

基于BOTDR分布式检测技术的光缆隐蔽性缺陷识别

夏彦卫 贾伯岩 庞先海 丁立坤 王怡欣

Identification of hidden defects in optical cables based on BOTDR distributed detection technology

XIA Yanwei, JIA Boyan, PANG Xianhai, DING Likun, WANG Yixin

引用本文:

夏彦卫, 贾伯岩, 庞先海, 等. 基于BOTDR分布式检测技术的光缆隐蔽性缺陷识别[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 229–236. DOI: 10.5768/JAO202445.0108002

XIA Yanwei, JIA Boyan, PANG Xianhai, et al. Identification of hidden defects in optical cables based on BOTDR distributed detection technology[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(1): 229–236. DOI: 10.5768/JAO202445.0108002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0108002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于频域纹理消除的结构性纹理缺陷检测方法

Structural texture defects detection method based on frequency domain texture elimination

应用光学. 2020, 41(4): 876–880 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0405004>

基于光学相干测振系统的微悬臂梁缺陷检测

Defect detection of micro-cantilever beams based on optical coherence vibrometer system

应用光学. 2021, 42(2): 304–309 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203003>

基于频域变换的MEMS声学薄膜缺陷检测算法

Defect detection algorithm of MEMS acoustic film based on frequency domain transformation

应用光学. 2021, 42(6): 1086–1091 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0603005>

基于激光移频回馈技术远距离振动测量研究

Long-distance vibration measurement based on laser frequency-shifted feedback interferometry

应用光学. 2020, 41(6): 1277–1283 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0607001>

用于铝板缺陷无损检测的激光超声有限元模拟研究

Finite element simulation in laser ultrasound for non-destructive testing of aluminum defect materials

应用光学. 2019, 40(1): 150–156 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107004>

基于分布式光纤的埋地自来水管多点泄漏定位方法分析

Analysis on underground water pipes multi-point leakage location method based on distributed optical fiber

应用光学. 2020, 41(1): 228–234 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0108002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0229-08

基于 BOTDR 分布式检测技术的 光缆隐蔽性缺陷识别

夏彦卫¹, 贾伯岩¹, 庞先海¹, 丁立坤², 王怡欣¹

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘 要: 提出基于布里渊光时域反射 (Brillouin optic time domain reflectometer, BOTDR) 分布式检测技术与解调信号的光缆隐蔽性缺陷识别方法, 识别检测光缆隐蔽性缺陷。在生产阶段将光纤植入多股碳纤维导线复合芯内部作为传感器, 依据 BOTDR 技术与光时域反射 (optic time domain reflectometer, OTDR) 技术原理, 构建关于碳纤维导线光缆隐蔽性检测的分布式传感系统, 利用光纤对温度、应力、传播损耗的高精度感知, 多维度地分析碳纤维导线光缆的隐蔽性缺陷及位置分布, 实现光缆的隐蔽性缺陷识别。利用 morlet 小波解调布里渊散射信号, 提取包络信息, 去除信号噪声, 采用列文伯格-马夸尔特算法, 拟合布里渊散射谱数据, 精确估计最优 Brillouin 频移量参数, 提升整体缺陷识别精度。实验证明: 该方法可以准确地对光缆的隐蔽性缺陷进行表征, 实现多股碳纤维导线光缆隐蔽性缺陷的快速、有效识别, 促进碳纤维导线光缆更好地应用于增容、大跨越等工程中。

关键词: BOTDR 技术; 信号解调; 隐蔽性缺陷; OTDR 技术; 曲线拟合; Brillouin 频移

中图分类号: TN39; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0108002

Identification of hidden defects in optical cables based on BOTDR distributed detection technology

XIA Yanwei¹, JIA Boyan¹, PANG Xianhai¹, DING Likun², WANG Yixin¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: A method for identifying and measuring the hidden defects of optical cables based on Brillouin optic time domain reflectometer (BOTDR) distributed detection technology and demodulated signals was proposed to identify and measure the hidden defects of optical cables and ensure the safe operation of multi-strand carbon fiber optic cables used in projects such as capacity expansion and large span. In the production stage, the optical fiber was embedded in the composite core of multi-strand carbon fiber cable as a sensor. According to the principle of BOTDR technology and optic time domain reflectometer (OTDR) technology, a distributed sensing system for the detection of the hidden defects of carbon fiber cable was constructed. The hidden defects and position distribution of carbon fiber cable were analyzed in a multi-dimensional way by using the high-precision sensing of the optical fiber on temperature, stress and propagation loss, which realized hidden defect identification of optical cable. The Morlet wavelet was used to demodulate Brillouin scattering signal, extract envelope information and remove signal noise. Levenberg-Marquardt algorithm was used to fit Brillouin scattering spectrum data, accurately estimate the optimal Brillouin frequency shift parameter, and improve the overall defect recognition accuracy. The experimental results show that this method can accurately characterize the hidden defects of optical cable, realize the fast and effective identification of hidden defects of

收稿日期: 2023-03-17; 修回日期: 2023-10-11

基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目 (kj2022-004)

作者简介: 夏彦卫 (1966—), 男, 正高级工程师, 主要从事输变电设备运检技术研究。E-mail: dihuang7840720@163.com

通信作者: 王怡欣 (1994—), 女, 助理工程师, 主要从事输电线路运检技术研究。E-mail: dihuang780940720@163.com

multi-strand carbon fiber cable, and promote the better application of carbon fiber cable in capacity expansion, large span and other projects.

Key words: BOTDR technology; signal demodulation; hidden defects; OTDR technology; curve fitting; Brillouin frequency shift

引言

随着社会用电量需求的增加,用电负荷屡次突破历史极值,线路重载、过载现象较为突出,导致线路故障风险剧增。为了满足大容量、大跨越的输电要求,提高线路载流量势在必行^[1-3]。目前光缆的材质种类很多,而碳纤维导线在增加输送容量、降低弧垂、减少线损、提高线路抗风能力等方面表现出其他类型导线无可比拟的优势,被业内称为“超导导线”,在线路增容改造、复杂地形大跨越等线路工程中得到广泛应用,并推广至基建工程中^[4-6]。该导线纤芯为碳纤维浸渍树脂制成,其伸长率相对较低,不能大角度弯折,但在施工时难免会出现弯折现象,造成碳纤维导线在投运前就已遭到破坏,出现微裂纹等隐蔽性缺陷,待正式投运后在导线重力、风载荷等共同作用下,隐蔽性缺陷快速增大,出现跳线断线故障。因此,为使碳纤维导线更好地应用于光缆项目,对其隐蔽性缺陷进行识别非常必要。

近年来,国外有学者做了相关研究,如文献[7]利用纳米矢量网络分析仪在不同频率下测量光缆的输入端口反射幅度,将其作为特征进行散射参数的识别,通过K近邻算法对光缆信号分类,实现缺陷识别;文献[8]介绍了分布式光纤传感技术的一般背景和基本原理,然后对其在基础设施健康监测中的应用进行了全面的回顾和评价,包括桥梁、水坝、边坡、管道、隧道、矿山输送机 and 路面。如吉咸阳等人采用边缘检测方法搜索光缆边界,再利用统计过程控制方法对光缆的缺陷进行预估,形成疑似缺陷图像,而准实时检测是利用双向微分算法对疑似缺陷图像的弱边缘进行分析,并通过分水岭分割算法对整个缺陷区域进行分割,以此确定光缆的缺陷位置^[9];李斌等人首先对光时域反射仪进行了构建,利用其对故障信号进行采集,然后通过小波分解的方式对信号进行分解与重组,并对小波包能量进行特征提取,将提取的特征向量输入至支持向量机模型中进行训练与测试,进而实现光缆缺陷的检测与识别^[10]。上述两种方法虽然对光缆出现的缺陷起到了一定的识别作用,但是第一种方法对图像采集的质量要求较

高,且算法复杂,应用价值不高;第二种方法则不擅长连续缺陷点的处理,也就是说如果光缆同时存在多处缺陷点时,该方法的识别精度就会下降。

布里渊光时域反射(Brillouin optic time domain reflectometer, BOTDR)技术采用单端测量结构,可以同时获取测量温度与应变信息,测量精度高、传感距离长且比较容易实现,被广泛应用于各类设施运行情况的识别^[11-12]。因此,本文提出基于BOTDR分布式检测技术与解调信号的光缆隐蔽性缺陷识别方法,可以有效实现光缆隐蔽性缺陷识别,具有较强的应用性。

1 光缆隐蔽性缺陷识别

为了实现以碳纤维导线为材质的光缆隐蔽性缺陷在线无损识别,本文利用分布式光纤传感技术,在生产阶段将光纤植入多股碳纤维导线复合芯的内部作为传感器,利用光纤对温度、应力、传播损耗的高精度感知,来检测植入光纤后对以多股碳纤维导线复合芯为芯棒的光缆隐蔽性缺陷。将光纤植入到线芯内部后,内部出现的微裂纹等隐蔽性缺陷分为两大类:一是微裂纹伤及光纤本体,光在光纤受损处受阻或逸出,表现为光路不通或损耗增加,通过测量光路通断或损耗情况对其进行表征;二是微裂纹未伤及光纤本体,碳纤维导线正常运行状态下,会受到导线重力等形成的张力作用,整体发生拉长形变,微裂纹缺陷处将出现应力集中,其形变量大于其他完好区段,光纤将出现一个较大的形变点,进而造成光纤频率出现突变。

本文采用基于分布式光纤布里渊散射的BOTDR技术,检测碳纤维导线的温度和应变分布情况,同时结合光时域反射技术(optic time domain reflectometer, OTDR)检测碳纤维导线中光纤的损耗情况,多维度地分析碳纤维导线的缺陷及位置分布,进而实现光缆的隐蔽性缺陷识别。

1.1 基于分布式传感技术的光缆隐蔽性缺陷识别

1.1.1 基于BOTDR技术的光缆温度和应变检测

BOTDR属于传感技术,具有分布式的特点。该技术可以感知到光纤的温度与应变信息的变化,而这一过程则是通过分析布里渊(Brillouin)散

射频谱在时间以及空间上的变化情况与分布情况来实现^[13]。

当植入到碳纤维导线线芯内部中的光纤温度 T 与应变值 ε 产生变动时, 在散射谱中体现出来的便是功率与频率的改变。而 T 与 ε 通常利用测量 Brillouin 频移 ν_B 来进行传感, 所以 ν_B 与 T 和 ε 之间存在着一一定的数学关联。

设定植入到碳纤维导线线芯内部的光纤密度用 ρ 描述, 泊松比用 k 描述, 光纤折射率用 n 描述, 杨氏模量用 Y 描述, 激光波长用 λ 描述。如果 T 或 ε 发生变化, 那么 n 就会发生改变, ρ 、 k 和 Y 均会受到影响, 所以布里渊频移可以通过 T 和 ε 的关系函数进行描述, 公式为

$$\nu_B(\varepsilon, T) = [2n(\varepsilon, T)] / \lambda \sqrt{\frac{[1-k(\varepsilon, T)]Y(\varepsilon, T)}{[1+k(\varepsilon, T)][1-2k(\varepsilon, T)]\rho(\varepsilon, T)}} \quad (1)$$

如果 T 等于初始温度 T_0 , 那么在应变梯度较小的情形下, 当 $\varepsilon = 0$, 且不考虑高阶项的情况时, 对式(1)进行泰勒展开, 进而得到:

$$\nu_B(\varepsilon, T_0) = \nu_B(0, T_0) + C_\varepsilon \Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中: $\Delta\varepsilon$ 为应变变量; C_ε 为 ν_B 的应变线性系数。由此可以看出, ν_B 随着 ε 的改变会产生线性变化。

如果光纤没有产生应变, 且温度梯度较小时, 当 $T = T_0$, 且不考虑高阶项的情况下, 实施泰勒展开, 可得到:

$$\nu_B(0, T) = \nu_B(0, T_0) + C_T \Delta T \quad (3)$$

式中: ΔT 为温度变量; C_T 为 ν_B 的温度线性系数。由此可以得出, ν_B 也会随着 T 的改变产生线性变化。

依据 T 和 ε 对 ν_B 的影响, 可以将 ν_B 重新描述为

$$\nu_B(\varepsilon, T) = \nu_B(\varepsilon_0, T_0) + C_\varepsilon(\varepsilon - \varepsilon_0) + C_T(T - T_0) \quad (4)$$

式中: $\nu_B(\varepsilon_0, T_0)$ 为初始 Brillouin 频移; ε_0 为初始应变值。

根据获取的 Brillouin 频移, 便可以知晓植入到碳纤维导线线芯内部的光纤温度与应变情况, 进而可以获取碳纤维导线的缺陷及位置分布。

1.1.2 基于 OTDR 技术的光纤损耗检测

为了对以多股碳纤维导线复合芯为芯棒的光缆隐蔽性缺陷进行更为精准地识别, 在对碳纤维导线线芯内部的光纤进行温度与应变检测之外, 还需对光纤的传播消耗情况进行检测, 从多维度来分析碳纤维导线存在的缺陷以及分布的位置, 进而实现光缆的隐蔽性缺陷识别。

OTDR 是当下较为有效的对光纤传播损耗进

行监测的技术, 该技术可以将光纤后向散射信号曲线反映出来, 具有直观、准确的特点, 并且在监测损耗的过程中, 还能够测量到由局内至所有接头点的传播距离, 对于光缆缺陷的精确查找以及故障的及时处理都非常重要。

OTDR 技术首先将脉冲光发射至碳纤维导线线芯内部的光纤中, 之后在 OTDR 端口处对返回的信息进行接收, 以此完成传播损耗测量。

在光纤内, 脉冲光在传播的过程中, 往往会出现散射和反射现象, 这样便会有一些散射光以及反射光重新折返至 OTDR 端口位置, 此时探测器便会对这些折返光中的信息进行探测, 获取的结果则被视为在光纤各个位置上的时间或曲线片段。根据脉冲光信号从发射至折回所需的时间, 以及脉冲光在光纤中的传播速度, 进而求得传感距离, 描述为

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (5)$$

式中: c 为真空光速; t 为脉冲光信号从发射至折回所需的时间。

根据此距离便可以确定碳纤维导线线芯内部光纤出现破损的位置。

关于光纤的特性, OTDR 技术通过瑞利散射与非涅尔反射来体现。其中瑞利散射是一种没有规律性的散射, 脉冲光顺着光纤方向进行传输时产生。接收机可以根据折返的背向散射光, 判断出光纤传播损耗情况, 在移动轨迹上体现出来的就是呈衰减趋势的曲线。由此可知, 背向散射光的功率在逐渐变弱, 进而表明在光纤中, 光信号经由一定时间的传播后, 有不同程度的损耗。

菲涅尔反射通常由光纤内的一些点引发形成, 当散射光通过这些由引起反向系数发生变化的各种因素构成的点时, 便会被反射回来。通过反射信息就可以获取各个连接点以及断点的位置。

根据上述两种光纤信号的作用原理, 可以检测碳纤维导线发生线芯微裂纹、断裂后对光纤损耗、形变等参量的影响。当外界环境施加后, 可以根据外界环境作用方式(如波动性、整体性等)的不同对信号进行区分。

1.1.3 光缆隐蔽性缺陷识别实现

将 BOTDR 技术与 OTDR 技术相结合, 便可以设计出关于光纤温度、应力以及光纤传播损耗检测的分布式传感系统, 以此实现以多股碳纤维导线复合芯为芯棒的光缆隐蔽性缺陷识别。

一般情况下,分布式传感系统检测光信号的方式主要分为2类,即直接检测与相干检测。由于 Brillouin 散射光的功率较小,并且掺杂的噪声也较多,不适合直接检测方式;而相干检测则可以通过参考光来增强 Brillouin 散射光的信噪比,起到了间接放大 Brillouin 后向散射光的作用,因此本文选用相干检测的方法对光信号进行检测。基于分布式光纤传感技术的传感系统框图如图1所示。

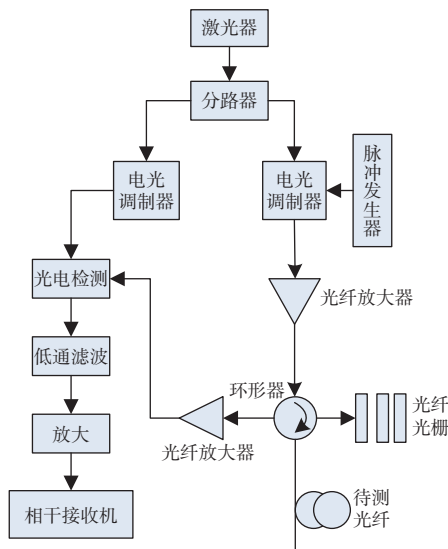


图1 BOTDR 传感系统框图

Fig. 1 Block diagram of BOTDR sensing system

在该系统中,利用分路器将连续波信号划分成2类,即信号光、参考光。其中,信号光通过光电调制器转换成脉冲光,脉宽可以自适应调节。利用光纤放大器对脉冲光进行放大操作,然后由光纤光栅将放大的自发辐射噪声去掉,再通过环形器投射至待测光纤中。

Brillouin 后向散射信号返回时,会经过环形器,并在此处完成耦合操作,之后再次进行放大处理,这一过程需利用光纤放大器来实现。参考光与 Brillouin 后向散射信号在光电检测环节中实施相干检测,用公式描述为

$$F = \partial D_{i0} D_{s0} \sin[2\pi(f_s - f_r)t + (\varphi_r - \varphi_s)] \quad (6)$$

式中: ∂ 为光电转换系数; φ_s 、 D_{s0} 以及 f_s 为信号光初始相位、强度以及频率; φ_r 与 D_{i0} 以及 f_r 为参考光初始相位、强度以及频率。

当碳纤维导线线芯内部光纤的某个位置的温度、应力以及传播损耗发生改变时, Brillouin 散射光就会出现频移现象,将参考光和散射光混频之后进入相干接收机,对后向 Brillouin 散射信号进行测量。因为往往只有散粒噪声才能对相干接收机

产生影响,所以其具有较高的灵敏度,通常情况下,瑞利散射与 Brillouin 散射相比会高出 20 dB~30 dB,这样就可以利用相干接收机将瑞利散射去除,进而获取足够窄的频率精度,确保,灵敏性。

综上所述,分布式传感系统可以对导线线芯内部的光纤温度、应力以及传输损耗情况进行感知与表征,可以快速定位到碳纤维导线线芯内部的光纤表面,以及本体出现微裂纹的部位,进而实现对以多股碳纤维导线复合芯为芯棒的光缆隐蔽性缺陷识别。

1.2 Brillouin 散射信号包络解调

在传感系统中,由于接收到的 Brillouin 散射信号通常为宽带信号,不在指定频率上,而且整个散射呈非线性,导致其表现为随机偏振态,散射信号中存在较多的随机噪声,因此需要利用一种处理方法,从信号中对包络信息进行提取,去除噪声,实现信号的解调。

morlet 小波具有多尺度、自适应性能好的特点,并且在时域和频域上均有较强的表征能力^[14-15]。因此,本文使用 morlet 小波对散射信号的包络进行提取,从而得到解调后的信号。

对于 morlet 小波而言,可将其视为复数滤波器,它的实部可以看成是零相移滤波器,而它的虚部则可以看成是 $\frac{\pi}{2}$ 相移滤波器。根据这一特点,便可以对散射信号实施包络提取。

在 morlet 小波中,母小波可以描述为

$$\psi(t) = (1/2\pi)e^{-t^2/2}e^{ip_0t} \quad (7)$$

式中 p_0 为中心频率。

将式(7)进行扩展,得到关于实部与虚部的表现形式,分别描述为

$$\psi_r(t) = (1/2\pi)e^{-t^2/2} \cos p_0t \quad (8)$$

$$\psi_i(t) = (1/2\pi)e^{-t^2/2} \sin p_0t \quad (9)$$

设定信号用 $x(t)$ 描述,展缩因子用 s 描述,平移因子用 τ 描述,进行 morlet 小波变换以后,其实部可以描述为

$$\text{Re}(w(s, \tau)) = \frac{x(t) \cos p_0\tau}{se^{-(\tau/s)^2} 2\pi} \quad (10)$$

虚部可以描述为

$$\text{Im}(w(s, \tau)) = \frac{x(t) \sin p_0\tau}{se^{-(\tau/s)^2} 2\pi} \quad (11)$$

对式(10)、式(11)实施平方相加的运算,再进行开方处理,便能够获取经过小波变换以后的包络,描述为

$$u(s, \tau) = \sqrt{\text{Im}(w(s, \tau))^2 + \text{Re}(w(s, \tau))^2} \quad (12)$$

信号的包络检波主要包含 2 个部分, 即滤波与幅值解调, 利用小波的滤波功能以及实部与虚部 $\pi/2$ 的正交特性所提供的信号解调功能, 便能够完成包络检波。如果取不同尺度下的小波对信号进行分析处理, 就能够获取到信号在不同频率下的包络成份, 并得到信号的包络尺度谱, 进而得到整个频域内的包络, 实现散射信号的包络解调。

1.3 Brillouin 散射谱的曲线拟合

Brillouin 频移与温度和应变都呈线性关系, 如何快速提取并准确计算出 Brillouin 频移是实现参量分析、长距离定位的关键。为此, 本文利用列文伯格-马夸尔特算法(LM)对 Brillouin 散射谱进行数据拟合, 对最优 Brillouin 频移量参数作出精确估计。

LM 算法是在高斯牛顿算法基础上引进阻尼因子, 并对期望参数进行重组, 使初始值的选择区域得到拓展。

设定 Brillouin 散射谱模型描述为

$$q = f(x_i, \mathbf{B}) \quad (13)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为 Brillouin 频移量参数向量; $i = 0, 1, \dots, N$ 为离散点, 其中传感系统中的点数用 $N > 3$ 描述。

以求得 $\mathbf{B}$ 的逼近误差 $E(\mathbf{B})$ 为目标, 建立目标函数描述为

$$E(\mathbf{B}) = \sum_i^N [y_i - f(x_i, \mathbf{B})]^2 \quad (14)$$

算法的迭代关系可以描述为

$$\mathbf{B}_{l+1} = \mathbf{B}_l - [\mathbf{H} + \lambda \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{J}^T [y_i - f(x_i, \mathbf{B})] \quad (15)$$

式中: $\mathbf{J} = [y_i - f(x_i, \mathbf{B})]^T \mathbf{R}^{-1} [y_i - f(x_i, \mathbf{B})]$, 为 Jacobian 矩阵, 其中 $\mathbf{R}$ 为对角阵; $\mathbf{H} = \mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 为 Hessian 矩阵; $\mathbf{A}$ 为单位矩阵; λ 为阻尼因子; l 为迭代次数。目标函数的最小值即为 Brillouin 散射谱模型中的频移量最佳参数。LM 算法流程图如图 2 所示。

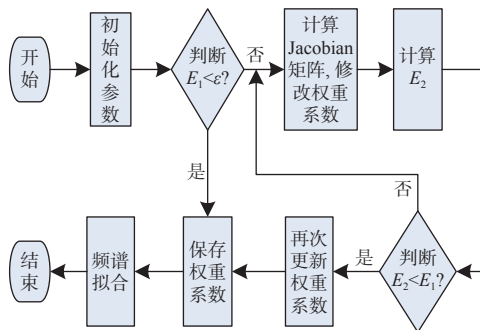


图 2 LM 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of LM algorithm

LM 算法具体过程如下:

1) 对相关参数进行初始化操作, 包括 $\mathbf{B}$ 的初始值、权重 w 以及期望误差 ε 等;

2) 根据式(14), 求得初始逼近误差 E_1 ;

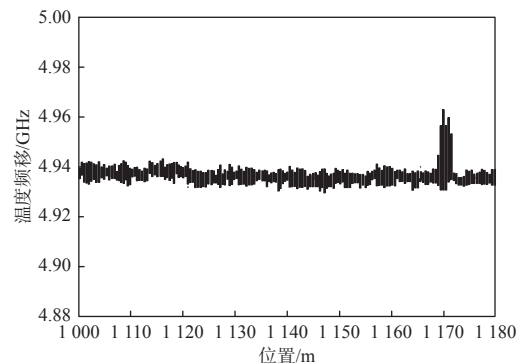
3) 将 ε 与 E_1 作对比, 若 $E_1 > \varepsilon$, 那么计算 Jacobian 矩阵, 对 w 进行修改, 并重新求取逼近误差, 得到 E_2 ;

4) 比较 E_1 与 E_2 , 当 $E_2 < E_1$ 时, 那么再次对 w 进行修改, 计算逼近误差 E_3 , 并将 E_3 与 E_1 作对比, 如此反复循环, 直到 $E < \varepsilon$, 保留 w , 完成 Brillouin 散射谱的数据拟合, 得到 Brillouin 散射谱模型中的频移量最佳参数, 进而获取精准的 Brillouin 频移, 快速、准确地定位光缆隐蔽性缺陷的位置。

2 实验分析

以某地区的电力光缆为实验对象, 光缆全长约 150 km, 横跨多个区域, 为周边地区进行电力传输与信息通讯。该电力光缆采用架空式的铺设形式, 架设在电力线杆塔上, 光缆芯棒为 7 股碳纤维导线复合芯。

为了验证本文方法的有效性, 实验选取该电力光缆中某一段光缆作为识别对象。实验采用中心波长为 1550 nm 的 DFB 激光器、CONOPTICS-M370LA 电光调制器、Amonics EDFA 掺铒光纤放大器、PulseRider PG1000 脉冲发生器、康冠 KG-RF 放大器、SiliconAPD-C30921 光纤光电探测器以及 Discovery DP-QPSK 相干接收机作为主要元件, 构建了分布式光纤传感系统, 对该段光缆进行隐蔽性缺陷识别, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 利用本文方法对该段光缆的隐蔽性缺陷进行识别时, 从光纤温度与应变频移方面来看, 在 1160 m 之前的频移较为平稳, 而在位于 1170 m 附近则出现大幅波动; 从光纤传播损耗方面来看, 也是在 1170 m 处出现了断崖式下降, 表现异常。综合上述 3 个方面考虑, 判断该段光缆在 1170 m 处存在隐蔽性缺陷。



(a) 光纤温度频移情况

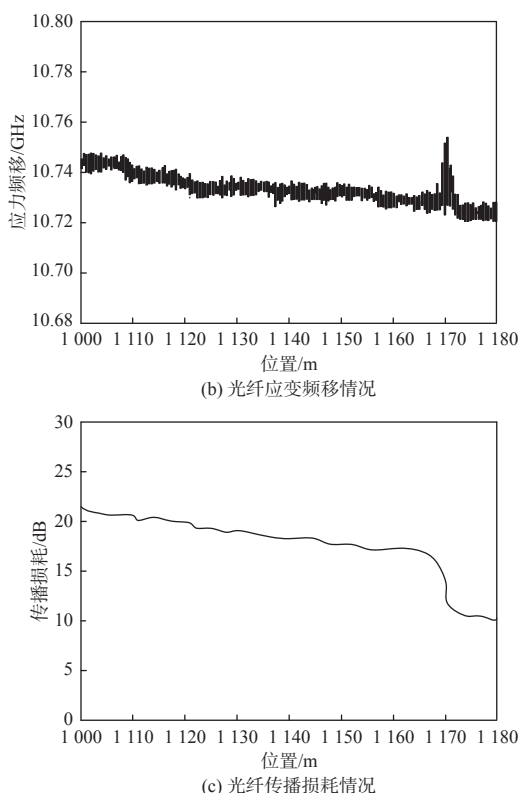


图3 光纤温度与应变频移以及传播损耗情况

Fig. 3 Optical fiber temperature, frequency conversion shift and propagation loss

为了验证本文方法对于光缆隐蔽性缺陷识别的准确性,实验将1170 m处的光缆进行了截取,并剥开线芯进行检查,结果如图4所示。由图4可知,截取的1170 m处光缆,去除光缆保护套,剥开线芯后可以清楚地看到,有部分碳纤维导线出现了轻微破损,虽未伤及光纤本体,没有影响光缆的正常运行,但光在传输过程中,在该受损处受阻,表现为光路不通畅、损耗增加。如果不进行处理,那么若再有外力作用于此处,则会形成一个较大的形变点,引起频率突变,影响整个光缆的正常运行。

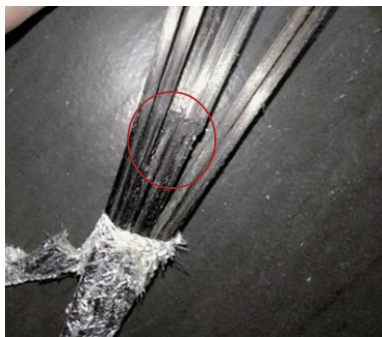


图4 碳纤维导线线芯破损图

Fig. 4 Broken image of carbon fiber conductor core

综上所述,本文方法可以有效地识别光缆的隐蔽性缺陷,准确度高,实用性强。为了进一步考量本文方法对于碳纤维导线复合芯内部状况的检测性能,实验将从该光缆上截取的1170 m处有轻微破损的光缆以及一段完好无损的光缆作为样本,对它们进行了施力与撤力操作,经过测试,得出的应力变化结果如图5所示。

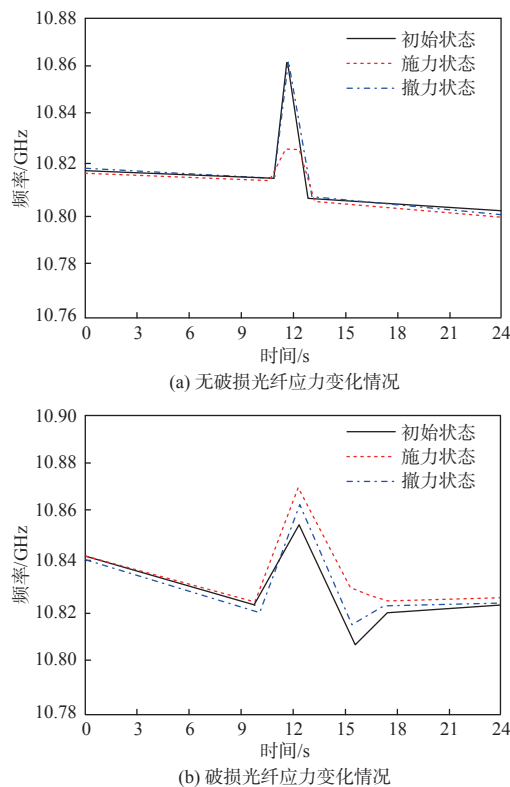


图5 光纤应力变化对比图

Fig. 5 Comparison diagram of optical fiber stress changes

由图5可知,在对2种光缆进行施力操作后,光纤的应力均产生了明显变化,与初始状态相比,均有一定的偏差。当撤去施加在这2种光缆上的力之后,无破损光纤内部的应变迅速恢复到初始状态,而受损的光纤则没能恢复到初始状态,且与初始状态存在较大差异。由此说明,通过本文方法可以较好地分析出光纤应力的变化情况,进而准确地对光缆的隐蔽性缺陷进行表征。

3 结论

为了推动碳纤维导线在增容、大跨越等线路工程中的应用,杜绝导线断线等恶性事故的发生,为新型电力系统建设提供技术支撑,本文提出一种基于BOTDR分布式检测技术与解调信号的光缆隐蔽性缺陷识别方法,对以多股碳纤维导线复

合芯为芯棒的光缆隐蔽性缺陷进行了识别。该方法揭示了存在隐蔽性缺陷碳纤维导线内部光纤信号的变化规律, 实现了碳纤维导线隐蔽性缺陷的准确识别。通过实验证明, 本文方法在识别光缆隐蔽性缺陷方面有着较好的表现, 适用于此类缺陷问题的解决。

参考文献:

- [1] 夏猛, 汤晓惠, 王颖, 等. 基于BOTDA/R的在运光纤复合架空地线光缆应变监测对比分析[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 36-42.
XIA Meng, TANG Xiaohui, WANG Ying, et al. Comparative analysis of strain monitoring of in-service optical fiber composite overhead ground wire and optical cable based on BOTDA/R[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 36-42.
- [2] 王克飞, 何惠阳. 基于渗透测试的通信光缆寻障定位仿真研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(3): 425-429.
WANG Kefei, HE Huiyang. Simulation study on communication optical cable obstacle finding and positioning based on penetration testing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 37(3): 425-429.
- [3] 陈磊, 詹跃东, 田庆生. 基于BOTDR分布式传感系统的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019, 437(6): 96-100.
CHEN Lei, ZHAN Yuedong, TIAN Qingsheng. Research on distributed sensing systems based on BOTDR[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019, 437(6): 96-100.
- [4] 张宇阳, 路元刚, 彭捷钦. 布里渊光时域光纤传感中的快速测量技术[J]. 半导体光电, 2022, 43(4): 625-641.
ZHANG Yuyang, LU Yuangang, PENG Jianqin. Rapid measurement technology in Brillouin optical time-domain optical fiber sensing[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(4): 625-641.
- [5] 陈刚, 段洁, 衣文索, 等. 基于BOTDR散射谱的应变提取方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 75-81.
CHEN Gang, DUAN Jie, YI Wensuo, et al. Research on strain extraction method based on BOTDR scattering spectrum[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 75-81.
- [6] 李雷, 严玉国, 杨宾峰. 基于FPGA的零中频DPSK信号解调技术研究[实现][J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(2): 114-118.
LI Lei, YAN Yuguo, YANG Binfeng. Research and implementation of zero intermediate frequency DPSK signal demodulation technology based on FPGA[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(2): 114-118.
- [7] BADER O, HADDAD D, KALLEL A Y, et al. Identification of communication cables based on *s*-parameters and *k*-nearest neighbors algorithm[C]//18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Tunisia: IEEE, 2021: 808-811.
- [8] WIJAYA H, RAJEEV P, GAD E. Distributed optical fibre sensor for infrastructure monitoring: field applications[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 64: 102577.
- [9] 吉咸阳, 徐宁, 杨庚, 等. 光缆表面缺陷视觉在线高速检测算法研究[J]. 高技术通讯, 2019, 29(8): 808-815.
JI Xianyang, XU Ning, YANG Geng, et al. Research on online high speed visual inspection algorithm for surface defects of optical cables[J]. Chinese High Technology Letters, 2019, 29(8): 808-815.
- [10] 李斌, 张敏, 周恒, 等. 基于小波包分析和支持向量机的光时域反射仪光缆故障识别[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 127-134.
LI Bin, ZHANG Min, ZHOU Heng, et al. Fault identification of optical fiber optic cables using wavelet packet analysis and support vector machine[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 127-134.
- [11] 谷行, 白清, 王清琳, 等. 基于窗函数优化的布里渊光时域反射仪测温精度提升研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 25-31.
GU Xing, BAI Qing, WANG Qinglin, et al. Research on improving the temperature measurement accuracy of Brillouin optical time domain reflectometer based on window function optimization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2020, 34(1): 25-31.
- [12] 谢云飞, 李天昀, 彭华. DVB-CID信号解调算法与性能研究[J]. 信号处理, 2019, 35(7): 1250-1258.
XIE Yunfei, LI Tianyun, PENG Hua. Research on DVB-CID signal demodulation algorithm and performance[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(7): 1250-1258.
- [13] 唐然, 赵迎新, 吴虹. 基于改进反馈判决的自动识别系统信号解调算法[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(5): 610-615.
TANG Ran, ZHAO Yingxin, WU Hong. Signal demodulation algorithm for automatic recognition systems based on improved feedback judgment[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(5): 610-615.
- [14] 郑志东, 肖庆正, 吴高洁. 基于最大累计度量的低复杂度多指数CPM信号解调[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(6): 19-23.
ZHENG Zhidong, XIAO Qingzheng, WU Gaojie. Low

- complexity multi index CPM signal demodulation based on maximum cumulative measure[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(6): 19-23.
- [15] 郑来芳, 张俊生, 梁海坚, 等. 一种光纤振动传感器的改进型相位解调方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 184-190.
- ZHENG Laifang, ZHANG Junsheng, LIANG Haijian, et al. Research on an improved phase demodulation method for fiber optic vibration sensors[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2021, 35(8): 184-190.

书讯

《航空光学工程》

《航空光学工程》是在参考国内外大量相关资料基础上,由周海宪研究员和程云芳高级工程师编撰而成,并在完成保密审查后,由化学工业出版社正式出版发行。

随着现代飞机和近代光学技术的快速发展,各种用途的飞机对机载光学系统工程提出了越来越高的技术要求。航空光学工程的工作波长从可见光成像发展到可见光/近红外/中波红外/长波红外/激光宽波谱成像,光学元件/系统从传统的折射/反射型结构发展到衍射型(包括全息元件和二元光学元件)/光波导型/微纳米型等混合结构,光学系统的成像原理从传统的几何成像理论发展到包括衍射成像、偏振成像和光谱成像等多种成像理论。军用飞机对空/地的攻击能力、昼夜及各种恶劣气候条件下的作战能力、制导武器的成功率、空中告警、目标探测以及作战有效性等方面都有了长足发展。

《航空光学工程》阐述了国内外重要机载光电设备的发展历史、主要类型、基本结构及典型性能。不仅介绍传统的光学成像理论,更注重现代光学成像技术;既讨论普通的光学设计方法,又尽量多地列举有代表性的机载光学系统设计实例。使书中所述光学成像技术既适用于军事领域,在众多民用领域中也具有重要参考价值。

《航空光学工程》由 13 章和 2 个附录组成。

《航空光学工程》一书可供航空领域(不局限于航空领域)从事光学仪器设计、光学系统和光机结构设计研发的设计师、光机制造工艺和光机材料研究的工程师阅读,引导科技工作者进一步探索、研究和突破更多技术难题,对促进我国航空事业赶超世界先进水平具有指导意义,也可以用作大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。

作者:周海宪,程云芳

出版单位:化学工业出版社

书号:978-7-122-43614-6

购书请扫码:

