一较佳实施例的电池等效电路模型；

图 2 示出了本发明第二较佳实施例的电池等效电路模型；

图 3 示出了本发明第三较佳实施例的电池等效电路模型；

图 4 示出了本发明第四较佳实施例的电池等效电路模型；

图 5 示出了本发明第五较佳实施例的电池等效电路模型；

图 6 示出了本发明第三较佳实施例的电池等效电路模型模拟在 50%的充电状态下 5.5Ah 的磷酸铁锂/石墨电池的电化学阻抗特性；

图 7 示出了本发明第三较佳实施例的电池等效电路模型模拟在 50%的充电状态下 5.5Ah 的磷酸铁锂/石墨电池的电化学阻抗的大小和相位；

图 8 示出了本发明第三较佳实施例的电池等效电路模型模拟在 5.5A 电流条件下从 50%充电状态放电 10s 的过程中 5.5Ah 的磷酸铁锂/石墨电池的模拟和测量电压曲线；

图 9（a）示出了本发明第三较佳实施例的等效电路模型模拟过程中，端电压的模拟和测量结果之间的对比；

图 9（b）示出了本发明第三较佳实施例的电池等效电路模型模拟过程中，5.5Ah 的磷酸铁锂/石墨电池在美国联邦城市行驶工况（Federal Urban Driving Schedule)条件下的模拟电压的绝对误差值|ΔV|。

具体实施方式

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的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。

现有的等效电路模型包括 Warburg（瓦尔堡）元件或恒相位元件（Constant Phase Element, CPE），无法准确解释非电气元件的物理实质、无法表征非电气元件对于电池整体性能的影响，同时，现有的等效电路模型并未考虑到与频率相关的电气损耗及其对电化学阻抗和电池的充放电特性的影响等问题。本发明的主要创新点在于：提供一种电池等效电路模型，电感元件和电容元件具有复数参数，可以反映出电气元件与频率有关的耗耗特性；该等效电路模型的所有元件的参数，均可以通过拟合测量的电化学阻抗特性计算得到，以在不同频率范围内分析其不同的影响。通过本发明等效电路模型使得电化学阻抗谱的模拟结果以及动态充放电特性精度高，所有误差均小于 5%。

下文将以锂离子电池为代表详细说明本发明的电池等效电路模型。当然，本发明的电池等效电路模型也完全适用于镍镉电池、镍氢电池、铅酸电池等其它电池种类。

图 1 示出了本发明第一较佳实施例的电池等效电路模型，如图 1 所示，本实施例中具有复数参数的电气元件为电容 C_e*，本发明中，所有复数变量均采用*标记。其中，电容 C_e*的虚部表示电池与频率有关的损耗特性。

在本实施例中，电容 C_e*包含在电容单元中，电容 C_e*与电阻 R_t 并联连接构成电容单元。在现有的等效电路模型中，恒相位元件通常与欧姆电阻并联，或者，欧姆电阻与瓦尔堡元件串联后与恒相位元件并联，形成一个 RC 单元，用以模拟电池实际情况。由于本发明的等效电路模型中，完全可以不包括瓦尔堡元件或恒相位元件，只需赋予电容 C_e*以复数参数，即可使得所有的电气元件具有物理意义。与现有的等效电路模型类似，为了提高模拟精度，电容 C_e*与第一电阻元件并联连接构成电容单元，第一电阻元件即本实施例中的电阻 R_t，具有实数参数。也可以理解为，第一电阻元件为非必须元件，在模拟精度要求不高的前提下，本实施例的等效电路模型可以不包括第一电阻元件，由电容 C_e*单独构成电容单元。

图 2 示出了本发明第二较佳实施例的电池等效电路模型，如图 2 所示，具有复数参数的电气元件还包括电感元件，电感 L*和电容 C_e*的虚部共同表示电池与频率有关的损耗特性。电感 L*具有复数参数的电感值，该电感值产生于导线和电极的连接。

在本实施例中，电感 L*单独构成电感单元。在现有的等效电路模型中，具有实数参数的电感用于与 RC 单元串联，用于表征导线和电极之间的连接。但是实数参数的电感无法表示频率变化对其损耗特性的影响。电容 C_e*与电阻 R_t 的并联后与电感 L*串联连接，具有复数参数的电感元件和电容元件能够准确的表示电气元件的物理意义。

图 3 示出了本发明第三较佳实施例的电池等效电路模型，如图 3 所示，等效电路模型包括至少一个电容单元。即，电容单元的数量不仅可以如图 1 中所示的一个，也可以为多个，每个所述电容单元中电容元件的复数参数对

应虚部表示对应元件随频率变化而改变的损耗特性。电感 L*表示导线和电极的连接效应，主要影响高频范围内的电化学阻抗特性；电容 C_e*与电阻 R_t的并联连接，主要影响中频范围内的电化学阻抗特性；电容 C_0*主要影响低频范围的电化学阻抗特性。

在本实施例中，当电容单元的数量大于一个时，各个电容单元串联或者并联连接，以适应复杂的电池构造情形。与前文类似，在模拟精度要求不高的前提下，相串联或者并联的各个电容单元可以只由具有复数参数的电容元件构成。电容单元中的至少一个还包括与电容元件相并联的第一电阻元件，用以提高模拟精度。所有电容单元可以都包括第一电阻元件，也可以只是部分包括第一电阻元件，当然，也可以都不包括第一电阻元件，每个电容单元表征各自不同的电化学阻抗特性，例如，分别表示不同频率范围内的电化学阻抗特性。

图 4 示出了本发明第四较佳实施例的电池等效电路模型，如图 4 所示，等效电路模型包括至少一个所述电感单元。即，电感单元的数量不仅可以如图 2 或者图 3 中所示的一个，也可以为多个，每个所述电感单元中电感元件的复数参数对应虚部表示导线和电极的连接效应的损耗。

在本实施例中，电感元件包含在电感单元中，L_0*与电阻 R_t'并联连接构成电感单元。与现有的等效电路模型类似，为了提高模拟精度，电感 L_0*与第三电阻元件并联连接构成电感单元，第三电阻元件即本实施例中的电阻 R_t'，具有实数参数。当然，电感 L_0*也可以与第三电阻元件串联连接构成电感单元。

也可以理解为，第三电阻元件在电感单元中为非必须元件，在电路情况不复杂的情形下，电感单元可以不包括第一电阻元件，如电感 L*，由电感 L*单独构成电感单元。电感单元的数量大于一个时，各个电感单元串联或者并联连接，所有电感单元可以都包括第三电阻元件，也可以只是部分包括第三电阻元件，当然，也可以都不包括第三电阻元件，每个电感单元表征各自不同的电化学阻抗特性，例如，分别表示不同频率范围内的电化学阻抗特性。

在本实施例中，包括有串联的两个电容单元，当然电容单元的数量也可以为多个。其中一个电容单元中，电容 C_e*与电阻 R_{t1} 的串联后，与电阻 R_{t2}

并联连接，以适应模拟精度要求下的复杂的电池构造情形。即，在一个电容单元内部，可以具有多个第一电阻元件，电容元件与其中一部分第一电阻元件串联后与另一部分的第一电阻元件并联。类似的，电感单元也可以具有此种结构，即在一个电感单元内部，可以具有多个第三电阻元件，电感元件与其中一部分第三电阻元件串联后与另一部分的第三电阻元件并联。

图 5 示出了本发明第五较佳实施例的电池等效电路模型，如图 5 所示，等效电路模型包括两个电感单元和两个电容单元，每个电感单元或者电容单元的组成与图 4 中相同。不同之处在于，一个电感单元与一个电感单元并联连接，该电感单元由电感 L*组成，该电容单元电容 C_0*和电阻 R_{t3} 并联组成。在本实施例的等效电路模型中，其它的电感单元和电容单元依次串联。类似的，在一个等效电路模型中包括有多个电感单元或者多个电容单元时，部分的电感单元并联连接后，与其它电感单元、电容单元相串联；或者，部分电容单元并联连接后，与其它电感单元、电容单元相串联，以分别适应复杂的电池构造情形。

在本实施例中，第三电阻由一个电阻 R_t'组成，L_0*与电阻 R_t'并联连接构成电感单元。该电阻 R_t'表示多个电阻串联和/或并联之后的电阻值。

下文将以本发明锂离子电池第三较佳实施例的等效电路模型为例，说明等效电路模型的工作原理。

在本发明锂离子电池第三较佳实施例的等效电路模型中，L*, C_e* 和 C_0* 可以由以下公式（1）、（2）、（3）来表示：

$$L^* = L + i \cdot L' \quad (1)$$

$$C_e^* = C_e + i \cdot C_e' \quad (2)$$

$$C_0^* = C_0 + i \cdot C_0' \quad (3)$$

其中，L、C_e 和 C_0 分别是 L*、 C_e* 和 C_0*的实部，并分别表示实数的电感和电容值。L'、C_e' 和 C_0'是对应的虚部，并分别表示相应元件的损耗。可选择地，L*、 C_e* 和 C_0*也可以由以下公式（4）、（5）、（6）来表示：

$$L^* = L \cdot (1 + i \cdot \tan\theta_L) \tag{4}$$

$$C_e^* = C_e \cdot (1 + i \cdot \tan\theta_{Ce}) \tag{5}$$

$$C_0^* = C_0 \cdot (1 + i \cdot \tan\theta_{C0}) \tag{6}$$

其中，θ_L、 θ_{Ce} 和 θ_{C0} 分别为 L^*、 C_e^* 和 C_0^*的相位角。

Z_L^*、Z_{Ce}^* 和 Z_{C0}^* 表示 L^*、 C_e^* 和 C_0^* 的复数阻抗，并且可以由公式（7）、（8）、（9）来表示：

$$Z_L^* = i \cdot 2\pi f \cdot L^* = -2\pi f L' + i \cdot 2\pi f L \tag{7}$$

$$Z_{Ce}^* = \frac{1}{i \cdot 2\pi f \cdot C_e^*} = \frac{-C_e' - iC_e}{2\pi f \cdot (C_e'^2 + C_e^2)} \tag{8}$$

$$Z_{C0}^* = \frac{1}{i \cdot 2\pi f \cdot C_0^*} = \frac{-C_0' - iC_0}{2\pi f \cdot (C_0'^2 + C_0^2)} \tag{9}$$

其中，f为频率。从公式（7）、（8）、（9）可以看出， L'和f 决定了电感L^*的电阻值；而电容C_e^* 和电容 C_0^*的电阻抗值为电容C_e^* 和电容 C_0^*的实部、虚部和f的函数。

根据图 3，锂离子电池的整个复数电化学阻抗 Z_B^*可以表示为：

$$Z_B^* = R_0 + Z_L^* + \frac{Z_{Ce}^* \cdot R_t}{Z_{Ce}^* + R_t} + Z_{C0}^* \tag{10}$$

Z_B^* 可以通过将公式(7)、(8)和(9)代入公式 (10)中计算得到。与先前所报道的等效电路模型相比，用于说明 Z_B^*的所有变量很显然都很重要，并具有物理意义。

基于这样的等效电路模型，通过将模拟的电化学阻抗特征与所测量的数据相拟合，可以更加明确地识别所有的电气元件参数，并认清这些电气元件参数对锂离子电池性能的影响。

为了表征模拟值和测量值之间的区别，在本文中引入了误差函数 E，见公式（11）：

$$E = \frac{\sum_{n=1}^{N}\left[X_t(n) - X_s(n)\right]^2}{\sum_{n=1}^{N}\left[X_t(n) - \overline{X_t}\right]^2} \tag{11}$$

这里，N是数据总数。X_t和X_s分别为测量数据和模拟数据。$\overline{X_t}$ 是X_t的平均值。误差函数E为模拟数据和测量数据之间差异函数，且E的范围为0~1。在本文中，误差函数不仅用于表征基于所提出的等效电路模型拟合的电化学阻抗特性的精度，而且用于表征锂离子电池的模拟动态性能和测试结果之间的一致性。其中，模拟动态性能通过等效电路模型的拟合元件参数来预测。

实验：

在本实施例中，以额定容量为 5.5Ah 的圆柱形 $LiFePO_4$ 电池商品为研究对象（32650，深圳市沃特玛电池有限公司（Shenzhen OptimumNano Energy Co., Ltd），深圳，中国）。该种锂离子电池在 50%充电状态下（SOC）的电化学阻抗谱通过电化学工作站（型号为 Reference 600，产自 Gamry Instruments 公司，沃明斯特，美国）在开路电压（交流电）为 5mV、频率范围为 0.01Hz~10kHz 的条件下进行测量。在频率低于 0.01Hz 的低频下进行电化学阻抗测量将会消耗更多的时间，并且有时通过实际的电池充放电流进行测量并不可行。因此，本文并不考虑低于 0.01Hz 的低频条件下对电池性能产生的影响。因此，对于磷酸铁锂电池，2 mHz 以下的扩散过程可以忽略。本文也没有研究相应的 Warburg 元件以及这些元件在所提出的等效电路模型中的影响。

电池的动态充放电性能是实际上通过电池测试系统（CT-4001-5V500A，新威尔有限公司，深圳，中国）进行测试。在每次试验之前，电池的充电状态维持在 50%。该电池以 0.2 的充电速率（C-rate）充电至 3.65V，随后充电电压保持在 3.65V 直到充电电流低于 55mA（0.01 充电速率）。等待 15min 后，

电池以 0.2 的放电速率进行放电，放电量为 2.75Ah。在每次试验开始前，等待 3 小时以实现 50%的充电状态。所有的准备以及试验步骤均在 25℃的环境温度下进行。

结果分析：

通过本实施例所提出的等效电路模型，通过模拟退火优化算法拟合测量数据可以获得磷酸铁锂电池的理论电化学阻抗谱。图 6 示出了拟合的电化学阻抗谱和测量的电化学阻抗谱之间的对比，如图 6 所示，在所研究的频率范围（从 0.01Hz 到 10kHz）内，拟合的阻抗在视觉上与测量值非常好地匹配。为了研究拟合结果的精度，图 7 示出了一定频率范围内拟合的电化学阻抗谱和测量的电化学阻抗谱特征的大小和相位的对比，如图 7 所示，在频率为 0.01Hz 时，两者之间的大小及相位差均达到最大值，分别为 2mΩ 和 3.28°。通过公式（11）计算可知，大小和相位的误差函数 E 分别为 4.87%和 1.51%。这证明了所提出的等效电路模型具有较高的电化学阻抗模拟精度。

图 3 所示的等效电路模型的拟合元件参数如表 1 所示。R_0 的纯欧姆阻值为 32.82mΩ，该电阻值不受频率的影响。L'的值为-48.01nH，表明了由于电池集电器和电缆所产生的电感损耗。L 的电感值为 321.1nH，主要用于使得 Z_B* 的虚部为正，并随着频率的增长，电化学阻抗接近 0.01Ω。C_0 主要在频率范围低于 1Hz 时影响电化学阻抗；该 C_0 值为 1321F，是 C_e（1.241F）数值的一千倍以上。其中 C_e 主要在高于 1Hz 的中频范围内影响电化学阻抗。C_0'的绝对值为 C_0 的 63.9%；而 C_e* 的虚部绝对值为其实部的 59.5%。这两个百分比反映了有关频率的损耗特性主要源于电化学反应以及电极界面电容。

表 1. 用于锂离子磷酸/石墨电池的等效电路模型元件的拟合参数

元件参数	拟合值
R_0, mΩ	32.82
L, nH	321.1

L', nH	-48.01
C_e, F	1.241
C_e', F	-0.7388
R_t, mΩ	3.779
C_0, F	1321
C_0', F	-844.2

在所研究的电池的时间域内的动态充放电性能也通过这种模型进行研究。图 8 示出了在电流为 5.5A 的条件下（放电速率为 1）放电 10s 的电池的模拟和测量的端电压（terminal voltage），如图 8 所示，在放电过程中以及放电过程后，通过所提出的模型预测的电压曲线与测量所得的曲线具有良好的一致性。电池的脉冲放电性能的误差函数 E 为 1.44%。按照联邦城市行驶工况（FUDS，Federal Urban Driving Schedules），对所研究的磷酸铁锂电池的动态性能进行进一步的研究。作为典型的工作周期，该 FUDS 持续 1372s，通常用于验证电池模型的精度。按照 FUDS 行使周期的预设功率通过电池测试系统产生实时充放电信号，并将该实时充放电信号应用在电池中。通过在时间域内所记录的电流数据，该等效电路模型可以计算出电池的终端电压曲线。图 9 示出了在整个动态过程中模拟值和测量值的终端电压的对比，如图 9 所示，最大的电压差为 0.0357V。通过公式（11）计算出 FUDS 周期的终端电压的误差为 3.32%。该结果进一步验证了所提出的模型具有极好的动态特性预测精度。

在发明提出的锂离子电池的等效电路模型包括电感和电容元件并具有复数参数，相比现有的模型，由于不具有 Warburg 元件或恒相位元件，在本模型中所有的电气元件具有物理意义。用于 $LiFePO_4$ 电池的、所提出的等效电路模型的所有元件的参数，均通过拟合测量的电化学阻抗特性计算得到，以在

不同频率范围内分析其不同的影响。通过本模型使得电化学阻抗谱的模拟结果以及动态充放电特性精度高，所有误差均小于 5%。

权 利 要 求 书

1、一种电池等效电路模型，用于模拟电化学阻抗谱以及电池动态充放电特性，其特征在于，包括具有复数参数的电气元件，复数参数里的虚部表示与频率有关的损耗特性，其中，所述具有复数参数的电气元件包括电容元件。

2、根据权利要求 1 所述的电池等效电路模型，其特征在于，所述电容元件包含在电容单元中，所述等效电路模型包括至少一个所述电容单元，其中所述电容元件表示电池电极/电解液界面形成的双电层效应，每个所述电容单元中电容元件的复数参数的虚部表示其对应的损耗。

3、根据权利要求 2 所述的电池等效电路模型，其特征在于，所述电容单元的数量大于一个时，各个所述电容单元串联或者并联连接；所述电容单元中的至少一个还包括与其相并联的第一电阻元件，表示电池的自放电效应，所述第一电阻元件具有实数参数。

4、根据权利要求 3 所述的电池等效电路模型，其特征在于，还包括第二电阻，所述第二电阻具有实数参数，表示所述锂离子电池不随频率变化而改变的直流内阻。

5、根据权利要求 1～4 中任一项所述的电池等效电路模型，其特征在于，所述具有复数参数的电气元件还包括电感元件。

6、根据权利要求 5 所述的电池等效电路模型，其特征在于，所述电感元件包含在电感单元中，所述等效电路模型包括至少一个所述电感单元，所述电感单元与所述电容单元串联或者并联连接。

7、根据权利要求 6 所述的电池等效电路模型，其特征在于，所述电感单元中电感元件表示电池中导线和电极连接的效应，其复数参数的虚部表示其对应的损耗。

8、根据权利要求 7 所述的电池等效电路模型，其特征在于，所述电感单元的数量大于一个时，各个所述电感单元串联或者并联连接；至少一个所述电感单元还包括与其相并联或者串联的第三电阻元件，所述第三电阻元件具有实数参数。

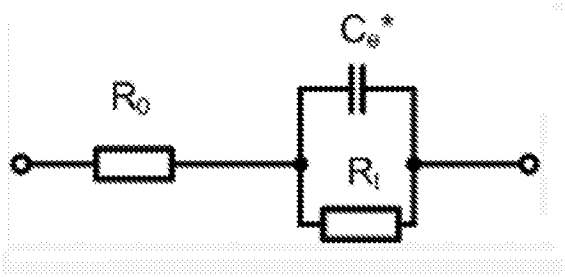


图 1

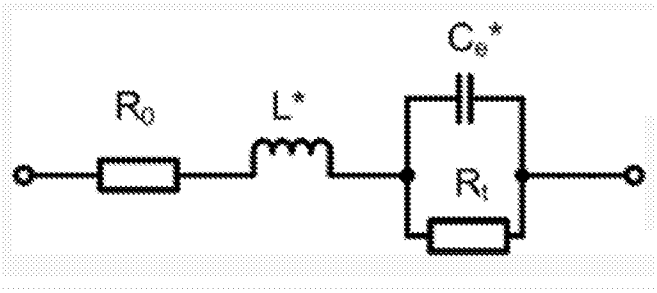


图 2

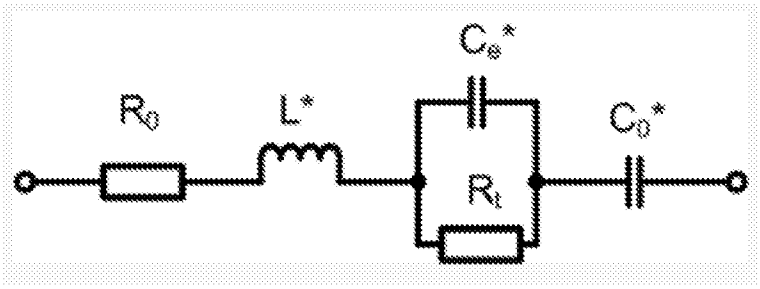


图 3

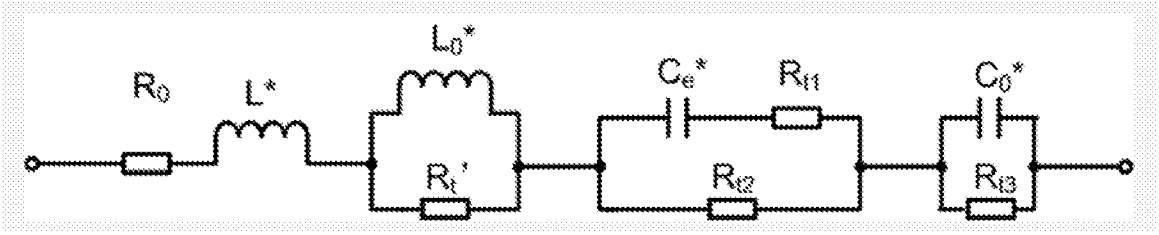


图 4

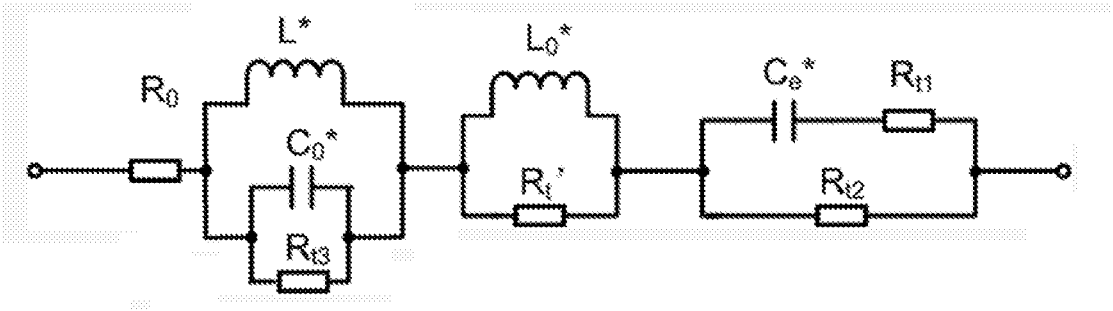

L*
L0*
R0
C0*
Rf3
Rf1'
Ce*
Rf1
Rf2

图 5

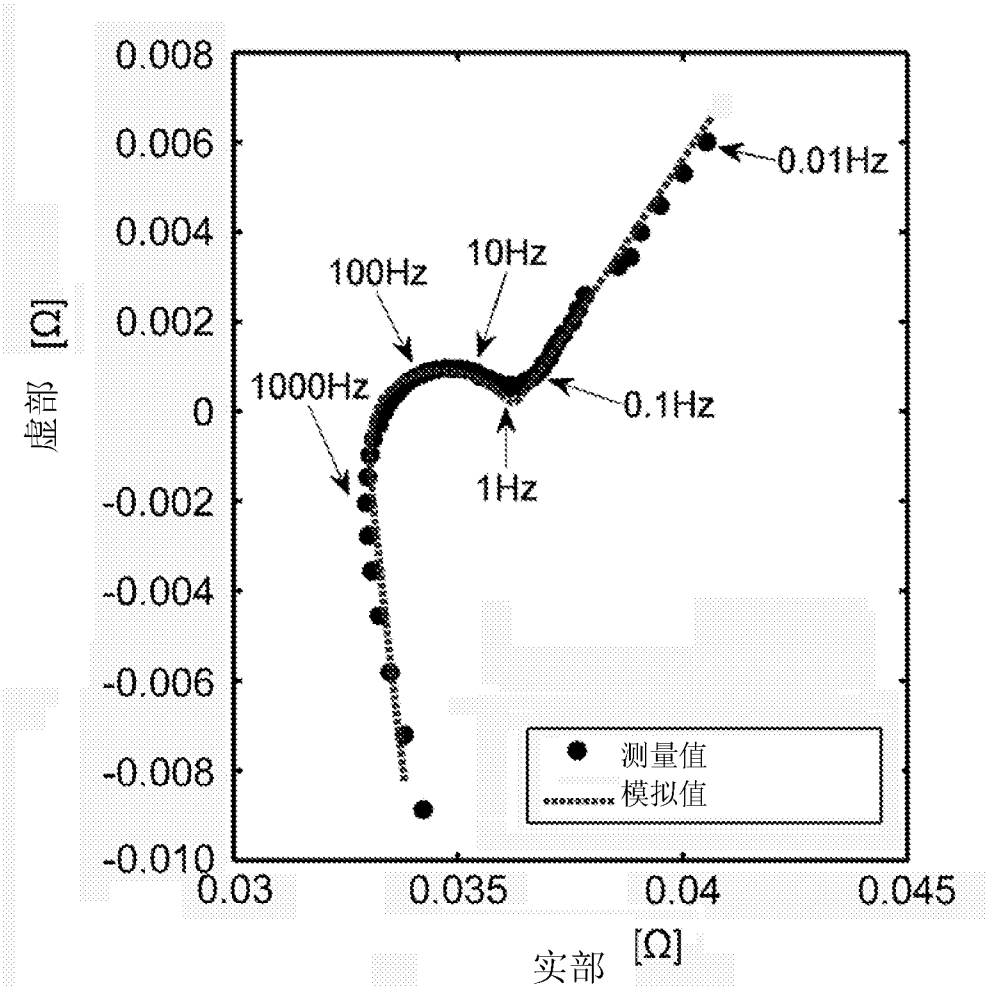

0.008
0.006
0.004
0.002
0
-0.002
-0.004
-0.006
-0.008
-0.010
虚部 [Ω]
0.03
0.035
0.04
0.045
实部 [Ω]
0.01Hz
100Hz
10Hz
1000Hz
0.1Hz
1Hz
测量值
模拟值

图 6

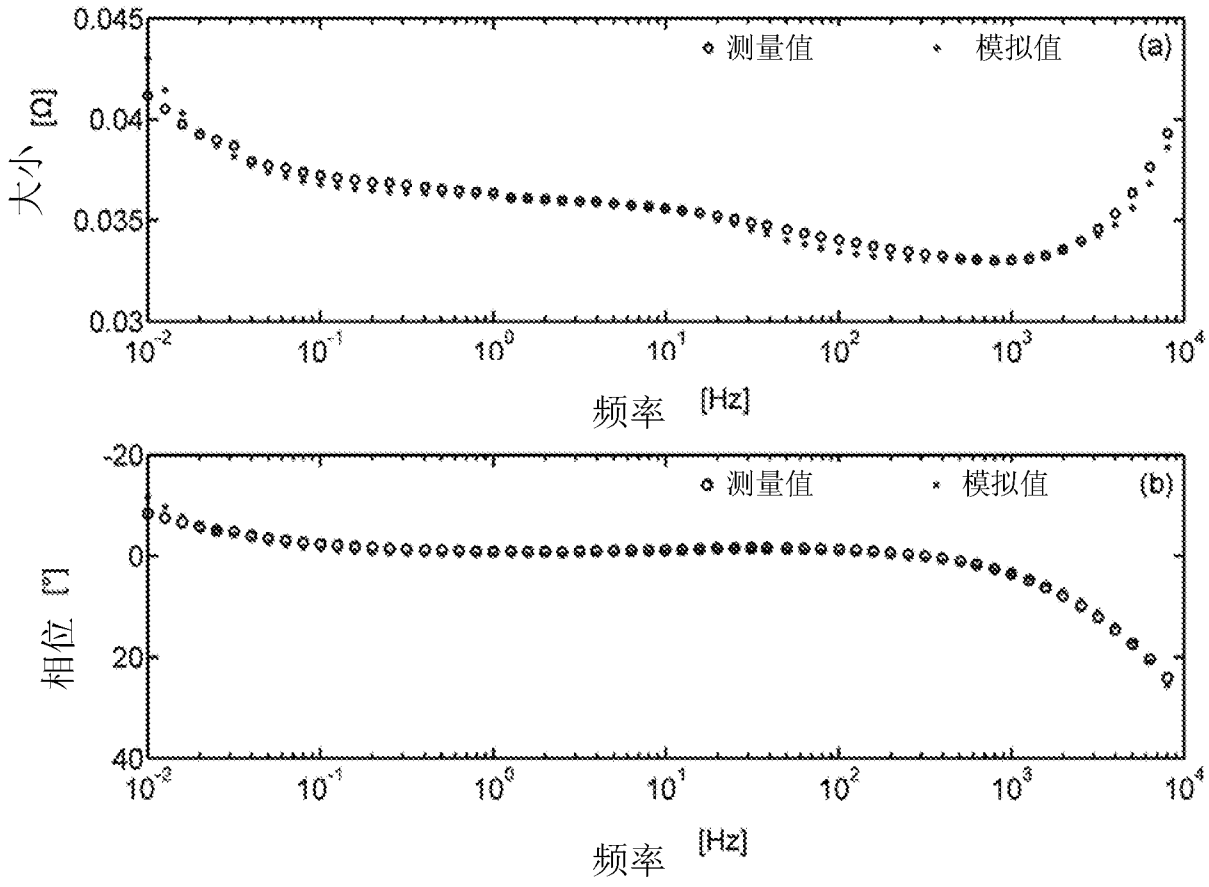

0.045
0.04
0.035
0.03
大小 [Ω]
测量值
模拟值
(a)
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
频率 [Hz]
-20
0
20
40
相位 [°]
测量值
模拟值
(b)
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
频率 [Hz]

图 7

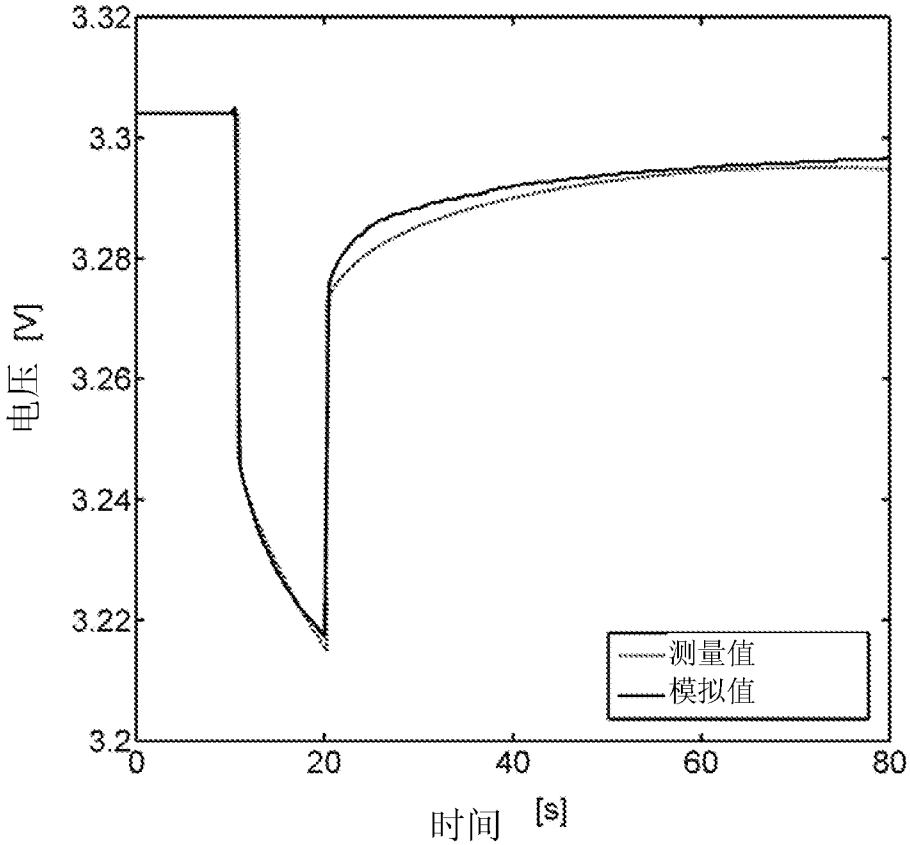


图 8

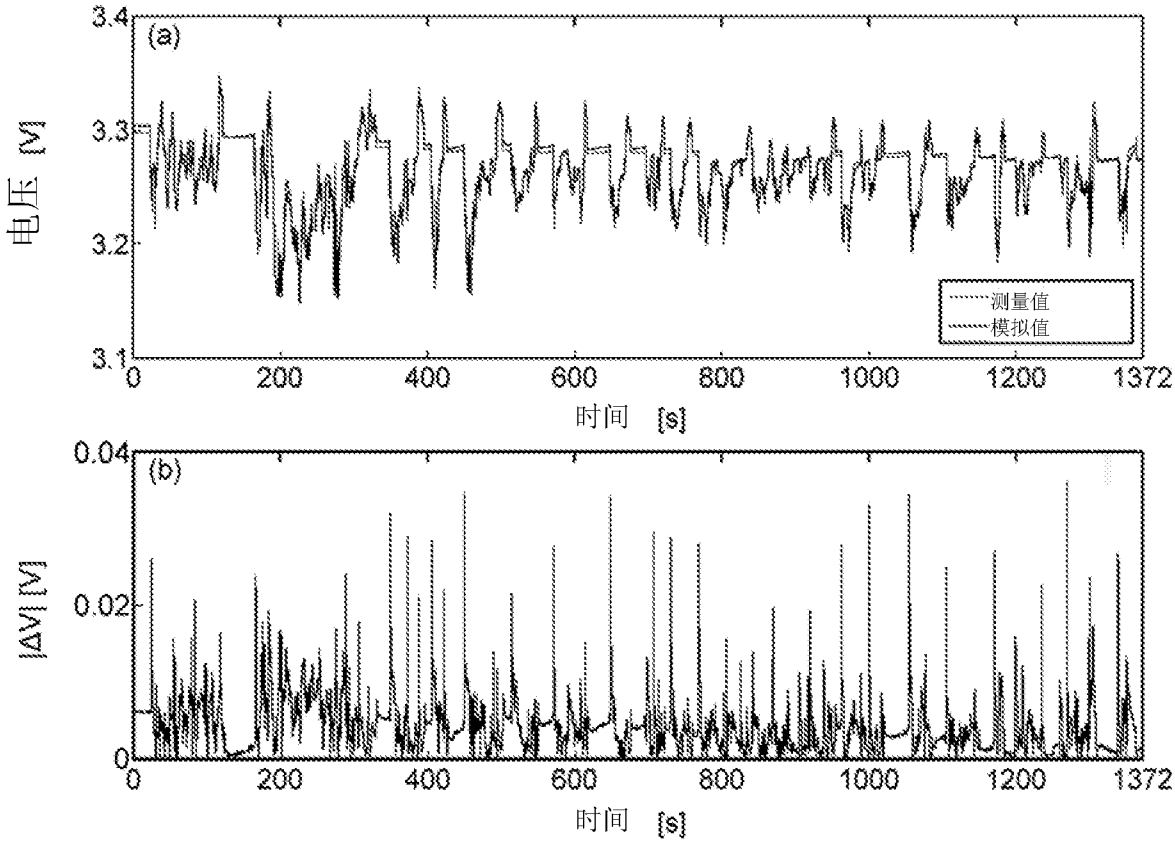

(a)
电压 [V]
3.4
3.3
3.2
3.1
0
200
400
600
800
1000
1200
1372
测量值
模拟值
时间 [s]
(b)
|ΔV| [V]
0.04
0.02
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1372
时间 [s]

图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2014/095317

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 31/-

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)

CNTXT, DWPI, SIPOABS: g01r31/36, fitting, model, simulat+, impedance, capacitor, frequency, imaginary part

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 102472798 A (FRENCH ALTERNATIVE ENERGIES AND ATOMIC ENERGY COMMISSION), 23 May 2012 (23.05.2012), description, paragraphs [0016]-[0021], and figures 2 and 3	1-8
A	CN 102866362 A (CHONGQING UNIVERSITY), 09 January 2013 (09.01.2013), the whole 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	Date of mailing of the international search report
20 September 2015 (20.09.2015)	**28 September 2015 (28.09.2015)**
Name and mailing address of the ISA/CN: 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 **WANG, Nanye** Telephone No.: (86-10) **62089300**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2014/095317

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102472798 A	23 May 2012	FR 2948771 A1	04 February 2011
		WO 2011012580 A1	03 February 2011
		JP 2013500487 A	07 January 2013
		KR 20120052334 A	23 May 2012
		EP 2460026 A1	06 June 2012
		JP 5674783 B2	25 February 2015
		US 2012130662 A1	24 May 2012
		FR 2948771 B1	26 August 2011
		CN 102472798 B	11 February 2015
CN 102866362 A	09 January 2013	CN 102866362 B	15 April 2015

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2014/095317

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)

G01R31/-

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）)

CNTXT, DWPI, SIPOABS:g01r31/36, 建模，拟合，模型，模拟，模式，阻抗，电容，频率，虚部，model, simulat+, impedance, capacitor, frequency, imaginary part

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
X	CN 102472798 A (法国原子能及替代能源委员会) 2012年 5月 23日 (2012-05-23) 说明书第[0016]-[0021]段，图2、3	1-8
A	CN 102866362 A (重庆大学) 2013年 1月 9日 (2013-01-09) 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	国际检索报告邮寄日期
2015年 9月 20日	2015年 9月 28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) 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 中国 传真号 (86-10)62019451	王南野 电话号码 (86-10)62089300

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2014/095317

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	102472798	A	2012年 5月 23日	FR	2948771	A1	2011年 2月 4日
				WO	2011012580	A1	2011年 2月 3日
				JP	2013500487	A	2013年 1月 7日
				KR	20120052334	A	2012年 5月 23日
				EP	2460026	A1	2012年 6月 6日
				JP	5674783	B2	2015年 2月 25日
				US	2012130662	A1	2012年 5月 24日
				FR	2948771	B1	2011年 8月 26日
				CN	102472798	B	2015年 2月 11日
CN	102866362	A	2013年 1月 9日	CN	102866362	B	2015年 4月 15日