

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306355

基于高精度温度传感器的多股碳纤维导线 潜伏性缺陷检测方法^{*}

刘 杰¹ 夏彦卫¹ 贾伯岩¹ 吴国强² 殷庆栋¹

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

摘 要:为提升多股碳纤维导线的质量,研究基于高精度温度传感器的多股碳纤维导线潜伏性缺陷检测方法。利用布里渊光时域反射技术设计高精度温度传感器,并将单根光纤植入多股碳纤维导线中,通过注入窄谱光源来实现温度采集。采用外差检测法对窄谱光源进行处理,获取多股碳纤维导线的温度采集结果。采用平均处理方法滤除温度数据内部的噪声。基于滤波后的温度数据,建立多股碳纤维导线的温度场逆问题模型,并利用牛顿迭代法对模型进行求解,从而得到多股碳纤维导线的热导率。实验证明,该方法能够有效地采集多股碳纤维导线的温度,并成功滤除 99% 的内部噪声。检测无缺陷多股碳纤维导线的热导率是 235 W/m·k,基于此,该方法也能够根据与无缺陷导线的热导率的差异有效地检测导线的潜伏性缺陷。值得注意的是,当导线的负荷电流增加时,该方法的潜伏性缺陷检测效果更佳。

关键词:高精度;传感器;多股碳纤维;潜伏性;缺陷检测;布里渊

中图分类号: TP391.7;S951.4⁺1;V242.4⁺1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Method for detecting latent defects in multi strand carbon fiber conductors based on high precision temperature sensors

Liu Jie¹ Xia Yanwei¹ Jia Boyan¹ Wu Guoqiang² Yin Qingdong¹

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

Abstract: To improve the quality of multi-strand carbon fiber wires, a method for detecting latent defects in multi-strand carbon fiber wires based on high-precision temperature sensors is studied. Design a high-precision temperature sensor using Brillouin optical time-domain reflection technology, and implant a single fiber into multiple carbon fiber wires to achieve temperature collection by injecting a narrow spectral light source. Using heterodyne detection method to process narrow-spectrum light sources and obtain temperature collection results of multi-strand carbon fiber wires. Using an average processing method to filter out internal noise in temperature data. Based on the filtered temperature data, the inverse problem model of the temperature field of the multi strand carbon fiber conductor is established, and the Newton Iterative method is used to solve the model, so as to obtain the thermal conductivity of the multi strand carbon fiber conductor. Experiments have shown that this method can effectively collect the temperature of multiple carbon fiber wires and successfully filter out 99% of internal noise. The thermal conductivity of detecting defect free multi stranded carbon fiber wires is 235 W/m·k. Based on this, this method can also effectively detect latent defects in wires based on the difference in thermal conductivity compared to defect free wires. It is worth noting that the method performs better in detecting latent defects when the load current of the wire increases.

Keywords: high-precision; sensor; multi-strand carbon fiber; latency; defect detection; Brillouin

0 引言

多股碳纤维导线的纤芯由碳纤维浸渍树脂制成,其本身的伸长率较低,弯曲半径受限,不能锐角弯折^[1]。因此,在碳纤维导线工程中,施工人员需要使用专用工具并接受相应的技术培训。然而,在一些工程中,施工人员会对导线进行大角度弯折^[2],导致多股碳纤维导线的纤芯在投运前就已经受到破坏,出现了芯棒劈裂和折断等潜伏性缺陷^[3]。在导线投入运行后,这些潜伏性缺陷会在导线重力、风载荷等的共同作用下迅速发展,导致跳线断线故障^[4]。因此,有必要在多股碳纤维导线投入使用前对潜伏性缺陷进行高精度检测。

为解决多股碳纤维导线的断线问题,需研究多股碳纤维导线潜伏性缺陷的检测方法。陈大兵等^[5]先对多股碳纤维导线的 X 射线图像,展开图像成像标准化处理,再通过深度卷积神经网络,依据标准化处理后的导线 X 射线图像,得到多股碳纤维导线潜伏性缺陷检测结果。该方法可快速自动检测多股碳纤维导线的潜伏性缺陷。吕中宾等^[6]通过射线源探测器扫描多股碳纤维导线,根据扫描结果,建立直线扫描 CT 模型,完成多股碳纤维导线的潜伏性缺陷检测。该方法的导线成像效果较优,可有效检测多股碳纤维导线潜伏性缺陷。国外有学者研究了相关方法。如文献[7]提出利用气动机械、能量采集、人工智能故障检测算法,实现自主电力线检查任务。文献[8]提出设计涡流探头检测碳纤维导线的分层损伤。探头采用最佳线圈配置,使涡流垂直于纤维流动,对横向电导率变化敏感,实现高质量的分层损伤检测。

但多股碳纤维导线线芯是复合材料,X 光与射线源发射的光在其内部衰减过快,成像效果较差,即使上述方法对所拍摄的射线图像进行处理后,对潜伏性缺陷的检出率仍然不高,且造价昂贵,仅在部分线路进行试用,未大范围推广。

高精度温度传感器可精准采集导线的温度,准确呈现导线的温度场分布情况,并根据温度场分布情况,检测导线的潜伏性缺陷,提升潜伏性缺陷检测效果。为此,研究基于高精度温度传感器的多股碳纤维导线潜伏性缺陷检测方法,及时发现导线的潜伏性缺陷,提升导线运行的安全可靠。

1 多股碳纤维导线潜伏性缺陷检测方法

多股碳纤维导线的潜伏性缺陷检测方法的整体思路如下:

1) 设计高精度温度传感器:利用布里渊光时域反射技术,将单根光纤植入多股碳纤维导线中,并在光纤中注

入窄谱光源。这样可以通过测量光纤中的温度变化来获取多股碳纤维导线的温度信息。

2) 外差检测法处理窄谱光源:通过外差检测法,将窄谱光源的信号与参考信号进行混频,得到多股碳纤维导线中的温度采集结果。

3) 平均处理方法滤除温度数据内部噪声:为了减少温度数据中的噪声干扰,可以采用平均处理方法对数据进行滤波处理,提高温度采集结果的精度和稳定性。

4) 建立多股碳纤维导线的温度场逆问题模型:根据滤波后的温度数据,可以建立多股碳纤维导线的温度场逆问题模型。该模型可以描述导线内部的温度分布情况。

5) 利用牛顿迭代法求解模型:采用牛顿迭代法对温度场逆问题模型进行求解,从而得到多股碳纤维导线的热导率。通过对比分析求解的热导率与无缺陷导线的热导率,可以检测出多股碳纤维导线中的潜伏性缺陷。

该方法通过利用布里渊光时域反射技术和外差检测法获取多股碳纤维导线的温度信息,并通过平均处理方法滤除噪声,建立温度场逆问题模型,再利用牛顿迭代法求解模型,最终实现对多股碳纤维导线潜伏性缺陷的检测。

1.1 基于布里渊光时域反射技术的高精度温度传感器

利用布里渊光时域反射技术,设计高精度温度传感器,在整个多股碳纤维导线内植入单根光纤,通过设计的高精度温度传感器,采集多股碳纤维导线的温度。当多股碳纤维导线存在潜伏性碳棒劈裂与折痕缺陷,该位置的温度与附近正常位置的温度会存在差异^[9],由此可以检测多股碳纤维导线的潜伏性缺陷。利用布里渊光时域反射技术,设计的高精度温度传感器结构如图 1 所示。

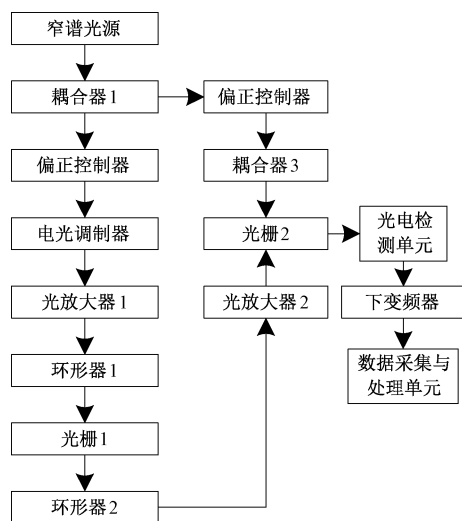


图 1 高精度温度传感器结构

Fig. 1 High-precision temperature sensor structure

1.2 导线内植入光纤温度采集的外差检测方法

利用外差检测法能够获取信号光的全部信息,利用高精度温度传感器中,光电检测单元融合背向散射光与参考光后,可获取两种光混频后的中频信号^[10-12],该信号内包含调制信号的全部特征,为此,通过外差检测法,解调中频信号便可获取布里渊频移信号。通过数据采集与处理单元,分析与处理低频率的布里渊频移信号,便可得到多股碳纤维导线的温度采集结果^[13]。

经过外差检测法^[14]得到的布里渊频移为:

$$\beta = \frac{2nV}{\lambda} = \frac{2n}{\lambda} \sqrt{\frac{(1-h)M}{(1+h)(1-2h)\rho}} \quad (1)$$

其中, n 为光纤纤芯折射率; V 为光纤声速; λ 为光源中心波长; h 为光纤泊松比; M 为杨氏模量; ρ 为密度。

多股碳纤维导线的温度 T 的公式如下:

$$T = \beta(T_0, 0) + C_T T_0 \quad (2)$$

其中, T_0 为多股碳纤维内植入的光纤初始温度; C_T 为 β 的温度系数。依据 β 可获取沿多股碳纤维导线分布的光纤温度信息。

多股碳纤维内植入的光纤中形成的瑞利散射光功率 P_R 、布里渊散射光功率 P_S 与斯托克斯光功率 P_B 为:

$$\begin{cases} P_R = \frac{P_0 c W e^{-2\mu g}}{3\lambda^2 D^2} \pi^2 n^5 p^2 k \theta_{\hat{T}} = \frac{\bar{I} R_L c W e^{-2\mu g}}{3\lambda^2 D^2} \pi^2 n^5 p^2 k \theta_{\hat{T}} \\ P_S = \frac{P_0 c W e^{-2\mu g}}{3\rho\lambda^2 D^2 V^2} \pi^2 n^5 p^2 k T_0 = \frac{\bar{I} R_L c W e^{-2\mu g}}{3\rho\lambda^2 D^2 V^2} \pi^2 n^5 p^2 k T \\ P_B = 2P_{RS} = 2P_{RS} P_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, c 为光速; P_0 为光电检测单元输出的功率; W 为光脉冲宽度; μ 为光纤衰减系数; D 为光纤有效面积; g 为散射点至始端的距离; R_L 为负载电阻; k 为玻尔兹曼常量; $\hat{T}$ 为理想温度; $\theta_{\hat{T}}$ 为压缩率; p 为光弹常量; P_{RS} 为外差信号功率。

C_T 的计算公式如下:

$$C_T = \frac{d(2P_R P_S P_B)}{2P_R P_S P_B dT_0} = \frac{1}{P_S} \cdot \frac{dP_S}{dT_0} + \frac{1}{P_R} \cdot \frac{dP_R}{dT_0} + \frac{1}{P_B} \cdot \frac{dP_B}{dT_0} \quad (4)$$

高精度温度传感器内数据采集与处理单元中,利用平均处理方法,滤除多股碳纤维导线温度采集结果内的噪声。

避免采集的温度信息淹没在噪声中,令采集的温度值与实际温度值无限接近^[15]。若采集的多股碳纤维导线温度经过 η 次反复测量叠加,那么经过平均处理后的温度为 $\sqrt{\eta} \cdot T(t)$ 。

1.3 基于温度场逆问题的潜伏性缺陷检测方法

热导率是指材料传导热量的能力,它反映了材料在

温度变化下传热的特性。对于多股碳纤维导线而言,正常情况下,其热导率是已知的,并且可以通过实验或理论计算得到。

对于多股碳纤维导线的主要潜伏性缺陷,芯棒劈裂和折断都可能导致热导率的降低。具体来说,这是因为这两种缺陷会破坏导线内部的结构完整性,影响热量在导线中的传导,引起局部温度异常,导致热量在该区域的传导速率发生变化。因此,通过求解多股碳纤维导线的热导率,可以间接地获取导线内部的温度场分布情况,从而判断是否存在潜伏性缺陷。

依据高精度传感器采集的多股碳纤维导线温度 T , 可获取多股碳纤维导线的温度场分布 T_q ^[16]。在已知和多股碳纤维导线载流量时,可建立多股碳纤维导线的温度场逆问题,通过求解温度场逆问题,可获取多股碳纤维导线场域的热导率分布 ξ 。当多股碳纤维导线存在潜伏性缺陷时,具有潜伏性缺陷处的 ξ 与无缺陷处的 ξ 存在差异,即多股碳纤维导线有无缺陷时的温度场分布情况也不同^[17]。为此,根据高精度传感器采集的多股碳纤维导线温度,得到多股碳纤维的温度场分布 T_q ,并根据 T_q 与载流量数据,反推获取多股碳纤维导线的 ξ ,并和无缺陷多股碳纤维导线的 ξ 实施对比,完成多股碳纤维导线的潜伏性缺陷检测。

多股碳纤维导线的温度场逆问题模型为:

$$\min O(\xi) = \|T_q(\xi) - T\|^2 = \sum_{i=1}^N [T_{q,i}(\xi) - T_i]^2 \quad (5)$$

其中,整个多股碳纤维导线的温度场逆问题求解场域内包含的单元数量是 N ;第 i 个单元内多股碳纤维导线温度与温度场分布是 $T_i, T_{q,i}$; ξ 的误差函数是 $O(\xi)$ ^[18]。

式(5)属于非线性优化问题,其最佳解是一阶微分驻点,表达公式如下:

$$\frac{\partial O(\xi)}{\partial \xi_i} = \sum_{i=1}^N [T_{q,i}(\xi) - T_i] \frac{\partial T_{q,i}(\xi)}{\partial \xi_i} = 0 \quad (6)$$

$O(\xi)$ 对 ξ_i 的偏导数是 $F_i(\xi)$, 公式如下:

$$F_i(\xi) = \frac{\partial O(\xi)}{\partial \xi_i} = \sum_{i=1}^N [T_{q,i}(\xi) - T_i] \frac{\partial T_{q,i}(\xi)}{\partial \xi_i} = 0 \quad (7)$$

令整个多股碳纤维导线的温度场逆问题求解场域内包含 κ 个单元,那么温度场逆问题求解共包含 κ 个式(7)的方程^[19-20],由此,组建一组非线性方程组 $\mathbf{F}(\xi) = 0$ 。

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{F} = [F_1 F_2 \cdots F_{\kappa}] \\ \xi = [\xi_1 \xi_2 \cdots \xi_{\kappa}] \end{cases} \quad (8)$$

通过牛顿迭代法求解式(8),获取的迭代结果为:

$$\xi_{\tau+1} = \xi_{\tau} - [Y(\xi_{\tau})]^{-1} \cdot F(\xi_{\tau}) \tag{9}$$

其中, τ 为迭代次数; Y 为 $\hat{m} \times \hat{n}$ 的 Hessen 矩阵。

$Y(\xi_{\tau})$ 的计算公式如下:

$$Y_{\hat{m} \times \hat{n}}(\xi_{\tau}) = \frac{\partial F_{\hat{n}}(\xi)}{\partial \xi_{\hat{m}}} = \frac{\partial}{\partial \xi_{\hat{m}}} \left[\frac{\partial O(\xi_{\tau})}{\partial \xi_{\hat{n}}} \right] = \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_{q,i}(\xi_{\tau})}{\partial \xi_{\hat{n}}} \frac{\partial T_{q,i}(\xi_{\tau})}{\partial \xi_{\hat{m}}} + \sum_{i=1}^N [T_{q,i}(\xi_{\tau}) - T_i] \frac{\partial^2 T_{q,i}(\xi_{\tau})}{\partial \xi_{\hat{m}} \partial \xi_{\hat{n}}} \tag{10}$$

令无缺陷时,多股碳纤维导线的热导率是 $\hat{\xi}$; 当 $\xi < \hat{\xi}$ 时,说明多股碳纤维导线的热导率存在潜伏性缺陷, ξ 越低,说明多股碳纤维导线的潜伏性缺陷越严重。

2 实验分析

以某公司生产的 JLRX/F1B-315/40 (ACCC/TW-315/40) 型号多股碳纤维导线为实验对象,利用本文方法对该型号的多股碳纤维导线进行潜伏性缺陷检测,验证本文方法潜伏性缺陷检测的可行性。该公司生产的 LGJ-300/40JLRX/F1B-315/40 (ACCC/TW-315/40) 型号多股碳纤维导线的具体参数如表 1 所示。

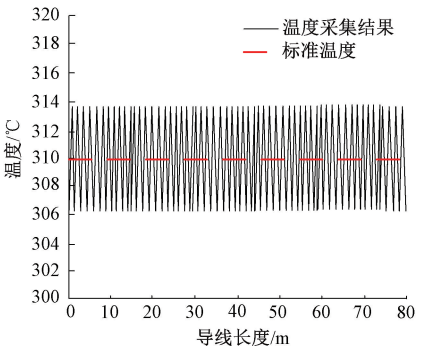
表 1 多股碳纤维导线的具体参数

Table 1 Specific parameters of multiple stranded carbon fiber wires

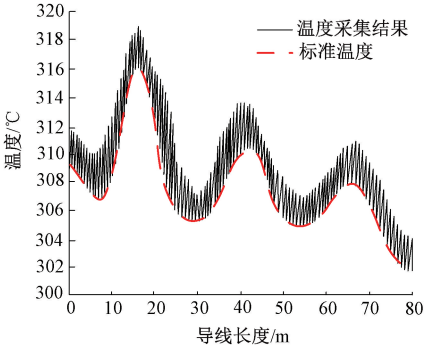
名称	碳纤维复合芯铝绞线
结构	铝:2 层 16 股
	复合芯:1×70
截面积/mm ²	铝:317.7
	复合芯:38.48
	总:356.2
导电率 IACS/%	63
外径/mm	22
单重 kg/km	946.1
拉力/N	99 106
弹性模量/GPa	65 (80 ℃ 以内)
	122 (80 ℃ 以上)

在该公司生产的多股碳纤维导线内,随机选择一根,其中一根无潜伏性缺陷,一根存在潜伏性缺陷,利用本文方法采集这两根多股碳纤维导线的温度,温度采集结果如图 2 所示。

根据图 2(a) 可知,对于无缺陷多股碳纤维导线,本文方法可有效采集其温度,本文方法采集的温度与标准温度相比,波动幅度较大,即包含较多的噪声。根据图 2(b) 可知,对于存在缺陷的多股碳纤维导线,本文方法也可有效采集其温度,与标准温度相比,波动幅度也较大,也包含较多的噪声。实验证明:对于有无缺陷的多股碳纤维导线,本文方法均可有效采集导线温度,但温度采



(a) 无缺陷多股碳纤维导线温度采集结果
(a) Temperature acquisition results of multi-defect carbon fiber wire



(b) 存在缺陷多股碳纤维导线温度采集结果
(b) Temperature acquisition result of defective multistranded carbon fiber wire

图 2 多股碳纤维导线温度采集结果

Fig. 2 Temperature acquisition results of multiple-stranded carbon fiber wires

集结果中包含大量噪声,无法为后续潜伏性缺陷检测提供有效的数据支持。为此,利用本文方法对采集的温度进行滤波处理,去除其内部噪声,以存在缺陷的多股碳纤维导线温度采集结果为例,温度数据的滤波结果如图 3 所示。

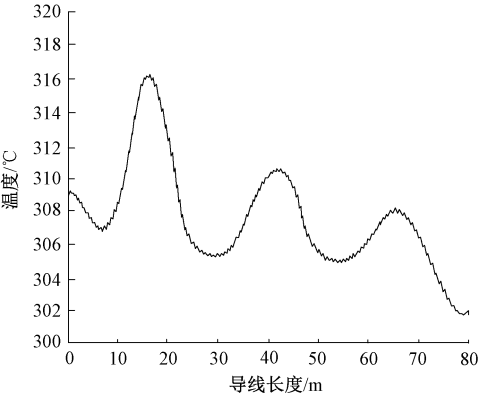


图 3 温度数据的滤波结果

Fig. 3 Filtering results for the temperature data

根据图 3 可知,本文方法可有效滤波处理多股碳纤

维导线的温度采集结果,去除其内部的大部分噪声,滤波后的温度数据,与标准温度非常接近,仅有微小的波动幅度。实验证明,本文方法可有效滤波处理采集的多股碳纤维导线温度数据,去除内部噪声。

搭建多物理场耦合模型对其进行温度场的分析计算,利用本文方法对这两根多股碳纤维导线进行潜伏性缺陷检测,无缺陷多股碳纤维导线的热导率是 $235 \text{ W/m} \cdot \text{k}$,多股碳纤维导线内部的热导率分布情况如图 4 所示。

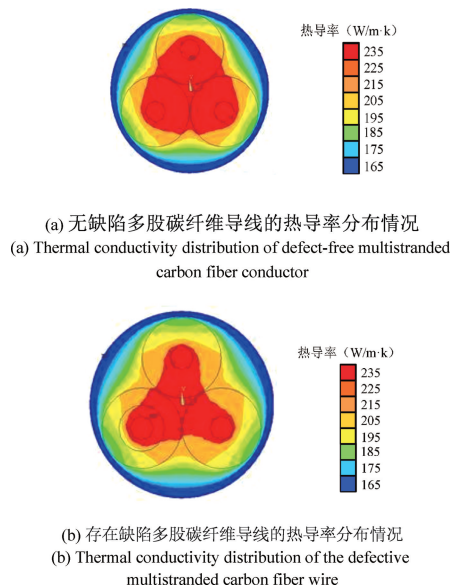


图 4 多股碳纤维导线的热导率分布情况
Fig. 4 Thermal conductivity distribution of multiple-stranded carbon fiber wires

根据图 4(a) 可知,本文方法可有效获取无缺陷多股碳纤维导线的热导率分布情况,整个多股碳纤维导线中心部分的热导率均为 $235 \text{ W/m} \cdot \text{k}$,无任何变化情况,说明该根导线无潜伏性缺陷,与实际情况相符。根据图 4(b) 可知,本文方法可有效获取存在缺陷多股碳纤维导线的热导率分布情况。该根导线中间部分区域的热导率低于 $235 \text{ W/m} \cdot \text{k}$,说明该区域存在潜伏性缺陷,与实际情况相符。实验证明,本文方法可精准检测多股碳纤维导线的潜伏性缺陷。

在该公司随机选择 2 根多股碳纤维导线,在导线内分别注入不同的负荷电流,这 2 根导线内均存在潜伏性缺陷,利用本文方法对这 2 根导线进行潜伏性缺陷检测,检测结果如图 5 所示。

分析图 5(a) 可知,当负荷电流为 10 A 时,本文方法可有效计算多股碳纤维导线的热导率,根据热导率分布情况可知,其中,中心区域的热导率均低于正常热导率,说明该根导线内存在潜伏性缺陷,与实际情况相符,但热导率的呈现结果并不明显。分析图 5(b) 可知,当负荷电流为 20 A 时,本文方法可有效计算多股碳纤维导线的热

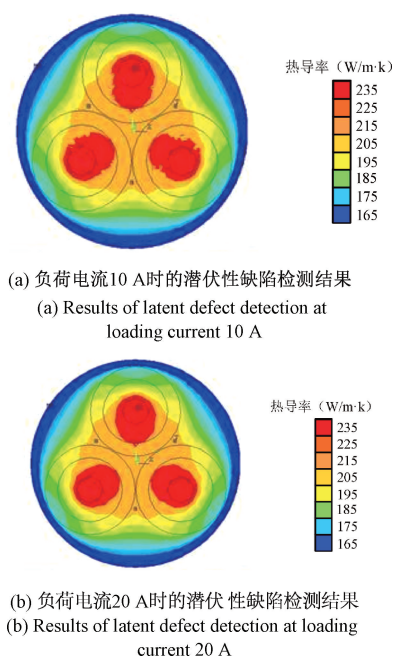


图 5 多股碳纤维导线潜伏性缺陷检测结果
Fig. 5 Detection results of latent defect in multiple stranded carbon fiber wires

导率,根据热导率分布情况可知,其中,中心区域的热导率均低于正常热导率,说明该根导线内存在中心区域的潜伏性缺陷,与实际情况相符,且热导率的显现结果清晰度较高。实验证明:对于存在不同程度潜伏性缺陷的导线来说,本文方法依旧能够精准检测出潜伏性缺陷,且注入导线的负荷电流越高,热导率的呈现结果越清晰,潜伏性缺陷检测效果越佳。

3 结 论

文章研究基于高精度温度传感器的多股碳纤维导线潜伏性缺陷检测方法。利用布里渊光时域反射技术和外差检测法,准确地采集多股碳纤维导线的温度,并通过平均处理方法去除噪声,提高了温度采集结果的可靠性。通过建立热导率的逆问题模型,并利用牛顿迭代法对模型进行求解,获得多股碳纤维导线的热导率信息,从而实现导线潜伏性缺陷的检测。实验证明,该方法具有良好的可行性和有效性,能够检测出导线潜伏性缺陷的存在。

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 Q, FU F P, ZHANG B, 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] 曾辉耀, 叶波, 张依仃, 等. 单向碳纤维复合材料分层缺陷垂直涡流检测有限元仿真研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(1): 45-50.
- ZENG H Y, YE B, ZHANG Y D, et al. Finite element analysis of delamination in unidirectional carbon fiber reinforced polymer by vertical eddy current method [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33 (1): 45-50.
- [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 F R, ZHANG H, ZHE M L, 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] 朱笑, 袁丽华. 基于红外热成像的 CFRP 复合材料低速冲击损伤表征[J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 4164-4171.
- ZHU X, YUAN L H. Low-velocity impact damage characterization of CFRP composite based on infrared thermography [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39 (8): 4164-4171.
- [5] 陈大兵, 魏寒来, 胡轶宁, 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 D B, WEI H L, HU Y N, et al. Standardized 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.
- [6] 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 ZH B, TIAN ZH J, LIU G H, et al. Inspecting defects of ACCC by linear scanning CT [J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44 (5): 95-103.
- [7] IVERSEN N, SCHOFIELD O B, COUSIN L, et al. Design, integration and implementation of an intelligent and self-recharging drone system for autonomous power line inspection [C]. 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2021: 4168-4175.
- [8] MACHADO M A, ANTIN K N, ROSADO L S, et al. High-speed inspection of delamination defects in unidirectional CFRP by non-contact eddy current testing[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 224: 109167.
- [9] 李治龙, 张卫华, 王一民, 等. 基于机器学习的布里渊光时域分析传感系统温度提取研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 322-330.
- LI ZH L, ZHANG W H, WANG Y M, et al. Advances of machine learning in Brillouin optical time domain analysis sensing systems for temperature extraction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58 (13): 322-330.
- [10] 蒋益强, 方亚林, 赵文君, 等. 基于温度场逆问题的电力电缆缺陷检测方法研究[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(9): 81-88.
- JIANG Y Q, FANG Y L, ZHAO W J, et al. Research on defect detection method of power cable based on inverse problem of temperature field [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41 (9): 81-88.
- [11] 刘凤莲, 夏荣, 李文杰, 等. 高压交联电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 259-266, 274.
- LIU F L, XIA R, LI W J, et al. Research on detection method of buffer layer ablation defect in high voltage XLPE cable [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 259-266, 274.
- [12] 汪凤秀, 郭新华. 基于热效应的 CFRP 缺陷超声检测方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(2): 83-89.
- WANG F X, GUO X H. Ultrasonic testing for detection of CFRP defects based on thermo-acoustic effect [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44 (2): 83-89.
- [13] 方春华, 胡冻三, 郭凯歌, 等. 高压电缆终端铅封缺陷超声检测方法研究[J]. 中国测试, 2022, 48(3): 118-123.
- FANG CH H, HU D S, GUO K G, et al. Research on ultrasonic testing method for lead sealing defects of high voltage cable terminals [J]. China Measurement & Test, 2022, 48 (3): 118-123.
- [14] 邓琨, 温启良, 张渊渊. 基于超声红外热像的电缆终端局部放电缺陷检测方法[J]. 红外技术, 2022, 44(9): 972-978.
- DENG K, WEN Q L, ZHANG Y Y. Detection method of partial discharge defects in cable terminals based on ultrasonic infrared thermography [J]. Infrared Technology, 2022, 44 (9): 972-978.
- [15] 王文凯, 邓斌. 基于 DAE-IPSO-SVM 的电缆早期故障识别方法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 29-35.
- WANG W K, DENG B. Cable incipient fault

- identification method based on DAE-IPSO-SVM [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40 (8): 29-35.
- [16] 曹虎银,姜浩,王强,等. 基于温度场原理的真空管道真空度测试系统平台设计与实现[J]. 真空科学与技术学报,2022,42(10):726-730.
- CAO H Y, JIANG H, WANG Q, et al. Implementation and design of vacuum test platform of the vacuum pipeline based on the principle of temperature field [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42 (10): 726-730.
- [17] 刘劲松,张良利,王松伟,等. 基于双温度场耦合的铜板坯水平连铸过程有限元模拟[J]. 铸造技术,2022,43(7):511-518.
- LIU J S, ZHANG L L, WANG S W, et al. Finite element simulation of copper slab horizontal continuous casting process based on double temperature field coupling [J]. Foundry Technology, 2022, 43 (7): 511-518.
- [18] 孙俊峰,李志斌. 基于 LSTM 的滚动预测算法的电缆缆芯温度的研究[J]. 电子测量技术,2021,44(21):84-88.
- SUN J F, LI ZH B. Research on cable core temperature based on rolling prediction algorithm of LSTM [J]. Electronic Measurement Technology, 2021,44 (21): 84-88.
- [19] 孔倩,姜根山,刘月超,等. 声学法炉内温度场与速度场协同测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2023,44(4):249-258.
- KONG Q, JIANG G SH, LIU Y CH, et al. Study on simultaneous measurement of temperature and velocity field in furnace based on acoustic tomography [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44 (4): 249-258.
- [20] 许富景,杜少成,荆蕊蕊. 基于压缩感知与分段 Hermite 插值的二维温度场重构方法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(4):40-47.
- XU F J, DU SH CH, JING R R. Two-dimensional temperature field reconstruction method based on compressed sensing and piecewise Hermite interpolation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (4): 40-47.

作者简介



刘杰(通信作者),2010 年于华北电力大学获得学士学位,2013 年于华北电力大学获得硕士学位,现为国网河北省电力有限公司电力科学研究院电力设备技术中心输电技术研究室主管,主要研究方向为输电线路运检技术。

E-mail: jingkuanguabr@163.com

Liu Jie(Corresponding author) received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2010, M. Sc. degree from North China Electric Power University in 2013. Now he is the director in transmission Technology Research Office of Power Equipment Technology Center, State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd. Electric Power Research Institute. His main research interests include transmission line transportation and inspection technology.