

一种大量程光纤弯曲损耗型线性位移传感器研究

郑勇, 肖旺, 朱正伟*

重庆大学土木工程学院, 重庆 400045

摘要 针对很多大型工程结构存在大变形但仍可以发挥功能性作用的特点, 基于光纤弯曲损耗传感原理, 设计了一种可用于位移测量的大量程、结构简单的线性传感器。从理论上证明了测量位移与光纤弯曲损耗之间的线性关系, 并推导出表达式, 开展了一系列标定试验和性能试验。试验结果表明, 该传感器的测量范围为 0~200 mm, 灵敏度为 $0.1668 \text{ dB}\cdot\text{mm}^{-1}$, 最小分辨位移为 0.06 mm, 重复性误差为 0.26%, 迟滞性误差为 2.22%。所设计的传感器可用于结构的开裂测量和大型工程的连续监测, 具有良好的应用前景。

关键词 光纤光学; 位移传感器; 弯曲损耗; 大量程范围; 结构监测

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1206002

Research on an Optical Fiber Linear Displacement Sensor Based on Bending Loss for Use over Large Range

Zheng Yong, Xiao Wang, Zhu Zhengwei*

School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

Abstract It is the truth that many large-scale engineering structures have large deformation while they are still functional. Based on the bending loss characteristics of an optical fiber, we present a large range and linear sensor with simple construction for displacement measurement. The linear relationship between the measured displacement and the bending loss of an optical fiber is proved theoretically, and its expression is derived. A series of calibration experiments and performance tests are conducted. The experimental results show that the sensor is characterized by a wide measurement range of 0–200 mm, a sensitivity of $0.1668 \text{ dB}\cdot\text{mm}^{-1}$, a minimum displacement resolution of 0.06 mm, a repeatability error of 0.26%, and a hysteresis error of 2.22%. The designed sensor can be used for the crack detection and the continuous monitoring for large-scale engineering structures and has a promising application prospect.

Key words fiber optics; displacement sensor; bending loss; large range; structural monitoring

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 280.4788; 120.4640

1 引言

位移检测是测量技术最基本的测量项目之一^[1]。传统的机械、电磁式位移传感器受精度、电磁干扰的制约, 不适合工程现场应用。而光纤传感监测技术将位移信号转化为在光纤中传播的光信号, 具有集“传”与“感”为一体、抗电磁干扰能力强、体积小、质量轻、便于组成传感网络、可测量多种信号及信息量大等优点, 在桥梁、大坝、隧道、道路、房屋、管道等结构健康监测领域发挥着越来越重要的作用^[2-4]。

光纤传感器按光波在光纤中被解调的原理可以分为光强调制型、相位调制型、偏振态调制型和波长调制型等几种形式。其中基于光纤弯曲损耗原理的光纤位移传感器属于光强调制型光纤传感器。光纤弯曲损耗型传感器利用光纤弯曲变形时, 在其间传播的光波会发生功率衰减^[5]。该类型传感器在1980年被Fields等^[6]首次提出后, 获得了越来越大的发展。在国外, Sienkiewicz等^[7]首次提出了具有8字形非周期性弯曲调制结构的光纤位移传感器, 其外部物理量可以引起光纤弯曲半径的改变, 具有较高的灵敏度($475 \text{ mV}\cdot\text{mm}^{-1}$)和较宽的测量位移

收稿日期: 2019-12-06; 修回日期: 2019-12-09; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2019CDXYTM0033)、国家自然科学基金(51478066)、重庆市自然科学基金(cstc2018jsx-msybX0271)

* E-mail: zqiao99@126.com

响应(30 mm)。在国内,罗志会等^[8]提出了在橡皮管上螺旋式缠绕光纤的传感结构,利用外部变形引起缠绕在橡皮管上的光纤的弯曲半径的改变,进而导致弯曲损耗,传感器的测量量程为 17 mm。Zhu 等^[9]研发了一种用于滑坡监测的光纤位移传感器,光纤被植入毛细钢管中并在毛细钢管末端形成蝴蝶结弯曲调制结构。当监测岩土体发生剪切变形时,毛细钢管发生弯折,毛细钢管末端的蝴蝶结尺寸变小,通过捕捉光纤的弯曲损耗,可获得毛细钢管的回缩位移量,从而简单测量出待测边坡钻孔底部到顶部的剪切区位移。研究表明,该传感器具备监测边坡变形的能力,同时具有 30.6 mm 的测量量程、3.3 mm 的初始测量精度和较低的经济成本。包腾飞等^[10]提出了一种环形裸光纤传感器,该传感器的传感段光纤采用一种裸光纤线圈,裸光纤线圈的两端分别被固定于混凝土结构可能发生裂缝的两侧,当监测结构产生裂缝时,裸光纤线圈的直径减小,从而引起光纤弯曲损耗,该传感器的监测范围为 26 mm。杨杰等^[11]设计了一种用于监测结构裂缝变形的光纤环传感器,结构出现裂缝会导致光纤环弯曲结构的几何尺寸发生变化,通过捕捉弯曲损耗,可感知裂缝的扩展与闭合,测量位移可达 20 mm。为了监测路面在实际载荷作用下的力学响应,Meng

等^[12]提出了一种宏观弯曲损耗调制方法,即在不同直径的铝棒上螺旋缠绕光纤,结构的变形引起缠绕在铝棒上的光纤线圈曲率发生变化,缠绕光纤进而产生弯曲损耗,此项研究成果对研制大应变光纤岩土工程监测系统具有重要意义。然而,在上述研究中,光纤损耗与应变、剪切位移及裂缝宽度的对应关系复杂,且测量量程较小,因此这些方法应用于大型实际工程中时局限性较大。

本文针对目前光纤弯曲损耗型传感器的不足,采用具有固定直径的圆形凹槽结构来保持光纤弯曲直径不变,并结合同心圆位移转换齿轮来扩大传感器量程,设计了一种大量程的线性光纤位移传感器。从理论上证明了该传感器的可行性,并通过一系列试验测试了传感器的各项性能指标,该新型光纤弯曲型位移传感器具有结构简单、解调设备经济及测量范围大的优点。

2 传感器结构与测量原理

2.1 传感器的结构设计

本文设计了一种基于光纤弯曲损耗的线性位移传感器,该传感器主要部件包括底座、位移转化齿轮、拉杆齿条、单模光纤、顶盖等,其结构如图 1 所示。

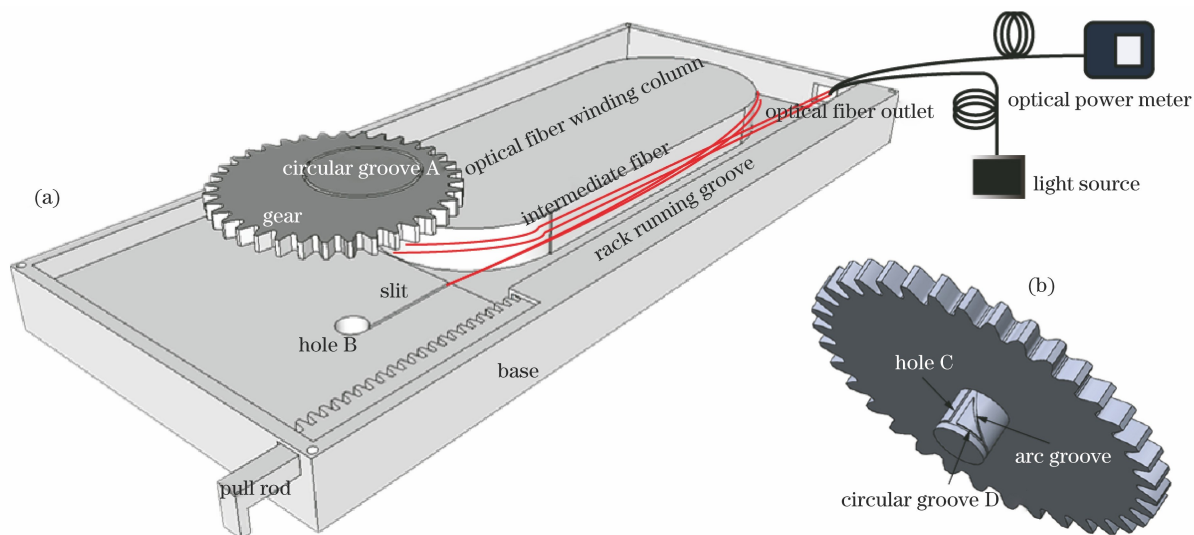


图 1 光纤位移传感器示意图。(a) 传感器结构;(b) 齿轮结构

Fig. 1 Schematic of optical fiber displacement sensor. (a) Sensor structure; (b) gear structure

底座上有引导并固定光纤运行轨迹的直线引导槽和圆形齿轮固定孔。直线引导槽与齿轮固定孔相切。在底座右侧有一光纤引出口,且底座下方预留有供拉杆齿条运行的齿条运行槽。

位移转化齿轮通过底座的齿轮固定孔被固定

在底座上。位移转化齿轮上有一圆柱形贯穿孔,贯穿孔与齿轮下部的弧形槽连通。光纤对折穿过齿轮上的贯穿孔,为防止光纤折断,对折部分光纤被固定于上部预留的圆环槽中,并通过齿轮下部的弧形槽,同时利用无影胶将光纤与齿轮上、下部

结构及贯穿孔固定,弯曲部分的光纤没有去除涂覆层。

光纤穿过贯穿孔后,部分与弧形槽固定。利用无影胶胶合引导槽内的两根光纤,光纤经直线引导槽导出,多余的过渡光纤被缠绕在光纤缠绕柱上,并通过光纤引出孔与光源和光功率计连接。

齿条置于底座的齿条运行槽内并与齿轮啮合,齿轮和齿条的模数均为 2,齿轮的齿数为 36,齿轮的分度圆与齿条的分度线相切。

上述所有结构通过顶盖被封装在底座内,这样可以有效地保护内部光纤。当拉杆齿条上作用有线性位移时,齿条会牵引齿轮转动,与齿轮固定的光纤会与齿轮一起做圆周运动,从而在齿轮下部的光纤圆形槽内形成一定长度的圆弧,进而使光纤的弯曲损耗发生变化。通过建立线性位移与光纤弯曲损耗的关系,可以基于光纤损耗信息来实时监测位移。同时通过改变小孔到齿轮旋转中心与齿轮分度圆的距离比值,则可以获得具有不同量程和精度的线性光纤位移传感器。

2.2 传感器测量原理

光纤发生弯曲后,在光纤中传播的光会发生模的变化与耦合,从而引起光功率强度的衰减。阶跃单模光纤单位长度上的弯曲损耗计算公式^[13]为

$$\alpha_c = A_c r^{-1/2} \exp(-Ur), \quad (1)$$

$$A_c \approx 30\Delta^{1/4} \lambda^{-1/2} (\lambda_{cf}/\lambda)^{3/2}, \quad (2)$$

$$U \approx 0.705 \frac{\Delta^{3/2}}{\lambda} \left(2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_{cf}} \right)^3, \quad (3)$$

式中: α_c 为单位长度上的弯曲损耗; A_c 和 U 为与光

纤种类和光源工作状态相关的量; r 为光纤曲率半径; Δ 为光纤的相对折射率差; λ 为工作波长; λ_{cf} 为截止波长。在实际应用中,单位长度光纤弯曲损耗的理论值与实际值存在一定的出入,故采用标定试验来确定其实际值。传感器所用的光纤是武汉长飞光学光缆股份有限公司生产的型号为 G652B 的单模光纤,利用波长为 1550 nm 的光源及光功率计对该光纤进行标定,其标定结果如图 2 所示。通过拟合得到的单位长度光纤经验损耗公式为

$$\alpha_{c1550} = 29.7252r^{-0.5} \exp(-0.69514r). \quad (4)$$

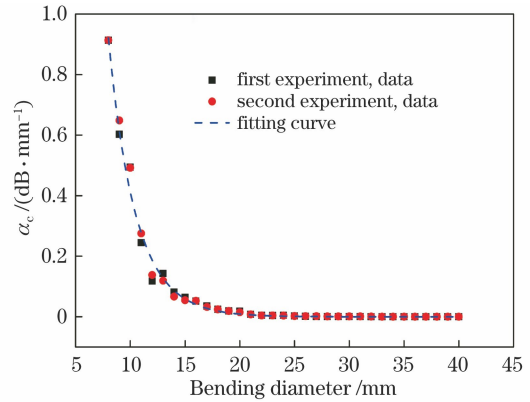


图 2 α_c 与弯曲直径的关系

Fig. 2 Relationship between α_c and bending diameter

传感器实物如图 3 所示,当齿轮上半径分别为 r' 和 R' 的同心圆共同绕圆心旋转角度 ω 时,它们端点扫过的弧长分别为 $S_{r'} = \omega r'$ 和 $S_{R'} = \omega R'$,设位移缩放系数为 T ,则

$$T = \frac{S_{R'}}{S_{r'}} = \frac{\omega R'}{\omega r'} = \frac{R'}{r'}. \quad (5)$$

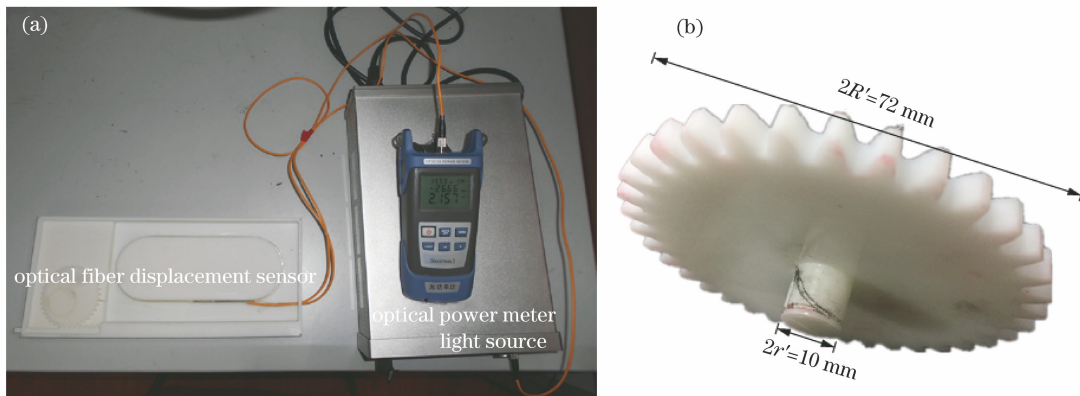


图 3 传感器实物图及齿轮尺寸。(a) 封装的传感器实物;(b) 齿轮尺寸

Fig. 3 Physical drawing of sensor and dimension of gear. (a) Encapsulated sensor; (b) gear size

由(5)式可知:位移缩放系数 T 仅与同心圆半径的比值有关。基于此原理并综合考虑传感器的量程与精度,本文设计了图 3 所示的齿轮结构,齿轮的分度圆半径 $R' = 36$ mm,在距齿轮中心 $r' =$

5.0 mm 的地方开一个直径为 1 mm 的贯穿孔,光纤从贯穿孔中穿出,并用无影胶将光纤与贯穿孔及部分光纤缠绕槽固定。当齿轮在齿条的传动作用下绕中心旋转时,光纤会在齿轮下部的光纤缠绕槽上形

成一段半径为 5.0 mm 的光纤圆弧。

当齿条上作用有线性位移 ΔL 时, 齿轮会产生弧长为 $\Delta S_{R'} = \Delta L$ 的圆弧形位移, 通过同心圆旋转位移缩放作用, 光纤产生的弧长变化为

$$\Delta S_{r'} = \frac{\Delta S_{R'}}{T} = \frac{r'}{R'} \Delta S_{R'} \quad (6)$$

由于光纤采用对折形式从贯穿孔中穿出, 故随齿轮一起做旋转运动的光纤为两根, 且光纤沿圆形绕槽运动的半径为 r' , 则产生的光纤弯曲损耗变化为

$$\Delta I_s = 2\alpha_{c,r'} \Delta S_{r'} = 2\alpha_{c,r'} \frac{r'}{R'} \Delta L, \quad (7)$$

式中: $\alpha_{c,r'}$ 为此时单位长度的光纤弯曲损耗。

在实际应用中, 只需通过测量和标注传感器的初始功率 I_0 , 以及当前位移 ΔL 下的光功率 $I_{\Delta L}$, 即可计算得到位移 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{R'}{2\alpha_{c,r'} r'} (I_0 - I_{\Delta L}) = K \Delta I_s, \quad (8)$$

式中: K 为传感器的标准传感系数, $K = \frac{R'}{2\alpha_{c,r'} r'}$ 。

3 传感器的试验标定

3.1 试验过程

为了验证所设计的线性位移传感器的可行性, 本文开展了传感器角度与损耗关系标定试验。标定试验主要用到的仪器设备有光功率计、波长为 1550 nm 的稳定光源、无影胶等。试验如图 3 所示, 将传感器的底座固定在试验平台上, 齿轮放置于底座的固定孔中, 光功率计和光源分别与传感器的光纤接头连接, 记录光功率计的初始读数。齿轮的齿数为 36, 每一个齿轮对应的角度为 10° 。试验中以 10° 为间隔转动齿轮, 来回往复加载和卸载, 旋转角度从 0° 开始直至 320° , 每一步稳定后读数时间为 1 min, 记录下旋转角度与相应的光功率值, 同时通过齿轮旋转角度计算出齿条的运行位移, 试验结果如图 4 所示。

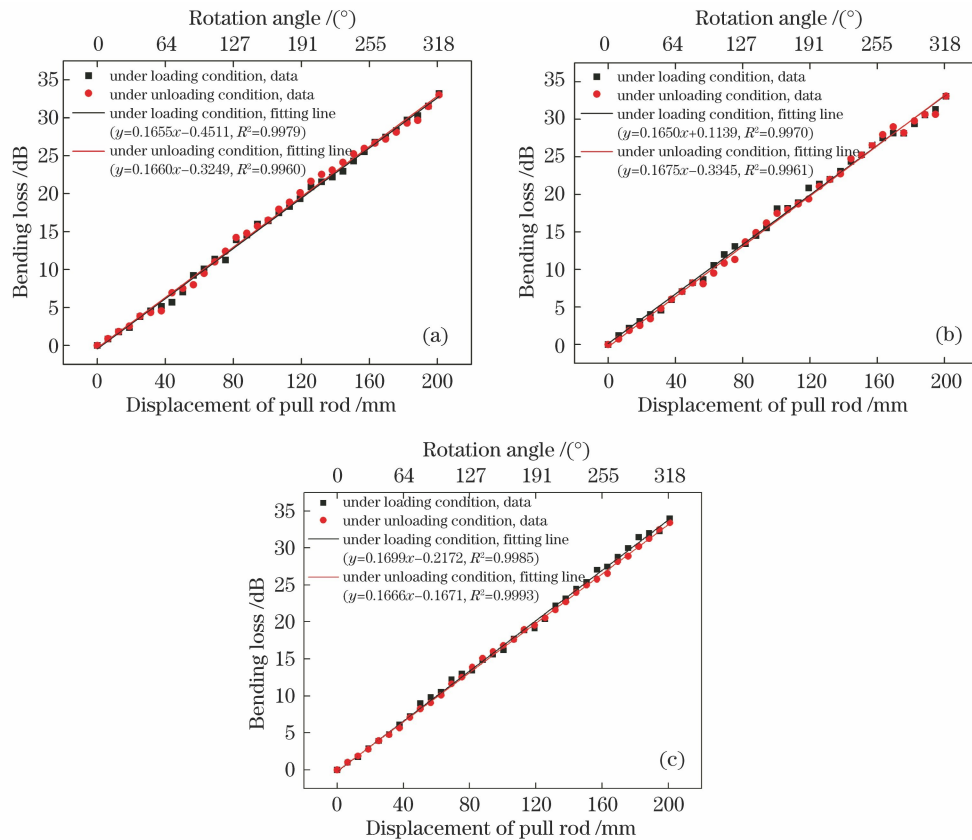


图 4 光损耗与位移的关系。(a) 测试 1; (b) 测试 2; (c) 测试 3

Fig. 4 Relationships between displacements and optical losses of calibration experiments.

(a) Test 1; (b) test 2; (3) test 3

3.2 试验结果分析

从三次重复性试验中可知, 传感器的测量位移与输出光损耗信号呈较好的线性关系, 相关系数 R^2

在 0.996 以上, 测量量程可达 200 mm。在同一型号传感器的所有可取试验数据中, 平均加载和卸载的输出光损耗与测量位移的线性关系式为

$$y_{(\text{loading})} = 0.1668x - 0.1848, R^2 = 0.9968, \quad (9)$$

$$y_{(\text{unloading})} = 0.1667x - 0.2755, R^2 = 0.9971, \quad (10)$$

式中: $y_{(\text{loading})}$ 为试验加载时传感器输出的光损耗; $y_{(\text{unloading})}$ 为试验卸载时传感器输出的光损耗; x 为拉杆位移。

因此, 本文设计的光纤位移传感器的加载和卸载灵敏度系数分别为 $0.1668 \text{ dB} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $0.1667 \text{ dB} \cdot \text{mm}^{-1}$; 取倒数后可得传感器的标定系数分别为 $K_{(\text{loading})} = 5.995 \text{ mm} \cdot \text{dB}^{-1}$, $K_{(\text{unloading})} = 5.998 \text{ mm} \cdot \text{dB}^{-1}$, 加、卸载时传感器标定系数的平均值与理论的位移传感器标准传感系数 $K = 8.759 \text{ mm} \cdot \text{dB}^{-1}$ 相比, 约低 31.5%。

当光纤受到均匀的应力作用时, 传导模场发生相应的变化, 传输过程中产生相应的损耗^[14]。光纤在弯曲之前处于自由状态, 但在缠绕过程中为保证缠绕均匀且具有拉应力, 光纤必须刚好卡在圆形槽中且在齿轮固定孔中运动。从试验数据可以看出, 位移与损耗具有良好的线性关系, 据此可推测携带拉应力的光纤在弯曲的同时会额外引起单位长度损耗。同时, 在传感器的制作过程中, 齿轮和齿条可能没有完全紧密咬合, 但这并不影响传感器的使用, 在实际使用时传感器的设计系数应该以试验值为准, 理论系数只作为参考。本文所提出的传感器的设计标准系数 K 取 6 个加、卸载试验数据的平均值, 即 $K = 5.996 \text{ mm} \cdot \text{dB}^{-1}$ 。因此, (8) 式可表示为

$$\Delta L = 5.996 \Delta I_s. \quad (11)$$

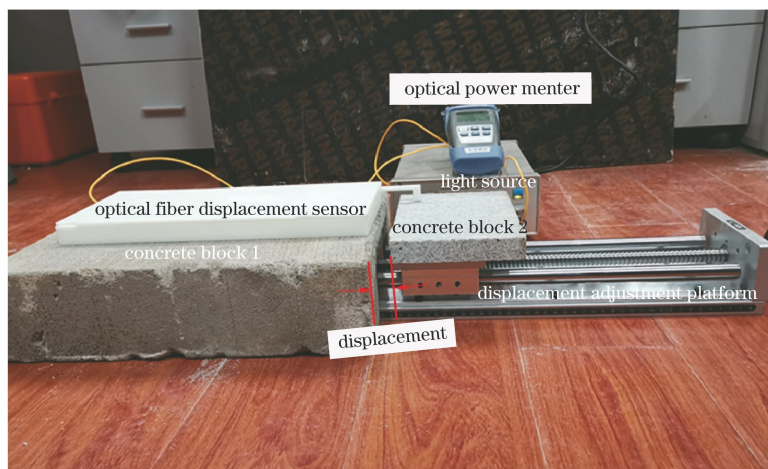


图 5 传感器性能测试试验

Fig. 5 Performance test experiment of sensor

4.2 测试结果分析

由表 1 可知, 同一位移点处的光纤弯曲损耗基本保持不变, 每 10 次测量中最大值与最小值之差不

本文所用的信号解调设备的最小损耗分辨率为 0.01 dB , 传感器标定的标准系数为 $5.996 \text{ mm} \cdot \text{dB}^{-1}$ (即灵敏度为 $0.1668 \text{ dB} \cdot \text{mm}^{-1}$), 因此传感器的最小位移分辨率为 0.06 mm 。

4 传感器的性能测试

4.1 单点稳定性和重复性测试

为了将旋转位移转化为线性位移, 并对其性能进行研究, 本文设计并进行了传感器单点稳定性和可重复性试验。试验主要用到的仪器设备有光功率计、波长为 1550 nm 的稳定光源、无影胶、位移调节平台以及光纤位移传感器等。在实际应用中, 由于外界条件的不确定性, 位移变化是往复的且位移改变量是不确定的, 如建筑结构预留的伸缩缝。因此, 本文进行了一系列的裂缝开度往复试验, 长时间进行来回加载与卸载, 以测试传感器的性能。

为研究不确定位移对传感器精度的影响, 本文采用两块混凝土板对结构的相对位移进行模拟。如图 5 所示, 用胶水将传感器固定在其中一块石板上, 为使施加在传感器上的线性位移能够得到精确测量, 将另一块石板固结于最小定位精度为 0.02 mm 、测量量程为 400 mm 的位移调节平台上, 同时将传感器的拉杆固定在石板上。光功率计和光源分别与传感器的光纤接头连接。以 25 mm 为步长转动位移调节平台手柄, 直至将拉杆拉至传感器的满量程 200 mm , 在每个位移点记录下光功率计的读数, 读数稳定时间为 5 min , 测量结果如表 1 所示。

超过 0.09 dB , 数据的最大标准差为 0.0270 dB 。由于传感器的标定系数为 $5.996 \text{ mm} \cdot \text{dB}^{-1}$, 因此传感器在测量中的最大偏差为 0.162 mm 。此外, 传感器

表1 性能测试试验数据
Table 1 Performance test data of sensor

Displacement / mm	Condition	Macro-bending loss of optical fiber /dB										Standard deviation /dB
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
25	Elongation	3.89	3.91	3.87	3.88	3.92	3.90	3.86	3.87	3.85	3.88	0.0210
	Shrinkage	3.55	3.59	3.60	3.61	3.61	3.58	3.57	3.59	3.57	3.56	0.0195
50	Elongation	8.17	8.19	8.20	8.18	8.19	8.21	8.16	8.17	8.22	8.19	0.0178
	Shrinkage	8.01	8.03	8.01	7.98	8.00	7.99	8.04	8.06	8.02	8.06	0.0261
75	Elongation	12.45	12.43	12.48	12.47	12.45	12.47	12.42	12.48	12.49	12.46	0.0214
	Shrinkage	11.71	11.72	11.76	11.78	11.77	11.73	11.72	11.74	11.77	11.79	0.0270
100	Elongation	16.64	16.66	16.68	16.65	16.69	16.62	16.63	16.67	16.62	16.63	0.0239
	Shrinkage	16.14	16.17	16.18	16.16	16.14	16.13	16.19	16.18	16.12	16.15	0.0224
125	Elongation	20.63	20.64	20.65	20.62	20.67	20.66	20.64	20.69	20.67	20.68	0.0216
	Shrinkage	21.38	21.39	21.36	21.35	21.34	21.33	21.37	21.35	21.36	21.34	0.0179
150	Elongation	24.89	24.92	24.91	24.90	24.93	24.91	24.88	24.87	24.94	24.91	0.0206
	Shrinkage	24.53	24.56	24.59	24.51	24.52	24.56	24.58	24.51	24.53	24.55	0.0269
175	Elongation	29.01	29.05	28.99	29.06	29.07	29.08	29.04	29.06	29.07	29.05	0.0268
	Shrinkage	29.54	29.56	29.53	29.58	29.57	29.56	29.53	29.51	29.53	29.55	0.0206
200	Elongation	33.28	33.24	33.26	33.27	33.21	33.25	33.28	33.24	33.28	33.23	0.0229
	Shrinkage	33.13	33.17	33.18	33.20	33.21	33.19	33.22	33.20	33.22	33.21	0.0261

的迟滞性误差为 2.22%，可重复性误差为 0.26%，由此可证明传感器的长期稳定性和可重复性。

5 结 论

在分析传统光纤弯曲损耗传感原理的基础上，设计了一种新型光纤弯曲损耗型位移传感器。该传感器通过恒定直径齿轮轴缠绕弯曲光纤的方式，避免了传统光纤弯曲损耗型传感器中光纤弯曲损耗与位移之间的非线性关系，具有结构简单、信号解调容易、传感器的实用性强等优点。经过试验证明，传感器具有良好的线性度、灵敏度、分辨率和较大的测量量程。此外，可以通过调节同心圆齿轮的半径比来调节传感器的测量量程和精度，同时该传感器复用能力较强，可用于大型工程结构的大变形监测。试验均在室内进行，认为温度基本是恒定不变的，未考虑温度对光纤损耗的影响，在后续研究中应该进一步考虑温度对光纤损耗的影响以便更好地用于户外工程结构的长期监测。

参 考 文 献

- [1] Shi L F, Hong C Y, Wei X H, et al. Development and verification of new geotechnical engineering FBG inclination sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(4): 485-490.
- [2] Di H T, Yin J H, Zhang J M, et al. Axial strain measurement based on curvature fiber optic sensor [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2013, 24(2): 271-275.
- [3] Tang B, Huang J B, Gu H C. Structural design of distributed feedback fiber laser accelerometer sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1010002.
- [4] Wei L, Liu Z, Li H C, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for “土” shaped beam[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106004.
- [5] Zuo L L, Jin T, He L, et al. Analysis and design of macro-bend optical fiber displacement sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(12): 1763-1768.

- 左路路, 金韬, 何流, 等. 宏弯型光纤位移传感器的分析与设计[J]. 传感技术学报, 2019, 32(12): 1763-1768.
- [6] Fields J N, Asawa C K, Ramer O G, et al. Fiber optic pressure sensor[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 67(3): 816-818.
- [7] Sienkiewicz F, Shukla A. A simple fiber-optic sensor for use over a large displacement range[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1997, 28(4): 293-304.
- [8] Luo Z H, Chen C. Study and application of broad dynamic range distributed optical fiber sensor[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2010, 21(6): 851-855.
- 罗志会, 陈池. 大量程分布式光纤传感器的研究与应用[J]. 光电子·激光, 2010, 21(6): 851-855.
- [9] Zhu Z W, Liu D Y, Yuan Q Y, et al. A novel distributed optic fiber transducer for landslides monitoring[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(7): 1019-1024.
- [10] Bao T F, Zhao J L, Yan P L, et al. A novel cracking sensing fiber sensor with wide range[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2015, 45(9): 984-990.
- 包腾飞, 赵津磊, 阎培林, 等. 一种新型大量程裂缝光纤传感器[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(9): 984-990.
- [11] Yang J, Zhang K, Cheng L, et al. A fiber-optic sensor for monitoring crack of concrete structures[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(4): 481-484.
- 杨杰, 张凯, 程琳, 等. 一种用于混凝土结构裂缝监测的光纤传感器[J]. 压电与声光, 2019, 41(4): 481-484.
- [12] Meng L J, Wang L B, Xiong H C, et al. An investigation in the influence of helical structure on bend loss of pavement optical fiber sensor[J]. Optik, 2019, 183: 189-199.
- [13] Li M H, Cheng L, Li Y M, et al. Design of displacement sensor based on the bending loss of U-type winding fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0606007.
- 李明昊, 程琳, 李亚明, 等. U型缠绕式光纤弯曲损耗位移传感器设计[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0606007.
- [14] Tsai K H, Kim K S, Morse T F. General solutions for stress-induced polarization in optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(1): 7-17.