doi: 10.13413/j.cnki.jdxblxb.2023282

基于双端 Mach-Zehnder 的电缆舞动监测系统设计

衣文索[1]，寇汉鹏[2]，聂大禹[2]，冯振华[2]，陈学峰[2]，王普莫[1]
(1. 长春理工大学 光电工程学院，长春 130022；2. 蒙东电网公司，呼和浩特 010020)

摘要：针对传统电缆舞动检测器在面对电磁干扰和持续供电时灵敏度低、信噪比差、安装复杂和需额外供电等问题，提出一种新型双端 Mach-Zehnder(M-Z)电缆扰动监测系统. 该系统采用双端光纤 M-Z 光路结构，可实现长距离、大尺度、多维度的在线监测和结构安全预警，从而实时定位舞动位置. 该系统的检波器力学单元采用硅胶弹性体和黄铜质量块推挽式结构，经 ANSYS 软件进行参数化建模和有限元分析后，得出其固有频率为 106.77 Hz，与实验所测数据的相对误差仅为 1.65%. 实验结果表明，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：M-Z 干涉仪；光纤传感；推挽式结构；有限元分析
中图分类号：TN247 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5489(2024)05-1248-06

Design of Seismic Wave Detection System Based on Double-Ended Mach-Zehnder

YI Wensuo[1], KOU Hanpeng[2], NIE Dayu[2],
FENG Zhenhua[2], CHEN Xuefeng[2], WANG Pumo[1]
(1. *School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*;
2. *Mengdong Power Grid Company, Hohhot* 010020, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low sensitivity, poor signal-to-noise ratio, complex installation, and the need for additional power supply of the traditional power grid dance detector in the face of electromagnetic interference and continuous power supply, we proposed a new double-ended Mach-Zehnder (M-Z) fibre optic seismic detection system. The system adopted double-ended fibre optic M-Z optical path structure, which could achieve long-distance, large-scale, multi-dimensional on-line monitoring and structural safety warning to locate the position of the dance in real time. The geophone mechanical unit of this system adopted the push-pull structure of silicone elastomer and brass mass block, and after parametric modelling and finite element analysis by ANSYS software, its intrinsic frequency was determined to be 106.77 Hz, with the relative error of only 1.65% compared to the experimental data. The experimental results show that 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: M-Z interferometer; fiber optic sensing; push-pull structure; finite element analysis

收稿日期：2023-07-05.

第一作者简介：衣文索(1971—)，男，汉族，博士，副教授，从事光纤传感、光电检测和激光雷达的研究，E-mail：yiws@jlu.edu.cn. **通信作者简介**：寇汉鹏(1977—)，男，汉族，博士，副教授，从事智慧电网和光纤传感的研究，E-mail：375142512@qq.com.

基金项目：国家自然科学基金(批准号：61675035).

特高压输电线路电缆由于结冰或异常天气导致电缆不规则舞动，这种舞动会对电塔安全和电缆结构强度产生危害，因此电缆舞动是电网相关领域中导致损害较严重的一个重大问题. 近年来，我国的电缆舞动灾害主要发生于秦岭淮河以北的广大北方地区[1]. 电网相关建筑和设施分布广泛，所处自然环境复杂，在广泛多样的国土范围内极易遭受多种复杂的灾害破坏[2]. 电缆舞动是电缆结冰后因风向不同等原因导致冰层覆盖不均匀，使电缆产生自激振动现象，且由于电缆与铁塔有可能形成塔线耦联体系，从而放大舞动效应，增大损伤程度，因此该舞动现象具有舞动频率较低、但舞动幅度较大的特征[3]. 电缆舞动若未被及时检测出并进行相关维护，会导致线路舞动进一步扩大，严重损害线路运行安全，使停电现象频发[4].

传统电缆舞动检波器多数采用力负反馈结构，虽然其检波指数较突出且可记录大量数据，但由于其采用的传统反馈结构中含有大量电子元件，因此在使用过程中存在大量散粒噪声和热噪声，导致系统信噪比较低、响应速度较慢、动态特性较差以及不能随时断电等问题，作为新一代无源型电缆舞动波检波器，基于光纤干涉传感技术的光波检波器可将外界加速度信号转化为光相位的变化进行解调[5-7]. 该波形检测器在结构设计、探测相关微弱信号、多种传感器系统集成等方面具有显著优势，同时因其使用电子元件相对较少，从而避免了传统舞动仪需面临环境和噪声干扰等问题，仅依靠光学元件使检波器具有结构紧凑、复杂性低和操作简单等优点，使其在电缆舞动监测领域具有广泛的应用前景[8-9]. 常见的检波器敏感结构主要分为平面型碟式与芯轴型圆柱式两种结构[10].

基于 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪受光器件回波和光纤中后向散射光的影响较小，以及在低频振动测量区域中芯轴型敏感结构比平面型结构具有更佳的工作特性[11-12]，本文设计一种基于双端 M-Z 干涉技术的光纤电缆舞动检波器，敏感单元采用弹性体缠绕光纤线圈所形成的推挽式结构. 通过理论分析和实验测试，验证光纤传感技术的优势以及新型双端 M-Z 光纤电缆舞动检波器良好的监测性能.

1　基本原理

M-Z 干涉仪原理如图 1 所示. 当 M-Z 干涉仪的传感光纤受到电缆舞动信号扰动时，会导致光传输中心纤芯产生相位偏移，从而实现电缆舞动加速度信号对光纤中传输光的相位调制.

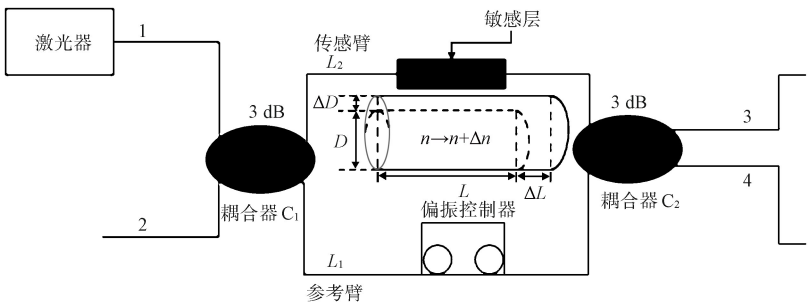


图 1　M-Z 干涉仪原理

Fig. 1　Principle of M-Z interferometer

由图 1 可见，M-Z 干涉仪由两个 3 dB 耦合器 C_1 和 C_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，L 表示光纤总长度，n 表示光纤折射率，D 表示光纤纤芯直径，ΔL，Δn，ΔD 分别表示它们产生的应变变化量[13].

当其入射光振幅为 E_t，频率为 ω，初始相位差为 φ_0 时，理想状态下光纤无振动作用时输出为

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

在实际应用中，当光纤受外界振动影响时，产生的相位移动可近似表示为

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

其中 $\Delta\varphi_\varepsilon$ 表示光纤长度弹性形变导致的相位移动，$\Delta\varphi_s$ 表示光纤折射率变化产生的相位移动. 弹性形变主要考虑 z 方向长度变化导致的相位变化，弹光效应需分别考虑石英光纤的弹光张量和应变张量. 两项的相位变化分别为

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

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

将式(3)和式(4)代入式(2)即可得外界扰动导致的总相移量

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

当传感光纤受外界振动影响时，会产生相位差 $\Delta\varphi$. 此时，传感光纤的输出信号可表示为

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

M-Z 干涉仪在外界无应变变化时的两相干光初始相位差为 $\pi/2$，由于干涉仪引入 $\Delta\varphi$ 的相位差将导致干涉光强变化，因此可通过分析干涉光强的变化得到结构体所产生加速度信号幅度的变化.

2 检波器结构理论及有限元分析

2.1 工作原理及理论说明

检波器基本组成模型如图 2 所示，其中质量块所用材质为黄铜，质量为 m，其与缠有光纤的薄壁柱体相连，并通过向容积腔内浇注液体硅胶与铝制外壳构成一个整体. 感应舞动的原理如下：电缆舞动导致质量块发生位移，使检波器内弹性柱体发生形变，推动光纤产生信号传输. 由于质量块上下两端光纤同时受力，发生形变产生信号传递，因此新型检波器理论上可达到传统推挽式检波器 2 倍以上的探测灵敏度. 由舞动产生的相关信号通过薄壁弹性柱体经上述过程转化为由光纤形中 2 束相干光之间的相位差，再由干涉仪将其转化为干涉光光强变化，并将干涉光光强变化作为观测电缆舞动时模块对舞动导致质量块加速度变化的敏感程度的直接探测信号.

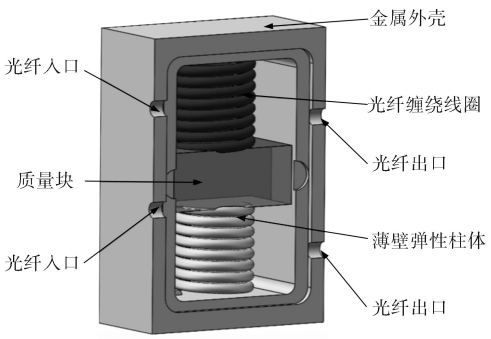


图 2 检波器基本组成模型

Fig. 2 Basic composition model of detector

若模块中质量块(电缆舞动)的加速度为 a，质量块位移导致光纤形变为 ε_f，则

$$ma = k\varepsilon_f, \tag{7}$$

其中 k 为结构体中质量块位移与光纤形变的关系系数，由于质量块两端连接的光纤变化状态相反，因此 2 束相干光的相位差变化为

$$\Delta\varphi_f = \frac{4\pi nd\varepsilon_f}{\lambda}, \tag{8}$$

其中 n 为敏感光纤的折射率，d 为缠绕在硅胶弹性体上的光纤长度，λ 为探测光光源波长. 由式(7)和式(8)可得模块的加速度灵敏度(rad/Pa)为

$$S_a = \frac{\Delta\varphi_f}{a} = \frac{4\pi ndm}{\lambda k}. \tag{9}$$

2.2 结构体有限元分析

该结构体模块采用的材料及其属性列于表 1. 为实现相同质量下密度大且体积小的特点，质量块选用高敏感材料；光纤选择小包层直径的单模光纤；弹性体采用薄壁圆筒.

表 1 标准通讯单模光纤参数

Table 1 Standard communication single-mode fiber parameters

参数	λ/m	μ_f	n	P_{11}	P_{12}
参数值	1.550×10^{-3}	0.17	1.456	0.121	0.270

传感光纤和参考光纤分别缠绕在与质量块和铝制基座相连的弹性体上，先将光纤、质量块和铝制基座共同构成推挽式结构，再将它们封装在铝制外壳内. 通过 ANSYS 软件对结构体进行有限元集总

参数分析.

当薄壁圆筒壁厚为 1 mm，薄壁圆筒外径从 10 mm增加至 40 mm，步长为 2 mm，采用不同材料的薄壁圆筒时，光纤应变灵敏度的变化如图 3 所示. 由图 3 可见，当采用薄壁圆筒增敏时，光纤具有较高的应变灵敏度.

根据对声振增敏单元的设计，薄壁圆筒外径设为 30 mm，壁厚为 1 mm，材料为聚碳酸酯(PC)，其弹性模量 $E_{cy}=2.4$ Gpa，Poisson 比 $\mu_{cy}=0.37$. 结合表 1 中的参数，可得薄壁圆筒增敏时单位长度光纤的应变灵敏度为 $M_{pu}=4.8\times10^{-2}$ rad/Pa.

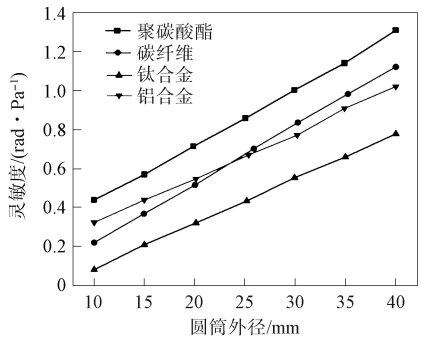


图 3　壁筒厚度与光纤应变灵敏度的关系

Fig. 3　Relationship between wall barrel thickness and fiber strain sensitivity

在 ANSYS 有限元仿真软件中对增敏模型进行网格划分后选择应变区域，将外界层设置为完美匹配层以分隔模拟的应变区域和无限应变范围. 添加振动源激励为 0.01 kg/(m·s)进行仿真分析. 振源对增敏模型的应变分布如图 4 所示. 由图 4 可见，薄壁圆筒具有较均匀的应变分布，最高振动值为 88.881 dB，最低振动值为 19.75 dB. 应变分布场呈阶梯型分布，每层应变强度相同，整体上应变强度近似于线性衰减分布.

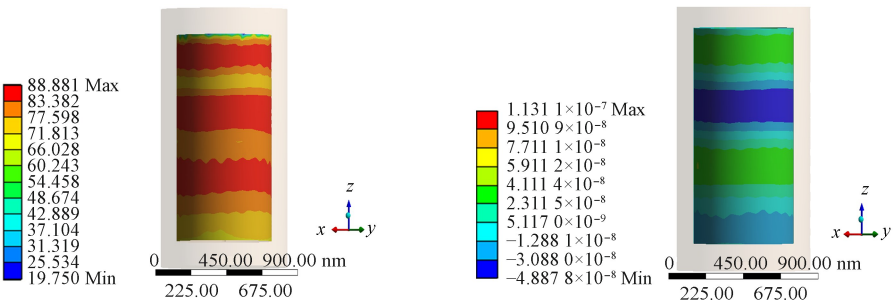


图 4　振源对增敏模型的应变分布

Fig. 4　Strain distribution of vibration source pair sensitization model

3　实验方案和数据分析

双端 M-Z 光纤电缆舞动检波器系统示意图如图 5 所示，基于 M-Z 干涉的电缆舞动监测系统由电缆舞动信号接收系统及线缆舞动信号处理系统组成. 通过将装有形变感知模块的铝制壳体与光纤一同埋入地下，用以实时监测电缆舞动信号. 该光路系统内含保偏光纤和保偏耦合器，该光路结构可使监测系统提高干涉信号的稳定性并提高其灵敏度阈值. 由图 5 可见，泵浦源产生 1 550 nm 的脉冲激光，通过信号隔离器后经 1×3 光耦合器 1 进行光纤分路，一路进入探测器 PIN2 并作为信号参考光进行输出，另外两路依次进入环形器 1 和环形器 2，经环形器交叉耦合处理后进入信号敏感模块. 进入环形器 1 的光经处理后只能按逆时针方向进入 1×2 耦合器 1，然后分成 2 束光分别进入模块内推挽式结构的上下 2 个光纤传感线圈的外端. 当电缆发生舞动时，会导致模块内质量块产生位移并导致薄壁弹性柱体形变，并通过光纤将形变量转换成光学相位信号. 由于 2 束光同时发生反向相位变化，因此形成一个差分信号. 该信号再经后端 1×2 耦合器 3 后，按顺时针方向进入探测器 PIN3. 同理，经环形器 2 的光也会按顺时针方向产生差分信号，并以逆时针方向进入探测器 PIN1，由上端 PIN 探测器进行探测. 双端 M-Z 光学结构的不对称性使信号光在不同时刻到达探测器，由时延定位技术即可定位出电缆舞动波信号的位置信息，3 个 PIN 探测器接收到的光信号经转换变成模拟电信号后一同进入数据采集卡中，经现场可编程门阵列(FPGA)将模拟信号处理成数字信号后，经解调模块发送给上位机显示界面. 同时对两路差动信号接入示波器进行提取分析. 由于该模块的结构采用了推挽式，因此压力和温度等环境因素对其上下两端光纤产生的作用幅度相同，但方向相反，从而该模块能抵消这些因素

导致的误差干扰和噪声，使系统能更稳定地对舞动信号进行监测，进一步提高了舞动监测系统的精确度.

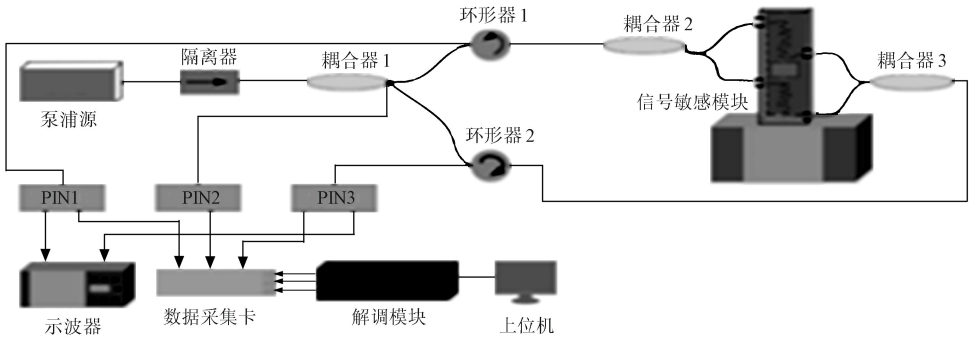


图5 双端M-Z光纤电缆舞动检波器系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of double-ended M-Z fiber geophone system

为检验该系统的监测性能，采用小型电缆舞动模拟台以模拟电缆舞动，将敏感模块水平放置在模拟台上，在其附近放置一个高精度加速度计记录振动台的加速度幅度. 采用对数形式对检波器输出的相位幅度变化 $\Delta\varphi_f$ 与振动台产生的加速度幅度变化 a 进行记录，结果如图6所示，其中横坐标为舞动频率，纵坐标为相对灵敏度. 由图6可见，在一定振动频率范围内，检波器的相对灵敏度近似趋近于一个单调递增线性曲线，随着电缆舞动频率的增大而增高，当舞动频率约为105 Hz时，相对响应灵敏度到达其峰值66.78 dB(rad/Pa)，之后随电缆舞动频率的增大而近似线性曲线降低. 因此检波器的固有频率为105 Hz，与理论值106.77 Hz仅有约1.65%的相对误差.

为验证该检波器对不同频率范围振动信号的分析能力，在其他相关条件不变的条件下，对其进行不同频率正弦波信号所带来效果差异性的对比实验，结果如图7所示. 由图7可见，检波器可清晰展现出不同频率信号在不同时刻的响应幅度变化，因此该检波器具有较好分辨不同频率振动信号的能力.

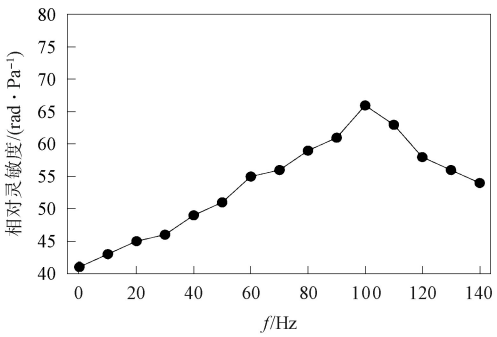


图6 检波器相对灵敏度测试曲线

Fig. 6 Relative sensitivity test curve of detector

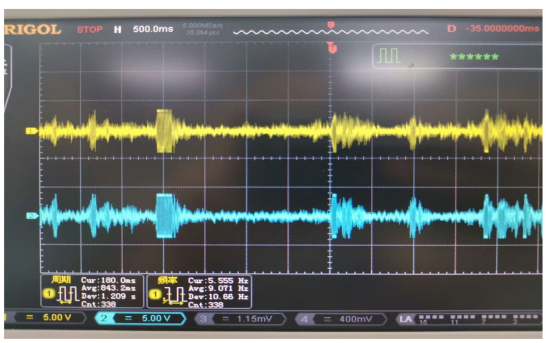


图7 同一幅度下高频与低频响应波形图

Fig. 7 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型光纤电缆舞动监测系统，该系统利用M-Z干涉仪、时间差测量及光电转换等原理和技术，并对该系统的信号敏感模块进行了有限元分析及三维建模. 通过有限元分析得到该敏感模块的固有频率与理论计算结果相符，且在实验过程中发现振动频率在0～140 Hz时系统能保持较好的相对灵敏度. 由实验和理论结果可见，该系统的信号响应稳定，且在不同频率下仍有较好的灵敏度. 因此采用无源光纤检波器进行电缆舞动监测具有广泛的应用前景.

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)：57-59.(ZHAO Z L. Galloping of Conductor of Transmission Line and Precaution[J]. High Voltage Engineering，2004(2)：57-59.)

[2] 张立春，朱宽军. 输电线路覆冰舞动灾害规律研究 [J]. 电网与清洁源，2012，28(9)：13-19.（ZHANG L C，ZHU K J. Research on the Law of Disasters Caused by 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. Analysis of Galloping Phenomenon and Countermeasures for 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. Galloping Characteristics of Transmission Line in Northern Hebei Province and Meteorological Elements Analysis [J]. Journal of Arid Meteorology，2019，37(6)：1021-1027.）

[5] USHER M J，GURALP C，BURCH R F. The Design of Miniature Wideband Seismometers [J]. Geophysical Journal International，1978，55(3)：605-613.

[6] USHER M J，BURCH R F，GURALP C. Wide-Band Feedback Seismometers [J]. Physics of the Earth and Planetar Interiors，1979，18(2)：38-50.

[7] KAMENEV O T，KULCHIN Y N，PETROV Y S，et al. Fiber-Optic Seismometer on the Basis of Mach-Zehnder Interferometer [J]. Sensors and Actuators A：Physical，2016，244：133-137.

[8] 王巍，丁冬发，夏君磊. 干涉型光纤传感用光电子器件技术 [M]. 北京：科学出版社，2012：55-67.（WANG W，DING D F，XIA J L. Interfering Optical Fiber Sensing with Optoelectronic Device Technology [M]. Beijing：Science Press，2012：55-67.）

[9] AL-HAYALI S K，SALMAN A M，AL-JANABI A H. High Sensitivity Balloon-Like Interferometric Optical Fiber Humidity Sensor Based on Tuning Gold Nanoparticles Coating Thickness [J]. Measurement，2021，170：108703-1-108703-10.

[10] 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 Outlook of Fiber Optic Seismic Wave Detection Technology [J]. Science and Technology Innovation，2020(3)：15-16.）

[11] GERGES A S，NEWSON T P，JONES J D C，et al. High-Sensitivity Fiber Optic Accelerometer [J]. Applied Optics，1990(4)：27-28.

[12] 卫扬道. 基于 FPGA 的双 M-Z 分布式光纤传感技术研究 [D]. 长春：长春理工大学，2017.（WEI Y D. Research on Dual M-Z Distributed Fiber Optic Sensing Technology Based on FPGA [D]. Changchun：Changchun University of Science and Technology，2017.）

[13] 刘宗麟，宋继红，刘会杰，等. 基于光纤干涉原理的转机监测振动传感器设计 [J]. 吉林大学学报(理学版)，2021，59(5)：1272-1277.（LIU Z L，SONG J H，LIU H J，et al. Design of Vibration Sensor for Rotor Monitoring Based on Fiber Optic Interference Principle [J]. Journal of Jilin University (Science Edition)，2021，59(5)：1272-1277.）

（责任编辑：王　健）