

双通道 Mach-Zehnder 光纤相干振动传感器

徐 华¹, 衣文索², 杨雨欣²

(1. 国防科技大学 智能科学学院, 长沙 410073; 2. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要: 针对传统电网舞动监测装置存在电磁干扰抑制能力弱、需持续外部供电、安装工艺复杂、信噪比低和灵敏度较差等问题, 提出一种新型缆线扰动监测系统. 该系统采用双端光纤 Mach-Zehnder 干涉光路结构, 可实现长距离、大尺度、多维度在线监测与结构安全预警, 从而实时定位舞动位置. 传感器核心采用薄壁增敏型电缆套筒设计, 内部集成由高灵敏微细光纤及耦合器构成的激光光纤 Mach-Zehnder 干涉光路. 该干涉仪对振动信号具有优良的响应特性, 经特定金属外壳封装后形成集成化舞动监测传感器. 实验结果表明, 该传感器有限元的固有频率为 106.77 Hz, 与实验数据的相对误差仅为 1.65%, 该检测器在 0~140 Hz 内的相对灵敏度为 41.25~66.78 dB(rad/Pa), 对舞动信号具有较高灵敏度的检测能力.

关键词: Mach-Zehnder 干涉仪; 光纤传感; 薄壁增敏电缆套筒; 有限元分析; 电网舞动检测器
中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2025)06-1775-09

Dual Channel Mach-Zehnder Fiber Coherent Vibration Sensor

XU Hua¹, YI Wensuo², YANG Yuxin²

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problems of weak electromagnetic interference immunity, continuous external power supply, complex installation process, low signal-to-noise ratio, and insufficient sensitivity of conventional power grid dance monitoring systems, we proposed a novel cable disturbance monitoring system. The system employed a dual-ended Mach-Zehnder interferometric (MZI) optical path structure, which could achieve long-distance, large-scale, and multi-dimensional online monitoring and structural safety warning to locate the position of the dance in real-time. The sensor core adopted a thin-walled sensitivity-enhanced cable sleeve design, which integrated a laser MZI optical path composed of high-sensitivity micro-optical fiber and couplers inside. This interferometer had excellent response characteristics to vibration. After being encapsulated within a specialized metal housing to form an integrated dance monitoring sensor. The experimental results show that the natural frequency of the finite element of the sensor is 106.77 Hz, and the relative error with the measured date is only 1.65%. The relative sensitivity of the detector in the range of 0—140 Hz is 41.25—66.78 dB (rad/Pa), which confirms its ability to detect the high sensitivity of the dance signal.

Keywords: Mach-Zehnder interferometer; fiber optic sensing; thin-walled sensitivity-enhanced cable sleeve; finite element analysis; power grid dancing detector

收稿日期: 2025-01-26.

第一作者简介: 徐 华(1979—), 男, 汉族, 博士研究生, 高级工程师, 从事光纤传感技术与安全应急的研究, E-mail: xuhuanudt@nudt.edu.cn. **通信作者简介:** 衣文索(1971—), 男, 汉族, 博士, 副教授, 从事光纤传感技术的研究, E-mail: 2090583950@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 61703056).

在电力系统运行过程中,导线舞动现象是输电线路需解决的重要技术难题,其危害性大且防治难度较高^[1].由于电网基础设施具有分布范围广、运行环境复杂等特点,因此导线长期暴露在各类自然灾害下.研究表明,在电网系统全年故障中,超过 3/4 的事故诱因可归咎于极端气候条件^[2].当导线表面覆冰分布不均匀时,风荷载可导致导线大振幅低频振动,这种振动与输电塔相互作用形成塔线耦合系统并放大舞动破坏效应^[3].输电导线的剧烈振荡会严重危害电力系统安全,长期作用将损坏杆塔、导线和连接金具等关键部件,使线路频繁跳闸停电,导致绝缘击穿、断线、横担变形或倒塔等永久性破坏,严重影响电网稳定运行^[4].

导线舞动作用于 0.1~3 Hz 频段^[5],本文研究的低频振动涵盖 0.1~10 Hz 频段的机械振动响应,导线舞动作为该频段内的典型振动形式,在激励机制、振动幅值以及模态特性等关键参数上均表现出明显的差异性特征.在激发机理方面,低频振动通常由环境激励(如风载荷、机械振动或交通激励等)所致,具有较宽的频谱分布,可能包含随机振动和谐波振动等多种形式;导线舞动属于气动弹性失稳现象,主要由覆冰导线在稳定风场(通常风速 4~20 m/s)下产生的周期性涡激振动或 Den Hartog 不稳定效应所致,其频率通常集中在 0.1~3 Hz 内.在振幅和模态特征方面,低频振动的振幅通常较小(小于导线直径的 1~2 倍),振动模式大多数表现为单点振动或局部小幅度波动;导线舞动的振幅显著增大(可达导线直径的 5~50 倍),呈现大位移、低频率的椭圆或“8”字形轨迹,或同时存在垂直、水平和扭转方向的复合模态耦合现象.在危害性和监测需求方面,低频振动的长期作用可能导致疲劳损伤、螺栓松动和结构微裂纹等渐进性破坏;导线舞动在短期内即可导致相间闪络、金具断裂和塔线结构失效等严重事故,因此需更高精度的实时动态监测.

用于检测导线舞动的设备主要包括电磁感应传感器、数字光栅检测器、光纤光栅监测仪和偏心光纤测量仪等.传统设备由于测量范围小、易受干扰且灵敏度较差,因此难以实现舞动的实时精确监测和数据采集^[6].这种导线舞动监测设备使用微机电系统(MEMS)加速度传感器,结合实验室模拟平台和补偿算法,可完成从数据采集到分析处理的全部功能,但其未能用于实际测试,且野外施工难度较大^[7].目前舞动监测技术主要依赖电子传感装置,这类安装在输电线路上的监测设备需持续供电才能维持正常运行,且在数据采集和传输环节存在显著局限性:一方面,监测终端所处环境(如偏远山区)通常通信条件恶劣,导致采集数据难以实时回传至监控中心;另一方面,数据传输延迟现象频发,严重影响监测时效性^[8].

光纤传感技术主要采用 Michelson, Fabry-Pérot, Mach-Zehnder(M-Z) 和 Sagnac 4 种干涉结构^[9].当外界作用影响传感元件时,光波相位发生变化,这种变化通过干涉效应转化为光强变化,分析这些光强变化即可准确监测导线舞动状态.

本文基于 M-Z 干涉仪的独特性能,设计一种应用于电网舞动监测的双端光纤传感装置.该检测系统的核心传感单元采用特殊结构设计,通过将光纤线圈以螺旋方式紧密缠绕在弹性体上,形成具有高灵敏度的电缆套筒式传感结构.实验结果表明,这种双端 M-Z 干涉检测器具有较好的监测能力,该方案有效解决了光学器件回波效应和光纤后向散射干扰等问题.与传统的平面结构传感器相比,该装置在低频舞动监测方面具有更优异的特性.

1 M-Z 干涉仪传感理论

光纤振动监测系统的核心部件是 M-Z 干涉仪,它由两个 3 dB 耦合器串联构成.先分别制作两个 3 dB 耦合器,再熔接其光纤臂完成组装^[10].当电缆振动产生的力作用在 M-Z 干涉仪传感光纤上时,可使光纤中传输的光波相位发生改变,从而实现振动信号到光信号的转换.

图 1 为 M-Z 干涉仪示意图.由图 1 可见,M-Z 干涉仪由两个 3 dB 耦合器(标记为 1 和 2)组成,并包括参考光纤和传感光纤.其中间部分表示外界扰动导致的光纤应变变化.光纤的基本参数包括总长度 L 、折射率 n 和纤芯直径 D ,当受到应变作用时,这些参数的变化量分别表示为 ΔL 、 Δn 和 ΔD ^[11].

理想条件下可忽略光纤偏振模色散,当入射光振幅为 E_i ,角频率为 ω ,初始相位差为 φ_0 时,其输出光场可表示为

$$E_0 = E_i \times \cos(\omega t + \varphi_0). \tag{1}$$

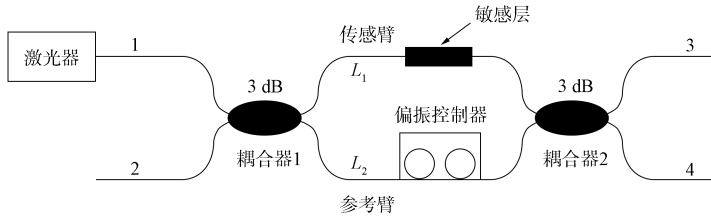


图 1 M-Z 干涉仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of M-Z interferometer

在工程实践中, 电缆振动导致的相位偏移可近似表示为

$$\Delta\varphi \approx \beta\Delta L + L \frac{\partial\beta}{\partial n}\Delta n = \Delta\varphi_\epsilon + \Delta\varphi_s, \tag{2}$$

评估弹光效应需综合考虑石英的弹光系数张量和应变张量, 二者相互作用形成的相位偏移^[11]可分别表示为

$$\Delta\varphi_\epsilon = -\beta LP(1 - 2\mu)/E = \beta\epsilon_z L, \tag{3}$$

$$\Delta\varphi_s = L \frac{\partial\beta}{\partial n}\Delta n = -\frac{n^3}{2}(P_{11} + P_{12})\epsilon_x k_0 L - \frac{n^3}{2}P_{12}\epsilon_z L, \tag{4}$$

其中 $\Delta\varphi_\epsilon$ 表示由光纤弹性伸缩导致光程差变化的相位偏移, $\Delta\varphi_s$ 表示由弹光效应导致折射率变化的相位偏移.

将式(3)和式(4)代入式(2)即可得到外界扰动导致的总相位偏移量^[12]

$$\Delta\varphi = nk_0 L \left[\epsilon_z - \frac{1}{2}n^2(P_{11} + P_{12})\epsilon_x - \frac{1}{2}n^2 P_{12}\epsilon_z \right]. \tag{5}$$

当传感光纤受外界振动影响时, 产生相位差 $\Delta\varphi$, 此时传感光纤的输出表达式为

$$E_o = E_i \times \cos(\omega t + \varphi_0 + \Delta\varphi). \tag{6}$$

M-Z 干涉仪的两相干光初始相位差为 $\pi/2$ (无应变状态), 由于外界扰动产生的相移会改变输出光强, 因此通过测量光强变化即可获得结构体产生加速度信号幅度的变化.

2 薄壁电缆套筒增敏模型

2.1 物理模型建立和理论推导

图 2 为光纤缠绕薄壁套筒实现增敏的示意图. 由图 2 可见, 总长度为 L 的光纤紧密缠绕在外径为 a 、壁厚为 t 的薄壁套筒表面, 并通过黏接剂固定其位置^[13].

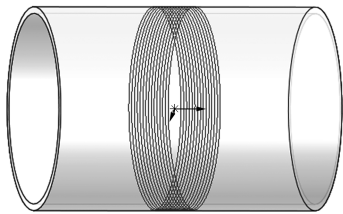


图 2 光纤绕制薄壁套筒增敏示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sensitization of optical fiber winding thin-walled sleeve

光波在传感光纤中传播距离 L 后的相位变化可表示为

$$\varphi = \beta L, \tag{7}$$

其中 $\beta = k_0 n$ 为光纤的传播常数, k 表示波矢模量 ($k_0 = 2\pi/\lambda$), n 为纤芯有效折射率, λ 为光在真空中的波长.

由于电缆舞动作用于传感光纤产生的材料应变会调制传输光波的相位特性, 即施加于光纤的轴向应变可导致长度变化(ΔL), 并触发弹光效应(折射率变化 Δn), 且光纤所受的径向应变也会改变纤芯直径(ΔD), 它们共同影响相位. 因此, 光波的总相位变化量为

$$\Delta\varphi = \beta L \left(\frac{\Delta L}{L} \right) + L \left(\frac{\partial\beta}{\partial n} \right) + L \left(\frac{\partial\beta}{\partial D} \right) \Delta D. \tag{8}$$

电缆舞动通过介质应力波传播, 其灵敏度作为关键指标可有效反映传感器对振动变化的响应能

力,其表达式为

$$M_p = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\sigma}. \quad (9)$$

该灵敏度的量纲为 rad/Pa. 工程实践中用对数标度的舞动灵敏度级 M 表示光纤舞动灵敏度 M_p 与基准灵敏度 M_r 的关系,其表达式为

$$M = 20\log(M_p/M_r). \quad (10)$$

灵敏度级的量纲为分贝(dB),其计算需设定一个基准灵敏度值($M_r = 1$ rad/ μ Pa). 采用单位长度舞动灵敏度参量

$$M_{pu} = \frac{M_p}{L} = \frac{\Delta\varphi}{\rho L}, \quad (11)$$

以消除光纤长度对测量结果的影响,该参数的量纲为 rad/(Pa·m).

2.2 光纤弯曲衰减机理物理模型理论推导

建立光纤曲率半径变化与传输损耗关系的数学模型,如图 3 所示.

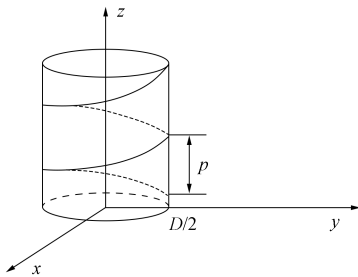


图 3 物理模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of physical model

空间螺旋轨迹表达式为

$$R(t) = \left(\frac{D}{2} \cos(t), \frac{D}{2} \sin(t), \frac{p}{2\pi} t \right), \quad (12)$$

其中 D 为轴线直径, p 为螺距.

空间曲线曲率 $K(t)$ 可表示为

$$K(t) = \frac{|R' \times R''|}{|R'|^3}. \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)可得

$$K(t) = \frac{2\pi^2 D}{\pi^2 D^2 + p^2}. \quad (14)$$

基于曲率半径 $R = 1/K$ 关系可导出相应曲率半径的表达式为

$$R = \frac{1}{K} = \frac{D}{2} + \frac{p^2}{2\pi^2 D}. \quad (15)$$

单模光导纤维因弯曲导致的传输衰减表达式为

$$\alpha_c = A_c R^{-1/2} \exp\{-UR\}, \quad (16)$$

其中相关参数定义为

$$A_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{aW^3} \right)^{1/2} \left[\frac{U}{WK_1(W)} \right]^2, \quad (17)$$

$$U = \frac{4\delta n W^3}{3aV^2 n_2}. \quad (18)$$

在工程实际应用中,通常采用简化形式

$$W \approx 1.1428V - 0.996 \approx 2.7484 \frac{\lambda_c}{\lambda} - 0.996, \quad (19)$$

$$U = (V^2 - W^2)^{1/2}. \quad (20)$$

将式(17)代入式(16)可得

$$A_c \approx 30 \sqrt[4]{\Delta} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{\left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^3}. \quad (21)$$

用 MATLAB 软件对数据进行处理和分析,可得到光波导衰减系数与弯曲曲率半径之间的关系^[14]. 光损耗系数与曲率半径的关系如图 4 所示. 由图 4 可见,光信号衰减程度随弯曲曲率半径的增大呈急剧下降的趋势. 当弯曲半径大于 8 mm 时,光纤的功率损耗幅度趋于恒定,其后续变化率显著降低,渐近于一个相对稳定的状态.

2.3 舞动传感单元模型理论推导

当薄壁外套结构发生舞动时,其表面会产生显著的周向应变场. 采用高密度光纤缠绕方式敷设于

该外套表面, 可高效将外套的周向应变耦合至光纤, 并主要转化为光纤沿其长度方向的轴向应变. 这种轴向应变作用会同时改变光纤的物理长度及其纤芯材料的折射率, 当光波在光纤中传播时, 其相位将受到调制, 产生可观测的相位漂移.

本文假设薄壳的外径远小于舞动波长, 该条件下作用于其表面的压力可近似表示为均匀分布的径向载荷. 为简化分析, 定义如下坐标系: 将薄壳沿管道壁穿透时的纵断面形成的曲线称为经线, 将垂直于子午线的横断面形成的闭合曲线称为纬线. 薄壁套筒受舞动作用时的应力分布如图 5 所示, 其中 a 为壳体外径, t 为壁厚. 管壁任意点存在三向应力状态: 轴向应力(经线方向)、环向应力(纬线方向)和径向应力(壁厚方向), 在外表面($r=a$)处存在

$$\begin{cases} \sigma_1 = 0, \\ \sigma_2 = p \frac{a^2 + (a-t)^2}{a^2 - (a-t)^2}, \\ \sigma_3 = p. \end{cases} \quad (22)$$

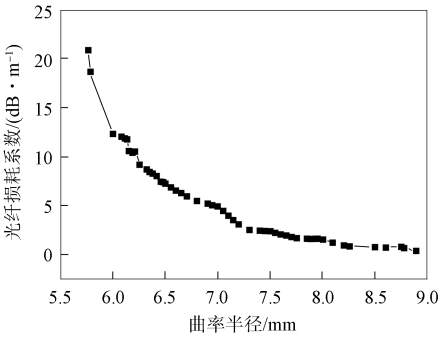


图 4 光损耗系数与曲率半径的关系

Fig. 4 Relationship between optical loss coefficient and radius of curvature

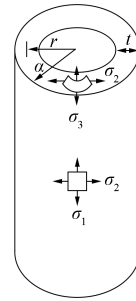


图 5 薄壁套筒受舞动作用时的应力分布

Fig. 5 Stress distribution of a thin-walled sleeve under dancing action

描述薄壁外套材料行为的本构方程(应力-应变关系)为

$$\begin{cases} \epsilon_2 = \frac{1}{E_{cy}}(\sigma_2 - \mu_{cy}\sigma_3), \\ \epsilon_3 = \frac{1}{E_{cy}}(\sigma_3 - \mu_{cy}\sigma_2). \end{cases} \quad (23)$$

壳体材料的弹性模量和 Poisson 比分别由 E_{cy} 和 μ_{cy} 表示, 周向应变分量和径向应变分量分别由 ϵ_2 和 ϵ_3 表示. 由于光纤传感器通过黏接剂牢固附着在薄壁外壳的外表面, 因此假设光纤的轴向变形 ϵ 与该点的外壳周向变形 ϵ_2 相对应, 即

$$\epsilon \approx \epsilon_2 = \frac{p}{E_{cy}} \left(\frac{a^2 + (a-t)^2}{a^2 - (a-t)^2} - \mu_{cy} \right). \quad (24)$$

将式(22)代入本构方程(23), 可得

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}. \quad (25)$$

光纤中光波相位的变化 $\Delta\varphi$ 受两个相互独立的物理机制影响.

1) 光纤几何形变效应: 当光纤长度 L 发生改变量 ΔL 时, 直接导致的光程变化可使相应的相位偏移, 其关系式为

$$\Delta\varphi_{11} = \beta\epsilon L. \quad (26)$$

2) 光纤材料光弹效应: 作用于光纤的轴向应变 S 可改变其纤芯材料的折射率 n . 该折射率变化量 Δn 可表示为

$$S = \begin{pmatrix} -\mu_f \epsilon \\ -\mu_f \epsilon \\ \epsilon \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{27}$$

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 \epsilon [(1 - \mu_f) P_{12} - \mu_f P_{11}]. \tag{28}$$

该折射率扰动 Δn 可导致附加相移

$$\Delta \varphi_{12} = L k_0 - \frac{1}{2} n^3 \epsilon [(1 - \mu_f) P_{12} - \mu_f P_{11}]. \tag{29}$$

因此舞动载荷经由薄壁外套结构对传感光纤的增敏作用, 最终在光纤中产生的总光相位漂移 $\Delta \varphi$ 是几何形变效应(式(26))与材料弹光效应(式(29))共同作用的结果, 即

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_{11} + \Delta \varphi_{12} = \beta \epsilon L - \frac{n^3 k_0 \epsilon L}{2} [(1 - \mu_f) P_{12} - \mu_f P_{11}]. \tag{30}$$

2.4 舞动灵敏度模型理论推导

振动传感灵敏度主要取决于薄壁增敏管的光纤缠绕长度 L 、结构尺寸(外径 a 和壁厚 t)和材料特性(弹性模量 E 和 Poisson 比 μ)。根据式(30), 在管材其他特性参数固定的条件下, 系统对振动的响应灵敏度与光纤缠绕长度 L 呈线性正相关。因此, 理论上可通过延长 L 有效提升灵敏度。但在工程实践中, 光纤传感单元的长度通常受限于检测系统。另一方面, 薄壁管材料的选择对其增敏性能至关重要, 主要取决于材料固有的弹性模量 E 和 Poisson 比 μ 。不同舞动增敏材料的弹性模量和 Poisson 比列于表 1。此外, 在传感器设计初期阶段, 需对薄壁管的几何尺寸参数(外径 a 和壁厚 t)进行综合考量与优化设计, 这是实现高性能振动传感的核心环节。

表 1 不同舞动增敏材料的弹性模量和 Poisson 比

Table 1 Elastic modulus and Poisson's ratio of different dancing sensitization materials

材料	弹性模量/MPa	Poisson 比	材料	弹性模量/MPa	Poisson 比
钛合金	96 000	0.36	铝合金	71 000	0.33
碳纤维	23 000	0.23	聚碳酸酯	24 000	0.37

本文选用聚碳酸酯(PC)作为薄壁覆材的制造材料。针对该材料, 设计 3 种外径分别为 20, 30, 40 mm 的套管。对每种外径调整其壁厚参数, 变化范围为 0.25~1 mm, 调整步长为 0.05 mm。薄壁套筒材料与光纤舞动灵敏度的关系如图 6 所示。由图 6 可见, 增加覆材外径尺寸可显著提升传感灵敏度。薄壁套筒厚度与光纤舞动灵敏度的关系如图 7 所示。由图 7 可见, 增大壁厚可导致灵敏度下降。

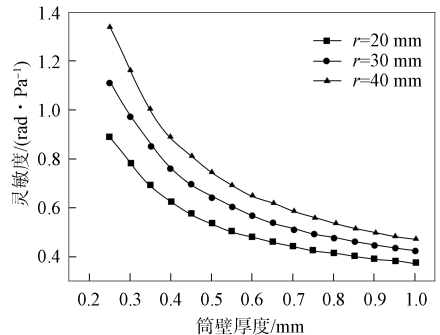
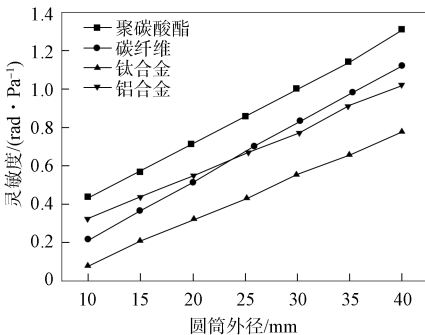


图 6 薄壁套筒材料与光纤舞动灵敏度的关系

图 7 薄壁套筒厚度与光纤舞动灵敏度的关系

Fig. 6 Relationship between material of thin-walled sleeve and fiber optic dancing sensitivity

Fig. 7 Relationship between thickness of thin-walled cylinder and fiber optic dancing sensitivity

采用聚碳酸酯(PC)材质制造增敏结构传感单元, 该材料的弹性模量 $E_{cy} = 2.4 \text{ GPa}$, Poisson 比

$\mu_{cy} = 0.37$, 结构外径为 30 mm, 壁厚为 1 mm. 标准通讯单模光纤参数列于表 2. 结合表 2 中的参数, 可得薄壁套筒增敏时单位长度光纤的应变灵敏度 $M_{pu} = 4.8 \times 10^{-2}$ rad/Pa.

表 2 标准通讯单模光纤参数

Table 2 Standard communication single-mode fiber parameters

参数	λ/m	μ_f	n	P_{11}	P_{12}
参数值	1.55×10^{-3}	0.17	1.456	0.121	0.270

在建立的数值模型中, 用 ANSYS 有限元分析软件构建声学传播域, 并将外围空气层定义为完全匹配层(PML), 以有效隔离计算区域内的声场与外部无限大空间. 在模型中添加振动激励源为 $0.01 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 进行动力学模拟. 舞动对增敏模型应变分布的影响如图 8 所示. 由图 8 可见, 在薄板结构状态下, 声压分布呈高度一致性. 声压级最大值为 88.881 dB, 最小值为 19.75 dB. 声压级分布呈明显的层级结构特征, 各层级内声场构型具有相似特征, 且相同高度位置的声压值接近. 因此, 声压级随距离增大呈线性衰减趋势.

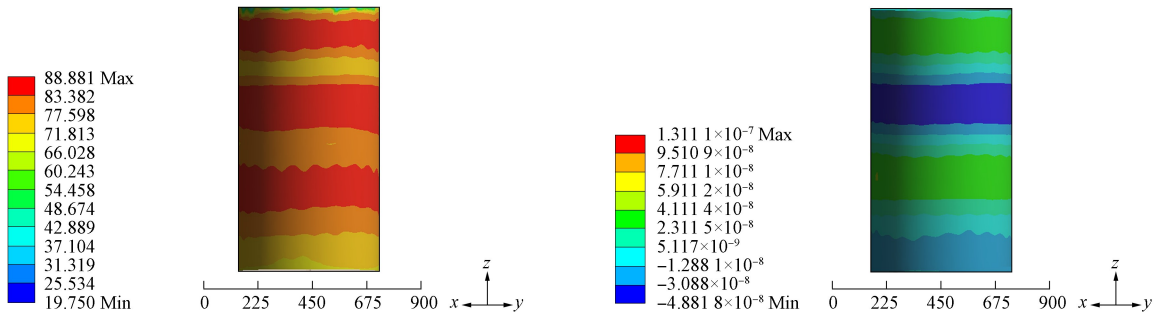


图 8 舞动对增敏模型应变分布的影响

Fig. 8 Effect of dancing on strain distribution of sensitization model

3 实验方案和数据分析

图 9 为双端 M-Z 光纤电网舞动检测器系统示意图. 用于监测光缆舞动的系统架构主要包含两个核心单元: 信号采集模块以及信号处理模块. 在实施光缆振动监测时, 需在其上部署高灵敏度传感单元, 以便实时捕获舞动信号. 该方案采用保偏光纤与保偏分路器构成的光学结构, 相较于传统单模光纤的传感装置, 可产生更稳定的干涉图样, 并显著提升测量灵敏度.

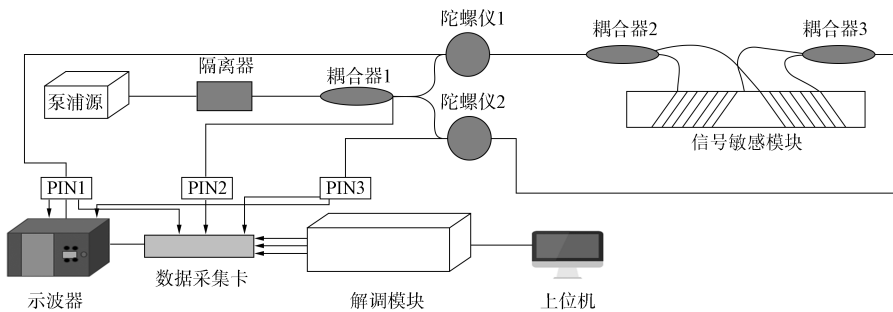


图 9 双端 M-Z 光纤电网舞动检测器系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of double-ended M-Z fiber optic power grid dancing detection system

由图 9 可见, 泵浦光源产生的 1550 nm 脉冲激光经 1×3 耦合器 1 分束后, 一路传输至探测器 PIN2 作为参考信号, 另外两路分别进入陀螺仪 1 和陀螺仪 2, 信号经陀螺仪完成交叉耦合后进入信号敏感模块. 进入陀螺仪 1 的光信号经过处理后仅能通过 1×2 光耦合器 1 的逆时针传输路径到达传感模块. 光缆振动波诱发的形变被光纤转换为光学相位调制信号. 两束反向传输光波的相位对称变化产生差分信号, 其中一路经 1×2 耦合器 3 顺时针传输至探测器 PIN3, 另一路从陀螺仪 2 逆时针传输至探测器 PIN1. 由于 M-Z 干涉仪非对称特性导致信号时延差异, 因此利用时差定位技术可确定振动波

位置,最终探测器将光信号转换为电信号输出至采集卡.经现场可编程门阵列(FPGA)将模拟信号数字化,并通过解调器传送至上位机接口.此外,差分信号也被传送至示波器进行提取分析.该传感模块包含冲击和脉冲抑制结构,可补偿外部因素对垂直悬挂质量块的影响,从而保障光缆振动信号监测的稳定性.

为建立电缆振动的数学模型并评估系统性能,构建一个小型振动试验平台.在该平台搭建过程中,灵敏度传感单元被横向固定于振动台表面,在其邻近位置安装高精度加速度计,用于实时采集数据.检测器相对灵敏度测试曲线如图 10 所示.由图 10 可见,在一定振动频率范围内,探测器响应幅度随激励频率升高而增强,但超出该范围后响应幅度下降,这与振动监测系统中各结构单元的固有谐振频率特性一致.当外界激励频率接近该谐振点时,系统内部的能量传递效能达到峰值,进而使响应灵敏度达到最高水平.当外部激励频率为 105 Hz 时,相对响应灵敏度达到其峰值 66.78 dB(rad/Pa).实验测得探测器固有频率为 105 Hz,与理论值 106.77 Hz 仅有约 1.65% 的相对误差.通过向电缆适配器施加等幅变频正弦激励信号,并利用示波器观测探测器 PIN 输出光强信号,结果如图 11 所示.由图 11 可见,不同频率的振动激励可产生明显差异的响应幅度,表明该探测器具备良好的频率分辨能力.

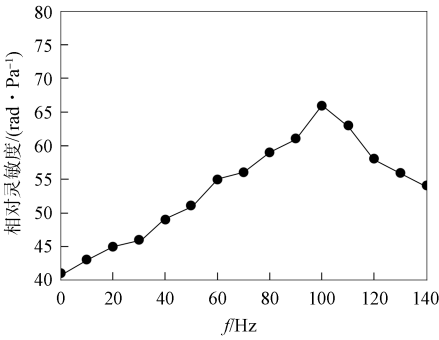


图 10 检测器相对灵敏度测试曲线

Fig. 10 Test curve of relative sensitivity of detector

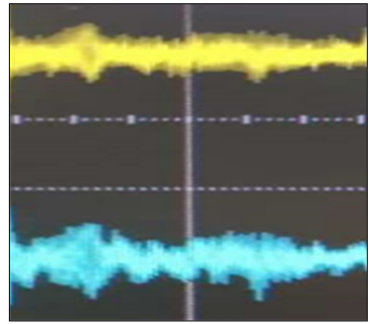


图 11 同一幅度下高频与低频响应波形图

Fig. 11 Waveform diagram of high frequency and low frequency responses at same amplitude

综上,本文设计并搭建了一套干涉式光纤电缆舞动监测系统,结合时间差定位技术与光电检测方法对该系统的信号敏感模块进行了有限元分析与三维建模研究.结果表明,仿真结果与理论计算结果相符,即传感模块的固有频率特性得到了准确预测.实验测试覆盖了 0~140 Hz 的振动频段,相关数据验证了系统设计的有效性,保障了宽频带范围内振动信号检测的稳定性.因此采用该无源光纤传感系统进行电缆舞动监测具有广阔的应用前景.

参 考 文 献

[1] 赵作利. 输电线路导线舞动及其防治 [J]. 高电压技术, 2004(2): 57-58. (ZHAO Z L. Transmission Line Galloping and Its Mitigation [J]. High Voltage Engineering, 2004(2): 57-58.)

[2] 张立春, 朱宽军. 输电线路覆冰舞动灾害规律研究 [J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(9): 13-19. (ZHANG L C, ZHU K J. Research on Disaster Patterns of Iced Transmission Line Galloping [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(9): 13-19.)

[3] 陈奕亮. 架空输电线路的舞动现象与对策分析 [J]. 集成电路应用, 2020, 37(3): 60-61. (CHEN Y L. Galloping Phenomenon and Countermeasure Analysis of Overhead Transmission Lines [J]. Applications of IC, 2020, 37(3): 60-61.)

[4] 王洁, 范俊红, 赵增保, 等. 冀北输电线路舞动灾害特征与气象条件分析 [J]. 干旱气象, 2019, 37(6): 1021-1027. (WANG J, FAN J H, ZHAO Z B, et al. Analysis of Galloping Disaster Characteristics and Meteorological Conditions for Transmission Lines in North Hebei [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(6): 1021-1027.)

[5] 叶雨田, 周家成, 孙伟君, 等. 输电线路舞动的研究现状和防治方法 [J]. 通信电源技术, 2014, 31(2): 88-91.

- (YE Y T, ZHOU J X, SUN W J, et al. Research Status and Prevention Methods of Transmission Line Galloping [J]. Telecom Power Technologies, 2014, 31(2): 88-91.)
- [6] 吕公河. 舞动勘探检测器原理和特性及有关问题分析 [J]. 石油物探, 2009, 48(6): 531-543. (LÜ G H. Principle and Characteristics of Seismic Exploration Geophone and Analysis of Related Problems [J]. Petroleum Physical Exploration, 2009, 48(6): 531-543.)
- [7] 王辉明, 宋志翔, 马国庆. MEMS 加速度传感器开发及在地球物理勘探中的应用 [J]. 勘探地球物理进展, 2005(3): 223-226. (WANG H M, SONG Z X, MA G Q. Development of MEMS Acceleration Sensor and Its Application in Geophysical Exploration [J]. Advances in Exploration Geophysics, 2005(3): 223-226.)
- [8] 周瑞. 基于光纤光栅应变传感器的输电线路舞动监测装置研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019. (ZHOU R. Research on Transmission Line Galloping Monitoring Device Based on Fiber Bragg Grating Strain Sensor [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.)
- [9] 周锐. 光纤地震波检测技术发展状况及展望 [J]. 科学技术创新, 2020(3): 15-16. (ZHOU R. Development Status and Prospects of Optical Fiber Seismic Wave Detection Technology [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(3): 15-16.)
- [10] 卜凡云. 基于 M-Z 干涉仪的光纤气体传感器 [D]. 无锡: 江南大学, 2012. (BU F Y. Fiber-Optic Gas Sensor Based on Mach-Zehnder Interferometer [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.)
- [11] 刘会杰, 宋继红, 衣文索, 等. 基于光纤干涉技术的电机故障监测系统设计 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(5): 125-130. (LIU H J, SONG J H, YI W S, et al. Design of Motor Fault Monitoring System Based on Optical Fiber Interference Technology [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 43(5): 125-130.)
- [12] 张叶浩. 基于 3×3 耦合器双马赫曾德分布式光纤传感系统的设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018. (ZHANG Y H. Design of Dual Mach-Zehnder Distributed Optical Fiber Sensing System Based on 3×3 Coupler [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.)
- [13] 夏菁, 江俊峰, 王双, 等. 用于分布式光纤声传感的薄壁圆筒声增敏实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 89-94. (XIA J, JIANG J F, WANG S, et al. Experimental Study on Thin-Walled Cylindrical Acoustic Sensitivity Enhancement for Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 89-94.)
- [14] 余双勇, 衣文索, 陈昊玥, 等. 分布式声传感型特种光纤结构设计 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 59-69. (YU S Y, YI W S, CHEN H Y, et al. Structural Design of Specialty Optical Fiber for Distributed Acoustic Sensing [J]. Chinese Journal Scientific Instrument, 2021, 42(3): 59-69.)

(责任编辑: 王 健)