

U 型缠绕式光纤弯曲损耗位移传感器设计

李明昊^{1,2}, 程琳^{1,2}, 李亚明^{1,2}, 马钰明^{1,2}, 杨杰^{1,2}

¹省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

²西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048

摘要 针对传统光纤弯曲损耗位移传感器中位移与弯曲损耗的非线性关系,且高灵敏度和大量程不能兼得的问题,设计了一种 U 型缠绕式光纤弯曲损耗位移传感器,结构包括 U 型回绕和螺旋绕轴,两者合称为 U 型缠绕。理论证明被测位移量与光纤弯曲损耗之间的线性关系,推导出表达式,讨论了螺旋绕轴方式对光纤弯曲半径的影响和 U 型回绕方式对传感器精度的影响,并进行了一系列实验研究和性能测试。结果表明:传感器的测量范围为 0~120 mm,灵敏度为 0.14 dB/mm,线性相关系数大于 0.99,光纤在 U 型缠绕中无应力松弛的现象,建议 U 型回绕光纤曲率半径大于 6 mm。U 型缠绕式光纤弯曲损耗位移传感器具有良好的测量精度和较大量程,能够实现传感器对混凝土结构的裂缝监测和大型结构位移的连续监测。

关键词 光纤光学; 位移传感器; 光纤缠绕轴; U 型缠绕; 弯曲损耗

中图分类号 TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0606007

Design of Displacement Sensor Based on the Bending Loss of U-Type Winding Fiber

Li Minghao^{1,2}, Cheng Lin^{1,2}, Li Yaming^{1,2}, Ma Yuming^{1,2}, Yang Jie^{1,2}

¹State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

²Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract In view of the nonlinear relationship between displacement and bending loss in traditional fiber bending loss displacement sensor, and the problem that high sensitivity and large scale cannot be obtained at the same time, we design a novel displacement sensor based on the bending loss of U-type winding fiber. The fiber consists of a U-type turning and a spiral winding around the shaft, which of them are called U-type winding. It is proved theoretically that there is a linear relationship between the measured displacement and the bending loss. We deduce the expression of them, discuss the effect of spiral winding on the bending radius of fiber and the effect of U-type turning on the accuracy of the sensor, and carry out a series of experimental studies and performance tests. Experimental results demonstrate that displacement sensitivity of the sensor is 0.14 dB/mm in the range from 0 to 120 mm, and the linear correlation coefficient is greater than 0.99. There is no stress relaxation of the optical fiber in the winding process. It is suggested that the radius of curvature of the U-type turning fiber should be larger than 6 mm. The displacement sensor based on the bending loss of U-type winding fiber has good measurement precision and large scale. It can realize the monitoring of concrete structure cracks and continuous monitoring of the displacement of large structure.

Key words fiber optics; displacement sensor; fiber winding shaft; U-type winding; bending loss

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 120.4640

收稿日期: 2017-12-14; 收到修改稿日期: 2018-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(51409205)、中国博士后自然科学基金(2015M572656XB)、陕西省博士后自然科学基金、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2014491011)

作者简介: 李明昊(1998—),男,本科生,主要从事水利水电工程方面的研究。E-mail: 1525784658@qq.com

导师简介: 程琳(1986—),男,博士,讲师,主要从事光纤传感技术、水工结构安全监测方面的研究。

E-mail: wanmu2381@163.com(通信联系人)

1 引 言

位移是结构健康监测的最重要物理量之一。传统的电测量位移传感器由于抗电磁干扰能力弱,在搬运、率定、安装埋设及混凝土振捣过程中易损坏,且测量误差常较大,难以实现长期、稳定和远距离的测量。而光纤传感器具有频带宽、抗干扰能力强、质量轻、体积小、耐腐蚀、电绝缘性好及安全可靠等优点,受到国内外学者的广泛关注^[1-11]。

光纤传感器按光波在光纤中被调制的原理可分为光强调制型、相位调制型、偏振态调制型和波长调制型等^[12]。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。光纤弯曲损耗是光纤的弯曲半径小于光纤的临界弯曲半径所引起的附加损耗^[13-14]。随着光纤弯曲损耗被学者们所认识,国外学者提出了两种用于监测结构裂缝的分布式光纤传感器^[15],该传感器可以用来确定结构裂缝产生的位置与大小。为提高基于光时域反射仪(OTDR)的串联式光纤弯曲损耗型位移传感器的测量精度,也有学者提出了一种光纤环形干涉位移传感器,结果表明,该传感器虽然很经济适用,但由光缆引起的测量误差仍需进一步改进^[16]。另外也有学者在橡皮管上设计出螺旋缠绕光纤的传感结构,即一种大量程分布式光纤位移传感器,采用 OTDR 分析结构产生位移的大小以及定位位移异常偏大的位置,传感器最大量程为 17 mm^[17];另一种点式光纤裂缝传感器仍采用 OTDR 分析结构裂缝的开度,但理论量程仅 26 mm^[18],且光纤在大的变形中容易被拉断。上述研究中结构的应变、裂缝、变形或位移量与光纤弯曲损耗之间都呈复杂的非线性关系,传感器的量程较小,不利于光纤弯曲损耗传感器在大的结构变形、裂缝监测或检测中的应用。

针对光纤弯曲损耗位移传感器实用性不足的问题,本文提出采用固定直径的光纤缠绕轴,以 U 型缠绕的方式设计了一种高精度齿轮传动型光纤弯曲损耗位移传感器。理论证明了该传感器的可行性和可靠性,测试了传感器的技术指标,以理论推导的方式分析了螺旋绕轴方式的误差,讨论了其对灵敏度的影响,以及 U 型回绕光纤曲率半径 R_0 对传感器测量精度的影响。

2 传感器结构与测量原理

2.1 传感器的结构设计

线性大量程的光纤弯曲损耗位移传感器的整体

结构如图 1 所示,其主要部件包括基座、顶盖、光纤缠绕轴、传动齿轮、齿条、轴承、拉杆和固定螺帽等。各主要部件的具体连接形式为:

1) 光纤缠绕轴从上到下,依次套接上齿轮、轴承和下齿轮。

2) 传动拉杆包含主齿条和副齿条。主齿条与下齿轮咬合,副齿条与上齿轮咬合。每个齿条包含无齿部分和有齿部分,有齿部分传递位移,无齿部分则使光纤在绕轴移动时始终保持与传感器底部垂直。拉杆的末端装有固定螺帽,以便固定被测物体。

3) 基座底部和顶盖中间设置有一段直线轨道,轴承在其间转动。

4) 固定齿条共有 2 支,分别位于传感器一侧的纵向两条边上,传动拉杆通过基座边侧的通孔可以左右滑动,并与光纤缠绕轴的传动齿轮啮合。

5) 在基座边侧通孔的一侧,有 2 个光纤引出口。将一段 G652D 光纤从任意一个引出口穿入,在轴中部按 U 型布置,回绕的光纤尾部从另一个引出口穿出。穿入和穿出后拉直光纤并用热熔胶固定,最后用热缩套筒将光纤的首尾封装在一起。为使光纤在轴上均匀缠绕,可使 2 个引出口的距离大于 U 型回绕光纤曲率直径 $2R_0$ 。上端光纤以小角度螺旋上绕,下端光纤以小角度螺旋下绕。

6) 光纤缠绕轴直径 $D = 15$ mm,传动齿轮的齿数 $z = 15$,各齿条与传动齿轮的模数 $m = 1$ 。传感器最大量程 $L = 120$ mm。

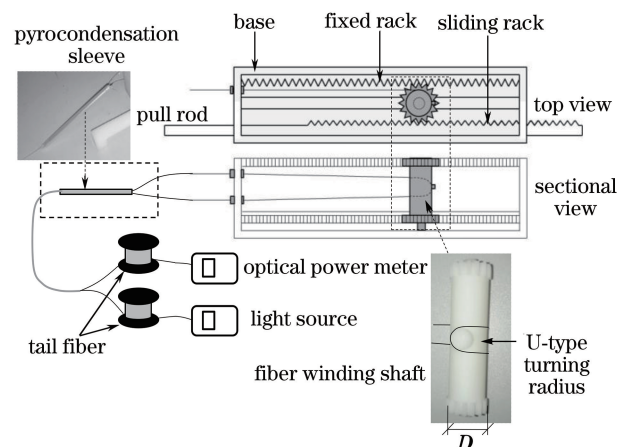


图 1 光纤弯曲损耗位移传感器结构图

Fig. 1 Schematic diagram of displacement sensor structure of fiber bending loss

2.2 传感器测量原理

传感器工作时主要支架的位移传递原理如图 2 所示。当外界位移引起拉杆水平移动 Δl 时,这段

位移一部分将引起传动齿轮旋转,另一部分将引起传动齿轮水平滑动。由几何关系可知,传动齿轮水平滑动位移与旋转线位移均为 $0.5\Delta l$ 。因为传动齿轮的分度圆直径 $d = z \times m = 15 \text{ mm}$,与光纤缠绕轴的直径 D 相等,所以光纤缠绕轴的线位移也为 $0.5\Delta l$,即 U 型光纤将在缠绕轴上缠绕 $0.5\Delta l$ 。且缠绕轴旋转时上下两段光纤同时发生弯曲,分别以上螺旋和下螺旋绕轴,光纤总共增加 Δl 的弯曲长度。在光纤缠绕轴水平滑动 $0.5\Delta l$ 的同时,水平拉直的光纤也减少了 $0.5\Delta l$,因此整个位移传递过程中光纤所受拉应力保持不变。

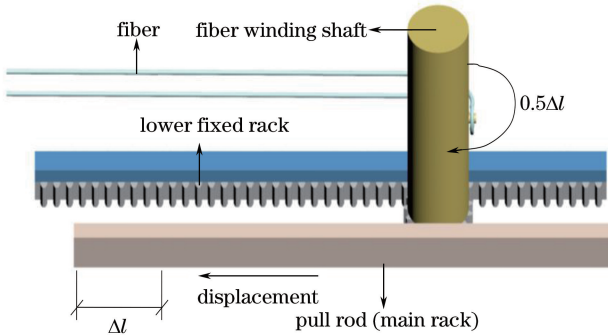


图 2 光纤弯曲损耗位移传感器主要支架的位移传递原理
Fig. 2 Displacement transfer principle of the main rack for displacement sensor of fiber bending loss

如图 3 所示,光纤弯曲后会沿光纤弯曲长度的能量辐射,原有光波导中的传导模将变为辐射模,从而引起弯曲损耗。对于阶跃单模光纤,单位长度上的弯曲损耗可以表示为^[19]

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

式中: r 为光纤弯曲半径; A_c 和 U 为与光纤种类和光源工作状态相关的量,具体为

$$A_c \approx \eta \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right)^{1/4} \lambda^{-1/2} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

$$U \approx \frac{\Delta (n_1/n_2 - 1)^{3/2}}{\lambda (2.748 - 0.996\lambda_c/\lambda)^3}, \quad (3)$$

式中: λ 为工作波长; λ_c 为截止波长; n_1 为纤芯折射率; n_2 为包层折射率; η 和 Δ 为与光纤类型、光源工作波长有关的常数。

为确定 A_c 和 U 值,结合传感器 U 型缠绕特点,在同一光源和同一型号光纤条件下,获取了单位长度弯曲损耗与弯曲直径的实验数据,如图 4 所示。将实验数据代入(1)式可知,在光源工作波长为 1550 nm 时,单位长度 G652D 光纤损耗的经验公式为

$$a_c = 7.331r^{-1/2} \exp(-0.4363r). \quad (4)$$

安装标定传感器后,记下初始光功率计读数

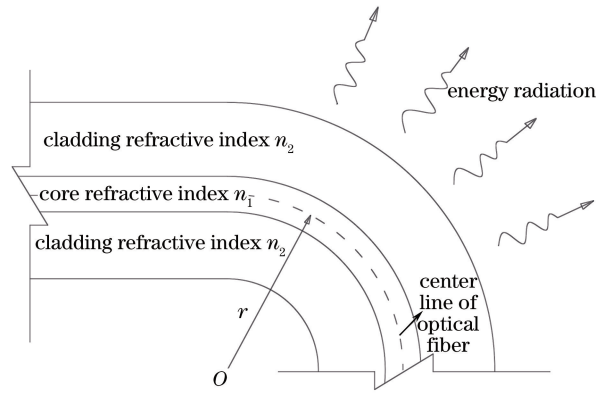


图 3 弯曲光纤的波导辐射

Fig. 3 Waveguide radiation of the bending optical fiber

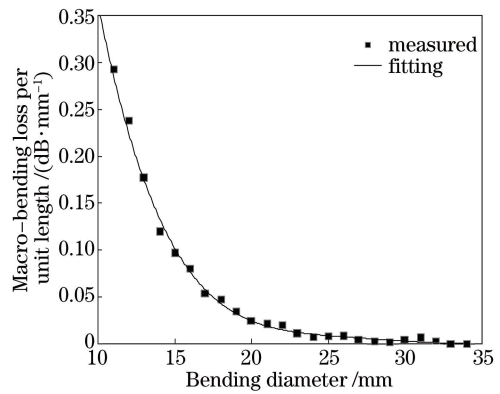


图 4 单位长度弯曲损耗与弯曲直径的关系

Fig. 4 Relationship between macro-bending loss per unit length and bending diameter

I_0 。结构发生 Δl 的位移时,传感光纤弯曲长度将增加 Δl ,此时光功率计读数为

$$I_i = I_0 - \Delta L_s, \quad (5)$$

式中: ΔL_s 为光纤弯曲损耗, ΔL_s 和 Δl 的关系为

$$\Delta L_s = \Delta l \times a_c. \quad (6)$$

令传感器设计标准系数 $K = 1/a_c$,则位移公式为

$$\Delta l = K \Delta L_s. \quad (7)$$

此时(4)式中的 r 与光纤上螺旋或下螺旋线曲率半径 ρ 相等,而 ρ 与缠绕轴直径 D 有关。

为使固定在轴上的 U 型光纤以上螺旋和下螺旋的方式缠绕在轴上,并产生相对恒定的弯曲损耗。位移传感器中两个光纤引出口的距离应大于 U 型回绕光纤直径,假设相距距离为 δ ,则一个光纤引出口与水平线的距离为 $\delta/2$,假设某时刻光纤与水平线的夹角为 α ,光纤细部结构如图 5 所示。

因缠绕光纤在缠绕轴上对称分布,取上螺旋的光纤为研究对象,光纤与轴相切的一点为研究点,并以缠绕轴的自旋转轴为 z 轴,分度圆所在平面建立 xoy 平面。

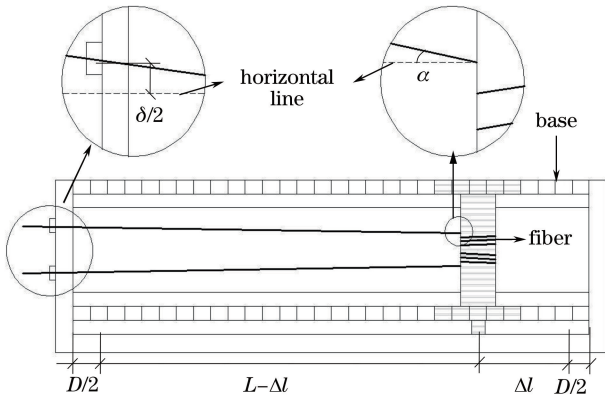


图 5 光纤细部结构

Fig. 5 Fiber details in sensor

在某一位置处,由空间关系可以建立研究点的方程

$$\begin{cases} x = D/(2\cos\theta) \\ y = D/(2\sin\theta) \\ z = (\Delta l \tan\alpha)/2 \end{cases} \quad (8)$$

当监测到位移 Δl 时,缠绕轴转过的角度为 $\theta = \Delta l/D$,代入(8)式,则螺旋线的曲率半径为

$$\rho = \frac{\pi^2 D^2 + h^2}{2\pi^2 D}, \quad (9)$$

式中: h 为两螺旋线的间距,具体表示为

$$h = 2\pi z/\theta, \quad (10)$$

因此,将(10)式代入(9)式得

$$\rho = \frac{D}{2}(1 + \tan^2\alpha). \quad (11)$$

在缠绕轴向前移动的过程中,研究点的高度沿 z 方向增加,其中由图 5 几何关系可知:

$$\tan\alpha = \frac{\delta/2 - z}{L - \Delta l}, \quad (12)$$

解出 $\tan\alpha$ 后代入(11)式,即得螺旋绕轴曲率半径 ρ 与缠绕轴直径 D 的关系

$$\rho = \frac{D}{2} \left[1 + \left(\frac{\delta}{2L - \Delta l} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

为保证测量精度,拉杆最大伸长 $\Delta l_{\max} = 120$ mm. 光纤在轴上缠绕的圈数 n 表示为

$$n = \frac{\Delta l}{2\pi D}, \quad (14)$$

故 $n_{\max} = 3$. 本实验中 G652D 光纤的标称直径为 0.125 mm,为保证传感器正常工作,要求 $\delta/2 > n_{\max} \times 0.125$ mm,本文使用的传感器 $\delta = 2$ mm,使用位移传感器时, $2L - \Delta l$ 的最小值为 120 mm,因此, $\delta/(2L - \Delta l) < 1.67\%$. 即在螺旋绕轴过程中,光纤的弯曲半径 r 比缠绕轴半径大. 而单位长度弯曲损耗 a_c 与弯曲半径 r 呈指数关系,即 a_c 对 r 非常

敏感, r 的改变对 a_c 的影响可由微分求得.

对(4)式微分可得

$$da_c = 7.331 \frac{\exp(-0.4363r)}{\sqrt{r}} \left(-\frac{1}{2r} - 0.4363 \right) dr, \quad (15)$$

式中: $dr = r \times (1.67\%)^2$. 将 $r = 7.5$ mm 代入(4)式,则 $a_c = 0.1015$ dB/mm;将 $r = 7.5$ mm 代入(15)式,则 $da_c = -1.068 \times 10^{-4}$ dB/mm, $|da_c|/a_c = 0.11\%$. 相比(1)式自身存在的误差[20],可以认为光纤的弯曲半径等于缠绕轴半径,即

$$r = D/2, \quad (16)$$

代入 $r = 7.5$ mm,得到位移 Δl 与光功率损耗值 ΔL_s 的关系为

$$\Delta l = 9.851\Delta L_s. \quad (17)$$

因此,由(17)式可知,被测位移量与光纤弯曲损耗之间呈线性关系.

3 传感器的标定实验及结果

3.1 实验过程

为研究高精度齿轮传动型光纤弯曲损耗位移传感器的可行性,进行了传感器的验证实验及标定. 光功率计的量程为 -70.00 dB \sim $+7.00$ dB,为保证数据的准确度,测量时应在量程的 $2/3$ 内,即 -44.00 dB \sim $+7.00$ dB. 因此,实验材料与设备主要包括:工作波长为 1550 nm 的光源、光功率计、位移传感器、三角板、有机玻璃板和热熔胶等. 实验装置如图 6 所示. 将三角板、位移传感器和直尺用热熔胶固定在实验台上,并将有机玻璃板粘在位移传感器拉杆上. 尺子带刻度的两边夹住有机玻璃板. 将位移传感器的拉杆外端对准直尺上某一整数刻度

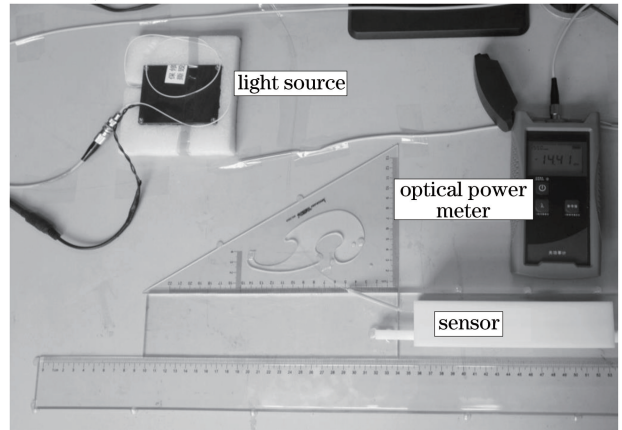


图 6 光纤弯曲损耗位移传感器标定实验装置

Fig. 6 Calibration experiment device of displacement sensor structure of fiber bending loss

值,记录光功率计的初始读数。拖动拉杆,通过加载或卸载位移传感器模拟实际的裂缝发展,并记录相应的光功率计数值。传感器位移测试以 10 mm 为步长,从 0 mm 开始设置位移直至 120 mm,光功率计每次读数间隔时间为 1 min。

3.2 实验结果分析

由实验数据可知,光功率计的最大读数为 -20.12 dB;最小读数为 -40.22 dB,实验数据满足在量程 2/3 内的要求。光损耗及其拟合曲线如图 7 所示, R^2 为相关系数。

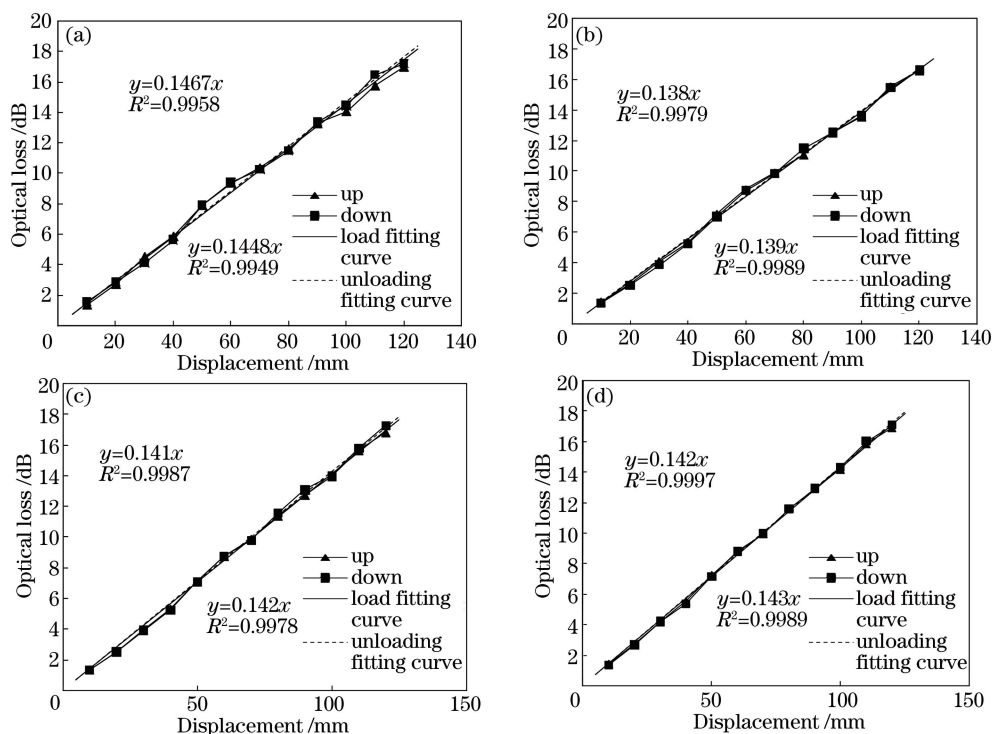


图 7 光损耗及位移测试曲线图。(a)测试 1; (b)测试 2; (c)测试 3; (d)测试 4

Fig. 7 Optical loss and displacement test data. (a) Test 1; (b) test 2; (c) test 3; (d) test 4

在同一个光纤缠绕轴直径 D ,同一 U 型回绕光纤曲率半径 R_s 的所有可取实验数值中,可得平均加载和卸载的损耗位移关系式:

$$y = 0.1415x - 0.5443, \quad (18)$$

$$y = 0.1402x - 0.6091, \quad (19)$$

式中:0.1415 与 0.1402 分别为加载和卸载时位移传感器的灵敏度数值,取倒数后得到传感器系数 $K_{load} = 7.067 \text{ mm/dB}$, $K_{download} = 7.133 \text{ mm/dB}$,与理论推导出的位移传感器标准传感系数 $K = 9.851 \text{ mm/dB}$ 相比,约低 28%。

当光纤受到均匀的应力时,传导模场产生相应的变化,传输过程产生相应的损耗^[21]。在确定单位长度弯曲损耗与直径的经验表达式时,先需分析光纤所受拉应力的情况。光纤弯曲之前处于自由状态,但在传感器的缠绕过程中为保证缠绕均匀,光纤上始终存在均匀的拉应力。从实验数据可以看出,位移与损耗之间保持有良好的线性关系,据此可推测携带拉应力的光纤在弯曲的同时同样会引起单位长度的损耗,但这并不影响传感器的使用,传感

器的设计系数以实验值为准,其理论值仅作参考。本实验所用传感器的设计标准系数 K 取加载和卸载的平均值,即 $K = 7.100 \text{ mm/dB}$ 。因此,(17)式变为

$$\Delta l = 7.100 \Delta L_s. \quad (20)$$

4 性能测试与分析

实际工程中的裂缝开度是一个往返长周期变化的过程,例如不同坝段之间的伸缩缝或是其他大体积建筑物之间预留的连接缝。根据传感器的结构可知,光纤在上螺旋和下螺旋的过程中存在均匀的拉应力,而持续应力的作用和反复的缠绕光纤可能会产生应力松弛的现象,影响传感器的灵敏度,破坏传感器的长期稳定性。本文进行了一系列的裂缝开度往复实验,长时间来回加载与卸载,以测试传感器性能。

用两块大体积混凝土块的相对位移模拟真实的大体积混凝土结构的裂缝。为精确控制位移,将传感器固结在最小分度为 0.1 mm 的微位移调节平台

的上部,并且微位移调节平台固定在混凝土块的上部。传感器的拉杆固结于另一块混凝土的上部。实验中确保混凝土位移产生方向、传感器拉杆移动方向和微位移平台调节方向两两平行,如图 8 所示。以 20 mm 为步长,依次将拉杆拉至满量程120 mm,在每个位移点处读取光功率计读数,读数间隔为 30 min。测试结果如表 1 所示。

由表 1 可知,同一位移点的光纤弯曲损耗值基本不变,最大值与最小值的差值不超过 0.05 dB。数值之间最大的标准差仅为 0.0178。而本实验传感器的标定值为 7.100 mm/dB。因此,实验测量的位移最大偏差为 0.355 mm,实验结果初步证实了传感器的稳定性。

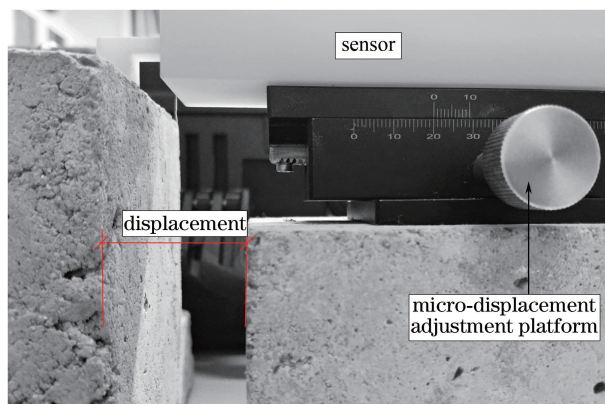


图 8 光纤弯曲损耗位移传感器性能测试
Fig. 8 Performance testing of displacement sensor structure of fiber bending loss

表 1 位移传感器光纤弯曲损耗
Table 1 Fiber bending loss in displacement sensor

Displacement /mm	Direction	Bending loss /dB										Standard deviation /dB
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
20.0	Up	2.69	2.70	2.66	2.70	2.68	2.65	2.66	2.68	2.70	2.69	0.0176
	Down	2.71	2.67	2.71	2.71	2.68	2.70	2.67	2.68	2.71	2.70	0.0162
40.0	Up	5.43	5.44	5.42	5.39	5.43	5.44	5.42	5.43	5.43	5.44	0.0142
	Down	5.73	5.73	5.71	5.74	5.70	5.71	5.70	5.70	5.74	5.70	0.0157
60.0	Up	7.17	7.16	7.19	7.14	7.16	7.16	7.18	7.18	7.15	7.15	0.0150
	Down	6.91	6.91	6.92	6.93	6.93	6.90	6.92	6.92	6.90	6.91	0.0102
80.0	Up	9.69	9.70	9.73	9.70	9.71	9.69	9.72	9.69	9.71	9.72	0.0136
	Down	9.64	9.65	9.69	9.64	9.62	9.62	9.62	9.65	9.62	9.63	0.0143
100.0	Up	12.50	12.47	12.51	12.48	12.47	12.47	12.49	12.48	12.48	12.50	0.0136
	Down	12.62	12.61	12.63	12.63	12.59	12.62	12.62	12.60	12.61	12.61	0.0108
120.0	Up	15.32	15.32	15.35	15.36	15.37	15.33	15.35	15.34	15.32	15.32	0.0178
	Down	15.28	15.27	15.30	15.28	15.29	15.27	15.29	15.27	15.29	15.28	0.0098

5 传感器误差分析

在传感器的核心构件中,缠绕轴上 R_w 的变化必然影响测量结果。从(17)式可以看出, R_w 与传感器的灵敏度无直接关系。但是,曲率半径越小,光经过 U 型回绕段时光损耗值越大。随着光功率计起始读数 I_0 变小,整个位移传感过程中光功率计的读数变动区间发生变化,读数可能会超出量程的 2/3,即 $-44.00 \text{ dB} \sim +7.00 \text{ dB}$,造成读数误差偏大。下面验证 R_w 对传感器测量精度的影响。

将三角板、位移传感器和直尺用热熔胶固定在实验台上,并将有机玻璃板粘在位移传感器的拉杆上。用尺子带刻度的两边夹住有机玻璃板。将位移传感器的拉杆外端对准直尺上某一整数刻度值,记录光功率计的初始读数。以一定的步长不断拖动拉杆,通过加载或卸载位移传感器模拟实际裂缝发展,并记录相应的光功率计数值。实验中位移变化范围

为 0~120 mm,逐渐缩小 R_w ,进行 6 组实验,每组实验往复加载和卸载 10 次。实验结果见图 9。结果

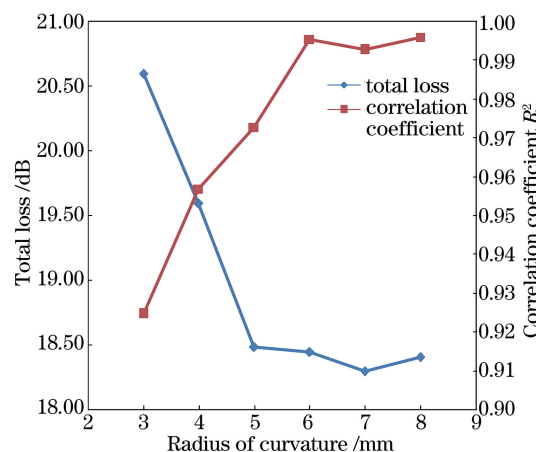


图 9 U 型回绕光纤曲率半径 R_w 对传感器测量精度的影响
Fig. 9 Influence of radius of curvature of U-type turning radius on the measurement precision of sensor

表明, R_w 较大时, 其总损耗值稳定在 18 dB 左右, 相关系数 $R^2 > 0.99$, 即该区间的读数可信度较高, 能够保证传感器的测量精度。 R_w 过小, 则光功率计起始读数和最大位移读数过小, 导致读数超出可信区间, 其总损耗值不稳定, 线性相关度降低, 将影响传感器正常工作。因此, R_w 间接影响传感器的灵敏度, 建议 R_w 大于 6 mm。

6 结束语

在传统位移传感器的基础上, 提出了一种新型大量程且具有较高精度的位移传感器。将传统的光纤损耗值与位移之间的非线性关系, 通过恒定的齿轮轴半径和一定的 U 型回绕曲率半径将其确定为线性关系。U 型回绕和螺旋绕轴相结合的位移传动结构使光纤均匀受力, 实验证明传感器具有良好的线性度和较高的精度, 较基于同类弯曲损耗的位移传感器在量程上有成倍提高, 可用于混凝土结构的大裂缝监测和大型结构位移的连续监测。本文通过性能测试初步验证了传感器的稳定性, 但长期稳定性取决于传感器内部结构。另外实验过程均在室温进行, 未考虑温度对传感器的影响, 后续将在这两方面继续研究, 以优化传感器内部结构。

参 考 文 献

- [1] Xie T, Wang X, Li C, *et al.* Fiber Bragg grating differential tilt sensor based on mercury column structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0306002.
谢涛, 王行, 李川, 等. 水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅倾角传感器 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0306002.
- [2] Wang Y, Wang M, Xia W, *et al.* Optical fiber Bragg grating pressure sensor based on dual-frequency optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(21): 1864-1867.
- [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.
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿. 分布反馈式光纤激光加速度传感器结构设计 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1010002.
- [4] Luo B B, Zou W G, Zhao M F, *et al.* pH sensor on fiber grating with extremely large tilt angle and its sensitivity enhancement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0106009.
罗彬彬, 邹文根, 赵明富, 等. 极大倾斜角度光纤光栅 pH 值传感器及其增敏研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0106009.
- [5] Rizzolo S, Sabatier C, Boukenter A, *et al.* Radiation characterization of optical frequency domain reflectometry fiber-based distributed sensors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, 63(3): 1688-1693.
- [6] Liang S, Liu T F, Sheng X Z, *et al.* Investigation on space-domain difference based location method for φ -OTDR fiber-optic distributed disturbance sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 253-257.
梁生, 刘腾飞, 盛新志, 等. 基于空间域差分的 φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器定位方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 253-257.
- [7] Zou D B, Liu H, Zhao L, *et al.* Research of signal recognition of distributed optical fiber vibration sensors [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(1): 86-89.
邹东伯, 刘海, 赵亮, 等. 分布式光纤振动传感信号识别的研究 [J]. *激光技术*, 2016, 40(1): 86-89.
- [8] Wang H P, Xiang P. Optimization design of optical fiber sensors based on strain transfer theory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1233-1241.
王花平, 向平. 基于应变传递理论的光纤传感器优化设计 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1233-1241.
- [9] Cha G Z, Zheng X H. High sensitivity optic fiber torsion sensor [J]. *Automation & Instrumentation*, 2016, 31(1): 23-25, 58.
茶国智, 郑晓虹. 高灵敏度光纤扭转传感器 [J]. *自动化与仪表*, 2016, 31(1): 23-25, 58.
- [10] Zhang K Y, Yan G, Lu L D, *et al.* Study on the sensing performance of pre-stretching fiber grating strain sensor [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2017, 39(5): 654-658.
张开宇, 闫光, 鹿利单, 等. 预拉伸光纤光栅应变传感器传感性能研究 [J]. *压电与声光*, 2017, 39(5): 654-658.
- [11] Zhao L, Jiang L, Li L Q. An optical fiber grating pressure sensor with composition structure [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2017, 39(1): 60-62, 66.
赵林, 姜龙, 李连庆. 一种组合结构光纤光栅压力传感器 [J]. *压电与声光*, 2017, 39(1): 60-62, 66.
- [12] Ding X P, Wang W, Fu L C. Classification and application principles of optical-fibre transducer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(6): 1176-1178.
丁小平, 王薇, 付连春. 光纤传感器的分类及其应用原理 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(6): 1176-1178.

- [13] Zhou Q, Feng G Y, Li X D, *et al.* Theoretical analysis and measurement on the character of bending loss in fiber[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 32-35.
周情, 冯国英, 李小东, 等. 光纤弯曲损耗特性的理论与实验研究[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(4): 32-35.
- [14] Marcatili E A J, Miller S E. Improved relations describing directional control in electromagnetic wave guidance[J]. Bell Labs Technical Journal, 1969, 48(7): 2161-2188.
- [15] Leung C K Y, Elvin N, Olson N, *et al.* A novel distributed optical crack sensor for concrete structures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65: 133-148.
- [16] Higuchi K, Nagatomo S, Yamazaki N, *et al.* Measurement of Ground Displacement using Optical Fiber Ring Interferometer[J]. Proceedings of the Japan National Conference on Geotechnical Engineering, 2003, 38: 2131-3132.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Gambling W A, Matsumura H, Ragdale C M. Curvature and microbending losses in single-mode optical fibres [J]. Optical and Quantum Electronics, 1979, 11(1): 43-59.
- [20] Xue M C. Research and measurement of optical fibre macrobend loss [J]. Telecommunications Science, 2009, 25(7): 57-62.
薛梦驰. 光纤弯曲损耗的研究与测试[J]. 电信科学, 2009, 25(7): 57-62.
- [21] 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.