新型可测量大变形的弯曲型光纤光栅裂缝传感器

包腾飞^{①②*}, 赵津磊^{①②}, 张万祝^③, 阎培林^③

① 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

② 河海大学水利水电学院, 南京 210098;

③ 中国水电顾问集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024

* E-mail: baotf@hhu.edu.cn

收稿日期: 2014-05-20; 接受日期: 2014-06-30

国家自然科学基金(批准号: 51379068, 51139001)、江苏省杰出青年基金(批准号: BK20140039)、新世纪优秀人才支持计划(编号: NCET-11-0628)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120094110005)和中央高校基本科研业务费(编号: 2012B07214)资助项目

摘要 光纤光栅传感技术以其自身的优势, 在结构裂缝监测等工作中得到了广泛的应用, 然而由于其自身很容易折断的特点, 其测量的范围较小. 在前人研究成果的基础上, 设计了一种简易弯曲型光纤光栅裂缝传感装置, 并通过实验对此传感装置的性能进行了验证. 实验结果表明, 本裂缝传感装置切实可行, 可明显提高普通光栅光纤传感器的测量范围, 而且具备良好的重复使用能力, 以应对实际工程中裂缝开展情况的不确定性.

关键词光纤光栅
裂缝监测
弯曲型
混凝土结构

1 引言

裂缝是混凝土结构健康状况的主要标志, 对裂缝开展情况进行及时有效的监测是工程安全运行的重要保证. 目前, 许多学者已经对混凝土结构上裂缝监测工作做了大量的研究^[1~8]. 光纤传感技术以其显著的优越性被广泛应用于工程结构健康监测中, 其中, 光纤光栅传感技术作为光纤传感技术之一, 在具备普通光纤传感器优势的同时, 还具有灵敏度和测量精度更高、可靠性和稳定性好、兼容性强、信息损耗小、可实现准分布式测量等独特优势, 因此, 光纤光栅传感技术在土木工程界中受到了越来越多的关注. 然而, 光纤光栅是由石英光纤刻写而成的, 其特点是纤巧、脆弱, 其最大的伸长率仅有 1% 左右, 很容易折断, 测量范围小. 而在实际工程中, 隧道、桥梁、大坝等工程会产生开度较大的裂缝, 普通的光纤光栅传感器远不能满足工程监测的要求. 为此, 许多学

者对如何扩大光纤光栅传感器的测量范围进行了一些研究. Goh 等人^[9]设计了一种弯梁结构, 使光纤光栅传感器的波长调谐范围增大至 90 nm. Falciai 和 Trono^[10]设计了一种类似的弯梁结构, 并分别在弯曲量的上、下表面粘贴光纤光栅传感器, 实现了基于两点之间距离变化的大应变测量. 上述两种方法都是针对光纤光栅传感器本身的解调研究, 但实验装置制作工艺较复杂, 实用性较差. Zhou 等人^[11]设计了一种将光纤光栅传感器和弹簧串联在一起的装置, 弹簧承担一部分的位移, 传递到光栅上的只有剩下的一部分位移, 从而实现了光纤光栅传感器的大应变、大位移测量, 但是这种装置对裂缝的敏感性较差. 还有一些学者提出采用塑料光纤代替石英光纤制作光纤光栅传感器, 因为塑料光纤可以大大提高光纤的应变测量值^[12,13], 但塑料光纤光栅制作工艺的技术还不是很成熟.

鉴于以上方法存在的不足, 本文在 Falciai 和

引用格式: 包腾飞, 赵津磊, 张万祝, 等. 新型可测量大变形的弯曲型光纤光栅裂缝传感器. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1013–1019
Bao T F, Zhao J L, Zhang W Z, et al. Bend type fiber Bragg grating crack sensor with big measurement range (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1013–1019, doi: 10.1360/N092014-00187

Trono^[10]利用弯曲梁结构实现光纤光栅传感器大范围波长解调的方法的基础上, 研究一种简化的弯曲型光纤光栅传感装置. 下文将首先对本裂缝传感装置的构造及传感理论进行介绍, 然后通过实验对其测量性能进行测试, 通过模拟实验结果与理论结果的对比分析, 验证了本传感装置的可行性.

2 弯曲型光纤光栅裂缝传感器构造及其传感理论

利用光纤光栅传感器轻质柔软、不受微弯影响等特性, 并结合现有的弯曲梁结构裂缝传感装置的研究成果, 本文设计了一种简化的弯曲型光纤光栅传感装置. 为保证弯曲梁在实验过程中有一定的弹性弯曲能力且持有基本的刚度, 同时结合梁的厚度太大或者太小都不适合弯曲光纤光栅传感器的波长解调等问题, 本文选用了有一定厚度和弯曲能力且刚度适中的优质合金钢材料作为弯曲梁的基本材料.

将光纤光栅固定于一定厚度的弹性梁上, 弹性梁受水平方向外力产生弯曲时, 光纤光栅随之被拉伸(传感器布置于梁上表面)或者压缩(传感器布置于梁下表面), 如图 1 所示.

设弹性梁的长度为 L , 厚度为 h , 则贴于弹性梁表面的光栅传感器与梁中性轴的距离为 $h/2$, 弹性梁弯曲时的水平位移为 Δx , 此时梁水平跨度为 x , 弯曲量为 f , 圆弧对应圆心角为 θ .

分析图 1, 梁的弯曲量 f 可表示为

$$f = R \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right). \quad (1)$$

梁跨度 x 可表示为

图 1 弯曲光纤光栅结构示意图

$$x = 2R \sin \frac{\theta}{2}. \quad (2)$$

弯曲后弧长 L 为

$$L = R\theta. \quad (3)$$

梁弯曲时的水平位移 Δx 为

$$\Delta x = L - x = L - 2R \sin \frac{\theta}{2}. \quad (4)$$

将 $\sin \frac{\theta}{2}$ 在 $\theta = 0$ 处按泰勒公式取两级展开为

$$\sin \frac{\theta}{2} \approx \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\theta^3}{48} \right), \quad (5)$$

将 $\cos \frac{\theta}{2}$ 在 $\theta = 0$ 处按泰勒公式取两级展开为

$$\cos \frac{\theta}{2} \approx 1 - \frac{\theta^2}{8}. \quad (6)$$

由材料力学, 可以得出如下关系式:

$$\varepsilon = \frac{h}{2R}, \quad (7)$$

将上式改写为

$$R = \frac{h}{2\varepsilon}. \quad (8)$$

将(8)代入(3)式得

$$\theta = \frac{2L\varepsilon}{h}. \quad (9)$$

将(5)代入(4)式, 利用(9)式可得

$$\Delta x = \frac{\varepsilon^2 L^3}{6h^2}. \quad (10)$$

将(6)代入(1)式, 利用(9)式可得

$$f = \frac{L^2 \varepsilon}{4h}. \quad (11)$$

根据光栅光纤理论, 以下公式成立:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = (1 - p)\varepsilon, \quad (12)$$

式中 λ 为光栅的中心波长, $\Delta \lambda$ 为波长的改变量, p

为弹光系数.

将上式代入(10)式得

$$\Delta\lambda = \sqrt{6} \frac{\lambda h(1-p)}{L} \cdot \sqrt{\frac{\Delta x}{L}}. \quad (13)$$

(13)式即为弯曲光纤光栅传感器的波长改变量计算公式,也是弯曲光纤光栅传感原理的基本数学表达式.由上式可知,对同一 Δx , L 越大,弯曲梁的潜在波长解调范围越大,灵敏度越小,反之亦然.受弯曲梁刚度的限制,梁长度太小不利于弯曲实验的进行.与此同时,光纤光栅传感器粘贴于梁上光纤段长度过小会引起传感器与弯曲梁连接不牢固等问题,导致实验的误差.而弯曲梁长度过大会存在监测灵敏度过小、解调效果不明显等问题.因此,综合考虑以上各项影响因素,本文初步选择长度为 20~40 cm,厚度为 2~4 mm 的优质合金钢材料作为弯曲光纤光栅传感装置的基底材料.

3 弯曲型光纤光栅裂缝传感器的性能测试

3.1 实验方法

本实验采用一定厚度的优质合金钢材料作为光纤光栅传感器的基底材料,用以模拟其弯曲监测性能.实验分三组,分别用胶水将光纤光栅传感器光纤段平直牢固地粘贴在尺寸分别为 20 cm×1 cm×2.4 mm, 30 cm×1 cm×2.6 mm, 40 cm×1 cm×3.4 mm(长×宽×厚)的弯曲梁表面中轴线上,并尽量确保传感器光栅段位于梁受拉区的中心位置,然后将粘贴有光纤光栅的弯曲梁置于带刻度的水平台上.使水平台左右两边有机玻璃的宽度刚好可以容纳特定长度的弯曲梁,另一水平板用以确保弯曲梁沿水平移动方向移动,实验装置如图 2 所示.

向弯曲梁与有机玻璃板接触的右侧缝中不断插入厚度分别为 0.1, 0.2, 0.5 mm 的刀片,由于左右两块有机玻璃板之间距离一定,插入刀片后,梁只能沿轴

线弯曲变形,采用游标卡尺(精度 0.02 mm)精确测量梁右端水平位移量和梁的弯曲量.

3.2 实验结果分析

实验通过梁的水平位移来控制梁的变形,而固定于梁上表面的光纤光栅传感器随着梁的弯曲受拉变形,进而引起传感器波长发生改变.实验中假定传感器与梁协同变形,则由光纤光栅传感器的波长改变量可以计算出其应变值,即为梁在光栅处的应变值.梁弯曲幅度随右端水平位移的增大而增大,当梁弯曲量达到一定值后,光纤光栅传感器所受应变超出其极限范围,停止实验.

结合光纤光栅传感器的实测数据和梁的基本物理参数,由(10)和(11)式可以反算出各实验点下梁水平位移和弯曲量的理论值.三组实验中梁水平位移 Δx 和光栅微应变关系曲线的理论和实验结果见图 3.

由图 3 可以看出:光纤光栅传感器的应变值随梁水平位移的增大而增大,且应变增长速率随梁水平位移的增大而增大.三幅图中实验曲线和理论曲线规律大致相同,符合程度较好,这说明实验结果和理论结果基本吻合,证明了实验结果的可靠性.

三组实验中,梁弯曲量和光栅微应变的理论和实验结果如图 4 所示.

由图 4 可以看出:光栅传感器的应变值随梁弯曲量的增大而增大,且两者成正相关线性关系.三幅图中实验曲线和理论曲线规律大致相同,符合程度较好,这说明实验结果和理论结果基本吻合,再一次证明了实验结果的可靠性.

另外从图 4 还可以看出,随着梁水平位移和弯曲量的增大,实验曲线和理论曲线之间的差值不断增大,这里理论值和实验值之间的差值,可能是随着梁弯曲变形的增大,胶体在大应变情况下会产生松弛应变,所导致测量误差.

分别将各组弯曲光栅传感器及光纤光栅传感器直线拉伸实验结果进行比较,如图 5 所示.

由图 5 可以看出:三组弯曲光纤光栅传感器的应变值均随弹性梁水平位移的增加而增大,弹性梁的长度 L 越小,光纤光栅传感器的应变值越大;对同一 Δx ,各组弯曲光栅传感器的应变值均小于直线拉伸情况下光纤光栅传感器的应变值.综合以上分析可以看出,对同一极限应变值,弯曲光纤光栅传感器有更大的裂缝监测潜力,为实际工程的大尺度裂缝监

图 2 (网络版彩图)实验装置图

图3 $L=200$ mm(a), 300 mm(b), 400 mm(c)梁水平位移与光栅应变关系图

测提供了可能。

4 弯曲光纤光栅传感器重复使用性能实验

为了进一步研究弯曲光纤光栅传感器的性能,在前面实验的基础上对弯曲光栅传感器的重复使用性能进行了实验研究. 将波长均为 1535 nm 的两根光栅传感器光纤段牢固粘贴于长为 200 mm 的弯曲梁的上、下表面, 通过改变梁的水平位移来控制其弯曲

图4 $L=200$ mm(a), 300 mm(b), 400 mm(c)梁弯曲量与光栅应变关系图

变形. 其中第一组为光纤光栅传感器弯曲受拉(将传感器布置于梁上表面)重复性实验, 第二组为光纤光栅传感器弯曲受压(将传感器布置于梁下表面)重复性实验.

绘制两组实验中各传感器的波长改变量过程曲线, 如图 6 和 7 所示.

观察图 6 和 7 可以看出, 随着弯曲梁水平位移的增大, 受拉光栅传感器的波长随之增大, 波长改变量亦随之正向增大; 受压光栅传感器的波长随之减

图5 光纤光栅传感器的波长改变量对比图

图6 光纤光栅传感器弯曲受拉波长改变量过程线

图7 光纤光栅传感器弯曲受压波长改变量过程线

小, 波长改变量负向增大. 光纤光栅传感器无论是弯曲受压还是弯曲受拉, 四组重复实验的过程线均相互吻合, 这说明本弯曲光纤光栅传感器分别有很好的重复性弯曲受拉和弯曲受压性能, 且多次重复性使用后, 其传感性能基本不受影响.

两组光纤光栅传感器对应的应变值变化过程,

如图 8 和 9 所示.

由图 8 和 9 可以看出, 各组光纤光栅传感器的应变值均随梁水平位移的增加而增大, 光纤光栅传感器无论是弯曲受压还是弯曲受拉, 各组应变过程线同波长改变量过程线一样, 基本吻合. 而且, 两组实验中光纤光栅传感器的应变值随梁水平位移的变化趋势基本一致.

为了进一步研究本弯曲光纤光栅传感器的性能, 将两组实验(弯曲受拉实验和弯曲受压实验)的应变过程线绘制在一张图上, 如图 10 所示.

由上图可以看出, 无论是弯曲受拉还是弯曲受压, 同一水平位移对应光纤光栅传感器的应变值相差不大. 结合上文分析可以得知, 对同一 Δx 值, 受拉、受压光纤光栅传感器的波长改变量大小相等、方向相反, 光纤光栅传感器的应变值相等.

综上所述, 弯曲光纤光栅传感器具有很好的重复使用性能, 为结构裂缝的不确定性监测提供了可能.

图8 光纤光栅传感器弯曲受拉应变过程线

图9 光纤光栅传感器弯曲受压应变过程线

图 10 两组光纤光栅传感器应变过程线总图

5 结论

本文基于弯曲光纤光栅传感器的基本理论, 设

计了一种简易弯曲型光纤光栅裂缝传感装置, 并通过实验分析了本弯曲光纤光栅传感器的解调范围和复用性能, 主要结论如下.

1) 本弯曲型光纤光栅传感器的应变值随梁水平位移和梁弯曲量的增大而增大, 且梁的弯曲量和光栅传感器的应变值基本成正相关线性关系; 弯曲梁的长度 L 越小, 光栅传感器的波长解调范围越大, 灵敏度越高; 实验结果与理论结果吻合程度较高. 本弯曲光纤光栅传感器相比于同等条件下的普通光纤光栅传感器, 具有更大尺度的裂缝监测潜力, 从而大大提高了光栅传感器的裂缝监测能力.

2) 本弯曲型光纤光栅传感器具有很好的重复性使用性能, 且多次重复性弯曲受拉、弯曲受压, 其基本性能基本保持不变. 弯曲光纤光栅传感器的这一特性为结构裂缝的不确定性监测提供了可能.

参考文献

- 1 郑东健, 霍中艳, 李波. 基于 XFEM 的拱坝裂缝变形监控混合模型. 中国科学: 技术科学, 2012, 42: 213-219
- 2 Bao T F, Wang J L, Yao Y. A fiber optic sensor for detecting and monitoring cracks in concrete structures. Sci China Tech Sci, 2010, 53: 3045-3050
- 3 Gu C S, Li Z C, Xu B. Abnormality diagnosis of cracks in the concrete dam based on dynamical structure mutation. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 1930-1939
- 4 Zheng D J, Huo Z Y, Li B. Arch-dam crack deformation monitoring hybrid model based on XFEM. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 2611-2617
- 5 顾冲时, 李占超, 徐波. 基于动力学结构突变的混凝土坝裂缝转异诊断方法研究. 中国科学: 技术科学, 2011, 41: 1000-1009
- 6 吴中如, 徐波, 顾冲时, 等. 大坝服役状态的合评判方法. 中国科学: 技术科学, 2012, 42: 1243-1254
- 7 Li Z C, Gu C S, Wu Z R. Abnormality diagnosis of cracks in the concrete based on double crack tip opening displacement criterion. Sci China Tech Sci, 2013, 56: 1915-1928
- 8 Su H Z, Hu J, Wu Z R. A study of safety evaluation and early-warning method for dam global behavior. Struct Health Monit, 2011, 11: 269-279
- 9 Goh C S, Mokhtar M R, Butler S A, et al. Wavelength tuning of fiber Bragg gratings over 90nm using a simple tuning package. IEEE Photonic Tech Lett, 2003, 15: 557-559
- 10 Falciai R, Trono C. Curved elastic beam with opposed fiber Bragg gratings for measurement of large displacements with temperature compensation. IEEE Sens J, 2005, 5: 1310-1314
- 11 Zhou Z, Lan C G, Ou J P. New kind of FBG based crack (large strain) sensor. Proc SPIE, 2006, 6167: 616714
- 12 Sharon K, Kara P, Tasnim H, et al. Polymer in-fiber interferometer for large strain measurements. Proc SPIE, 2008, 6933: 69330W
- 13 Husdi I R, Nakamura K, Ueha S. Sensing characteristics of plastic optical fibres measured by optical time domain reflectometry. Meas Sci Technol, 2004, 15: 1553-1559

Bend type fiber Bragg grating crack sensor with big measurement range

BAO TengFei^{1,2}, ZHAO JinLei^{1,2}, ZHANG WanZhu³ & YAN PeiLin³

¹ State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

² College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

³ Beijing Engineering Corporation Limited, HYDROCHINA Corporation, Beijing 100024, China

Fiber Bragg grating (FBG) sensing technique has been widely applied to structural crack monitoring due to its advantages over other sensors. However, the measurement range of FBG sensors is small due to easy breakage of silica fiber. In this paper, using current research results for reference, a simple bend type FBG crack sensing setup was designed. The performance of the sensor was verified through experiments. The experimental results show that the crack sensing of the sensor is reliable, the measurement range can be extended a lot compared with traditional FBG crack sensors, and that the sensor possesses good repeatability to cope with the uncertainty of crack development.

fiber Bragg grating, crack monitoring, bend type, concrete structures

doi: 10.1360/N092014-00187