

(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  
2025 年 1 月 9 日 (09.01.2025)



(10) 国际公布号  
**WO 2025/007993 A1**

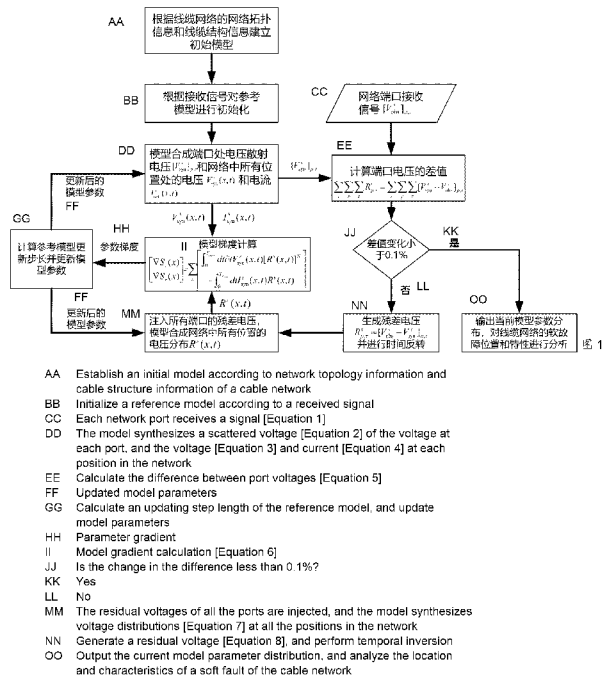
- (51) 国际专利分类号:  
**G01R 31/08** (2020.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2024/111081
- (22) 国际申请日: 2024 年 8 月 9 日 (09.08.2024)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:  
202310826536.8 2023年7月6日 (06.07.2023) CN
- (71) 申请人: 华南理工大学 (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510641 (CN)。
- (72) 发明人: 官权升 (GUAN, Quansheng); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510641 (CN)。 陈川旭 (CHEN, Chuanxu); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510641 (CN)。 金鑫 (JIN, Xin); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510641 (CN)。 施

展 (SHI, Zhan); 中国广东省广州市天河区五山路 381 号, Guangdong 510641 (CN)。

- (74) 代理人: 广州嘉权专利商标事务所有限公司 (JIAQUAN IP LAW); 中国广东省广州市天河区黄埔大道西 100 号富力盈泰广场 A 栋 910, Guangdong 510627 (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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, 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, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚

(54) Title: SOFT FAULT LOCATING AND IMAGING METHOD AND APPARATUS FOR TRANSMISSION LINE NETWORK, AND STORAGE MEDIUM

(54) 发明名称: 一种传输线网络软故障定位和成像方法、装置及存储介质



(57) Abstract: The present application belongs to power cable fault locating and fault imaging technology. Disclosed are a soft fault locating and imaging method and apparatus for a transmission line network, and a storage medium. The method comprises: providing a transmitter and a receiver at each port of a transmission line network, wherein the transmitter at the port transmits a detection signal; establishing a reference model and initializing same; injecting the detection signal into the reference model, and calculating a voltage signal; calculating the residual of port voltages, re-injecting the residual voltage, after being inverted in a time domain, into the reference model through the same port, and calculating a voltage distribution at each position; calculating the gradients of capacitance and resistance parameters in the reference model according to a voltage distribution caused by the detection signal and the distribution of the re-injected residual voltage; and calculating the sum of updating step lengths of capacitance and resistance in the reference model, and updating a model parameter distribution until a preset condition is reached. The present application gets rid of the limitations whereby the previous fault locating for a transmission line network is targeted only at point faults and the number thereof needs to be less than the number of ports.

(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, ME, 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)。

根据细则4.17的声明:

— 发明人资格(细则4.17(iv))

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。
- 在修改权利要求的期限届满之前进行, 在收到该修改后将重新公布(细则48.2(h))。
- 包括关于请求恢复一项或多项优先权要求的信息(细则26之二.3和48.2(b)(vii))。

**(57)** 摘要: 本申请公开了一种传输线网络软故障定位和成像方法、装置及存储介质, 属于电力线缆故障定位和故障成像技术。其中方法包括: 在传输线网络的端口设置发射器和接收器, 端口处的发射器发射探测信号; 建立参考模型并初始化; 在参考模型中注入探测信号, 并计算电压信号; 计算端口电压的残差, 并将残差电压在时域上进行反转后在相同端口处重新注入参考模型中, 计算每个位置处的电压分布; 根据探测信号导致的电压分布和重新注入的残差电压分布, 计算参考模型中电容和电阻参数的梯度; 计算参考模型中电容和电阻的更新步长和, 并对模型参数分布进行更新, 直到达到预设条件。本申请摆脱了以往传输线网络故障定位只能针对点故障且数量需要小于端口数目的限制。

# 一种传输线网络软故障定位和成像方法、装置及存储介质

## 技术领域

本申请涉及电力线缆故障定位和故障成像技术，尤其涉及一种传输线网络软故障定位和成像方法、装置及存储介质。

## 背景技术

电缆网络在现代电力系统和电气设备中广泛分布。然而，在系统运行过程中，电缆网络不可避免地会出现电缆老化、绝缘损坏等电缆软故障。这些软故障的进一步恶化将导致网络中出现短路或开路等硬故障，从而使系统发生故障。为了保证电力系统和设备的稳定运行，对电缆网络中的故障进行在线监测就显得尤为重要。

然而现有的硬故障监测方案已经非常成熟，可以实现在复杂线缆网络中对各种硬故障进行定位和特征分析。但是当线缆网络出现硬故障时，当前系统已经失效，甚至已经发生严重的电气火灾等事故。所以软故障的监测成为了现阶段的研究热点。

现有的软故障监测方案采用人工目视巡线监测，但由于电力传输线常常出现线路埋地或埋墙的空间分布，这使得目视的方案难以实行。所以现有方案在目视检查的同时会使用手持红外、超声或X光扫描设备进行线路故障排查。但此类方法费时费力，同时难以实现对线缆网络的实时监控，容易出现监测死角，无法全面预防线缆故障导致的电气火灾。

为了实现远程实时的线缆网络软故障监测，现有方案提出基于反射波测量的方案对软故障进行定位。该方案利用线缆发生软故障时注入的探测信号会发生反射这一特性来实现故障定位，但是故障的反射波容易淹没在分支的反射中，且多个软故障同时发生时会出现“伪故障点”的情况。

近年来，基于电磁时间反转的电力软故障定位方案被提出并应用于复杂网络的软故障定位中。该方案可以准确的定位故障，并且实现超分辨率的故障定位。但是在实际情况中软故障不仅存在长度不可忽略的特性，同时故障形成的原因也是绝缘层和导体铜芯两者老化共同导致的。这使得该方案难以应用在实际软故障定位和特征成像上。此外，现有方案都聚焦在故障的准确定位上，并不能实现故障关键特征（如电导率和介电常数）计算，这使得电力故障感知不够全面，火灾预警困难。因此，实际情况下的软故障定位和成像成为电力传输线实时监控的难点问题。

## 发明内容

为至少一定程度上解决现有技术中存在的技术问题之一，本申请的目的在于提供一种传输线网络软故障定位和成像方法、装置及存储介质。

本申请所采用的技术方案是：

一种传输线网络软故障定位和成像方法，包括以下步骤：

S1、在传输线网络的端口设置发射器和接收器，每个端口处的发射器轮流发射任意带宽受限的探测信号  $s = f(x, t)$ ，所有端口  $p$  处的接收器记录一段有限时长  $T_{\max}$  内的散射电压信号

$[V_{\text{obs}}^s]_{p, \tau}$ ，其中  $\tau \in [0, T_{\max}]$ ；

S2、利用传输线网络的线缆拓扑和线缆结构信息建立对应的传输线网络的参考模型，使用散射电压信号  $[V_{\text{obs}}^s]_{p, \tau}$  中各个端口处的首次到达波对模型参数进行模型初始化；

S3、在传输线网络的参考模型中注入相同的探测信号，并计算所有端口  $p$  处一段有限时长  $T_{\max}$  内的散射电压信号  $[V_{\text{syn}}^s]_{p, \tau}$  和传输线网络中每个位置处的电压  $V_{\text{syn}}^s(x, t)$  和  $I_{\text{syn}}^s(x, t)$ ；

S4、计算实际传输线网络和参考模型合成的端口电压的残差  $R_{p, \tau}^s = [V_{\text{obs}}^s - V_{\text{syn}}^s]_{p, \tau}$ ，并将残差电压  $R_{p, \tau}^s$  在时域上进行反转后在相同端口  $p$  处重新注入参考模型中，计算每个位置处的电压分布  $R^s(x, t)$ ；

S5、根据探测信号导致的电压分布  $V_{\text{syn}}^s(x, t)$  和重新注入的残差电压分布  $R^s(x, t)$ ，计算参考模型中电容  $c$  和电阻  $r$  参数的梯度  $\nabla S_c(x)$  和  $\nabla S_r(x)$ ；

S6、计算参考模型中电容  $c$  和电阻  $r$  的更新步长  $\zeta_c$  和  $\zeta_r$ ，并对模型参数分布进行更新；

S7、重复步骤 S3-S6，直到端口电压的残差  $R_{p, \tau}^s = [V_{\text{obs}}^s - V_{\text{syn}}^s]_{p, \tau}$  总和变动比例小于预设阈值，此时更新后参考模型中电容  $c$  和电阻  $r$  参数分布与实际传输线网络中参数分布近乎一致。

进一步地，步骤 S1 中所述每个端口处的发射器轮流发射探测信号的步骤，包括：

在发射器发射的同时，接收器开始进行记录；其中，下一个端口的探测信号注入时间需大于在上一个端口注入后的记录时长  $\tau$ 。

进一步地，所述传输线网络的参考模型采用端口已知的传输线缆结构和传输线网络拓扑信息进行构建；

模型中电阻  $r_0$ 、电容  $c_0$ 、电感  $l_0$  和电抗  $g_0$  的参数分布通过以下公式进行计算：

$$r_0 = \frac{1}{4\pi r_c^2 \sigma_c}$$

$$c_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(r_i / r_c)}$$

$$l_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_i}{r_c}$$

$$g_0 = \frac{2\pi\sigma_i}{\ln(r_i / r_c)}$$

其中,  $r_i$  和  $r_c$  分别是电缆的核心导体半径和屏蔽层半径,  $\sigma_c$  为电缆核心导体的电导率分布,  $\mu_0$  为电缆绝缘层的磁导率,  $\epsilon_0$  为电缆绝缘层的介电常数,  $\sigma_i$  为电缆绝缘层的电导率分布。

进一步地, 步骤 S2 中所述使用散射电压信号  $[V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}$  中各个端口处的首次到达波对模型参数进行模型初始化的步骤, 包括:

利用首次到达波的时延和幅值衰减对传输网络中电容和电阻参数进行初始化;

其中, 实际传输线网络和参考模型合成的端口  $p$  处的首次到达波之间的时延  $t_{\text{obs},p}^s$  和  $t_{\text{ref},p}^s$ 、幅值  $A_{\text{obs},p}^s$  和  $A_{\text{ref},p}^s$  的差的表达式如下:

$$\begin{aligned} t_{\text{obs},p}^s - t_{\text{ref},p}^s &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([t_{\text{obs},p}^s]_n - [t_{\text{ref},p}^s]_n) \\ A_{\text{obs},p}^s - A_{\text{ref},p}^s &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([A_{\text{obs},p}^s]_n - [A_{\text{ref},p}^s]_n) \\ &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([A_{\text{obs},p}^s]_n - [A_{\text{ref},p}^s]_n) - ([A_{\text{ref},p}^s]_n - [A_{\text{ref},p}^s]_n) \\ &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([aA_{\text{obs},p}^s]_n - [aA_{\text{ref},p}^s]_n) \end{aligned}$$

其中,  $C_{\text{dp}}$  是由直接传播路径中的电缆组成的集合,  $[\cdot]_n$  表示由第  $n$  条电缆造成的影响,  $A_{\text{ref},p}^s$  是无损耗参考模型下的第一到达波的振幅;  $aA_{\text{obs},p}^s$  和  $aA_{\text{ref},p}^s$  分别为实际传输线网络观测的电压和参考模型的合成电压的振幅衰减;

传输线网络模型初始化每条传输线上的电容  $c_{\text{ini},n}$  电阻  $r_{\text{ini},n}$  表示为:

$$c_{\text{ini},n} = c_{\text{ref},n} \cdot ([t_{\text{obs},p}^s]_n / [t_{\text{ref},p}^s]_n)^2$$

$$r_{\text{ini},n} = r_{\text{ref},n} \cdot \ln \frac{[aA_{\text{obs},p}^s / aA_{\text{ref},p}^s]_n}{([t_{\text{obs},p}^s]_n / [t_{\text{ref},p}^s]_n)^2}$$

其中,  $c_{\text{ref},n}$  和  $r_{\text{ref},n}$  分别为未发生故障时传输线网络中第  $n$  条线缆的电容和电阻。

进一步地, 步骤 S4 中残差电压  $R_{p,\tau}^s$  需在时域上进行反转后作, 为输入源在相同端口  $p$  处重新注入参考模型中, 在注入参考模型时需分别计算所有端口的残差电压  $R_{p,\tau}^s$  和归一化后的残差电压  $[R_{p,\tau}^s]^N$ , 注入参考模型后, 叠加形成的传输线网络模型中的电压分布  $R^s(x,t)$  和  $[R^s(x,t)]^N$ ;

其中归一化残差电压  $[R_{p,\tau}^s]^N$  的计算公式为:

$$[R_{p,\tau}^s]^N = \frac{\sqrt{\left(\sum_{\tau} [V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s]_{p,\tau}\right)^2}} [V_{\text{obs}}^s - V_{\text{syn}}^s]_{p,\tau}$$

其中,  $N$  表示归一化。

进一步地, 步骤 S5 中参考模型的电容  $c$  和电阻  $r$  参数的更新梯度  $\nabla S_c(x)$  和  $\nabla S_r(x)$  计算公式如下所示:

$$\begin{bmatrix} \nabla S_c(x) \\ \nabla S_r(x) \end{bmatrix} = \sum_s \begin{bmatrix} \int_0^{T_{\max}} dt \partial_t V_{\text{syn}}^s(x,t) [R^s(x,t)]^N \\ - \int_0^{T_{\max}} dt I_{\text{syn}}^s(x,t) R^s(x,t) \end{bmatrix}$$

。

进一步地, 步骤 S6 中电容  $c$  电阻  $r$  的更新步长  $\zeta_c$  和  $\zeta_r$  通过以下公式计算得到:

$$\zeta_c = \kappa_c \frac{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s(c + \kappa_c \nabla S_c, r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{\text{syn}}^s(c, r) - V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}}{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s(c + \kappa_c \nabla S_c, r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{\text{syn}}^s(c + \kappa_c \nabla S_c, r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}}$$

$$\zeta_r = \kappa_r \frac{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s(c, r + \kappa_r \nabla S_r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{\text{syn}}^s(c, r) - V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}}{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s(c, r + \kappa_r \nabla S_r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{\text{syn}}^s(c, r + \kappa_r \nabla S_r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}}$$

其中  $\kappa_c$  和  $\kappa_r$  是较小的超参数, 用于确保参数分布变化在线性变化范围内;  $\delta$  为位置与时

间上的狄拉克函数；

参考模型的参数分布的更新的表达式如下：

$$c_{upd} = \varepsilon - \zeta_c \nabla S_c$$

$$r_{upd} = r - \zeta_r \nabla S_r$$

更新后的模型将用于步骤 S2 中计算端口电压的残差  $R_{p,\tau}^s$ 。

进一步地，步骤 S7 中所述预设阈值根据任务进行改变；

在参考模型更新完成后，利用更新后的参考模型中电容  $c$  和电阻  $r$  的参数分布实现传输线软故障的精准定位和故障成像；以及结合传输线结构不发生改变的前提对传输线绝缘层和铜芯的介电系数、电导率进行计算。

本申请所采用的另一技术方案是：

一种传输线网络软故障定位和成像装置，包括：

至少一个处理器；

至少一个存储器，用于存储至少一个程序；

当所述至少一个程序被所述至少一个处理器执行，使得所述至少一个处理器实现如上所述方法。

本申请所采用的另一技术方案是：

一种计算机可读存储介质，其中存储有处理器可执行的程序，所述处理器可执行的程序在由处理器执行时用于执行如上所述方法。

本申请的有益效果是：本申请摆脱了以往传输线网络故障定位只能针对点故障且数量需要小于端口数目的限制，同时本申请能够提升传输线网络中软故障定位的精度性、消除伪故障定位，并实现网络中绝缘层和铜芯老化导致的软故障特性的解耦和成像。

## 附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例或者现有技术中的技术方案，下面对本申请实施例或者现有技术中的相关技术方案附图作以下介绍，应当理解的是，下面介绍中的附图仅仅为了方便清晰表述本申请的技术方案中的部分实施例，对于本领域的技术人员而言，在无需付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获取到其他附图。

图 1 是本申请实施例中一种基于全波反演的传输线网络软故障定位和成像方法的流程图；

图 2 是本申请实施例中传输线网络拓扑图；

图 3 是本申请实施例中设定的 RG-58 线缆的结构图；

图4是本申请实施例中的线缆电容与电阻分布成像图；其中图4(a)、图4(d)为本专利算法获得的电容和电阻分布图，图4(b)、图4(e)为实际线缆中的电容和电阻分布图。

### 具体实施方式

下面详细描述本申请的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，仅用于解释本申请，而不能理解为对本申请的限制。对于以下实施例中的步骤编号，其仅为了便于阐述说明而设置，对步骤之间的顺序不做任何限定，实施例中的各步骤的执行顺序均可根据本领域技术人员的理解来进行适应性调整。

在本申请的描述中，需要理解的是，涉及到方位描述，例如上、下、前、后、左、右等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本申请和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本申请的限制。

在本申请的描述中，若干的含义是一个或者多个，多个的含义是两个以上，大于、小于、超过等理解为不包括本数，以上、以下、以内等理解为包括本数。如果有描述到第一、第二只是用于区分技术特征为目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量或者隐含指明所指示的技术特征的先后关系。

此外，在本申请的描述中，除非另有说明，“多个”是指两个或两个以上。“和/或”，描述关联对象的关联关系，表示可以存在三种关系，例如，A和/或B，可以表示：单独存在A，同时存在A和B，单独存在B这三种情况。字符“/”一般表示前后关联对象是一种“或”的关系。

本申请的描述中，除非另有明确的限定，设置、安装、连接等词语应做广义理解，所属技术领域技术人员可以结合技术方案的具体内容合理确定上述词语在本申请中的具体含义。

为了解决现有技术的缺点和不足，本申请提供一种基于全波反演的传输线网络软故障定位和成像方法，该方法不仅可以在复杂的线缆网络中对有一定长度的多个软故障进行定位。此外，本申请在定位的同时可以对多个软故障的电容、电阻参数进行解耦，并实现不同参数的同时成像。该方法克服了现有方案无法对网络中多个故障进行定位和成像的难点，同时解耦了故障形成的多个参数，帮助现有电力线缆网络监测系统获取更加全面的线路软故障特征信息。

如图1所示，本实施例提供一种基于全波反演的传输线网络软故障定位和成像方法，本实施例中针对Y型线缆网络中出现三个具有一定长度的软故障进行定位和成像，三条线缆长

度分别设置为 100 米，正常线缆设置为 RG-58 线缆，单位电容为 101.85pF/m，单位电阻为 37.5mΩ/m。故障  $F_1$  设置为线缆 C1 上 50 到 70 米范围的软故障，其中绝缘层老化导致的电容为 130.58pF/m，导体铜芯老化导致的电阻为 375mΩ/m，故障  $F_2$  设置为线缆 C2 上为 20 到 50 米范围的软故障，绝缘层老化导致的电容为 174.1pF/m，故障  $F_3$  设置为线缆 C3 上为 70 到 80 米范围的软故障，导体铜芯导致的电阻为 750mΩ/m。三条线缆对应的电容电阻分布如图 4 中 (b) 和 (e) 所示。该方法具体包括以下步骤：

S1、在传输线网络的所有端口都设置一个接收器和一个发射器，三个发射器轮流发射高斯调制脉冲，其中心频率为 50MHz，电压幅度为 1V，所有接收器分别记录  $5\mu s$  的反射信号  $[V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}$ ，其中  $\tau \in [0, T_{\text{max}}]$ 。

在本实施例中，步骤 S1 中所述的每个端口处的发射器轮流发射任意带宽受限的探测信号  $s = f(x, t)$ ，在发射器发射时接收器同时开始进行记录。此外，下一个端口的探测信号注入时间需要大于在上一个端口注入后的记录时长  $5\mu s$ 。

S2、利用 Y 型传输线网络拓扑和 RG-58 结构信息建立对应的传输线网络参考模型，使用散射电压信号  $[V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}$  中各个端口处的首次到达波对模型参数进行模型初始化。

步骤 S2 中初始的参考模型建立一般采用端口已知的传输线缆结构和传输线网络拓扑信息进行建模，传输线网络拓扑如图 2 所示，线缆结构如图 3 所示。模型可以采用时域有限差分法 (FDTD)、鲍姆-刘-特谢 (BLT) 方程、SPICE 模型等方案。

在本实施例中，模型采用时域有限差分法 (FDTD) 方案，模型的电阻  $r_0$ 、电容  $c_0$ 、电感  $l_0$  和电抗  $g_0$  参数分布的获取可以根据以下公式进行计算：

$$r_0 = \frac{1}{4\pi r_c^2 \sigma_c}$$

$$c_0 = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln(r_i / r_c)}$$

$$l_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_i}{r_c}$$

$$g_0 = \frac{2\pi \sigma_i}{\ln(r_i / r_c)}$$

其中  $r_i$  和  $r_c$  分别是电缆的核心导体半径和屏蔽层半径, RG-58 电缆核心导体的电导率分布为  $\sigma_c = 5.175 \times 10^5 \Omega/m$ , 电缆绝缘层的磁导率为真空磁导率  $\mu_0$ 、介电常数为  $\varepsilon_{0r} = 2.34\varepsilon_0$ , 其中  $\varepsilon_0$  为真空介电系数, 和电导率分布  $\sigma_i$  忽略不计 (软故障情况下漏电电流较小可以忽略)。

另外, 进行的初始化主要是利用首次到达波的时延和幅值衰减对传输网络中电容和电阻参数进行初始化。实际传输线网络和参考模型合成的端口  $p$  处的首次到达波之间的时延  $t_{\text{obs},p}^s$  和  $t_{\text{ref},p}^s$  与幅值  $A_{\text{obs},p}^s$  和  $A_{\text{ref},p}^s$  的差异可以表示为如下形式:

$$\begin{aligned} t_{\text{obs},p}^s - t_{\text{ref},p}^s &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([t_{\text{obs},p}^s]_n - [t_{\text{ref},p}^s]_n) \\ A_{\text{obs},p}^s - A_{\text{ref},p}^s &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([A_{\text{obs},p}^s]_n - [A_{\text{ref},p}^s]_n) \\ &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([A_{\text{obs},p}^s]_n - [A_{\text{ref},p}^s]_n) - ([A_{\text{ref},p}^s]_n - [A_{\text{ref},p}^s]_n) \\ &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([aA_{\text{obs},p}^s]_n - [aA_{\text{ref},p}^s]_n) \end{aligned}$$

其中  $C_{\text{dp}}$  是由直接传播路径中的电缆组成的集合,  $[\cdot]_n$  表示由第  $n$  条电缆造成的影响,  $A_{\text{ref},p}^s$  是无损耗参考模型下的第一到达波的振幅。  $aA_{\text{obs},p}^s$  和  $aA_{\text{ref},p}^s$  分别为实际传输线网络观测的电压和参考模型的合成电压的振幅衰减。传输线网络模型初始化每条传输线上的电容  $c_{\text{ini},n}$  电阻  $r_{\text{ini},n}$  可以表示为:

$$\begin{aligned} c_{\text{ini},n} &= c_{\text{ref},n} \cdot ([t_{\text{obs},p}^s]_n / [t_{\text{ref},p}^s]_n)^2 \\ r_{\text{ini},n} &= r_{\text{ref},n} \cdot \ln \frac{[aA_{\text{obs},p}^s]_n / [aA_{\text{ref},p}^s]_n}{([t_{\text{obs},p}^s]_n / [t_{\text{ref},p}^s]_n)^2} \end{aligned}$$

S3、在传输线网络的参考模型中注入相同的高斯调制脉冲探测信号, 并计算所有端口处  $5 \mu s$  的散射电压信号  $[V_{\text{syn}}^s]_{p,\tau}$  和传输线网络中每个位置处的电压  $V_{\text{syn}}^s(x,t)$  和  $I_{\text{syn}}^s(x,t)$ 。

S4、计算实际传输线网络和参考模型合成的端口电压的残差  $R_{p,\tau}^s = [V_{\text{obs}}^s - V_{\text{syn}}^s]_{p,\tau}$ , 并将残差电压  $R_{p,\tau}^s$  在时域上进行反转后在相同端口  $p$  处重新注入参考模型中, 计算每个位置处的电压分布  $R^s(x,t)$ 。

步骤 S4 中残差电压  $R_{p,\tau}^s$  需要在时域上进行反转后作为输入源在相同端口  $p$  处重新注入参考模型中，在注入模型时需要分别计算所有端口的残差电压  $R_{p,\tau}^s$  和归一化后的残差电压  $[R_{p,\tau}^s]^N$  注入后叠加形成的传输线网络模型中的电压分布  $R^s(x,t)$  和  $[R^s(x,t)]^N$  进行记录，用于步骤 S4 的计算。其中归一化残差电压  $[R_{p,\tau}^s]^N$  可以表示为：

$$[R_{p,\tau}^s]^N = \frac{\sqrt{\left(\sum_{\tau} [V_{obs}^s]_{p,\tau}\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{\tau} [V_{syn}^s]_{p,\tau}\right)^2}} [V_{obs}^s - V_{syn}^s]_{p,\tau}$$

S5、利用探测信号导致的电压分布  $V_{syn}^s(x,t)$  和重新注入的残差电压分布  $R^s(x,t)$  来计算参考模型中电容  $c$  电阻  $r$  参数的梯度  $\nabla S_c(x)$  和  $\nabla S_r(x)$ 。

步骤 S5 中参考模型的电容  $c$  电阻  $r$  参数的更新梯度  $\nabla S_c(x)$  和  $\nabla S_r(x)$  计算公式如下所示：

$$\begin{bmatrix} \nabla S_c(x) \\ \nabla S_r(x) \end{bmatrix} = \sum_s \begin{bmatrix} \int_0^{T_{max}} dt \partial_t V_{syn}^s(x,t) [R^s(x,t)]^N \\ - \int_0^{T_{max}} dt I_{syn}^s(x,t) R^s(x,t) \end{bmatrix}$$

S6、计算参考模型中电容  $c$  电阻  $r$  的更新步长  $\zeta_c$  和  $\zeta_r$ ，并对模型参数分布进行更新。

步骤 S6 中电容  $c$  电阻  $r$  的更新步长  $\zeta_c$  和  $\zeta_r$  可以通过下面公式得到：

$$\zeta_c = \kappa_c \frac{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{syn}^s(c + \kappa_c \nabla S_c, r) - V_{syn}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{syn}^s(c, r) - V_{obs}^s]_{p,\tau}}{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{syn}^s(c + \kappa_c \nabla S_c, r) - V_{syn}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{syn}^s(c + \kappa_c \nabla S_c, r) - V_{syn}^s(c, r)]_{p,\tau}}$$

$$\zeta_r = \kappa_r \frac{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{syn}^s(c, r + \kappa_r \nabla S_r) - V_{syn}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{syn}^s(c, r) - V_{obs}^s]_{p,\tau}}{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{syn}^s(c, r + \kappa_r \nabla S_r) - V_{syn}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{syn}^s(c, r + \kappa_r \nabla S_r) - V_{syn}^s(c, r)]_{p,\tau}}$$

其中  $\kappa_c = 1 \times 10^{-2}$  和  $\kappa_r = 1 \times 10^{-8}$  是较小的超参数，用于确保参数分布变化在线性变化范围内。同时模型参数分布的更新可以表示为如下形式：

$$c_{upd} = c - \zeta_c \nabla S_c$$

$$r_{upd} = r - \zeta_r \nabla S_r$$

更新后的模型将用于步骤 S2 计算端口电压的残差  $R_{p,\tau}^s$ 。

S7、重复步骤 S3-S6 直到端口电压的残差  $R_{p,\tau}^s = [V_{\text{obs}}^s - V_{\text{syn}}^s]_{p,\tau}$  总和变动比例小于设定的阈值 0.1%，此时更新后参考模型中电容  $c$  和电阻  $r$  参数分布与实际传输线网络中参数分布近乎一致。

步骤 S7 中端口电压的残差  $R_{p,\tau}^s = [V_{\text{obs}}^s - V_{\text{syn}}^s]_{p,\tau}$  总和变动比例小于设定的阈值，阈值选取可以根据任务进行改变，通常选择变化比例小于当前总和的 0.1%。此外，可以利用更新后的参考模型中电容  $c$  和电阻  $r$  参数分布实现传输线软故障的精准定位和故障成像，其对应的电容电阻参数成像结果如图 4 中 (a) 和 (d) 所示。结合传输线结构不发生改变的前提可以对传输线绝缘层和铜芯的介电系数、电导率进行计算。

综上所述，本实施例方法相对于现有技术，至少具有如下的优点及效果：

(1) 本申请解决了复杂线缆网络中具有一定长度的多个电力线软故障定位和成像问题。这类软故障经常发生在实际生活中，如电力线绝缘层或导体铜芯都是较长一段线缆内都发生老化现象，解决此类问题更具有实际价值。

(2) 本申请克服了现有方法在线缆网络软故障定位中，故障数目不能大于线缆网络端口数目的限制。在实际生活中，复杂线缆网络通常会出现多个软故障点，同时具有一定长度的软故障可以等效为多个点故障的集合，这也是现有方案在线缆网络中出现具有一定长度的软故障时失效的主要因素。

(3) 本申请的在定位的同时可以实现故障的特征成像，而且可以解耦导体铜芯和绝缘层老化带来的影响，并同时两者进行成像，这使得线缆网络的软故障监测可以获得更加准确的故障信息，为线缆网络的维护提供了便利。

(4) 本申请在实施中不需要提前知道线缆网络的空间分布，这可以克服在实际中电力传输线常常掩埋在墙体内部所导致的巡线困难问题，本申请只需要在网络的端口处部署设备，并定时向所监测的线缆网络发送探测信号并记录，就可以实现实时的线缆网络软故障监测。

本实施例还提供一种传输线网络软故障定位和成像装置，包括：

至少一个处理器；

至少一个存储器，用于存储至少一个程序；

当所述至少一个程序被所述至少一个处理器执行，使得所述至少一个处理器实现如图 1 所示方法。

本实施例的一种传输线网络软故障定位和成像装置，可执行本申请方法实施例所提供的

一种传输线网络软故障定位和成像方法，可执行方法实施例的任意组合实施步骤，具备该方法相应的功能和有益效果。

本申请实施例还公开了一种计算机程序产品或计算机程序，该计算机程序产品或计算机程序包括计算机指令，该计算机指令存储在计算机可读存介质中。计算机设备的处理器可以从计算机可读存储介质读取该计算机指令，处理器执行该计算机指令，使得该计算机设备执行图 1 所示的方法。

本实施例还提供了一种存储介质，存储有可执行本申请方法实施例所提供的一种传输线网络软故障定位和成像方法的指令或程序，当运行该指令或程序时，可执行方法实施例的任意组合实施步骤，具备该方法相应的功能和有益效果。

在一些可选的实施例中，在方框图中提到的功能/操作可以不按照操作示图提到的顺序发生。例如，取决于所涉及的功能/操作，连续示出的两个方框实际上可以被大体上同时地执行或所述方框有时能以相反顺序被执行。此外，在本申请的流程图中所呈现和描述的实施例以示例的方式被提供，目的在于提供对技术更全面的理解。所公开的方法不限于本文所呈现的操作和逻辑流程。可选的实施例是可预期的，其中各种操作的顺序被改变以及其中被描述为较大操作的一部分的子操作被独立地执行。

此外，虽然在功能性模块的背景下描述了本申请，但应当理解的是，除非另有相反说明，所述的功能和/或特征中的一个或多个可以被集成在单个物理装置和/或软件模块中，或者一个或多个功能和/或特征可以在单独的物理装置或软件模块中被实现。还可以理解的是，有关每个模块的实际实现的详细讨论对于理解本申请是不必要的。更确切地说，考虑到在本文中公开的装置中各种功能模块的属性、功能和内部关系的情况下，在工程师的常规技术内将会了解该模块的实际实现。因此，本领域技术人员运用普通技术就能够在无需过度试验的情况下实现在权利要求书中所阐明的本申请。还可以理解的是，所公开的特定概念仅仅是说明性的，并不意在限制本申请的范围，本申请的范围由所附权利要求书及其等同方案的全部范围来决定。

所述功能如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用，可以存储在一个计算机可读存储介质中。基于这样的理解，本申请的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质中，包括若干指令用以使得一台计算机设备（可以是个人计算机，服务器，或者网络设备等）执行本申请各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括：U 盘、移动硬盘、只读存储器（ROM，Read-Only Memory）、随机存取存储器（RAM，

Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

在流程图中表示或在此以其他方式描述的逻辑和/或步骤,例如,可以被认为是用于实现逻辑功能的可执行指令的定序列表,可以具体实现在任何计算机可读介质中,以供指令执行系统、装置或设备(如基于计算机的系统、包括处理器的系统或其他可以从指令执行系统、装置或设备取指令并执行指令的系统)使用,或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用。就本说明书而言,“计算机可读介质”可以是任何可以包含、存储、通信、传播或传输程序以供指令执行系统、装置或设备或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用的装置。

计算机可读介质的更具体的示例(非穷尽性列表)包括以下:具有一个或多个布线的电连接部(电子装置),便携式计算机盘盒(磁装置),随机存取存储器(RAM),只读存储器(ROM),可擦除可编程只读存储器(EPROM或闪速存储器),光纤装置,以及便携式光盘只读存储器(CDROM)。另外,计算机可读介质甚至可以是可在其上打印所述程序的纸或其他合适的介质,因为可以例如通过对纸或其他介质进行光学扫描,接着进行编辑、解译或必要时以其他合适方式进行处理来以电子方式获得所述程序,然后将其存储在计算机存储器中。

应当理解,本申请的各部分可以用硬件、软件、固件或它们的组合来实现。在上述实施方式中,多个步骤或方法可以用存储在存储器中且由合适的指令执行系统执行的软件或固件来实现。例如,如果用硬件来实现,和在另一实施方式中一样,可用本领域公知的下列技术中的任一项或他们的组合来实现:具有用于对数据信号实现逻辑功能的逻辑门电路的离散逻辑电路,具有合适的组合逻辑门电路的专用集成电路,可编程门阵列(PGA),现场可编程门阵列(FPGA)等。

在本说明书的上述描述中,参考术语“一个实施方式/实施例”、“另一实施方式/实施例”或“某些实施方式/实施例”等的描述意指结合实施方式或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本申请的至少一个实施方式或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不一定指的是相同的实施方式或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何的一个或多个实施方式或示例中以合适的方式结合。

尽管已经示出和描述了本申请的实施方式,本领域的普通技术人员可以理解:在不脱离本申请的原理和宗旨的情况下可以对这些实施方式进行多种变化、修改、替换和变型,本申请的范围由权利要求及其等同物限定。

以上是对本申请的较佳实施进行了具体说明,但本申请并不限于上述实施例,熟悉本领域的技术人员在不违背本申请精神的前提下还可做作出种种的等同变形或替换,这些等同的变形或替换均包含在本申请权利要求所限定的范围内。

## 权 利 要 求 书

## 1. 一种传输线网络软故障定位和成像方法，包括以下步骤：

S1、在传输线网络的端口设置发射器和接收器，每个端口处的发射器轮流发射探测信号  $s = f(x, t)$ ，所有端口  $p$  处的接收器记录一段有限时长  $T_{\max}$  内的散射电压信号  $[V_{\text{obs}}^s]_{p, \tau}$ ，其中  $\tau \in [0, T_{\max}]$ ；

S2、利用传输线网络的线缆拓扑和线缆结构信息建立对应的传输线网络的参考模型，使用散射电压信号  $[V_{\text{obs}}^s]_{p, \tau}$  中各个端口处的首次到达波对模型参数进行模型初始化；

S3、在传输线网络的参考模型中注入探测信号，并计算所有端口  $p$  处一段有限时长  $T_{\max}$  内的散射电压信号  $[V_{\text{syn}}^s]_{p, \tau}$  和传输线网络中每个位置处的电压  $V_{\text{syn}}^s(x, t)$  和  $I_{\text{syn}}^s(x, t)$ ；

S4、计算实际传输线网络和参考模型合成的端口电压的残差  $R_{p, \tau}^s = [V_{\text{obs}}^s - V_{\text{syn}}^s]_{p, \tau}$ ，并将残差电压  $R_{p, \tau}^s$  在时域上进行反转后在相同端口  $p$  处重新注入参考模型中，计算每个位置处的电压分布  $R^s(x, t)$ ；

S5、根据探测信号导致的电压分布  $V_{\text{syn}}^s(x, t)$  和重新注入的残差电压分布  $R^s(x, t)$ ，计算参考模型中电容  $c$  和电阻  $r$  参数的梯度  $\nabla S_c(x)$  和  $\nabla S_r(x)$ ；

S6、计算参考模型中电容  $c$  和电阻  $r$  的更新步长  $\zeta_c$  和  $\zeta_r$ ，并对模型参数分布进行更新；

S7、重复步骤 S3-S6，直到端口电压的残差  $R_{p, \tau}^s = [V_{\text{obs}}^s - V_{\text{syn}}^s]_{p, \tau}$  总和变动比例小于预设阈值。

## 2. 根据权利要求 1 所述的一种传输线网络软故障定位和成像方法，其中，步骤 S1 中所述每个端口处的发射器轮流发射探测信号的步骤，包括：

在发射器发射的同时，接收器开始进行记录；其中，下一个端口的探测信号注入时间需大于在上一个端口注入后的记录时长  $\tau$ 。

## 3. 根据权利要求 1 所述的一种传输线网络软故障定位和成像方法，其中，所述传输线网络的参考模型采用端口已知的传输线缆结构和传输线网络拓扑信息进行构建；

模型中电阻  $r_0$ 、电容  $c_0$ 、电感  $l_0$  和电抗  $g_0$  的参数分布通过以下公式进行计算：

$$r_0 = \frac{1}{4\pi r_c^2 \sigma_c}$$

$$c_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(r_i / r_c)}$$

$$l_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_i}{r_c}$$

$$g_0 = \frac{2\pi\sigma_i}{\ln(r_i / r_c)}$$

其中,  $r_i$  和  $r_c$  分别是电缆的核心导体半径和屏蔽层半径,  $\sigma_c$  为电缆核心导体的电导率分布,  $\mu_0$  为电缆绝缘层的磁导率,  $\epsilon_0$  为电缆绝缘层的介电常数,  $\sigma_i$  为电缆绝缘层的电导率分布。

4. 根据权利要求 1 所述的一种传输线网络软故障定位和成像方法, 其中, 步骤 S2 中所述使用散射电压信号  $[V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}$  中各个端口处的首次到达波对模型参数进行模型初始化的步骤, 包括:

利用首次到达波的时延和幅值衰减对传输网络中电容和电阻参数进行初始化;

其中, 实际传输线网络和参考模型合成的端口  $p$  处的首次到达波之间的时延  $t_{\text{obs},p}^s$  和  $t_{\text{ref},p}^s$ 、幅值  $A_{\text{obs},p}^s$  和  $A_{\text{ref},p}^s$  的差的表达式如下:

$$\begin{aligned} t_{\text{obs},p}^s - t_{\text{ref},p}^s &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([t_{\text{obs},p}^s]_n - [t_{\text{ref},p}^s]_n) \\ A_{\text{obs},p}^s - A_{\text{ref},p}^s &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([A_{\text{obs},p}^s]_n - [A_{\text{ref},p}^s]_n) \\ &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([A_{\text{obs},p}^s]_n - [A_{\text{ref},p}^s]_n) - ([A_{\text{ref},p}^s]_n - [A_{\text{ref},p}^s]_n) \\ &= \sum_{n \in C_{\text{dp}}} ([aA_{\text{obs},p}^s]_n - [aA_{\text{ref},p}^s]_n) \end{aligned}$$

其中,  $C_{\text{dp}}$  是由直接传播路径中的电缆组成的集合,  $[\cdot]_n$  表示由第  $n$  条电缆造成的影响,

$A_{\text{ref},p}^s$  是无损耗参考模型下的第一到达波的振幅;  $aA_{\text{obs},p}^s$  和  $aA_{\text{ref},p}^s$  分别为实际传输线网络观测的电压和参考模型的合成电压的振幅衰减;

传输线网络模型初始化每条传输线上的电容  $c_{\text{ini},n}$  电阻  $r_{\text{ini},n}$  表示为:

$$c_{\text{ini},n} = c_{\text{ref},n} \cdot ([t_{\text{obs},p}^s]_n / [t_{\text{ref},p}^s]_n)^2$$

$$r_{\text{ini},n} = r_{\text{ref},n} \cdot \ln \frac{[aA_{\text{obs},p}^s / aA_{\text{ref},p}^s]_n}{([t_{\text{obs},p}^s]_n / [t_{\text{ref},p}^s]_n)^2}$$

其中,  $c_{\text{ref},n}$  和  $r_{\text{ref},n}$  分别为未发生故障时传输线网络中第  $n$  条线缆的电容和电阻。

5. 根据权利要求 1 所述的一种传输线网络软故障定位和成像方法, 其中, 步骤 S4 中残差电压  $R_{p,\tau}^s$  需在时域上进行反转后作, 为输入源在相同端口  $p$  处重新注入参考模型中, 在注入参考模型时需分别计算所有端口的残差电压  $R_{p,\tau}^s$  和归一化后的残差电压  $[R_{p,\tau}^s]^N$ , 注入参考模型后, 叠加形成的传输线网络模型中的电压分布  $R^s(x,t)$  和  $[R^s(x,t)]^N$ :

其中归一化残差电压  $[R_{p,\tau}^s]^N$  的计算公式为:

$$[R_{p,\tau}^s]^N = \frac{\sqrt{\left(\sum_{\tau} [V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s]_{p,\tau}\right)^2}} [V_{\text{obs}}^s - V_{\text{syn}}^s]_{p,\tau}$$

其中,  $N$  表示归一化。

6. 根据权利要求 1 所述的一种传输线网络软故障定位和成像方法, 其中, 步骤 S5 中参考模型的电容  $c$  和电阻  $r$  参数的更新梯度  $\nabla S_c(x)$  和  $\nabla S_r(x)$  计算公式如下所示:

$$\begin{bmatrix} \nabla S_c(x) \\ \nabla S_r(x) \end{bmatrix} = \sum_s \begin{bmatrix} \int_0^{T_{\max}} dt \partial_t V_{\text{syn}}^s(x,t) [R^s(x,t)]^N \\ - \int_0^{T_{\max}} dt I_{\text{syn}}^s(x,t) R^s(x,t) \end{bmatrix}$$

。

7. 根据权利要求 1 所述的一种传输线网络软故障定位和成像方法, 其中, 步骤 S6 中电容  $c$  电阻  $r$  的更新步长  $\zeta_c$  和  $\zeta_r$  通过以下公式计算得到:

$$\zeta_c = \kappa_c \frac{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s(c + \kappa_c \nabla S_c, r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{\text{syn}}^s(c, r) - V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}}{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s(c + \kappa_c \nabla S_c, r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{\text{syn}}^s(c + \kappa_c \nabla S_c, r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}}$$

$$\zeta_r = \kappa_r \frac{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s(c, r + \kappa_r \nabla S_r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{\text{syn}}^s(c, r) - V_{\text{obs}}^s]_{p,\tau}}{\sum_s \sum_p \sum_{\tau} [V_{\text{syn}}^s(c, r + \kappa_r \nabla S_r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}^T \delta(x - x_p, t - \tau) [V_{\text{syn}}^s(c, r + \kappa_r \nabla S_r) - V_{\text{syn}}^s(c, r)]_{p,\tau}}$$

其中  $\kappa_c$  和  $\kappa_r$  是超参数； $\delta$  为位置与时间上的狄拉克函数；

参考模型的参数分布的更新的表达式如下：

$$c_{upd} = \varepsilon - \zeta_c \nabla S_c$$

$$r_{upd} = r - \zeta_r \nabla S_r$$

更新后的模型将用于步骤 S2 中计算端口电压的残差  $R_{p,\tau}^s$ 。

8. 根据权利要求 1 所述的一种传输线网络软故障定位和成像方法，其中，步骤 S7 中所述预设阈值根据任务进行改变；

在参考模型更新完成后，利用更新后的参考模型中电容  $c$  和电阻  $r$  的参数分布实现传输线软故障的精准定位和故障成像；以及结合传输线结构不发生改变的前提对传输线绝缘层和铜芯的介电系数、电导率进行计算。

9. 一种传输线网络软故障定位和成像装置，包括：

至少一个处理器；

至少一个存储器，用于存储至少一个程序；

当所述至少一个程序被所述至少一个处理器执行，使得所述至少一个处理器实现权利要求 1-8 任一项所述方法。

10. 一种计算机可读存储介质，其中存储有处理器可执行的程序，所述处理器可执行的程序在由处理器执行时用于执行如权利要求 1-8 任一项所述方法。

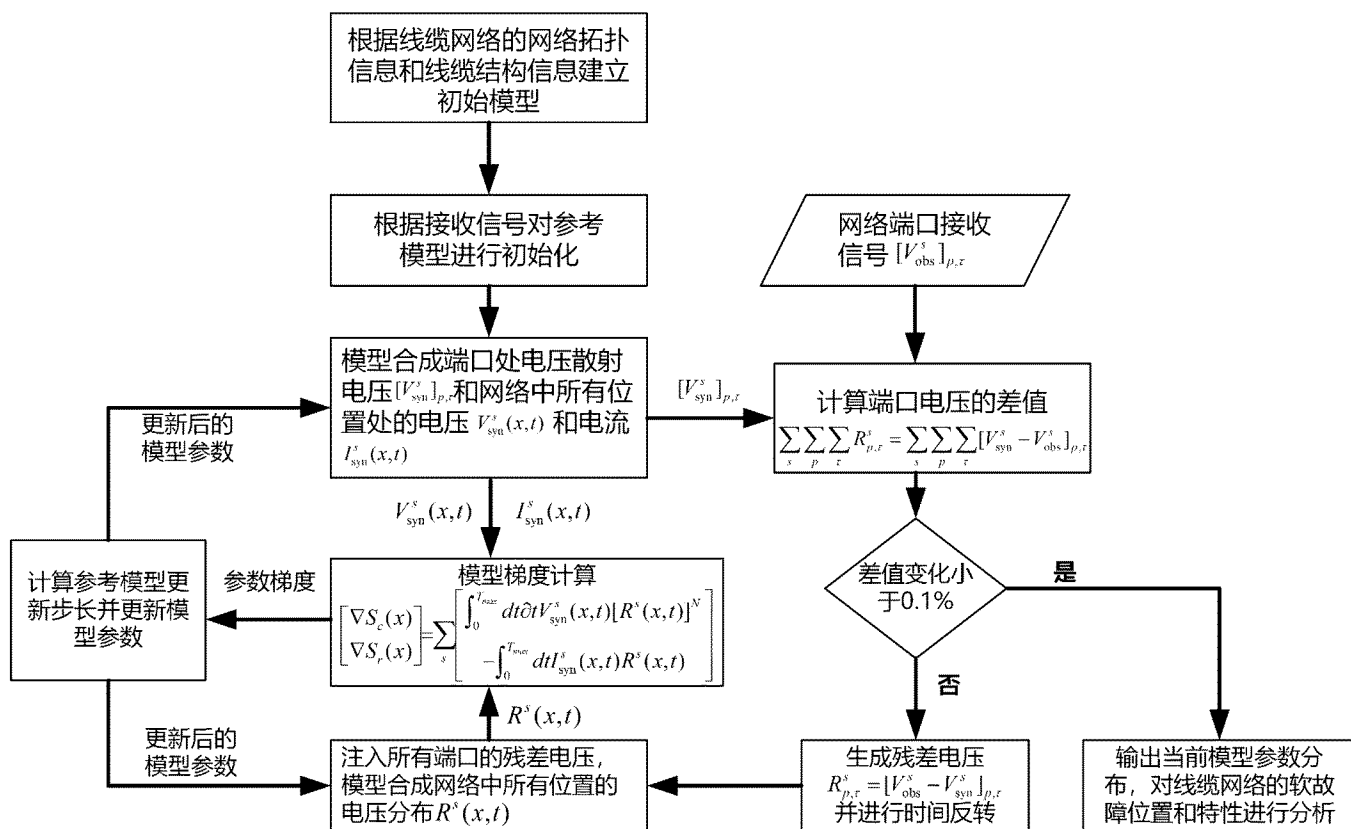


图 1

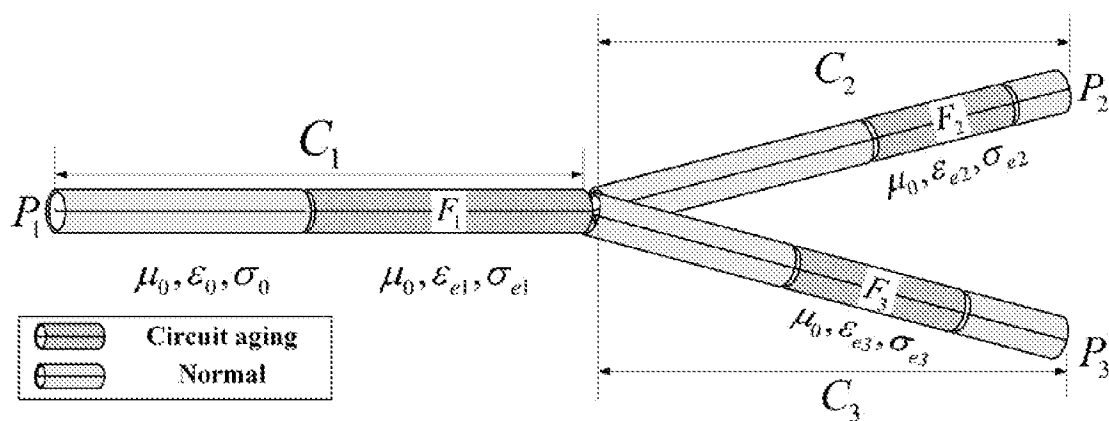


图 2

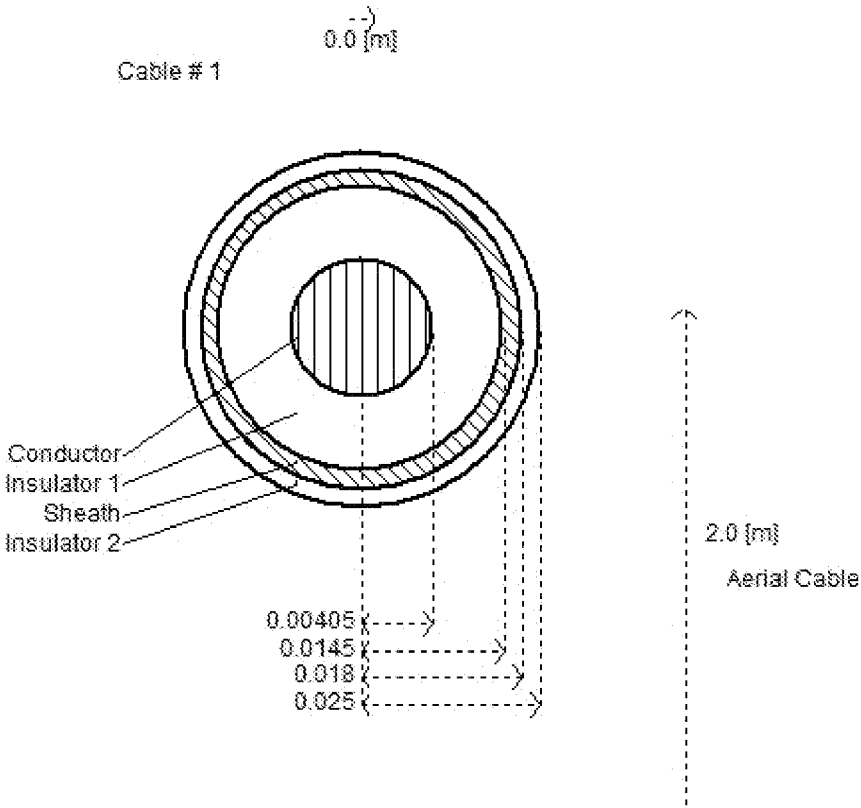


图 3

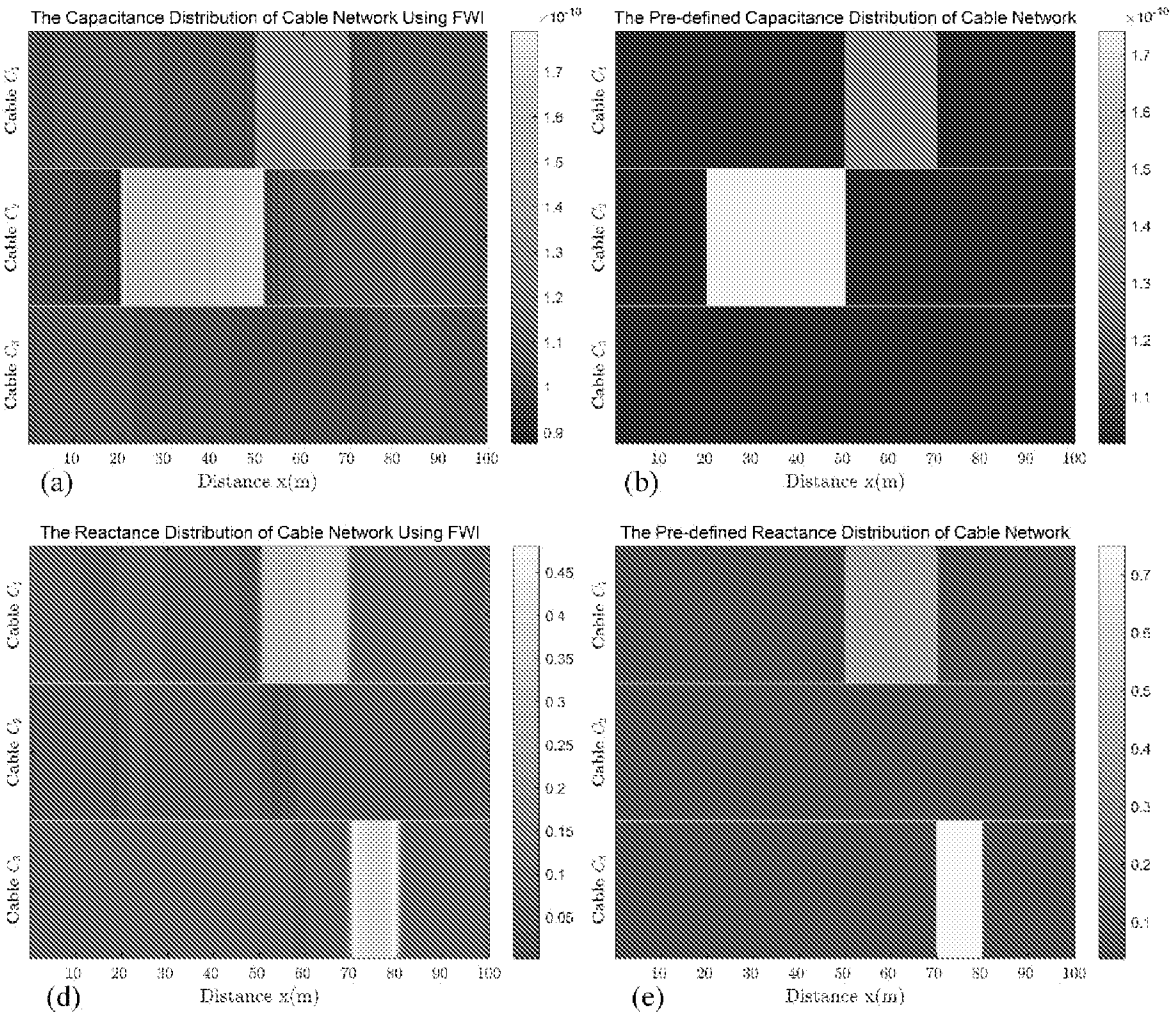


图 4

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2024/111081

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G01R31/08(2020.01)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)

IPC: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)

CNTXT, ENTXTC, Web of science: 华南理工大学, 官权升, 陈川旭, 金鑫, 施展, 步长, 残差, 电压, 反射法, 软故障, 模型, 电容, 电阻, VISS, WDR, line-like soft, localization, wavenumber domain reflectometry, volterra, fault detection

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                    | Relevant to claim No. |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| PX        | CN 116930677 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 24 October 2023 (2023-10-24)<br>claims 1-10, description, paragraphs 0070-0116, and figures 1-4 | 1-10                  |
| A         | US 2021278452 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 09 September 2021 (2021-09-09)<br>description, paragraphs 0060-0125, and figures 1-5                 | 1-10                  |
| A         | CN 113049918 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 29 June 2021 (2021-06-29)<br>entire document                                                          | 1-10                  |
| A         | CN 103954886 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 30 July 2014 (2014-07-30)<br>entire document                                                    | 1-10                  |
| A         | CN 115575859 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 06 January 2023 (2023-01-06)<br>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

“D” document cited by the applicant in the international application

“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

14 November 2024

Date of mailing of the international search report

20 November 2024

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/  
CN)  
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,  
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                                                                       | Relevant to claim No. |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | CN 114019309 A (CHENGDU POWER SUPPLY COMPANY OF STATE GRID SICHUAN ELECTRIC POWER COMPANY) 08 February 2022 (2022-02-08)<br>entire document                                                                                                                                                                                              | 1-10                  |
| A         | CHEN, Chuanxu et al. "2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)"<br><i>Localization and Imagination of Line-like Soft Faults in Transmission Lines</i> ,<br>31 May 2023 (2023-05-31), pages 1539-1543<br>Transmission Lines Model with Line-like Soft, Wavenumber Domain Reflectometry,<br>Simulation Results | 1-10                  |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.  
**PCT/CN2024/111081**

| Patent document cited in search report |            |    | Publication date (day/month/year) | Patent family member(s) |            |    | Publication date (day/month/year) |
|----------------------------------------|------------|----|-----------------------------------|-------------------------|------------|----|-----------------------------------|
| CN                                     | 116930677  | A  | 24 October 2023                   | None                    |            |    |                                   |
| US                                     | 2021278452 | A1 | 09 September 2021                 | WO                      | 2020001966 | A1 | 02 January 2020                   |
|                                        |            |    |                                   | US                      | 11333699   | B2 | 17 May 2022                       |
|                                        |            |    |                                   | FR                      | 3082947    | A1 | 27 December 2019                  |
|                                        |            |    |                                   | FR                      | 3082947    | B1 | 12 June 2020                      |
|                                        |            |    |                                   | EP                      | 3814789    | A1 | 05 May 2021                       |
|                                        |            |    |                                   | EP                      | 3814789    | B1 | 03 August 2022                    |
| CN                                     | 113049918  | A  | 29 June 2021                      | CN                      | 113049918  | B  | 22 March 2024                     |
| CN                                     | 103954886  | A  | 30 July 2014                      | None                    |            |    |                                   |
| CN                                     | 115575859  | A  | 06 January 2023                   | None                    |            |    |                                   |
| CN                                     | 114019309  | A  | 08 February 2022                  | CN                      | 114019309  | B  | 10 March 2023                     |

A. 主题的分类

G01R31/08(2020.01)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)

IPC: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))

CNTEXT,ENTXTC,Web of science:华南理工大学, 官权升,陈川旭,金鑫,施展,步长,残差,电压,反射法,软故障,模型, 电容, 电阻, VISS,WDR,line-like soft,localization,wavenumber domain reflectometry,volterra, fault detection

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 116930677 A (华南理工大学) 2023年10月24日 (2023 - 10 - 24)<br>权利要求1-10, 说明书第0070-0116段, 图1-4              | 1-10    |
| A   | US 2021278452 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 2021年9月9日 (2021 - 09 - 09)<br>说明书第0060-0125段, 图1-5 | 1-10    |
| A   | CN 113049918 A (哈尔滨工业大学) 2021年6月29日 (2021 - 06 - 29)<br>全文                                          | 1-10    |
| A   | CN 103954886 A (华南理工大学) 2014年7月30日 (2014 - 07 - 30)<br>全文                                           | 1-10    |
| A   | CN 115575859 A (华南理工大学) 2023年1月6日 (2023 - 01 - 06)<br>全文                                            | 1-10    |
| A   | CN 114019309 A (国网四川省电力公司成都供电公司) 2022年2月8日 (2022 - 02 - 08)<br>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

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“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

2024年11月14日

国际检索报告邮寄日期

2024年11月20日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局  
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

马慧媛

电话号码 (+86) 010-53962407

PCT/ISA/210 表(第2页) (2022年7月)

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |         |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 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       | Chuanxu Chen 等. "2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)"<br>Localization and Imagination of Line-like Soft Faults in Transmission Lines,<br>2023年5月31日 (2023 - 05 - 31), 第1539-1543页<br>TRANSMISSION LINES MODEL WITH LINE-LIKE SOFT、WAVENUMBER<br>DOMAIN REFLECTOMETRY、SIMULATION RESULTS | 1-10    |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |         |

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号  
PCT/CN2024/111081

| 检索报告引用的专利文件 |            |    | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利 |            |    | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|------------|----|----------------|------|------------|----|----------------|
| CN          | 116930677  | A  | 2023年10月24日    | 无    |            |    |                |
| US          | 2021278452 | A1 | 2021年9月9日      | WO   | 2020001966 | A1 | 2020年1月2日      |
|             |            |    |                | US   | 11333699   | B2 | 2022年5月17日     |
|             |            |    |                | FR   | 3082947    | A1 | 2019年12月27日    |
|             |            |    |                | FR   | 3082947    | B1 | 2020年6月12日     |
|             |            |    |                | EP   | 3814789    | A1 | 2021年5月5日      |
|             |            |    |                | EP   | 3814789    | B1 | 2022年8月3日      |
| CN          | 113049918  | A  | 2021年6月29日     | CN   | 113049918  | B  | 2024年3月22日     |
| CN          | 103954886  | A  | 2014年7月30日     | 无    |            |    |                |
| CN          | 115575859  | A  | 2023年1月6日      | 无    |            |    |                |
| CN          | 114019309  | A  | 2022年2月8日      | CN   | 114019309  | B  | 2023年3月10日     |