

频域反射法在海缆局部缺陷诊断中的应用评述

王昊月¹, 祝一一¹, 李 猛¹, 王 励², 张佳宝¹, 和敬涵¹

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 长江三峡集团江苏能源投资有限公司, 南京 210019)

摘 要: 频域反射法(frequency domain reflectometry, FDR)在长距离海底电缆诊断定位领域具有重要应用前景。FDR 法主要有首端输入阻抗谱和反射系数谱两种技术手段, 该文针对长距离传输海底电缆缺陷诊断的适应性, 从原理、诊断效果以及海底电缆的适应性 3 个维度对这 2 种技术进行了系统综述, 比较了它们在电缆缺陷诊断中的差异。首先, 从原理上, 首端输入阻抗频谱图依赖于与完好电缆数据的对比来识别缺陷, 反射系数谱则直接反映信号的反射强度, 且二者在核心变量和数学变换上有所不同。此外, 在诊断效果方面, 总结分析了当前研究进展, 通过仿真复刻不同位置、不同范围和类型的电缆缺陷, 比较了两种技术在缺陷诊断中的效果, 发现反射系数谱在定位感性缺陷方面更具优势, 而输入阻抗谱对电缆后段缺陷的诊断更为精确。最后, 结合海底电缆诊断的实际特点, 分析了两种技术的适应性, 输入阻抗谱法因其较强的抗噪能力, 在长距离传输和高噪声环境下的定位准确性更高。通过对比分析, 该文为不同应用场景下选择合适的 FDR 技术提供了理论依据, 并为海缆的维护和故障诊断提供了新的视角。

关键词: 频域反射法; 电缆缺陷定位; 首端输入阻抗谱; 反射系数谱; 海底电缆

Review of the Application on Frequency Domain Reflectometry for the Diagnosis of Localized Defects in Submarine Cable

WANG Haoyue¹, ZHU Yiyi¹, LI Meng¹, WANG Li², ZHANG Jiabao¹, HE Jinghan¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Yangtze Three Gorges Group Jiangsu Energy Investment Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: Frequency domain reflectometry (FDR) has significant application prospects in the diagnostic localization of long-distance submarine cables. The FDR method primarily involves two technical approaches, namely, the broadband impedance spectrum (BIS) and the reflection coefficient spectrum (RCS). This paper systematically reviews and compares the differences between the two techniques for cable defect diagnosis from the perspectives of principle, diagnosis effect and adaptability to submarine cables. Firstly, in terms of principle, BIS relies on comparison with intact cables data to identify defects, while RCS directly reflects the signal's reflection intensity. The core variables and mathematical transformations between the two are different. Additionally, in the diagnosis effect, this paper summarizes and analyzes the current research progress, and simulates cable defects of different positions, ranges and types; meanwhile, this paper compares the diagnostic effects of the two techniques, and it is found that RCS performs better in locating inductive defects while BIS provides more accurate diagnosis for defects in the later segments of the cable. Finally, considering the specific characteristics of submarine cable diagnostics, the paper analyzes the adaptability of both techniques. Due to its stronger noise resistance, BIS method achieves higher positioning accuracy in long-distance transmission and high-noise environments. Through comparative analysis, this paper provides theoretical guidance for selecting the appropriate FDR technique in different application scenarios and offers a novel perspective for the maintenance and submarine cables fault diagnosis.

Key words: frequency domain reflectometry; cable defect location; broadband impedance spectrum; reflection coefficient spectrum; submarine cable

0 引言

我国海上风电规模庞大且增长迅速, 是现代能

源体系中的关键发展方向, 海底电缆是海上风电输电系统跨海域电力传输的关键载体, 我国曾因海缆故障难诊断定位导致海上风电并网系统数月停运。然而, 海底的运行工况、特殊环境使得海底电缆不可避免地受到海水侵蚀和船锚损伤等破坏, 导致其发生绝缘劣化等局部缺陷^[1-2]。但是, 海上定期检修时间间隔较长, 局部缺陷往往难以及时发现, 从而

基金资助项目: 国家自然科学基金(52407158); 国家重点研发计划(2023YFB2406900); 国家资助博士后研究人员计划(GZC20240098)。Project supported by National Natural Science Foundation of China (52407158), National Key R&D Program of China (2023YFB2406900), Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (GZC20240098)。

发展成永久性故障, 影响海上风电系统正常运行, 造成巨大损失。因此, 对海底电缆局部缺陷进行精确高效的诊断定位和预警, 是海上风电并网安全的重大迫切需求^[3-4]。目前, 针对海底电缆诊断定位主要存在以下问题:

1) 海底电缆传输距离长, 局部缺陷特征响应弱: 海底电缆输送距离较陆上电缆更长, 缺陷发生的随机性高; 长线路分布电容大, 缺陷各项特征响应弱; 为满足连续长度要求, 海底电缆中间接头采用挤出模塑式软接头, 呈三维网状结构^[5], 局部缺陷产生的特征信号传播路径复杂。

2) 海洋运行环境复杂, 海底电磁噪声干扰大: 海洋环境高湿、高盐雾、高温差、随机高幅值振动等工况^[6], 导致局部缺陷演化规律受到影响, 特征不明; 海底噪声环境复杂, 海洋生物、船舶或工业活动等产生的噪声会改变海缆埋设的状态, 地磁场变化与海水带电粒子也可能引发电磁噪声, 影响缺陷特征信号的传输路径, 导致诊断定位灵敏度进一步下降。

目前, 电力电缆诊断与定位方面, 国内外学者已开展大量研究工作, 取得了一定的成果^[7]。根据电缆局部缺陷处的介电常数与电导率发生变化这一特性, 可分为基于接地电流的诊断方法、基于局部放电的诊断方法和基于介电特性的诊断方法^[8]。其中, 基于接地电流检测的方法仅在贯穿性故障时有较好的诊断效果; 基于局部放电的诊断方法对电缆绝缘老化局部缺陷不够灵敏^[9]; 基于介电常数的诊断方法主要分为时域的极化-去极化电流法^[10]与频域的介电谱法、频域反射法^[11-13]。极化-去极化电流法的主要问题是施加直流电压易对电缆造成二次伤害; 频域介电谱法有基于单点超低频 0.1 Hz 介质损耗角正切的诊断评估方法和基于高压频域介电谱的诊断方法。基于超低频 0.1 Hz 的诊断方法已有评估标准《IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)》, 然而基于单点阈值的方法在对海底电缆进行诊断时存在以下问题: 缺陷段的介质损耗角正切增大幅度极大, 检测结果也极易被完好电缆部分影响, 无法达到标准要求的阈值; 针对基于单点阈值诊断方法存在的问题, 文献^[14]提出了一种基于高压频域介电谱的电力电缆诊断评估方法, 利用电缆绝缘具有的高压频域非线性特征, 实现了电力电缆局部缺陷的类型辨识与局部缺陷严重程度评估。但是, 面对

海底电缆长、海洋噪声大的特殊问题, 该方法受限于检测设备的容量, 已无法适用于海底电缆缺陷诊断中。

与此同时, 频域反射法是基于宽频段反射信号进行诊断, 不仅无损且不受限于检测设备容量^[15], 频率范围大、测量频率高, 对于微小缺陷能够快速识别和精确定位, 具备实现诊断长距离海底电缆局部缺陷的潜力。其中具有代表性的技术是基于首端输入阻抗谱和反射系数谱的定位方法。挪威学者 Paolo Fantoni 为评估核电站电缆的老化状态, 开发了一种基于宽频输入阻抗谱的线性共振分析商用仪器^[16-17]。仪器通过对电缆首端注入 5 V 的宽频 (1~100 MHz) 信号且在首端测量回路测量宽频阻抗谱, 通过数据分析算法实现电缆运行状态的诊断, 相关算法尚未公布。周志强研究了电缆分布参数频率特性^[18], 基于传输线理论推导了宽频阻抗计算模型, 为宽频输入阻抗谱技术在电缆状态诊断中的应用提供了理论支撑。四川大学周凯教授课题组提出的基于反射系数谱定位技术, 降低了频域反射法所需的测试频率及测试点数, 实现了对 10 kV XLPE 电力电缆由于物理结构改变产生的微弱缺陷识别^[19]。此外, 基于步进频连续波^[20]和调频连续波^[21]的诊断方法因硬件性能受限且信号处理复杂暂未广泛应用。

在实际应用特定方法进行诊断之前, 对方法论原理的详尽解析, 对不同缺陷类型诊断性能的深入评估, 以及对新场景对象适应性的全面考量, 是确保诊断准确性的关键步骤。鉴于此, 本文综述了现有频域反射法的两种主要技术在电缆缺陷诊断方法与定位技术的主要研究进展, 从原理、诊断效果和海缆适应性 3 个维度进行对比评估。通过这一综合分析, 本文旨在为科学选择海底电缆局部缺陷诊断定位技术提供坚实的理论依据, 并为未来的研究方向提供清晰的指导思路。

1 频域反射法基本原理

依据传输线理论^[22], 对于用作高频电磁波传输介质的电缆, 必须采用分布式参数模型^[23]取代原有的集中式参数模型, 才能合理描述电缆中高频电磁波的传输过程。以同轴电缆为例, 各参数可近似由式(1)~(4)给出^[24]。用以下模型来描述含有局部缺陷电缆的信号传输特性, 包括两个正常段和一个缺陷段。取空间坐标系原点位于电缆首端, 正方向指向负载末端, 如图 1 所示。

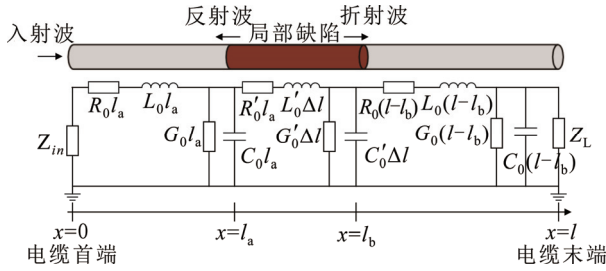


图1 含有局部缺陷的电缆传输线模型

Fig.1 Cable transmission line model with local defects

$$R_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (1)$$

$$L_0 \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} + \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (2)$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_s/r_c)} \quad (3)$$

$$G_0 = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \quad (4)$$

式中： R_0 、 L_0 、 C_0 和 G_0 分别为电缆每单位长度下的电阻、电感、电容和电导； ω 为角频率， $\omega=2\pi f$ ， f 为高频电磁波信号的频率值； r_c 、 r_s 为电缆缆芯半径和屏蔽层内半径； ρ_c 、 ρ_s 为电缆缆芯电阻率和屏蔽层电阻率； μ_0 为真空磁导率； ϵ 为电介质的介电常数； σ 为电介质的电导率。

依据基尔霍夫定律，电缆首端设定为坐标原点，信号传播方向为正方向。当传输的电磁波信号处于正弦稳态状态下时，得到电缆中距离原点 x 处的电压 $U(x)$ 、电流 $I(x)$ 信号^[25]分别为：

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_0^+ e^{-\gamma x} + \dot{U}_0^- e^{\gamma x} \quad (5)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_0} (\dot{U}_0^+ e^{-\gamma x} - \dot{U}_0^- e^{\gamma x}) \quad (6)$$

式中： $\dot{U}_0^+ e^{-\gamma x}$ 和 $\dot{U}_0^- e^{\gamma x}$ 分别为电压波的前向和后向传播波，其中 \dot{U}_0^+ 、 \dot{U}_0^- 分别为入射、反射电压波在原点处的复振幅； γ 为电力电缆自身的传播常数； Z_0 为电力电缆自身的特性阻抗。 γ 的定义式和复数形式分别表示为：

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \\ \gamma = \alpha + j\beta \end{cases} \quad (7)$$

式中： α 是电缆的衰减常数，表征电压波、电流波的幅值衰减特性； $\beta = \omega/v = 2\pi f/v$ 是电缆的相位常数，其中 v 是电缆中信号的传播速度。

Z_0 可以表示为：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (8)$$

可见传输线的分布参数决定了其对电压波、电流波的传播特性，局部缺陷的存在会导致电缆局部缺陷处的分布参数发生改变。在电信号的传输过程中，流经局部缺陷点时由于阻抗的不连续性，会在缺陷处产生折反射现象^[26]。因此，对电缆中局部缺陷的精确诊断，需要对传输线缺陷处的阻抗变化进行细致分析，以便准备评估其对电信号传播特性的影响。

根据频域反射法中提取表征电缆状态的特征参量，主要分为基于首端输入阻抗谱和基于首端反射系数谱的诊断定位方法。下面将详细对比二者原理的异同。

1.1 首端输入阻抗谱

对于长度为 l 的完好电缆而言，距电缆首端任意距离 x 处的输入阻抗^[27]可由式(10)表示：

$$Z(x) = \frac{U(x)}{I(x)} = Z_0 \left(\frac{1 + \rho_L e^{-2\gamma(l-x)}}{1 - \rho_L e^{-2\gamma(l-x)}} \right) \quad (9)$$

$$\rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (10)$$

式中： Z_L 为电缆末端的负载阻抗； ρ_L 为电缆末端的反射系数。若电缆末端开路($Z_L = \infty$)，则 $\rho_L = 1$ 。

令 $x=0$ 即得电缆首端输入阻抗表达式：

$$Z_h(0) = \frac{U(x)}{I(x)} = Z_0 \left(\frac{1 + \rho_L e^{-2\gamma l}}{1 - \rho_L e^{-2\gamma l}} \right) \quad (11)$$

含有局部缺陷的电缆首端输入阻抗通过级联的方式求得，此时电缆首端($x=0$)输入阻抗可由式(12)–(17)求得。

$$Z_d(0) = Z_0 \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} \quad (12)$$

$$\Gamma_0 = \frac{Z_d(l_a) - Z_0}{Z_d(l_a) + Z_0} e^{-2\gamma l_a} \quad (13)$$

$$Z_d(l_a) = Z_{0d} \frac{1 + \Gamma_{l_a}}{1 - \Gamma_{l_a}} \quad (14)$$

$$\Gamma_{l_a} = \frac{Z_d(l_b) - Z_{0d}}{Z_d(l_b) + Z_{0d}} e^{-2\gamma_d(l_b - l_a)} \quad (15)$$

$$Z_d(l_b) = Z_0 \frac{1 + \Gamma_{l_b}}{1 - \Gamma_{l_b}} \quad (16)$$

$$\Gamma_{l_b} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2\gamma(l - l_b)} \quad (17)$$

式中： Z_{0d} 、 γ_d 分别为本体局部缺陷电缆的特性阻抗和传播常数； $Z_d(l_a)$ 、 $Z_d(l_b)$ 分别为本体局部缺陷 l_a 、 l_b 处的输入阻抗； Γ_0 、 Γ_{l_a} 、 Γ_{l_b} 分别为电缆首端、本体局部缺陷 l_a 、 l_b 处的反射系数。

这种方法将电缆分段, 每段对应不同的阻抗参数, 缺陷的影响体现在局部的阻抗不连续性上。

1.2 反射系数谱

对于长度为 l 的完好电缆而言, 电缆首端反射系数^[19]为:

$$\Gamma_L = \frac{U_r}{U_i} e^{-2\gamma l} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2\gamma l} \quad (18)$$

式中: U_r 、 U_i 分别为反射波和入射波。

对于含有局部缺陷的电缆, 首端反射系数的计算思路与输入阻抗谱类似^[28], 可表示为:

$$\Gamma_0 = \frac{Z_d(l_a) - Z_0}{Z_d(l_a) + Z_0} e^{-2\gamma l_a} \quad (19)$$

反射系数主要关注阻抗的不匹配程度, 较为直观地反映了电缆中的反射现象。

当电缆存在局部缺陷时会导致其局部位处的传播系数发生变化, 影响电缆的传输特性, 进而导致电缆的输入阻抗和反射系数发生变化, 因此这两种方法一定程度上都能反映电缆的缺陷情况。

1.3 原理差异

本节对两种方法从核心变量和数学变换的角度进行分析。分析结果如下所述。

核心变量不同: 首端输入阻抗反映的是阻抗变化, 首端反射系数是信号强度的映射。输入阻抗谱主要通过阻抗变化来描述电缆的缺陷位置和性质, 反映了阻抗的叠加效应, 单位是欧姆(Ω), 对阻抗大幅度的变化更为敏感; 而反射系数则通过信号反射的幅值和相位变化来表征缺陷, 反映了信号在缺陷处的反射强度, 无量纲, 更适合反映微弱缺陷引起的阻抗失配。

数学变换差异: 输入阻抗为全局量, 计算复杂, 反射系数是局部量, 计算相对简单。反射系数含有指数衰减项 $e^{-2\gamma l}$, 是关于局部阻抗 $Z_d(l_a)$ 的线性分数函数, 幅值受到距离 l_a 的影响。输入阻抗是由反射系数 Γ_0 推导出的全局量, 当 Γ_0 趋近于 1 时, 输入阻抗会呈现非线性放大效应, 即反射系数的微小变化会导致输入阻抗的急剧变化, 尤其是在强阻抗失配(如开路或短路)时, 输入阻抗会迅速增大。仿真模型复杂度上, 反射系数计算相对简单, 一定程度上减少了处理数据的数量和时间, 本质上是频域内反射波和入射波的比值计算, 信号的衰减对其影响较小; 而输入阻抗谱增加了计算冗余。在实际测量处理复杂度上, 由于输入阻抗谱是对整体阻抗的响应, 因此需要更宽的测试频带和更多的采样点数来实现

高精度的定位。

两种方法在诊断电缆缺陷时各有优劣, 具体选择应根据实际应用场景中的缺陷复杂度和诊断需求所决定。

2 针对典型缺陷诊断效果对比

2.1 频谱形式对比

频谱是反射法实现诊断定位的最直观结果。电缆物理结构性破坏、水树、电树、绝缘老化等现象会导致电缆中局部区域的电容发生变化^[29-30], 进而造成电缆中该区域的分布参数模型发生变化。为进一步比较两种方法的异同, 本节在同一条件下举例说明输入阻抗谱和反射系数谱对于电缆发生局部缺陷时二者频谱的异同。

图 2 所示为 30 m 完好的 10 kV XLPE 电力电缆和在 13 m 处存在缺陷长度 10 cm、缺陷区域单位长度电容为完好区域 1.5 倍(模拟受潮缺陷)时的首端输入阻抗谱和反射系数谱。电缆相关参数与文献^[31]一致。

首端输入阻抗幅值频谱图展现出周期性、迅变性和衰减性的特征^[18]。对于完好电缆与含有局部缺

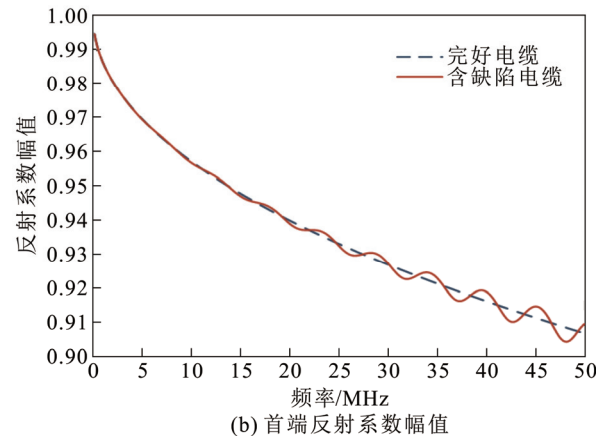
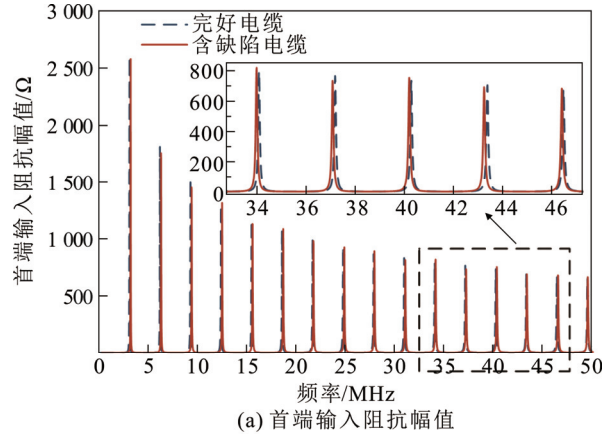


图 2 两种技术频谱图对比

Fig.2 Spectrum diagram comparison of the two techniques

陷的电缆, 通过比较其输入阻抗谱的差异, 可以对电缆的状态进行评估。

由式(11)可知, 电缆末端开路时, 首端输入阻抗谱可表示为:

$$Z_L = Z_0 \left(\frac{1 + e^{-2\alpha l} e^{-2j\beta l}}{1 - e^{-2\alpha l} e^{-2j\beta l}} \right) \quad (20)$$

取 $r = e^{-2\alpha l}$, $\theta = -2\beta l$, 代入上式可得电缆首端阻抗幅值为:

$$|Z_L| = |Z_0| \sqrt{\frac{1 + r^2 + 2r \cos \theta}{1 + r^2 - 2r \cos \theta}} \quad (21)$$

由式(8)知, 高频下(>1 MHz), 可以认为电缆的特性阻抗 Z_0 几乎与频率无关, 为 $Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$ 。由于 $r > 0$, 当 $\cos \theta = 1$ 时首端阻抗幅值出现极大值:

$$|Z_L|_{\max} = |Z_0| \frac{1+r}{1-r} \quad (22)$$

此时, $\theta = 2\pi k$ (k 为整数), 则有:

$$2\beta l = \frac{4\pi f}{v} l = 2\pi k \quad (23)$$

因此输入阻抗幅值出现极大值时的频率^[18]为:

$$f_{|Z|_{\max}} = \frac{v}{2l} k \quad (24)$$

波速 $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$, 由式(3)知, 电容 C 正比于 ϵ_r ,

因此, 当电缆中存在容性缺陷(C 变大)时, 波速会变小, 输入阻抗谱幅值极大值出现的频率会变小, 即会往左偏移, 谐振频率点降低^[31]。

在完好电缆谐振频率 49.55 MHz, 含缺陷电缆谐振频率 49.47 MHz 时, 谐振频率点偏移量达到最大值 0.08 MHz。此外, 在特定的谐振频率点完好电缆与含缺陷电缆的幅值差异尤为显著。特别是在 9.28 MHz/9.27 MHz 的谐振频率点, 幅值差异达到最大为 46.28 Ω。

相比于输入阻抗谱, 反射系数幅值频谱图在识别局部缺陷方面更为直观和敏感。在正常情况下, 由于均匀传输线的衰减特性, 电缆的反射系数幅值频谱图呈平滑递减的曲线, 而局部缺陷处引入的阻抗不匹配导致反射波和入射波相互干涉, 从而频谱图出现明显的振荡波动, 随着频率的增加, 信号的波长缩短, 电磁波对局部缺陷的响应更加显著, 反射系数谱的振荡幅度也逐渐增大。在 25 MHz 以上的频段, 振荡现象尤为明显, 且在 48 MHz 处反射系数幅值的差异达到最大为 0.004 19。

综上, 首端输入阻抗谱和反射系数谱都是基于

波的传播特性和信号的折反射原理而提出, 一定程度上均能反映电缆的缺陷情况。二者频谱的不同之处在于: 首端输入阻抗幅值谱提供了电缆整体状态的信息, 通常需要与完好电缆的数据进行详细对比, 以便发现谐振频率点的微小偏移或幅值的细微变化, 因此需要更广的测试范围和更高的采样点数。相比之下, 存在局部缺陷的反射系数幅值频谱图在高频段的幅度波动较明显, 且无需依赖于与完好电缆数据的对比, 从而减少了数据处理的数量和时间。

2.2 诊断效果的对比

输入阻抗频谱图的特征一定程度上能直接反映故障或者缺陷的类型, 文献[25]通过与完好电缆输入阻抗频谱图对比后输入阻抗幅值大小、谐振点的偏移、谐振周期的变化情况以及相位值的变化, 有效区分了 1 000 m 电力电缆开路、短路及其他故障类型。文献[32]同样利用输入阻抗幅值谱的特征对本体缺陷长度大于 5 cm 或缺陷处电容变化率绝对值大于 5% 的局部缺陷进行了类型识别。而从反射系数频谱图难以直接识别缺陷类型。

因此, 需要借助一定的数学分析方法从所测谱图中提取出特征参量来识别局部缺陷, 不论是输入阻抗谱还是反射系数谱, 它们都是频域的阻抗谱, 对于信号处理的核心思想是将所测电缆阻抗谱从频域函数变换为空间域。

基于首端输入阻抗谱的定位方法, 日本学者 Yoshimichi Ohki 利用快速傅里叶反变换分析算法将阻抗谱变换到时域, 结合信号在电缆中的传播速度从而得到电缆的空间域图像, 实现了核电站高温和老化电缆缺陷区域的定位^[33-35]。国内学者对 FDR 的定位算法进行了大量改进以提高其在城市陆地输配电电缆缺陷检测与定位的适用性。文献[36]提出了积分变换的阻抗谱数据分析方法, 将发生局部缺陷的阻抗谱积分变换函数与完好状态下的进行对比, 进一步凸显缺陷段与完好部分的差异, 实验证明了该方法对 50 m 的 10 kV XLPE 电缆局部热老化和局部破损缺陷有较好的定位效果, 但需要被测电缆的原始谱线数据来进行对比诊断, 在实际应用中受限。文献[37]提出基于输入阻抗谱相位变化比率的第一峰值和第二峰值的比例关系来实现定位, 该方法通过 PSCAD 仿真在 100 km 电力电缆上验证了有效性。文献[38]利用离散傅里叶变换将输入阻抗频谱信息转换到空间域, 实现了 20 m 短电缆本体局部受潮范围和受潮严重程度的诊断。

基于首端反射系数谱的定位方法, 文献[19]采用精细谱分析、加 Kaiser 窗和距离窗的离散傅里叶变换对电缆首端反射系数幅值谱进行处理, 在实验室 65.5 m 的 10 kV XLPE 电缆上制作铜屏蔽层松动局部缺陷验证了该方法定位的准确性。文献[39]提出利用改进的短时傅里叶变换对反射系数谱的解析信号进行分析得到三维缺陷定位图, 根据三维缺陷定位图分析缺陷处反射信号的能量衰减特性, 从而选择合理的频率范围来开展电缆缺陷定位, 解决了传统方法对长电缆中缺陷定位效果差和对测试点数要求高的问题。文献[40]采用了与文献[36]类似的积分变换思想, 选取核函数对反射系数谱进行处理, 对 50 m 电力电缆发生 10 cm 热老化缺陷实现了有效定位。文献[41]通过测量电缆首端反射系数谱, 再通过反傅里叶变换转换到空间域, 实现了挤压、破损、局部过热情况下的缺陷定位, 并验证了频域反射法的定位精度与扫频信号的频带有关, 频带越宽, 定位越准确。重庆大学周焯等人也基于反射系数谱实现了对 50 m 的 10 kV XLPE 电缆人工水树缺陷的诊断定位[42]。

虽然现有研究对频域的数学处理还提出了子空间分解[43]、Pisarenko 谐波分解[44]、同步压缩变换[45]等变换方法转换到空间域实现定位, 但输入阻抗谱和反射系数谱在电缆缺陷诊断中的本质差异和适用性尚未被充分阐明。以下, 将通过对同一条件下二者的缺陷诊断效果进行分析, 详细阐述输入阻抗谱和反射系数谱应用于电力电缆及海底电缆诊断的差异。

2.3 诊断效果影响因素分析

因频谱中均有多个可表征电缆传输特性的特征参数, 以便在相同条件下进行对比分析, 本节分别选取输入阻抗的实部和反射系数的实部作为讨论对象, 并采用离散傅里叶变换分别对首端输入阻抗谱和反射系数谱实部数据中的周期性分量进行提取与识别, 以对比两种方法针对不同缺陷位置、不同缺陷范围、不同严重程度缺陷的定位效果。

对式(11)和(18)利用欧拉公式分解[46]得:

$$Z(0) = Z_0 \left(1 + \frac{2}{e^{2\alpha l} (\cos(2\beta l) + j\sin(2\beta l)) - 1} \right) \quad (25)$$

$$\Gamma_L = e^{-2\alpha l} (\cos(2\beta l) - j\sin(2\beta l)) \quad (26)$$

取实部:

$$Z(0)_{\text{real}} = Z_0 \left(1 + \frac{2(e^{2\alpha l} \cos(2\beta l) - 1)}{e^{4\alpha l} - 2e^{2\alpha l} \cos(2\beta l) + 1} \right) \quad (27)$$

$$\Gamma_{\text{real}} = e^{-2\alpha l} \cos(2\beta l) \quad (28)$$

由 $\beta = \omega/v = 2\pi f/v$ 可得二者实部的三角函数部分均为 $\cos(2\pi l(2f/v))$ 。将频率 f 看作自变量, 输入阻抗和反射系数实部都是关于自变量 f 的三角周期函数, 此时等效频率为 $2l/v$ 。当电缆中 x 处存在阻抗失配时, 实部会出现等效频率 $f = 2x/v$ 的分量[47]。因此, 估计得到实部数据中三角周期函数的频率值后, 便可通过式(29)确定缺陷的位置。

$$x = \frac{\hat{f}_x v}{2} \quad (29)$$

以一根长度为 1 000 m 的 10 kV XLPE 电缆为例, 缺陷模拟样本参数如表 1 所示。样本 1 用于比较同一缺陷出现在电缆不同位置(前、中、后段)的定位结果, 样本 2 用于比较缺陷范围对定位结果的影响, 样本 3 用于比较缺陷的不同严重程度和不同类型对定位结果的影响。扫频信号起始频率设置为 150 kHz, 截止频率设置为 100 MHz, 扫频步长设置为 10 kHz。频率参数设置参考了文献[39]。

2.3.1 缺陷位置的影响

表 1 中样本 1 模拟了局部分布电容为完好电缆 0.5 倍且长度为 0.1 m 的缺陷, 分别出现在电缆的 50 m(前段)、500 m(中段)、930 m(后段)处, 首端输入阻抗谱和反射系数谱的定位结果如图 3 所示。

由图 3(a), 输入阻抗定位图的 0 m 处存在很高的幅值, 使得后续定位波峰幅值相对较小。这是由于输入阻抗实部包含一个常量项 Z_0 , 它不依赖于频率, 在傅里叶变换中, 常量项对应等效频率的 0 频点, 因此会在定位图 0 m 处产生较高的值[38,48], 这与电缆首端存在阻抗不匹配导致输入阻抗谱首端较高幅值的实际物理特性是一致的。本文为直观反映其特征保留首端幅值。

表 1 缺陷模拟样本基本参数

Table 1 Parameters of defect simulation samples		
样本编号	缺陷段距首端距离/m	缺陷程度
1	50~50.1	$C_q=0.5C_0$
	500~500.1	
	930~930.1	
2	500~500.5	$C_q=2C_0$
	510~512	
	500~530	
3		$C_q=0.6C_0$
		$C_q=0.8C_0$
		$C_q=1.2C_0$
		$C_q=1.4C_0$

两种方法均能有效识别电缆前段的缺陷, 50 m 处的定位误差均为 0.023%, 表明这些方法对于近端缺陷具有高精度的定位能力。由于传输信号的衰减效应, 中段 500 m 处的缺陷定位峰归一化幅值显著降低, 定位误差也增加至 0.047%。对于电缆后段 930 m 处的缺陷, 两种方法均未能产生明显定位峰, 具体而言, 基于反射系数谱的定位图在 930 m 附近发生波形畸变, 且处于电缆末端波峰的上升处, 表明该方法受末端波峰影响的电缆范围更大, 由于电缆末端(开路)阻抗不匹配导致末端存在一个较宽的遮蔽区域, 由图 3(b)可以看到, 从 900 m 处开始定位谱线呈明显上升趋势, 900~1 000 m 内的缺陷易被上升沿遮蔽^[9], 因此局部缺陷在靠近电缆末端 10%区域内的定位精度会受到一定影响。而基于输入阻抗谱的定位图在 930 m 附近的波形畸变仍处在水平位置, 表明其在定位靠近末端的缺陷时表现更佳, 能有效识别电缆末端 5%区域内的缺陷。

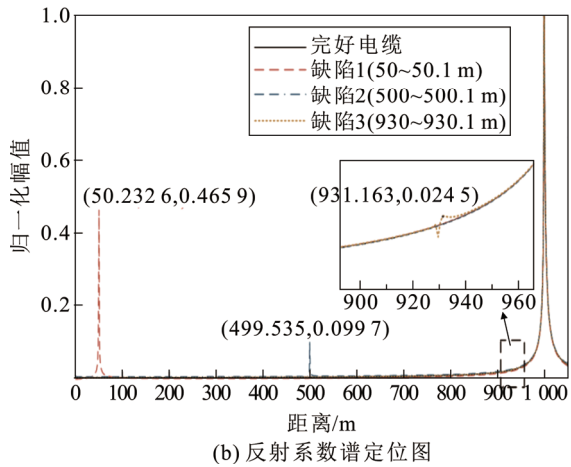
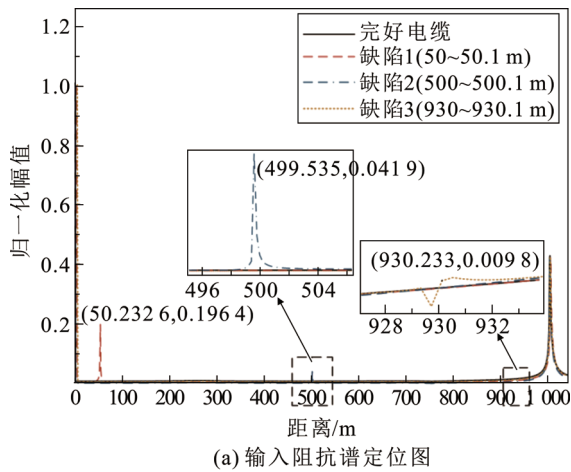


图 3 不同缺陷位置两种技术定位图对比

Fig.3 Positioning diagram comparison of the two techniques for different defect locations

综上, 两种方法对于电缆前、中段均有较好的定位效果, 尽管在电缆末端缺陷的诊断上都存在一定的局限性, 但输入阻抗谱在识别电缆后段的缺陷方面表现出了相对的优势。

2.3.2 缺陷范围的影响

表 1 中样本 2 模拟的是局部分布电容为完好电缆 2 倍的容性缺陷(如严重受潮)范围不同的情况, 两种方法定位结果如图 4 所示。

对比图 4(a)和(b), 当缺陷范围超过 2 m 时, 基于输入阻抗谱和反射系数谱的定位图像在缺陷的起始端和末端分别显示出明显的波峰。图中缺陷 2 发生在电缆的 510~512 m 处, 基于输入阻抗谱的定位图缺陷范围估计为 2.791 m, 由此可见两个波峰的存在为估计实际缺陷范围提供了一种直接的方法。通过测量两个波峰之间的距离, 可以对实际缺陷范围进行有效估计。这种技术在定位较大范围缺陷时更有效, 更适合评估电缆整体状态。而此时反射系数谱的缺陷范围估计为 6.499 m, 相比而言误差更大, 由于反射系数是局部特性的反映, 对缺陷较小范围的响应没有输入阻抗谱的全局响应明显, 因此反射系数谱的定位方法在估计缺陷范围方面具有一定的局限性。

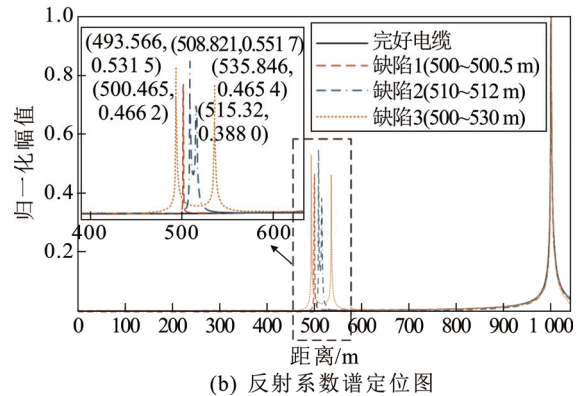
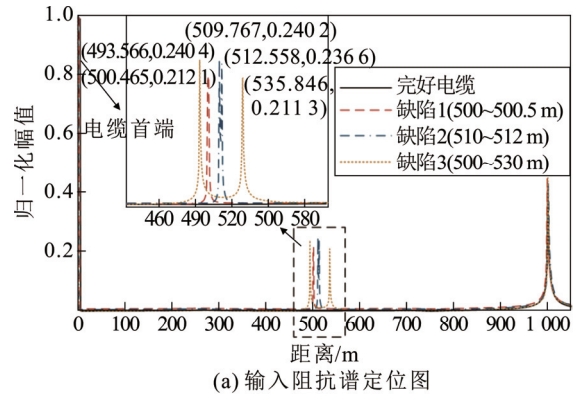


图 4 不同缺陷范围两种技术定位图对比

Fig.4 Positioning diagram comparison of the two techniques for different defect ranges

2.3.3 缺陷类型和严重程度的影响

表 1 中样本 3 通过改变分布电容大小来模拟不同类型和不同严重程度的缺陷, 如图 5 所示。由 2.3 节式(27)和(28)可知, 当电缆存在阻抗失配时, 输入阻抗谱和反射系数谱实部将包含等效频率分量为 $2x/v$ 的周期性成分。经离散傅里叶变换后, 波形幅值强度直接表征等效频率分量的能量, 其中缺陷越严重时阻抗失配导致的多次折反射现象越显著, 对应波形幅值增大。而缺陷类型则通过频变特性影响反射强度: 感性缺陷通常表现为串联电感 $Z_L = Z_0 + j\omega L$, 与频率正相关; 容性缺陷通常表现为并联电容 $Z_C = \frac{Z_0}{1 + j\omega C Z_0}$, 与频率反相关。在宽频测试中, 感性缺陷因感抗随频率线性增长维持较高反射幅值, 容性缺陷因容抗非线性衰减导致反射强度较低。因此, 两种方法的波峰幅值变化不仅反映缺陷严重程度(幅值越大表征局部缺陷越严重), 一定程度上还呈现了类型差异, 即相同严重程度(分布电容变化倍数相同)下, 感性缺陷显示出相对较高的定位峰幅值。

此外, 基于输入阻抗谱的方法在定位同一位置的缺陷时, 其定位精度保持一致, 定位误差为 0.047%, 这一精度不受缺陷类型和严重程度的影响。基于反射系数的定位方法在诊断感性缺陷时表现出较高的精准度, 对于容性缺陷的定位误差与输入阻抗谱相当, 证实了反射系数谱在识别感性缺陷方面的潜力。

2.4 典型缺陷诊断效果差异

在对电缆缺陷进行诊断时, 输入阻抗谱和反射系数谱均被证明是有效的技术, 但他们在不同类型的缺陷检测中表现出了不同的优势。对于长度较短(不超过 0.5 m)的局部缺陷以及容性缺陷, 这两种方法都提供了相等的定位精度。然而, 它们在检测特定类型的缺陷时的敏感性和适用性存在差异。文中所提典型缺陷诊断效果误差对比如表 2 所示。

输入阻抗谱在识别缺陷长度方面表现出较高的敏感性, 这是因为它是全局特性反映, 考虑了信号在电缆中的多次反射和传输, 使得它在估计缺陷的实际长度上有更广泛的应用。由于其末端波峰的遮蔽效应范围较小, 输入阻抗谱更适合于检测接近电缆末端的缺陷。而反射系数谱在定位感性缺陷方面表现出更显著的峰值幅度和更高的定位精度, 具有一定的优势。这种差异源于两种方法对电缆特性

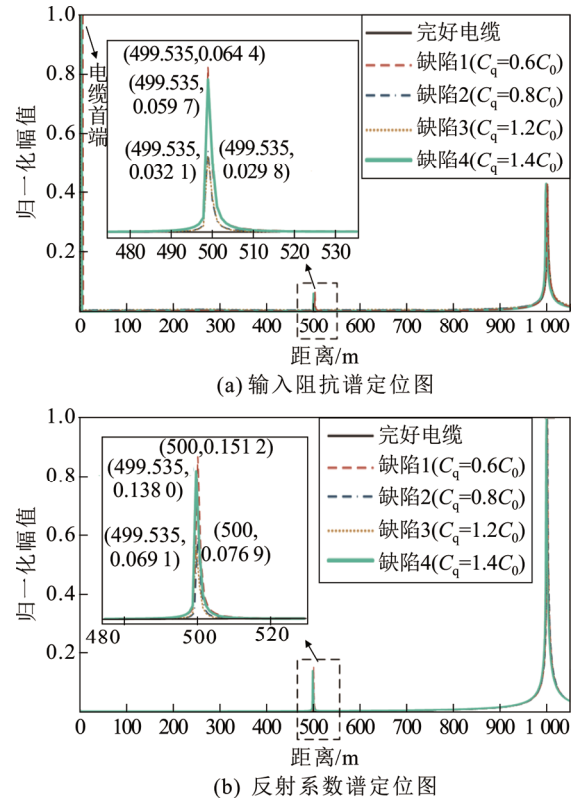


图 5 不同缺陷类型和严重程度两种技术定位图对比

Fig.5 Positioning diagram comparison of the two techniques for different defect types and severity

表 2 典型缺陷诊断效果对比

Table 2 Comparison of diagnostic effects for typical defects

缺陷段距首端 距离/m	缺陷程度	定位误差/%		范围估计/m	
		输入阻 抗谱	反射系 数谱	输入阻 抗谱	反射系 数谱
50~50.1		0.023	0.023	—	—
500~500.1	$C_q=0.5C_0$	0.047	0.047	—	—
930~930.1		—	—	—	—
500~500.5		0.047	0.047	—	—
510~512	$C_q=2C_0$	0.023	0.12	2.791	6.499
500~530		0.64	0.64	42.28	42.28
500~500.2	$C_q=0.6C_0$	0.047	0	—	—
	$C_q=0.8C_0$	0.047	0	—	—
	$C_q=1.2C_0$	0.047	0.047	—	—
	$C_q=1.4C_0$	0.047	0.047	—	—

阻抗变化的响应机理不同, 反射系数谱幅相特性直接反映了特性阻抗的比值关系, 能够更清晰地揭示感性缺陷引起的感抗线性增长, 避免了输入阻抗谱中传输线本身特性带来的干扰, 从而提升定位准确性。因此, 在实际应用中, 应综合考虑两种方法的优势互补: 利用输入阻抗谱对缺陷长度进行初步估计, 并着重关注接近电缆末端的潜在缺陷; 再利用

反射系数谱对缺陷进行精确定位。通过结合两种谱的信息,可以更全面、准确地评估电缆的缺陷情况,从而提高故障诊断的效率和可靠性。

输入阻抗适合复杂环境和连续缺陷诊断,反射系数适合短缺陷定位。反射系数是关于局部阻抗失配的直接量化指标,能够直观反映缺陷位置及反射强度,适用于定位单一或区域较短的缺陷。输入阻抗反映整个电缆系统在缺陷点处的响应,在复杂环境和多缺陷条件下表现更好,适用于诊断连续分布缺陷和电缆整体性能。

综上,输入阻抗谱和反射系数谱在电缆缺陷诊断中各有优势,具体方法的选择应基于缺陷的类型、位置和范围。对于范围较小的局部缺陷和容性缺陷,两种方法均可提供精确的定位;而对于大范围缺陷(如中间接头或本体受潮^[49])和靠近末端的缺陷,输入阻抗谱更为合适;对于感性缺陷,反射系数谱则提供了更高的定位精度。因此,在实际应用中,可以结合这两种方法的特点以确保最佳的定位精度和效率。

3 对海缆局部缺陷诊断定位适应性对比

海底电缆相比于陆上电缆传输距离更长,达到几十公里级;此外海底敷设环境复杂,存在噪声导致用于诊断的信号受到干扰^[50]。

针对长距离的特点,采用时域反射技术或冲击电流法已在 31 km 的 500 kV 充油海底电缆上进行了实测试验,可以实现故障的预定位^[51]。文献[52]结合了变分模态分解和支持向量机等算法分析海缆收集的振动信号来检测并分类直流系统中的锚害故障,在故障特征提取方面表现出较高的鲁棒性。文献[53]分析了 220 kV 海底电缆的沿线电压和首端输入阻抗的频率特性,在 PSCAD 上利用仿真实现了对 100 km 海缆发生开路和短路故障的定位。文献[54-55]挖掘了发生高阻、低阻故障时的暂态电流弱特征,再基于神经网络的分析方法实现了故障定位,为长距离海底电缆故障弱特征检测提供了自动化的方案,但现阶段海底电缆相关样本数据不足,难以满足复杂的数据要求。

海洋环境高湿、高盐雾、高温差和随机高幅值振动等工况,导致局部缺陷演化规律特征不明;海底电磁噪声环境复杂,海洋生物、船舶或工业活动等会改变海缆埋设状态,地磁场变化与海水带电粒子也可能引发电磁噪声,影响特征信号的传输路径,

这些波动与海底噪声相互叠加,使得缺陷特征有效提取更为困难。针对高噪声环境,文献[56]通过改进的 FPGA 基于相干光检测的 FDR 系统,实现了对跨大西洋海底电缆状态的实时监测,提升了海底复杂环境下的信噪比。

现有研究主要集中在海缆故障定位方面,而针对局部缺陷的诊断研究仍较为稀缺,且尚未在相同条件下对频域反射法在海缆缺陷诊断中的适应性进行对比探究。因此,本节分别从传输距离影响和环境噪声影响两方面,对首端输入阻抗谱与反射系数谱在海底电缆局部缺陷诊断中的适应性进行对比分析。

3.1 传输距离的影响

以 10 km 海缆为例,模拟 1、5、9 km 处分别发生分布电容 C_q 为 $1.8C_0$ 、长度 10 cm 的局部缺陷,扫频信号起始频率设置为 150 kHz,截止频率设置为 100 MHz,扫频步长设置为 1 kHz。

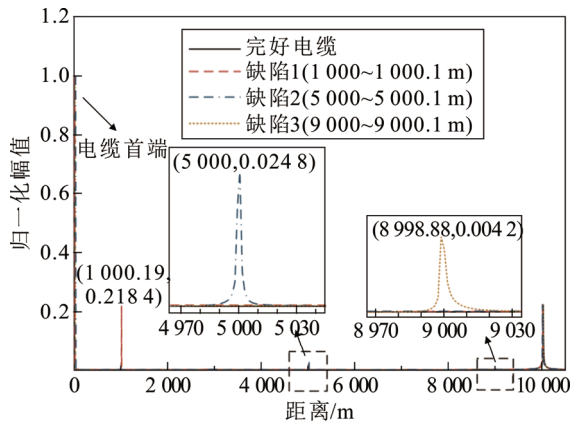
图 6 中两种不同方法所得出的定位峰值幅度数据显示,随着缺陷位置与电缆首端距离的增加,信号强度呈现出相同的衰减趋势。当缺陷位于 5 km 时,定位峰的幅度降至 1 km 处峰值幅度的 11.4%,而当缺陷位置处于 9 km 时,定位峰值幅度进一步衰减至 1 km 处的 1.9%,也相当于 5 km 处峰值幅度的 17%。这一现象揭示了海底电缆在长距离传输过程中信号衰减的普遍特性。

鉴于海底电缆的这一特性,信号在传输过程中的衰减效应对于信号处理算法的精确度以及缺陷识别的准确性提出了更为严格的要求。尽管输入阻抗谱和反射系数谱在缺陷定位的精度上未表现出显著差异,但信号衰减现象的存在使得在信号的输入、采集和预处理阶段必须采取相应的措施,以增强对微弱信号特征的识别能力,确保即使在信号衰减的情况下,也能够准确地识别和定位海底电缆中的潜在缺陷。

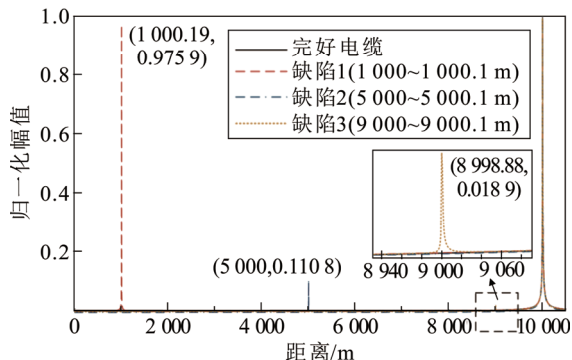
3.2 环境噪声的影响

为了更真实地模拟海底环境噪声的干扰,本节在信号中加入一定强度的高斯白噪声,噪声的幅度系数为 0.2。完好电缆的输入阻抗谱和反射系数谱实部原始信号和加噪后的信号频谱如图 7 所示。

此时,输入阻抗实部信噪比为 (28 ± 0.1) dB,反射系数实部信噪比为 (-7.3 ± 0.1) dB。这是因为输入阻抗实部信号强度通常在数百欧姆量级,而反射系数实部是无量纲的小数,二者信号幅值差异显著,



(a) 输入阻抗谱定位图

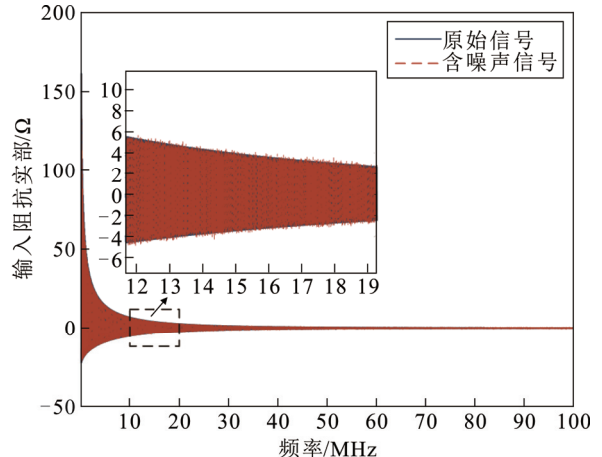


(b) 反射系数谱定位图

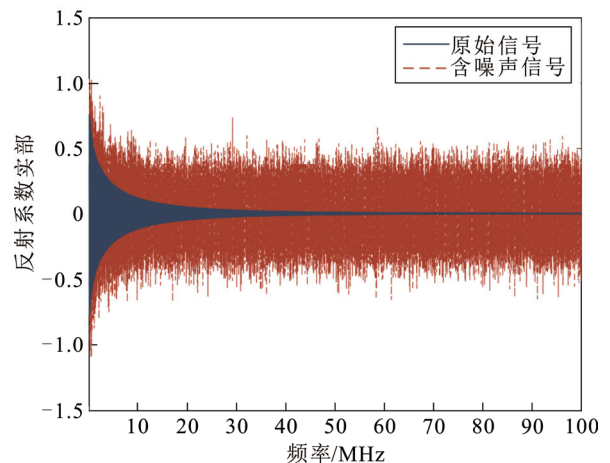
图 6 10 km 海底电缆不同缺陷位置两种技术定位图对比
Fig.6 Comparison diagram of 10 km submarine cable positioning of the two techniques for different defect locations

反射系数频谱信号对固定强度的噪声表现出更低的信噪比, 导致其更易受噪声干扰, 难以从噪声中区分出有用的信号。

模拟 10 km 海底电缆在 5 km 处发生分布电容 C_q 为 $1.8C_0$ 、长度 10 cm 的局部缺陷, 定位效果如图 8 所示。结果表明, 加入噪声后, 输入阻抗谱仍有明显的定位波峰, 能对缺陷准确定位; 反射系数谱定位图的特性则大幅削弱, 出现大量干扰峰, 这些干扰峰与真实缺陷峰相互混杂, 极大地增加了从定位图中正确辨识缺陷峰的难度, 从而大大降低了缺陷定位的准确性。相比之下, 输入阻抗谱法表现出更强的抗噪声干扰能力, 能够在更高强度的噪声环境下保持稳定, 因此定位精度更高, 这也使得输入阻抗谱法在噪声环境下更具应用潜力。然而, 实际海底电缆检测中的噪声情况远比本文所模拟的复杂多变, 因此提出有效的噪声抑制策略和优化方法对于提升海缆定位精度至关重要, 确保海底电缆的稳定运行和可靠性。



(a) 输入阻抗实部频谱图



(b) 反射系数实部频谱图

图 7 完好电缆原始信号和含噪声信号两种技术频谱图对比
Fig.7 Spectrum diagram comparison of the two techniques for intact cable original signal and noisy signal

4 结论与展望

本文对电缆局部缺陷定位领域中广泛应用的频域反射法(FDR)的两种关键技术——首端输入阻抗谱和反射系数谱进行了深入的对比综述, 从原理、典型缺陷诊断效果以及海底电缆诊断适应性 3 个方面讨论了二者的相似之处与差异, 为海缆诊断方法的选择提供了理论依据。主要结论如下:

1) 从原理角度, 首端输入阻抗谱和反射系数谱都是基于波的传播特性和信号的折反射原理。尽管二者均能揭示电缆缺陷, 但由于它们在核心变量和数学处理的差异, 导致诊断效果不同。输入阻抗反映阻抗的叠加效应, 反射系数直接表征反射强度。

2) 诊断效果上, 输入阻抗谱和反射系数谱在识别不同类型、范围和位置的缺陷时各有优势。对于短长度、容性或者位于电缆中前段的缺陷, 二者定位精度较高。反射系数谱在感性缺陷定位上适用

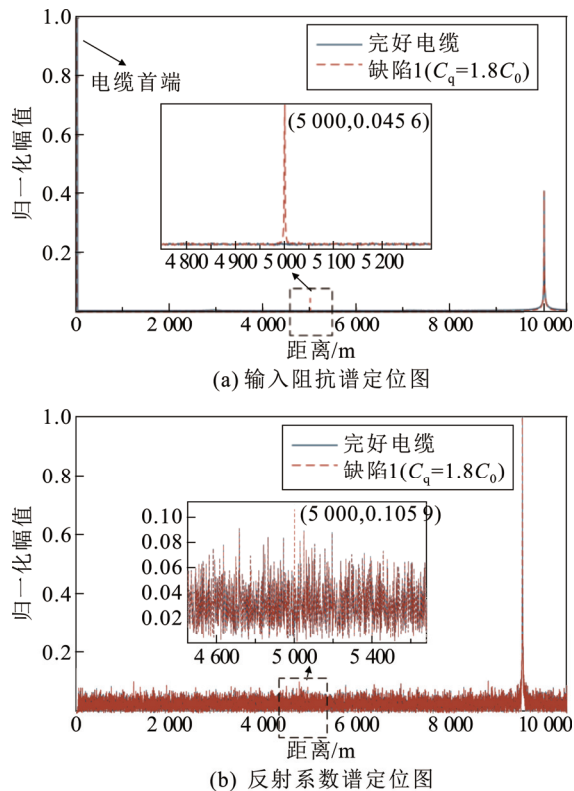


图8 加入噪声后的海底电缆定位图对比

Fig.8 Positioning diagram comparison of submarine cable after adding noise

性更好, 输入阻抗则对较长缺陷或电缆后段的缺陷更有效。选择合适的定位技术是确保实现最佳定位精度和最高效率的关键。

3) 在海缆适应性方面, 传输距离和环境噪声导致两种方法的测量信号显著衰减, 影响定位的准确性。尽管如此, 输入阻抗法因其较强的抗噪声能力而展现出更优的定位效果, 而反射系数则更容易受到噪声干扰。

虽然输入阻抗谱和反射系数谱两种技术在不同方面呈现出了不同的应用价值, 但面对日趋复杂的测试场景二者均存在一定的局限性:

1) 长距离信号衰减与宽频带需求的矛盾。随着信号频率的增大, 信号传输距离呈指数式衰减, 尤其是高频段衰减更为明显。为了检测线路缺陷点通常需要较宽的测试频带以获取足够的信息, 且FDR诊断灵敏度随测试频带上限的增大而增高。因此, 克服长距离高频衰减的同时满足宽频带的测试需求成为了亟待解决的技术难题。

2) 诊断灵敏度受限于频率分辨率。FDR多采用离散傅里叶变换等信号处理方法进行时频域转换, 而频率分辨率由采样频率和点数共同决定, 存

在频率分辨率下限, 导致诊断灵敏度难以进一步提高。此外, 电缆中接头与电缆本体特征阻抗不匹配, 受到频率分辨率的影响也不易被识别。

3) 遮蔽效应缩小了有效定位区间。电缆末端开路时信号发生全反射, 与入射波叠加会形成驻波, 导致周围区域也会出现信号强度的波动, 在定位图中的表现为末端波峰附近区域仍呈现较高幅值, 因此该区域若发生缺陷则波形易被末端的遮蔽区域所淹没, 难以实现有效定位。

针对上述不足, 未来研究方向可从以下方面展开: 采用分频段注入结合分布式光纤传感的检测模式, 通过时-频互补机制削弱衰减的影响; 研究基于压缩感知理论的超分辨率重构算法, 增强对微弱特征的提取能力的同时提高诊断灵敏度; 此外, 面对信号衰减、噪声干扰及复杂海洋环境的耦合影响, 海底电缆缺陷诊断可采用阻抗谱为主、反射系数谱为辅的融合诊断方案, 并嵌入环境参数补偿模块, 这将为提升海缆诊断灵敏度提供解决思路, 且有助于确保海缆的稳定可靠运行。

参考文献 References

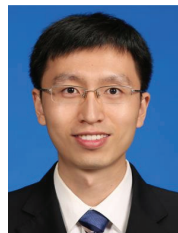
- [1] 马国明, 秦炜淇, 王思涵, 等. 海底电缆状态分布式光纤监测技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 370-387. MA Guoming, QIN Weiqi, WANG Sihan, et al. Review of submarine cable condition monitoring based on distributed optical fiber sensing[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 370-387.
- [2] O'REILLY G, KEARNEY J, LAWLER J, et al. Design of an underwater cable fault location device to precisely locate submarine cable faults[C]/2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Heraklion, Greece: IEEE, 2017: 1-5.
- [3] 白龙雷, 范道平, 罗博, 等. 基于混合调制的海底直流电缆故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1623-1631. BAI Longlei, FAN Daoping, LUO Bo, et al. Fault location method for submarine DC cable based on mixed modulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1623-1631.
- [4] KWON G Y, LEE C K, LEE G S, et al. Offline fault localization technique on HVDC submarine cable via time-frequency domain reflectometry[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1626-1635.
- [5] 王佩龙. 海底电力电缆软接头的研究[J]. 电线电缆, 1981(6): 46-50. WANG Peilong. Research on soft joints of submarine power cables[J]. Wire & Cable, 1981(6): 46-50.
- [6] 王得安, 张剑韬, 朱春波, 等. 海洋环境对水下无线电能传输系统的影响机理研究进展[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 653-675. WANG De'an, ZHANG Jiantao, ZHU Chunbo, et al. Review of progress in the study of marine environment effects on underwater wireless power transfer systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 653-675.
- [7] 单秉亮, 李舒宁, 杨霄, 等. XLPE配电网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 Bingliang, LI Shuning, YANG Xiao, 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.

- [8] CIGRE. JWG D1/B1.20-493 Non-destructive water-Tree detection in XLPE cable insulation[R]. Paris, France: CIGRE, 2012.
- [9] AL-ARAINY A, MALIK N H, QURESHI M I, et al. The performance of strippable and bonded screened medium-voltage XLPE-insulated cables under long-term accelerated aging[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, 22(2): 744-751.
- [10] 袁 豪, 周 凯, 李 原, 等. 基于 SPDMD 算法的 XLPE 电缆介质响应参数辨识[J]. *高电压技术*, 2023, 49(8): 3544-3553.
YUAN Hao, ZHOU Kai, LI Yuan, et al. Parameters identification for dielectric response of XLPE cable insulation based on SPDMD algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(8): 3544-3553.
- [11] YE G, LI H, LIN F C, et al. Condition assessment of XLPE insulated cables based on polarization/depolarization current method[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(2): 721-729.
- [12] IEEE guide for field testing of shielded power cable systems using very low frequency (VLF) (less than 1 Hz): 400.2-2013[S]. New York: IEEE, 2013: 1-60.
- [13] PERKEL J, VALLE Y D, HAMPTON R N, et al. Interpretation of dielectric loss data on service aged polyethylene based power cable systems using VLF test methods[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(5): 1699-1711.
- [14] 王昊月, 孙茂伦, 赵凯杰, 等. 电缆绝缘老化的高压频域介电谱诊断评估方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(9): 3630-3641.
WANG Haoyue, SUN Maolun, ZHAO Kaijie, et al. High voltage FDS diagnosis and evaluation method for cable insulation aging[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(9): 3630-3641.
- [15] 陈 璐, 李光茂, 杨 森, 等. 频域响应法在电力电缆缺陷定位中的研究综述[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(10): 53-64.
CHEN Lu, LI Guangmao, YANG Sen, et al. Review of research on frequency domain response method and its application in defect location of power cables[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(10): 53-64.
- [16] FANTONI P F. Wire system aging assessment and condition monitoring using line resonance analysis (LIRA)[R]. Halden, Norway: IFE Halden Reactor Project, 2006.
- [17] FANTONI P F. Wire system aging assessment and condition monitoring (WASCO)[R]. Halden, Norway: IFE Halden Reactor Project, 2006.
- [18] 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 Zhiqiang. Local defects diagnosis for cable based on broadband impedance spectroscopy[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [19] 谢 敏, 周 凯, 赵世林, 等. 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(9): 3083-3089.
XIE Min, ZHOU Kai, ZHAO Shilin, et al. A new location method of local defects in power cables based on reflection coefficient spectrum[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(9): 3083-3089.
- [20] 赵书静, 龚梁涛, 詹博博, 等. 电缆局部缺陷的步进频连续波定位方法[J]. *高电压技术*, 2023, 49(5): 2121-2130.
ZHAO Shujing, GONG Liangtao, ZHAN Bobo, et al. Location method for local defects of cable based on stepped frequency continuous wave technology[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(5): 2121-2130.
- [21] 李淑蓉, 王彬江, 朱晓光, 等. 基于调频连续波的长距离电缆高阻故障定位精度提升研究[J]. *高电压技术*, 2024, 50(9): 4152-4162.
LI Shurong, WANG Binjiang, ZHU Xiaoguang, et al. Location accuracy improvement research for high impedance fault of long-distance cable based on frequency modulated continuous wave[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(9): 4152-4162.
- [22] 金 鑫, 肖 勇, 曾勇刚, 等. 低压电力线宽带载波通信信道建模及误差补偿[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2800-2808.
JIN Xin, XIAO Yong, ZENG Yonggang, et al. Modeling and error compensation for low-voltage broadband power line communications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2800-2808.
- [23] STONE G C, BOGGS S A. Propagation of partial discharge pulses in shielded power cable[C]//Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena - Annual Report 1982. Amherst, USA: IEEE, 1982: 275-280.
- [24] 徐 政, 钱 洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. *高电压技术*, 2013, 39(3): 689-697.
XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculating electrical parameters of power cables[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(3): 689-697.
- [25] 李 蓉, 周 凯, 饶显杰, 等. 基于输入阻抗谱的电缆故障类型识别及定位[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3236-3245.
LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Identification and location of cable faults based on input impedance spectrum[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3236-3245.
- [26] 赵智大. 高电压技术[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2006.
ZHAO Zhida. *High voltage technology*[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2006.
- [27] 单秉亮. 基于宽频阻抗谱技术的 XLPE 配电网电缆剩余寿命现场评估方法[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
SHAN Bingliang. A field evaluation method for residual life of XLPE distribution cables based on broadband impedance spectrum technology[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2023.
- [28] LI Y, ZHOU H, XU Y F, et al. Defect localization for power cables with chirp Z transform of reflection coefficient spectrum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2025, 32(1): 551-560.
- [29] 吴 阳, 张品佳. 基于漏电流测量的配电网电缆高精度状态感知技术研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2929-2939.
WU Yang, ZHANG Pinjia. High-accuracy condition sensing for power cables in distribution grids based on leakage current measurement approach: an overview[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2929-2939.
- [30] 魏力强, 苏金刚, 韩 涛, 等. 基于宽频阻抗谱的电缆绝缘水树定位机理及算法研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(3): 125-133.
WEI Liqiang, SU Jingang, HAN Tao, et al. Mechanism and location algorithm of water tree in cable insulation based on broadband impedance spectrum[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(3): 125-133.
- [31] 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 Xianjie, XU Zhonglin, LONG Lin, et al. Cable defect time domain diagnostic characteristic waveform based on frequency domain reflection[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3483-3493.
- [32] 李 蓉, 周 凯, 万 航, 等. 基于输入阻抗谱的电力电缆本体局部缺陷类型识别及定位[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(8): 1743-1751.
LI Rong, ZHOU Kai, WAN Hang, et al. Identification and location of local defects in power cable body based on input impedance spectroscopy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(8): 1743-1751.
- [33] OHKI Y, HIRAI N. Successful detection of insulation degradation in cables by frequency domain reflectometry[M]//JACKSON J H, PARAVENTI D, WRIGHT M. *Proceedings of the 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*. Cham, Switzerland: Springer, 2019: 1293-1301.
- [34] OHKI Y, HIRAI N. Location feasibility of degradation in cable through Fourier transform analysis of broadband impedance spectra[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2013, 183(1): 1-8.
- [35] OHKI Y, YAMADA T, HIRAI N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy[C]//2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2011: 24-27.

- [36] 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.
- [37] 潘文霞, 赵坤, 朱正鼎. 一种基于阻抗相位变化比率的长电缆局部缺陷定位新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(12): 4043-4050. PAN Wenxia, ZHAO Kun, ZHU Zhengding. A new method for local defect location of long cable based on impedance phase change ratio[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(12): 4043-4050.
- [38] 李蓉, 周凯, 饶显杰, 等. 配电网本体受潮缺陷定位及受潮特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9): 3470-3479. LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Localization of damp defects and analysis of moisture characteristics for cable body in the distribution grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(9): 3470-3479.
- [39] 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 Xianjie, XU Zhonglin, CHEN Bo, et al. Cable defect location optimization based on frequency domain reflection[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(9): 3681-3689.
- [40] 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 Hongshan, SUN Jingjie, XU Xiangdong. Diagnosis of local defects in cables based on integral reflection coefficient spectrum[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(11): 4548-4556.
- [41] 张国鑫. 基于频域反射法的电缆故障定位方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2019. ZHANG Guoxin. Cable fault location method based on frequency domain reflectometry[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2019.
- [42] 周淦, 王鑫源, 欧阳希, 等. 基于反射系数谱的XLPE电缆水树缺陷定位方法[J]. *电工电能新技术*, 2021, 40(7): 28-39. ZHOU Quan, WANG Xinyuan, OUYANG Xi, et al. Location of water tree in XLPE cable based on reflection coefficient spectrum[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2021, 40(7): 28-39.
- [43] 王尉军, 毛先胤, 李波, 等. 基于子空间分解的电缆缺陷定位方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(9): 3948-3956. WANG Weijun, MAO Xianyin, LI Bo, et al. Cable defect localization method based on subspace decomposition[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(9): 3948-3956.
- [44] 冯杰, 王大兴, 赵兴虹, 等. 基于Pisarenko谐波分解的电力电缆缺陷定位方法[J]. *南方电网技术*, 2025, 19(2): 149-155. FENG Jie, WANG Daxing, ZHAO Xinghong, et al. Power cable defect location method based on Pisarenko harmonic decomposition[J]. *Southern Power System Technology*, 2025, 19(2): 149-155.
- [45] 彭向阳, 操雅婷, 余欣, 等. 基于同步压缩变换的电缆缺陷定位研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(7): 3004-3012. PENG Xiangyang, CAO Yating, YU Xin, et al. Research on cable defect location based on SST transform[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(7): 3004-3012.
- [46] 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 Xianjie, ZHOU Kai, HUANG Yonglu, et al. Type judgement technology of impedance variation in frequency domain reflection method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(16): 3457-3466.
- [47] HUANG J T, ZHOU K, XU Y F, et al. Upper sweeping frequency selection for cable defect location based on STFT[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 3521109.
- [48] HIRAI N, YAMADA T, OHKI Y. Comparison of broadband impedance spectroscopy and time domain reflectometry for locating cable degradation[C]//2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 229-232.
- [49] 李蓉, 周凯, 万航, 等. 基于频域反射法的10kV配电网电缆中间接头受潮定位[J]. *电网技术*, 2021, 45(2): 825-832. LI Rong, ZHOU Kai, WAN Hang, et al. Moisture location of 10kV cable joints in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(2): 825-832.
- [50] 肖世杰, 胡列翔, 周自强, 等. 交联聚乙烯绝缘海底电缆应用及试验监测技术评述[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(1): 1-9. XIAO Shijie, HU Liexiang, ZHOU Ziqiang, et al. Applications and test monitoring technology of cross-linked polyethylene insulated submarine cable[J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(1): 1-9.
- [51] 黄小卫, 蔡驰, 李晓骏, 等. 长距离海底电缆故障定位技术研究与探讨[J]. *电线电缆*, 2021(3): 35-40. HUANG Xiaowei, CAI Chi, LI Xiaojun, et al. Study and discussion of fault location on long submarine cable[J]. *Wire & Cable*, 2021(3): 35-40.
- [52] ZHU W W, FAN C Y, XU C H, et al. Anchor fault identification method for high-voltage DC submarine cable based on VMD-volterra-SVM[J]. *Energies*, 2023, 16(7): 3053.
- [53] 朱正鼎, 潘文霞, 苏琦. 新型基于频率特性的电缆故障定位方法[J]. *广东电力*, 2018, 31(12): 86-92. ZHU Zhengding, PAN Wenxia, SU Qi. New cable fault location method based on frequency characteristics[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(12): 86-92.
- [54] LUAN S Z, LI G J, GAN W M, et al. High impedance fault location of submarine cable in seafloor observation network based on improved LeNet-5[C]//2022 4th International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC). Qingdao, China: IEEE, 2022: 938-943.
- [55] LI G J, LUAN S Z, GAN W M, et al. Low impedance fault location of submarine cable in seafloor observation network based on transient current travelling wave[C]//2022 9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA). Zhuhai, China: IEEE, 2022: 936-941.
- [56] MAZUR M, FONTAINE N K, KELLEHER M L, et al. Advanced distributed submarine cable monitoring and environmental sensing using constant power probe signals and coherent detection[EB/OL]. (2023-03-12)[2025-01-10]. <https://arxiv.org/abs/2303.06528>.



WANG Haoyue
Ph.D.



LI Meng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

王昊月

1993—, 女, 博士

主要从事电力设备故障诊断及电力设备故障防御的研究工作

E-mail: 98930268@bjtu.edu.cn

李猛(通信作者)

1986—, 男, 博士, 副教授, 硕导

主要从事柔性直流系统继电保护技术的研究工作

E-mail: lmeng@bjtu.edu.cn

收稿日期 2025-01-15 修回日期 2025-05-13 编辑 曹昭君