

# 激光与光电子学进展

## 基于弱光纤布拉格光栅阵列的桥梁应变测量

陈考奎, 李院峰, 周次明\*, 范典

武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

**摘要** 混凝土桥梁受温度和荷载作用的影响容易引起裂缝, 危害桥梁安全, 而传统的应变测量方法难以在实际工程中大规模应用。弱光纤布拉格光栅(wFBG)阵列应变测量技术具有组网便利、精度高、测点多、可靠性强、抗干扰能力强、耐腐蚀、测量范围广且可长距离测量等优点, 能广泛应用于大型土木工程应变测量领域。首先, 通过 wFBG 应变-波长标定实验确定应变与波长的关系, 构建高精度大容量解调系统。然后, 通过 T 型梁加载卸载过程中的应变测量实验, 验证了 wFBG 阵列测量应变的可行性和优越性。最后, 用 4118 个 wFBG 组成的阵列在杭州下沙大桥上实现了桥梁应变监测。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 应变; 桥梁监测; 光纤传感

中图分类号 TP212.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0706003

### Bridge Strain Measurement Based on Weak Fiber Bragg Grating Array

Chen Kaokui, Li Yuanfeng, Zhou Ciming\*, Fan Dian

National Engineering Laboratory of Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology,  
Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** Temperature and stress are easily to cause cracks in concrete bridges and endanger the safety of bridges, but traditional strain measurement methods are difficult to apply on a large scale in actual projects. The weak fiber Bragg grating (wFBG) array strain measurement technology has the advantages of easy networking, high-precision, multiple measurable points, strong reliability, strong anti-interference ability, excellent corrosion resistance, wide measurement range and long-distance measurement. It can be widely promoted in the field of large civil engineering strain measurement. In this paper, first, the relationship between strain and wavelength is determined through wFBG strain-wavelength calibration experiments, and a high-precision large-capacity demodulation system is constructed. Then, the feasibility and superiority of wFBG array strain measurement are verified by strain measurement experiment in T-beam loading and unloading process. Finally, an array of 4118 wFBGs is used to monitor the bridge strain on the Hangzhou Xiasha Bridge.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg gratings; strain; bridge monitoring; fiber optic sensing

## 1 引言

随着经济、社会、科学特别是交通网络的迅速发展, 桥梁建设的形式越来越多样化, 跨度越来越大, 在国民经济生产中的作用也越来越重要, 因此,

桥梁的安全评估工作和健康监测受到了人们的广泛关注。桥梁监测主要通过测试桥梁的承载能力获得桥梁的实际工作状态, 以消除桥梁安全隐患。传统的桥梁安全监测方法主要有人工光学测量法、连通管法、视频测量成像法<sup>[1]</sup>等, 这些方法均存在自

收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-06-06; 录用日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(61775173, 61975157, 52071245)

通信作者: \*zcm@whut.edu.cn

动化程度低、工作量大且容易受外界环境干扰等缺点。近年来,国内外发生的几起大桥坍塌或局部破坏事故很大程度上是因为构件疲劳以及监测措施不足导致。因此,采用科学先进的方法对桥梁健康进行大范围长期监测<sup>[2]</sup>具有重要意义。

拉丝塔在线刻写光纤布拉格光栅(FBG)技术的出现使FBG<sup>[4-5]</sup>传感技术得到了前所未有的发展,也使大规模、长距离桥梁等建筑结构的应变监测<sup>[6-7]</sup>成为可能。其中,FBG分布式复用<sup>[8-9]</sup>测量应变技术是近年来发展的一种尖端技术。传统应变监测中一般使用应变片进行监测,但应变片的安装布设比较复杂,而弱FBG(wFBG)阵列可以用一根线完成全布设<sup>[10]</sup>,达到工程监测的目的<sup>[11]</sup>。FBG分布式复用传感技术具有易成阵列<sup>[12-13]</sup>、耐高温、抗干扰性强<sup>[14]</sup>、抗腐蚀性强、信噪比高、测量精度高以及检测信号可探测性强等优点,已应用于空冷岛<sup>[15]</sup>和油库油罐温度场监测等领域。

本文从wFBG阵列应变测量的基本原理出发,在实验室进行了应变标定和等效缩比实验,并将该传感器阵列应用到实际桥梁应变场测量中,验证了该传感器阵列在桥梁安全监测中的有效性,为wFBG阵列应变传感器的推广应用奠定了基础。

## 2 弱光纤布拉格光栅测量应变的基本原理

wFBG感受到外界压力或温度变化时,其有效折射率会发生变化,进一步导致wFBG的中心波长发生漂移,通过计算波长漂移就能得到外界压力或温度的变化情况。wFBG的中心波长可表示为

$$\lambda_b = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中, $n_{\text{eff}}$ 为wFBG位置的有效折射率, $\Lambda$ 为wFBG的周期。对(1)式进行微分,得到

$$\Delta\lambda_b = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda. \quad (2)$$

从(2)式可以发现,应变和温度的弹光效应和热光效应会影响 $\Delta n_{\text{eff}}$ ,同理,FBG在外界应变作用下会影响 $\Delta\Lambda$ ,热膨胀效应也会影响其周期 $\Lambda$ 。即外界应变和温度变化都会导致wFBG的中心波长 $\lambda_b$ 产生漂移。wFBG中心波长的漂移量随应变和温度的变化关系<sup>[16]</sup>可表示为

$$\Delta\lambda_b = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial l} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T, \quad (3)$$

式中, $l$ 为光纤的长度, $T$ 为光纤的温度。弹光效应导致的FBG折射率变化量<sup>[16]</sup>可表示为

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = -\frac{1}{2}n_{\text{eff}}^2[P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]\epsilon = -P\epsilon, \quad (4)$$

式中, $P_{11}$ 和 $P_{12}$ 分别为由应变导致的光纤纵向和横向的折射率变化系数, $\mu$ 为FBG的泊松比, $P = \frac{1}{2}n_{\text{eff}}^2[P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]$ 为弹光系数, $\epsilon$ 为光纤轴向应变导致的FBG周期变化量,可表示为

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{\Lambda} = \frac{dl}{l}, \quad (5)$$

将(4)式与(5)式代入(2)式中,得到

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 - P)\epsilon, \quad (6)$$

令 $K_\epsilon = \lambda_b(1 - P)$ 为光纤中心波长变化量与轴向应变之间的灵敏度系数,则

$$\Delta\lambda_b = K_\epsilon\epsilon. \quad (7)$$

温度对于wFBG中心波长的影响可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \left(\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}} \cdot dT} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda \cdot dT}\right) \cdot dT, \quad (8)$$

令 $\zeta = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}} \cdot dT}$ 为热光系数, $\alpha = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda \cdot dT}$ 为热膨胀系数,则(8)式可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (\zeta + \alpha) \cdot dT. \quad (9)$$

令 $K_T = \lambda_b(\zeta + \alpha)$ 为FBG的温度传感灵敏度系数,则

$$\Delta\lambda_b = K_T \cdot \Delta T. \quad (10)$$

同时考虑外界应变和温度变化时,FBG的中心波长变化量可表示为

$$\Delta\lambda_b = K_\epsilon \cdot \epsilon + K_T \cdot \Delta T. \quad (11)$$

## 3 工程实况

关于wFBG阵列应变传感器在工程中的应用报道较少,因此,对wFBG进行应变-波长标定实验后,根据几何相似原理分别在长为1.5 m、4.5 m、9.5 m的T型梁上进行等效缩比实验,并在下沙大桥上进行了测试实验。

### 3.1 应变-波长标定实验

图1为wFBG的力敏性能检测实验平台。实验中选用的wFBG阵列由220个间隔为5 m,中心波长约为1552 nm,反射率为0.1%的wFBG串接而成。在等强度悬臂梁的上表面与悬臂端有一定距离的位置选择1个固定的传感器断面,用环氧树脂AB结构胶固定编号分别为39、40、118的3个wFBG,wFBG的安装示意图如图2所示。在wFBG相同应变处安装一个标准



图 1 wFBG 的力敏性能检测实验平台

Fig. 1 Experimental platform for force-sensitive performance detection of the wFBG

应变计, 从而对 wFBG 的应变进行标定。

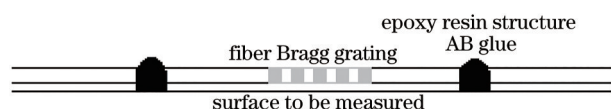


图 2 wFBG 的安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of installation of the wFBG

将砝码从空载依次增加到 4 级加载时, 3 个 wFBG 中心波长随应变的变化情况如图 3 所示。可以发现: 随着砝码质量的增加, 等强悬臂梁所受应变依次增加, 3 个 wFBG 的中心波长变化量也相应增加, 编号为 39、40、118 的 wFBG 中心波长变化量-应变曲线的线性度较好, 相关系数分别为 0.996、0.999、0.991, 斜率分别为 1.215、1.198、1.154。将 3 个斜率进行平均, 得到加载砝码时 wFBG 中心波长变化量和应变之间的变化率为 1.189 pm/ $\mu\epsilon$ 。

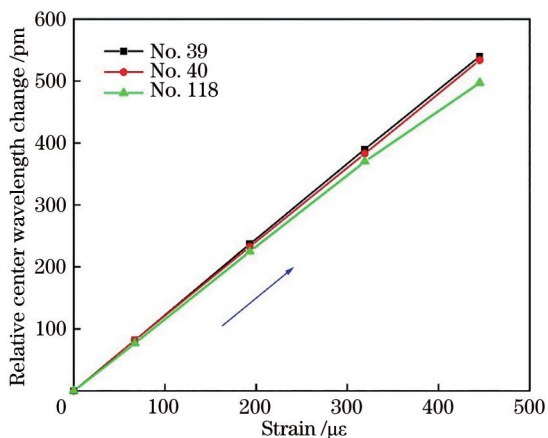


图 3 加载砝码过程中 wFBG 中心波长变化量随应变的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of the change of wFBG center wavelength with strain during the loading process

为了验证 wFBG 承受压力后的性能是否可以恢复, 将砝码依次卸载, 图 4 为 3 个 wFBG 中心波长变化量随着砝码质量减小的变化情况。可以发现: 卸载砝码的过程中, 编号为 39、40、118 的 wFBG 中心波长变化量-应变曲线也呈很好的线性关系, 相关系数分别为 0.999、0.999、0.998, 斜率分别为 1.219、1.194、1.154。同样将 3 个斜率平均, 得到应变减小时 wFBG 中心波长变化量和应变之间的变化率为 1.189 pm/ $\mu\epsilon$ 。

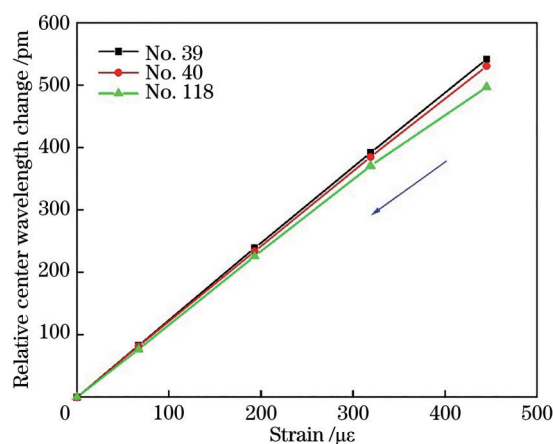


图 4 卸载砝码过程中 wFBG 中心波长变化量随应变的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of the change of wFBG center wavelength with strain during the unloading process

此外, 从图 3 和图 4 可以发现: 编号为 39、40、118 的 wFBG 中心波长-应变曲线没有完全重合, 这可能是 AB 胶固定过程中收缩导致 wFBG 封装不一致造成的。

### 3.2 1.5 m 简支 T 梁的应变测量实验

图 5 和图 6 分别为 1.5 m 简支 T 梁及其监测截面、截面监测点位示意图。1.5 m 简支 T 梁分为 3 个监测截面, 3 个监测截面上的 wFBG 数目分别为 11、10、11 个, 即用于测量应变的 wFBG 共 32 个, 还有 1 个 wFBG 作为温度补偿光栅。测量前已经对 wFBG 的位置进行了标记, 即每个 wFBG 都有对应的编号。用编号 3-8 的 wFBG 后第 2 个 wFBG (单独编号为 4-8) 作为温度补偿光栅, 并通过安装保护措施, 使其不受梁应变的影响。

在 1.5 m 简支 T 梁的加载实验中, 加载梁的位置处于截面 2 的顶板顶位置。梁加载设备的工作时长共 3 小时 13 分 38 秒, 在加载过程中, 加载级别依次从 0 kN 到 80 kN, 为了模拟真实的桥梁受力过程, 加载间隔从小到大依次为 3 kN、6 kN、10 kN。每次加

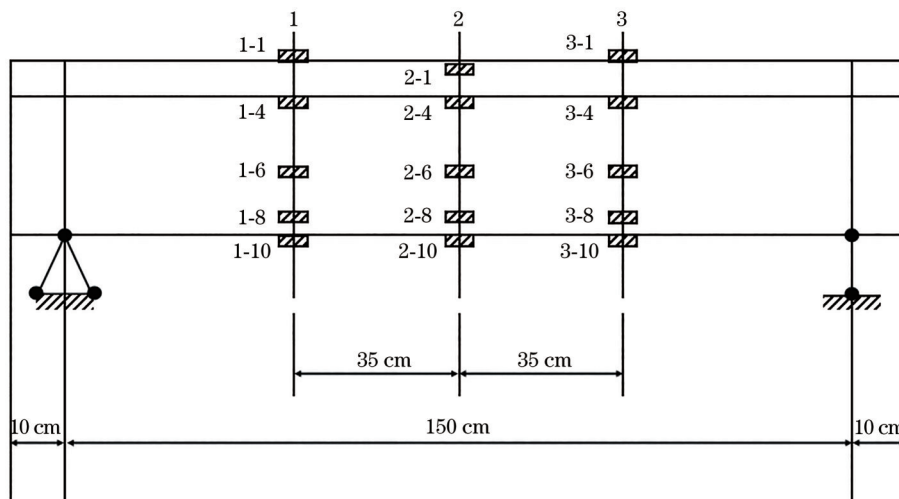


图 5 1.5 m 简支 T 梁的截面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of section of 1.5 m simply supported T beam

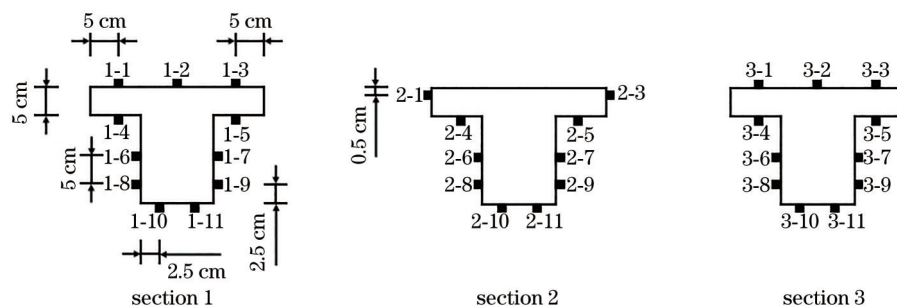


图 6 1.5 m 简支 T 梁截面点位示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cross section points of 1.5 m simply supported T beam

载完成后,都会保持 3 min 左右,然后逐渐从 80 kN 卸载到 0 kN(间隔为 10 kN)。加载实验的目的是验证 wFBG 能否正确监测到应变的变化,卸载实验的目的是检验 wFBG 在承受一定的压力后性能能否恢复。

在连续 3 个多小时的加载和卸载过程中,顶板顶和腹板底 wFBG 测得的应变情况分别如图 7 和图 8 所示。从图 7 可以发现:随着时间的增加,加载在顶板顶上的压力逐渐增加,传感器 2-3 比 2-1(同一截面的 2 个传感器)的变化更明显,这表明在 1.5 m 简支 T 梁中间位置传感器 2-1 附近已经开始出现裂痕。由于加载梁的位置在截面 2,因此,截面 2 受压产生的应变明显比截面 1 和截面 3 大,即传感器 2-3 的应变变化量最大。从图 8 可以发现:1.5 m 简支 T 梁的腹板底随压力的增加应变值是正值,加载到 20 kN 时,传感器 2-11 出现了一个 1000  $\mu\epsilon$  的应变,这表明编号为 2-11 的 wFBG 处已经开始出现裂缝,且随着应变的增加,同一个截面的对称位置,如传感器 1-10 和 1-11、2-10 和 2-11、3-10 和 3-11 处的应变变化已经出现了明显差异,这表明裂缝进一步增

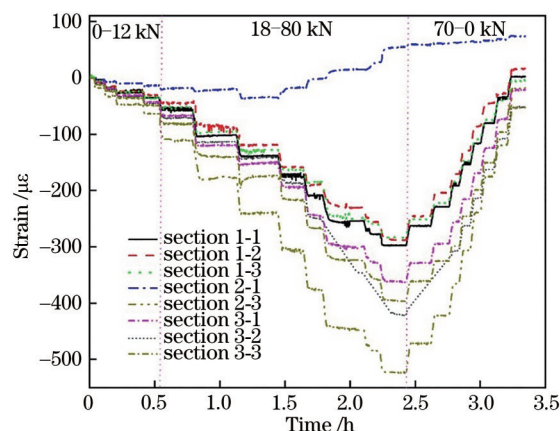


图 7 1.5 m 简支 T 梁顶板顶 wFBG 的应变-时间关系图

Fig. 7 Strain-time relationship diagram of the wFBG at the top of 1.5 m simply supported T beam

多,范围也进一步增大。对比图 7 和图 8 可以发现:对于 1.5 m 简支 T 梁,顶板顶受压产生的应变小于腹板底受拉力产生的应变。

图 9 为 1.5 m 连续 T 梁截面 2 左侧和右侧应变随时间的变化曲线。可以发现:即使是同一个截

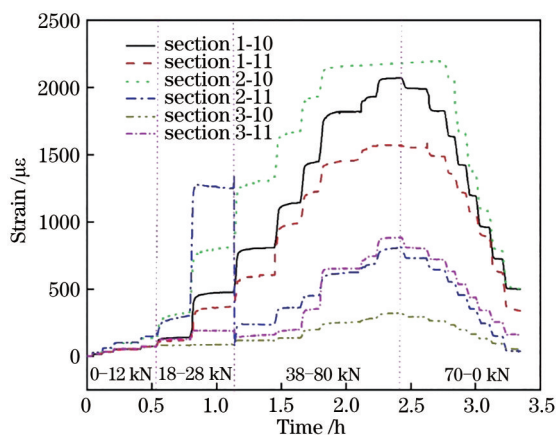


图 8 1.5 m 简支 T 梁腹板底 wFBG 的应变-时间关系图  
Fig. 8 Strain-time relationship diagram of the wFBG at the bottom of 1.5 m simply supported T beam

面,左侧和右侧 wFBG 所受应变的变化趋势也不一致,如传感器 2-1 和 2-3、2-4 和 2-5、2-6 和 2-7、2-8 和 2-9、2-10 和 2-11 对称位置的应变变化,这表明随着压力的增加,截面 2 表面上的裂缝越来越多,且无论是左侧还是右侧,腹板底的应变均大于腹板侧的应变,而腹板侧的应变均大于顶板顶的应变。

### 3.3 4.5 m 连续 T 梁的应变测量实验

图 10 和图 11 分别为 4.5 连续 T 梁的截面和截面点位示意图。4.5 m 连续 T 梁包含 7 个截面,7 个截面上的 wFBG 数目分别为 11、9、11、10、11、9、11 个,即用于测量应变的 wFBG 共 72 个,还有 1 个 wFBG 作为温度补偿光栅,用于感受外界温度的变化,将其放在传感器 7-8 后,单独编号为 8-8。

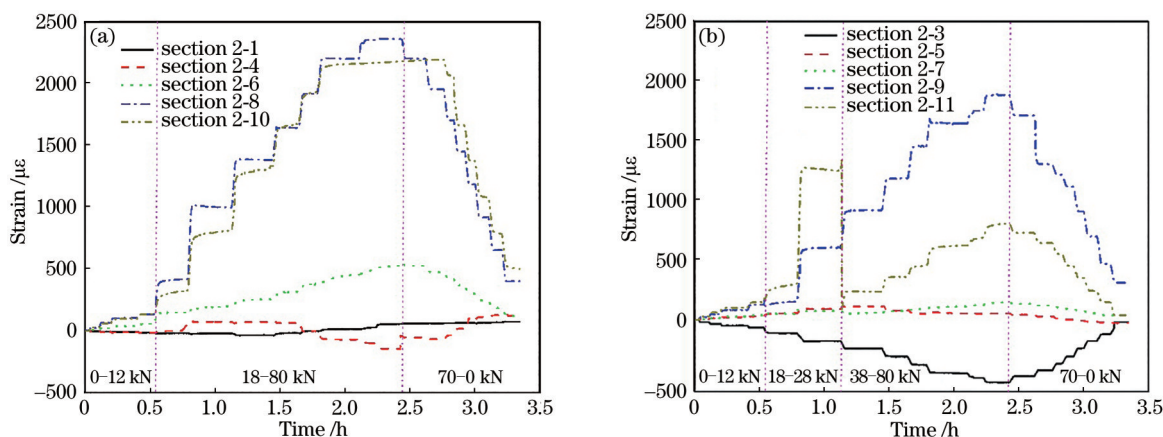


图 9 1.5 m 简支 T 梁截面 2 上 wFBG 的应变-时间关系图。(a) 截面 2 左侧; (b) 截面 2 右侧  
Fig. 9 Strain-time relationship diagram of the wFBG of the section 2 of 1.5 m simply supported T-beam.

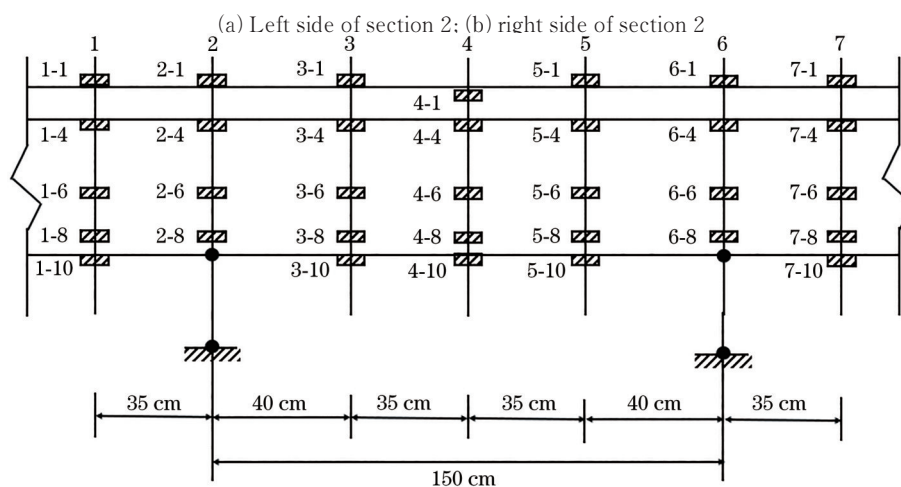


图 10 4.5 m 连续 T 梁截面示意图

Fig. 10 Schematic diagram of section of 4.5 m continuous T beam

在 4.5 m 连续 T 梁的加载实验中,梁加载设备的位置位于 T 梁的中间位置,即截面 4 的中间。梁

加载设备的工作时长共计 7 小时 1 分 38 秒,加载过程中加载级别依次从 0 kN 到 90 kN,加载间隔与

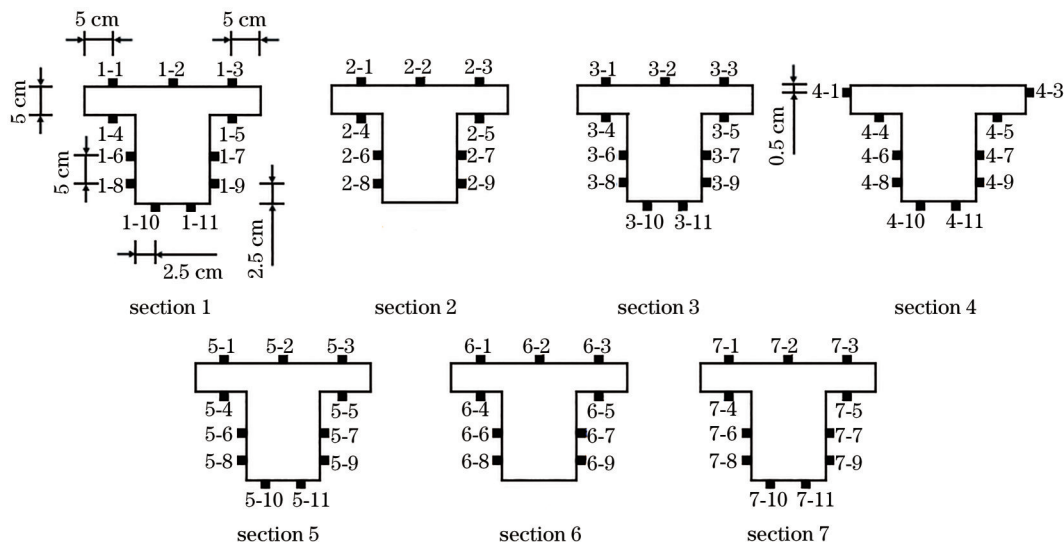


图 11 4.5 m 连续 T 梁截面点位示意图

Fig. 11 Schematic diagram of cross section points of 4.5 m continuous T beam

1.5 m 简支 T 梁类似,按照从小到大的间隔,使梁体逐步适应受力,每完成一次加载保持 3 min 左右,从而使梁体受力稳定,有利于观察应变情况,然后按照 10 kN 的间隔从 90 kN 卸载到 0 kN。

图 12 为 4.5 m 连续 T 梁 7 个截面顶板顶左侧位置 wFBG 随时间增加在梁加载过程和卸载过程中产生的应变值。图 13 为 4.5 m 连续 T 梁腹板底右侧 wFBG 随时间增加在梁加载和卸载过程中的应变变化曲线。可以发现,加载截面即截面 4 的应变最大。图 14 为 4.5 m 连续 T 梁截面 4 左侧和右侧随时间增加的应变变化趋势。可以发现,腹板底的应变明显大于顶板顶和腹板侧的应变,而顶板顶的应变大于顶板底的应变。

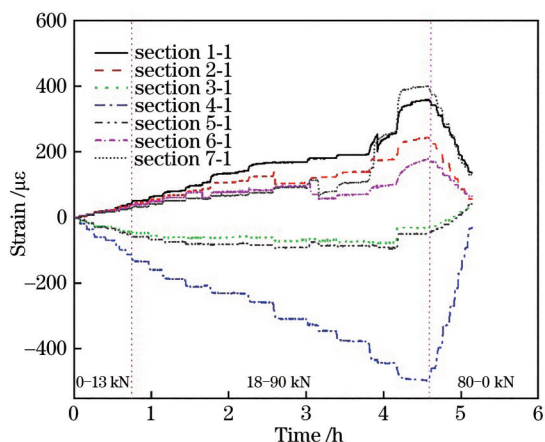


图 12 4.5 m 连续 T 梁顶板顶左侧 wFBG 的应变-时间关系图  
Fig. 12 Strain-time relationship diagram of the wFBG on the left side of the top of 4.5 m continuous T beam

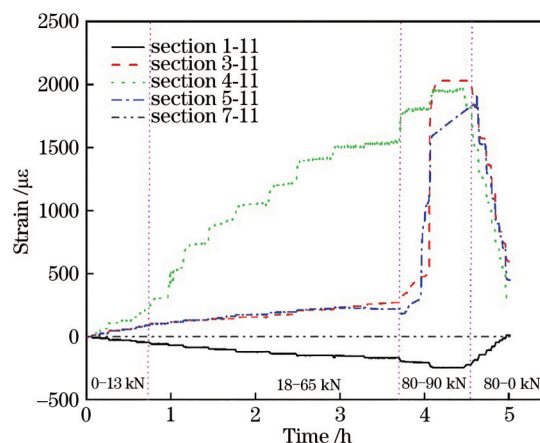


图 13 4.5 m 连续 T 梁腹板底右侧 wFBG 的应变-时间关系图  
Fig. 13 Strain-time relationship diagram of the wFBG on the right side of the bottom of 4.5 m continuous T beam

### 3.4 9.5 m 变截面 T 梁应变测量实验

图 15 和图 16 分别为 9.5 m 变截面连续 T 梁的截面和截面点位示意图。其中,截面 1~3,截面 11~13 的高度一致且最低,截面 4、5、6 的高度依次增加,截面 8、9、10 的高度依次减少,且截面 4 和截面 10 的高度一致,截面 5 和截面 9 的高度一致,截面 6 和截面 8 的高度一致,截面 7 的高度最高。由于截面 7 的腹板底和腹板侧位置是梁的支座,只能安装 3 个 wFBG,其余每个截面上都安装了 9 个 wFBG,即用于测量应变的 wFBG 共 111 个。同时,额外安装两个 wFBG 用作温度补偿,以便在进行应变计算时去除外界温度对于 wFBG 中心波长漂移的影响。

在 9.5 m 变截面连续 T 梁的梁加载实验中,梁

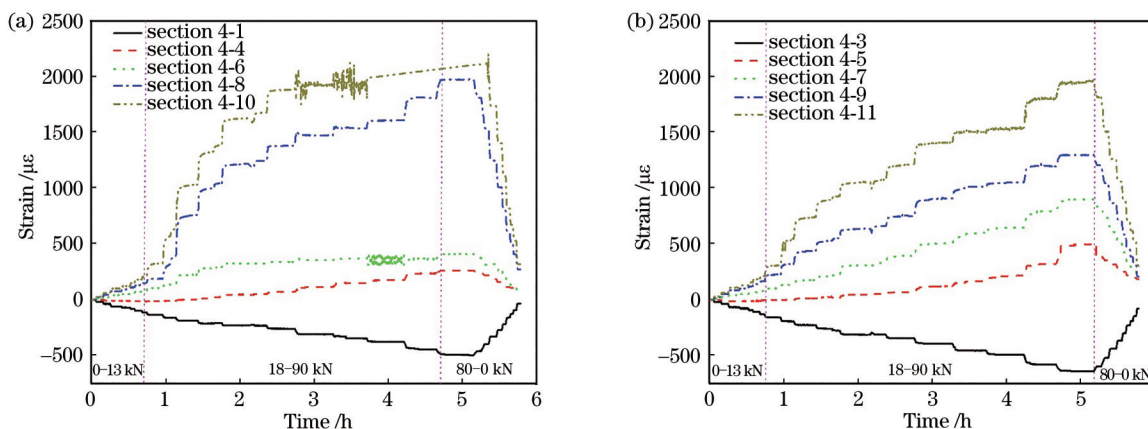


图 14 4.5 m 连续 T 梁截面 4 上 wFBG 的应变-时间关系图。(a) 截面 4 左侧; (b) 截面 4 右侧

Fig. 14 Strain-time relationship diagram of the wFBG of the section 4 of 4.5 m continuous T beam. (a) Left side of section 4; (b) right side of section 4

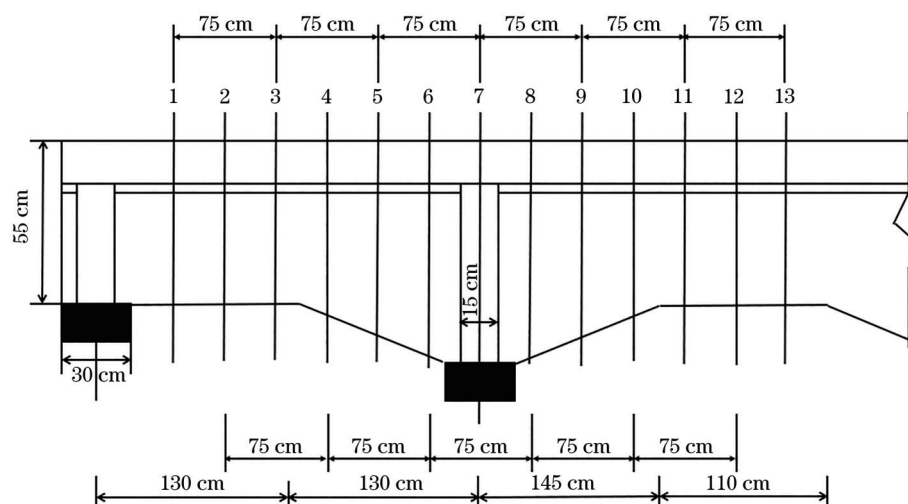


图 15 9.5 m 变截面连续 T 梁截面示意图

Fig. 15 Schematic diagram of section of 9.5 m variable cross section continuous T beam

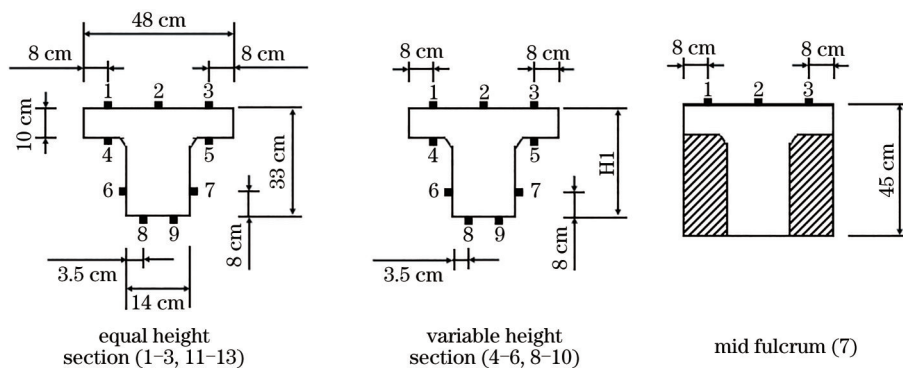


图 16 9.5 m 变截面连续 T 梁截面点位示意图

Fig. 16 Schematic diagram of cross section points of 9.5 m variable cross section continuous T beam

加载设备放置于截面 3 与截面 4 之间, 加载和卸载时长共计 3 小时 57 分 42 秒。在加载过程中, 梁的受力按照一定的间隔从 0 kN 增加到 160 kN, 卸载过程的受力从 160 kN 到 0 kN, 间隔为 20 kN。每完成一次

加载和卸载过程, 保持 2 min 稳定。图 17 为 9.5 m 变截面 T 梁加载与卸载过程中 13 个截面顶板顶左侧 wFBG 测量的应变变化情况。图 18 为 9.5 m 变截面连续 T 梁的 13 个截面腹板底右侧 wFBG 测量的

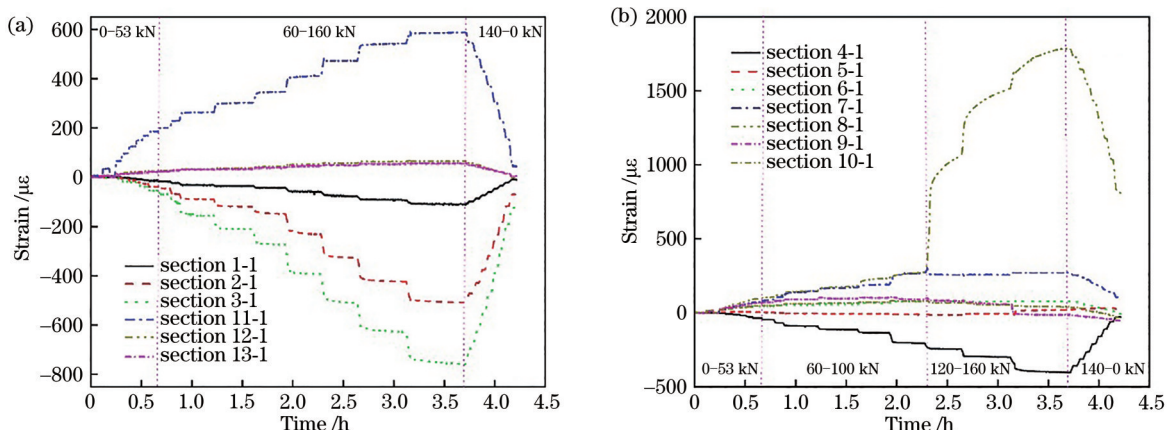


图 17 9.5 m 变截面连续 T 梁顶板顶左侧 wFBG 的应变-时间关系图。(a) 9.5 m 梁等高段截面; (b) 9.5 m 梁变高段和中支点截面  
Fig. 17 Strain-time relationship diagram of the wFBG on the left side of the top of 9.5 m variable cross section continuous T beam. (a) Section of 9.5 m beam with equal height section; (b) section of 9.5 m beam with variable height section and mid fulcrum

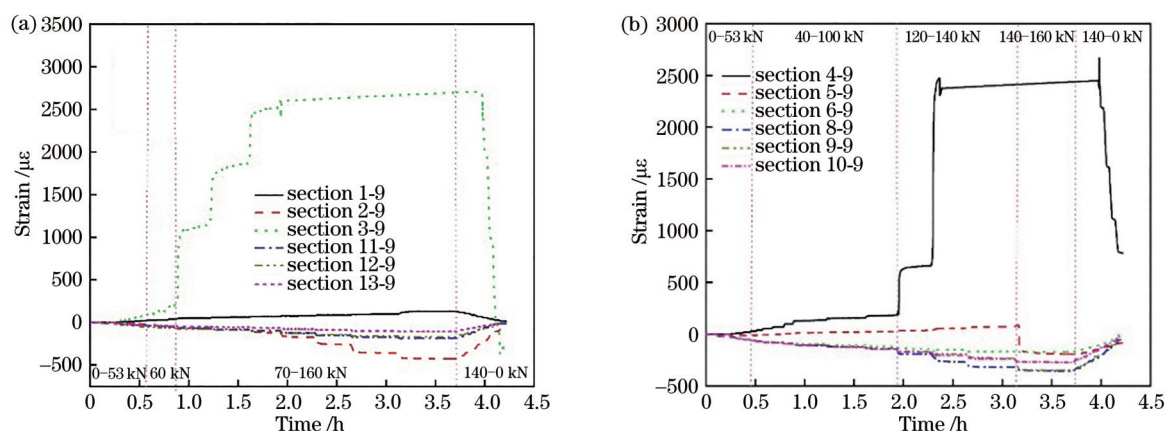


图 18 9.5 m 变截面连续 T 梁腹板底右侧 wFBG 的应变-时间关系图。(a) 9.5 m 梁等高段截面; (b) 9.5 m 梁变高段截面  
Fig. 18 Strain-time relationship diagram of the wFBG on the right side of the bottom of 9.5 m variable cross section continuous T beam. (a) Section of 9.5 m beam with equal height section; (b) section of 9.5 m beam with variable height section

应变变化情况。可以发现:在相同的受力情况下,腹板底和顶板顶受拉力面的应变值大于受压面的应变值,加载位置附近截面的应变最大。

### 3.5 杭州下沙大桥的应变测量实验

实际实验过程中,将同一个箱梁梁体分为 10 个监测截面,截面 1 到截面 10 的 wFBG 数目分别为 393、416、313、401、398、416、403、388、569、421 个,10 个截面共计可获得 4118 个应变传感器的数据。随机选取 10 个截面中编号相同的 wFBG 共计 33 小时 53 分 52 秒的数据进行分析。

选取每个监测截面中编号为 1、50、100、159、208 的 wFBG 实时监测数据进行分析。图 19 为不同监测截面编号为 1 的 wFBG 在 30 多个小时监测时长内的应变变化情况,可以发现:除了个别传感器外,大多数传感器反映的截面应变变化比较一

致,这表明桥梁整体受力比较均匀;随着时间的增加,应变的绝对变化量为正值,但波动不是特别大,总体浮动在  $100 \mu\epsilon$  以下,远远小于安全限,这表明桥梁上通过的车流量不是特别大;之后几个小时中(夜间),由于车流量较少,应变波动量在  $5 \mu\epsilon$  以内且出现了回升变小的趋势,这表明 wFBG 的监测结果与实际情况相吻合。

图 20 为 10 个截面中编号为 50、100、159、208 的 wFBG 测量的应变变化情况,可以发现:编号为 50、100、159、208 的 wFBG 与编号为 1 的 wFBG 测试结果相似。由于桥梁上的车辆分布具有随机性,各个传感器在某一时间的数据会出现与其他数据不一致的情况,但经过一段时间后又能跟上大多数传感器的趋势,这表明该传感器具有较高的灵敏度。



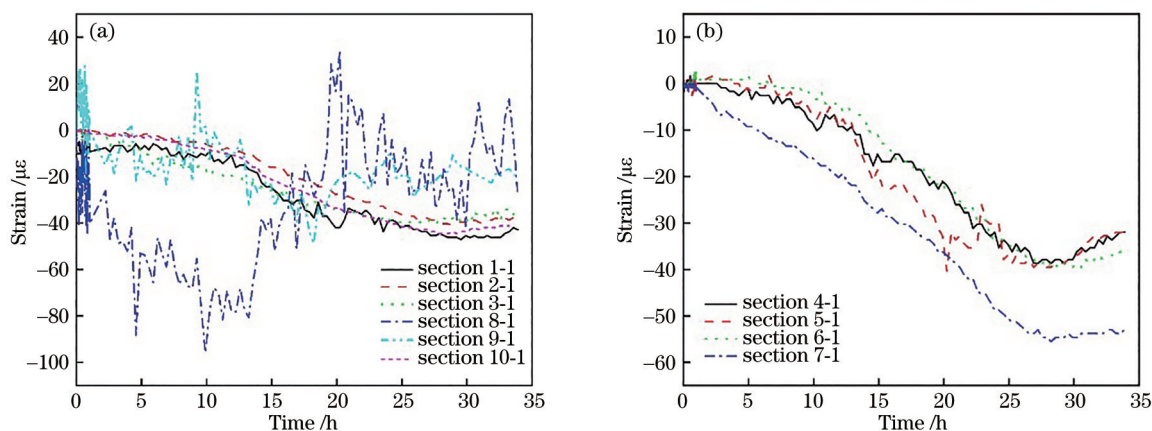


图 19 10 个截面中编号 1 的 wFBG 时间-应变关系图。(a)截面 1~3, 8~10; (b)截面 4~7

Fig. 19 Time-strain relationship diagram of wFBG No. 1 of 10 sections. (a) Section 1-3, 8-10; (b) section 4-7

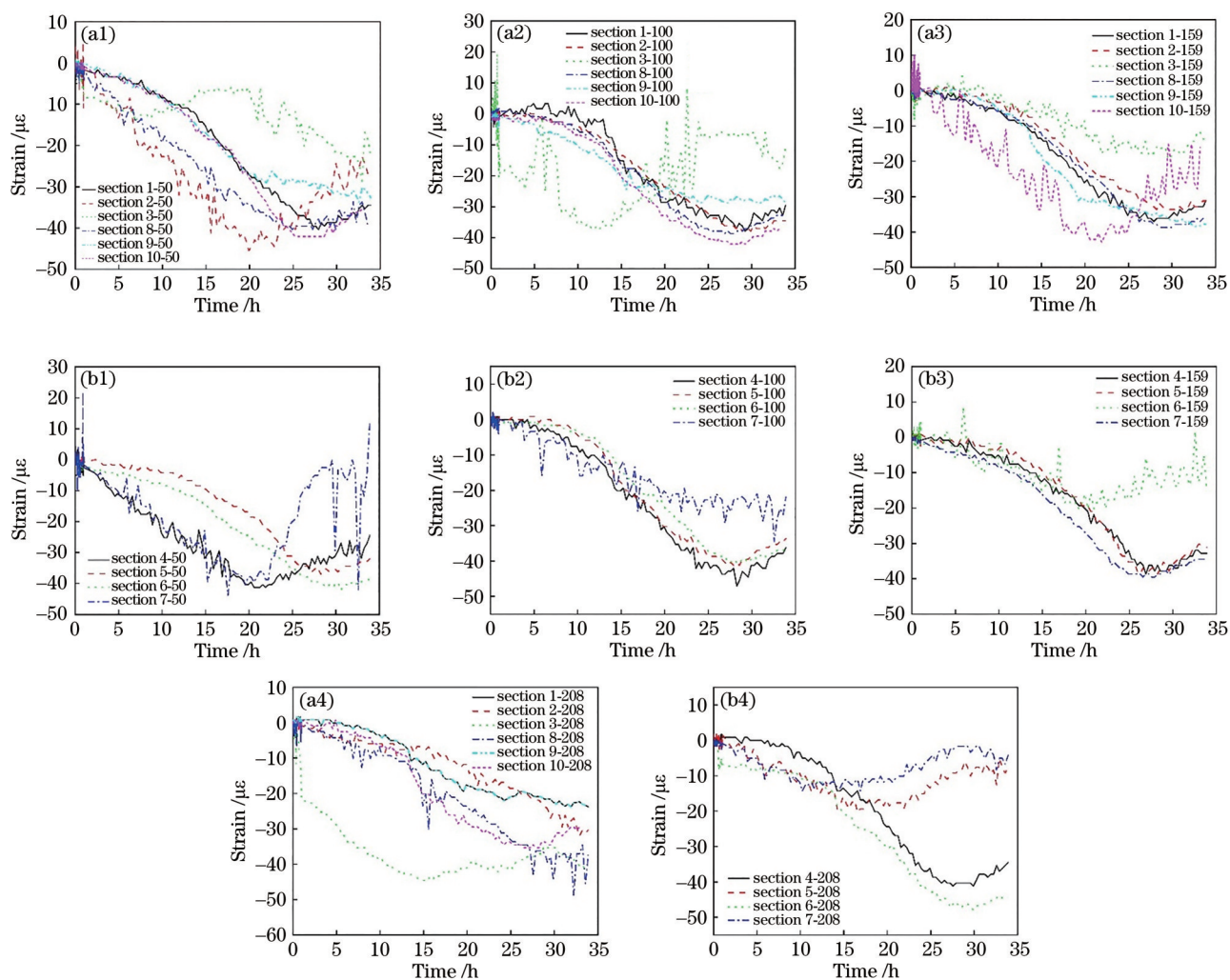


图 20 10 个截面中部分 wFBG 的时间-应变关系图。(a)截面 1~3, 8~10; (b)截面 4~7

Fig. 20 Time-strain relationship diagram of part of wFBG in 10 sections. (a) Section 1-3, 8-10; (b) section 4-7

## 4 结 论

将 wFBG 阵列应用到桥梁的应变测量中,并进行了加载和卸载过程中的应变-波长标定实验、1.5 m

和 4.5 m 连续等截面 T 梁加载卸载过程的应变测量实验、9.5 m 连续变截面 T 梁加载卸载过程中的应变测量实验、杭州下沙大桥的实时应变测量实验,得到了与实际运行状态相符的实验数据,验证了将

wFBG阵列用于桥梁应变测量的可行性。相比传统的机电类传感器,wFBG具有易集成、抗干扰性强等优点,可广泛应用于大型土木工程的实时应变测量。下一步还将完善wFBG阵列测量应变的检测系统,建立预警体系,通过量化分析,监测应变是否超过允许范围。

### 参 考 文 献

- [1] An Q, Li Y, Zhang T T. Design and application of bridge safety monitoring system[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2016(1): 11-15, 19.  
安庆,李岩,张婷婷.桥梁安全监测系统设计与应用[J].*城市勘测*, 2016(1): 11-15, 19.
- [2] Dong X Z, Li S, Li A M. Deformation monitoring on the application of bridge monitor[J]. *Surveying and Mapping*, 2012, 35(1): 13-15.  
董学智,李胜,李爱民.变形监测技术在桥梁监测中的应用[J].*测绘*, 2012, 35(1): 13-15.
- [3] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [4] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [5] Zhou Z, Tian S Z, Zhao X F, et al. Theoretical and experimental studies on the strain and temperature sensing performance of optical FBG[J]. *Journal of Functional Materials*, 2002, 33(5): 551-554.  
周智,田石柱,赵雪峰,等.光纤布拉格光栅应变与温度传感特性及其实验分析[J].*功能材料*, 2002, 33(5): 551-554.
- [6] Park C Y, Kim J H, Jun S M. A structural health monitoring project for a composite unmanned aerial vehicle wing: overview and evaluation tests[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2012, 19(7): 567-579.
- [7] Chan T H T, Yu L, Tam H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: background and experimental observation[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(5): 648-659.
- [8] Rao Y J, Ribeiro A B, Jackson D A, et al. Combined spatial-and time-division-multiplexing scheme for fiber grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(20): 2149-2151.
- [9] Park S J, Lee C H, Jeong K T, et al. Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical network[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(11): 2582-2591.
- [10] Wang Y H, Zhang M Y, Ma J X, et al. Measurements of penetration characteristics of jacked piles in clayey soil based on fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0706004.  
王永洪,张明义,马加骁,等.光纤布拉格光栅用于黏质土中静压沉桩贯入特性的测量研究[J].*光学学报*, 2020, 40(7): 0706004.
- [11] Pang X R, Wang D P. Oblique crack monitoring of concrete beam with macro FBG strain sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120603.  
庞香润,王大鹏.FBG宏应变传感器的混凝土梁斜裂缝监测[J].*激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120603.
- [12] Hou J F, Pei L, Li Z X, et al. Development and application of optical fiber sensing technology[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(1): 49-53.  
侯俊芳,裴丽,李卓轩,等.光纤传感技术的研究进展及应用[J].*光电技术应用*, 2012, 27(1): 49-53.
- [13] Yan J, Li W, Jiang M S, et al. Shape perception and three-dimensional reconstruction technology of plate structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106006.  
闫洁,李伟,姜明顺,等.基于光纤光栅传感器的板状结构形态感知与三维重构技术[J].*中国激光*, 2020, 47(11): 1106006.
- [14] Ma J X, Wang Y H, Zhang M Y, et al. Experimental study on penetration characteristics of open pipe pile based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130602.  
马加骁,王永洪,张明义,等.基于光纤布拉格光栅传感技术的开口管桩贯入特性实验研究[J].*激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130602.
- [15] Tong Y H, Xie Z Y, Huang Y R, et al. Research on intelligent control system of direct air-cooled island fan[J]. *China High-Tech Enterprises*, 2015(28): 18-19.  
童宇衡,谢紫莹,黄悠然,等.直接型空冷岛风机智能控制系统研究[J].*中国高新技术企业*, 2015(28): 18-19.
- [16] Qian Y. The basic research on fiber grating sensing technology[D]. Changchun: Jilin University, 2009: 45-73.  
钱颖.光纤光栅传感技术基础研究[D].长春:吉林大学, 2009: 45-73.