

基于光纤传感技术的多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测

贾伯岩 夏彦卫 刘宏亮 徐亚兵 伊晓宇

Detection of hidden defects of multi-strand carbon fiber composite core conductor based on optical fiber sensing technology

JIA Boyan, XIA Yanwei, LIU Hongliang, XU Yabing, YI Xiaoyu

引用本文:

贾伯岩, 夏彦卫, 刘宏亮, 等. 基于光纤传感技术的多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 467–474. DOI: 10.5768/JAO202445.0208004
JIA Boyan, XIA Yanwei, LIU Hongliang, et al. Detection of hidden defects of multi-strand carbon fiber composite core conductor based on optical fiber sensing technology[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 467–474. DOI: 10.5768/JAO202445.0208004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0208004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多波长布里渊光纤激光器的温度传感特性

Temperature sensing characteristics based on multi-wavelength Brillouin fiber laser
应用光学. 2018, 39(4): 585–589 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0408001>

基于卷积神经网络的焊缝缺陷图像分类研究

Research on weld defect image classification based on convolutional neural network
应用光学. 2020, 41(3): 531–537 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0302007>

基于深度神经网络的太阳能电池组件缺陷检测算法研究

Research on detection algorithm of solar cell component defects based on deep neural network
应用光学. 2020, 41(2): 327–336 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202006>

用于液体传感的高双折射新型光子晶体光纤结构

New photonic crystal fiber structure with high birefringence for liquid sensing
应用光学. 2020, 41(3): 637–644 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308004>

45° 光纤微反射镜聚焦离子束加工及多轴位移检测研究

Research on focused ion beam processing of 45 optical communication fiber mirror and multi-axis displacement detection
应用光学. 2021, 42(3): 557–564 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0308001>

宽带空芯THz单模单偏振光纤

Broadband THz single-mode single-polarization hollow core fiber
应用光学. 2017, 38(5): 844–847 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0508001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0467-08

基于光纤传感技术的多股碳纤维复合芯导线 隐蔽性缺陷检测

贾伯岩¹, 夏彦卫¹, 刘宏亮¹, 徐亚兵², 伊晓宇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
沧州供电分公司, 河北 沧州 061000)

摘要: 为解决大容量、大跨越输电用碳纤维导线由于隐蔽性缺陷无法检出而导致频繁断线的问题, 提出了一种基于光纤传感技术的多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测方法。该方法通过搭建导线运行环境并模拟导线运行工况, 采用基于分布式光纤布里渊散射的时域反射技术, 检测碳纤维导线的温度和应变分布情况, 并结合光时域反射技术, 检测碳纤维导线中光纤的损耗情况。经过综合对比分析, 获取可表征多股碳纤维缺陷隐蔽性缺陷的光纤温度、应变、损耗等信号特征量, 并构建神经网络模型, 将各信号特征量作为模型输入, 通过模型训练确定模型内各权重系数, 使其能够有效地检测多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷。实验结果表明, 该方法可有效获取各类光纤信号特征量, 并且能够准确地检测各类导线隐蔽性缺陷, 具有重要的实际应用价值。

关键词: 光纤传感技术; 多股碳纤维; 复合芯导线; 隐蔽性缺陷; 信号特征量; 神经网络模型

中图分类号: TN913.7; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0208004

Detection of hidden defects of multi-strand carbon fiber composite core conductor based on optical fiber sensing technology

JIA Boyan¹, XIA Yanwei¹, LIU Hongliang¹, XU Yabing², YI Xiaoyu¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China;
2. Cangzhou Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Cangzhou 061000, China)

Abstract: In order to solve the problem of frequent disconnection of carbon fiber conductors for large-capacity and long-distance transmission due to undetectable hidden defects, a detection method for hidden defects in multi-strand carbon fiber composite core conductors based on optical fiber sensing technology was proposed. The operating environment of the wire was established and the operating conditions were simulated. The time-domain reflection technology based on distributed fiber Brillouin scattering was adopted to detect the temperature and strain distribution of carbon fiber wires, and the optical time-domain reflection technology was combined to detect the loss of optical fibers in carbon fiber wires. Comprehensive comparative analysis was conducted to obtain signal feature quantities such as fiber temperature, strain and loss that could characterize hidden defects in multi-strand carbon fibers, and a neural network model was constructed with each signal feature quantity as input to the model. Through model training, the various weight coefficients within the model were determined, enabling it to effectively detect hidden defects in multi-strand carbon fiber composite core wires. The experimental results show that this method can effectively obtain signal feature quantities of various types of fiber optic and can accurately detect various hidden defects in wires, which has important practical application values.

Key words: optical fiber sensing technology; multi-strand carbon fiber; composite core conductor; hidden defects; signal feature quantity; neural network model

收稿日期: 2023-03-03; 修回日期: 2023-08-16

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: 贾伯岩 (1978—), 男, 正高级工程师, 主要从事输变电设备运检技术研究。E-mail: chuipang7987360426@163.com

引言

随着社会用电需求不断增加,用电负荷屡次突破历史极值,线路重载、过载现象等突出问题日益严重^[1],以钢芯铝绞线为主的传统输电导线伸长率大、耐热性能不佳等问题凸显,如何提高输电线路输送容量成为现今输电专业迫切需要解决的难题之一。多股碳纤维复合芯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法比拟的优势^[2-3],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。随着碳纤维导线应用范围扩大,厂家力量不足、对施工人员监管不到位等问题凸显,部分工程中施工人员大角度弯折导线,造成碳纤维导线纤芯在投运前已遭到破坏,出现微裂纹等隐蔽性缺陷,其投运后在导线重力、风载荷等共同作用下,隐蔽性缺陷快速发展^[4],往往不到1年时间内即出现断线故障。为解决碳纤维导线的断线问题,相关研究机构一直致力于碳纤维导线隐蔽性缺陷的检测方法研究。

吕中宾等人采用直线扫描CT法,通过射线源探测器在相对平行直线区域扫描导线的方式获取缺陷检测结果^[5],该方法在实际应用过程中无法实现多股导线的缺陷检测。赵勇军等人引用声学成像技术及红外成像检测技术获取缺陷检测结果^[6],该方法在实际应用过程中受外界环境影响显著,检测结果容易出现偏差。陈大兵等人利用X射线图像技术获取缺陷检测结果^[7],该方法实际应用过程中,由于碳纤维导线是复合材料,导致X光在其内部衰减过快,成像效果较差,对微裂纹等缺陷的检出率仍然不高。

光纤传感技术作为传感技术的先导,能够感知并传输外界信号,光纤自身具备易弯曲、抗电磁干扰、抗辐射性能好等优势,被广泛应用于各大领域中。针对上述文献中存在的问题,提出基于光纤传感技术的多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测方法,准确有效地对多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷进行检测。

1 多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测

1.1 检测流程设计

采用光纤传感技术检测多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷的具体流程如下:

1) 搭建多股(7股)碳纤维导线不带电运行环

境,导线长度不低于50 m,两端施加运行张力,导线内部植入7根光纤,两端通过耐张金具进行光纤引出;

2) 模拟覆冰(不均匀铝片或水泥管)、振动(微风振动模拟试验台)、局部重物(局部加重块或局部施加垂直方向拉力)等碳纤维导线运行工况,采用布里渊光时域反射技术与光时域反射技术等测试光纤温度、应变和损耗等信号;

3) 在多股碳纤维导线不同位置模拟隐蔽性缺陷,并施加运行工况,测试光纤温度、应变和损耗等信号的变化规律;

4) 综合对比分析多股碳纤维导线隐蔽性缺陷前后、施加运行工况前后光纤信号的时间和空间分布特征,结合各类工况、缺陷对光纤温度、应变和损耗等信号的影响机理,分析得到可表征多股碳纤维缺陷隐蔽性缺陷的光纤温度、应变和损耗等信号特征量;

5) 提出集成至少7路光纤信号的碳纤维导线隐蔽性缺陷综合判别方法,采用人工神经网络实现碳纤维导线隐蔽性缺陷的自动综合检测。

1.2 基于BOTDR技术的导线温度与应变分析

布里渊光时域反射(Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)是一种通过探测光纤中自发布里渊散射来实现传感的分布式光纤传感技术^[8]。依照布里渊后向散射原理,通过检测注入光的多股碳纤维复合芯导线后向布里渊散射光功率与频移大小,即可确定光纤链路上温度与应力的波动情况。

温度与应变对于布里渊散射光的强度也产生影响^[9],通过式(1)能够计算布里渊散射光强度 Q_B :

$$Q_B = \frac{Q_R T}{T_F (\rho V_A^2 D_T - 1)} \quad (1)$$

式中: Q_R 和 T 分别表示瑞利散射光强度和绝对温度; T_F 和 ρ 分别表示假设温度与材料密度; V_A 和 D_T 分别表示声学声子的速率和等温压缩率。

检测布里渊散射光功率 $P_B(T, \varepsilon)$,需先归一化处理光纤固有损耗,一般情况下,采用同光纤瑞利散射光时域反射信息轨迹相对比的方式实施归一化处理^[10]。通过同时获取归一化处理后的 $P_B(T, \varepsilon)$ 与布里渊散射光频移 $\nu_B(T, \varepsilon)$,即可在同一时间获取温度与应变,它们之间具有线性相关性,公式描述如下:

$$\begin{bmatrix} \nu_B(T, \varepsilon) \\ P_B(T, \varepsilon) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\nu,T} & R_{\nu,\varepsilon} \\ R_{P,T} & R_{P,\varepsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial_T \\ \partial_\varepsilon \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $R_{v,T}$ 、 $R_{v,\varepsilon}$ 、 $R_{P,T}$ 和 $R_{P,\varepsilon}$ 均为标定的线性系数; ∂_T 和 ∂_ε 分别表示光纤的温度波动值与应变量。

通过 $R_{v,T}$ 、 $R_{v,\varepsilon}$ 、 $R_{P,T}$ 和 $R_{P,\varepsilon}$ 求解式(2), 能够得到:

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{|R_{P,\varepsilon}|\Delta v_B + |R_{v,\varepsilon}|\Delta P_B}{|R_{P,T}R_{v,\varepsilon} - R_{P,\varepsilon}R_{v,T}|} \\ \Delta \varepsilon = \frac{|R_{P,T}|\Delta v_B + |R_{v,T}|\Delta P_B}{|R_{P,T}R_{v,\varepsilon} - R_{P,\varepsilon}R_{v,T}|} \end{cases} \quad (3)$$

式中 Δv_B 和 ΔP_B 分别表示布里渊散射光频移和功率变化。

将光纤植入到碳纤维导线线芯内部, 当碳纤维导线内部出现微裂纹等缺陷时, 可分为两大类^[11]: 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, 其形变量将大于其他完好区段, 光纤也将出现一个较大的形变点, 进而造成光纤频率出现突变。运行工况(如覆冰、振动、防振锤、异物搭接等)作用于导线上时, 在导线上同样形成局部的应力集中点, 其也会引起光纤频率的改变, 与隐蔽性缺陷相似。但是运行工况引起的光纤频率变化的时间和空间分布特征, 与隐蔽性缺陷存在本质区别, 因此, 采用光时域反射技术(optical time domain reflectometry, OTDR)对信号的时空特征进行区分, 实现多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测。

1.3 基于光时域反射技术的光纤损耗确定

采用光时域反射技术确定多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测过程中的光纤损耗, 是当前最普遍且最有效的方法之一, 通过该方法能够准确获取多股碳纤维复合芯导线局部至内部不同接头点的实际传输距离, 可有效提升多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测的准确度。

光时域反射技术是通过发射光脉冲到光纤内, 然后在光时域反射仪端口接收返回的信息^[12-13]。当光脉冲在多股碳纤维复合芯导线中的光纤内传输时, 会由于光纤本身的性质、连接器、接合点、弯曲或其他类似的事件而产生散射、反射, 其中一部分的散射和反射就会返回到光时域反射仪中。返回的有用信息由光时域反射仪的探测器进行测量, 作为多股碳纤维复合芯导线中光纤不同位置上的时间或曲线片段。从发射信号到返回信号所用的时间, 确定光在玻璃物质中的速度, 就可以计

算出距离:

$$d = \frac{c \times t}{2} R_{\text{IOR}} \quad (4)$$

式中: c 和 t 分别表示光在真空中的速度和信号发射后到接收到信号(双程)的总时间(两值相乘除以2后就是单程的距离); R_{IOR} 表示光纤折射率。

利用光时域反射技术描述光纤特征时, 主要依据为瑞利散射与菲涅尔反射^[14-16]。前者主要是光信号依照光纤产生不规则的散射而形成一条向下的曲线, 其能够体现背向散射的功率持续下降, 产生这种现象的主要原因是光信号经过相应距离的传输后, 发射和背向散射的信号均产生一定损耗^[17-20]; 后者作为离散的反射, 是由整条光纤内个别点导致的, 这些点会产生显著的背向散射光被反射回来。所以, 光时域反射技术就是利用菲涅尔反射的信息来定位连接点^[20-23]、光纤终端或断点。

通过布里渊光时域反射技术与光时域反射技术两种光纤信号解调原理, 可以测试碳纤维导线发生线芯微裂纹及断裂后对光纤损耗、温度、应变等参量的影响。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, 采用人工神经网络对信号进行区分。

1.4 基于人工神经网络的隐蔽性缺陷检测

多层前馈模型是一种常见的神经网络模型, 也被称为多层感知机(multilayer perceptron, MLP)。该模型由多个神经元组成, 每个神经元接收来自上一层神经元的信号, 并将其加权求和, 再通过激活函数进行非线性变换, 最终输出到下一层神经元或最终的输出层。输入层接收原始数据, 隐藏层对原始数据进行特征提取和转换, 输出层进行最终的预测或分类。在训练多层前馈模型时, 通常采用反向传播算法, 即从输出层开始, 计算误差并沿着网络反向传播, 根据误差调整每个神经元的权值和偏置, 以使得模型能够更准确地进行预测或分类。因此, 选用多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测的人工神经网络, 是一个包含一个输入层、一个隐含层与一个输出层的多层前馈模型。将布里渊光时域反射技术与光时域反射技术所获取的光纤温度、应变与损耗等信号特征量作为神经网络的输入, 以 N 、 L 和 M 分别表示3个模型3层中的节点数量, ϕ_j 和 ξ_j 分别表示隐含层的节点阈值与节点输出, φ_k 和 y_k 分别表示输出层的节点阈值与节点输出, 公式描述如下:

$$\begin{cases} \xi_j = f\left(\sum_{i=1}^N w_{ij}x_i - \phi_j\right) & j = 1, 2, \dots, L \\ y_k = f\left(\sum_{j=1}^L w_{jk}\xi_j - \varphi_k\right) & k = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_i 表示输入层输入; f 表示 Sigmoid 函数, 其公式描述如下:

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (6)$$

如将阈值划为权系数, 也就是令 $w_{(N+1)}^{(1)} = \phi_j$, $w_{(L+1)k}^{(2)} = \varphi_k$, 同时令 $x_{N+1} = \xi_{L+1} = -1$, 由此能够得到:

$$\begin{cases} \xi_j = f\left(\sum_{i=1}^{N+1} w_{ij}^{(1)} x_i\right) \\ y_k = f\left(\sum_{j=1}^{L+1} w_{jk}^{(2)} \xi_j\right) \end{cases} \quad (7)$$

神经网络训练过程中选用误差反向传播方法。以 $p(p=1, 2, \dots, q)$ 和 S_{pk} 分别表示训练样本和其期望输出, y_{pk} 和 $\lambda_{pk} = (S_{pk} - y_{pk})$ 分别表示实际输出与 2 种输出间的误差, 则利用式 (8) 能够描述不同输出误差的平方和:

$$E_p = \sum_{k=1}^M \lambda_{pk}^2 \quad (8)$$

经由变换神经网络模型内不同加权系数能够令 E_p 最大限度地降低, 依照最陡下降算法, 同时利用惯性优化策略, 能够获取不同权重系数的调整量, 公式描述如下:

$$\begin{cases} \Delta w_{ij}^{(1)}(t+1) = \eta \sum_{p=1}^q \left[\sum_{k=1}^M [(S_{pk} - y_{pk}) y_{pk} (1 - y_{pk}) w_{jk}^{(2)} \xi_{pj} (1 - \xi_{pk})] x_{pi} + \sigma \Delta w_{ij}^{(1)}(t) \right] \\ \Delta w_{ij}^{(2)}(t+1) = \eta \sum_{p=1}^q (S_{pk} - y_{pk}) y_{pk} (1 - y_{pk}) \xi_{pj} + \sigma \Delta w_{ij}^{(2)}(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: η 和 σ 分别表示学习步幅和惯性系数; t 和 $t+1$ 表示学习过程的时序编号。

由于初始权值的生成具有随机性, 由此造成期望输出与实际输出间必然产生误差, 神经网络模型经由持续学习训练样本, 优化权值, 由此逐渐降低误差, 在误差满足设定阈值的条件下, 神经网络模型终止学习过程。确定完成训练的神经网络模型内不同权系数, 由此令模型能够有效识别输入的光纤温度、应变与损耗等参数, 实现多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测的目的。

2 实验结果

为验证本文研究的基于光纤传感技术的多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测方法在实际缺陷检测中的应用效果, 选取 JLRX/F1B-360/40 型号的碳纤维复合芯导线为研究对象, 其相关参数如表 1 所示。此次实验采用光纤传感器型号为 G657, 是一种低弯曲损耗单模光纤, 具有较高的抗张力能力和弯曲半径, 适用于需要在有限空间内安装或弯曲的应用场景。该型号的光纤设计使其能够更好地抵抗损坏、断裂或串扰等问题, 以确保光信号传输的可靠性。

表 1 研究对象相关参数

Table 1 Related parameters of research objects	
导线型号	JLRX/F1B-360/40
导线名称	碳纤维复合芯铝绞线
对比条件	与原导线等重量
导线结构	铝: 2层18股 复合芯: 1×7.0
导线截面(mm ²)	铝: 360.7 复合芯: 38.48 总: 399.2
导电率IACS(%)	63
导线外径/mm	23.30
导线单重/(kg·km ⁻¹)	1 064.6
计算拉力/N	101 584
弹性模量/GPa	64(80 ℃ 以内) 122(80 ℃ 以上)
线膨胀系数/(10 ⁻⁶ /℃)	13.1(80 ℃ 以内) 1.7(80 ℃ 以上)
20 ℃ 时直流电阻/(Ω·km ⁻¹)	0.0774
长期工作温度/℃	160
短时间最高工作温度/℃	180

采用本文方法对研究对象进行隐蔽性缺陷检测, 图 1 所示为缺陷检测示意图。图 2 所示为缺陷检测装置图, 检测过程以及所得结果如下。

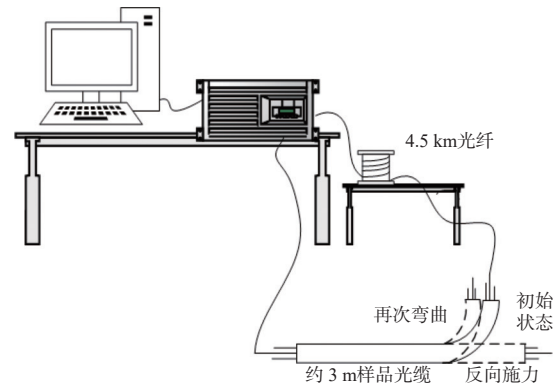


图 1 缺陷检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of defects detection



图2 缺陷检测装置图

Fig. 2 Device drawing of defects detection

2.1 温度检测

采用本文方法获取研究对象温度参数过程中,需先实施温度-频率标定,由此确定研究对象运行过程中的频率波动与温度波动间的相关性。选取一段 60 m 长的研究对象,标定过程中设定标准环境温度为 25.5 °C,在研究对象上每隔 10 m 设定一个检测点,变换覆冰室内温度,获取 5 个不同检测点的测量频率,结果如表 2 所示。

表 2 温度—频率标定测试数据

Table 2 Test data of temperature-frequency calibration

序号	覆冰室内温度/°C	测量频率/MHz				
		检测点1	检测点2	检测点3	检测点4	检测点5
1	25.5	422.9	422.0	422.1	423.7	422.8
2	19.0	416.6	417.1	417.3	414.4	415.9
3	14.5	410.0	412.5	410.7	411.5	410.4
4	10.0	403.8	403.6	405.6	404.8	405.0
5	5.5	398.5	398.4	400.1	398.7	399.2
6	1.0	390.1	392.3	391.0	391.0	391.4
7	-5.5	383.0	382.5	383.0	384.1	384.4
8	-10.0	376.3	377.0	376.9	375.9	376.2
9	-14.5	371.0	370.9	370.7	370.3	370.6
10	-19.0	362.8	364.6	364.7	364.4	364.0

根据表 2 内的测试数据,确定不同覆冰室内温度条件下的布里渊频移 $\Delta\nu_B$,所得结果如图 3 所示。

分析图 3 能够得到, $\Delta\nu_B$ 同覆冰室内温度之间表现出较好的线性相关性,两者间的相关系数达到 0.980。覆冰室内温度每变化 1 °C, $\Delta\nu_B$ 达到 1.28 MHz。依据图 2 所示的线性相关性,即可依照 $\Delta\nu_B$ 量获取研究对象相对标准温度的测量温度。

2.2 应力检测

采用本文方法分别获取研究对象非故障条件下,与内部 3 根碳棒断裂条件下的应力变化结果,所得结果如图 4 所示。

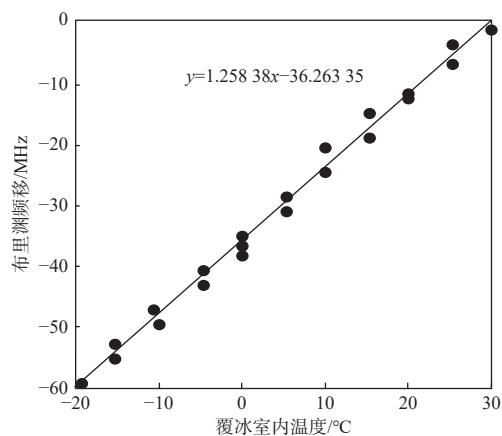
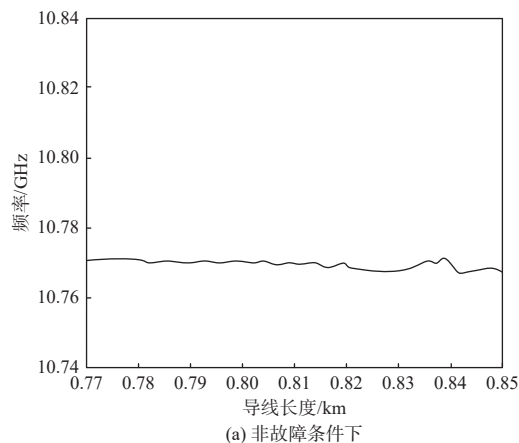
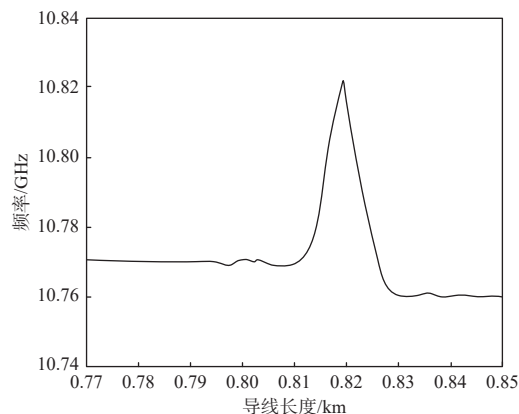


图3 布里渊频移同温度间的相关性

Fig. 3 Correlation between Brillouin frequency shift and temperature



(a) 非故障条件下



(b) 内部 3 根碳棒断裂条件下

图4 应力检测结果

Fig. 4 Stress detection results

分析图 4 得到,研究对象在非故障条件下,应力保持稳定状态,持续处于 10.77 GHz 左右;研究对象内部 3 根碳棒断裂条件下,应力产生显著波动,在断裂区域整体出现抬升趋势,抬升幅度达到 0.05 GHz 左右。

2.3 损耗检测

采用本文方法分别获取研究对象非故障条件下的损耗变化结果, 所得结果如表 3 所示。

表 3 研究对象非故障条件下的损耗变化结果

Table 3 Results of loss changes of research objects under non-fault conditions

检测点编号	损耗/dB	
	非故障条件下	内部3根碳棒断裂条件下
检测点1	0.30	0.35
检测点2	0.10	0.53
检测点3	0.15	0.94
检测点4	0.12	0.87
检测点5	0.26	0.49

从表 3 中可以看出, 在非故障条件下与内部 3 根碳棒断裂条件下, 5 个检测点的损耗出现了明显的差距。非故障条件下的损耗明显低于内部 3 根碳棒断裂条件下。

2.4 缺陷检测结果

将本文方法所获取的温度、应力以及损耗等参数输入神经网络模型内, 训练模型。利用训练好的模型检测研究对象隐蔽性缺陷, 所得结果如表 4 所示。

表 4 缺陷检测结果

Table 4 Results of defects detection

研究对象编号	检测结果		与实际情况是否一致
	是否产生缺陷	缺陷情况	
1	否	-	一致
2	是	两股导线产生微裂纹	一致
3	是	一股导线断裂	一致
4	是	一股导线产生微裂纹	一致
5	否	-	一致
6	否	-	一致
7	是	两股导线断裂	一致
8	是	两股导线产生微裂纹, 两股导线产生微裂纹, 两股导线断裂	一致
9	否	-	一致
10	是	两股导线产生微裂纹	一致

分析表 4 得到, 采用本文方法能够有效检测研究对象是否产生隐蔽性缺陷, 且对缺陷的检测结果与实际情况基本一致, 由此说明本文方法具有较好的实际应用效果, 值得推广使用。

3 结论

本文研究基于光纤传感技术的多股碳纤维复

合芯导线隐蔽性缺陷检测方法, 可以得到以下结论:

1) 提出了一种基于光纤传感技术的多股碳纤维复合芯导线隐蔽性缺陷检测方法, 填补了该领域的研究空白;

2) 首次揭示了运行工况作用下碳纤维导线内部光纤信号的变化规律, 为后续该领域的研究提供了重要的实验数据;

3) 设计了人工神经网络模型, 通过光纤信号的学习与训练实现了碳纤维导线隐蔽性缺陷的快速准确检测, 为该领域的研究提供了实用性的解决方案;

4) 该研究结果可为电力设备的安全运行提供技术支持, 具有重要的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 李清, 傅范平, 张博, 等. 有限角CT法检测碳纤维复合芯导线内部缺陷[J]. 核电子学与探测技术, 2021, 41(3): 392-396.
LI Qing, FU Fanping, ZHANG Bo, et al. Limited-angle CT method for detecting internal defects of aluminum conductor composite core[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2021, 41(3): 392-396.
- [2] 万建成, 宋泽明, 黄强, 等. X射线无损检测技术在碳纤维芯导线压接中的应用研究[J]. 中国体视学与图像分析, 2020, 25(3): 242-251.
WAN Jiancheng, SONG Zeming, HUANG Qiang, et al. Application of X-ray nondestructive testing in crimping carbon fiber conductor[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2020, 25(3): 242-251.
- [3] 周仿荣, 张辉, 者梅林, 等. 一种基于数据增强增广和神经网络的输电导线及其缺陷检测方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 131-142.
ZHOU Fangrong, ZHANG Hui, ZHE Meilin, et al. A power transmission line and its defect detection method based on data enhancement, augmentation and neural network[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 131-142.
- [4] 冀建宇, 王容, 吴奇, 等. 基于相移光纤光栅传感器的碳纤维增强树脂复合材料基体裂纹超声探伤[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 113-120.
JI Jianyu, WANG Rong, WU Qi, et al. Ultrasonic damage detection of matrix cracks in carbon fiber reinforced polymer composites using phase-shifted fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1):

- 113-120.
- [5] 吕中宾, 田忠建, 刘光辉, 等. 直线扫描CT检测碳纤维复合芯导线缺陷研究[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(5): 95-103.
- LYU Zhongbin, TIAN Zhongjian, LIU Guanghui, et al. Inspecting defects of ACCC by linear scanning CT[J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(5): 95-103.
- [6] 赵勇军, 廖圣, 杨万锐, 等. 一起基于声学及红外成像检测技术的配电网架空绝缘导线缺陷案例分析[J]. *电气技术*, 2022, 23(12): 95-99.
- ZHAO Yongjun, LIAO Sheng, YANG Wanrui, et al. Analysis of a case of defect of overhead insulated conductors in distribution network based on acoustic and infrared imaging detection technology[J]. *Electrical Engineering*, 2022, 23(12): 95-99.
- [7] 陈大兵, 魏寒来, 胡铁宁, 等. 碳纤维复合芯导线X射线图像标准化增强与缺陷检测方法[J]. *数据采集与处理*, 2020, 35(4): 739-744.
- CHEN Dabing, WEI Hanlai, HU Yining, et al. Tandardized enhancement and detection of defects in X-ray images of carbon fiber composite core wires[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2020, 35(4): 739-744.
- [8] 蔡永军, 杨士梅, 李妍, 等. 基于光纤传感的管道线路复杂状态监测技术[J]. *油气储运*, 2020, 39(4): 434-440.
- CAI Yongjun, YANG Shimei, LI Yan, et al. Monitoring technology for complex state of pipeline route based on optical fiber sensing[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(4): 434-440.
- [9] 宋敏毓, 陈力荣, 梁建安, 等. 轻量化改进网络的实时光纤端面缺陷检测模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(24): 201-211.
- SONG Minyu, CHEN Lirong, LIANG Jianan, et al. Real-time optical fiber end surface defects detection model based on lightweight improved network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(24): 201-211.
- [10] 桂鑫, 李政颖, 王洪海, 等. 基于大规模光栅阵列光纤的分布式传感技术及应用综述[J]. *应用科学学报*, 2021, 39(5): 747-776.
- GUI Xin, LI Zhengying, WANG Honghai, et al. Review of distributed optical fiber sensing technology and application based on large-scale grating array fiber[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2021, 39(5): 747-776.
- [11] 张中流, 何宁, 何斌, 等. 基于分布式光纤传感技术的结构受力测量新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9): 45-55.
- ZHANG Zhongliu, HE Ning, HE Bin, et al. New method to measure structure stress based on distributed optical fiber technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9): 45-55.
- [12] 马加骁, 王永洪, 张明义, 等. 基于光纤布拉格光栅传感技术的开口管桩贯入特性实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 128-134.
- MA Jiaxiao, WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, et al. Experimental study on penetration characteristics of open pipe pile based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 128-134.
- [13] 胡杨, 郭通达, 龙万学, 等. 基于BOTDA分布式光纤传感技术的双排圆形桩变形特性及内力研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(5): 692-699.
- HU Yang, GUO Tongda, LONG Wanxue, et al. Research on deformation characteristics and internal forces of double-row circular piles based on BOTDA distributed optical fiber sensing technology[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition)*, 2021, 53(5): 692-699.
- [14] 吴自强, 范伟松, 斯荣. 应用单芯单模光纤的电缆沟多参量分布式光纤传感系统[J]. *电子设计工程*, 2021, 29(4): 29-32.
- WU Ziqiang, FAN Weisong, SI Rong. Cable ditch multi-parameter distributed optical fiber sensing system using single-core single-mode optical fiber[J]. *Electronic Design Engineering*, 2021, 29(4): 29-32.
- [15] 黄新波, 章小玲, 张烨, 等. 基于径向基概率神经网络的输电导线缺陷状态识别[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(3): 201-210.
- HUANG Xinbo, ZHANG Xiaoling, ZHANG Ye, et al. State identification of transmission line defect based on radial basis probabilistic neural network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(3): 201-210.
- [16] JIANG S, LU X, WANG H, et al. Simulation and experimental study of remote field current testing for hidden defects of aluminum alloy plate with damping coating[J]. *Sensor Review*, 2022, 42(2): 365-376.
- [17] MATHIVANAN D, LAN C W, CHANG H. In-line detection of defects in steel pipes using flexible GMR sensor array[J]. *Journal of King Saud University - Science*, 2021, 34(2): 1017-1025.
- [18] 葛进, 程小劲, 尚建华. 基于激光热弹效应的碳纤维增强树脂复合材料缺陷检测机理研究[J]. *光电子·激光*,

- 2022, 33(1): 83-90.
- GE Jin, CHENG Xiaojin, SHANG Jianhua. Study of defect detection mechanism of carbon fiber reinforced polymer based on laser thermoelastic effect[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2022, 33(1): 83-90.
- [19] 李红利, 李硕, 修春波, 等. 基于电磁式阵列传感器的平纹编织碳纤维复合材料检测方法[J]. *天津工业大学学报*, 2022, 41(3): 48-54.
- LI Honghong, LI Shuo, XIU Chunbo, et al. Detection method of plain weave carbon fiber reinforced plastics based on array electromagnetic sensor[J]. *Journal of Tiangong University*, 2022, 41(3): 48-54.
- [20] 陈丛茂, 周虹, 蒿宝乾, 等. 碳纤维材料表面缺陷无损检测仿真[J]. *电子测试*, 2021, 23(21): 101-104.
- CHEN Congmao, ZHOU Hong, HAO Baoqian, et al. Nondestructive testing simulation for surface defects of carbon fiber materials[J]. *Electronic Test*, 2021, 23(21): 101-104.
- [21] 田勔, 王丽萍, 张勇, 等. 轨道车辆车体用碳纤维复合材料超声波检测试验研究[J]. *铁道车辆*, 2021, 59(6): 90-96.
- TIAN Meng, WANG Liping, ZHANG Yong, et al. Research on ultrasonic detection testing of CFRP for railway car-body[J]. *Rolling Stock*, 2021, 59(6): 90-96.
- [22] 胡业发, 孟由, 张锦光, 等. 含夹杂缺陷碳纤维复合材料层压板的无损检测与评估研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2023, 11(2): 94-100.
- HU Yefa, MENG You, ZHANG Jinguang, et al. Nondestructive testing and evaluation of carbon fiber reinforced polymer laminates with inclusions[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023, 11(2): 94-100.
- [23] 张全利, 曾加恒, 杨振, 等. 碳纤维复合材料缺陷的超声检测及材料力学性能仿真研究[J]. *机械制造与自动化*, 2022, 51(1): 136-141.
- ZHANG Quanli, ZENG Jiaheng, YANG Zhen, et al. Ultrasonic detection of defects and simulation of mechanical properties for carbon fiber composites[J]. *Machine Building & Automation*, 2022, 51(1): 136-141.