

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.004



分布式光纤在混凝土结构裂缝监测中的应用

叶宇霄¹, 赵新铭¹, 吴刚², 谢雪峰², 姚剑²

(1. 南京航空航天大学 土木工程系, 南京 210016; 2. 江苏省泰州市水利局, 江苏 泰州 225300)

摘要: 分布式光纤在结构健康监测的应用中, 定量分析裂缝是难点。裂缝对光纤产生拉伸、弯曲和折角的影响, 需要深入研究各因素影响程度。测试光纤角度的频移影响, 并对比研究了轴向拉伸造成的频移影响。提出一种基于BOTDA分布式光纤传感的计算公式并将该公式运用于裂缝成像软件中。试验结果表明: 在裂缝产生后, 光纤角度的变化对试验结果产生较大影响, 且考虑角度因素后, 裂缝成像更接近真实情况。使用分布式光纤监测混凝土裂缝时, 需要考虑角度问题。

关键词: 混凝土; 裂缝; 光纤传感; 角度

中图分类号: TU317 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)01-0024-06

Application of distributed optical fiber in the monitoring of cracks in concrete structures

Ye Yuxiao¹, Zhao Xinming¹, Wu Gang², Xie Xuefeng², Yao Jian²

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China;
2. Jiangsu Taizhou Water Bureau, Taizhou 225300, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: In the application of distributed optical fiber structure health monitoring, quantitative analysis of cracks is difficult. The effect of tensile, bending and folding on optical fiber and the influence degree of various factors needs to be studied. In this paper, the influence of frequency shift on optical fiber angle is tested and the effect of frequency shift caused by axial tension is compared. A new calculation formula based on BOTDA distributed optical fiber sensing is proposed and applied to crack imaging of software. The experimental results show that the change of the optical fiber angle has a great influence on the experimental results after the crack is generated, and the fracture imaging is closer to the real situation after taking the angle factor into account. Therefore, when using distributed optical fiber to monitor concrete cracks, the angle should be taken into account.

Keywords: concrete; crack; fiber sensor; angle

自大量使用钢筋混凝土作为建筑材料以来, 混凝土裂缝就是困扰专家们的热点问题^[1]。混凝土结构从筑成到退出工作始终有裂缝伴生, 裂缝的存在

不可避免, 随着裂缝的发展, 混凝土结构的力学性能和耐久性将会受到影响, 必须根据结构的功能和工作环境对裂缝采取不同措施^[2]。结构建成后产生的

收稿日期: 2017-07-04

基金项目: 江苏省水利科技项目(JS-20140898)

作者简介: 叶宇霄(1992-), 男, 主要从事无损检测研究, E-mail: 285098127@qq.com。

赵新铭(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: xmzhao@nuaa.edu.cn。

Received: 2017-07-04

Foundation item: Jiangsu Province Water Conservancy Science and Technology Project(JS-20140898)

Author brief: Ye Yuxiao(1992-), Master. main research interest: Nondestructive testing, E-mail: 285098127@qq.com.
Zhao Xinming(corresponding author), PhD, professor, E-mail: xmzhao@nuaa.edu.cn.

裂缝难以修补,且有可能造成严重后果,需要根据裂缝的大小、形状、方向、分布以及结构所处的环境条件等评估裂缝的危害等级,从而决定采取相应的补救措施^[3]。混凝土裂缝的宽度不宜超过0.4 mm,过大的裂缝会使钢筋锈蚀。因此,需要准确可靠的裂缝监测方式。

光纤传感器监测技术因具有实际操作简单、可分布式布置、探测距离长、对外界刺激敏感、对结构工作性能影响较小等特点,在结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)中与其他点式监控手段相比具有显著优势。经过学者们深入研究,光纤定性监测技术已经得到长足发展和进步。钱振东等^[4]对钢桥面疲劳裂缝进行研究。何勇等^[5]、毛江鸿等^[6]对使用光纤监测结构裂缝的应用进行研究,建立了300 mm标注的光纤裂缝传感器监测裂缝宽度、夹角的数学模型。康师表^[7]基于BOTDA的钢桥面铺装裂缝疲劳扩展进行研究。分布式光纤的高精确性确保他可以达到预测裂缝出现的可能^[8],而且具备同时监测多类数据的可能(应变、温度)^[9]。因此,光纤在监测裂缝的问题上仍有很大的研究空间。虽然,在分布式光纤监测混凝土结构裂缝这一领域,相关科研人员已经得到一些成果,但还不能满足实际工程对裂缝监测的要求。已经有将分布式光纤应用于工程实际问题的先例,并证实至少在较小范围内可以适应复杂的裂缝情况^[10]。

首先,阐述了分布式光纤监测裂缝角度的理论公式。通过布置在玻璃板上粘贴轴向和斜交光纤试验,分析在合理的裂缝宽度范围内(0~1 mm)光纤与裂缝夹角占总频移的比例,以确定角度因素是否存在考虑的必要性。通过不同光纤夹角试验,推出光纤夹角与频移关系,再通过得到的角度-频移关系,修正只考虑温度和轴向应变的传统公式;随后,使用新公式编程,编写成像软件并与真实的裂缝情况进行对比,讨论该公式的可行性。

1 分布式传感技术及监测原理

分布式光纤传感技术发展迅速,目前,主要有基于瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射等的主要技术。其中,基于瑞利散射的OTDR测量精度不足,传感距离不够,现有的研究较少;基于拉曼散射的有关技术返回信号较弱;基于布里渊散射的相关技术与其他技术相比具有明显优势。

1.1 BOTDA 监测技术原理

BOTDA 全称为 Brillouin Optical Time Domain Analysis(布里渊光时域分析),是一款基于布里渊散射的分布式光纤传感器。其监测到的布里渊散射频移量 ν_B 与温度、应变的变化呈线性关系。由此,可以通过监测 ν_B 获得光纤各部位应变和温度的变化量。现有研究认为,布里渊频移量 $\Delta\nu_B$ 应该符合如下关系式(1)^[11]。

$$\Delta\nu_B = \Delta T \frac{d\nu_B(T)}{dT} + \epsilon \frac{d\nu_B(\epsilon)}{d\epsilon} \quad (1)$$

式中: ϵ 为光纤应变变量; ΔT 为温度变化量; $\frac{d\nu_B(T)}{dT}$ 为温敏系数; $\frac{d\nu_B(\epsilon)}{d\epsilon}$ 为应变系数。

1.2 光纤角度原理

在中国,已经有利用光纤角度解决工程实际问题的相关理论和应用手段^[12]。刘浩吾^[13]对基于OTDR光纤传感技术应用于混凝土重力坝的裂缝监测进行了研究。提出了在单根光纤分辨率有限的情况下,通过改变光线的铺设方式,与混凝土裂缝形成角度来提高光纤监测精度。

在裂缝产生后,由于光纤被紧密地贴合在监测对象的表面或埋在结构内部,通常要经历温度、轴向拉伸和角度3种变化。布里渊频移量 $\Delta\nu_B$ 的实际组成为

$$\Delta\nu_B = \Delta T \frac{d\nu_B(T)}{dT} + \Delta\epsilon \frac{d\nu_B(\epsilon)}{d\epsilon} + 2\Delta\theta \frac{d\nu_B(\theta)}{d\theta} \quad (2)$$

式中: θ 为斜交裂缝时光纤与裂缝的夹角; $\frac{d\nu_B(\theta)}{d\theta}$ 为弯敏系数。 $2\Delta\theta \frac{d\nu_B(\theta)}{d\theta}$ 即为光纤与裂缝斜交时光纤产生的两个角度带来的布里渊频移量影响。

光纤与裂缝斜交布置时,受到裂缝的横向拉伸,产生了两个转角。由于光纤角度的理论值为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,而裂缝的宽度则不存在上限值,理论上来说角度和轴向伸长的影响可能不在一个量级上。由于混凝土裂缝的宽度不宜超过0.4 mm,因此,当需要监测的裂缝宽度为0.4 mm左右时,需要考虑光纤角度带来的影响。如图1所示。

裂缝和并列光纤相交得夹角 $\angle 1$,如图2所示。

图2中, $\angle 3 = 90^\circ$, $\angle 2 = (90^\circ - \angle 1)$,代入式(2)中,整理得到光纤的实际伸长量

$$\Delta\epsilon = \left[\Delta\nu_B - \Delta T \frac{d\nu_B(T)}{dT} - 2(90^\circ - \angle 1) \frac{d\nu_B(\theta)}{d\theta} \right] / \frac{d\epsilon}{d\nu_B(\epsilon)} \quad (3)$$

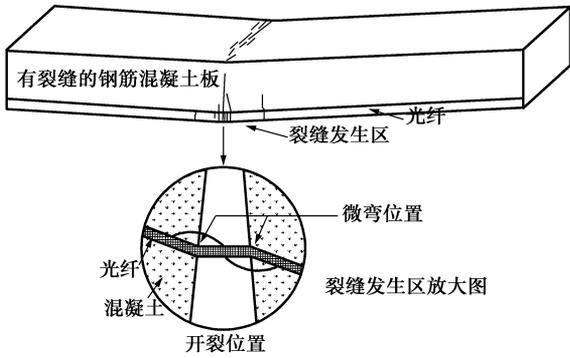


图 1 光纤监测裂缝细部结构图

Fig. 1 Detail diagram of optical fiber monitoring crack structure

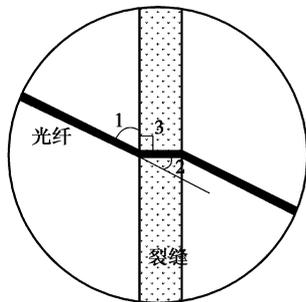


图 2 光纤角度计算图

Fig. 2 Optical fiber angle calculation diagram

1.3 基于 BOTDA 的光纤角度原理

由于使用 BOTDA 解调仪监测光纤变化,而基于 BOTDA 的光纤监测对没有伸长量的光纤纯弯曲无法监测,因此,角度变化最终回归到伸长量的变化上来。通过有角度状态和无角度状态下相同裂缝宽度直线伸长量的不同来确定角度的量。

如图 3 所示,当裂缝通过正交光纤 l_2 和斜交光纤 l_1 时,两者的伸长量不一致,这种差异主要与光纤与裂缝的夹角有关。

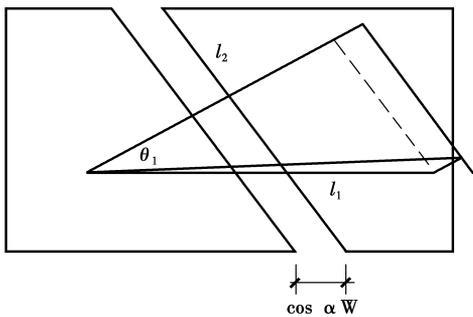


图 3 角度计算图

Fig. 3 Angle calculation chart

分析角度与裂缝宽度的关系可知,当斜交裂缝的宽度为 ω 时,斜交光纤长度由原来的 l_1 变为现在的 l'_1 。因此,光纤的伸长量应为 $l'_1 - l_1$ 。用 l_1 表示 l'_1 , 结果为

$$l'_1 = \sqrt{(l_1 \sin \theta)^2 + (l_1 \cos \theta + \omega)^2} \quad (5)$$

整理得到光纤应变

$$\epsilon = \sqrt{(\sin \theta)^2 + (\cos \theta + \frac{\omega}{l_1})^2} - 1 \quad (6)$$

式(6)中拥有 θ 和 ω 两个未知数,因此,需要通过具体的光纤布置手段来求解。

2 分布式光纤实验

2.1 关于角度影响的实验探究

为了研究光纤的角度原理,进行了如图 4 所示的分布式光纤试验。图 4 左图为轴向拉伸试验,右图为斜交拉伸试验。

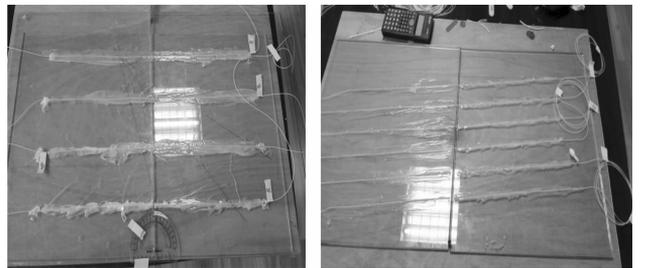


图 4 光纤标定试验图

Fig. 4 Optical fiber calibration test diagram

由于在混凝土的表面粘结光纤需要考虑恶劣的工作环境和分布式的概念,因此,该试验所有光纤都将环氧树脂粘贴在玻璃板的表面,这样可以有效传递力,并在一定程度上改善光纤的工作环境。验证了使用环氧树脂贴敷光纤可以获得准确的频移-缝宽值。

将 4 根连通的光纤均匀分布在玻璃板的表面,用环氧树脂粘贴。通过人工制造裂缝的方式测量了在 0.08、0.14、0.2、0.26、0.32 mm 等裂缝宽度下,光纤的频移影响。实验数据显示,不同的宽度对光纤的频移量产生了影响,且裂缝宽度变化越大的光纤产生的频移量也越大,如图 5 所示。

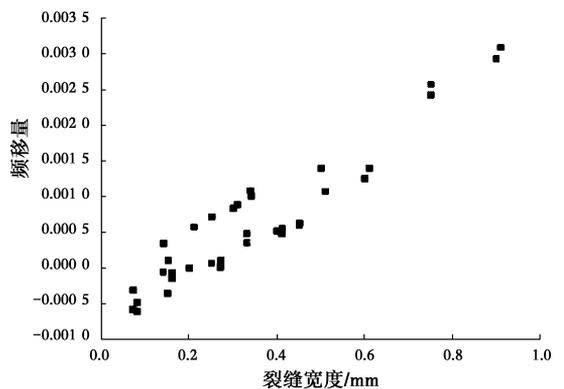


图 5 裂缝宽度-频移图

Fig. 5 Crack width-frequency shift diagram

实验数据显示,光纤所监测的裂缝宽度变化与频移基本符合线性关系。可以得到使用环氧树脂全程贴敷的光纤频移与裂缝宽度变化量的公式,近似为

$$\frac{3}{700}\Delta l - \frac{0.6}{700} = \Delta v_B \quad (7)$$

式中: Δl 为裂缝的宽度; Δv_B 为频移量。

将光纤均匀分布在玻璃板的表面,用环氧树脂粘贴。通过人工制造裂缝的方式测量在不同的裂缝宽度和折角下光纤的频移影响。试验通过设置 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 的裂缝夹角,总结出角度与频率呈线性变化关系。如图 6 所示,相同裂缝宽度在不同角度下,频率随着角度的增大而增大。

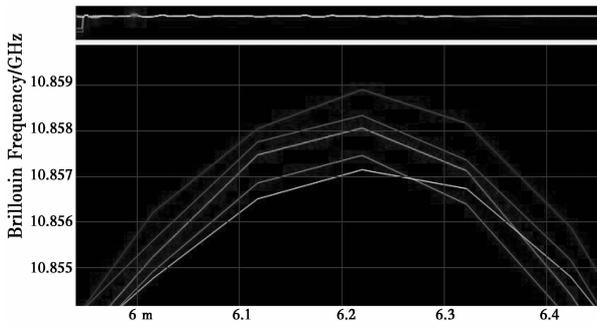


图 6 DITEST 采集的角度-频移图

Fig. 6 Angle frequency shift map acquired by DITEST

对比轴向受拉试验,得出角度因素所占总频移的比重,如图 7 所示。

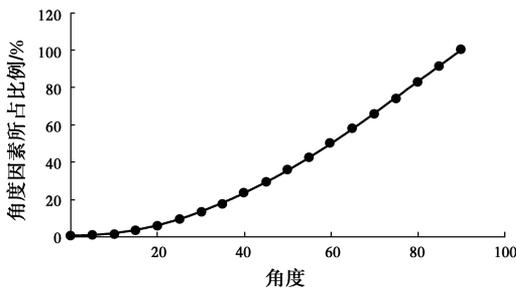


图 7 角度因素所占比例图

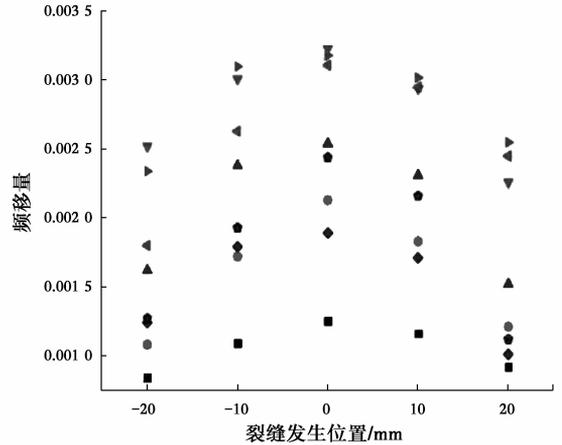
Fig. 7 Proportion diagram of angle factor

由此可见,夹角越大,角度带来的影响就越不可忽略。因此,有必要研究角度对光纤检测的影响。

2.2 极值法测定裂缝位置

使用环氧树脂固定光纤时,光纤的频移变化量与环氧树脂的传力性能有密切关系。由于环氧树脂材料受力的特点,环氧树脂的应变与和裂缝的距离成反比,因此,可以反映裂缝的精确发生位置。经计算,通过拟合裂缝附近数据的二次曲线,求得驻点与实际裂缝位置对比。在裂缝处的频移值如图 8 所

示。其偏移值较小,可将此法称为极值法,通过极值法确定的裂缝点可以将测量的精度提升 60%,变动范围由 ± 10 cm 缩小到 ± 4 cm 范围内。而且,由实验所得负数段数据呈线性来看,由于环氧树脂的固定作用,光纤可以表征被测对象的受压状况。



注: ■ 1 ● 2 ▲ 3 ▼ 4 ◀ 5 ▶ 6 ◆ 7 ● 8

图 8 裂缝位置频移图

Fig. 8 Frequency shift diagram of crack location

具体数据如表 1 所示。

表 1 裂缝测点数表

Table 1 Table of fracture measurement

裂缝测点	裂缝位置	偏移值
1 号位置	18.235	0.035
2 号位置	18.184	0.016
3 号位置	21.172	0.028
4 号位置	21.175	0.025
5 号位置	24.221	0.021
6 号位置	24.233	0.033
7 号位置	27.189	0.011
8 号位置	27.167	0.033

3 裂缝成像初探

当使用光纤监测玻璃板裂缝时,因为粘结材料的作用,可以提高光纤测量的精度。可以在已知光纤布置方案的前提下反推角度和宽度,解决在实时监测中已知数据太少的弊端。因此,根据式(3)编写裂缝成像软件,运行原理如下。

在之前的实验中,根据 BODTA 解调仪监测的图像取出峰值作为参考点,如图 9 所示。然后,对比经过裂缝变化之后的图像,寻找频移量变化最大的几个位置,如图 10 所示。根据这几个点在图上的距

离及光纤的布置方案,定出出现变化的几个点在结构简图的位置,如图 11(a);将几个点连线获得裂缝的图像,如图 11(b);附上光纤的布置简图,算出每个点的夹角,如图 11(c);根据式(6)求出每一个点的裂缝宽度,然后,做两条距离为裂缝宽度的平行直线并连线,得出裂缝简图,如图 11(d)。

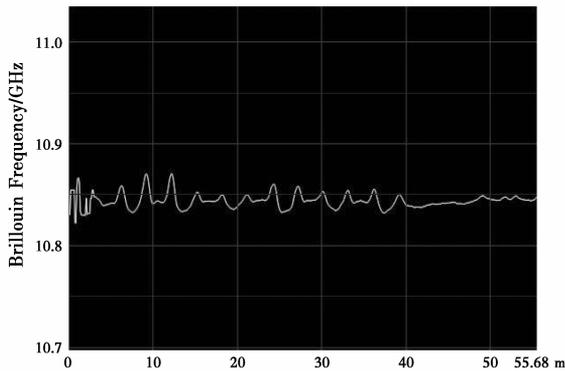


图 9 BOTDA 频移图

Fig. 9 BOTDA frequency shift diagram

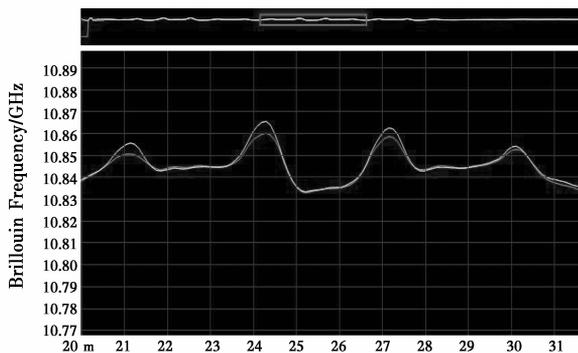


图 10 频移峰值差异图

Fig. 10 Difference of Peak point frequency shift

根据裂缝宽度通过光纤在裂缝监测上的应用,可以通过编程编写相应程序,并应用于实地裂缝监测中。虽然,光纤的数据采集仍然需要昂贵的电子设备支撑,但是引入软件和网络将是实现裂缝实时监测、预警及查阅的重要一步。

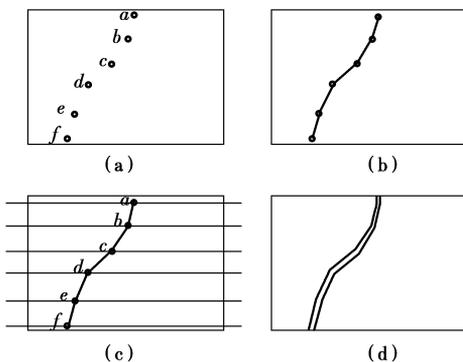


图 11 裂缝成像过程图

Fig. 11 Crack imaging process map

3 结论

系统介绍了基于 BOTDA 分布式光纤角度和测量原理,提出了光纤角度的受力模型和角度测量实验模型,并提出了基于光纤角度的计算公式。通过实验得出结论:

1)使用有一定变形能力的材料(例如,环氧树脂)可以将测量的精度提升 60%,由 10 cm 的变动范围缩小到 4 cm 范围内,而且,可以保护光纤。

2)强调了角度因素在裂缝测量中的重要性,使用考虑角度影响的公式可以缩小光纤测量的误差。

3)使用反算法,验证了传感器推算裂缝角度的可行性,并为基于 BOTDA 的裂缝成像提出思路建议。

使用的解调仪精度为 10 cm,在使用玻璃板实验测量裂缝时,通过所得的实验数据描绘出了与玻璃板的实际裂缝有较高仿真度的裂缝图像,证明了极值法在基于 BOTDA 裂缝成像的可行性。现有的裂缝监测实验中,所监测的基本为单一裂缝或直线裂缝。

参考文献:

- [1] 张欣,姚森敬,陈泰,等. 基于布里渊散射的分布式光纤技术的研究[J]. 光通信技术,2015(1):53-55.
ZHANG X, YAO J S, CHEN T, et al. Research of the distributed optical fiber technology based on Brillouin scattering [J]. Optical Communication Technology, 2015(1):53-55. (in Chinese)
- [2] 刘永智. 布里渊散射分布式光纤传感器的理论分析和相关技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2006.
LIU Y Z. Theoretical analysis and related techniques of distributed optical fiber sensor based on Brillouin scattering [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [3] 窦超. 光纤传感技术在水利安全监测中的应用[J]. 唐山学院学报,2015(28):26-28.
DOU C. Application of optical fiber sensing technology in water conservancy safety monitoring [J]. Journal of Tangshan College, 2015(28):26-28. (in Chinese)
- [4] 钱振东,韩光义,黄卫. 基于 BOTDA 的钢桥面铺装裂缝疲劳扩展研究[J]. 土木工程学报(自然科学版),2009,42(10):132-136.
QIAN Z D, HAN G Y, HUANG W. A study on crack fatigue propagation of steel deck pavement based on BOTDA [J]. Journal of Civil Engineering (Natural Science Edition), 2009, 42(10):132-136. (in Chinese)

- [5] 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.
HE Y,JIANG S,MAO J H,et al,Cracking method and experiment with distributed fiber sensor[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2012, 34 (1): 1-6. (in Chinese)
- [6] 毛江鸿,崔磊,金伟良,等. 基于分布式光纤传感的混凝土裂缝识别与监测试验研究[J]. 传感技术学报,2014, 27(9):1298-1303.
MAO J H, CUI L, JIN W L, et al. Experimental research on concrete crack recognizing and monitoring based on distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27 (9): 1298-1303. (in Chinese)
- [7] 康师表. 基于BOTDA的组合梁桥面板裂缝监测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
KANG S B. Crack monitoring of composite beam bridge deck using BOTDA[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] GERARDO R, JOAN R C, SERGI V. Cracking assessment in concrete structures by distributed optical fiber [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 9(24): 1-11.
- [9] BAO X, WEBB D J, JACKSON D A. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber [J]. Optics Letters, 1994, 19(2): 141-143.
- [10] XIANG L G, CHEN Z Y, ANSARI F. Fiber optic distributed crack sensor for concrete structures. ASCE2004: advanced technology in structural engineering [C]// Structures Congress, Philadelphia, Pennsylvania, United States, 2000: 1-8.
- [11] LIU R M, BABANAJAD S K, TAYLOR T, et al. Experimental study on structural detect detection by monitoring distributed dynamic strain [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(5): 1-8.
- [12] BILLON A, HENAULT J M, QUIERTANT M, et al. Qualification of a distributed optical fiber sensor bonded to the surface of a concrete structure; a methodology to obtain quantitative strain measurements [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(9): 1-13.
- [13] 刘浩吾. 混凝土重力坝裂缝观测的光纤传感网络[J]. 水利学报, 1999, 30(10): 61-64.
LIU H W . Optical fiber sensor network for crack observation of concrete gravity dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30 (10): 61-64. (in Chinese)

(编辑 胡玲)