

引用本文:刘朋真,李相如,张金磊,等.用于混凝土结构裂缝监测的共轭弹簧式光纤传感器设计与测试[J].光通信技术,2026,50(4):72-76.

用于混凝土结构裂缝监测的共轭弹簧式光纤传感器设计与测试

刘朋真,李相如,张金磊,张家选

(周口师范学院 机械与电气工程学院,河南 周口 466001)

摘要:针对光纤传感器在混凝土结构裂缝长期监测中存在的单一方向测量及线性度不足等问题,设计一种用于混凝土结构裂缝监测的共轭弹簧式光纤传感器。首先,结合圆柱螺旋结构几何特性与光纤宏弯损耗效应,建立共轭弹簧式单模光纤裂缝传感器;其次,采用叠加不同传感区域单模光纤宏弯损耗的方法,构建单模光纤宏弯损耗与轴向位移间的传递函数;最后,通过标定及模型试验,验证共轭弹簧式单模光纤裂缝传感器在混凝土结构裂缝监测中的稳定性与可靠性。测试结果表明:共轭弹簧式单模光纤裂缝传感器具有良好的线性对应关系,且在量程范围内最大测量误差不超过5.4%。

关键词:混凝土结构;裂缝;光纤传感器;光时域反射技术

中图分类号:TH741 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)04-0072-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.011

Design and testing of a conjugate spring-based optical fiber sensor for crack monitoring in concrete structures

LIU Pengzhen, LI Xiangru, ZHANG Jinlei, ZHANG Jiaxuan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhoukou Normal University, Zhoukou Henan 466001, China)

Abstract: To address the issues of single-direction measurement and insufficient linearity in the long-term monitoring of cracks in concrete structures using optical fiber sensors, a conjugate spring-based fiber optic sensor for concrete structural cracks is designed. Firstly, based on the geometric characteristics of the cylindrical helical structure and the macro-bending loss effect of optical fibers, a conjugate spring-type single-mode optical fiber crack sensor is established. Secondly, by superimposing the macro-bending losses of single-mode optical fibers in different sensing regions, a transfer function between the macro-bending loss of the single-mode optical fiber and the axial displacement is constructed. Finally, the stability and reliability of the conjugate spring-type single-mode optical fiber crack sensor in monitoring cracks in concrete structures are verified through calibration and model tests. The test results indicate that the conjugate spring-type single-mode optical fiber crack sensor exhibits a good linear relationship, and the maximum measurement error within the measuring range does not exceed 5.4%.

Key words: concrete structures, crack, fiber optic sensors, optical time domain reflection technology

0 引言

裂缝是混凝土结构面临的常见病害之一,其不仅破坏结构的整体性,还会致使结构内部钢筋锈蚀,严重降低结构的耐久性与使用寿命。对其进行准确、及

时监测意义重大,为提前预警和防治措施的制定提供关键依据。

近年来,由于光纤传感器具有良好的耐腐蚀、抗电磁干扰特性,以及高灵敏度、高测量精度和准分布式监测能力等技术优势,在土木工程领域受到广泛关注^[1-3]。许多学者在利用光纤传感技术对裂缝监测研究方面做了大量的工作。王洋等人^[4]针对混凝土结构微裂缝,应用光纤弯曲损耗原理研究了缠绕半径对光信号传输性能的影响,建立了光纤损耗与裂缝宽度的数值模型。汪辛等人^[5]将布里渊光时域反射(BOTDA)技术用于混凝土结构裂缝监测,研究了多级荷载作用下混凝土梁表面和内部的应变分布规律。在此基础

收稿日期:2025-08-24。

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(25A560017)资助。

作者简介:刘朋真(1987—),男,河南商水人,博士,讲师,主要研究方向为分布式光纤传感技术、光信号处理技术及灾害预警技术。主持河南省高等学校重点科研项目“可测量边坡深部岩土体变形的新型柔性光纤传感装置研究”。



上,何勇等人^[6]通过几何分析得到了光纤应变和裂缝收缩与扩展的理论模型,并采用标定试验建立了由光纤测试应变反算裂缝收缩与扩展的数值方程。郭飞等人^[7]通过埋入式光纤探究了光纤传感器的传递效率及耦合性能。Zheng Yong 等人^[8]和 Lin Cheng 等人^[9]在光纤宏弯损耗原理的基础上,设计了新型混凝土结构裂缝测量传感器。然而,上述文献对于裂缝的双向测量方面研究较少,未考虑现场实际测量过程中裂缝可能存在收缩与扩展2种不同变形状态。裂缝不同的变形状态反映结构的受力状态,为裂缝损伤程度、潜在风险评估及测量设备的布设提供指导。

针对上述问题,本文设计一种用于混凝土结构裂缝监测的共轭弹簧式光纤传感器。该传感器的测量结构由单模光纤螺旋缠绕于弹簧表面构成,并通过建立位移导致的光纤宏弯损耗与位移量之间的映射关系,获取传感器的位移转换特性。

1 共轭弹簧式光纤传感器设计

1.1 宏弯损耗特性

宏弯损耗是利用单模光纤实现结构变形测量的理论基础。当单模光纤发生弯曲时,沿单模光纤弯曲半径方向将产生能量辐射,原有光波导中的传导模将变为辐射模,从而引起弯曲损耗^[10-12]。

为建立弯曲半径与宏弯损耗之间的定量映射关系,本文对 G.652.D 单模光纤在不同弯曲半径条件下的宏弯损耗进行了标定试验,测试装置如图 1 所示。试验中,将单模光纤放置于绕线板表面的半圆弧凹槽内以模拟不同曲率,信号采集装置采用光时域反射仪(OTDR)。OTDR 发射光信号波长为 1 310 nm,测量脉宽为 10 ns,测量精度为 0.01 dB。

通过大量的试验,测得单模光纤单位长度宏弯损耗与其弯曲半径的拟合关系,如图 2 所示。拟合得到的



图1 不同弯曲半径下单模光纤宏弯损耗测试装置

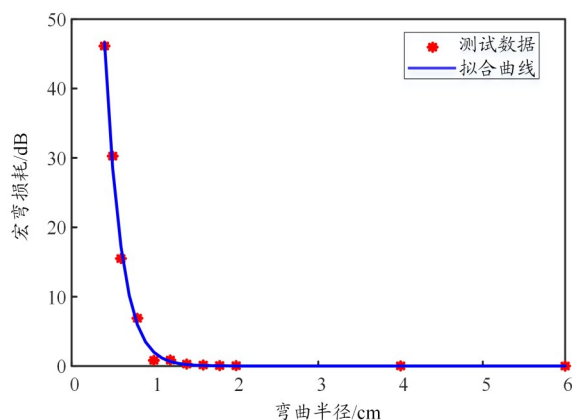


图2 单模光纤宏弯损耗与其弯曲半径的拟合关系

经验公式为

$$a_{c1310} = 257.9\rho^{-0.5}e^{-0.6009\rho} \quad (1)$$

式中: a_{c1310} 为波长为 1 310 nm 处的单位长度宏弯损耗, ρ 为曲率半径。该式表明宏弯损耗与曲率半径呈负指数关系,为后续传感器几何参数设计提供了定量依据。

1.2 传感器结构与传感模型

1.2.1 结构设计

为解决传统光纤裂缝传感器存在的单向测量及非线性响应问题,本文设计了一种共轭弹簧式光纤传感器,其结构如图 3 所示。该传感器主体由 2 根高弹性螺旋弹簧构成,单模光纤通过塑料毛细管以螺旋方式分别缠绕于 2 根弹簧表面,形成传感区域 I 与传感区域 II。2 根弹簧采用共轭布置,使 2 个传感区域对同一裂缝变形产生互补性响应。当裂缝发生拉伸或压缩时,两传感区域的光纤曲率呈反向变化,导致光损耗互补性增减。2 个传感区域产生的光损耗通过 OTDR 进行分布式同步测量。通过差分计算,可有效抑制共模干扰,从而克服传统传感器单向测量的缺陷,实现光功率损耗的线性响应。此外,该传感器利用高弹性弹簧变形范围大、力学性能稳定的特点,可通过设置不同的初始弯曲损耗与缠绕节距,灵活调节测量灵敏度与测量范围,以适应不同变形尺度与分布特征的混

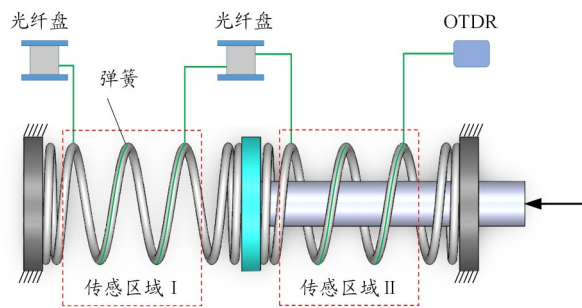


图3 传感器结构示意图

刘朋真,李相如,张金磊,等:用于混凝土结构裂缝监测的共轭弹簧式光纤传感器设计与测试

凝土裂缝监测需求。

1.2.2 几何建模

共轭弹簧式光纤传感器通过检测附着于弹簧表面的单模光纤所产生的宏弯损耗变化,来实现对外界物理量的测量。单模光纤的直径为0.125 mm(与弹簧线径相差较大),其对测量结果的影响可以忽略^[13-14],因此,将单模光纤等效为圆柱螺旋线。传感器轴向变形前几何模型如图4(a)所示。其中, p 为螺距, D 为直径。

假设共轭弹簧式单模光纤裂缝传感器发生轴向位移为 s 的变形,如图4(b)所示。弹簧发生轴向变形过程中,弹簧长度不发生变化,螺距均匀变化^[15]。将传感区域 I 单圈螺旋光纤进行展开,可以得到直角边为 πD_I 、 p_I 及 l 的直角三角形,如图4(c)所示。由直角三角形的几何关系,传感区域 I 螺旋光纤的曲率半径 ρ_I 为

$$\rho_I = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - \frac{t^2 + 2pt}{\pi^2} \left[1 + \frac{(p-t)^2}{\pi^2 D^2 - t^2 + 2pt} \right]} \quad (2)$$

同理,将传感区域 II 单圈螺旋光纤进行展开,如图4(d)所示。结合传感区域 II 螺旋光纤的直径 D_{II} 及螺距 p_{II} ,可以得到其曲率半径 ρ_{II} 。

将 ρ_I 和 ρ_{II} 分别代入式(1),即可得到两传感区域单位长度螺旋光纤的宏弯损耗变化量。同时,将两区域的宏弯损耗变化量叠加,可建立传感器轴向位移与总宏弯损耗之间的映射关系。

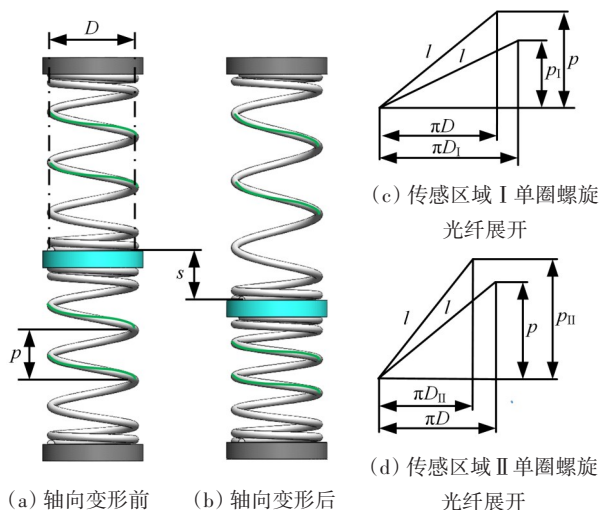


图4 传感器的几何模型

2 标定试验

2.1 试验方案

为验证共轭弹簧式光纤传感器的传感性能及传

递函数有效性,本文搭建了标定试验平台,如图5所示。试验采用单向加载方式,通过精密螺杆驱动加载杆对传感器施加轴向位移,模拟裂缝变形过程。

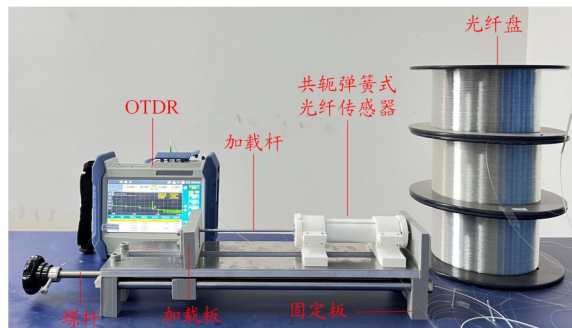


图5 传感器标定试验平台

共轭弹簧式光纤裂缝传感器两端固定,从一侧进行加载,随着驱动杆的不断推进,传感器产生相应的变形。光信号经过不同的传感区域后返回 OTDR。传感器整体长度为20 cm,传感区域 I 与传感区域 II 中弹簧长度均为6 cm,螺距均为1 cm,直径均为12 mm,有效缠绕圈数均为2圈。

2.2 试验结果分析

为了研究共轭弹簧式光纤传感器在混凝土结构裂缝测量过程中的传感性能,试验采用0.5 cm步长对传感器进行轴向位移加载,待系统稳定后记录其宏弯损耗值,分别完成5次循环加载过程,并取其平均值。根据宏弯损耗变化量与加载位移的对应关系,构建拟合曲线,并采用决定系数 R^2 评估线性度,结果如图6所示。可以看出,在轴向位移加载过程中,传感区域 I 中的宏弯损耗变化量随位移增加呈上弯曲趋势,经二次拟合计算,其 $R^2=0.78$;传感区域 II 中的宏弯损耗变化量随位移增加呈下弯曲趋势,得到 $R^2=0.82$ 。2个区域的非线性趋势相反,验证了1.2.2节中共轭结构几何互补性理论分析的正确性。

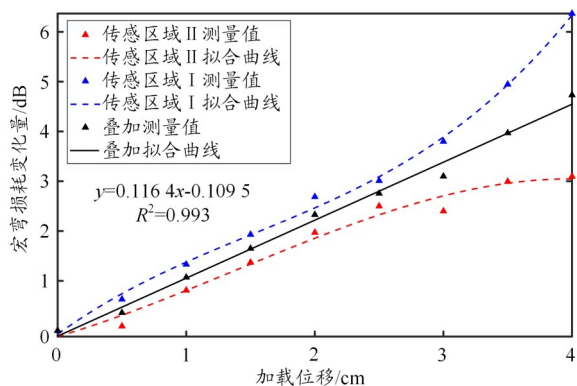


图6 加载位移与宏弯损耗变化量拟合曲线

为改善拟合曲线的线性度,本文将传感区域 I 与传感区域 II 中的宏弯损耗变化量进行叠加。叠加光损耗变化量与加载位移拟合曲线的决定系数为 0.993。对于传感区域 I,线性度提升约 27.3%;对于传感区域 II,线性度提升约 21.1%。这一结果证实了共轭弹簧结构通过非线性误差抵消机制显著改善了传感器的线性响应特性,与理论模型预测一致。因此,通过该种宏弯损耗变化量叠加的方式,可显著提高传感器特性曲线的线性度。

3 模型试验

3.1 测量误差分析

为了验证共轭弹簧式光纤传感器在混凝土结构健康监测中的可行性,本文搭建了裂缝模型试验平台,如图 7 所示。试验采用 2 块混凝土块的相对位移模拟实际混凝土结构中的裂缝行为。混凝土试件尺寸为 60 cm × 30 cm × 10 cm(长×高×宽)。将传感器安装于裂缝模型中,传感器底座固定于一侧混凝土块表面,加载杆固定于另一侧混凝土块表面,并确保在安装及加载过程中,底座与加载杆始终保持与混凝土块表面平行。通过一侧混凝土块的正向加载模拟裂缝收缩,反向加载模拟裂缝扩展。以 1 cm 为步长,依次从 0 位正向加载至 4 cm,再从 0 位反向加载至 -4 cm。待系统稳定后,记录各加载位移节点对应的宏弯损耗值,结果如表 1 所示。可以看出,两传感区域的宏弯损耗随裂缝位移呈显著的互补增减特征,且叠加损耗与位移之间具有良好的线性关系。基于叠加损耗反算的测量位移与加载位移的最大测量误差为 5.4%。试验结果表明,该传感器能够实现线性响应与双向测量,验证了其在裂缝监测中的可行性。

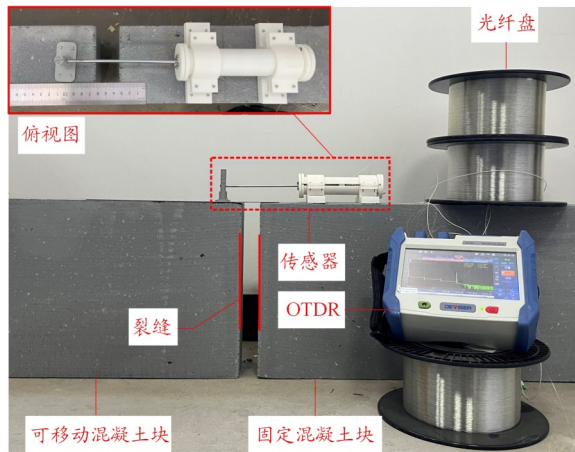


图7 共轭弹簧式光纤传感器裂缝模型试验平台

表1 共轭弹簧式光纤裂缝传感器宏弯损耗及测量误差

加载 位移/cm	宏弯损耗/dB			测量 位移/cm	测量 误差/%
	传感区域 I	传感区域 II	叠加		
4	6.37	3.01	4.69	4.12	3.1
3	4.49	2.66	3.57	3.16	5.4
2	2.69	1.97	2.34	2.10	5.0
1	1.05	0.94	0.99	0.95	4.9
0	0.52	0.19	0.36	—	—
-1	1.08	1.12	1.12	-1.05	5.2
-2	1.77	2.48	2.13	-1.92	3.9
-3	2.73	4.33	3.53	-3.13	4.2
-4	2.89	6.10	4.50	-3.96	1.0

3.2 裂缝收缩与扩展变形状态识别

在混凝土结构裂缝监测过程中,为了准确识别裂缝的收缩与扩展 2 种不同变形状态,本文将收缩与扩展变形状态与传感器不同传感区域进行关联,通过对比不同传感区域宏弯损耗值的大小,识别裂缝处于收缩或扩展状态。裂缝收缩与扩展均为 2 cm 工况下光纤链路损耗如图 8 所示,结合表 1 的测量数据,当裂缝处于收缩状态时,传感区域 I 宏弯损耗(2.69 dB)大于传感区域 II 宏弯损耗(1.97 dB);当裂缝处于扩展状态时,传感区域 I 宏弯损耗(1.77 dB)小于传感区域 II 的宏弯损耗(2.48 dB)。因此,通过对比不同传感区域宏弯损耗值的大小,可以实现对裂缝收缩与扩展不同变形状态的准确识别。

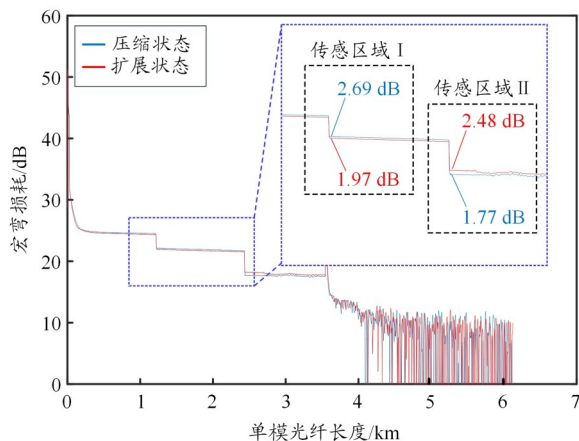


图8 收缩与扩展均为 2 cm 工况下光纤链路损耗

4 结束语

本文设计了一种适用于混凝土结构裂缝监测的共轭弹簧式光纤裂缝传感器,并分别通过标定试验与模型试验系统评估了其传感性能。主要结论如下:

1) 基于 OTDR 技术的共轭弹簧式单模光纤裂缝

刘朋真,李相如,张金磊,等:用于混凝土结构裂缝监测的共轭弹簧式光纤传感器设计与测试

传感器,能够有效拓展光纤传感技术在岩土工程健康监测中的适用性,为混凝土结构裂缝监测提供了可行方案。

2)共轭弹簧式结构设计显著抑制了宏弯损耗变化量对传感器轴向位移响应的非线性特征。通过比较不同传感区域的宏弯损耗值,本文提出了一种能够区分裂缝收缩与扩展过程的识别方法。在传感器量程范围内,其最大测量误差不超过5.4%。

3)该传感器结构简单,信号采集自动化程度高,为构建大型复杂混凝土结构的裂缝远程监测系统提供了新的技术思路。

此外,后续研究将探究传感器在复杂环境下的长期稳定性,并基于无线传感组网技术,实现其在大型结构分布式监测中的工程应用。

参考文献:

- [1] 唐杰,邵国霞.一种面向结构沉降的改进型FBG传感器[J].光通信技术,2024,48(4):36-41.
- [2] 施羿,封皓,曾周末.Φ-OTDR型分布式全光纤传感器研究进展[J].自动化仪表,2017,38(7):70-74,79.
- [3] Damiano E, Battipaglia M, De Cristofaro M, et al. Innovative extenso-inclinometer for slow-moving deep-seated landslide monitoring in an early warning perspective[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(8): 5359-5371.
- [4] 王洋,高瑞,刘炜.基于光纤弯曲损耗的混凝土裂缝位移传感器设计[J].传感器与微系统,2023,42(3):87-90.
- [5] 汪辛,丁志凯,刘胜春.基于BOTDA的混凝土结构裂缝识别试验研究及工程应用[J].公路交通科技,2023,40(9):151-157.
- [6] 何勇,姜帅,毛江鸿,等.结构裂缝的分布式光纤监测方法及试验研究[J].土木建筑与环境工程,2012,34(1):1-6.
- [7] 郭飞,孔恒,侯公羽,等.埋入式光纤的应变传递理论及试验研究[J].传感技术学报,2025,38(4):603-609.
- [8] Zheng Yong, Yu Jie, Zhu Zhengwei, et al. Design, sensing principle and testing of a novel fiber optic displacement sensor based on linear macro-bending loss[J]. Optik, 2021, 242: 167194.
- [9] Lin Cheng, Li Yaming, Ma Yuming, et al. The sensing principle of a new type of crack sensor based on linear macro-bending loss of an optical fiber and its experimental investigation[J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2018, 272: 53-61.
- [10] 游善红,郝素君,殷宗敏,等.单模光纤中弯曲损耗的测试与分析[J].光子学报,2003,32(4):409-412.
- [11] Widiyatmoko B, Rofianingrum M Y, Hanto D, et al. Macrobending loss in wrapped fiber optic for load detections[J]. Applied Optics, 2022, 61(13): 3786-3792.
- [12] Al-Lami S S, Atea H K, Salman A M, et al. Adjustable optical fiber displacement-curvature sensor based on macro-bending losses with a coding of optical signal intensity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 373: 115403.
- [13] Wang Jiawei, Han Yifeng, Cao Zhenglong, et al. Applications of optical fiber sensor in pavement engineering: a review[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132713.
- [14] Zhao Lizhi, Tang Fujian, Li Gang, et al. Crack width measurement with OFDR distributed fiber optic sensors considering strain redistribution after structure cracking[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2024, 14(4): 1091-1109.
- [15] Meng Lingjian, Wang Linbing, Hou Yue. Development of large-strain macrobend optical-fiber sensor with helical-bending structure for pavement monitoring application[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 32(3): 04019021.