

# 基于分布式光纤传感的裂缝监测应用研究

杨樟成<sup>1</sup>, 王维国<sup>2</sup>, 冯亚非<sup>1</sup>, 张守龙<sup>2</sup>, 朱建朝<sup>2</sup>

<sup>1</sup>杭州应用声学研究所, 浙江 杭州

<sup>2</sup>宁波市交通建设工程试验检测中心有限公司, 浙江 宁波

Email: 435386106@qq.com, 191781690@qq.com, fengyafeicool@163.com, 827017212@qq.com, 412334440@qq.com

收稿日期: 2021年6月1日; 录用日期: 2021年6月22日; 发布日期: 2021年6月29日

## 摘要

钢筋混凝土结构在日常运营中, 由于裂缝的出现, 会导致内部渗水、钢筋锈蚀等问题, 从而破坏结构的安全性。因此, 钢筋混凝土结构的裂缝监测是评估建筑结构的重要依据, 本文采用分布式光纤应变/温度传感技术(BOTDA), 将传感光缆铺设在混凝土内部和表面, 实现了对混凝土裂缝的监测, 并且通过钢筋混凝土梁的静载试验, 验证了对裂缝宽度跟踪监测的有效性, 对结构健康监测有重要意义。

## 关键词

布里渊, 分布式, 光纤传感, 混凝土, 裂缝

# Research on Application of Crack Monitoring Based on Distributed Optical Fiber Sensing

Zhangcheng Yang<sup>1</sup>, Weigu Wang<sup>2</sup>, Yafei Feng<sup>1</sup>, Shoulong Zhang<sup>2</sup>, Jianchao Zhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Ningbo Communication Construction Engineering Testing Center Co. Ltd., Ningbo Zhejiang

Email: 435386106@qq.com, 191781690@qq.com, fengyafeicool@163.com, 827017212@qq.com, 412334440@qq.com

Received: Jun. 1<sup>st</sup>, 2021; accepted: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2021; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In the daily operation of reinforced concrete structures, due to the appearance of cracks, problems

文章引用: 杨樟成, 王维国, 冯亚非, 张守龙, 朱建朝. 基于分布式光纤传感的裂缝监测应用研究[J]. 土木工程, 2021, 10(6): 615-621. DOI: 10.12677/hjce.2021.106069

such as internal water seepage and steel corrosion will be caused, which will undermine the safety of the structure. Therefore, the monitoring of cracks in concrete structures is an important basis for evaluating building structures. In this paper, distributed optical fiber strain/temperature sensing technology (BOTDA) is used to lay the sensing optical cables on the inside and on the surface of the concrete to realize the occurrence of cracks and cracks in the concrete. Path monitoring and the static load test of reinforced concrete beams verify the effectiveness of the crack width tracking monitoring, which is of great significance to structural health monitoring.

## Keywords

Brillouin, Distributed, Optical Fiber Sensing, Concrete, Crack

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国经济的快速发展,大型土木工程结构日益增多,如超大桥梁、大型水利工程、隧道、大型边坡等,但土木工程结构在环境腐蚀、材料老化、疲劳效应和突发效应的作用下会产生损伤积累和安全隐患。特别是对于混凝土结构,现在仍以人工巡检和传统的点式电学传感器为主要的检测手段,只能观察混凝土表面结构异常位置,对于混凝土内部的缺陷和异常变化很难感知。为了保障结构安全健康,急需一种切实有效的监测手段对大型结构进行实时连续在线监测。

基于新型的光纤传感技术以本质安全、抗电磁干扰、灵敏度高、空间连续测量、长距离、大范围等优点成为结构健康监测的重要选择之一。而分布式光纤传感技术以其测量精度高,测量距离远而备受关注,利用光纤中的光散射信号可以实现被测结构物的温度、应变、振动信号的测量,并结合其信号传输特点,可以将光纤路径上的任何一点看作是一个传感元件,从而测量出光纤上任一点的结构响应,最后实现长距离结构响应的分布式测量。

本文采用分布式光纤传感技术,从理论到试验模型研究了分布式传感光纤应用于混凝土裂缝监测的可行性,证明了裂缝大小与应变变化的线性关系,将传感光缆布设于混凝土结构内部和表面,不仅可以测量混凝土结构内部连续的应变变化,还可以准确定位裂缝发生位置及裂缝的大小,对预防结构建筑灾害的发生有重要意义。

## 2. 技术原理

光纤中的散射主要有拉曼散射、布里渊散射和瑞利散射三种,如图1所示。其中瑞利散射是一种弹性散射,对振动敏感;布里渊散射是一种非弹性散射,对温度和应变敏感;拉曼散射也是非弹性散射,只对温度敏感。

BOTDA (Brillouin optical time domain analysis)是基于受激布里渊散射效应的光纤传感技术。如图2所示,当从光纤两端入射的相向传输的泵浦脉冲光和连续光的频率差在光纤固有布里渊增益范围内,满足受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering (SBS))放大条件时,这两束光将通过声波场发生SBS作用,产生能量转移,发生受激布里渊放大。待测光纤温度或者应变发生变化时,光纤的固有BFS会发生改变,当两束光的频差等于光纤固有的BFS时,能量转移最大。据此,通过扫描在BFS附近的泵浦脉冲

光和探测光的频率偏移可得到传感光纤的布里渊散射谱，并利用 BFS 与温度和应变之间的线性关系来实现分布式温度和应变解调[1] [2] [3]。

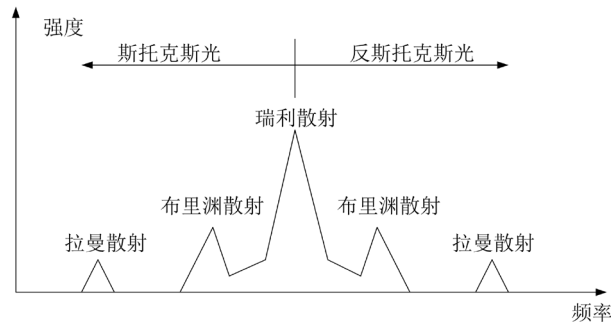


Figure 1. Scattering spectrum in optical fiber  
图 1. 光纤中的散射光谱

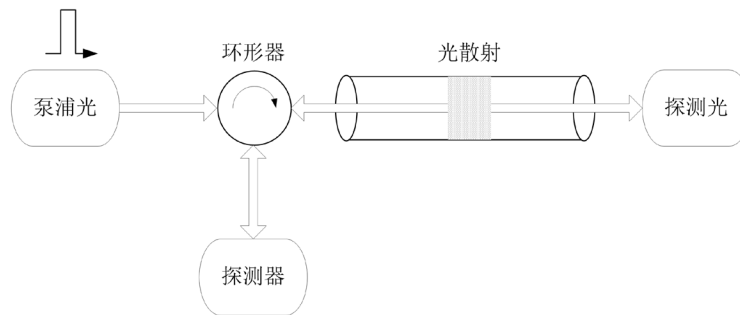


Figure 2. Schematic diagram of BOTDA  
图 2. BOTDA 原理图

在光纤中存在着热光效应和弹光效应，温度和应变分别通过热光效应和弹光效应使光纤折射率发生变化，而温度和应变对声速的影响则是通过对  $E$  (杨氏模量)， $k$  (泊松比)， $n$  (折射率)， $\rho$  (密度)的变化而变化，可以得到布里渊频移公式如下。

$$f_B(\varepsilon, T) = \frac{2v_p}{C} n(\varepsilon, T) \sqrt{\frac{[1 - k(\varepsilon, T)]E(\varepsilon, T)}{[1 + k(\varepsilon, T)][1 - 2k(\varepsilon, T)]\rho(\varepsilon, T)}} \quad (1)$$

在实际工程应用中，传感光纤检测的也是小应变，因而可将式(1)右边各项与  $\varepsilon$  有关各项的变量在零点作泰勒展开，并精确到一次项。

$$f_B(\varepsilon, T_0) = f_B(0, T_0) \left\{ 1 + \frac{n'_\varepsilon}{n(0, T_0)} \varepsilon + \frac{E'_\varepsilon}{2E(0, T_0)} \varepsilon - \frac{\rho'_\varepsilon}{2\rho(0, T_0)} \varepsilon + \frac{k'_\varepsilon k(0, T_0)[2 - k(0, T_0)]}{[1 - k^2(0, T_0)][1 - 2k(0, T_0)]} \varepsilon \right\} \quad (2)$$

上式可简写为：

$$f_B(\varepsilon, T_0) = f_B(0, T_0) [1 + (\Delta n_\varepsilon + \Delta E_\varepsilon + \Delta \rho_\varepsilon + \Delta k_\varepsilon) \varepsilon] \quad (3)$$

同理可得温度与应变的关系式可推导为：

$$f_B(\varepsilon_0, T) = f_B(\varepsilon_0, 0) [1 + (\Delta n_T + \Delta E_T + \Delta \rho_T + \Delta k_T) T] \quad (4)$$

以上系数均与光纤本身性质有关， $\Delta n_\varepsilon$ 、 $\Delta E_\varepsilon$ 、 $\Delta \rho_\varepsilon$ 、 $\Delta k_\varepsilon$ 、 $\Delta n_T$ 、 $\Delta E_T$ 、 $\Delta \rho_T$ 、 $\Delta k_T$  为常数，所以总结可得，增益谱峰处的频移(布里渊频移)与光纤所受应变成正比关系，所以测得光纤各点的布里渊频移

值，可由下式得到光纤各点所受应变：

$$\Delta f = C_{11} \times \Delta \varepsilon + C_{12} \times \Delta T \tag{5}$$

其中  $\Delta f$  是布里渊频移变化量， $\Delta \varepsilon$  是应变变化量， $\Delta T$  是温度变化量， $C_{11}$  及  $C_{12}$  分别是布里渊频移/应变系数和频移/温度系数，通常情况下两个系数分别为 0.05 MHz/ $\mu\varepsilon$  和 1 MHz/ $^{\circ}\text{C}$ ，即布里渊频移 1 MHz 对应 20  $\mu\varepsilon$  或者 1 $^{\circ}\text{C}$ 。

近十几年来，随着 BOTDA 传感技术的兴起，主要针对大型、长距离的基础工程进行健康监测，已在桥梁、隧道、大坝等工程应变监测中应用[4] [5] [6]，将其应用于结构裂缝监测相对较少，本文通过分布式光纤裂缝试验，验证了该技术的可行性。

### 3. 裂缝标定试验

本文中实验所采用的是日本 NEUBREX 公司的 NBX-7000 分布式光纤应变分析仪，该设备采用脉冲预泵浦光时域分析 DPP-BOTDA (Pulse-Pre-Pump Optical Time Domain Analysis)技术，可以实现最高空间分辨率 2 cm 的测量精度。试验中为了研究裂缝大小与应变变化量直接的关系，自制裂缝控制器，该装置由 2 块 300 mm  $\times$  300 mm  $\times$  3 mm 铝板组成，通过螺旋测微计顶推调整裂缝宽度，裂缝控制精度为 0.01 mm，如图 3 所示。将 0.9 mm 直径的紧包传感光纤粘贴固定在铝板上，然后引线熔接跳线头接入解调设备。再将裂缝间距控制器通过螺钉固定在钢板上，旋转两个间距控制器上螺钉的位置，即可调节两块铝板的间距，同步测量光纤的应变。



Figure 3. Diagram of crack measuring device  
图 3. 裂缝测量装置图

设置空间分辨率为 10 cm 情况下，测量段光缆长度为 20 cm，测量初始应变。逐级增大裂缝宽度，每级增加 0.01 mm，共六级，该分辨率情况下的光缆应变变化，如图 4 所示。

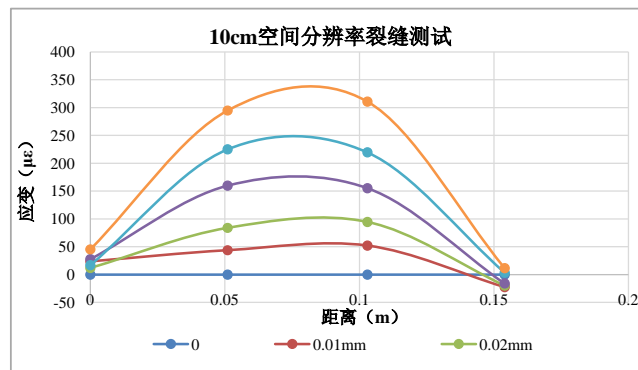


Figure 4. Crack test results with different spatial resolutions  
图 4. 不同空间分辨率裂缝测试结果

从图可得, 0.16 m 的距离内, 有明显的应变变化, 而且逐级加载呈现线性增加的趋势, 选择应变最大位置点 0.1 m 处做裂缝与应变的变化图, 如图 5 所示。

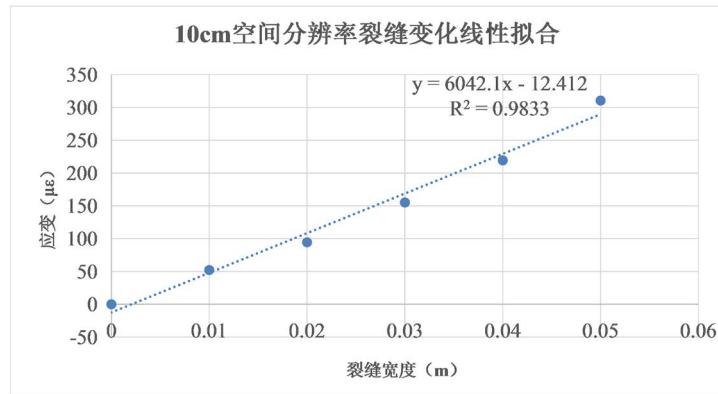


Figure 5. 10 cm resolution crack width calibration diagram

图 5. 10 cm 分辨率裂缝宽度标定图

从图 5 可得, 在 10 cm 空间分辨率情况下, 裂缝大小与应变量为线性关系, 得到的裂缝与应变的定量系数为:  $6042 \mu\epsilon/\text{mm}$ 。对于该应变分析仪的应变测量精度为  $5 \mu\epsilon$ , 反推得到裂缝测量精度最小可达  $8 \times 10^{-4} \text{ mm}$ , 从而说明了分布式光纤应变监测技术具有极高的裂缝测试精度, 完全满足实际工程要求。

#### 4. 混凝土梁裂缝试验

以上分析证明了使用分布式光纤测量表面裂缝的可行性, 接下来用分布式光纤传感技术测试混凝土梁在弯矩作用下的受力特性[7] [8], 试验装置如图 6 所示, 混凝土梁长度约 2.5 m, 在混凝土内部和表面分别安装分布式传感光缆, 其中内部布设两根金属铠装应变光缆, 外部表面布设一根 0.9 mm 的紧套分布式光缆。

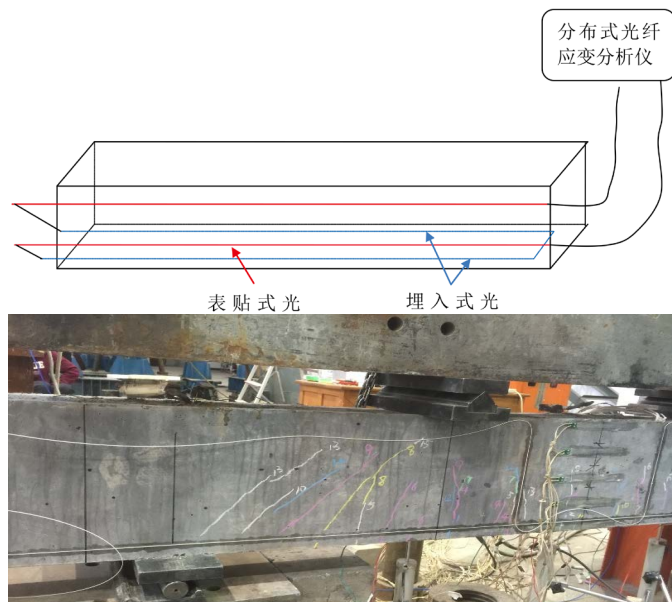


Figure 6. Schematic diagram of optical cable laying device

图 6. 光缆布设装置示意图

设置 BOTDA 空间分辨率为 10 cm，对混凝土梁进行逐级荷载试验，共计 23 级荷载，应变分布如图 7 所示，其中 10~12 m 为表面粘贴的紧包光纤，12.5~16 m 和 18~20 m 为内部金属铠装光缆。

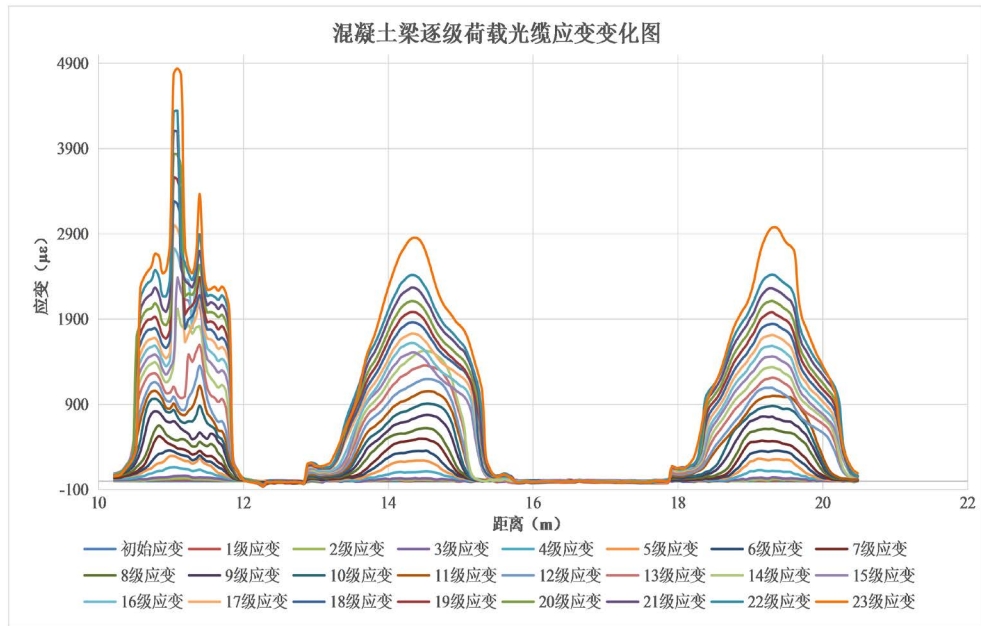


Figure 7. Load and strain change diagram of optical fiber cable step by step  
图 7. 光缆逐级荷载应变变化图

从图 7 可得，随着荷载逐级加大，表贴式分布式光缆和埋入式分布式光缆应变逐级增大，而且埋入式的两根光缆呈现对称分布。取表贴式分布式光缆 11 m 处和埋入式分布式光缆 14.4 m 处的光缆绘制单点应变变化图，如图 8 所示。

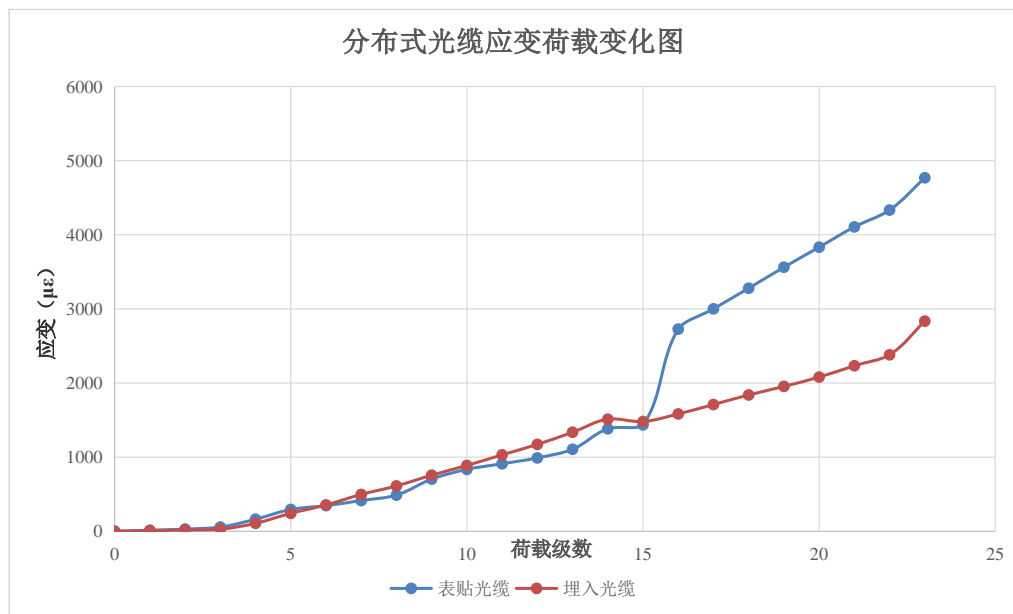


Figure 8. Single-point gradual load-strain change diagram  
图 8. 单点逐级荷载应变变化图



根据现场测量结果,并经过试验分析得到如下结论:1)混凝土结构表面应变变化比内部大,开裂首先从表面开始,然后裂缝延伸至内部;2)内部金属铠装光缆由于自身弹性模量较大,在模型加载过程中可能会出现相对位置滑移的情况,所以对于裂缝测量不明显,而表贴式紧包光纤由于弹性模型小,可以较好的与模型表面粘贴,测量表面裂缝开裂信息;3)加载过程分为3个阶段,弹性阶段、裂缝开展阶段、钢筋屈服和破坏阶段。4)1~5级加载为弹性阶段,应变曲线呈线性增长,此时没有裂缝产生,此时最大应变为 $200\ \mu\epsilon$ ,基本符合混凝土开裂的极限条件;5)5~22级加载为裂缝开展阶段,随着荷载增加,梁底开裂,应变继续增加;荷载继续增加,裂缝数量增多、宽度增大并向受压区边缘延伸,从图7,图8中可得,表面粘贴的紧包应变光纤明显有两个峰值异常变大的位置点,该位置点即为裂缝展开变大的位置;6)23级之后为钢筋屈服和破坏阶段,当纵筋屈服,裂缝数量基本不再增加,宽度继续增大,向上延伸加快,应变迅速增加;继续加载,裂缝扩展明显,中性轴上升,直至受压区被压坏,梁破坏。

## 5. 结论

本文通过实验验证了分布式光纤传感技术不仅能够准确定位裂缝的发生位置,还能定量测到裂缝的大小,另外在混凝土梁模型荷载试验过程中,通过粘贴在混凝土结构模型表面的紧包光纤,可以得到随着荷载的增加,表面裂缝逐级增大直到破坏。普通的混凝土结构,极限拉伸应变为 $150\ \mu\epsilon$ ,拉断应变为 $1000\ \mu\epsilon$ ,分布式光纤可以全程监测混凝土结构从产生裂缝到梁体断裂的全过程,说明了分布式光纤传感不仅量程大,而且能够实现混凝土结构的全过程监测,较传统的点式传感器,不仅可以实现光纤链路的无死角监测,而且测量精度高,抗干扰性强,实时在线监测,体积小易嵌入便于施工,价格经济以及能够适应复杂环境的需求等优良特性,在通信和结构健康监测领域得到广泛的应用,对于提高我国大型基础设施、大型结构装备和地质灾害的安全监测能力,提升公共安全水平,以及减小经济损失和社会影响具有重要意义。

## 基金项目

宁波市交通运输科技项目(201926)。

## 参考文献

- [1] Tkach, R.W., Chraplyvy, A.R. and Derosier, R.M. (1986) Spontaneous Brillouin Scattering for Single Model Optical Fiber Characterization. *Electronics Letters*, **22**, 1011-1013. <https://doi.org/10.1049/el:19860691>
- [2] Horiguchi, T., Kurashima, T. and Tateda, M. (1989) Tensile Strain Dependence of Brillouin Frequency Shift in Silica Optical Fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, **1**, 107-108. <https://doi.org/10.1109/68.34756>
- [3] Bao, X.Y., Demerchant, M., Brown, A., et al. (2001) Tensile and Compressive Strain Measurement in the Lab and Field with the Distributed Brillouin Scattering Sensor. *Journal of Lightwave Technology*, **19**, 1698-1704. <https://doi.org/10.1109/50.964070>
- [4] 张桂生, 毛江鸿, 何勇, 金伟良. 基于 BOTDA 的隧道变形监测技术研究[J]. 公路, 2010(2): 204-209.
- [5] 杨樟成, 罗剑波, 等. 布里渊光时域分析技术在桥梁静载试验中的应用[J]. 声学与电子工程, 2015, 119(3): 11-14.
- [6] 唐天国, 陈春华, 刘浩吾. 分布式光纤传感用于大坝基座裂缝监测[J]. 传感技术报, 2007, 20(10): 2357-2360.
- [7] 叶宇霄, 叶方洁, 等. 分布式光纤混凝土梁应变测试研究[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(3): 40-44.
- [8] Li, F., Zhao, W., Xu, H., Wang, S. and Du, Y. (2019) A Highly Integrated BOTDA/XFG Sensor on a Single Fiber for Simultaneous Multi-Parameter Monitoring of Slopes. *Sensors*, **19**, Article ID 2132. <https://doi.org/10.3390/s19092132>