



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110320434 B

(45) 授权公告日 2020.09.25

(21) 申请号 201910593655.7

G01R 31/54 (2020.01)

(22) 申请日 2019.07.03

G01R 31/58 (2020.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G01R 27/02 (2006.01)

申请公布号 CN 110320434 A

G06K 9/00 (2006.01)

(43) 申请公布日 2019.10.11

审查员 涂明珏

(73) 专利权人 山东大学

地址 250061 山东省济南市历下区经十路  
17923号

(72) 发明人 张恒旭 韦明杰 石访 王雪文  
邢晓东 孙百聪

(74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限  
公司 37221

代理人 李琳

(51) Int. Cl.

G01R 31/52 (2020.01)

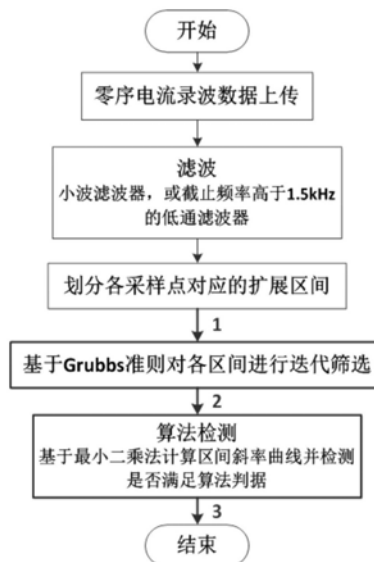
权利要求书2页 说明书8页 附图6页

(54) 发明名称

基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障  
辨识方法及系统

(57) 摘要

本公开提供了一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法及系统,接收零序电流滤波数据,从波形形态特征的角度描述高阻故障非线性特征,采用最小二乘法计算基于采样点扩展区间的斜率,对计算后的采样点扩展区间的斜率采用格拉布斯准则进行处理,筛选出异常值,根据处理后的斜率曲线,确定是否出现高阻故障。能够实现对高阻故障不同故障场景(中性点接地方式、接地介质和过渡电阻)的稳定燃弧或接地介质击穿过程(弱电弧、无电弧)中不同程度非线性特征的可靠检测。



1. 一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法,其特征是:包括以下步骤:

接收零序电流滤波数据,从波形形态特征的角度描述高阻故障非线性特征,采用最小二乘法计算基于采样点扩展区间的斜率,对计算后的采样点扩展区间的斜率采用格拉布斯准则进行处理,筛选出异常值,根据处理后的斜率曲线,确定是否出现高阻故障;

采用快速傅里叶变换逐周期计算零序电流的相位,从而标定周期内基频信号最大最小值点;考虑到波形非线性情况下采用快速傅里叶变换进行相位计算的偏差,分别在以最大和最小值点为中心的一定范围搜索区间斜率的最低点,以最低点为边界,将每个周期进行进一步的划分,得到最终的分析范围。

2. 如权利要求1所述的一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法,其特征是:获取零序电流波形曲线,采用最小二乘法对区间内曲线进行线性拟合,以拟合后的直线斜率作为该采样点所对应的区间斜率,从而获取零序电流的区间斜率曲线。

3. 如权利要求1所述的一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法,其特征是:利用格拉布斯法斜率计算区间逐个进行检测并滤除短时突变点,从而修正每一个采样点对应的区间斜率,具体包括:

1) 对原始采样数据进行滤波;

2) 对于一采样点,从零序电流采样信号中提取范围为R的区间信号,并计算区间信号中各点的格拉布斯归一化残差;

3) 确定置信概率,根据当前区间信号中的采样点个数获取格拉布斯临界值 $G_P[i]$ ,逐一将计算出的各采样点残差 $G[i]$ 与 $G_P[i]$ 对比,若 $G[i] < G_P[i]$ ,则将该采样点在当前区间信号中剔除,直到整个信号的采样点全部检测完毕;

4) 若信号 $I_{0,R}$ 内不存在 $G[i] < G_P[i]$ 的采样点,则对最终的区间信号进行基于最小二乘的线性拟合,计算出该采样点 $n_s$ 经格拉布斯法处理后的区间斜率 $k_s[n_s]$ ;对采样点 $n_s+1$ ,重新进行步骤2)到4),直到所有采样点对应的区间斜率 $k_s$ 计算完毕。

4. 如权利要求1所述的一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法,其特征是:非故障情况下,零序电流波形区间斜率曲线在每半个周期只具有一个波峰;而在故障情况下则具有至少两个波峰。

5. 如权利要求1所述的一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法,其特征是:在分析范围内逐个寻找极小值点,在以极小值点为分界点,将一个周期分为两个小区间,在前后两个小区间内分别寻找最大斜率值,如果同时满足约束条件,则认为该分析范围内具有故障波形的畸变特征,且两个小区间均满足时,该周期为故障特征周期。

6. 如权利要求5所述的一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法,其特征是:约束条件包括:

(1) 两个小区间内的最大斜率值之和与灵敏系数的乘积大于等于极小值的斜率;

(2) 在各区间存在斜率等于极小值的斜率与对应区间的最大斜率值的平均值的点,且该点的数量为二;

(3) 区间长度与每半个周期的采样点个数的差值小于等于相位计算偏差设定的裕度;

或,进一步的,在N个故障特征周期连续出现时,认为高阻故障发生,N大于2。

7. 一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识系统,其特征是:包括处理器,

所述处理器被配置为执行以下指令：

从波形形态特征的角度描述高阻故障非线性特征，采用最小二乘法计算基于采样点扩展区间的斜率，对计算后的采样点扩展区间的斜率采用格拉布斯准则进行处理，筛选出异常值，根据处理后的斜率曲线，确定是否出现高阻故障；

采用快速傅里叶变换逐周期计算零序电流的相位，从而标定周期内基频信号最大最小值点；考虑到波形非线性情况下采用快速傅里叶变换进行相位计算的偏差，分别在以最大和最小值点为中心的一定范围搜索区间斜率的最低点，以最低点为边界，将每个周期进行进一步的划分，得到最终的分析范围。

8. 一种计算机可读存储介质，其特征是：其中存储有多条指令，所述指令适于由终端设备的处理器加载并执行权利要求1-6中任一项所述的一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法。

9. 一种终端设备，其特征是：包括处理器和计算机可读存储介质，处理器用于实现各指令；计算机可读存储介质用于存储多条指令，所述指令适于由处理器加载并执行权利要求1-6中任一项所述的一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法。

## 基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法及系统

### 技术领域

[0001] 本公开属于故障诊断领域,具体涉及一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法及系统。

### 背景技术

[0002] 本部分的陈述仅仅是提供了与本公开相关的背景技术信息,不必然构成在先技术。

[0003] 配电网高阻故障是一种常见的故障形式,并以单相接地故障为主,一般是由于线路发生断线或树障,使得线路与水泥、沙地、树木等高阻抗的接地介质发生接触。由于其故障电流微弱,往往不到数10A,甚至1A以内,配电网现有的继电保护装置以及传统故障保护算法均难以对其实现有效检测。此外,高阻故障常伴随电弧,其非线性也给故障检测带来了一定的影响。据统计,目前配电网中所安装的继电保护装置对弧光高阻故障的检测率不足20%,无法满足故障辨识可靠性的需求,对系统的稳定运行以及人员财产的安全产生巨大的隐患。

[0004] 据发明人了解,国内外对于高阻故障的检测方法主要基于扰动发生后十几毫秒内的暂态特征量或是后续几百毫秒到几秒的高频特征信号的分析。对于暂态特征量,当接地电阻达到一定值时,故障前后暂态特征量基本未发生明显变化,因而此类方法对故障接地过渡电阻的适用范围有限;对于高频特征信号,由于高阻故障的非线性是来自于电弧的燃烧和接地固体介质的击穿,当电弧轻微燃烧时,故障非线性主要由接地固体介质击穿引起,此时故障高频信号特征微弱,难以检测。另外,配电网一般处于较高的噪声环境之下,当发生高阻故障时,故障电流的微弱导致暂态特征量和高频特征量非常容易受到噪声的干扰,因此传统高阻故障检测算法始终难以在实际应用环境下保证较高的检测可靠性。

### 发明内容

[0005] 本公开为了解决上述问题,提出了一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法及系统,本公开能够有效抑制或消除实际故障波形中因电弧和强噪声等产生的不规则畸变对区间斜率曲线的影响。

[0006] 根据一些实施例,本公开采用如下技术方案:

[0007] 一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法,包括以下步骤:

[0008] 接收零序电流滤波数据,从波形形态特征的角度描述高阻故障非线性特征,采用最小二乘法计算基于采样点扩展区间的斜率,对计算后的采样点扩展区间的斜率采用格拉布斯准则进行处理,筛选出异常值,根据处理后的斜率曲线,确定是否出现高阻故障。

[0009] 作为可能的实施方式,获取零序电流波形曲线,采用最小二乘法对区间内曲线进行线性拟合,以拟合后的直线斜率作为该采样点所对应的区间斜率,从而获取零序电流的区间斜率曲线。

[0010] 作为可能的实施方式,利用格拉布斯法斜率计算区间逐个进行检测并滤除短时突

变点,从而修正每一个采样点对应的区间斜率,具体包括:

[0011] 1) 对原始采样数据进行滤波;

[0012] 2) 对于一采样点,从零序电流采样信号中提取范围为R的区间信号,并计算区间信号中各点的格拉布斯归一化残差;

[0013] 3) 确定置信概率,根据当前区间信号中的采样点个数获取格拉布斯临界值 $G_P[i]$ ,逐一将计算出的各采样点残差 $G[i]$ 与 $G_P[i]$ 对比,若 $G[i] < G_P[i]$ ,则将该采样点在当前区间信号中剔除,直到整个信号的采样点全部检测完毕;

[0014] 4) 若信号 $I_{0,R}$ 内不存在 $G[i] < G_P[i]$ 的采样点,则对最终的区间信号进行基于最小二乘的线性拟合,计算出该采样点 $n_s$ 经格拉布斯法处理后的区间斜率 $k_s[n_s]$ ;对采样点 $n_s+1$ ,重新进行步骤2)到4),直到所有采样点对应的区间斜率 $k_s$ 计算完毕。

[0015] 作为可能的实施方式,非故障情况下,零序电流波形区间斜率曲线在每半个周期只具有一个波峰;而在故障情况下则具有至少两个波峰。

[0016] 作为可能的实施方式,采用快速傅里叶变换逐周期计算零序电流的相位,从而标定周期内基频信号最大最小值点;考虑到波形非线性情况下采用快速傅里叶变换进行相位计算的偏差,分别在以最大和最小值点为中心的一定范围搜索区间斜率的最低点,以最低点为边界,将每个周期进行进一步的划分,得到最终的分析范围。

[0017] 作为可能的实施方式,在分析范围内逐个寻找极小值点,在以极小值点为分界点,将一个周期分为两个小区间,在前后两个小区间内分别寻找最大斜率值,如果同时满足约束条件,则认为该分析范围内具有故障波形的畸变特征,且两个小区间均满足时,该周期为故障特征周期。

[0018] 约束条件包括:

[0019] (1) 两个小区间内的最大斜率值之和与灵敏系数的乘积大于等于极小值的斜率;

[0020] (2) 在各区间存在斜率等于极小值的斜率与对应区间的最大斜率值的平均值的点,且该点的数量为二;

[0021] (3) 区间长度与每半个周期的采样点个数的差值小于等于相位计算偏差设定的裕度。

[0022] 作为可能的实施方式,在N个故障特征周期连续出现时,认为高阻故障发生,N大于2。

[0023] 一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识系统,包括处理器,所述处理器被配置为执行以下指令:

[0024] 从波形形态特征的角度描述高阻故障非线性特征,采用最小二乘法计算基于采样点扩展区间的斜率,对计算后的采样点扩展区间的斜率采用格拉布斯准则进行处理,筛选出异常值,根据处理后的斜率曲线,确定是否出现高阻故障。

[0025] 一种计算机可读存储介质,其中存储有多条指令,所述指令适于由终端设备的处理器加载并执行所述的一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法。

[0026] 一种终端设备,包括处理器和计算机可读存储介质,处理器用于实现各指令;计算机可读存储介质用于存储多条指令,所述指令适于由处理器加载并执行所述的一种基于零序电流波形区间斜率曲线的高阻故障辨识方法。

[0027] 与现有技术相比,本公开的有益效果为:

[0028] 本公开从波形形态特征的角度描述高阻故障非线性特征,采用最小二乘法计算基于采样点扩展区间的斜率,既实现对故障非线性畸变的描述,也一定程度降低了实际波形中由于噪声、电弧燃烧以及其他系统元件造成的非“零休”的轻微非线性在区间斜率曲线上的影响。

[0029] 本公开采用Grubbs准则对区间斜率进行处理,通过迭代的异常值筛选流程,抑制或消除短时不规则畸变对区间斜率的影响有很好的效果。

#### 附图说明

[0030] 构成本公开的一部分的说明书附图用来提供对本公开的进一步理解,本公开的示意性实施例及其说明用于解释本公开,并不构成对本公开的不当限定。

[0031] 图1是基于最小二乘法的波形区间斜率示意图;

[0032] 图2(a)是正常情况下波形及区间斜率曲线;

[0033] 图2(b)是高阻故障波形及区间斜率曲线;

[0034] 图3(a)是中性点不接地系统经水泥杆塔高阻接地故障Grubbs法处理前后的区间斜率示意图;

[0035] 图3(b)是谐振接地系统经干土地高阻接地故障Grubbs法处理前后的区间斜率示意图;

[0036] 图4是不同条件下算法检测成功率示意图;

[0037] 图5是三种算法抗噪性能对比示意图;

[0038] 图6是总体流程示意图;

[0039] 图7是基于Grubbs准则的区间采样点迭代筛选流程示意图;

[0040] 图8是检测流程示意图;

#### 具体实施方式:

[0041] 下面结合附图与实施例对本公开作进一步说明。

[0042] 应该指出,以下详细说明都是例示性的,旨在对本公开提供进一步的说明。除非另有指明,本实施例使用的所有技术和科学术语具有与本公开所属技术领域的普通技术人员通常理解的含义。

[0043] 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公开的示例性实施方式。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。

[0044] 为了保证高阻故障在稳定燃弧或接地介质击穿等复杂过程辨识结果的可靠性和安全性,本实施例提出了一种基于零序电流区间斜率曲线的高阻故障波形畸变特征描述方法,并采用基于最小二乘法的扩展区间斜率计算方法,以及Grubbs准则来抑制或消除实际故障波形中因电弧和强噪声等产生的不规则畸变对区间斜率曲线的影响。

[0045] 主要技术问题包括以下几点:

[0046] 基于最小二乘法的零序电流区间斜率曲线故障特征描述方法。零序电流基本反映了故障电流非线性畸变特征——“零休现象”。本方法从波形形态特征的角度描述高阻故障

非线性特征,采用最小二乘法计算基于采样点扩展区间的斜率,既实现对故障非线性畸变的描述,也一定程度降低了实际波形中由于噪声、电弧燃烧以及其他系统元件造成的非“零休”的轻微非线性在区间斜率曲线上的影响。

[0047] 基于Grubbs准则抑制或消除电弧燃烧引起的较大不规则波形畸变对区间斜率的影响。电弧燃烧机理较为复杂,燃烧过程中可能会引起不同程度的不规则波形畸变而影响区间斜率曲线特征,其中部分可以通过上文所述采样点扩展区间进行消除,但当不规则畸变较大时,扩展区间也不再有效;此外,采用低通滤波器时也同样会破坏原本的故障波形畸变特征,产生阶梯状的“零休”现象,不便于检测算法的设计和整定值的设定。采用Grubbs准则对区间斜率进行处理,通过迭代的异常值筛选流程,抑制或消除短时不规则畸变对区间斜率的影响有很好的效果。

[0048] 具体的技术方案,如图6所示,包括:

[0049] 基于最小二乘法的零序电流区间斜率曲线故障特征描述

[0050] 简单求导计算采样点的斜率受噪声和电弧引起的非“零休”不规则畸变影响,不利于对故障的非线性特征进行正确提取。本实施例通过扩展采样点的斜率计算区间,采用最小二乘法对区间内曲线进行线性拟合,如图1所示,并按照公式(1)拟合后的直线斜率作为该采样点所对应的区间斜率,从而获取零序电流的区间斜率曲线。

$$[0051] \quad k_s[n_s] = \left| \frac{L \sum_R i \cdot I_0[i] - \sum_R i \cdot \sum_R I_0[i]}{L \sum_R i^2 - (\sum_R i)^2} \right| \quad (1)$$

$$R: i \in \left( n_s - \frac{L}{2}, n_s + \frac{L}{2} \right)$$

[0052] 其中, $I_0$ 为零序电流的采样信号, $R$ 为采样点 $n_s$ 的斜率计算区间,区间长度为 $L$ 。设 $L$ 为 $N_T/8$ , $N_T$ 为每个周期的采样点个数。

[0053] 在非故障情况下,零序电流波形区间斜率曲线在每半个周期均呈现倒“U”形特征,如图2(a)所示;而在故障情况下则为“M”形,如图2(b)所示。采用快速傅里叶变换(FFT)逐周期计算零序电流的相位,从而标定周期内基频信号最大最小值点;考虑到波形非线性情况下采用FFT进行相位计算的偏差,分别在以最大最小值点为中心的 $N_T/10$ 范围搜索区间斜率 $k_s$ 的最低点,并标记为 $N_1$ 、 $N_2$ ,进而划分两个“半周期”范围分别为 $[N_0, N_1]$ 、 $[N_1, N_2]$ ,其中 $N_0$ 是前一周期搜索到的 $k_s$ 最低点。

[0054] 以 $[N_0, N_1]$ 半周期区间为例。一方面,由于区间边界处(即基频最大最小值点附近)的斜率较小,因而对不规则波形畸变更敏感,易造成区间斜率的波动,因而特征分析需要剔除一定的边界范围;另一方面,故障的非线性畸变一般位于每半周期的中部,但考虑畸变区间的偏移,从而最终将特征分析范围设为 $[N_0 + \Delta N, N_1 - \Delta N]$  ( $\Delta N = (N_1 - N_0) / 6$ )。随后,检测流程,如图8所示,具体如下:

[0055] 步骤1):如图2(b),在 $[N_0 + \Delta N, N_1 - \Delta N]$ 范围内逐个寻找极小值点 $n_{\min}$ ,即当一个采样点的斜率值 $k_s[n_{\min}]$  ( $k_{s, \min}$ ) 满足式(2)时,进入步骤2);

$$[0056] \quad k_s[n_{\min}-1] \leq k_{s, \min} \leq k_s[n_{\min}+1] \quad (2)$$

[0057] 步骤2):在区间 $[N_0, n_{\min}-1]$ 和 $[n_{\min}+1, N_1]$ 内分别寻找最大斜率值 $k_{s, \max 1}$ 和 $k_{s, \max 2}$ 。若

式(3)所述判据均能满足,则认为该半周期具有故障波形的畸变特征,并进入步骤3),否则返回步骤1);

$$[0058] \quad \begin{cases} k_{S,\min} \leq (k_{S,\max 1} + k_{S,\max 2}) \cdot K_{set1} \\ N_{p1} = N_{p2} = 2 \\ \left| (N_1 - N_0) - \frac{N_T}{2} \right| \leq N_m \end{cases} \quad (3)$$

[0059] 其中,判据1中 $K_{set1}$ 为灵敏系数,可设为0.75~0.85,越小则算法越灵敏;判据2中 $N_{p1}$ 和 $N_{p2}$ 分别为斜率值满足公式(4)和(5)的采样点的个数;判据3中 $N_m$ 是考虑FFT相位计算偏差设定的裕度,实测故障验证其设定为 $N_T/10$ 即可满足要求。判据2和3事实上对半周期区间斜率的“M”形特征进行较为严格的限定,可避免其他暂态过程或高频振荡对判据1的影响而导致的对非故障扰动的误判。

$$[0060] \quad k_S[n] = k_{S1} = \frac{k_{S,\min} + k_{S,\max 1}}{2}, \quad N_0 \leq n < n_{\min} \quad (4)$$

$$[0061] \quad k_S[n] = k_{S2} = \frac{k_{S,\min} + k_{S,\max 2}}{2}, \quad n_{\min} < n \leq N_1 \quad (5)$$

[0062] 步骤3):继续判断 $[N_1, N_2]$ 区间,重复步骤1)和步骤2)。当且仅当两个“半周期”均满足式(3)所述判据,该周期被判断为“故障特征周期”。

[0063] 为避免误判,当连续出现至少3~4个“故障特征周期”时,认为高阻故障发生。

[0064] 从安全性角度,以电容器组的投切(短暂态过程),电动机负荷启动(长暂态过程),变压器励磁涌流(具有波形畸变)等系统正常扰动事件为例。电容器投切和电动机负荷启动(类似于负荷波动)等在扰动发生后均主要呈现正弦波形,其区间斜率曲线与图2(a)所示正常情况下基本相同,算法对这一类扰动很容易进行区分;变压器的励磁涌流会导致零序电流产生一定的畸变,但由于其畸变位于每个周期的一侧,因而区间斜率曲线在每个周期中的两个半周期分别呈现“M”型和倒“U”型,而非高阻接地故障特征所呈现的双“M”型,并且根据零序电流计算相位所标定的半周期区间 $[N_0, N_1]$ 、 $[N_1, N_2]$ 出现了较大的偏移,不满足公式(3)所述判据3,因此本公开的方法对变压器励磁涌流扰动也能实现区分。

[0065] 基于Grubbs准则的不规则波形畸变干扰的抑制方法,如图7所示。

[0066] 高阻故障波形的畸变总体上是相对平滑的,但也可能存在由于电弧燃烧等原因所产生的短时不规则畸变,从而使得区间斜率的变化与原有“M”形特征产生差异,这些不规则的波形畸变若通过低通滤波器不但难以得到有效消除,还有可能改变原有的故障畸变特征,使得检测算法的设计和整定值的设定更加困难,影响检测可靠性。

[0067] 采用格拉布斯法对图4中的斜率计算区间逐个进行检测并滤除短时突变点,从而修正每一个采样点对应的区间斜率。方法如下:

[0068] 步骤1):采用小波滤波器或截止频率不低于1500Hz的低通滤波器对原始采样数据进行处理。

[0069] 步骤2):对于一采样点 $n_s$ ,从零序电流采样信号 $I_0$ 中提取式(1)中所述范围为R的区间信号 $I_{0,R}$ ,并计算区间信号中各点的Grubbs归一化残差:



$$[0070] \quad G[i] = \frac{|I_{0,R}[i] - \overline{I_{0,R}}|}{S_R} \quad (6)$$

[0071] 其中  $\overline{I_{0,R}}$  为该区间采样点的均值,  $S_R$  为标准差;

[0072] 步骤3): 参考格拉布斯表(见表1), 取置信概率  $P=0.9$ , 并根据当前区间信号  $I_{0,R}$  中的采样点个数  $N$  获取格拉布斯临界值  $G_P[i]$ 。逐一将计算出的各采样点残差  $G[i]$  与  $G_P[i]$  对比, 若  $G[i] < G_P[i]$ , 则将该采样点在  $I_{0,R}$  中剔除, 待整个信号  $I_{0,R}$  的采样点全部检测完毕, 重新进行步骤1); 若信号  $I_{0,R}$  内不存在  $G[i] < G_P[i]$  的采样点, 则进入步骤4);

[0073] 步骤4): 参考公式(1)对最终的区间信号  $I_{0,R}$  进行基于最小二乘的线性拟合, 计算出该采样点  $n_s$  经 Grubbs 法处理后的区间斜率  $k_s[n_s]$ ;

[0074] 步骤5): 对采样点  $n_s+1$ , 重新进行步骤2)到4), 直到所有采样点对应的区间斜率  $k_s$  计算完毕。

[0075] 步骤6): 对处理后的区间斜率曲线按照前面流程逐周期进行检测(即图8所示), 判断是否为高阻故障。

[0076] 以两组故障为例, 其零序电流区间斜率在采用 Grubbs 法进行处理前后的变化分别如图3(a)和图3(b)所示。经过处理后的区间斜率曲线可以一定程度规避不规则畸变所引起的短时斜率突变, 使高阻故障零序电流的畸变特征, 即区间斜率曲线具有较为统一的特征, 进而使得算法更易于对该特征准确描述, 在保证检测灵敏度的同时, 能够具备对系统非故障扰动事件正确区分的能力。

[0077] 综上, 本实施例所介绍的基于最小二乘法的零序电流区间斜率曲线及其故障特征描述方法, 能够实现对高阻故障不同故障场景(中性点接地方式、接地介质和过渡电阻)的稳定燃弧或接地介质击穿过程(弱电弧、无电弧)中不同程度非线性特征的可靠检测。

[0078] 本实施例所介绍的基于 Grubbs 准则的斜率计算区间采样值迭代筛选方法, 可以有效抑制实际故障波形中电弧燃烧或强噪声滤波后遗留的不规则波形畸变对区间斜率区间变化规律的影响, 使得故障特征清晰明确易提取, 便于检测算法中对故障特征描述方法的设计以及相关阈值的设定, 从而也能够通过波形非线性与否实现与系统非故障扰动的安全区分, 不误判。

[0079] 本实施例所介绍的高阻故障检测方法得到了河南电科院真型试验场进行的真实高阻故障的测试。测试的28组故障中, 中性点接地方式包括中性点不接地、经消弧线圈接地和经小电阻接地三种, 故障接地介质有干(干燥)/湿(湿润)草地、干/湿土地、干/湿沙地、水泥杆塔、沥青路面等。考虑实际应用中的录波数据窗口长度以及噪声强度问题, 算法检测成功率如图4所示。设录波数据包括故障(扰动)发生后20周期, 所述方法与现有同类先进方法检测可靠性对比如图5所示, 可见本实施例中所述方法的抗噪性更强, 并且在同等噪声强度下, 本方法的检测灵敏性均高于其他两种方法。

[0080] 格拉布斯临界值表如表1所示, 其中  $P$  为置信概率, 反映对样本数据异常值筛选的严格程度;  $N$  为样本内的数据个数。

[0081] 对于本实施例中采用的实测波形数据的采样频率(6.4kHz)以及所述斜率计算区间的长度  $L(N_T/8)$ , 即16个采样点, 只需要使用表中  $N \leq 16$  的格拉布斯临界值。

[0082] 表1格拉布斯临界值表

N	P				
	0.9	0.95	0.975	0.99	0.995
3	1.148	1.153	1.155	1.155	1.155
4	1.425	1.463	1.481	1.492	1.496
5	1.602	1.672	1.715	1.749	1.764
6	1.729	1.822	1.887	1.944	1.973
7	1.828	1.938	2.020	2.097	2.139
8	1.909	2.032	2.126	2.22	2.274
9	1.977	2.110	2.215	2.323	2.387
10	2.036	2.176	2.290	2.410	2.482
11	2.088	2.234	2.355	2.485	2.564
12	2.134	2.285	2.412	2.550	2.636
13	2.175	2.331	2.462	2.607	2.699
14	2.213	2.371	2.507	2.659	2.755
15	2.247	2.409	2.549	2.705	2.806
16	2.279	2.443	2.585	2.747	2.852
...	...	...	...	...	...
100	3.017	3.207	3.383	3.600	3.754

[0085] 本领域内的技术人员应明白,本公开的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本公开可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本公开可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0086] 本公开是参照根据本公开实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0087] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0088] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0089] 以上所述仅为本公开的优选实施例而已,并不用于限制本公开,对于本领域的技术人员来说,本公开可以有各种更改和变化。凡在本公开的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本公开的保护范围之内。

[0090] 上述虽然结合附图对本公开的具体实施方式进行了描述,但并非对本公开保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本公开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公开的保护范围以内。

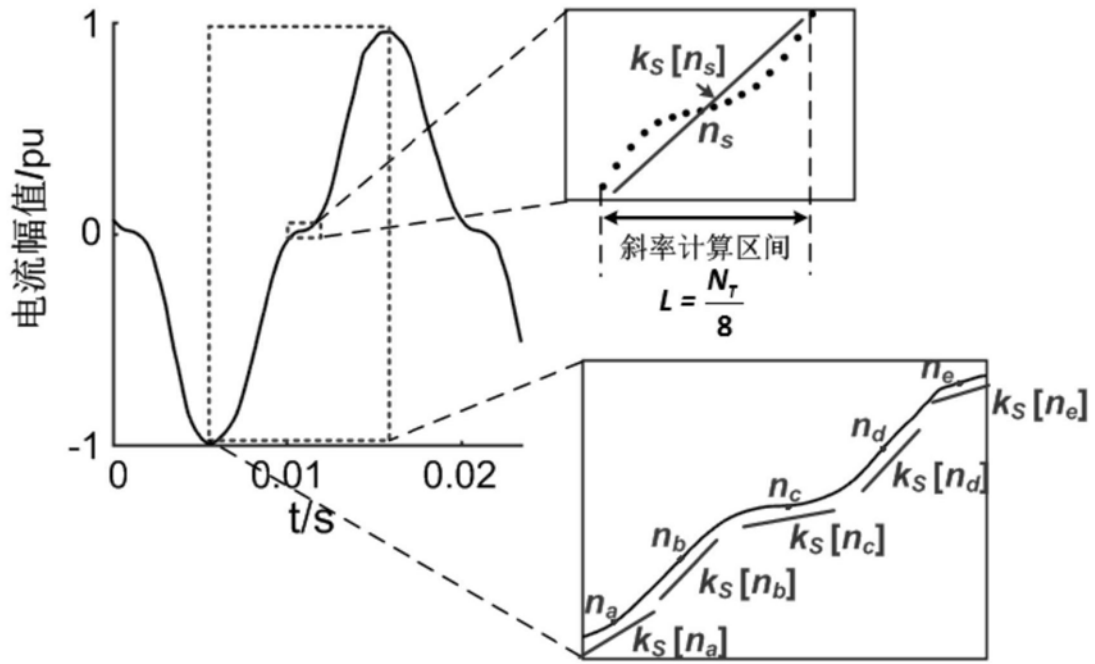


图1

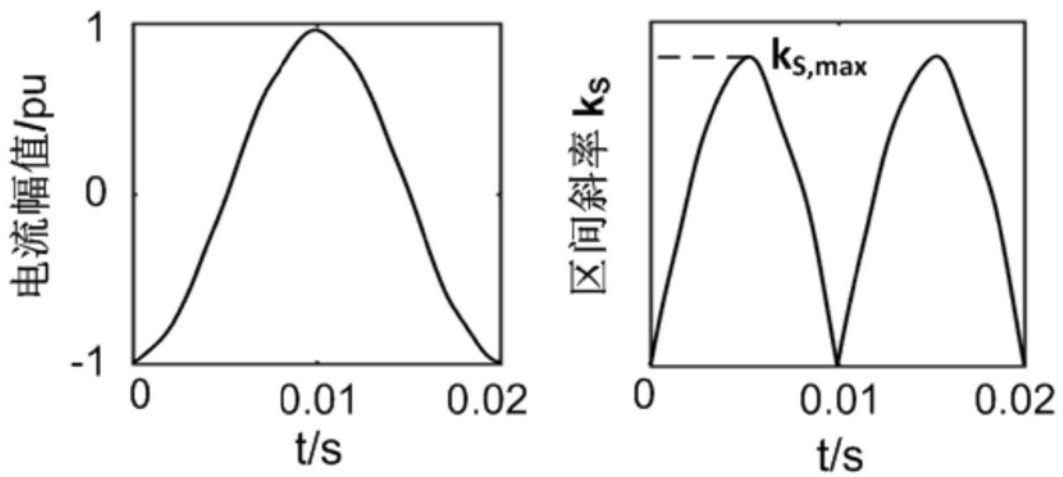


图2(a)

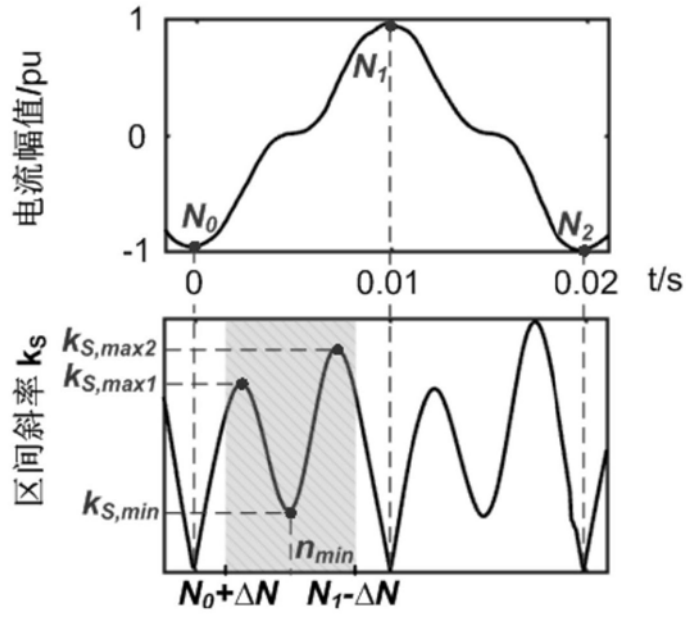


图2 (b)

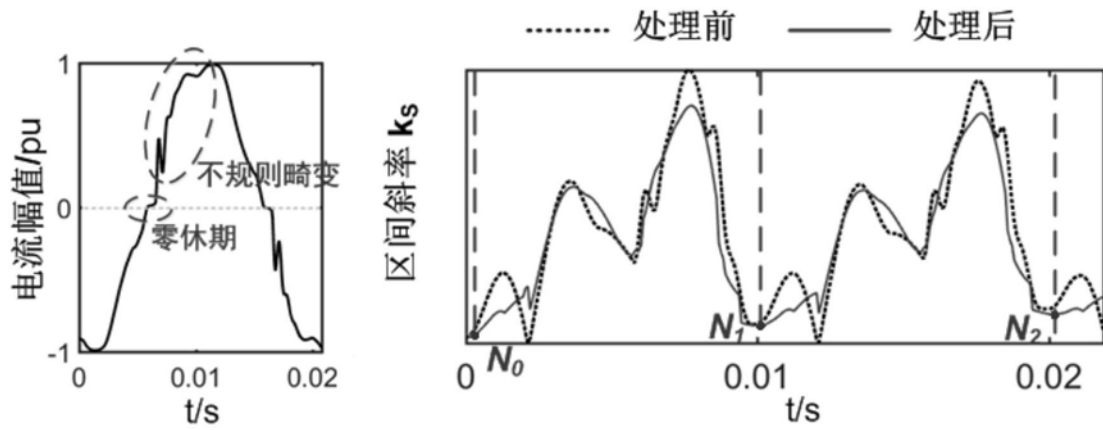


图3 (a)

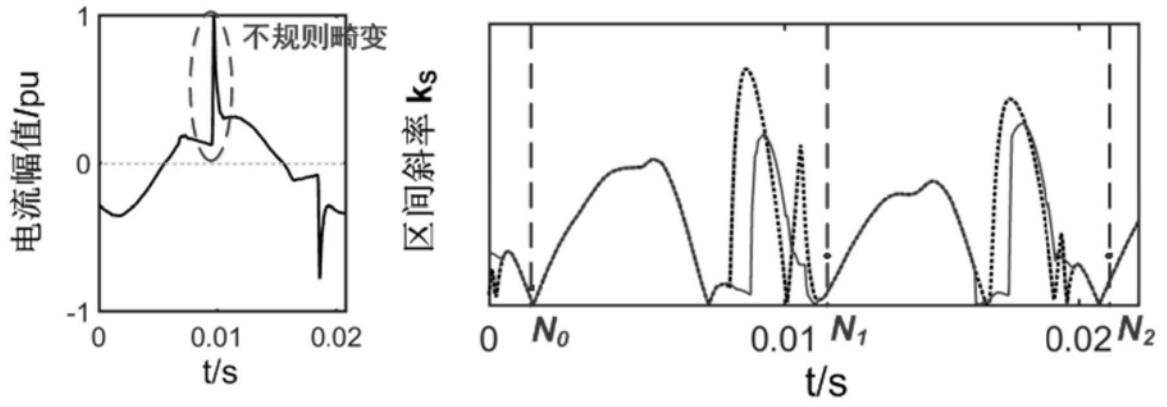


图3 (b)

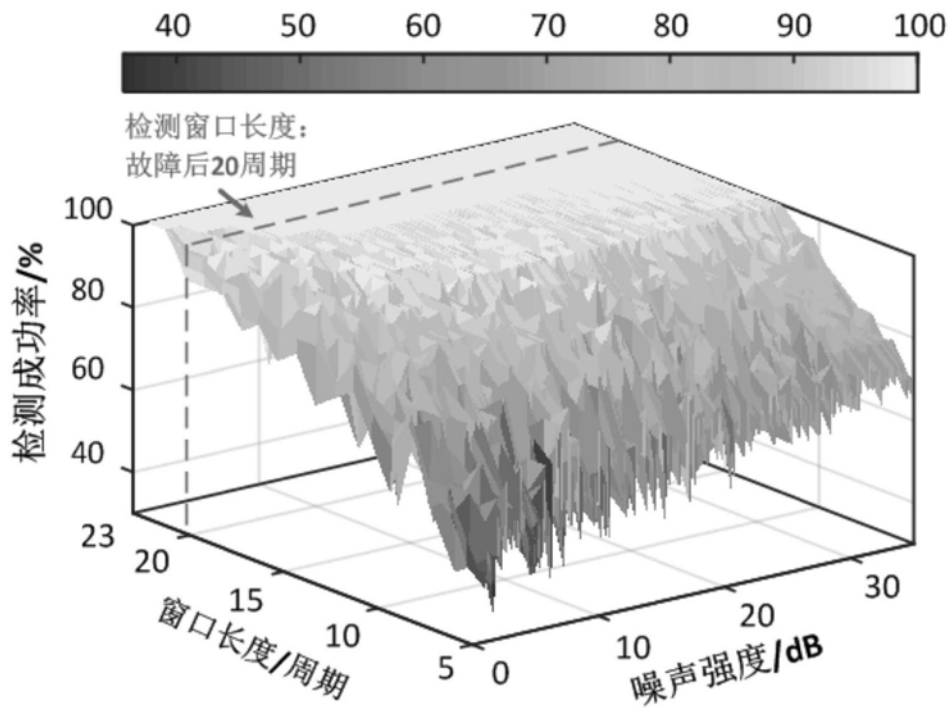


图4

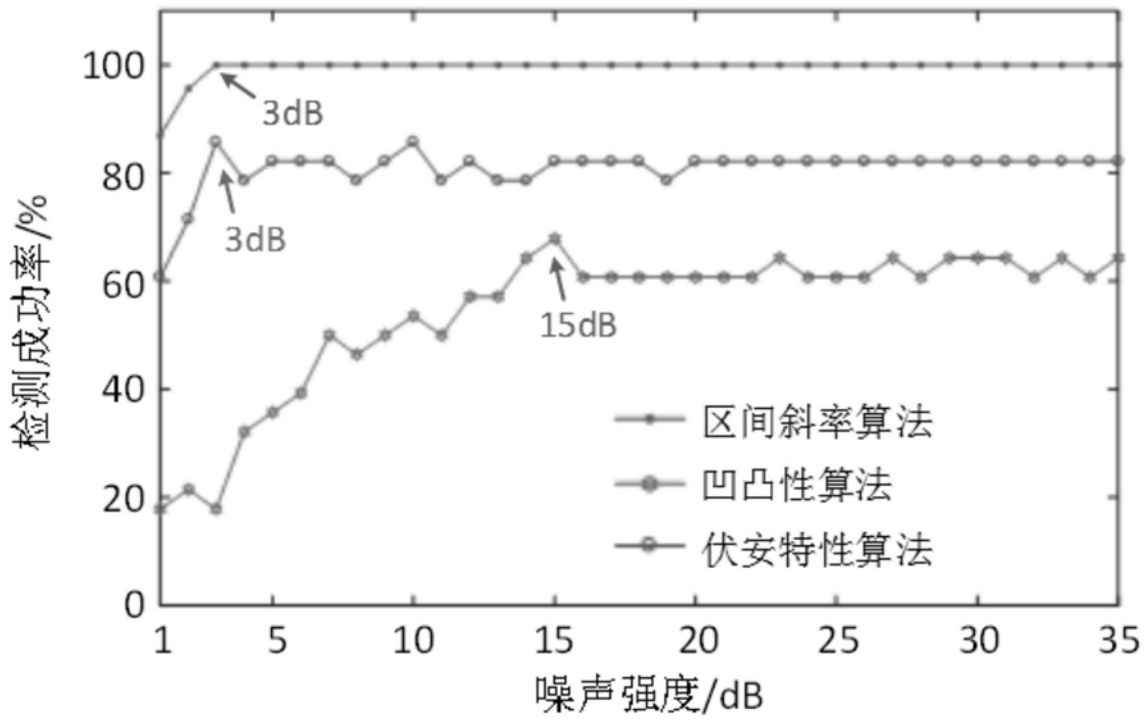


图5

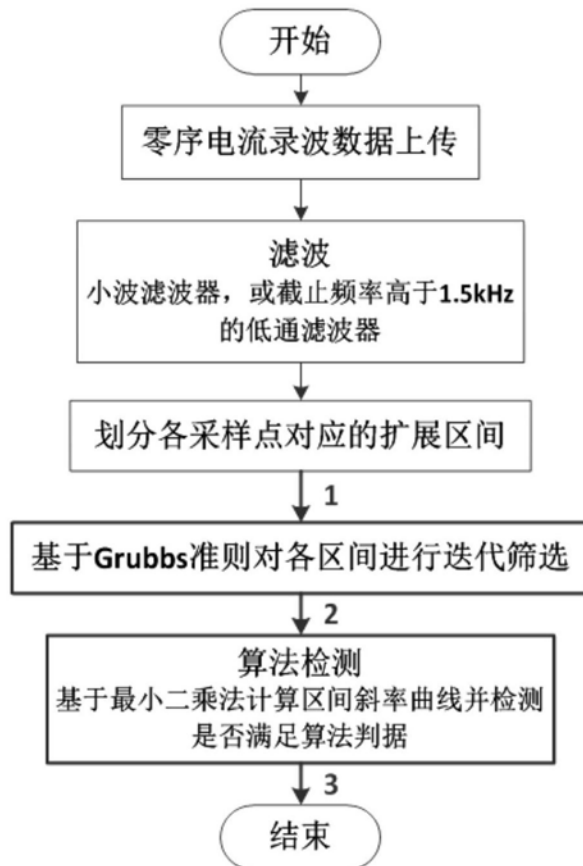


图6

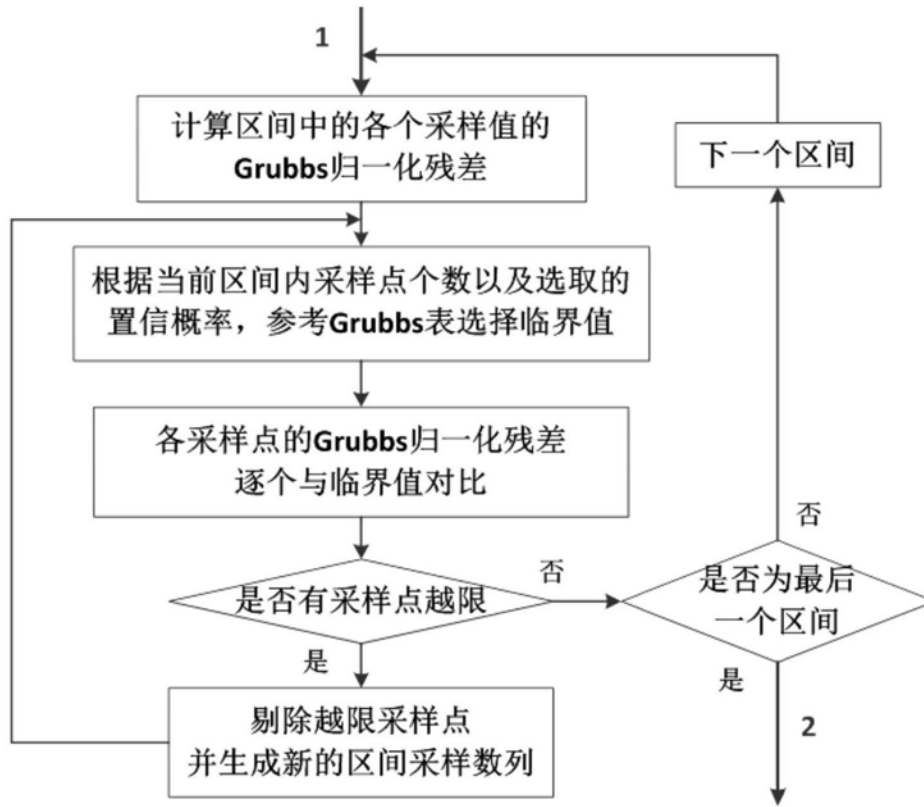


图7



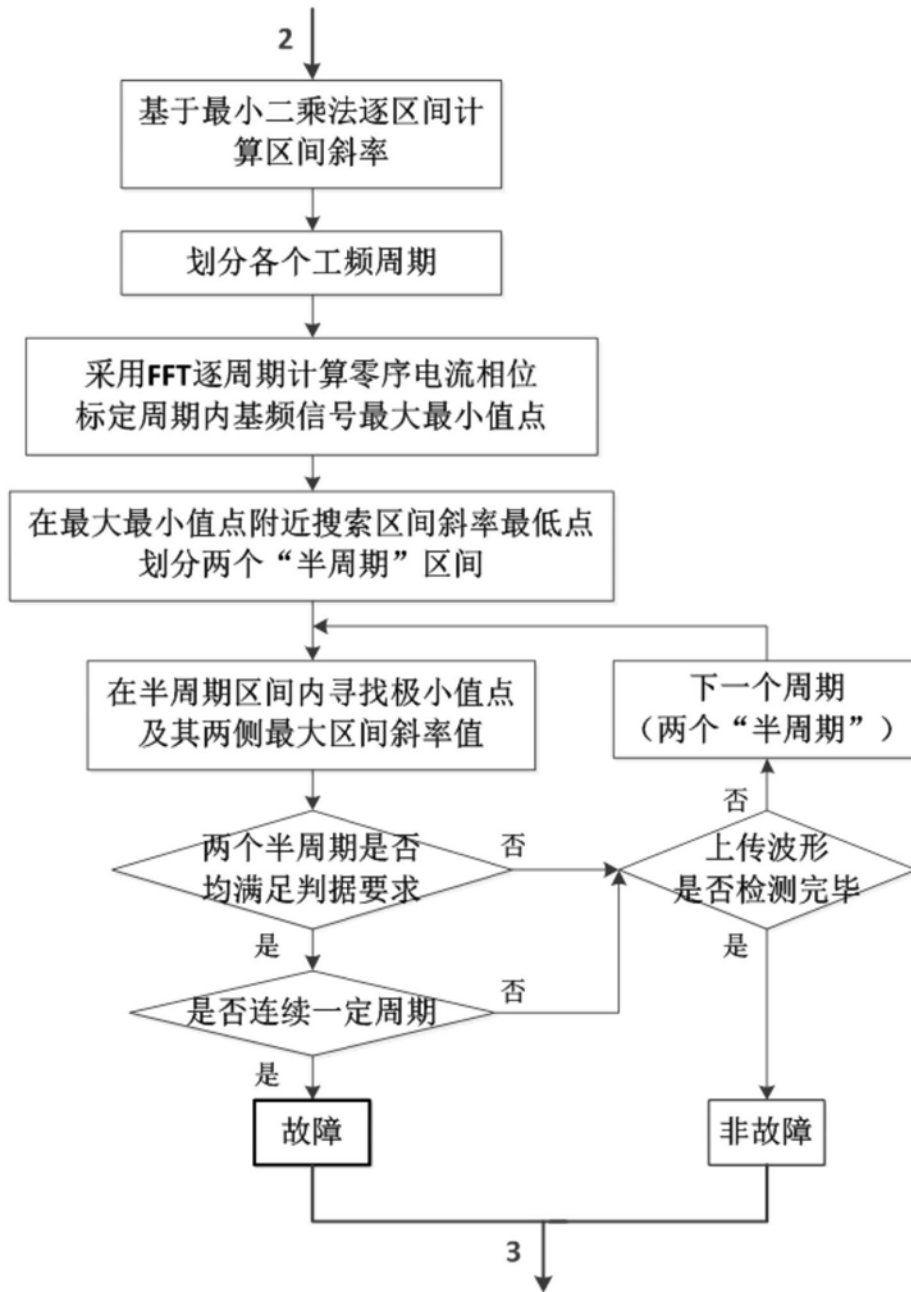


图8