

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.017

具有偏振互易结构的温度不敏感型全光纤振动传感技术

郝宇亮¹, 梁新钰², 李宣健楠¹, 张孟炜², 刘鹏², 王青于², 陈宸²

(1. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 文中提出一种具有温度自抑制功能的全光纤、微型化振动传感器, 实现电力设备振动信号精确捕获。通过在保偏光纤上制作微型悬臂梁, 将外部振动转为两个正交偏振态之间的相位变化, 实现对外部振动的测量。为有效抑制环境温度对光纤传感器的干扰, 在传感器中形成了偏振互易式光路结构, 有效消除温度双折射而引入的相位误差。测试结果表明所提出传感器在 100 Hz~6 kHz 范围内具有平坦的响应频带, 振动测量灵敏度达到 $87.76 \text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$, 且在 25 °C 至 60 °C 的温度范围内显示出优异的稳定性。为验证所提出传感器对电力设备振动的监测有效性, 在实验室开展了变压器油中燃弧过程中设备外壳的振动冲击检测试验, 试验结果表明传感器有效捕获燃弧过程设备外壳的振动波形, 燃弧过程振动持续时间约为 20 ms, 振动主频率为 800 Hz, 最大振幅达 4.2 m/s^2 。

关键词: 振动传感; 光纤传感; 偏振互易; 温度抑制; 全光纤结构

Temperature-insensitive All-fiber Vibration Sensing Technology with Polarization Reciprocal Structures

HAO Yuliang¹, LIANG Xinyu², LI Xuanjiannan¹, ZHANG Mengwei², LIU Peng²,
WANG Qinyu², CHEN Chen²

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, a kind of all-fiber and miniaturized vibration sensor with temperature self-suppression function is proposed so to achieve the precise capture of vibration signals in electrical equipment. By fabricating a micro-cantilever on polarization-maintaining fiber, the external vibrations are converted into phase changes between two orthogonal polarization states, enabling the measurement of external vibration signals. For effectively suppressing the interference of environmental temperature to the fiber sensor, a polarization-reciprocal optical path structure is formed in the sensor so to effectively eliminate the phase errors due to temperature-induced birefringence. The test results show that the proposed sensor exhibits a flat response bandwidth within the range of 100 Hz to 6 kHz, with a vibration measurement sensitivity of $87.76 \text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ and remarkable stability across a temperature span from 25 °C to 60 °C. In order to verify the monitoring effectiveness of the sensor to the vibration of electrical equipment, the vibration shock detection test of the casing of equipment during arcing process in transformer oil is performed in the laboratory. The test result shows that the sensor successfully captures the vibration waveform of the casing during the arcing process, with the vibration duration of the arcing process lasting approximately 20 ms. The vibration dominant frequency is 800 Hz and the maximum amplitude is up to 4.2 m/s^2 .

Key words: vibration sensing; optical fiber sensing; polarization reciprocity; temperature-insensitive; all-fiber

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-07-29

0 引言

对振动信号的精确感知在电力技术行业中具有重要应用需求。例如,变压器和断路器在长期运行中易受到内部缺陷或外部因素的影响,从而产生安全隐患。这些隐患通常伴随着振动信号,强度从微弱到显著不等。通过精密的振动传感系统,可以在设备故障萌芽阶段捕捉这些信号,从而实现早期预警与诊断^[1-2]。当油浸式电力设备发生电弧故障时,绝缘油将在极短时间内裂解并产生大量气体,导致内部油压骤增。这会迫使设备罐体经历从弹性到塑性变形的转变,严重威胁设备的安全稳定运行,甚至可能引发爆燃事故,造成重大经济损失^[3-4]。因此,对油浸式电力设备防爆技术的研究刻不容缓。探测燃弧过程中外壳产生的振动冲击波信号,对于揭示油浸式电力设备燃弧气体压力释放过程及评价电力设备外壳的力学特性具有重要意义。

传统的电学式振动传感器主要为压电式振动传感器。传感器的压电元件受到外部振动引起的机械应力变化时,其表面或内部会产生电荷。通过测量电荷量即可实现对外界振动的频率、加速度或振幅信息的检测^[5]。然而,电力设备在局部暂态过电压、击穿等过程均伴随在周围空间中产生极强的瞬态强电磁骚扰,对传统电学类振动传感器存在极强的电磁干扰,传感器易出现信号缺失、测量失真、信号中断等问题^[6-7]。此外。某些关键测量部位处于高场区,电学传感器也难以应用。再者,为了实现高灵敏度振动传感,压电类传感器普遍需要大尺寸压电器件,导致传感器尺寸较大、空间分辨率较低,而当前高空间分辨、高时间分辨的传感器是实现电力设备状态深度全息感知关键要求。

光纤传感技术因其独特的抗电磁干扰能力、高灵敏度和紧凑体积,在复杂、极端电磁环境下展示出显著的应用优势^[8]。目前,光纤振动传感器技术主要分为强度调制与相位调制两大类。强度调制方法主要通过外界机械振动对光路对准或耦合过程调制,使得光纤输出光强随着振动信号的变化而变化。强度调制型光纤振动传感器原理简单,但其结构稳定性欠佳且光路对准难度大,实用化水平较低^[9-10]。相位调制技术主要采用马赫—曾德尔、迈克尔逊或法布里—珀罗干涉仪方案实现,振动信号通过弹光效应引起光纤传输相位发生变化,并利用干涉结构将相位变化转为光学信号进行测量^[11-12]。相位调制型光纤振动传感器具有极高的测量精度,然而这些系统或因外界干扰易于引入附加相位噪声^[13],

或对环境变化极为敏感并要求复杂的光学对准,使其实际应用受到限制。

温度稳定性也是限制当前光纤传感器广泛应用的一个关键技术瓶颈^[14-15]。例如在互感器燃弧过程中,外壳将受电弧的影响使得温度异常升高^[16]。常规光纤传感器存在温度漂移现象,将导致振动测量结果出现极大误差,甚至导致传感器失效。因此,研究具有温漂自抑制功能的光纤振动传感器,消除温度对光纤振动感知的影响,对于提升光纤振动检测精度与可靠性具有重要意义^[17]。

文中提出一种可实现温漂自抑制的微型光纤振动传感技术。通过在保偏光纤上制作微型悬臂梁,将外部振动转为两个正交偏振态之间的相位变化,实现对外部振动的测量。所提出结构通过级联两端偏振方向垂直保偏光纤,构建了偏振互易式光路结构,有效消除温度双折射而引入的相位误差,实现对温度漂移的自抑制。为增加探测灵敏度,所提出光纤传感器利用光纤刻蚀工艺形成了微结构保偏光纤,从而提升传感器在振动下的响应幅度,提升检测灵敏度。理论和试验验证表明,所提出传感器在 100 Hz~6 kHz 范围内具有平坦的响应频带,对振动测量的灵敏度为 $87.76 \text{ mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$,并且对环境温度变化展现出优异的稳定性。所提出传感器成功实现对燃弧过程中设备外壳的振动信号捕获,验证了该技术在实际应用场景中的有效与可靠性。

1 传感机理

1.1 传感光路结构设计

所提出光纤振动传感器光路结构见图1。偏振激光器输出由保偏光纤 L_0 传输至传感器, L_0 与传感保偏光纤 L_1 熔接,熔接光轴角度呈 45° 。此时光源输出偏振光将在传感保偏光纤 L_1 中平均投影至快轴(x-pol)和慢轴(y-pol)两个偏振方向。传感保偏光纤 L_1 输出端与第二段传感保偏光纤 L_2 进行光轴 90° 熔接,并在传感保偏光纤 L_2 的中段制作微重物形成微悬臂梁结构,完成对外界振动的感知。传感保偏光纤 L_2 的输出与单偏振光纤熔接,光轴熔接角度呈 45° ,完成对传感光路的检偏。

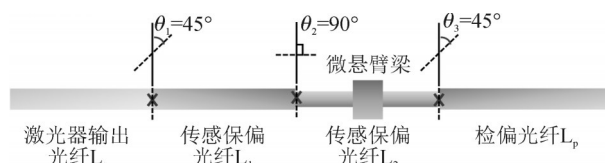


图1 传感光路

Fig. 1 The schematic of the proposed sensor

所提出传感光路结构为偏振干涉光路结构,其

琼斯矩阵可描述为

$$X_{\text{OUT}} = \text{Pol} \times R_{45} \times P_{L2} \times R_{90} \times P_{L1} \times R_{45} \times \text{Pol} \times X_{\text{IN}} \quad (1)$$

式(1)中,光路结构中各结构的琼斯矩阵描述见表1。

表1 传感器所用光学元件琼斯矩阵

Table 1 The Jonh's matrix of the utilized optical components

名称	琼斯矩阵
输入光 X_{IN}	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
检偏光纤 Pol	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
45°熔接 R_{45}	$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$
传感保偏光纤 P_{L1}	$\begin{bmatrix} e^{i\varphi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\varphi/2} \end{bmatrix}$
90°熔接 R_{90}	$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
传感保偏光纤 P_{L2}	$\begin{bmatrix} e^{i\varphi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\varphi/2} \end{bmatrix}$

将表1中的琼斯矩阵代入式(1)中计算可知,传感器最终输出的光功率 P_{OUT} 表示为

$$P_{\text{OUT}} = |X_{\text{OUT}}|^2 = \frac{E_0^2}{2} [1 + \cos(\varphi_2 - \varphi_1)] \quad (2)$$

式(2)中, φ_1 为传感保偏光纤 L_1 引入的快轴与慢轴之间的相位差,其主要来自于保偏光纤自身的双折射效应,表示为

$$\varphi_1 = \varphi_{L1-x\text{pol}} - \varphi_{L1-y\text{pol}} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) \times l_1 = B \times l_1 \quad (3)$$

φ_2 为传感保偏光纤 L_2 引入的快轴与慢轴之前的相位差,该部分包含保偏光纤自身双折射引入的相位差外,还有悬臂梁结构随外界振动而引入的相位差 φ_v

$$\varphi_2 = B \times l_2 + \varphi_v \quad (4)$$

在传感器构建中,使两段传感保偏光纤等长,即 $l_1 = l_2$, 因此可得传感器输出的光功率为

$$P_{\text{OUT}} = |X_{\text{OUT}}|^2 = \frac{E_0^2}{2} (1 + \cos \varphi_v) \quad (5)$$

由式(5)可见,传感器输出的光功率受外界振动信号的调制。通过测量传感器输出光功率的变化,即可实现对外界振动信号的解析。此外,从式(5)可见传感器输出与外界温度变化无关,即该传感结构具有传感温度自补偿的效应。这是由于该结构中,传感保偏光纤 L_1 与传感保偏光纤 L_2 具有相同的双

折射系数与传输长度,当外界温度发生变化时,两端光纤产生的双折射效应相同,通过 90°熔接完成偏振光路的互易,实现对温度干扰的有效消除。

1.2 全光纤振动传感器制备流程

文中所提出全光纤振动传感器无需空间光路对准、外加悬臂梁等过程,具有全光纤一体化、微型化的结构特点。同时其制造工艺简单,光路结构稳固,极大地提升了系统可靠性和实用性。传感器制备的具体流程见图2,该流程分为两个核心步骤:构建偏振干涉光路和形成光纤一体微悬臂梁结构。

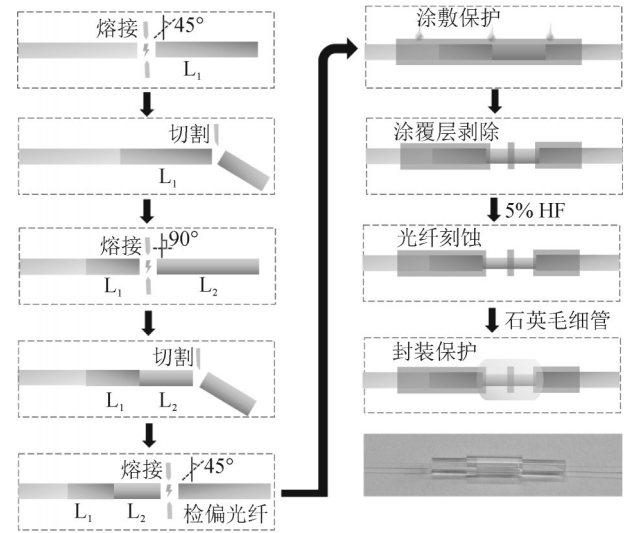


图2 传感器制备流程

Fig. 2 The fabrication of the proposed sensor

传感器所用光源为DFB偏振激光器,波长为1 550 nm,由偏振光纤 L_s 慢轴输出。采用保偏光纤熔接机将光源偏振光纤 L_s 的输出端与熊猫型保偏光纤 45°熔接,熔接完成后将光纤切割至12 mm,形成传感保偏光纤 L_1 ;将 L_1 的输出端与另一段熊猫保偏光纤熔接,两端光纤光轴角度呈 90°,熔接完成后同样将其切割至12 mm,形成传感保偏光纤 L_2 ;将传感保偏光纤 L_2 输出端与单偏振光纤进行熔接(领结型单偏振光纤,单偏振光纤偏振方向与 L_2 呈 45°),完成偏振干涉光路结构制备。

随后在传感偏振光纤 L_2 上制备微悬臂梁。文中提出通过在传感保偏光纤 L_2 特定区间内诱导局部负荷效应,实现对外界振动引起的光纤应变的高效转换,模拟出悬臂梁的动态响应特性。此外,文中提出将减小传感光纤直径以增加振动检测灵敏度,具体制备流程如下:首先,采用光纤喷涂技术对以上熔接形成的偏振干涉光路结构进行涂敷,涂敷材料为丙烯酸酯,涂敷后光纤直径为 280 μm 。通过光纤涂敷能够有效保护光纤熔接电的可靠性,同时

增加光纤直径以提升悬臂梁的灵敏度。然后,对传感保偏光纤 L_2 进行部分涂敷层剥离,仅保留光纤中部约3 mm区域的涂覆层,利用5%(vol)氢氟酸对涂覆层剥离部分进行精细腐蚀,带有涂覆层的光纤部分免受氢氟酸的腐蚀,而 L_2 中剥离了涂覆层的光纤部分将在氢氟酸的溶解下直径变小。在该过程中需精准控制保偏光纤腐蚀时间,避免对保偏光纤应力区的侵蚀。文中采用的腐蚀时间约为1.5 h,刻蚀后的光纤直径约为100 μm ,成功在 L_2 中构建出具有局部负荷特性的微区。最后,采用玻璃管对传感器进行封装,确保传感光纤 L_2 两端固定,中间为局部负荷微区,即成功构成悬臂梁结构。

上述保偏光纤的熔接由保偏光纤熔接机完成,通过分析光纤端面应力区的分布图像实现任意偏振角度的配准,角度配准误差小于 1.4° 。根据偏振干涉光路分析可知,光纤偏振角度配准精度越高,传感器输出信号的背景噪声越小,反之亦然。

2 试验与分析

2.1 传感器性能测试与分析

为分析验证所提出光纤振动传感器的性能,搭建了试验平台见图3,主要包括光源、振动源、光电探测器、数据采集与分析系统。激光器与传感器连接偏振光源,传感器固定在振动平台上,传感器输出经光电探测器转换为电学信号,最后由数据采集系统采集与显示。其中,振动源由机械振子、信号发生器、功率放大器构成。信号发生器产生不同频率的信号,然后通过功率放大模块放大并施加在机械振子上。机械振子的振动频率与振动加速度由信号源和功率放大倍数控制。试验采用的测试振动信号频率范围为100 Hz~6 kHz,加速度覆盖 $0\sim 10\text{ m/s}^2$,满足电力设备振动测试要求。

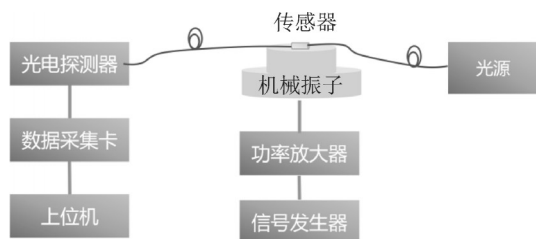


图3 试验系统

Fig. 3 Experiment set-up

2.1.1 传感器对不同频率振动信号的响应

传感器对不同频率的特性见图4。机械振子施加给传感器的振动加速度为 2.5 m/s^2 ,文中展示了传感器从低频到高频(0.1、2、4、6 kHz)下传感器的响应

波形。试验结果表明,传感器输出波形能够有效跟随施加振动信号。通过对传感器输出波形进行频谱分析可知,传感器的输出信号主频能够与外部振源设定频率精准匹配,验证了传感器在频率响应方面的一致性和准确性。此外,传感器响应幅值基本一致,表明传感器具有平坦的幅频特性。

2.1.2 传感器对多频率振动叠加作用下的信号的响应

传感器在检测含有多个振动频率叠加的信号时的响应特性见图5。如图5所示,传感器输出波形准确地反映了振动信号。进一步的频谱分析证实,传感器能够详细识别信号中的各个频率成分。分析结果显示,传感器输出波形能够有效反映叠加的各个频率分量,频谱特性与输入频率特性一致。该试验结果表明所提出的光纤振动传感器不仅适用于单一频率信号的测量,在面对处理和解析复杂振动场景信号的情况时也具有强大潜力。它能够准确无误地重现混合振动波形中的每一个细微频率分量,从而确保了在实际应用中,即便是面对信号环境复杂多变的情况,也能实现高精度的振动信号测量与分析。

2.1.3 传感器的灵敏度分析

固定施加振动信号的频率为2 kHz,通过调节功率放大器对传感器施加的振动信号的强度,分析传感器对振动的响应灵敏度,测试结果见图6。根据图像可知,传感器输出幅值随着振动强度的变化而单调变化,具有良好的线性关系。传感器对振动探测的灵敏度可达 $87.76\text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ 。

2.1.4 传感器的温度稳定性分析

传统光纤振动传感器受材料的热光效应影响,存在严重的温度漂移现象。相比之下,文中提出的传感器结构采用了具有两端互易体结构的保偏传感光纤,有效实现了温度漂移自抑制,增加了测量结果的准确性。

将传感器以及机械振子置于恒温箱中,对传感器施加频率为2 kHz,加速度为 4.5 m/s^2 的振动信号。调节恒温箱温度,温度从 25°C 开始,以 5°C 为步长逐步升至 60°C 。在每个温度测试点下保持5 min,采集传感器输出波形,并分析其响应幅值,测试结果见图7。从图7中可以看出,在环境温度变化的过程中,传感器输出幅值几乎保持不变。这是由于两段传感光纤具有相同的结构参数,当传输进入第二段传感光纤时,第一段的慢轴/快轴极化转变为快轴/慢轴极化,因此经过两段光纤后温度引起的温度双折射相位差被抵消。

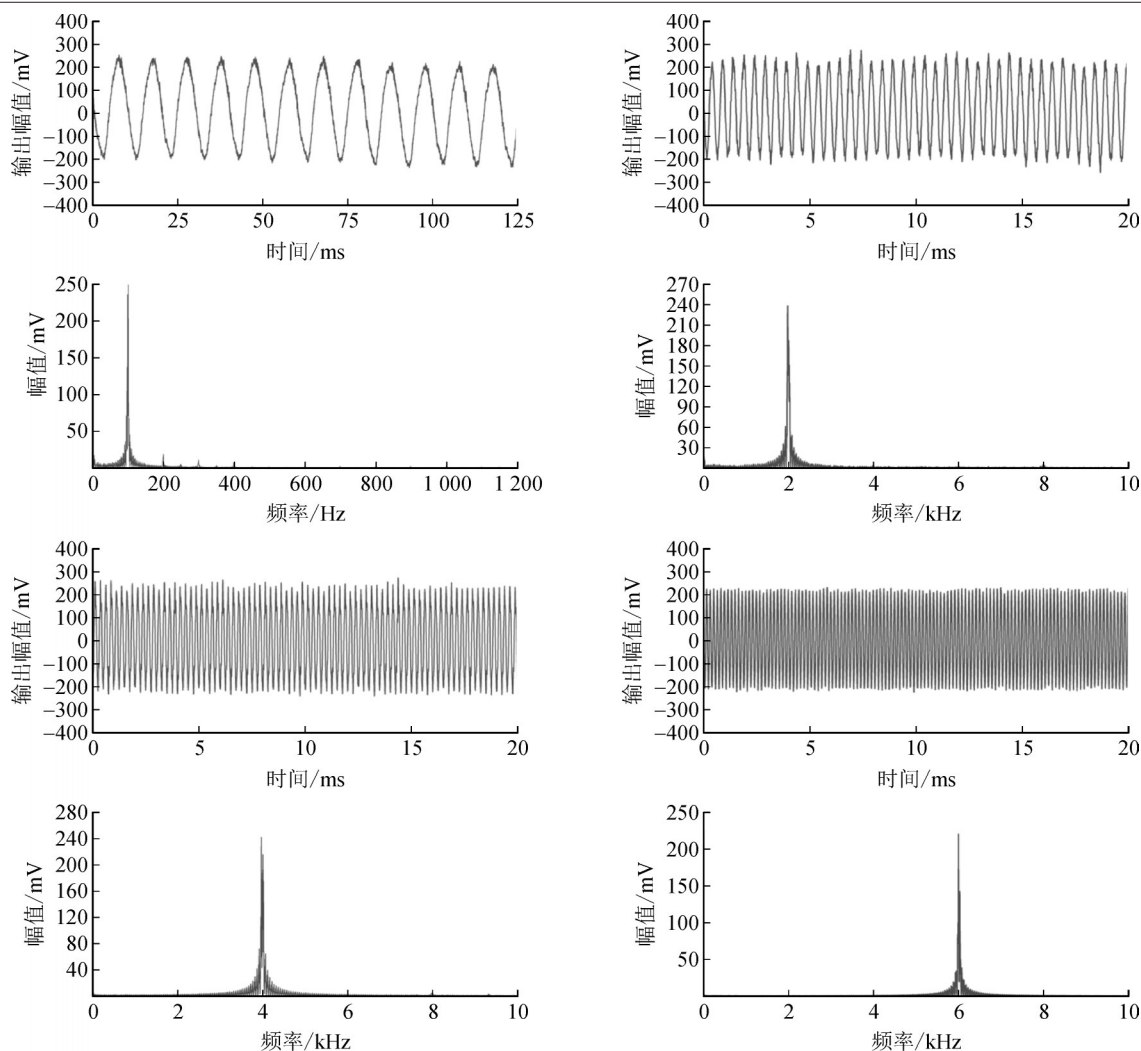


图4 传感器对不同频率振动信号的响应特性

Fig. 4 The response of the sensor to vibration with different frequency

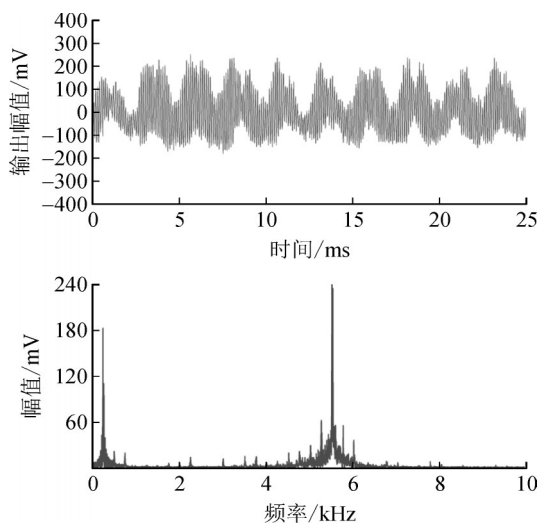


图5 传感器对多频率叠加振动光信号的响应特性

Fig. 5 The response characteristics of the sensor to multi-frequency superimposed vibration optical signals

2.2 光纤振动传感器应用于电力设备燃弧过程振动信号检测

为验证所提出传感器的有效性,在实验室搭建

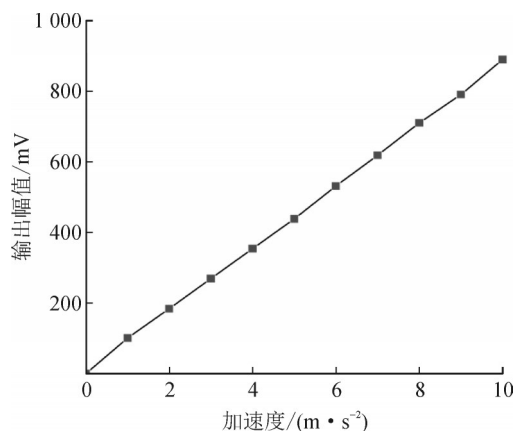


图6 传感器灵敏度分析

Fig. 6 The sensitivity of the proposed sensor

电弧试验平台,进行燃弧过程振动信号检测研究,试验平台见图8。充油试验仓一端为高压进线套管,另一端为低压出线套管。试验电极采用黄铜板一板电极,电极长度25 mm,倒角曲率2 mm,充油试验仓内所用绝缘油为矿物绝缘油 K150X,试验电压设置为60 kV。利用高压击穿绝缘油从而引发油中

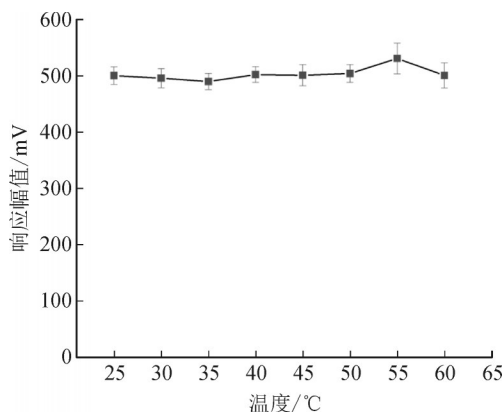


图7 传感器温度稳定性测试

Fig. 7 The temperature stability of the proposed sensor

电弧放电,此时通过光纤振动传感器检测外壳振动情况。

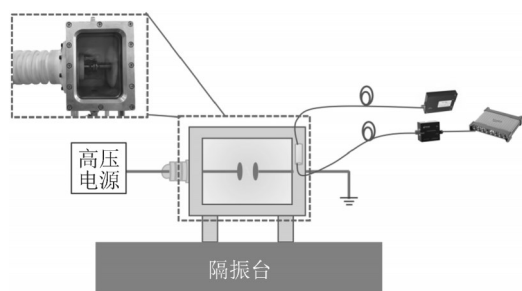


图8 电弧试验平台搭建

Fig. 8 Setup of the arc fault test platform

传感器测试得到的外壳振动波形见图9。根据试验结果可知,在产生电弧后设备外壳发生剧烈振动,振动主频为800 Hz,最大振动幅值为4.2 m/s²。随着系统能量的耗散,外壳振动的强度随着时间逐步降低,整个振动过程持续约为20 ms。

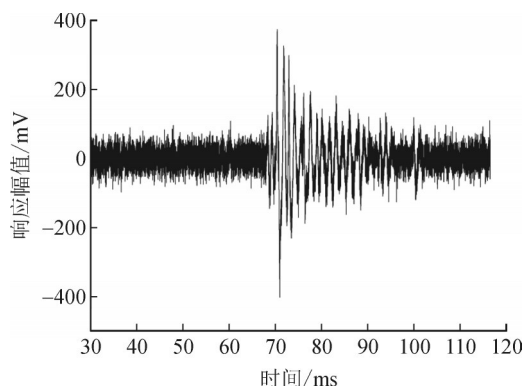


图9 振动波形

Fig. 9 The vibration of the housing during arc process

3 结语

文中提出了一种具有温漂自抑制功能的微型光纤振动传感技术。通过在保偏光纤上制作微型悬臂梁,将外部振动转为两个正交偏振态之间的相位变化,实现对外部振动的测量。所提出结构通过

级联两端偏振方向垂直保偏光纤,构建了偏振互易式光路结构,有效消除温度双折射而引入的相位误差,实现对温度漂移的自抑制。试验验证表明,所提传感器在100 Hz至6 kHz的宽频范围内展现出良好的频率响应特性,能够准确捕捉单一及多频率叠加的振动信号,振动测量灵敏度可达87.76 mV/(m·s²),且在环境温度从25℃上升至60℃时,传感器输出仍能保持稳定,显著优于传统光纤传感器。

为验证所提出传感器在电力设备振动信号监测中的应用,利用光纤振动传感器开展了电力设备燃弧过程振动信号的监测。试验结果表明,所提出光纤振动传感器成功捕获到燃弧过程中的振动波形,燃弧过程中振动持续时间约为20 ms,振动频率为800 Hz,最大振幅达4.2 m/s²。

文中工作所提出的光纤振动传感器全光纤、微型化、温度稳定性强的技术优势,为电力设备的振动监测提供了一个强有力的新工具,具有重要的科学价值和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 马宏忠,吴金利,陈冰冰,等. 电力变压器振动特性分析与固有频率识别[J]. 高压电器,2023,59(6):82-92.
MA Hongzhong, WU Jinli, CHEN Bingbing, et al. Vibration characteristic analysis and natural frequency identification of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 82-92.
- [2] 相晨萌,高树国,刘宏亮,等. 基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法可行性分析[J]. 高压电器,2024,60(4):83-91.
XIANG Chenmeng, GAO Shuguo, LIU Hongliang, et al. Feasibility analysis of power equipment condition monitoring method based on broadband vibration sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 83-91.
- [3] 罗 虎,苏钟煊,陈洪波. 有载分接开关内部故障压力传播仿真及试验研究[J]. 变压器,2023,60(11):48-52.
LUO Hu, SU Zhonghuan, CHEN Hongbo. Simulation and experimental research of internal fault pressure propagation of on-load tap changer[J]. Transformer, 2023, 60(11): 48-52.
- [4] 罗 亮,邱勇令,李金忠,等. 油浸式变压器新型压力释放阀动力学分析[J]. 变压器,2022,59(9):20-29.
LUO Liang, QIU Yongling, LI Jinzhong, et al. Dynamic analysis of a new pressure relief valve for oil-immersed transformer[J]. Transformer, 2022, 59(9): 20-29.
- [5] 边义祥,张 弋,王汝梦,等. 表面对称电极含金属芯PVDF纤维冲击振动传感特性研究[J]. 仪表技术与传感器,2017(12):110-113.
BIAN Yixiang, ZHANG Yi, WANG Rumeng, et al. Study

- on vibration sensing properties of metal core PVDF fiber with symmetrical electrode[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(12): 110-113.
- [6] 刘佳佳. GIS暂态过电压对电子式互感器电磁干扰影响及其抑制研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- LIU Jiajia. Research on the influence of GIS transient overvoltage on electromagnetic interference of electronic transformers and its suppression[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [7] 陈维江, 赵军, 边凯, 等. GIS变电站开关操作瞬态电磁骚扰研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4935-4948.
- CHEN Weijiang, ZHAO Jun, BIAN Kai, et al. Research progress on transient electromagnetic disturbance due to switching operations in GIS substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4935-4948.
- [8] GARCÍA Y R, CORRES J M, JAVIER G. Vibration detection using optical fiber sensors[J]. Journal of Sensors, 2010(1): 1-12.
- [9] VILLATORO J, ANTONIO-LOPEZ E, SCHÜLZGEN A, et al. Miniature multicore optical fiber vibration sensor[J]. Optics Letters, 2017, 42(10): 2022-2025.
- [10] BIN Ma, JIAN Xu. Experimental research of coupling fiber-optic sensor for vibration measurement[C]//2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics. China: IEEE, 2010: 1-4.
- [11] PAN Chao, LIU Xiaorui, ZHU Hui, et al. Distributed optical fiber vibration sensor based on sagnac interference in conjunction with OTDR[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20056-20070.
- [12] DENG Ming, ZHANG Tianhe, NAN Xinhao, et al. Enhanced sensitivity of optical fiber vibration sensor based on radio-frequency Michelson interferometer[J]. Optics Letters, 2021, 46(24): 6079-6082.
- [13] SUI Guanghui, LIU Huanhuan, PANG Fufei, et al. Broad-band acoustic vibration sensor based on cladding-mode resonance of double-cladding fiber[J]. Photonic Sensors, 2019, 9(3): 230-238.
- [14] LIU Yingfang, WANG Fang, PENG Yufeng, et al. Optical fiber vibration sensor with wide detection range based on STDS structure designed by mach-zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(22): 27351-27360.
- [15] DONG Miaoyun, TONG Zhengrong, ZHANG Weihua, et al. Temperature-insensitive sensor for glucose brix measurement based on compact spindle-shaped structure with two-mode fiber[J]. Optoelectronics Letters, 2022, 18(12): 737-742.
- [16] 刘洋, 章子潇, 赵贤根, 等. 进气流量对滑动电弧放电分解CO₂的瞬态电-光-热特性和转化性能的影响[J/OL]. 电工技术学报, 1-13[2024-05-07]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231860>.
- LIU Yang, ZHANG Zixiao, ZHAO Xiangen, et al. The effect of inlet flow rate on the transient electrical-optical-thermal characteristics and conversion performance of CO₂ decomposition in gliding arc discharges[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-13[2024-05-07]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231860>.
- [17] LUO Weixuan, CHEN Yao, XIAO Anping, et al. Three-core fiber-based temperature-insensitive twist sensor[J]. Optics Communications, 2024(554): 130229.

郝宇亮(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压电器产品检测技术(E-mail: 13572521201@163.com)。

梁新钰(2002—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力设备在线监测技术(E-mail: 358454297@qq.com)。

李宣健楠(1992—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向高压电器产品检测技术(E-mail: 13991196423@163.com)。

张孟炜(2002—), 男, 硕士, 主要研究方向为绝缘检测技术(E-mail: zmw0214@stu.xjtu.edu.cn)。

刘鹏(1979—), 男, 博士, 主要研究方向为高电压技术(E-mail: pengliu@xjtu.edu.cn)。

王青于(1991—), 女, 博士, 主要研究方向为高电压技术(E-mail: wqy.1991624@xjtu.edu.cn)。

陈宸(1991—), 女, 博士, 主要研究方向为绝缘检测技术(E-mail: chenchen613@xjtu.edu.cn)。

(上接第163页)

应取能技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 113-119.

LUO Yiping, ZENG Xiangjun, LEI Yongping, et al. High voltage electric-field induction energy-acquisition technology based on discharge method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 113-119.

程钰(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为传感器取能及大功率电源等电力电子技术(E-mail: 3121104002@stu.xjtu.edu.cn)。

曾翔君(1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大功率风电系统中功率变换和新能源等电力电子技术(通信作者)(E-mail: zengxj@mail.xjtu.edu.cn)。

马朝瑜(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为传感器取能及开关电源等电力电子技术(E-mail: mzy_xjtu@163.com)。

骆一萍(1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能仪器设计及工业自动化技术(E-mail: luoyip@mail.xjtu.edu.cn)。