

基于差异增强的电缆微弱缺陷诊断方法研究

孙胜兰 任旭虎 葛文博 张屹巍 赵文婧

(中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580)

摘要: 由于微弱缺陷与完好电缆的反射系数谱差异较小,现有检测技术难以识别,为此提出了一种基于反射系数谱差异增强的电缆微弱缺陷诊断方法。首先建立了电缆线路反射系数谱的数学模型,明确了缺陷程度与反射系数谱之间的内在关联;其次分析了微弱缺陷反射系数谱与完好电缆反射系数谱的差异特征。针对二者之间存在的可辨识差异,设计了一种基于差异谱增强的微弱缺陷定位函数,并提出了反射系数谱的恢复方法,该方法能够利用现有的检测结果,重建电缆在完好状态下的理论反射系数谱。通过将恢复后的完好反射系数谱与含缺陷反射系数谱进行差值处理,有效增强了缺陷特征,提升了缺陷检测的灵敏度和准确性。最后通过仿真结果和现场实验验证了该方法的有效性,结果显示,该方法能够准确识别电缆中的微弱缺陷,提升诊断准确性,定位误差低于4%。

关键词: 电缆线路;反射系数谱;恢复;差异增强;微弱缺陷定位

中图分类号: TM7;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on the diagnosis method of weak defects in cables based on difference enhancement

Sun Shenglan Ren Xuhu Ge Wenbo Zhang Yiwei Zhao Wenjing

(College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: A method for diagnosing weak defects in cables based on the difference enhancement of the reflection coefficient spectra is proposed because it is difficult to identify weak defects using the current cable inspection techniques due to the slight difference between their reflection coefficient spectra and intact cables. First, the internal link between the reflection coefficient spectrum and the defect degree is explained, and the mathematical model of the cable line's reflection coefficient spectrum is constructed. Second, an analysis is conducted to compare the reflection coefficient spectrums of the complete cable and the weak defect. A weak defect location function based on differential spectrum enhancement is devised with the goal of identifying the distinguishable difference between the two, and a reflection coefficient spectrum recovery approach is suggested. Using the current detection data, this method can recreate the theoretical reflection coefficient spectrum of the cable in good condition. Defect characteristics are successfully improved, and the sensitivity and accuracy of defect identification are raised, by processing the difference between the restored intact reflection coefficient spectrum and the reflection coefficient spectrum that contains defects. Ultimately, simulation and field tests were used to confirm the method's efficacy. The findings demonstrated that the technique could precisely detect weak cable flaws and increase diagnostic accuracy, with a localization error of less than 4%.

Keywords: cable line; reflection coefficient spectrum; recovery; difference enhancement; weak defect localizatio

0 引言

随着全球能源需求的持续增长和智能电网建设的推进,交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)电缆以其优越的性能和广泛的适用性,已经成为主导电力电缆市场的关键力量^[1-2]。但由于电缆复杂的制造及施工工艺,局

部区域极易受到外力作用、环境因素等影响^[3],导致该区域的电缆参数发生微弱变化,形成潜在缺陷。如果无法有效识别出潜在缺陷,在长期超负荷运行作用下,微弱缺陷会逐步发展为电缆故障,给人们的生产生活造成严重损失,对电网稳定造成严重威胁^[4]。因此,如何有效检测电缆微弱缺陷的存在,对预防电缆击穿故障的发生,提高供电稳定性具

有重要意义^[5]。

电缆缺陷检测方法包括局部放电法(partial discharge, PD)、时域反射法(time domain reflectometry, TDR)和频域反射法(frequency domain reflectometry, FDR)^[6]。PD法主要通过辨识缺陷处的局部放电信号完成电缆的诊断。由于局放信号本身微弱且波形复杂,同时又极易受到外界环境噪声和电磁干扰的影响,加大了电缆微弱缺陷的检测难度^[7];TDR须向电缆首端注入一个高频脉冲信号,通过检测脉冲信号遇到缺陷后的反射波,结合反射信号传播时间实现电缆缺陷的定位^[8]。但其所需的脉冲信号中高频分量能量较弱,并且容易受到电缆内部衰减和外部噪声的干扰^[9],导致TDR的识别精度较低,无法有效识别电缆中的微弱缺陷^[10]。而FDR是基于宽频阻抗谱(broadband impedance spectrum, BIS)和反射系数谱(reflection coefficient spectrum, RCS)来获取电缆的运行状态^[11],与局部放电法和TDR相比,对微弱缺陷较为敏感。

2015年,Pinomaa等^[12]使用BIS方法进行电缆故障定位,但未实现故障类型的区分。文献[13]提出利用快速傅里叶变换算法分析BIS,实现电缆缺陷定位,但BIS中存在直流分量,诊断函数在电缆首端会出现检测盲区,并且变换前后的点数固定限制了缺陷的距离分辨率,从而影响了缺陷定位的精度。文献[14-15]提出利用积分变换处理BIS,该方法有效实现了电缆缺陷定位,但需大量的原始数据作为参考,在实际应用中存在一定局限。近年来,有学者发现电缆首端反射系数谱能够灵敏识别电缆阻抗失配点。文献[16]通过测量电缆RCS,实现了对绝缘缺陷的有效定位及衰减补偿。但该方法并未分析电缆首端阻抗不匹配对测试结果的影响,且需要提供完好电缆的测试数据作为诊断参考,使得该方法在工程应用中的局限性较大。文献[17]为减轻离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)中数据截断效应对缺陷位置判断的影响,通过对反射系数谱添加Kaiser窗处理后执行离散傅里叶变换以精确定位电缆中的微弱缺陷,该方法能清晰地反映出电容性变化所导致的局部缺陷,但该方法计算量大且参数难以设定。文献[18]为解决传统FDR难以判断不连续点处的阻抗变化情况问题。提出将RCS变换为体现电缆局部缺陷的特征时域反射波形,实现电缆缺陷定位并对缺陷处阻抗变化情况进行辨识。但该方法改写了RCS的原始数据,降低了测试数据的可靠性。文献[19]为提升电缆微弱缺陷定位的效果,提出一种基于二次传输系数模型的新型定位方法。该方法能够更有效地识别物理缺陷,同时降低了测试所需的带宽。但目前二次传输系数模型理论尚不成熟,常数K的构建对电缆缺陷诊断影响较大。

电缆诊断技术不断发展,但针对微弱缺陷的检测仍处于初步阶段。为此,本文提出一种基于反射系数谱差异增强的电缆微弱缺陷诊断方法,该方法可以在获取到的原始电缆数据基础上进行完好反射系数谱的恢复,对二者进行

差异性分析,并对所得信号进行增强处理以突出其缺陷特征,最终构建出显著反映缺陷位置信息的反射系数谱,实现缺陷定位。通过该方法可有效识别电缆中的微弱缺陷,有较高的工程实用价值。

1 电缆分布式参数模型及基于RCS的电缆缺陷定位原理

1.1 电缆的分布参数模型

根据传输线理论^[20],当电缆长度足够长,或入射信号足够高时,待测电缆长度远大于传输信号的波长,此时电缆线路可等效为分布参数模型。完好电缆的分布参数模型如图1所示。

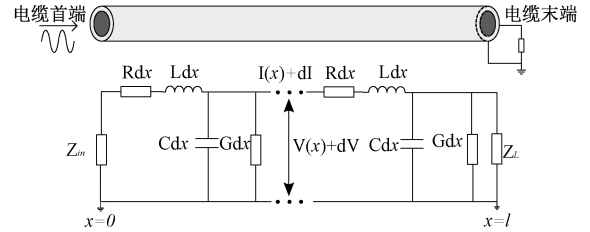


图1 电缆分布参数等效模型

Fig. 1 Distributed parameter equivalent model of cable

图中, Z_{in} 和 Z_L 分别为电缆首、末端的负载阻抗; dx 代表电缆的单位长度; $V(x)$ 与 $I(x)$ 分别代表距电缆首端 x 处的电压和电流行波信号; R 、 L 、 C 和 G 分别代表单位长度的等效电阻、电感、电容、电导^[14]; l 为电缆总长度。

对于终端开路的电缆,距电缆首端 x 处的输入阻抗 $Z(x)$ 与反射系数 $\Gamma(x)$ 可表示为^[21]:

$$Z(x) = Z_0 \frac{1 + \Gamma e^{-2\gamma(l-x)}}{1 - \Gamma e^{-2\gamma(l-x)}} \quad (1)$$

$$\Gamma(x) = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2\gamma(l-x)} \quad (2)$$

式中: Γ 表示终端处的反射系数,终端开路时取值为1; γ 和 Z_0 ^[22]分别代表电缆的传播系数和特征阻抗,分别为式(3)、(4)。

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \quad (3)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (4)$$

式中: α 代表电缆的衰减常数, β 代表相位常数, β 的具体表达式为:

$$\beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} \quad (5)$$

式中: f 与 v 分别代表传输信号的频率和速度。

结合式(1)、(2)和式(5),可得电缆首端($x=0$)时的阻抗谱 $Z(0)$ 及反射系数谱 $\Gamma(0)$ 分别由式(6)、(7)表示。

$$Z(0) = Z_0 \frac{1 + \Gamma e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma e^{-2\gamma l}} \quad (6)$$

$$\Gamma(0) = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2\gamma l} = \Gamma(l) e^{-2\gamma l} \quad (7)$$

1.2 基于首端 RCS 的积分变换定位原理

当电缆中存在缺陷时,入射信号沿电缆传输过程中会在缺陷处发生折反射现象,具体表现形式如图 2 所示。

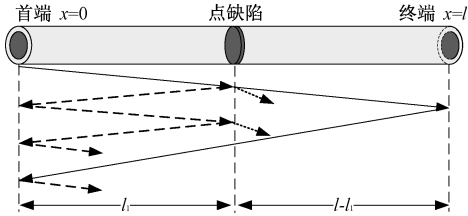


图 2 单一缺陷信号反射示意图

Fig. 2 Schematic of signal reflection at point defect

根据式(7),可推导出电缆含缺陷时的首端反射系数谱为:

$$\Gamma'(0) = \frac{Z(l_1) - Z_0}{Z(l_1) + Z_0} e^{-2\gamma l_1} = \Gamma(l_1) e^{-2\gamma l_1} \quad (8)$$

式中: $Z(l_1)$ 、 $\Gamma(l_1)$ 分别为缺陷处阻抗与反射系数; l_1 为缺陷位置距电缆首端的距离。

为探究电缆缺陷与首端反射系数谱之间的关系,结合式(3)和(5),对式(8)进行展开并获取实部信息如式(9)所示。

$$\Gamma'(0) = \text{Real}(\Gamma(0)) = \Gamma(l_1) e^{-2\alpha l_1} \cos(2\pi \frac{2l_1}{v} f) \quad (9)$$

电缆首端 RCS 与电缆缺陷位置息息相关,结合广义积分原理建立诊断函数可以确定电缆缺陷的位置,诊断函数如式(10)所示。

$$\begin{cases} D(x) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \Gamma'(0) \times K(x) df \\ K(x) = e^{2\gamma x} \end{cases} \quad (10)$$

式中: f_{\min} 与 f_{\max} 分别为测试频率上下; $K(x)$ 为传统积分变换选取的核函数。

由于电缆首端的反射系数谱蕴含电缆缺陷的关键信息,因此可通过积分变换实现缺陷的精确定位^[23]。然而,随着缺陷电阻的逐渐增大,缺陷处的电气特性逐渐与完好电缆相接近,导致含缺陷反射系数谱与完好电缆反射系数谱之间的差异减小,增加了缺陷定位的难度。

2 基于差异谱增强的微弱缺陷定位方法

2.1 微弱缺陷对反射系数谱的影响

文献[24]提出以 $R_f = 10Z_0$ 作为分界线,将接地故障分为 4 种类型:短路、低阻、高阻以及开路故障,阻值范围如表 1 所示。进一步分析表明,高阻故障可以被视为一种微弱缺陷,且随着故障阻值 R_f 的增加,缺陷的严重程度逐渐降低。

表 1 不同故障类型的阻值范围

Table 1 Resistance range for different fault types

	短路	低阻	高阻	开路
R_f 范围	$R_f = 0$	$R_f < 10Z_0$	$R_f \geq 10Z_0$	∞

含单一缺陷电缆(如图 2 所示)首端处的输入阻抗谱和反射系数谱可由式(11)、(12)表示。

$$Z(0) = Z_0 \frac{1 + e^{-2\gamma l} + \frac{Z_0}{2R_f} [1 - e^{-2\gamma l} - e^{-2\gamma l_1} + e^{-2\gamma(l-l_1)}]}{1 - e^{-2\gamma l} + \frac{Z_0}{2R_f} [1 + e^{-2\gamma l} + e^{-2\gamma l_1} + e^{-2\gamma(l-l_1)}]} \quad (11)$$

$$\Gamma(0) = \frac{e^{-2\gamma l} - \frac{Z_0}{2R_f} (e^{-2\gamma l} + e^{-2\gamma l_1})}{1 + \frac{Z_0}{2R_f} (1 + e^{-2\gamma(l-l_1)})} \quad (12)$$

将图 2 电缆模型用于仿真研究,测试频率为 0.1~10 MHz,本文设置 5 组不同 R_f 的电缆样本,具体参数如表 2 所示。其中设定 R_f 阻值分别为 300 Ω 和 3 000 Ω 的样本,用于模拟较为严重的低阻故障和微弱缺陷两种情形。

表 2 电缆仿真样本参数

Table 2 Cable simulation sample parameters

样本	缺陷位置/m	R_f 阻值/ Ω	电缆总长/m
No. 1	—	—	400
No. 2	200	300	400
No. 3	200	3 000	400
No. 4	100	300	400
No. 5	100	3 000	400

根据式(12)分析可知,其分子中以 $Z_0/2R_f$ 引导的项实际上是整体的 1/20,对结果影响可近似忽略不计。但分母中较小因数的变化可能对结果产生显著的扰动,所以不可忽略。因此,式(12)可化简为:

$$\Gamma(0) = \frac{e^{-2\gamma l}}{1 + \frac{1}{20} (1 + e^{-2\gamma(l-l_1)})} \quad (13)$$

将式(3)、(5)代入式(13)中,根据欧拉公式可得:

$$\Gamma(0) = \frac{e^{-2\alpha l} [\cos(2\pi \frac{2l}{v} f) - j \sin(2\pi \frac{2l}{v} f)]}{1 + \frac{1}{20} [1 + e^{-2\alpha(l-l_1)} (\cos(2\pi \frac{2(l-l_1)}{v} f) - j \sin(2\pi \frac{2(l-l_1)}{v} f))]} \quad (14)$$

根据式(14)可知,当电缆中存在缺陷时,除 $2l/v$ 频率分量外,还存在等效频率为“ $2(l-l_1)/v$ ”的周期性信号分量。

进一步推导出含两处缺陷的电缆首端反射系数谱可表示为式(15)。

$$\Gamma(0) = \Gamma(f, x, l, l_1, l_2, R_{f1}, R_{f2}, \alpha, v) \quad (15)$$

式中: l_1 、 l_2 分别为第一、二处缺陷位置距首端距离, R_{f1} 、 R_{f2} 分别为第一、二处缺陷电阻阻值。

根据式(14)对样本 2 分析,此时等效频率分量“ $2l/v$ ”、“ $2(l-l_1)/v$ ”分别为 800/ v 和 400/ v 。即含有电缆长度信

息的函数周期是含有故障距离信息的2倍。将样本1和2的反射系数谱对比分析,如图3所示。

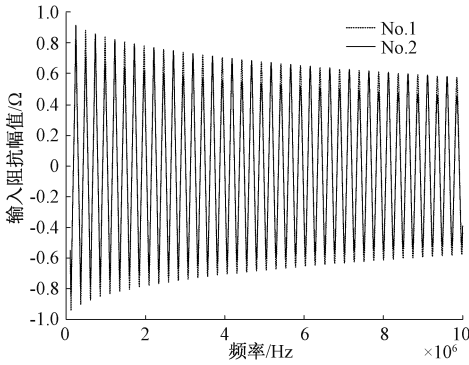


图3 No. 1与No. 2反射系数谱差异分析

Fig. 3 Analysis of reflectance coefficient spectrum difference between No. 1 and No. 2

基于公式(14)分析,在不同 f_l 下, $\Gamma(0)$ 的主要差异体现在分母中括号内的项,因此反射系数谱的幅值主要受该项的影响。并且将不同 f_l 下的 $\Gamma(0)$ 进行化简处理,可以观察到 $\Gamma(0)$ 的值呈现出明显的周期性变化,每两组数据为一个周期。这一周期特征与图3所示的仿真结果高度一致,验证了理论分析的准确性。

通过图3中的仿真结果可以看出含缺陷电缆与完好电缆反射系数谱仅在特定极值点幅值上存在差异,相位上保持严格一致性,这种差异与故障位置及电缆总长呈现出一定的规律性变化。将样本1~5分别进行电缆反射系数谱的获取,结果如图4所示。

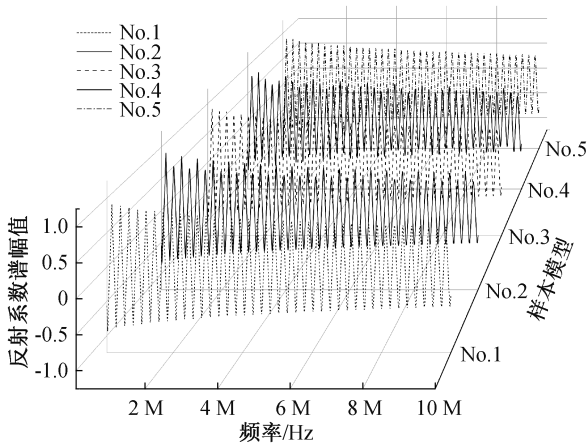


图4 样本1~5反射系数谱对比

Fig. 4 Sample 1~5 reflection coefficient spectrum comparison

通过图4可知,随着缺陷电阻的增加,含缺陷反射系数谱与完好电缆反射系数谱在特定极值点处的差异逐渐减小。此外,不同缺陷位置导致的反射系数谱变化规律与前述理论分析相一致。这一现象表明了随着缺陷电阻值的增大,缺陷的可检测性逐渐降低,从而加大了缺陷检测的难度。

尽管如此,含微弱缺陷的反射系数谱与理想完好状态下的反射系数谱之间仍然存在可辨识差异。因此,恢复完好电缆的反射系数谱对于提高缺陷检测的准确性和可靠性具有重要意义。

2.2 恢复完好电缆反射系数谱

在实际现场检测中,由于时间久远、环境变化或记录不全等原因,导致无法获取电缆完好状态下的数据参数。在这种情况下,反射系数谱恢复技术能够基于现有的含缺陷检测结果,重建电缆在完好状态下的理论反射系数谱,为后续的差异分析和增强处理提供准确的参考基准。

将式(3)代入式(8)化简为:

$$\Gamma_1(\omega) = e^{-2\gamma l} = e^{-2(\alpha + j\beta)l} \quad (16)$$

式中: Γ_1 为测试电缆宽频反射系数谱。

由图4可知,当电缆中存在缺陷时,此时的阻抗谱或反射系数谱已经不满足衰减性,呈现出一定规律的周期性变化,并且与电缆总长和缺陷位置有关。但其仍然包含与完好电缆状态下谐振点幅值相一致的特征谐振点,如图中虚线所示的第 $2n-1$ 个谐振峰(n 为正整数)。这一观察结果表明,可以通过对原始数据中的特定谐振点进行识别和筛选,根据筛选出的局部极大值进行衰减常数 α 的恢复。

由此可得电缆在谐振点处的衰减常数为:

$$\alpha = -\text{real}\left(\frac{\ln(\Gamma_{in, \max})}{2l}\right) \quad (17)$$

式中: $\Gamma_{in, \max}$ 为宽频反射系数局部极大值点处幅值。由于式(17)仅求得局部极大值点处的衰减常数,要得到整个频域范围内各点的衰减常数,需要利用幂函数进行数据拟合:

$$\alpha_{new}(f) = a \cdot f^b + c \quad (18)$$

式中: α_{new} 为恢复衰减常数; a 、 b 、 c 为拟合系数。

同理,相位常数可根据式(19)进一步获取

$$\beta_{new} = -\text{Im}\left(\frac{\ln(\Gamma_1(\omega))}{2l}\right) \quad (19)$$

根据获取到的 α_{new} 和 β_{new} ,可由式(20)进行完好反射系数谱 Γ_{new} 的恢复,恢复完好与原始反射系数谱对比如图5所示:

$$\Gamma_{new} = e^{-2\alpha_{new}l} \cdot \cos(2\beta_{new}l) \quad (20)$$

根据图5可以观察到,恢复后信号与原始测量信号保持较高的一致性,为后续的差值处理提供了基础。

2.3 构建差异谱增强的新型诊断函数

根据2.1节和2.2节中的分析可得,含缺陷电缆反射系数谱与完好电缆反射系数谱差异越大,缺陷特征越明显,缺陷定位的准确性也随之提高。因此为改善微弱缺陷定位困难的问题,尝试将恢复后的完好电缆反射系数谱与实际检测结果进行差异增强处理,实现微弱缺陷的精准定位。

因为微弱缺陷与完好反射系数谱差值相对于反射系数谱本身而言极其微小,因此,为进一步增强电缆缺陷特征,提升缺陷定位的精度,所以对二者的差值结果进行增强处理。引入增强因子 k ,构建增强后的缺陷反射系数谱为:

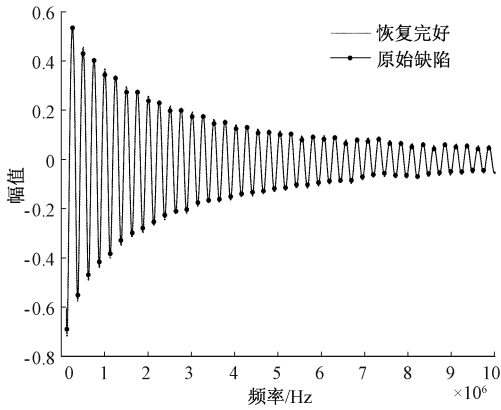


图 5 恢复完好与原始微弱缺陷反射系数谱对比
Fig. 5 Comparison of the reflection coefficient spectra of the restored intact state and the original weak defect

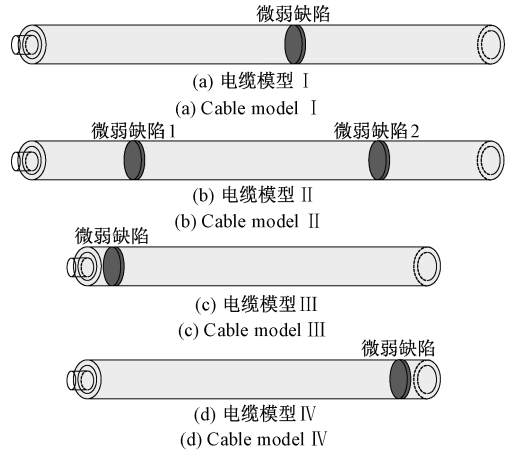


图 6 仿真构建的电缆模型
Fig. 6 Cable model constructed by simulation

$\Gamma_{zq}(0) = \Gamma_{new}(0) - k \cdot \Delta\Gamma$ (21)
式中: $\Delta\Gamma$ 为完好电缆与含缺陷电缆反射系数谱差值。因此, 利用式(21)构建基于差异谱增强的新型诊断函数, 定义为:

$$D(x) = \text{real} \left(\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \Gamma_{zq}(0) \times K'(x) df \right) \quad (22)$$

式中: $K'(x)$ 为积分变换核函数, 定义为:

$$K'(x) = e^{2ax} \cos(2\beta x) \quad (23)$$

联立式(7)、(8)、(21)和(23), 将式(21)化简可得:

$$D(x) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \left[((1-k)\Gamma_{new}(0) + k \cdot \Gamma'(0)) e^{2ax} \cos(2\pi \frac{2x}{v} f) \right] df \quad (24)$$

式中: $\Gamma'(0)$ 为含缺陷电缆反射系数谱。

利用诊断函数 $D(x)$ 进行电缆检测, 进一步增强了含缺陷电缆反射系数谱与完好电缆反射系数谱之间的差异, 可以更好地实现微弱缺陷的检测与定位, 提高缺陷检测精度。

3 仿真分析

3.1 构建缺陷电缆模型

为验证本文所提方法的有效性, 构建如图 6 所示 4 种电缆仿真模型。模型 I 和 II 模拟 10 kV 的 XLPE 电力电缆, 模型 III 模拟 SYV 75-3 同轴电缆, 模型 IV 模拟 WDZB-YJY 型电缆, 根据不同型号电缆的缆芯及屏蔽层半径、电阻率进行仿真分析。其中, 电缆模型 I 和 II 总长均为 600 m, 将模型 I 的微弱缺陷设置在距电缆首端 350 m 处, 缺陷电阻为 5 000 Ω ; 模型 II 的两处微弱缺陷分别设置在距首端 200 m 和 400 m 处, 缺陷电阻分别为 3 000 Ω 和 2 000 Ω ; 电缆 III 和 IV 总长均为 400 m, 微弱缺陷分别设置在距电缆首端 30 m 和 380 m 处, 缺陷电阻为 3 000 Ω 。

3.2 仿真结果及分析

仿真频带范围为 100 KHz ~ 10 MHz, 测试点数为 5 000, 在电缆终端开路状态下分别获取 4 种电缆模型首端

处的 RCS, 采用文中所提方法对 RCS 进行处理。根据式(24)可知, 增强因子 k 的选取与最终诊断结果密切相关。为验证 k 值对缺陷检测的影响, 本研究对模型 I 进行了仿真, 分别设置增强因子 k 为 1、5、15 和 25, 并绘制不同 k 值下的诊断函数曲线及相应的缺陷定位谱图, 如图 7 所示。

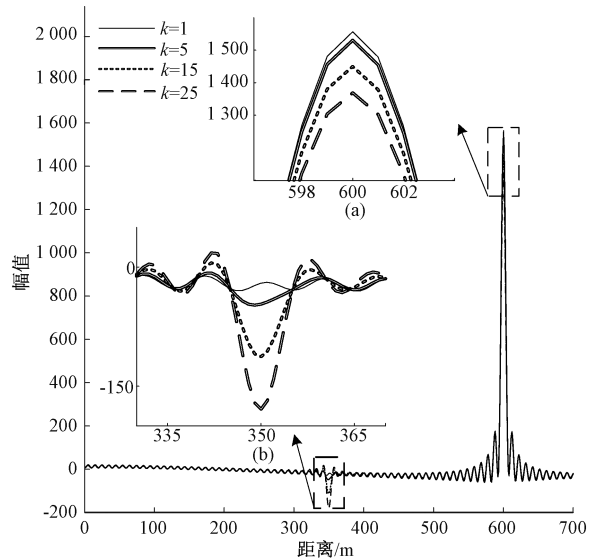


图 7 模型 II 不同增强因子 k 对诊断结果的影响
Fig. 7 The effect of different enhancement factors k on diagnostic results in model II

在图 7 中, 随着增强因子 k 的递增, 可以观察到缺陷区域的峰值显著增强, 如图 7(b) 所示; 然而, 增强因子 k 并非越大越有利, 随着 k 值的增加, 虽然缺陷峰值得到提升, 但电缆终端峰值却逐渐降低, 如图 7(a) 所示。因此, 对于不同的待测电缆, 首先要确定一个合适的增强因子, 确保提高缺陷检测灵敏度的同时, 不牺牲电缆终端的信号强度, 进而进行后续的数据处理。

图 8 为模型 I 分别利用传统和基于差异谱增强的新型

诊断函数的结果对比图。其中,为获得更显著的识别效果,选取 k 值为25。

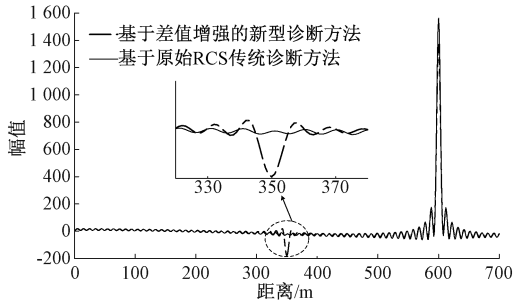


图8 模型Ⅰ传统诊断方法与新型诊断方法对比

Fig. 8 Model I comparison of traditional and new diagnostic methods

根据图8可以看出,利用传统方法对于含微弱缺陷电缆进行检测,仅在电缆终端出现“突变峰”,在预期缺陷位置并未检测到相应的“缺陷峰”,如实线所示。而利用文中方法对微弱缺陷电缆进行检测,可以清晰定位出微弱缺陷位置,并且不会影响电缆终端的定位,与缺陷模型Ⅰ的实际设置情况保持一致,如虚线所示。

图9表示模型Ⅱ分别利用传统和基于差异谱增强的新型诊断函数的结果对比图。其中,选取增强因子 k 值为15。

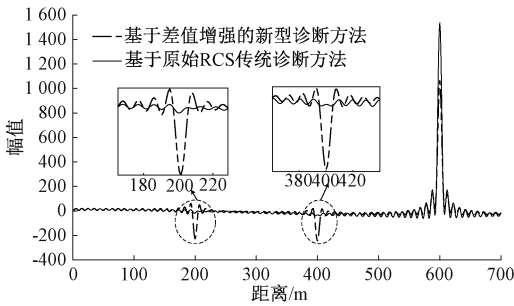


图9 模型Ⅱ传统诊断方法与新型诊断方法对比

Fig. 9 Model II comparison of traditional and new diagnostic methods

图9中实线为利用传统诊断函数的定位结果,可以看到在电缆终端存在“突变峰”,而在预设的两个缺陷位置处并未检测到相应的“缺陷峰”。而虚线为利用差异增强新型积分变换获取的诊断函数,该曲线不仅成功识别了电缆终端的位置,而且还清晰地定位了两个缺陷位置,与缺陷模型Ⅱ的实际设置情况完全一致。

图10、11为模型Ⅲ、Ⅳ分别利用传统和基于差异谱增强的新型诊断函数的结果对比图。其中,为获得更显著的识别效果,选取 k 值分别15和40。

根据图10和11可以看出,利用文中方法可以实现电缆近端和远端处的微弱缺陷定位检测。结合图8和9,分析得到文中方法可以实现不同电缆型号、不同缺陷位置的定位检测。

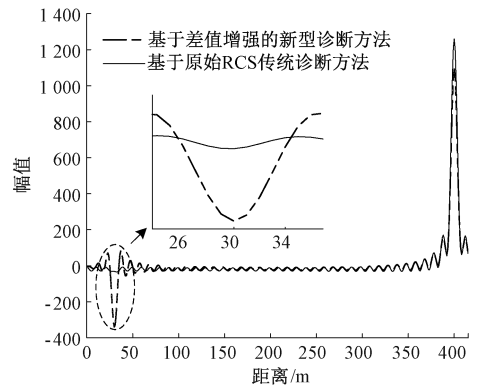


图10 模型Ⅲ传统诊断方法与新型诊断方法对比

Fig. 10 Model III comparison of traditional and new diagnostic methods

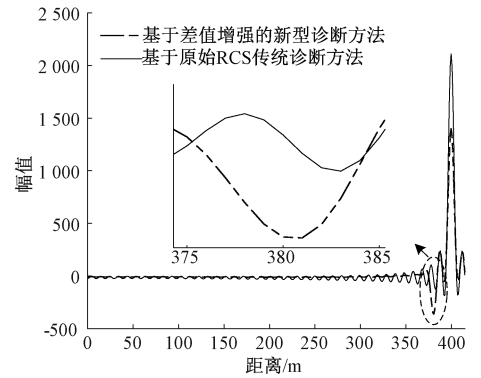


图11 模型Ⅳ传统诊断方法与新型诊断方法对比

Fig. 11 Model IV comparison of traditional and new diagnostic methods

将定位距离在 $0.98 l_i \sim 1.02 l_i$ 处的诊断函数幅值用式(25)计算其标准分贝值^[25]:

$$\begin{cases} P = \frac{1}{M} \int_{0.98 l_i}^{1.02 l_i} d(x)^2 df \\ B = 10 \lg(P) \end{cases} \quad (25)$$

式中: P 为区域内信号的平均功率; $d(x)$ 为诊断函数在该区域内数据点的幅值; M 为信号数据点个数, l_i 为缺陷位置距离, B 为计算所得标准分贝值。

为评估新型诊断函数的定位提升程度,利用式(26)计算二者的放大比率:

$$P_{\text{increase}} = \frac{B_n - B_i}{B_i} \times 100\% \quad (26)$$

式中: B_i 为传统诊断函数的标准分贝值, B_n 为新型诊断函数的标准分贝值。

图8中传统与新型诊断函数在区域 $0.98 l_1 \sim 1.02 l_1$ 的分贝值分别为28.88 dB、40.40 dB,计算放大比率得到新型诊断函数的诊断准确性相比传统诊断函数提升了39.9%。图9中传统方法在区域 $0.98 l_1 \sim 1.02 l_1$ 和 $0.98 l_2 \sim 1.02 l_2$ 的分贝值分别为21.85 dB、30.24 dB;新型诊断

函数分别为 44.05 dB、42.47 dB,计算放大比率得到新型诊断函数的诊断准确性提升了 101.0%、40.4%。图 10 中传统与新型诊断函数在区域 $0.98 l_1 \sim 1.02 l_1$ 的分贝值分别为 33.00 dB、49.10 dB,计算得到新型诊断函数的诊断准确性提升了 48.8%。图 11 中二者的分贝值分别为 39.55 dB、46.20 dB,新型诊断函数的诊断准确性提升了 16.8%。

4 实验验证

4.1 搭建实验平台及实验过程

为测试上述电缆微弱缺陷定位方法的效果,利用自研设备搭建了如图 12 所示的测试平台。并在检测中心利用电缆测试模拟设备进行缺陷模拟。

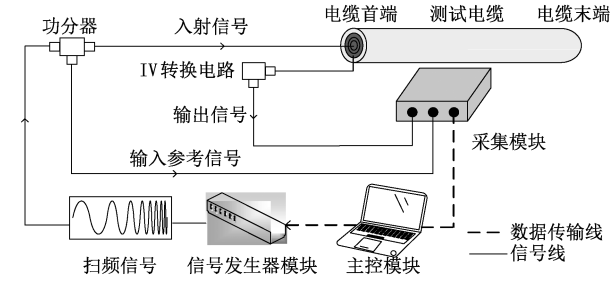


图 12 RCS 测试平台说明图

Fig. 12 Schematic diagram of RCS test platform

实验采用 3 种不同型号(样本 1~3 采用 10 kV XLPE 电力电缆、样本 4 采用 SYV 75-3 同轴电缆、样本 5 采用 WDZB-YJY 型电缆)的 400 m 电缆作为研究对象,构建出含微弱绝缘层缺陷的电缆样本,微弱缺陷具体参数由表 3 所示。测量频率范围为 0.1~10 MHz,测试点数为 400,末端处于开路状态。

表 3 电缆缺陷参数设置

Table 3 Cable defect parameter setting

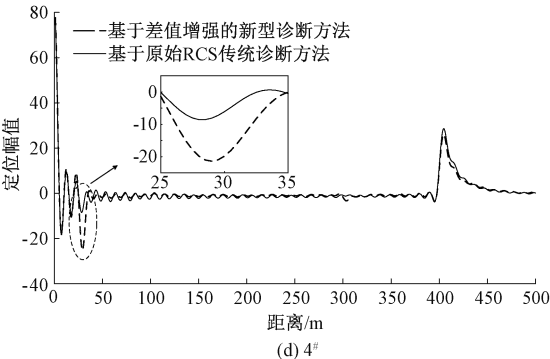
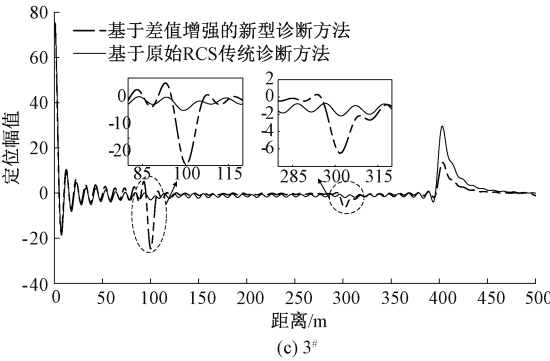
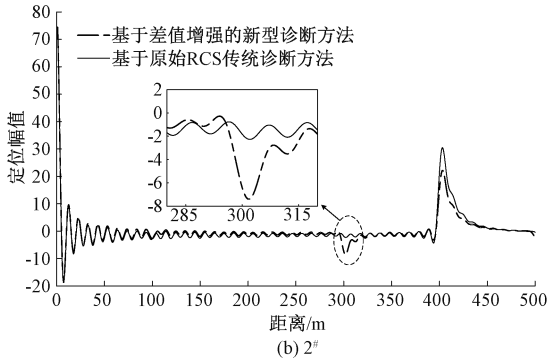
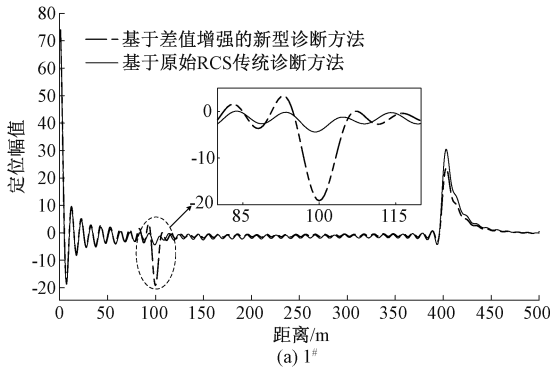
样本	缺陷位置/m	R_f 阻值/ Ω
1#	100	3 000
2#	300	3 000
3#	100、300	2 200、3 000
4#	30	3 000
5#	380	3 000

4.2 实验结果及分析

根据本文方法对电缆 RCS 数据进行分析,相应的诊断函数曲线如图 13 所示。根据式(25),分别计算两种诊断函数在 $0.98 l_i \sim 1.02 l_i$ 区域内的幅值分贝值,并通过式(26)获取放大比率。

在对电缆缺陷检测的研究中,新型诊断函数与传统诊断函数的性能对比存在显著差异。在 1# 样本中,传统诊断函数与新型诊断函数在缺陷区域的分贝值分别为 8.42 dB、20.86 dB,通过计算放大比率,发现新型诊断函数的诊断准

确性相比传统诊断函数提升了 147.7%;在 2# 样本中,两种函数分贝值分别为 3.92 dB、14.09 dB,新型诊断函数的诊断准确性提升了 259.4%;对于 3# 样本,传统诊断函数与新型诊断函数的分贝值分别为 9.30 dB、3.55 dB 和 23.10 dB、12.89 dB,提升幅度分别为 148.3%和 263.1%;在 4# 样本中,两种函数分贝值分别为 6.23 dB、9.27 dB,新型诊断函数的诊断准确性提升了 48.8%;在 5# 样本中,



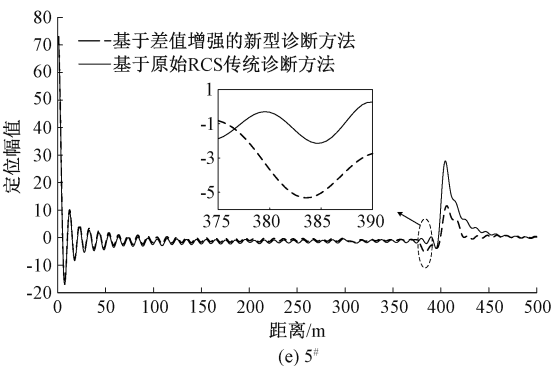


图 13 本文方法与传统方法缺陷检测结果对比

Fig. 13 A comparison of defect detection results between the method presented in this paper and traditional methods

两种函数分贝值分别为 3.55 dB、4.38 dB,新型诊断函数的诊断准确性提升了 23.4%。由此表明,新型诊断函数的构建有效增强了诊断函数在电缆微弱缺陷处的“缺陷峰”,提高电缆缺陷检测能力。

从图 13 中可以看出,本文所提微弱缺陷定位方法,在缺陷位置处存在明显“缺陷峰”,可实现不同位置处的微弱缺陷的定位检测。而利用原始单一 RCS 数据进行积分变换后,在缺陷位置并未形成“缺陷峰”,湮没在了该位置周围的震荡涟漪中,无法实现微弱缺陷的有效识别。为验证本文所提方法的有效性,根据电缆微弱缺陷的诊断结果与实际缺陷位置进行比较,如表 4 所示。从表 4 可以看出,本文提出的方法对于微弱缺陷的定位更为精确,定位误差不超过 4%。

表 4 真实电缆样本的缺陷检测结果

Table 4 Defect detection results for real cable samples

样本	实际位置/m	定位位置/m	定位误差/m
1 [#]	100	99.5	0.5(0.5%)
2 [#]	300	302	2(0.67%)
3 [#]	100,300	100,302	2(0.67%)
4 [#]	30	29	1(3.3%)
5 [#]	380	382	2(0.53%)

5 结 论

针对现有方法无法有效检测电缆微弱缺陷的问题,本文提出一种基于反射系数谱差异增强的电缆微弱缺陷诊断新方法。通过对仿真和实际电缆样本中的微弱缺陷进行诊断,验证了该方法的有效性。并得出以下结论:本文基于电缆宽频阻抗谱理论研究和仿真分析发现并验证完好电缆反射系数谱和含缺陷反射系数谱波形之间的内在联系,二者波形仅在特定极值点处幅值存在差异,即电缆缺陷越微弱,与完好电缆反射系数谱差异越小,进而增加定位难度;本文根据原始测量信号实现完好反射系数谱的恢复,进一步获

取二者的差值信号,并对所得信号进行增强处理,强化微弱缺陷的反射系数谱特征,从而实现微弱缺陷的定位,诊断准确性提升超过 147.7%;仿真分析与实际测量的结果一致表明,本文所提方法可以准确定位电缆微弱缺陷,定位误差不超过 4%,对防止电缆故障的发生具有重要意义。

参考文献

[1] 刘秀婷,李烨,高峰,等. 高压电缆局部放电检测及识别系统研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(17): 97-107.

LIU X T, LI Y, GAO F, et al. Research on partial discharge detection and recognition system of high voltage cable[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(17): 97-107.

[2] 陈研,倪松,马天宇,等. 在役高压电缆缓冲层缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 82-90.

CHEN Y, NI S, MA T Y, et al. Defect detection of buffer layer of in-service high voltage cable[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 82-90.

[3] 王昱皓,周凯,汪先进,等. 基于改进时频域反射法的电力电缆局部缺陷定位[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2584-2594.

WANG Y H, ZHOU K, WANG X J, et al. Power cable defects location based on improved time-frequency domain reflectometry[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2584-2594.

[4] 单秉亮,李舒宁,杨霄,等. XLPE 配电电缆缺陷诊断与定位技术面临的关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4809-4819.

SHAN B L, LI SH N, YANG X, et al. Key problems faced by defect diagnosis and location technologies for XLPE distribution cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4809-4819.

[5] 陈泽昊,许永鹏,李喆,等. 基于小波包分解的直流电缆泄漏电流分析研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 163-170.

CHEN Z H, XU Y P, LI ZH, et al. Leakage current analysis of DC cable based on wavelet packet decomposition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 163-170.

[6] 饶显杰,周凯,黄永禄,等. 频域反射法中阻抗变化类型判断技术[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3457-3466.

RAO X J, ZHOU K, HUANG Y L, et al. Type judgement technology of impedance variation in frequency domain reflection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3457-3466.

- [7] 聂永杰, 赵现平, 李盛涛. XLPE 电缆状态监测与绝缘诊断研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1361-1371.
NIE Y J, ZHAO X P, LI SH T. Research progress in condition monitoring and insulation diagnosis of XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1361-1371.
- [8] 高树国, 刘贺晨, 范辉, 等. 考虑波速特性的小波变换模极大值法的电力电缆局部放电定位研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2244-2250.
GAO SH G, LIU H CH, FAN H, et al. PD location method of power cable based on wavelet transform modulus maxima considering wave characteristics[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2244-2250.
- [9] MENG P F, LI T F, ZHOU K, et al. Online monitoring of the cable insulation state based on the impulse impedance spectrum[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-11.
- [10] LIU D L, FENG H W, YANG H Y. A Novel method based on spread-spectrum time-domain reflectometry for improving the distance of cable fault detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(9): 9440-9446.
- [11] 周凯, 黄靖涛, 孟鹏飞, 等. 基于 FDR 和时频脉冲转换的长电缆缺陷极性识别研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5271-5281.
ZHOU K, HUANG J T, MENG P F, et al. Research on defect polarity identification of long cables based on FDR and time-frequency pulse conversion [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 5271-5281.
- [12] PINOMAA A, AHOLA J, KOSONEN A, et al. Diagnostics of low-voltage power cables by using broadband impedance spectroscopy[C]. 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE' 15 ECCE-Europe). Geneva, Switzerland: IEEE, 2015.
- [13] LIM H, KWON G Y, SHIN Y J. Fault detection and localization of shielded cable via optimal detection of time-frequency-domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.
- [14] 周志强. 基于宽频阻抗谱的电缆局部缺陷诊断方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
ZHOU ZH Q. Research on the diagnosis method of local defects in cables based on broadband impedance spectrum [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [15] ZHOU Z Q, ZHANG D D, HE J J, et al. Local degradation diagnosis for cable insulation based on broadband impedance spectroscopy [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2097-2107.
- [16] 赵洪山, 孙京杰, 许向东. 基于反射系数谱积分的电缆缺陷诊断方法[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4548-4556.
ZHAO H SH, SUN J J, XU X D. Diagnosis of cable defects based on reflection coefficient spectral integration [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4548-4556.
- [17] 谢敏, 李烨, 俞骏, 等. 频域反射法阻抗匹配技术及其在电缆衰减补偿与相速度计算中的应用[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1762-1769.
XIE M, LI Y, YU J, et al. Impedance matching technology for frequency domain reflectometry and its application in cable attenuation compensation and phase velocity calculation [J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1762-1769.
- [18] 饶显杰, 周凯, 谢敏, 等. 基于频域反射法的特征时域波形恢复技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1420-1427.
RAO X J, ZHOU K, XIE M, et al. Recovery technique of characteristic time domain waveform based on frequency domain reflection method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1420-1427.
- [19] 高春林. 基于传输系数谱的电缆缺陷定位方法研究[D]. 西南石油大学, 2022.
GAO CH L. Research on cable defect location method based on transmission coefficient spectrum [D]. Southwest Petroleum University, 2022.
- [20] 饶显杰, 徐忠林, 龙林, 等. 基于频域反射法的电缆缺陷时域诊断特征波形[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3483-3493.
RAO X J, XU ZH L, LONG L, et al. Characteristic waveforms for time-domain diagnosis of cable defects based on frequency-domain reflection method [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3483-3493.
- [21] 饶显杰, 徐忠林, 陈勃, 等. 基于频域反射的电缆缺陷定位优化方法[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3681-3689.
RAO X J, XU ZH L, CHEN B, et al. Cable defect location optimization based on frequency domain reflection [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3681-3689.
- [22] OHKI Y, HIRAI N. Location attempt of a degraded portion in a long polymer-insulated cable[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2461-2466.

- [23] ZHU G Y, LIU ZH G, ZHOU K, et al. A novel dampness diagnosis method for distribution power cables based on time-frequency domain conversion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.
- [24] 李露. 船用电力电缆故障诊断的仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- LI L. Simulation study on fault diagnosis of marine power cable [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [25] 王浩轩, 容易, 曾耀祥. 多喷管火箭起飞噪声环境预示方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024,

64(8): 1357-1366.

WANG H X, RONG Y, ZENG Y X. Prediction method of lift-off acoustic environment for multinozzle rockets[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2024, 64(8): 1357-1366.

作者简介

孙胜兰, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备状态检测与故障诊断。

E-mail: 17754342687@163.com

任旭虎(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为电力设备故障预测与优化运维、电力系统运行与控制等。

E-mail: rxh@upc.edu.cn