(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105842596 A
(43)申请公布日 2016.08.10

(21)申请号 201610351358.8

(22)申请日 2016.05.24

(71)申请人 四川大学
地址 610065 四川省成都市武侯区一环路南一段24号

(72)发明人 周凯 谢敏 赵世林 何珉 张福忠 冉立

(74)专利代理机构 成都科海专利事务有限责任公司 51202
代理人 吕建平

(51)Int.Cl.
*G01R 31/12*(2006.01)

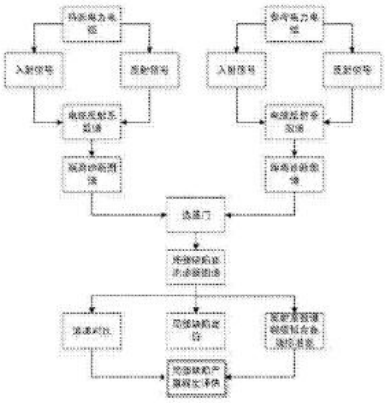
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法

(57)摘要

本发明公开了一种高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，该方法基于频域的电力电缆反射系数谱，利用非破坏性试验技术测量分析电力电缆的反射系数谱，结合选通门技术和现代数字信号处理技术实现对电力电缆局部缺陷进行定位，然后通过转换后的反射系数谱的实部或者虚部求得的被测电缆的波速与新电缆的波速进行对比，同时结合转换后的反射系数谱幅值与相应模型拟合曲线的差异，从而实现对局部缺陷的严重程度进行评估。与现有技术相比，本发明不仅能够实现对变化程度较弱的局部缺陷进行定位和多缺陷识别，而且也能够对电力电缆的局部缺陷的严重程度进行评估。



CN 105842596 A

1.一种高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，其特征在于：包括以下步骤：

(1)待测电缆数据测量

向被测电力电缆发射低压线性调频、伪随机或者高频窄脉冲的信号$V_i$，测量从电缆末端反射回来的反射信号$V_r$，通过$\Gamma_d=\frac{V_r}{V_i}$求出电缆的反射系数谱的幅值$|\Gamma_d(f)|$以及反射系数谱的实部$Real(\Gamma_d(f))$和反射系数谱的虚部$Imag(\Gamma_d(f))$，其中f为信号频率；

(2)待测电缆数据处理

利用转换函数$f\rightarrow t'$，将被测频域信号f转换为t′域信号，然后对转换得到的$Real(\Gamma_d(t'))$或$Imag(\Gamma_d(t'))$进行快速傅里叶变换或者离散傅里叶变换，记录下能量最大的频率点$f_0'$；然后对转换得到的$Real(\Gamma_d(t'))$或$Imag(\Gamma_d(t'))$与kaiser窗函数相乘并进行快速傅里叶变换或者离散傅里叶变换，得到初步处理数据$K\Gamma_d$；

对得到的初步处理数据$K\Gamma_d$做0赫兹至频率点$f_0'$的离散傅里叶变换，将变换结果映射到原始距离诊断图谱$D_0$中，对原始距离诊断图谱$D_0$进行加距离窗处理，得到距离诊断图谱D，其中0赫兹处映射距离为0米，频率点$f_0'$处映射距离为电力电缆长度l；

(3)参考电缆数据测量及处理

将三相系统中的非被测相电力电缆作为参考电力电缆，然后利用步骤(1)相同方式求出参考电力电缆的反射系数谱的幅值$|\Gamma_{d1}(f)|$以及反射系数谱的实部$Real(\Gamma_{d1}(f))$和反射系数谱的虚部$Imag(\Gamma_{d1}(f))$，并进行步骤(2)中相同方式的处理，得到处理后的距离诊断图谱E；

(4)电力电缆局部缺陷位置确定

对比距离诊断图谱D和处理后的距离诊断图谱E，利用选通门技术消除距离诊断图谱D中与处理后的距离诊断图谱E相同位置处的畸变点，得到局部缺陷距离诊断图谱F，从局部缺陷距离诊断图谱F中找到的畸变点，即为电力电缆局部缺陷位置；

(5)电力电缆局部缺陷判断

对得到的局部缺陷距离诊断图谱进行离散傅里叶反变换或快速傅里叶反变换，得到变换后的t′域反射系数谱曲线，并利用转换函数$t'\rightarrow f$将t′域反射系数谱转换为$Real(\Gamma_{d2}(f))$或$Imag(\Gamma_{d2}(f))$，然后找到$Real(\Gamma_{d2}(f))$或$Imag(\Gamma_{d2}(f))$中每个极大值点或极小值点对应的频率$f_k$，利用公式$v_c=\sum_{k=1}^{N-1}2l(f_{k+1}-f_k)/(N-1)$求出被测电力电缆的平均波速，并将$v_c$与同规格的新电力电缆波速$v_0$进行比较，若$v_c$与$v_0$相差1%及以上，说明被测电缆存在局部缺陷，其中N为$Real(\Gamma_{d2})$或$Imag(\Gamma_{d2})$中极大值点或极小值点的个数。

2.根据权利要求1所述的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，其特征在于，通过下述方法进一步评估被测电力电缆局部缺陷的严重程度：

建立电缆反射系数谱模值数学模型

$abs(\Gamma_{d2}(f))=a\cdot e^{b\cdot f}+c\cdot e^{d\cdot f}$

利用建立的数学模型对被测电力电缆测量得到的反射系数谱采用选通门技术后的模值$|\Gamma_{d2}(f)|$进行数据拟合，求较高频率极值点$f_k$处对应的拟合值，并由下面公式计算得到缺陷程度error进行评估：

$error=std((|\Gamma_{d2}(f_k)|-abs(\Gamma_{d2}(f_k)))/abs(\Gamma_{d2}(f_k)))\times100\%$

当error<5%时，电力电缆局部缺陷较轻，当5%≤error≤10%时，电力电缆局部缺陷程度中等，当error>10%时，电力电缆局部缺陷非常严重，公式中std为标准差。

3.根据权利要求1或2所述的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，其特征在于，所述kaiser窗函数中的β取值满足：

$$\beta=\begin{cases}0.1102(\alpha-8.7), & \alpha>50\\ 0.5842(\alpha-21)^{0.4}+0.07886(\alpha-21), & 50\geq\alpha\geq21\\ 0, & \alpha<21\end{cases}$$

其中α为旁瓣衰减倍数。

4.根据权利要求1或2所述的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，其特征在于，原始距离诊断图谱$D_0$采用下述公式进行加距离窗处理：

$$D(i)=\sum_{j\leq s}\frac{D_0(j)-\min(D_0)}{\max(D_0)-\min(D_0)}$$

其中s为窗口长度，取值不大于距离诊断图谱$D_0$中的空间分辨率，D为处理后得到的距离诊断图谱。

5.根据权利要求3所述的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，其特征在于，原始距离诊断图谱$D_0$采用下述公式进行加距离窗处理：

$$D(i)=\sum_{j\leq s}\frac{D_0(j)-\min(D_0)}{\max(D_0)-\min(D_0)}$$

其中s为窗口长度，取值不大于距离诊断图谱$D_0$中的空间分辨率，D为处理后得到的距离诊断图谱。

6.根据权利要求1或2所述的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，其特征在于：步骤(5)中同规格的新电缆波速$v_0$由公式$\frac{1}{\sqrt{LC}}$计算获得，其中L和C分别为同规格的新电缆单位长度的电感和电容，或者采用时域反射法测取。

7.根据权利要求3所述的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，其特征在于：步骤(5)中同规格的新电缆波速$v_0$由公式$\frac{1}{\sqrt{LC}}$计算获得，其中L和C分别为同规格的新电缆单位长度的电感和电容，或者采用时域反射法测取。

8.根据权利要求4所述的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，其特征在于：步骤(5)中同规格的新电缆波速$v_0$由公式$\frac{1}{\sqrt{LC}}$计算获得，其中L和C分别为同规格的新电缆单位长度的电感和电容，或者采用时域反射法测取。

9.根据权利要求5所述的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，其特征在于：步骤(5)中同规格的新电缆波速$v_0$由公式$\frac{1}{\sqrt{LC}}$计算获得，其中L和C分别为同规格的新电缆单位长度的电感和电容，或者采用时域反射法测取。

# 一种高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法

## 技术领域

[0001] 本发明涉及电力电缆运行中的缺陷诊断技术，更为具体地说，是涉及一种电力电缆局部缺陷的诊断方法。

## 背景技术

[0002] 交联聚乙烯(XLPE)电力电缆因其可靠的电气及机械性能，目前在我国电力工业中得到了广泛的应用。我国在90年代初，开展了大量的城网改造工作，大量的电缆开始应用到城市电网。但是，由于制作工艺以及长期处在不同的运行工况下的影响，电力电缆往往会由于受潮、过热、挤压、弯曲过度等原因造成电力电缆产生水树、绝缘介质变形、铜屏蔽层松动等局部缺陷，如果不对电力电缆的局部缺陷进行处理，电力电缆局部缺陷在强电场的作用下就会迅速发展，最终导致电力电缆绝缘的失效，从而为电力电缆的维护、更换带来大量的工作，导致大量的人力、财力浪费。此外，由于电力电缆埋在地下，并集中在中心城区，对整根电缆进行更换也是一个困难的工作。从节约成本的角度，如果能将电力电缆局部缺陷进行诊断、修复，则可大量节约人力、财力。

[0003] 现有比较成熟的时域反射法(TDR)能利用脉冲信号实现电力电缆故障的诊断，申请号为201310063871.3，名称为“时域反射系统和方法”的中国发明专利，提供了一种使用时域反射法确定导体异常的方法和系统，但该方法尚无法对变化程度较弱的缺陷进行诊断，并且TDR在多缺陷识别以及近端缺陷识别中的分辨率不够高。电力电缆的局部放电诊断是探测电缆局部缺陷的一种方法，但由于局部放电信号幅值小、衰减严重、信号的分离困难以及多故障识别困难等原因，使得在实际测量中很难实现对局部缺陷进行诊断。同时，局部放电离线测试实验往往是一种破坏性实验，其本身会对电缆的结构产生一定的影响。现有的电力电缆检测诊断技术仍然停留在故障诊断方面，缺乏对电缆结构参数变化程度较弱的局部缺陷进行诊断，无法对电缆的早期缺陷进行排查，因此开展电缆的局部缺陷诊断新技术意义重大。

## 发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种基于电力电缆反射系数谱的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，实现对电缆的局部缺陷进行精确定位与状态评估，同时也能对电力电缆的中间接头进行很好的区分。具有技术先进、易于操作、成本较低、灵敏度高的优点。

[0005] 本发明提供的高灵敏度电力电缆局部缺陷诊断方法，包括以下步骤：

[0006] 1、待测电缆数据测量

[0007] 向被测电力电缆发射低压线性调频、伪随机或者高频窄脉冲的信号$V_i$，测量从电缆末端反射回来的反射信号$V_r$，通过$\Gamma_d=\frac{V_r}{V_i}$求出电缆的反射系数谱的幅值$|\Gamma_d(f)|$以及反射系数谱的实部$Real(\Gamma_d(f))$和反射系数谱的虚部$Imag(\Gamma_d(f))$，其中f为信号频率；

[0008] 2、待测电缆数据处理

[0009] 利用转换函数f→t′，将被测频域信号f转换为t′域信号，然后对转换得到的Real($\Gamma_d(t')$)或Imag($\Gamma_d(t')$)进行快速傅里叶(FFT)变换或者离散傅里叶(DFT)变换，记录下能量最大的频率点$f_0'$；然后对转换得到的Real($\Gamma_d(t')$)或Imag($\Gamma_d(t')$)与kaiser(凯瑟)窗函数相乘，并进行快速傅里叶变换或者离散傅里叶变换，得到初步处理数据$K\Gamma_d$；

[0010] 对得到的初步处理数据$K\Gamma_d$做0赫兹至频率点$f_0'$的离散傅里叶变换，将变换结果映射到原始距离诊断图谱$D_0$中，对原始距离诊断图谱$D_0$进行加距离窗处理，得到距离诊断图谱D，其中0赫兹处映射距离为0米，频率点$f_0'$处映射距离为电力电缆长度l；

[0011] 3、参考电缆数据测量及处理

[0012] 将三相系统中的非被测相电力电缆作为参考电力电缆，然后利用步骤1相同方式求出参考电力电缆的反射系数谱的幅值$|\Gamma_{d1}(f)|$以及反射系数谱的实部Real($\Gamma_{d1}(f)$)和反射系数谱的虚部Imag($\Gamma_{d1}(f)$)，并进行步骤2中相同方式的处理，得到处理后的距离诊断图谱E；

[0013] 4、电力电缆局部缺陷位置确定

[0014] 对比距离诊断图谱D和处理后的距离诊断图谱E，利用选通门技术消除距离诊断图谱D中与处理后的距离诊断图谱E相同位置处的畸变点，得到局部缺陷距离诊断图谱F，从局部缺陷距离诊断图谱F中找到的畸变点，即为电力电缆局部缺陷位置；

[0015] 5、电力电缆局部缺陷判断

[0016] 对得到的局部缺陷距离诊断图谱进行离散傅里叶反变换或快速傅里叶反变换，得到变换后的t′域反射系数谱曲线，并利用转换函数t′→f将t′域反射系数谱转换为Real($\Gamma_{d2}(f)$)或Imag($\Gamma_{d2}(f)$)，然后找到Real($\Gamma_{d2}(f)$)或Imag($\Gamma_{d2}(f)$)中每个极大值点或极小值点对应的频率$f_k$，利用公式$v_c=\sum_{k=1}^{N-1}2l(f_{k+1}-f_k)/(N-1)$求出被测电力电缆的平均波速，并将$v_c$与同规格的新电力电缆波速$v_0$进行比较，若$v_c$与$v_0$相差1%及以上，说明被测电缆存在局部缺陷，其中N为Real($\Gamma_{d2}$)或Imag($\Gamma_{d2}$)中极大值点或极小值点的个数。

[0017] 本发明还可采取下述方法进一步评估被测电力电缆局部缺陷的严重程度：

[0018] 建立电缆反射系数谱模值数学模型

[0019] $abs(\Gamma_{d2}(f))=a\cdot e^{b\cdot f}+c\cdot e^{d\cdot f}$

[0020] 利用建立的数学模型对被测电力电缆测量得到的反射系数谱采用选通门技术后的模值$|\Gamma_{d2}(f)|$进行数据拟合，求较高频率极值点$f_k$处对应的拟合值，并由下面公式计算得到缺陷程度error进行评估：

[0021] $error=std((|\Gamma_{d2}(f_k)|-abs(\Gamma_{d2}(f_k)))/abs(\Gamma_{d2}(f_k)))\times100\%$

[0022] 当error<5%时，电缆局部缺陷较轻，此时被测电力电缆可能存在少量铜屏蔽层松动缺陷或者绝缘介质存在刀痕划伤等缺陷；当5%≤error≤10%时，电力电缆缺陷程度中等，此时被测电力电缆可能存在绝缘介质受潮或大面积铜屏蔽层破损等缺陷；当error>10%时，电缆缺陷非常严重，此时被测电力电缆可能存在绝缘介质严重变形等缺陷。公式中的std为标准差。

[0023] 在本发明的上述技术方案中，所述kaiser窗函数中的β取值应满足：

[0024] $$\beta=\begin{cases}0.1102(\alpha-8.7), & \alpha>50\\ 0.5842(\alpha-21)^{0.4}+0.07886(\alpha-21), & 50\geq\alpha\geq21\\ 0, & \alpha<21\end{cases}$$

[0025] 其中α为旁瓣衰减倍数。

[0026] 在本发明的上述技术方案中，原始距离诊断图谱$D_0$优先采用下述公式进行加距离窗处理：

[0027] $$D(i)=\sum_{j\in s}\frac{D_0(j)-\min(D_0)}{\max(D_0)-\min(D_0)}$$

[0028] 其中s为窗口长度，取值不大于距离诊断图谱$D_0$中的空间分辨率，D为处理后得到的距离诊断图谱。

[0029] 在本发明的上述技术方案中，步骤5中所述同规格新电缆的波速$v_0$可由公式$\frac{1}{\sqrt{LC}}$计算获得，其中L和C分别为同规格新电缆单位长度的电感和电容；也可采用时域反射法测取获得。

[0030] 由于测量过程中电力电缆中间接头位置也会出现畸变点，影响缺陷位置的判断，为了消除电力电缆的中间接头对缺陷位置判断的影响，本发明在诊断方法步骤3中引入了参考电力电缆进行对比，即将三相系统中的非被测相电力电缆作为参考电力电缆，然后利用步骤1相同方式求出参考电力电缆的反射系数谱的幅值$|\Gamma_{d1}(f)|$以及反射系数谱的实部$Real(\Gamma_{d1}(f))$和反射系数谱的虚部$Imag(\Gamma_{d1}(f))$，并进行步骤2中相同方式的处理，得到处理后的距离诊断图谱E。

[0031] 由于通常情况下电力电缆的每一相都会在相同位置制作中间接头，为了消除中间接头对电缆局部缺陷位置判断的影响，本发明在诊断方法步骤4中，采用了对比距离诊断图谱D和距离诊断图谱E的方法，利用选通门技术消除距离诊断图谱D中与距离诊断图谱E相同位置处的畸变点，得到局部缺陷距离诊断图谱F，从局部缺陷距离诊断图谱F中找到的畸变点，畸变点就是局部缺陷位置。

[0032] 在电力电缆局部缺陷诊断中，存在电力电缆长，信号衰减严重，所需的信号频带较窄；电力电缆短，信号衰减较小，所需的信号频带较宽。同时当信号未衰减为零时，信号的频带越宽，定位精度与灵敏度都越高。

[0033] 本发明提供的电力电缆局部缺陷诊断方法，具有如下十分突出的优点和有益技术效果：

[0034] 1.本发明的缺陷诊断方法采用的是低压测量方式而非破坏式试验测量方式，不仅不会对电缆绝缘造成损伤，还可减小测量设备的重量和体积。

[0035] 2.本发明利用对频域信息进行处理的方式使电缆局部缺陷更容易表现出来，在此基础上通过与kaiser窗函数的结合，大大提高了对电缆局部缺陷定位的灵敏度。

[0036] 3.相比于TDR，本发明对于变化程度较弱的局部缺陷的识别能力和多处缺陷的识别精度以及识别灵敏度更高，同时其对近端缺陷的识别能力也更强。

[0037] 4.本发明由于采取了通过对距离诊断图谱加距离窗处理的方法使畸变点更易表现出来，大大提高了定位精度。

[0038] 5.本发明采取了通过待测电缆与参考电缆距离诊断图谱的对比与选通门技术，找出相同位置处的畸变点并进行消除，以此消除电缆中间接头对电缆局部缺陷位置判断的影响。

[0039] 6.本发明通过电缆的波速计算对电缆局部缺陷严重程度进行初步评估，在此基础上结合选通后反射系数谱模值拟合曲线对局部缺陷严重程度进行了进一步评估，能准确地评估电缆局部缺陷的严重程度。

[0040] 7.本发明的电缆缺陷诊断方法不受限于待测电缆的电压等级，传统的电缆缺陷诊断方法需要根据不同的电压等级选择不同的测试设备。

## 附图说明

[0041] 图1为本发明的电力电缆缺陷诊断方法的流程示意图。

[0042] 图2为本发明实施例1中绘制的被测电力电缆和参考电力电缆的对比距离诊断图谱，其中实线表示被测电力电缆的距离诊断图谱，虚线表示参考电力电缆的距离诊断图谱。

[0043] 图3为本发明实施例1中绘制的经过选通门技术后的反射系数幅值谱对比图。其中虚线表示使用选通门技术后被测电力电缆的反射系数幅值谱，实线表示根据反射系数谱模值数学模型拟合得到的曲线。

[0044] 图4为本发明实施例2中绘制的局部缺陷距离诊断图谱。

## 具体实施方式

[0045] 下面通过实施例对本发明进行具体的描述。有必要在此指出的是本实施例只用于对本发明进行进一步说明，不能理解为对本发明保护范围的限制。该领域的技术熟练人员可以根据上述本发明的内容做出一些非本质的改进和调整。

[0046] 实施例1

[0047] 本实施例的电力电缆局部缺陷诊断方法的流程如图1所示，被测电力电缆和参考电力电缆的对比距离诊断图谱如图2所示，是针对100m ZR-YJV22-8.7/15电力电缆的局部缺陷诊断，缺陷类型为铜屏蔽层松动缺陷。诊断方法包括以下步骤：

[0048] (1)待测电缆数据测量

[0049] 向被测100m ZR-YJV22-8.7/15电力电缆发射低压伪随机信号$V_i$，测量从电缆末端反射回来的反射信号$V_r$，通过$\Gamma_d=\frac{V_r}{V_i}$求出电缆的反射系数谱的幅值$|\Gamma_d(f)|$以及反射系数谱的实部$Real(\Gamma_d(f))$和反射系数谱的虚部$Imag(\Gamma_d(f))$。

[0050] (2)待测电缆数据处理

[0051] 利用转换函数$f\rightarrow t'$，将被测频域信号转换为$t'$域信号，然后对转换得到的$Real(\Gamma_d(t'))$进行快速傅里叶(FFT)变换，记录下能量最大的频率点$f_0'$；然后对转换得到的$Real(\Gamma_d(t'))$与kaiser(凯瑟)窗相乘并进行快速傅里叶(FFT)变换得到初步处理数据$K\Gamma_d$，kaiser窗中的β取值为6；

[0052] 对$K\Gamma_d$做0赫兹至频率点$f_0'$的DFT变换，将变换结果映射到原始距离诊断图谱$D_0$中，其中0赫兹处映射距离为0米，$f_0'$处映射距离为电缆长度100米。

[0053] 将得到的原始距离诊断图谱进行加距离窗长度s为5米的加窗处理，处理方式为：

[0054] $D(i)=\sum_{j\in\Omega}\frac{D_0(j)-\min(D_0)}{\max(D_0)-\min(D_0)}$

[0055] (3)参考电缆数据测量及处理

[0056] 将三相系统中的非被测相电缆作为参考电缆，然后利用步骤(1)相同方式求出参考电力电缆的反射系数谱的幅值$|\Gamma_{d1}(f)|$和反射系数谱的实部$Real(\Gamma_{d1}(f))$以及反射系数谱的虚部$Imag(\Gamma_{d1}(f))$，并进行步骤(2)中相同条件下的处理，得到处理后的距离诊断图谱E。

[0057] (4)电力电缆局部缺陷位置确定

[0058] 对比距离诊断图谱D和距离诊断图谱E，如图2所示，利用选通门技术消除距离诊断图谱D中与距离诊断图谱E相同位置处的畸变点，得到局部缺陷距离诊断图谱F。从图2可以发现在70米的位置存在一个明显的畸变点，该处正是设置的局部缺陷点。

[0059] (5)电缆局部缺陷严重程度评估

[0060] 对得到的局部缺陷距离诊断图谱进行快速傅里叶反变换(IFFT)，得到变换后的反射系数谱t′域曲线，并利用转换函数$t'\rightarrow f$转换为$Real(\Gamma_{d2}(f))$。找到$Real(\Gamma_{d2}(f))$中每个极大值点对应的频率$f_k$，利用公式$v_c=\sum_{k=1}^{N-1}2l(f_{k+1}-f_k)/(N-1)$求出被测电力电缆的平均波速$v_c=1.7247\times10^8$米/秒，测得新电缆波速$v_0=1.7261\times10^8$米/秒。其中N为$Real(\Gamma_{d2})$或$Imag(\Gamma_{d2})$中极大值点或极小值点的个数。$v_c$与$v_0$两者相差0.81%<1%，说明被测电缆局部缺陷较轻。

[0061] 为了进一步评估被测电缆局部缺陷的严重程度，建立电缆反射系数谱模值数学模型：

[0062] $abs(\Gamma_{d2}(f))=a\cdot e^{b\cdot f}+c\cdot e^{d\cdot f}$

[0063] 利用建立的数学模型对被测电缆测量得到的反射系数谱采用选通门技术后的模值$|\Gamma_{d2}(f)|$进行数据拟合，拟合结果为$abs(\Gamma_{d2}(f))=0.137\cdot e^{-1.33\times10^{-7}\cdot f}+0.8095\cdot e^{-5.474\times10^{-9}\cdot f}$，如图3所示，求出较高频率极值点$f_k$处对应的拟合值并由公式

[0064] $error=std((|\Gamma_{d2}(f_k)|-abs(\Gamma_{d2}(f_k)))/abs(\Gamma_{d2}(f_k)))\times100\%$

[0065] 求出$|\Gamma_{d2}(f)|$与拟合曲线的相对差值的标准差error=1.16%<5%，说明被测电力电缆的局部缺陷较轻，印证了此时被测电力电缆存在铜屏蔽层松动的缺陷。

[0066] 实施例2

[0067] 本实施例的电力电缆局部缺陷诊断方法的流程如图1所示，被测电力电缆和参考电力电缆的对比距离诊断图谱如图4所示，针对1500m10kV XLPE电力电缆进行局部缺陷诊断，缺陷类型也绝缘介质严重变形缺陷，包括以下步骤：

[0068] (1)待测电缆数据测量

[0069] 向被测1500m ZR-YJV22-8.7/15电力电缆发射低压高频窄脉冲$V_i$，测量从电缆末端反射回来的反射信号$V_r$，通过$\Gamma_d=\frac{V_r}{V_i}$求出电缆的反射系数谱的幅值$|\Gamma_d(f)|$以及反射系数谱的实部$Real(\Gamma_d(f))$和反射系数谱的虚部$Imag(\Gamma_d(f))$。

[0070] (2)待测电缆数据处理

[0071] 利用转换函数$f\rightarrow t'$，将被测频域信号转换为t′域信号，然后对转换得到的Imag

($\Gamma_d(t')$)进行离散傅里叶(DFT)变换，记录下能量最大的频率点$f_0'$；然后对转换得到的Imag($\Gamma_d(t')$)与kaiser(凯瑟)窗相乘并进行离散傅里叶(DFT)变换到初步处理数据$K\Gamma_d$，kaiser窗中的β取值为8；

[0072] 对$K\Gamma_d$做0赫兹至频率点$f_0'$的DFT变换，将变换结果映射到原始距离诊断图谱$D_0$中，其中0Hz处映射距离为0米，$f_0'$处映射距离为电缆长度1500米。

[0073] 将得到的原始距离诊断图谱进行加距离窗长度s为30米的加窗处理，处理方式为：

[0074] $$D(i)=\sum_{j\in s}\frac{D_0(j)-\min(D_0)}{\max(D_0)-\min(D_0)}$$

[0075] (3)参考电缆数据测量及处理

[0076] 将三相系统中的非待测相电缆作为参考电缆，然后利用步骤(1)相同方式求出参考电力电缆的反射系数谱的幅值$|\Gamma_{d1}(f)|$以及反射系数谱的实部Real($\Gamma_{d1}(f)$)和反射系数谱的虚部Imag($\Gamma_{d1}(f)$)，并进行步骤(2)中相同条件下的处理，得到处理后的距离诊断图谱E。

[0077] (4)电力电缆局部缺陷位置确定

[0078] 对比距离诊断图谱D和距离诊断图谱E，利用选通门技术消除距离诊断图谱D中与距离诊断图谱E相同位置处的畸变点，得到局部缺陷距离诊断图谱F，如图3所示。从图3可以发现在500米和1200米处存在明显的畸变点，该处正是设置的局部缺陷点。

[0079] (4)电缆局部缺陷严重程度评估

[0080] 对得到的局部缺陷距离诊断图谱进行离散傅里叶反变换(IDFT)，得到变换后的反射系数谱t′域曲线，并利用转换函数t′→f转换为Imag($\Gamma_{d2}(f)$)。找到Imag($\Gamma_{d2}(f)$)中每个极小值点对应的频率$f_k$，利用公式$v_c=\sum_{k=1}^{N-1}2l(f_{k+1}-f_k)/(N-1)$求出被测电力电缆的平均波速$v_0=1.7217\times10^8$米/秒，测得新电缆波速$v_0=1.7261\times10^8$米/秒。其中N为Imag($\Gamma_{d2}$)中极大值点或极小值点的个数。$v_c$与$v_0$两者相差2.55%>1%，说明被测电缆局部缺陷比较严重。

[0081] 为了进一步评估被测电缆局部缺陷的严重程度，建立电缆反射系数谱模值数学模型：

[0082] $abs(\Gamma_{d2}(f))=a\cdot e^{b\cdot f}+c\cdot e^{d\cdot f}$

[0083] 利用建立的数学模型对被测电缆测量得到的反射系数谱采用选通门技术后的模值$|\Gamma_{d2}(f)|$进行数据拟合，拟合结果为$abs(\Gamma_{d2}(f))=0.3406\cdot e^{-9.535\times10^{-7}\cdot f}+0.2823\cdot e^{-2.032\times10^{-7}\cdot f}$，求出较高频率极值点$f_k$处对应的拟合值并由公式

[0084] $error=std((|\Gamma_{d2}(f_k)|-abs(\Gamma_{d2}(f_k)))/abs(\Gamma_{d2}(f_k)))\times100\%$

[0085] 求出$|\Gamma_{d2}(f)|$与拟合曲线的相对差值的标准差error=16.14%>10%，说明被测电力电缆的局部缺陷比较严重，印证了此时被测电力电缆存在绝缘介质严重变形的严重缺陷。

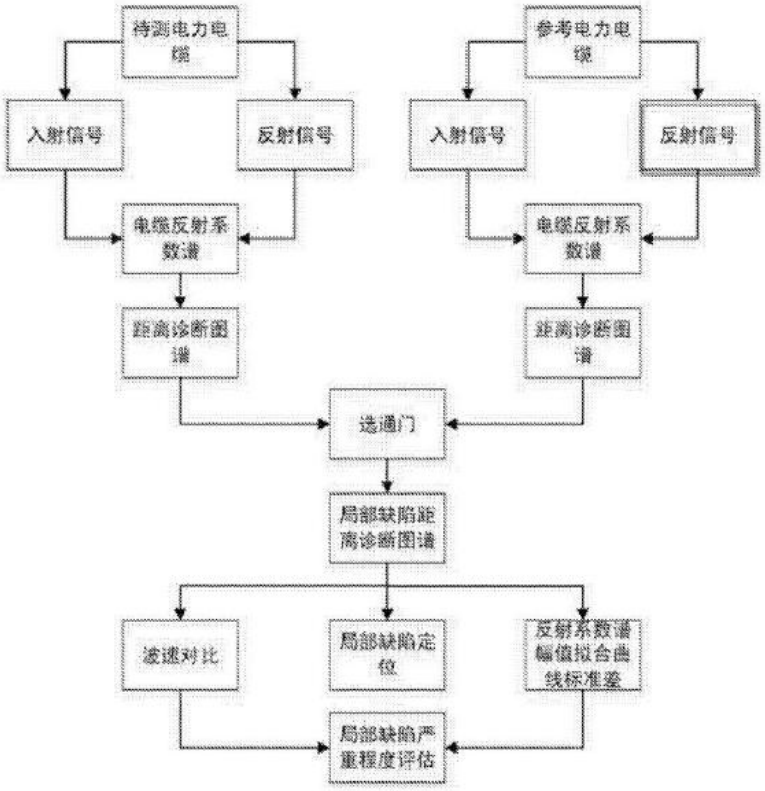

待测电力电缆
参考电力电缆
入射信号
反射信号
入射信号
反射信号
电缆反射系数谱
电缆反射系数谱
距离诊断图谱
距离诊断图谱
选通门
局部缺陷距离诊断图谱
波速对比
局部缺陷定位
反射系数谱幅值拟合曲线标准差
局部缺陷严重程度评估

图1

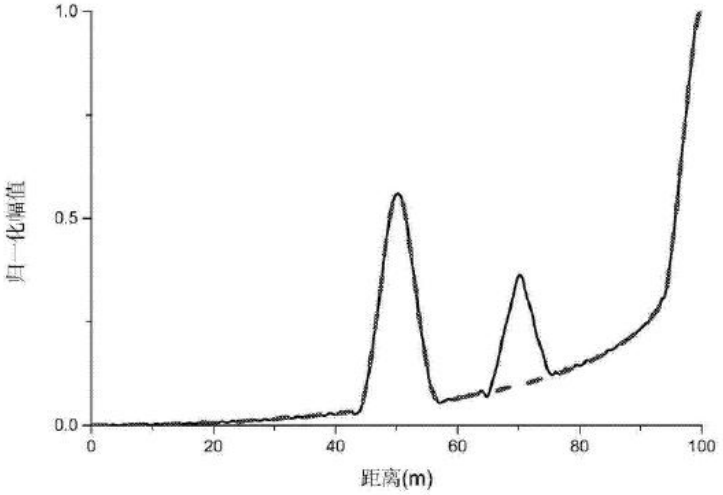

1.0
0.5
0.0
归一化幅值
0
20
40
60
80
100
距离(m)

图2

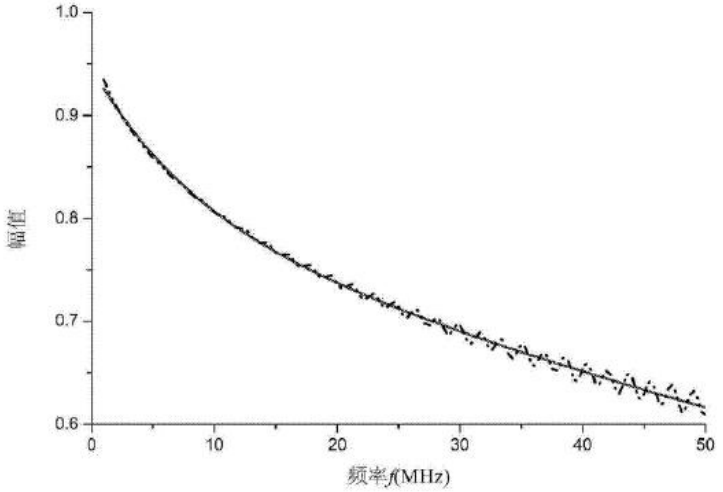

1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
幅值
0
10
20
30
40
50
频率f(MHz)

图3

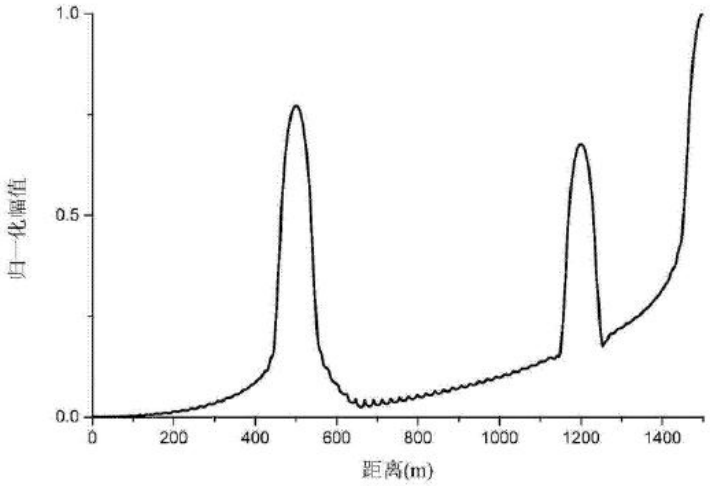



图4