

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.018

基于改进 TFDR 法的核电站仪控电缆断裂缺陷检测

邓红雷¹, 李力行¹, 涂画², 姚力恺², 张翔², 刘刚¹

(1. 华南理工大学(广东省绿色能源技术重点实验室), 广东 广州 510640;

2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘要:时频域反射(time-frequency domain reflectometry, TFDR)法具有成熟便捷、分辨率较高的特点,广泛应用于各类电缆的故障测距。为了有效判别和精确定位核电站仪控电缆绝缘屏蔽层断裂缺陷,文中通过介入热应力,提出一种改进 TFDR 法。对 50 m 多芯仪控电缆进行不同程度的断裂破损模拟,并使用传统 TFDR 法和改进 TFDR 法进行检测实验验证。检测结果显示,改进 TFDR 法对弱断裂缺陷的定位峰峰值为 0.2,是传统 TFDR 法的 2.5 倍,且不同程度断裂缺陷下定位误差率均小于 2.5%。可得出如下结论:相较于传统 TFDR 法,改进 TFDR 法使用热应力浮动方差曲线作为缺陷判别的依据,可显著提高对弱断裂缺陷的判别能力;改进 TFDR 法通过对原定距离进行修正,进一步提高了对弱断裂缺陷的定位精准度,可实现对微弱缺陷的有效识别定位。

关键词:仪控电缆;缺陷定位;时频域反射(TFDR)法;时频互相关;热应力;浮动方差

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)04-0177-09

0 引言

核电站内的仪表和控制电缆通过控制核电关键设备、传输重要信号和监控各模块负荷等来确保整个核电站运行的稳定和安全,确保站内应急冷却系统、安全壳喷淋系统、隔离系统的可靠工作^[1-4]。在仪控电缆的站内敷设环境中,时常伴随着高温、高压、机械应力、化学分子以及核辐射的作用^[5-6],仪控电缆外部及内部存在磨损、老化等^[7-9]。特别是敷设在电缆桥架拐角处的仪控电缆,更易受到尖锐处的磨损和电缆群间的挤压,出现外表皮、屏蔽层断裂现象,导致线芯裸露在周围环境中,不仅会使线芯内部与外部发生电磁信号交换,而且会令线芯受水汽分子侵蚀,与外部产生电流通道^[10]。

仪控电缆传输电压和电流的幅值较低,故在缺陷初期电缆信号的传输不易受到影响。但如果不能及时发现并修复缺陷,则在缺陷后期极可能出现因信号传输异常导致的控制设备失灵、设备运行参数丢失等现象。倘若该电缆承载着系统关键节点的连接,甚至还会造成核反应堆控制异常而引发重大安全事故^[11]。因此,现有核电站不仅要实时监控各仪控设备及电缆的运行状态,更要周期性地对在役仪控电缆进行缺陷检测和识别。是否能在缺陷初期对其进行有效准确的判别及定位,是核电站各系统能否安全稳定运行的重要一环。

收稿日期:2024-01-19;修回日期:2024-03-13

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2022A15150125-23)

时频域反射(time-frequency domain reflectometry, TFDR)法利用电磁波在电缆故障点上发生折射的特性,对入、反射信号进行时频域分布处理和时频相关性计算,能快速得到待测电缆的缺陷位置和严重程度^[12-13]。相比于传统的时域反射法和频域反射法,TFDR 法具有更高的空间分辨率和定位精度,且更为成熟便捷,故广泛用于故障检测和缺陷定位。

文献[14]通过 TFDR 法对 20 m 同轴电缆的断裂缺陷进行检测,并针对缺陷定位峰峰值不规则的情况提出断裂评估曲线,以衡量电缆断裂破损的严重程度,不同程度的断裂缺陷均能被准确定位,且误差率低于 0.5%。但该断裂评估曲线定位峰峰值较低,在预设的最大破损中,归一化定位峰峰值低于 0.02,在实际工况中难以应用。文献[15]针对高温超导(high-temperature superconducting, HTS)电缆在 TFDR 法检测中存在的接头盒和缺陷信号重叠干扰问题,提出一种新的算法,以区分故障信号和干扰信号,并使用不同的方法对 HTS 电缆进行检测,验证了该算法在定位准确性和分辨率上的可靠性。文献[16]提出一种基于仿射变换的改进 TFDR 法,并对存在铜屏蔽腐蚀缺陷的 105 m 及 500 m 电缆进行实验验证,结果表明该法能在不影响自项分辨率的情况下消除交叉项干扰,从而有效定位电缆缺陷。但其研究对象为长高压电力电缆,所使用的特定频率的入射信号会令其缺陷定位图中存在约 30 m 的检测盲区,不适用于长度在 50 m 左右的核电站仪控电缆。

不少学者在 TFDR 法的基础上进行了一系列的研究和拓展,使其具有更高的普适性和鲁棒性。但对于待测电缆存在的微弱缺陷,TFDR 法的判别能力有限,特别是对于面积足够小的断裂缺陷,缺陷定位峰的峰值往往不高,且易与噪声产生的干扰峰混淆,使其容易被忽视而留下安全隐患。相比于常见的高压电力电缆,核电站仪控电缆的结构更为复杂,其芯数较多,长度较短,故仪控电缆对缺陷检测方法的灵敏度要求较高。当前 TFDR 法在核电站仪控电缆中的应用较少,须改进传统 TFDR 法以提高其在微弱缺陷下的判别及定位性能。

文中提出一种基于 TFDR 的改进检测法,通过热应力浮动曲线增强对微弱缺陷的判别和定位能力。对 50 m 多芯仪控电缆进行不同程度断裂缺陷模拟,使用传统 TFDR 法和改进 TFDR 法进行检测,探究两者的缺陷判别能力和定位精确度。对比分析后可知,改进 TFDR 法在缺陷判别和定位精确度上具有更高的性能。

1 传输线理论基础

1.1 传输线模型及分布参数

文中使用 TFDR 法,所研究的传输信号为高频信号,线缆长度等于或大于信号波长,此时线缆上各处电压或电流不相同,须遵循传输线分布模型。图 1 为传输线分布参数模型,其由 4 个单位电气元件组成等效电路,可分析信号在线缆上的传输特性。图中, R_0 、 L_0 、 C_0 、 G_0 分别为单位电阻、单位电感、单位电容和单位电导; Δx 为单位长度; $U(x)$ 为距离首端 x 处的电压。

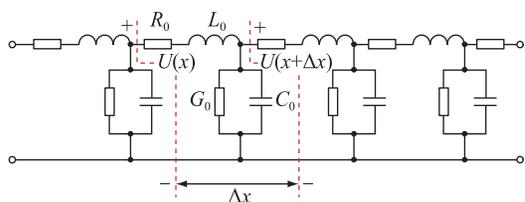


图 1 传输线分布参数模型

Fig.1 Model of distribution parameters on transmission lines

根据电报方程和电路性质^[17],可定义传输线上的特征阻抗为 Z 。无故障均匀传输线的特征阻抗 Z_0 为:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (1)$$

式中: ω 为频率。TFDR 法使用的电磁信号为高频信号,当 ω 足够大时,满足 $R \ll \omega L$ 且 $G \ll \omega C$,式(1)可简化为:

$$Z_0 \approx \sqrt{L_0/C_0} \quad (2)$$

1.2 信号的折反射

当电缆某处发生线芯故障、绝缘介质破损或者存在较严重的局部老化时,该处的局部特征阻抗会发生一定程度的变化。如图 2 所示,电缆局部缺陷段的特征阻抗变为 Z_1 ,电磁信号在特征阻抗变化的位置(Z_0 与 Z_1 间)会发生折射与反射。图 2 中, γ_0 为电磁信号在该线缆正常段上的传播系数; γ_1 为电磁信号在该线缆缺陷段上的传播系数。

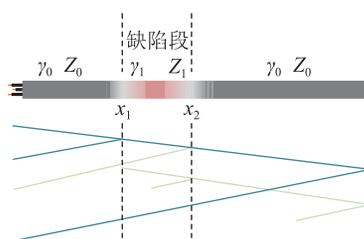


图 2 信号折反射示意

Fig.2 Schematic diagram of signal refraction and reflection

定义末端反射系数 Γ_L 为:

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3)$$

式中: Z_L 为末端负载阻抗。图 2 中电缆末端开路,则 Z_L 为无穷大, Γ_L 为 1。距离首端 x_2 处的输入阻抗 Z_2 和反射系数 Γ_2 为:

$$\begin{cases} Z_2 = Z_0 \left[1 + \frac{2\Gamma_L e^{-2\gamma_0(l-x_2)}}{1 - \Gamma_L e^{-2\gamma_0(l-x_2)}} \right] \\ \Gamma_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \end{cases} \quad (4)$$

同理,可求得距离首端 x_1 处的反射系数 Γ_1 。传输线上某处的反射系数定义为该处反射信号与入射信号的电压(电流)幅值之比,可根据特征阻抗的相关参数求得,反映该局部电气性质的变化程度。反射系数越大,则该处存在的缺陷越严重。

2 改进 TFDR 法

2.1 入射信号

TFDR 法的入射信号为高斯窗包络的线性调频信号,其在时域与频域内具有一定的时间宽度和频率宽度,后者即为带宽。以反射信号与入射信号的时间位置差(时间延迟)作为缺陷距离的粗测,频率中心偏移作为缺陷距离的补偿,反射信号与入射信号的相关性作为缺陷判别的依据。

高斯窗将信号的时间限制在一定范围,并令信号在局部空间内存在幅值最大值;线性调频部分令瞬时频率由低到高,并限制在一定范围内。故

TFDR 法的入射信号亦为时限带限信号,其数学表达式如下:

$$s(t) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} e^{-\alpha(t-t_0)^2/2 + j\beta(t-t_0)^2/2 + j\omega_0(t-t_0)} \quad (5)$$

式中: $(\alpha/\pi)^{1/4}$ 为信号的峰值, $e^{-\alpha(t-t_0)^2/2}$ 为高斯窗部分, $e^{j\beta(t-t_0)^2/2 + j\omega_0(t-t_0)}$ 为线性调频部分; α 为高斯分布的宽度因数, β 为频率增长率的时间系数,两者共同决定信号的持续时间 T_s 和频率宽度 B_s ; t 为时间变量; t_0 、 ω_0 分别为信号的时间中心和频率中心。对于信号各参数的选取和配置,须由待测电缆的尺寸、结构、绝缘介质材料和传输介质材料决定^[18]。

2.2 时频分布

时频分布的作用为分离信号的时域和频域。因此,信号分布后的函数可用于后续比对信号间的时频相关性。一个预设参数的入射信号在三维空间上的时频分布如图 3 所示。事实上,当预设的频率不高时,分布后的图像在时频轴平面上占有一定的面积,在正空间上形如半橄榄状。

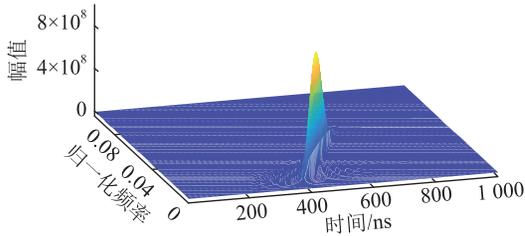


图 3 时频分布结果

Fig.3 Results of the time-frequency distribution

传统的时频分布通常采用魏格纳-维利分布 (Wigner-Ville distribution, WVD)。但在同时对多个信号进行时频分布时, WVD 的线性变换不满足叠加原理,在信号间会产生伪峰值,即交叉干扰项。现有学者使用伪魏格纳-维利分布 (pseudo Wigner-Ville distribution, PWVD) 和平滑伪魏格纳-维利分布 (smooth pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD) 来替代传统 WVD。PWVD 的窗函数能有效降低交叉项的幅值, SPWVD 在 PWVD 的基础上,增设平滑滤波函数以进一步抑制交叉项。在对超过 3 个信号进行时频分布时, PWVD 的抑制效果不如 SPWVD, 但 SPWVD 会降低信号的时频分辨率。下文实验部分仅涉及单缺陷,故选择 PWVD 作为 TFDR 法中时频分布模块的算法。PWVD 的函数表达式为:

$$D_{PWV}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s\left(t + \frac{1}{2}\tau\right) \times s^*\left(t - \frac{1}{2}\tau\right) h(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

式中: $s(x)$ 为入射信号; $s^*(x)$ 为入射信号的共轭函

数; τ 为积分变量; $h(x)$ 为窗函数。

2.3 时频互相关

信号的时域和频域分离后,便可根据其时频特征计算信号间的互相关性^[19]。定义入射信号和各时刻反射信号的相关值为时频互相关函数(下文简称为互相关曲线)。互相关曲线横轴为时间轴,纵轴为互相关幅值,互相关幅值通常为归一化值。互相关函数表达式为:

$$C_{sr}(t) = \frac{2\pi}{E_s E_r(t)} \int_{\tau=t-T_s}^{\tau=t+T_s} \int_{-\infty}^{+\infty} D_r(\tau, \omega) \times D_s(\tau - t, \omega) d\omega d\tau \quad (7)$$

式中: $D_s(x)$ 、 $D_r(x)$ 分别为入、反射信号时频分布函数; E_s 、 $E_r(x)$ 分别为入、反射信号的时频域能量,可通过计算该信号时频分布图像的二重积分得到。

$$\begin{cases} E_r(t) = \int_{t-T_s}^{t+T_s} \int_{-\infty}^{+\infty} D_r(\tau, \omega) d\omega d\tau \\ E_s = \int_{-T_s}^{T_s} \int_{-\infty}^{+\infty} D_s(\tau, \omega) d\omega d\tau \end{cases} \quad (8)$$

E_s 、 E_r 作为互相关函数的分母,具有归一化的作用,将互相关函数的幅值限定在 $[0, 1]$ 。各时刻反射信号的能量 $E_r(t)$ 为非定值。某时刻的互相关函数幅值越高,则入、反射信号的时频相似度越高。在实际测量中,互相关峰称为定位峰,定位峰峰值衡量该处缺陷严重程度。由于互相关函数为一连续曲线,故定位峰表现为一确定时间范围的尖峰,主瓣越窄,越容易确定其时间位置。由于入射信号在互相关曲线中存在自相关峰,反射信号段中的有限尖峰与其存在一定的时间延迟 Δt ,故通过式(9)可粗测计算得到缺陷的位置。

$$x = \frac{v\Delta t}{2} \quad (9)$$

式中: v 为信号在电缆导体中的传输速度; x 为缺陷位置与首端的距离。

2.4 频率衰减与偏移

凡是能引导电磁信号沿一定方向传播的传输线,均会令信号发生一定的损耗,信号会出现幅值衰减、频率和相位变化,高频信号更为明显。这将导致信号的时间中心和频率中心发生偏移,影响缺陷定位的精确度。互相关曲线中缺陷尖峰的实际时间延迟须根据频率中心的变化进行补偿,补偿后的时间延迟为:

$$\Delta t' = \Delta t + t_c = \Delta t + \frac{\omega_c}{\beta} = \Delta t + \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2\alpha\beta} A x \quad (10)$$

式中: t_c 、 ω_c 分别为时间中心与频率中心的偏移量; A 为线性函数斜率,认为信号频率的衰减函数 $\hat{a}(\omega)$

与频率呈线性相关,即 $\hat{a}(\omega) \approx A\omega$ 。

事实上,信号频率的衰减函数并不与频率呈线性相关,当频率足够高时, $\hat{a}(\omega) > A\omega$,故计算得到的频率偏移量与实际偏移量也有一定的差距。

为了根据时频互相关结果得到缺陷位置,须额外求取信号在待测电缆线芯的波速 v 与信号频率衰减函数的斜率 A 。为了方便快速定位,给出一种简化计算方法。由式(10)移项可得:

$$\begin{cases} x_2 = v\Delta t_2 = v\Delta t'_2 - \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2\alpha\beta}Avx_2 \\ x_1 = v\Delta t_1 = v\Delta t'_1 - \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2\alpha\beta}Avx_1 \end{cases} \quad (11)$$

进一步得到:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{x'_2}{x'_1} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \quad (12)$$

式中: x'_2, x'_1 分别为补偿后 2 个缺陷与首端的距离; x_2, x_1 分别为补偿前 2 个缺陷与首端的距离; $\Delta t_2, \Delta t_1$ 分别为时频互相关结果中 2 个不同的缺陷峰分别对于自相关峰的时间延迟; $\Delta t'_2, \Delta t'_1$ 分别为补偿后 2 个不同的缺陷峰的时间延迟。将末端断路缺陷峰、断裂缺陷峰的时间延迟与电缆的实际长度代入式(12)即可得到断裂缺陷的定位距离,无需波速即可求得不同断裂程度的缺陷定位结果。

2.5 基于热应力的改进方法

热应力的介入会改变电缆分布参数值,进一步改变特征阻抗值。故在时频互相关曲线中,定位峰峰值和极值点的时间位置会发生一定的微小变化,若令承载信号传输的导体升温,并在不同的阶梯温度下记录此刻的互相关曲线,则在温度变化区间内能得到一互相关曲线簇,称为热应力浮动曲线。

时频互相关曲线定位峰的波形会随着温度的升高而发生微弱的变化。主要有以下原因:(1) 导体的电阻率随温度的变化不断增加,进而影响传输线的分布电阻值、特征阻抗值和反射系数;(2) 在缺陷段中特征阻抗的变化是连续的,且由式(4)与传输线分布参数求解式^[20]可知电阻率与反射系数非线性相关,故在缺陷段和正常段,特征阻抗由于升温的减少并不是等值的;(3) 待测电缆长度较长,成捆后内部阻抗较大,为了能使线芯快速升温,须加大通入的电流,此时会加剧电缆导体的趋肤效应,进一步增大特征阻抗,且在缺陷段和正常段增大的程度不一致。故缺陷段的反射系数随温度变化会发生一定程度的变化,进而改变时频互相关曲线中定位峰的波形,又因在正常段特征阻抗的变化是等值的,故正常段的反射系数仍为 0。

为了提高传统 TFDR 法的检测效果,文中提出一种基于热应力的改进 TFDR 法。首先使用互相关曲线簇在各时刻的方差值来衡量其随温度变化的浮动程度。

在改进 TFDR 法内,定义 $V(t)$ 为时频互相关曲线的浮动方差函数, Δt_{fix} 为修正后的缺陷时间延迟,相关函数表达式如下:

$$\begin{cases} C_{\text{sr}}(\Delta t_x + t_0) = \max\{C_{\text{sr}}(t)\} \\ V(\Delta t_v + t_0) = \max\left\{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{\text{sr},i}(t) - C_{\text{avg}}(t))^2\right\} \\ \Delta t_{\text{fix}} = \frac{\Delta t_x + \Delta t_v}{2} \\ \Delta t_v + t_0 \in (t_1, t_2); \Delta t_x + t_0 \in (t_1, t_2) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $C_{\text{sr}}(t)$ 为未加热前的互相关曲线; $C_{\text{sr},i}(t)$ 为不同阶梯温度下的互相关曲线; $C_{\text{avg}}(t)$ 为不同阶梯温度互相关曲线的平均值; Δt_x 为 $C_{\text{sr}}(t)$ 中定位峰的时间延迟, x 为使用传统 TFDR 法求得的定位距离; Δt_v 为 $V(t)$ 中尖峰的时间延迟; t_0 为自相关峰的时间位置; t_1, t_2 分别为时频互相关函数中自相关峰与电缆末端断路定位峰的时间位置; n 为互相关曲线簇含有的曲线数。

综上,改进 TFDR 法检测步骤如下:(1) 使用传统 TFDR 法对电缆进行检测,得到时频域互相关曲线 $C_{\text{sr}}(t)$;(2) 对电缆进行短时加热,预设步长后,在每个阶梯温度上使用 TFDR 法进行检测,得到时频互相关曲线簇;(3) 根据曲线簇求得 $V(t)$,求得 $V(t)$ 中尖峰的时间延迟 Δt_v ,并以 $V(t)$ 作为缺陷判别的曲线;(4) 对比 $C_{\text{sr}}(t)$ 与 $V(t)$,若 $V(t)$ 定位峰与 $C_{\text{sr}}(t)$ 定位峰时间位置近乎一致,则通过均值求得修正后的时间延迟 Δt_{fix} 并计算出定位距离,若在规定时间内, $V(t)$ 存在定位峰但 $C_{\text{sr}}(t)$ 上不存在定位峰或定位峰峰值较低且难以确定瓣尖,则认为该位置存在微弱缺陷,以 Δt_v 为其最终时间延迟。

3 算例及验证

3.1 实验平台

基于 TFDR 法,文中以麦科信 ST01104C 数字示波器、泰克 AFG3022C 任意函数发生器及一台高性能计算机搭建拟控电缆缺陷判别及定位的实验平台。数据清洗、信号制作、时频域分布处理、互相关处理等工作由 MATLAB 软件负责。

TFDR 法检测平台如图 4 所示。图中高性能计算机通过软件产生预设参数的入射信号文件,导入到函数发生器中;待测电缆线芯、发生器与示波器

由 T 型转接口连接;发生器按照文件内容输出电磁信号,一部分注入到待测电缆的线芯中,另一部分通往示波器,作为时域数据的入射信号;示波器时刻采集由电缆首端返回的反射信号,并持续一段时间,最后将该段信号以文本传送至计算机^[21];计算机根据预设程式进行处理,得到检测结果。

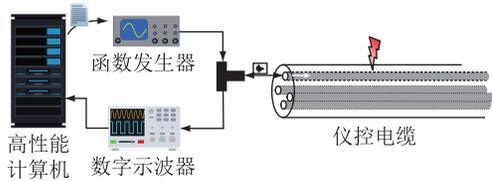


图 4 TFDR 法检测平台

Fig.4 Detection platform for TFDR method

3.2 缺陷模拟

文中采用 50 m 多芯交联聚烯烃仪控电缆进行缺陷模拟及验证实验,其截面层结构由外到内依次为外护套、外绝缘、屏蔽层、填充层、内绝缘和导体。单根芯导体截面积为 1.5 mm^2 ,一般传输的信号电压为 $1 \sim 5 \text{ V}$ 。对此电缆试样,用小刀在距离首端 30 m 处人为制造绝缘屏蔽层断裂缺陷。为了便于简单量化断裂破损的程度,在周向,以切割范围占整个圆周的角度划分为 3 种缺陷类型:周向 120° 、 240° 和 360° (即环切)。在径向,3 种缺陷类型均破坏电缆试样的外护套层、绝缘层以及屏蔽层,令电缆线芯处于裸露状态,如图 5 所示。

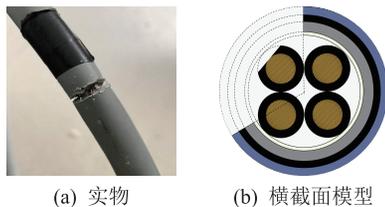


图 5 电缆断裂缺陷示意

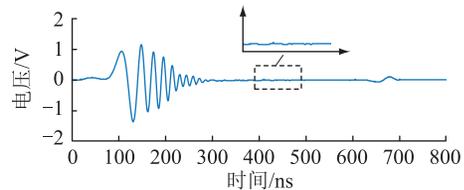
Fig.5 Schematic diagram of cable fracture defect

3.3 基于传统 TFDR 法的缺陷检测

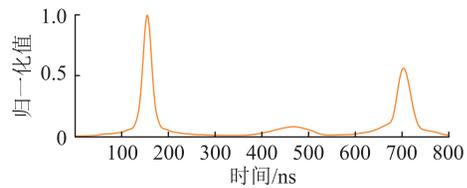
试验设备和样品按照图 4 所示方式进行连接,按照电缆试样的参数,文中设定的入射信号带宽 B_0 为 10 MHz,频率中心 f_0 为 30 MHz,持续时间 T_s 为 250 ns,示波器设定的采集持续时间为 1 ms。

当断裂缺陷周向角度为 120° 时,示波器采集到的时域信号与处理后的归一化时频互相关曲线如图 6 所示。因为电缆试样末端断开,传输线处于开路状态,入射信号到达电缆试样末端会发生全反射,图 6(b)中,时间位置 700 ns 附近的信号段即为全反射波。高频信号在电缆中传输时,幅值、频率会不断衰减,当入射信号到达电缆试样末端时,其衰减的程度尤为显著。在时间位置 $380 \sim 500 \text{ ns}$ 上

存在断裂缺陷的反射信号段,但由于电缆的结构在该类弱缺陷状态下变化不大,特征阻抗的变化不明显,且弱缺陷对导体中电磁信号传输的干扰甚微,故其反射信号段在肉眼下难以清晰分辨。图 6(b)中,150 ns 的尖峰为入射信号的自相关峰,700 ns 的尖峰为电缆末端定位峰,而在时间位置 $400 \sim 500 \text{ ns}$ 上,存在的缺陷峰符合缺陷距离对应的大致时间位置。可见在时域中难以分辨的缺陷,经过时频互相关处理后,能得到一定程度的放大。



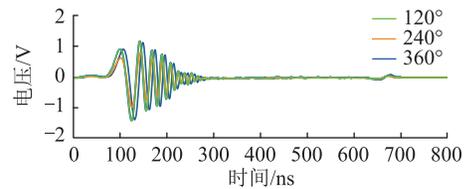
(a) 时域信号



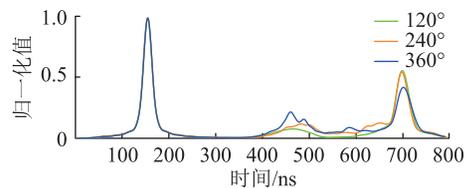
(b) 时频互相关结果

图 6 周向 120° 断裂缺陷的 TFDR 法检测结果Fig.6 TFDR results for 120° circumferential fracture defect

不同断裂缺陷周向角度下,检测结果如图 7 和表 1 所示。



(a) 不同割裂程度的时域信号



(b) 不同割裂程度的时频互相关结果

图 7 不同程度断裂缺陷的 TFDR 法检测结果

Fig.7 TFDR results of fracture defects with different degrees

表 1 不同程度断裂缺陷的定位结果

Table 1 Localization results of fracture defects with different degrees

断裂周向角度/ $^\circ$	定位距离/m	误差率/%	定位峰峰值
120	28.47	5.1	0.08
240	30.10	3.0	0.12
360	28.10	6.3	0.22

随着断裂的周向角度变大,断裂缺陷的严重程度增加,但在时域信号中,反射信号段的幅值并没有明显的增加,且在肉眼下难以判断出时间位置。经过 TFDR 法处理后,互相关曲线的缺陷定位峰峰值随着缺陷的严重程度增加而不断增加,并由周向 120°的圆钝状变为周向 360°的尖锐状。其中,周向 360°的归一化定位峰峰值达到了 0.22。一般来说,缺陷峰的主瓣越窄越聚集,对缺陷的判别置信度便越高,从而定位的精确度便越高^[22]。

综合来看,对于不同程度的断裂破损缺陷,TFDR 法的定位较为准确,误差率小于 7%。但对于周向 120°断裂的弱缺陷,其定位峰峰值较低,且瓣宽较大,这在电缆测障中容易受到干扰和混淆。虽然周向 240°和 360°的断裂缺陷定位效果能满足一般电缆缺陷定位的基本需求,但在核电站机组中,尤其是安全壳内,存在复杂交错的电缆管道、繁多的控制柜以及在同根电缆中存在不同走向的线芯,少许的误差便会让运维的时间和人工成本大大提高,故表 1 所示定位结果仍较难满足核电工程应用的要求。

3.4 基于改进 TFDR 法的缺陷检测

为了探究热应力对缺陷判别及定位的影响,令待测电缆的线芯升温^[23-24],并获取不同阶梯温度下的互相关曲线簇。实验使用大电流发生器进行加热,具体做法为:将待测电缆的首端与末端线芯分别连接大电流发生器的正负极,依据线芯尺寸计算出的载流量,控制施加电流的大小,并使用红外成像测温仪实时监测缺陷处线芯的温度变化。预设线芯最高加热温度为 50 °C,如图 8 所示,到达该温度后,停止加热,使用 TFDR 法进行缺陷检测。此后电缆线芯在室温下持续降温,继续使用测温仪监测温度,以 5 °C 为步长,在各阶梯温度下进行检测,得到一组检测结果。为了保证电缆内部导体、绝缘介质的结构不会因热应力而发生变化,避免使电缆发生二次损伤或者热老化,加热时间不宜过长,应控制在 30 min 内。且加热温度避免过高,应以电缆生产后所设定的运行工况温度、线芯所能承受的长时温度^[25-26]为依据。

图 9 为不同阶梯温度下不同程度断裂缺陷的互相关结果。可以发现,在温度区间内,自相关峰的幅值、形状均一致,但缺陷处的定位峰有一定的浮动。从放大图来看,定位峰峰值有随着温度的升高而变大的趋势。

可以发现,在周向 120°和周向 240°缺陷对应的时频互相关曲线簇中,两者的定位峰对应时间段附

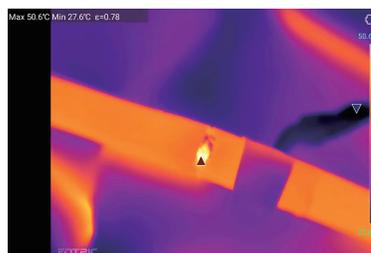
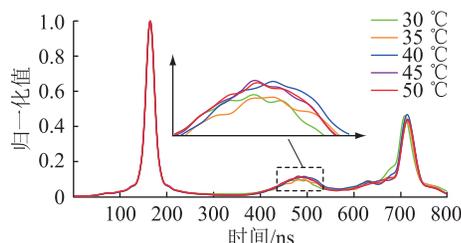
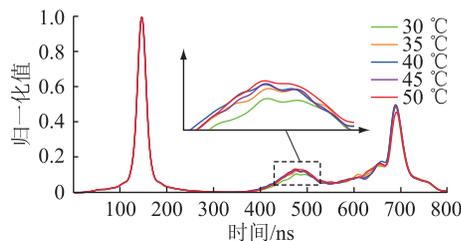


图 8 电缆线芯实时温度示意

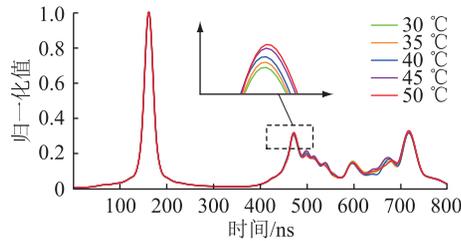
Fig.8 Schematic diagram of real-time cable core temperature



(a) 周向 120°断裂缺陷的互相关曲线簇



(b) 周向 240°断裂缺陷的互相关曲线簇



(c) 周向 360°断裂缺陷的互相关曲线簇

图 9 不同程度断裂缺陷的互相关曲线簇

Fig.9 Cross-correlation curve family of fracture defects with different degrees

近的区间,其幅值的浮动程度比其他区间的浮动要大;但在周向 360°缺陷中,定位峰的浮动程度与其他位置的浮动程度一致,均较为微小且难以辨别。

图 10 为 3 个互相关曲线簇的方差结果(下文简称为浮动方差曲线)。由于电缆末端的断路状态并非缺陷检测的关注点,故可取幅值为 [0, 1] 的方差曲线作为检测结果,忽略部分幅值量级较大的末端定位尖峰段,如图 10(a)所示。周向 360°断裂缺陷附近的方差值相比周向 120°和周向 240°小得多,故可知周向 360°断裂缺陷的定位峰峰值变化程度小于周向 120°和周向 240°。故在缺陷程度较为严重的检测结果中,时频互相关曲线的浮动程度反而较小。值得注意的是,到达电缆末端发生全反射的信

号为第一处缺陷折射过去的信号,故第一处缺陷定位峰的浮动较大,末端断路缺陷峰的浮动也会相应变大。

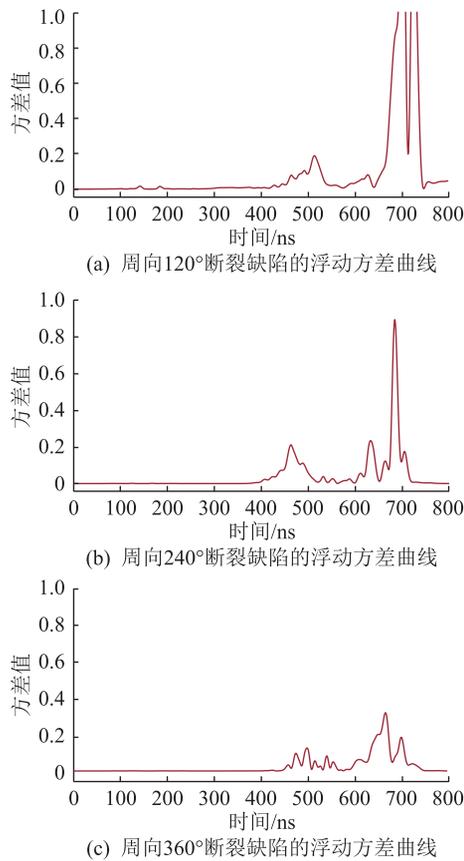


图10 不同程度断裂缺陷的浮动方差曲线
Fig.10 Floating variance curves of fracture defects with different degrees

由于越靠近缺陷,反射系数的变化程度越大,定位峰中靠近缺陷位置的部分浮动程度就越大,故原互相关曲线与浮动方差曲线的两定位距离可互相补偿。以时频互相关方差曲线的尖峰作为缺陷的判别依据,并通过式(13)对传统 TFDR 法定位结果作修正,可得到改进 TFDR 法检测结果,如表2所示。若在小区间内存在多个密集的尖峰,以峰值最高的主瓣作为定位峰。

表2 基于改进 TFDR 法的断裂缺陷定位结果

Table 2 Localization results of fracture defects with different degrees based on improved TFDR method

断裂周向角度/(°)	定位距离/m	误差率/%	定位峰峰值
120	30.09	0.3	0.19
240	29.51	1.6	0.21
360	29.25	2.5	0.10

由表2可知,对于周向120°和周向240°断裂缺陷,热应力浮动方差曲线的定位峰峰值达到了0.19和0.21,比原互相关定位峰峰值分别提高了137.5%

和75.0%,但周向360°缺陷的定位峰峰值仅有0.1,比原互相关定位峰峰值减少54.5%。这说明热应力浮动方差曲线对于微弱缺陷的判别能力要比强严重缺陷高,故以此定位峰峰值作为改进 TFDR 法的判别峰值。而通过改进 TFDR 法的修正后,3种不同程度缺陷的定位效果均得到改善,误差率控制在3%以内。

在缺陷判别部分,改进 TFDR 法采用热应力浮动方差曲线的尖峰作为判别与定位的依据,相比于原来的时频域定位峰,其幅值增大,能提高对微弱缺陷判别的置信度。在缺陷定位部分,TFDR 法利用浮动方差定位值与原互相关定位值互相补偿修正,显著提高缺陷定位的精准度,特别是周向120°断裂的弱缺陷,这对于实际核电站仪控电缆的运维有很大帮助。

4 结论

文中提出一种改进 TFDR 检测法,使用热应力浮动方差曲线作为缺陷判别的依据,并使用浮动方差曲线的定位值作为原 TFDR 的修正。对国产50 m多芯交联聚烯烃仪控电缆进行不同程度的绝缘屏蔽层断裂破损模拟实验,以断裂周向角度作为划分缺陷严重程度的标准,分析加入热应力后的微观理论,对比分析传统 TFDR 法与改进 TFDR 法的检测图像及定位结果。得出如下结论:

(1) 使用 TFDR 法进行检测,破损的周向角度越大,缺陷定位峰峰值越高。周向240°和周向360°缺陷的定位峰瓣宽和峰值较为理想,均能轻易被肉眼分辨出,但周向120°缺陷的定位峰瓣宽较大,归一化峰值较低,判别效果较差。3种缺陷下定位误差率均小于7%。

(2) 改进 TFDR 法以热应力浮动方差曲线替代互相关曲线进行缺陷判别,在2种弱缺陷上,其定位峰峰值显著提高,分别为0.19和0.21,但对于强缺陷(周向360°断裂),其定位峰峰值仅有0.1,相比 TFDR 法减少54.5%。故改进 TFDR 法对微弱缺陷有较强的判别能力。

(3) 改进 TFDR 法使用热应力浮动方差曲线对传统 TFDR 法定位距离进行修正,大大提高了缺陷的定位精准度。在3个不同程度的断裂缺陷定位中,定位误差率分别为0.3%、1.6%和2.5%,相较于 TFDR 法,误差显著降低,特别是对于周向120°的断裂缺陷,误差率降低了16倍。

在实际核电站仪控电缆运维中,现场的噪声可能会混淆在传统 TFDR 法的时频互相关曲线中,微

弱的缺陷定位峰可能不易被判别。故可先使用传统 TFDR 法进行检测,排除明显且容易判别的严重缺陷,再使用改进 TFDR 法进行检测,排查是否存在尚未检出的微弱缺陷,增加运维中缺陷检测的检出率,并可使用改进 TFDR 法提高缺陷判别的灵敏度和故障定位的精准度。事实上,对于式(13)中定位距离修正的函数,可对 Δt_x 和 Δt_e 做加权平均处理,适当的权重会令缺陷定位的误差更加小,权重的设定依靠实际电缆的长度、入射信号的波长等参数,亦需要大量实验数据和模型进行剖析,未来将针对定位精准度改进作进一步的探究。文中提出的改进 TFDR 法有助于实际核电站仪控电缆绝缘屏蔽层断裂缺陷的检测及定位,亦可用于各类典型缺陷的检测,对核电站的稳定安全运行具有重要意义。

参考文献:

- [1] KUMAR P, SINGH L K, KUMAR C. Performance evaluation of safety-critical systems of nuclear power plant systems [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(3): 560-567.
- [2] 安然, 黄焜. 三代核电站安全级仪控系统软件可靠性方法浅析[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(3): 6-7.
AN Ran, HUANG Kun. Analysis of software reliability methods on safety I&C system of third generation nuclear power plant [J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(3): 6-7.
- [3] 刘志龙, 聂常华, 欧柱. 核设备鉴定试验中仪控系统可靠性预测[J]. 自动化仪表, 2020, 41(2): 102-105, 110.
LIU Zhilong, NIE Changhua, OU Zhu. Reliability prediction of instrument and control system in nuclear equipment appraisal experiment [J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(2): 102-105, 110.
- [4] DAVYDOV R, ANTONOV V, ANGELINA M. Parameter control system for a nuclear power plant based on fiber-optic sensors and communication lines [C]//2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). St. Petersburg, Russia. IEEE, 2019: 42-45.
- [5] 王雷, 詹英杰, 云浩, 等. 基于变化活化能的核级电缆老化寿命评估[J]. 绝缘材料, 2021, 54(3): 68-72.
WANG Lei, ZHAN Yingjie, YUN Hao, et al. Ageing life evaluation on nuclear cables basing on varying activation energy [J]. Insulating Materials, 2021, 54(3): 68-72.
- [6] 徐剑峰, 龚巍, 鲍一晨. 核级电缆用聚合物材料在 γ 射线辐照下的指数老化模型[J]. 机械工程材料, 2019, 43(3): 55-59.
XU Jianfeng, GONG Yi, BAO Yichen. Exponential aging model of polymeric materials for nuclear cables under γ -ray irradiation [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(3): 55-59.
- [7] YANG J, LEE D Y, MIWA S, et al. Overview of filtered containment venting system in nuclear power plants in Asia [J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 119: 87-97.
- [8] 洪诗鑫, 何程, 彭沛星. 核电厂堆外核仪表接口与定期试验架构方案浅析[J]. 电子技术应用, 2021, 47(S1): 74-80.
HONG Shixin, HE Cheng, PENG Peixing. Analysis on the framework scheme of external nuclear instrument interface and periodic test in nuclear power plant [J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(S1): 74-80.
- [9] 乌晓燕, 李玉鸣, 钟志民. 热-辐照联合老化电缆的压入模量性能研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(5): 46-48, 54.
WU Xiaoyan, LI Yuming, ZHONG Zhimin. Study on indenter modulus of cables under thermal-radiation ageing [J]. Insulating Materials, 2016, 49(5): 46-48, 54.
- [10] 戴永东, 王茂飞, 唐达葵, 等. 基于双视卷积神经网络的输电线路自动巡检[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5): 201-210.
DAI Yongdong, WANG Maofei, TANG Daao, et al. Research on automatic inspection of transmission line based on cross-view convolution neural network [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 201-210.
- [11] 钱虹, 马萃萃. 基于改进层次分析法的核电站故障诊断方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 105-110.
QIAN Hong, MA Cuicui. Fault diagnostic method for nuclear power plant based on improved analytic hierarchy process [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 105-110.
- [12] 范伟松, 厉冰. 基于行波信号的配网成盘电缆长度快速检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 190-196.
FAN Weisong, LI Bing. Study on fast detection method for drum cable length of distribution network based on traveling wave signal [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 190-196.
- [13] 周灵锋, 杨善水, 王莉, 等. 阻性负载下含分段噪声的间歇性直流电弧阻抗模型[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 85-94.
ZHOU Lingfeng, YANG Shanshui, WANG Li, et al. Intermittent DC arc impedance model with segmented noise under resistive loads [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 85-94.
- [14] ZOU X Y, MU H B, ZHANG H T, et al. A cable breakage defect localization and assessment technique via time-frequency domain reflectometry with Gaussian window [C]//2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu, China. IEEE, 2022: 635-639.
- [15] LI M H, LEE Y H, BANG S S, et al. Application of enhanced optimal-detection of time-frequency domain reflectometry on HTS cable with high-resolution [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, 33(5): 9000306.
- [16] 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 Yuhao, ZHOU Kai, WANG Xianjin, et al. Power cable defects location based on improved time-frequency domain reflectometry [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2584-2594.
- [17] LOCK C G J, GREEFF J, JOUBERT S. Modelling of telegraph

- equations in transmission lines[D]. Tshwane:Tshwane University of Technology, 2007.
- [18] SHIN Y J, POWERS E J, CHOE T S, et al. Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(6):2493-2500.
- [19] 高文笃, 刘太君, 吴绍精, 等. 基于 LSTM 神经网络的漏缆故障定位算法[J]. 数据通信, 2022(3):45-49.
GAO Wendu, LIU Taijun, WU Shaojing, et al. LSTM based fault location algorithm for leaky cables[J]. Data Communication, 2022(3):45-49.
- [20] 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):4043-4051.
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):4043-4051.
- [21] 王子健, 周凯, 朱光亚, 等. 基于时频域转换法的配网电缆冷缩中间接头受潮诊断[J]. 高电压技术, 2022, 48(6):2178-2186.
WANG Zijian, ZHOU Kai, ZHU Guangya, et al. Moisture diagnosis method for cold-shrinkable intermediate joints of distribution cables based on time-frequency domain conversion[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6):2178-2186.
- [22] BANG S S, SHIN Y J. Classification of faults in multicore cable via time-frequency domain reflectometry[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5):4163-4171.
- [23] 傅晨钊, 司文荣, 祝令瑜, 等. 隧道电缆稳态温升快速计算方法研究[J]. 高压电器, 2021, 57(1):75-81.
FU Chenzhao, SI Wenrong, ZHU Lingyu, et al. Study on fast calculation method for steady temperature rise of tunnel cables[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1):75-81.
- [24] 赵莹莹, 鲍长庚, 姚维强, 等. 基于热路模型的电力电缆温升计算方法综述[J]. 电力与能源, 2022, 43(5):389-392, 433.
ZHAO Yingying, BAO Changeng, YAO Weiqiang, et al. Review of researches on thermal circuit model for conductor temperature calculation of power cables[J]. Power & Energy, 2022, 43(5):389-392, 433.
- [25] 卜江涛, 毕道伟. 核电站仪控设备老化机理及管理策略[J]. 发电设备, 2014, 28(3):221-225.
BU Jiangtao, BI Daowei. Aging mechanism and management of I&C equipment in nuclear power plant[J]. Power Equipment, 2014, 28(3):221-225.
- [26] 文朗, 白会贤, 郝庆福. 核电站仪控全数字化改造项目规划和对策分析[J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(11):212-213.
WEN Lang, BAI Huixian, HAO Qingfu. Planning and countermeasure analysis of all-digital transformation project of instrument and control in nuclear power plant[J]. Industrial & Science Tribune, 2019, 18(11):212-213.

作者简介:



邓红雷

邓红雷(1975),男,博士,副教授,研究方向为电力设备在线监测、交直流混合配电网(E-mail:denghl@scut.edu.cn);

李力行(1999),男,硕士在读,研究方向为电力设备状态监测和信号处理;

涂画(1984),男,学士,高级工程师,从事仪控设备可靠性研究相关工作。

Fracture detection of I&C cable in NPP based on improved TFDR method

DENG Honglei¹, LI Lixing¹, TU Hua², YAO Likai², ZHANG Xiang², LIU Gang¹

(1. South China University of Technology (Guangdong key laboratory of Clean energy technology), Guangzhou, 510640, China; 2. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

Abstract: Time-frequency domain reflection (TFDR) method has the advantages of maturity, convenience and high resolution, so it is widely applied to locate defects in various cables. To ensure the fracture defect of the instrumentation and control (I&C) cable can be effectively discriminated and precisely located in nuclear power plant (NPP), an improved TFDR method is proposed by intervening thermal stress in this paper. Subsequently, different degrees of fracture defects are simulated in a 50-meter multi-core I&C cable, and traditional TFDR and improved TFDR methods are used for detection and verification. Comparing the detection results of both, the peak localization of improved TFDR method for weak defect fracture is improved to 0.2, which is 2.5 times of the traditional TFDR method, and the localization error rate is less than 2.5%. Compared to the traditional TFDR method, improved TFDR method utilizes the thermal stress fluctuation variance curve as the basis for defect identification, the identification power of weak fracture defects can be substantially improved. The original localization distance can be corrected to improves the accuracy of weak fracture damage in improved TFDR method. So the effective identification and localization of weak defects can be further achieved in improved TFDR method.

Keywords: instrumentation and control cables; defect location; time-frequency domain reflection (TFDR) method; time-frequency cross-correlation; thermal stress; floating variance

(编辑 方晶)