

激光与光电子学进展

光频域反射与超弱光纤布拉格光栅技术的
结构监测性能王紫超^{1,2}, 刘志昂^{1,2*}, 杨华东^{1,2}¹中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;²长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040

摘要 为研究光频域反射(OFDR)和超弱光纤布拉格光栅(UWFBG)技术在桥梁钢结构中的监测性能,开展了H型钢梁弯曲测量实验。沿钢梁通长布设了四根光纤,在重、轻载工况下进行了钢梁四点加载受弯变形的分布式应变测量实验。结果表明,OFDR和UWFBG技术在钢梁分布式应变测量中均表现出较好的监测性能,相比应变片的测试结果,重载工况下OFDR和UWFBG的平均测量误差分别在 $3\mu\epsilon$ 和 $2\mu\epsilon$ 内,轻载工况下OFDR和UWFBG的平均测量误差分别在 $2\mu\epsilon$ 和 $1\mu\epsilon$ 内。0.9 mm紧套光纤和裸纤的测试结果相同。这表明紧套不会降低光纤的应变传递率。此外,通过实验设计可提高UWFBG技术测量结果的空间分辨率,提高程度取决于布设光纤自身的栅点密度和相邻光纤之间的相对栅点间隔。

关键词 光纤光学; 光频域反射; 超弱光纤布拉格光栅; 钢梁; 应变; 空间分辨率

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2106002

Structural Monitoring Performance of Optical Frequency Domain Reflectometry
and Ultra-Weak Fiber Bragg Grating TechnologiesWang Zichao^{1,2}, Liu Zhiang^{1,2*}, Yang Huadong^{1,2}¹CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, Hubei, China;²Key Laboratory of Transportation Sector for Long-Span Bridge Construction Technique,
Wuhan 430040, Hubei, China

Abstract To examine the monitoring performance of optical frequency domain reflectometry (OFDR) and ultra-weak fiber Bragg grating (UWFBG) technologies in the bridge steel structure, this study focuses on the bending measurement experiments of H-shaped steel beam. Four optical fibers are arranged along the full length of the steel beam and distributed strain measurement investigations are performed under heavy and light load conditions for the four-point loaded bending deformation of the steel beam. The findings reveal that both OFDR and UWFBG technologies indicate remarkable monitoring performance in the distributed strain measurement of the steel beam. Compared with the findings of the strain gage, the average measurement errors of the OFDR technology and UWFBG technology under heavy load conditions are within $3\mu\epsilon$ and $2\mu\epsilon$ and under light load conditions are within $2\mu\epsilon$ and $1\mu\epsilon$, respectively. The test findings for the 0.9 mm tight-buffered fiber and the bare fiber are similar, demonstrating that the tight-buffered fiber does not minimize the fiber's strain transmissibility. In addition, the spatial resolution of UWFBG measurement findings can be enhanced through experimental design, and the degree of improvement depends on the grating density of the laid fibers and relative grating spacing between adjacent fibers.

Key words fiber optics; optical frequency domain reflectometry; ultra-weak fiber Bragg grating; steel beam; strain; spatial resolution

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2021-11-02; 录用日期: 2021-11-05

基金项目: 湖北省技术创新专项(2018AAA031)

通信作者: kawhigo@foxmail.com

1 引言

近年来,中国桥梁建设取得了举世瞩目的成就,也修建了大量大跨度桥梁^[1],这些大跨度桥梁的主梁多采用钢桁梁(如常泰长江大桥、五峰山长江大桥、武汉杨泗港长江大桥)结构^[2-4]。在桥梁建设和运营时,钢梁承托着建筑物上部构架的大部分质量,受压(拉)弯曲是其主要形变形式。桥梁的健康监测发展迅速^[5],监测主梁在施工期吊梁和拉索后的应力应变状态以及挠度是分析桥梁结构受力情况、评估桥梁健康状况、分析桥梁潜在问题的关键^[6]。

桥梁的主梁跨度大、施工及运营持续时间长,这就要求其监测传感器测量参量多、分布范围广、使用寿命长。常规的传感器如应变计、应力计和位移计的测量点位是离散的、有限的,且在桥梁结构的全寿命长期测量中存在诸多缺点,对传感器的耐久性是一个很大的挑战^[7]。同时,需要专业技术人员定期到现场进行操作,将所测数据带回实验室进行分析,无法实现实时监测和数据传输,不能掌握桥梁的实时状态^[8]。随着对光纤中非线性效应研究的不断深入,光纤分布式传感利用单根或多根光纤就能实现长距离连续测量,准确给出光纤上某一点处的应变、温度、振动等信息变化,实现大范围分布式监测,得到了人们的广泛研究和应用^[9-11]。王一凡等^[12]提出了一种基于瑞利强度谱频率偏移解调应变的分布式应变传感技术。胡鑫鑫等^[13]综述了正弦频率调制型布里渊光相关域分析仪(BOCDA)、相位调制型 BOCDA 和宽带光源型 BOCDA 近年来的研究进展及优缺点,分析了 BOCDA 系统的性能,并对 BOCDA 技术的发展前景进行了展望。吴静红等^[14]基于光频域反射(OFDR)技术对混凝土裂缝进行了识别与监测。章征林等^[15]基于 OFDR 建立了一种应变传递模型,推导了光纤应变传递关系,分析了分布式光纤应变测量结果的影响因素。王花平等^[10,16-17]基于应变传递理论探讨分布式光纤传感器和被测结构界面相互作用及界面剥离对测量结果的影响。

上述研究推动了分布式光纤传感技术的发展并为其工程应用提供了参考。从桥梁主梁全寿命监测方面来看,监测效果较好且更适用于桥梁钢结构监测工程实际应用的分布式光纤传感技术还有待进一步研究。本文针对现有的 OFDR 和超弱光纤布拉格光栅(UWFBG)两种光纤传感技术,使用不同类型的光缆进行了 H 型钢梁的受弯变形测试,实时监测加卸载过程中钢梁全长的应变分布状态,并用应变片的定点测量结果作为参考进行对比分析。

2 基本原理

2.1 OFDR 技术的原理

OFDR 技术基于背向瑞利散射原理,采用相干探

测手段进行信号处理。光源发出的光经耦合器后分为两路,一路进入待测光纤中,在光纤各位置上不断产生背向瑞利散射信号,并与另一路参考光发生干涉,两者产生的拍频信号被光电探测器检测,且拍频与待测光纤位置成正比。当待测光纤某一位置受温度、压力或应变的影响时,此处光纤会产生瑞利散射频移。通过测量瑞利散射频移量,可以实现对某一位置应变和温度的测量以及整根光纤的分布式测量,其原理如图 1 所示。

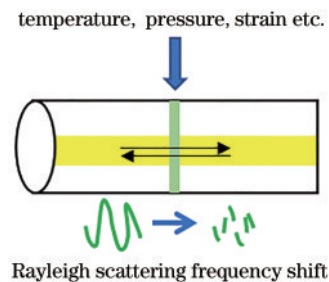


图 1 OFDR 的传感原理

Fig. 1 Sensing principle of the OFDR

2.2 UWFBG 技术的原理

光纤布拉格光栅(FBG)是通过紫外光曝光技术,使具有光敏性的光纤纤芯产生周期性的折射率分布和波长选择性,即对特定波长的光产生反射,其他波长的光可正常通过,相当于一种窄带反射式滤波器,其原理如图 2 所示。FBG 的反射方程可表示为

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

式中: λ 为 FBG 的中心波长; n_{eff} 为纤芯的有效折射率; Λ 为光栅的周期。由式(1)可知,若 n_{eff} 或 Λ 发生变化,则 FBG 的中心波长会发生漂移。通过测量 FBG 中心波长的漂移量可得到外界被测信号的变化,如应变或温度。UWFBG 是在 FBG 传感原理的基础上,在光纤上大量刻写反射率低于 0.1% 的超弱光栅(微结构),通过解析超弱光栅上的光信息准分布式和分布式感知外界信息,利用波分复用和时分复用技术大幅提高光栅传感器复用数量和传感距离,实现高分辨率长距离的分布式传感网络。

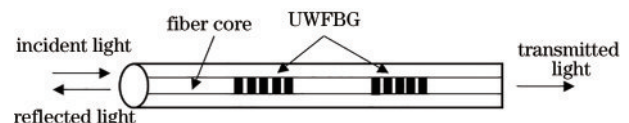


图 2 UWFBG 的传感原理

Fig. 2 Sensing principle of the UWFBG

3 实验设置

3.1 解调设备及对应光纤

实验使用的解调设备包括 OFDR 和 UWFBG 分析仪,其技术参数如表 1 所示。两种解调设备分别对应使用两种类型的光纤,共计 4 根,光纤类型如表 2 所

表 1 解调设备的技术参数

Table 1 Technical parameters of demodulation equipment

Name	OFDR	UWFBG
Sensing length /m	100	1000
Spatial resolution /mm	1	300
Measuring range / $\mu\epsilon$	12000	15000
Strain accuracy / $\mu\epsilon$	1	1
Temperature accuracy / $^{\circ}\text{C}$	0.1	0.1
Sampling rate	50 Hz@20 m, 20 Hz@50 m	1 Hz@1 km

表 2 光纤的类型

Table 2 Types of optical fibers

No.	Equipment	Characteristic	Diameter /mm
1	OFDR	strain sensing fiber	0.25
2		tight buffer strain sensing fiber	0.90
3	UWFBG	strain sensing fiber	0.25
4		tight buffer strain sensing fiber	0.90

示。其中,UWFBG 分析仪使用专用的刻点光纤,栅点间距为 0.3 m。

3.2 实验设计与光纤布设

实验模型由主梁、分配梁和铰支座组成,如图 3 所示。其中:主梁为 Q235b 焊接 H 型热轧钢梁,弹性模量 $E=206\text{ GPa}$,截面尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ (高度 \times 翼缘宽度 \times 厚度 \times 翼缘厚度),总长为 6 m,有效长度为 5 m(两端各留 0.5 m 长的悬臂段),跨中纯弯段长 1666 mm;分配梁为带肋 H 型钢梁,截面尺寸为 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 13\text{ mm}\times$

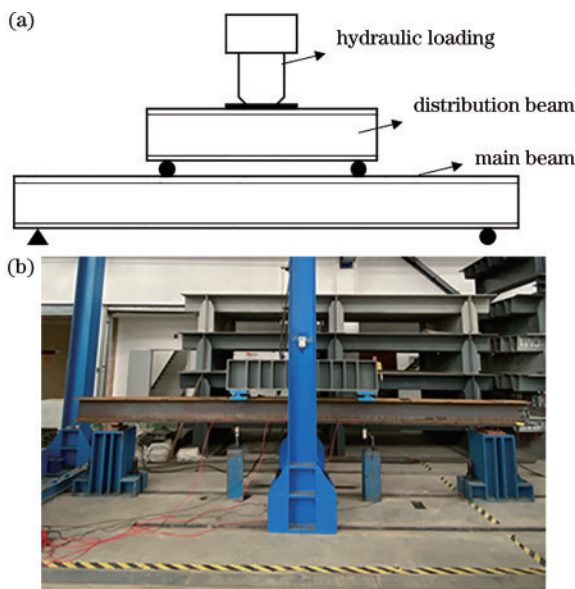


图 3 实验模型。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 3 Experimental model. (a) Schematic diagram; (b) physical map

21 mm,总长为 2 m,分配梁相对于主梁为纯刚性构件。在距主梁两端 0.5 m 处设置铰支座,分配梁与主梁间为铰支连接,位置为主梁有效长度的两个三分点处。

图 4 为光纤布设位置,在主梁下翼缘两侧上表面全长对称布设 4 种光纤。其中,3 号和 4 号 FBG 点关于梁截面左右两侧不完全对应。具体布设方法:将光纤预张拉后用 502 胶定点固定于主梁上,胶水风干后用黏结剂(环氧树脂)沿光纤通长粘贴,黏结剂固化后形成黏结层,依靠黏结层的内层进行应变传递,形成基材-黏结层-光纤-黏结层的四层复合材料结构^[18]。

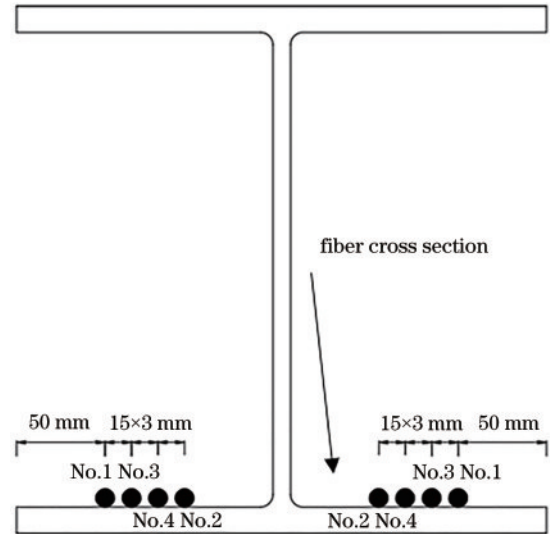


图 4 光纤布设截面

Fig. 4 Schematic diagram of optical fiber installation

为验证实验中光纤测量结果的可靠性,在主梁有效长度的两个三分点及跨中处光纤旁布置了 3 个电阻应变片进行同步测试,如图 5 所示。

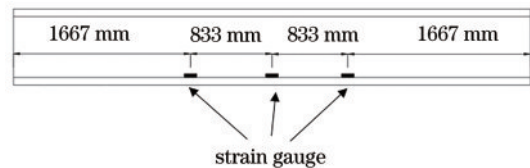


图 5 应变片的布置图

Fig. 5 Layout of strain gauges

为研究重载和轻载情况下,OFDR 和 UWFBG 的测试效果以及两种类型光纤的性能,设置了两组工况,具体参数如表 3 所示。

根据简支梁四点加载理论公式,实验设计的最大荷载为 100 kN,最大弯矩出现在纯弯段。梁身的最大应变 ϵ_{\max} 可表示为

$$\epsilon_{\max} = \sigma_{\max} / E, \quad (2)$$

$$\sigma_{\max} = M_{\max} / W_x \quad (3)$$

$$M_{\max} = F_{\max} \cdot d, \quad (4)$$

式中: M_{\max} 为梁身最大弯矩; F_{\max} 为实验设计的最大荷

表 3 不同工况的具体参数

Table 3 Specific parameters of different working conditions

Working condition	Step by step loading and unloading
Condition 1	heavy load, 10–100 kN, 100–10 kN (10 kN each level)
Condition 2	light load, 1–7 kN, 7–1 kN (1 kN each level)

载; d 为力臂; σ_{\max} 为梁身最大应力; W_x 为抗弯截面系数; x 为截面方向。计算的梁身最大应变 $\epsilon_{\max} = 297 \mu\epsilon$ 。

由于加卸载循环过程中, 梁始终处于弹性工作阶段, 故加载力 F 和应变 ϵ 存在线性关系, 根据最大荷载加载时计算的应变, 得到

$$\Delta\epsilon_T = 2.97\Delta F_T, \quad (5)$$

式中: $\Delta\epsilon_T$ 为梁下翼缘理论应变变化量; ΔF_T 为加载力理论相对变化量。根据式(5)可预测梁在弹性工作阶段下的应变理论值。

实验开始前, 需对实验模型进行预加载: 首先, 将主梁在不受力状态下的光纤初始数据作为基准值, 之后每次的测试数据均以基准值作为参考; 然后, 按照实验设计使用液压加载系统进行加载, 工况 1 每级荷载增加 10 kN, 至 100 kN 后逐级卸载 10 kN 至不受力, 工况 2 每级荷载增加 1 kN, 至 7 kN 后逐级卸载 1 kN 至不受力。实验过程中, 为剔除环境温度变化

给光栅波长漂移带来的交叉耦合, 环境温度始终保持在 25 °C。

4 实验结果与分析

4.1 OFDR 技术的实验结果分析

每次加卸载结束后测量 3 次应变数据并取平均值, 以增加实验研究的可信度。图 6 为 OFDR 测量的 1 号光纤和 2 号光纤分布式应变图。可以发现, 2 根光纤的测量结果相同, 重轻载工况下均呈现较好的空间应变分布特征, 主梁跨中(1 号光纤 7.0、13.0 m 处, 2 号光纤 10.5、16.5 m 处)出现应变最大值 281 $\mu\epsilon$ (工况 1) 和 23 $\mu\epsilon$ (工况 2), 测试精度为 3 $\mu\epsilon$ 。梁截面下翼缘两侧应变分布呈对称状, 与理论分析结果相符。实际测量过程中, 光纤在加载变形后短时间内无法恢复应变状态, 导致卸载应变曲线与加载应变曲线并未完全重合。

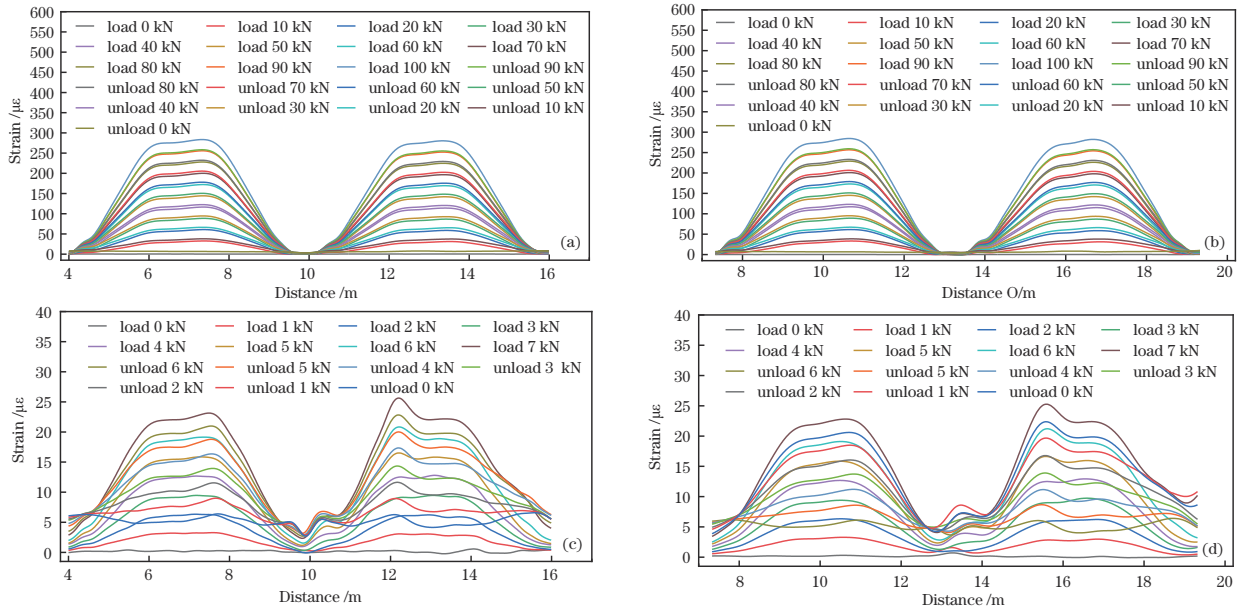


图 6 OFDR 的应变测试分布图。(a) 1 号光纤(工况 1); (b) 2 号光纤(工况 1); (c) 1 号光纤(工况 2); (d) 2 号光纤(工况 2)

Fig. 6 Strain test distribution of OFDR. (a) No. 1 optical fiber (condition 1); (b) No. 2 optical fiber (condition 1); (c) No. 1 optical fiber (condition 2); (d) No. 2 optical fiber (condition 2)

由实验测量结果可知, 梁身应变和加载力呈正线性关系, 实验加载力变化和梁身应变变化的关系为

$$\Delta\epsilon_o = 2.81\Delta F_E, \quad (6)$$

式中: $\Delta\epsilon_o$ 为梁下翼缘 OFDR 实测应变变化量; ΔF_E 为实验加载力的相对变化量。根据式(6)可预测梁在弹性工作阶段下的 OFDR 应变测量值。

4.2 UWFBG 技术的实验结果分析

4.2.1 波长-应变关系分析

图 7 为 UWFBG 技术测量的 3 号光纤和 4 号光纤分布式应变图。可以发现, 2 根光纤的实验测量结果基本相同, 重轻载工况下均呈现较好的空间应变分布特征, 主梁跨中(3 号光纤 8.5、14.5 m 处, 4 号光纤 11.5、17.5 m 处)出现应变最大值 281 $\mu\epsilon$ (工况 1) 和 21 $\mu\epsilon$ (工

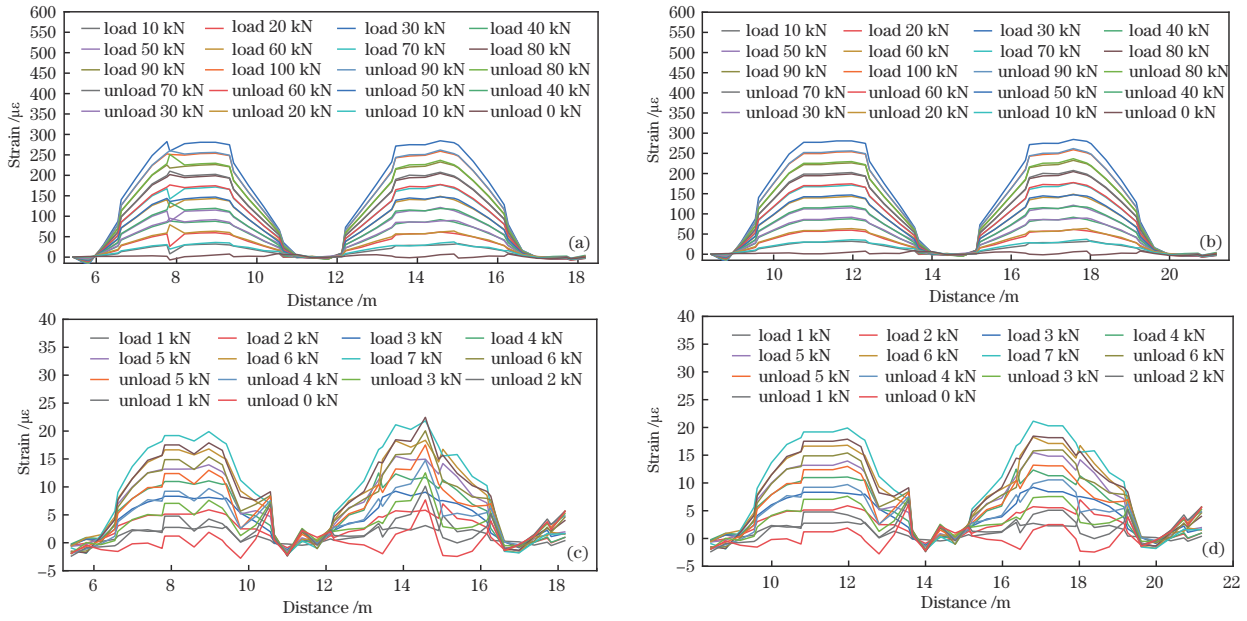


图 7 UWFBG 的应变测试分布图。(a) 3号光纤(工况 1);(b) 4号光纤(工况 1);(c) 3号光纤(工况 2);(d) 4号光纤(工况 2)
Fig. 7 Strain test distribution of UWFBG. (a) No. 3 optical fiber (condition 1); (b) No. 4 optical fiber (condition 1); (c) No. 3 optical fiber (condition 2); (d) No. 4 optical fiber (condition 2)

况 2), 测试精度为 $2 \mu\epsilon$, 光纤布设时预张力过大以及胶水凝固后应力的叠加导致 3 号光纤(7.9、8.5、10.3、14.2 m 处)和 4 号光纤(10.9、12.7、13.6、17.8、19.3 m)处出现栅点波长漂移。

实验测试中,用 UWFBG 技术测得的光栅点波长信号需乘以系数转换为应变数据。根据实验室标定结果,取 $1 \text{ pm} = 0.833 \mu\epsilon$, 得到转换关系

$$\Delta\lambda_i = 0.833\Delta\epsilon_i, \quad (7)$$

式中: $\Delta\lambda_i$ 为第 i 个光栅点波长的相对变化量; $\Delta\epsilon_i$ 为第 i 个光栅点对应梁下翼缘处应变的相对变化量。当加载到 100 kN 时,梁跨中下翼缘应变测量值为 $281 \mu\epsilon$, 则实际加载力变化量与光栅点所测应变相对变化量的关系为

$$\Delta\epsilon_i = 2.81\Delta F_E, \quad (8)$$

式中, ΔF_E 为实验加载力变化量。

根据式(7)和式(8),得到实验加载力变化和光栅点波长变化关系为

$$\Delta\lambda_i = 2.34\Delta F_E. \quad (9)$$

根据式(8)和式(9)可预测梁在弹性工作阶段下的 UWFBG 应变和波长测量值。

4.2.2 空间分辨率的提高分析

由 OFDR 的测试结果可知,梁截面下翼缘两侧应变呈对称分布且数值大小相等,因此可认为两侧应变相等。在 UWFBG 分析仪参数和光栅点密度都确定的情况下,设计的 3 号和 4 号 FBG 点关于梁截面左右两侧不完全对应,则两侧光栅点对应位置处的应变数据可合并到一侧,采取插值处理,提高测量的空间分辨率。图 8 为提高空间分辨率的原理。假设在给定测量区间内,光纤 1 和光纤 2 为两相邻并排布设光纤,光栅

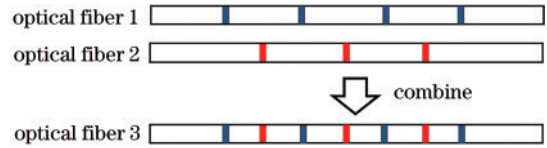


图 8 提高空间分辨率的示意图

Fig. 8 Schematic diagram of improving spatial resolution

点间距均为 X , 两光纤纵向相距 $X/2$, 其所处环境、所测物理参量均相同,将两光纤所测数据在空间上合并后得到光纤 3, 其空间分辨率为 $X/2$ 。

图 9 为 4 号光纤在重载工况下经差值处理后的应变图。可以发现,相比插值前,光纤在 7.5~12.5 m 处的数据密度增大,即空间分辨率更高。

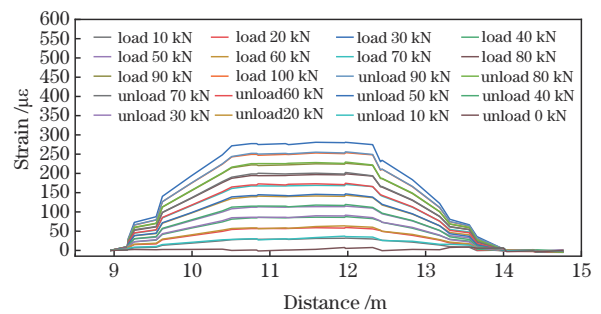


图 9 4号光纤的插值图

Fig. 9 Interpolation diagram of No. 4 fiber

4.3 精度分析

图 10 为梁在弹性工作阶段的应变理论值、OFDR 测量值、UWFBG 测量值。理论分析结果表明,OFDR 和 UWFBG 技术的测量结果一致,但与实际测量值相比存在误差,即式(6)、式(8)与式(5)的斜率相差

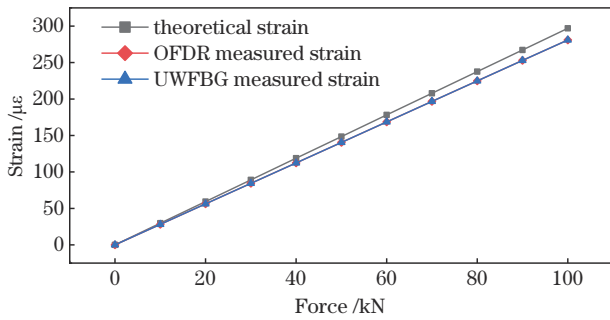


图 10 梁在弹性工作阶段的应变理论值、OFDR 测量值、UWFBG 测量值

Fig. 10 Theoretical strain, OFDR measured value and UWFBG measured value of the beam in elastic working stage

0.16。原因是胶黏剂会影响光纤应变的传递效果,且实验过程中存在系统误差。

为验证光纤所测数据的线性程度,在重载工况下计算了应变片及其相应位置处光纤的皮尔森相关系数,结果如表 4 所示。以主梁跨中为例,加卸载的应变曲线如图 11 所示。可以发现,应变片及光纤线性度较好且基本一致,皮尔森相关系数均在 0.999 以上,且加卸载结果的重复性较好。表 5 为光纤相对应应变片的测

表 4 皮尔森相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient

Location	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	Strain gauge
At the 1/3 of beam	0.9994	0.9993	0.9992	0.9992	0.9990
At the mid of beam	0.9990	0.9992	0.9998	0.9997	0.9995
At the 2/3 of beam	0.9992	0.9994	0.9999	0.9999	0.9998

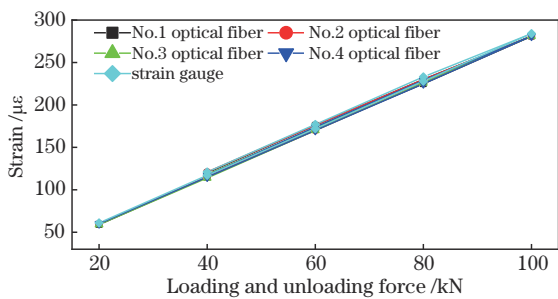


图 11 跨中光纤与应变片的测量值

Fig. 11 Measured values of mid span optical fiber and strain gauge

表 5 跨中光纤与应变片的测量值

Table 5 Measured values of midspan fiber and strain gauge

	No.	1	2	3	4
Condition 1	Precision /με	3	3	2	2
	Accuracy /%	98	98	98	98
Condition 2	Precision /με	2	2	1	1
	Accuracy /%	84	82	96	97

试性能。可以发现:重载工况下 4 根光纤的准确度均为 98%,1、2 号光纤的测量精度为 3 με,3、4 号光纤的测量精度为 2 με;轻载工况下 1、2 号光纤的准确度在 82% 以上,测量精度为 2 με,3、4 号光纤的准确度在 96% 以上,测量精度为 1 με。

5 结 论

将 OFDR 和 UWFBG 技术应用在 H 型钢梁弯曲实验中,研究了其在钢梁结构变形监测中的可行性,并对比分析了直径为 0.9 mm 紧套光纤和直径为 0.25 mm 裸纤的测试效果。实验结果表明,分布式光纤传感技术应用效果良好。相比应变片的测试结果:重载加卸载工况下 OFDR 技术的测量精度为 3 με, UWFBG 技术的测量精度为 2 με;轻载加卸载工况下 OFDR 技术的测量精度为 2 με, UWFBG 技术的测量精度为 1 με。实验条件下,根据公式预测的结果与 OFDR 和 UWFBG 测量结果一致,但与实际测量值存在误差。原因是胶黏剂会影响光纤应变的传递效果,且实验过程中存在系统误差。0.9 mm 紧套光纤的测试结果和裸纤测试结果具有较好的一致性。这表明紧套不会造成光纤应变传递损耗。通过改变光纤布设方法可提高 UWFBG 测量的空间分辨率,其提高程度取决于布设光纤自身的栅点密度和相邻光纤之间的相对栅点间隔。

参 考 文 献

- [1] Qin S Q, Gao Z Y. Developments and prospects of long-span high-speed railway bridge technologies in China[J]. Engineering, 2017, 3(6): 787-794.
- [2] 秦顺全,苑仁安,郑清刚,等.超大跨度公铁两用斜拉桥结构体系研究[J].桥梁建设,2020,50(4):1-8.
Qin S Q, Yuan R N, Zheng Q G, et al. Research on structural systems for very long-span rail-cum-road cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50(4): 1-8.
- [3] 唐贺强,徐恭义,刘汉顺.五峰山长江大桥主桥总体设计[J].桥梁建设,2020,50(6):1-7.
Tang H Q, Xu G Y, Liu H S. Overall design of main bridge of Wufengshan Changjiang River bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50(6): 1-7.
- [4] 李兴华,潘东发.武汉杨泗港长江大桥主桥施工技术[J].桥梁建设,2020,50(4):9-16.
Li X H, Pan D F. Key construction techniques for main bridge of Yangsigang Changjiang River bridge in Wuhan [J]. Bridge Construction, 2020, 50(4): 9-16.
- [5] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.
Editorial Department of China Journal of Highway, Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-97.
- [6] Hoffman J, Waters D H, Khadka S, et al. Shape sensing of polymer core composite electrical transmission lines

- using FBG sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(1): 249-257.
- [7] 欧进萍. 大型桥梁全寿命性能监测与维护[J]. 中国公路, 2017(13): 42-45.
Ou J P. Full-life performance monitoring and maintenance of large bridges[J]. China Highway, 2017(13): 42-45.
- [8] 蒋孝鹏, 邓清禄, 胡晓磊, 等. 分布式光纤在桥梁监测中的应用研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(S1): 617-620.
Jiang X P, Deng Q L, Hu X L, et al. Research on application of distributed optical fiber in bridge monitoring [J]. Building Structure, 2018, 48(S1): 617-620.
- [9] 张锦龙, 王拥军, 田凤, 等. 光纤传感的后起之秀: 分布式传感[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(2): 174-178.
Zhang J L, Wang Y J, Tian F, et al. A rising star in fiber optic sensor: distributed sensor[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2017, 9(2): 174-178.
- [10] 王花平. 分布式光纤传感器与被测结构的界面效应影响分析[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0206004.
Wang H P. Influence of interfacial effect between distributed optical fiber sensors and monitored structures [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0206004.
- [11] 刘铁根, 刘琨, 戴林, 等. 光电信息事件识别感知关键技术研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106002.
Liu T G, Liu K, Dai L, et al. Research progress of key technologies in recognition sensing for opto-electronic information and event[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106002.
- [12] 王一凡, 刘庆文, 李赫, 等. 基于瑞利图形相关的光纤分布式动态应变传感器[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1110002.
Wang Y F, Liu Q W, Li H, et al. Distributed fiber-optic dynamic strain sensor based on spectra correlation of Rayleigh backscattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1110002.
- [13] 胡鑫鑫, 王亚辉, 赵乐, 等. 布里渊光相干域分析技术研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0100001.
Hu X X, Wang Y H, Zhao L, et al. Research progress in Brillouin optical correlation domain analysis technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0100001.
- [14] 吴静红, 刘浩, 杨鹏, 等. 基于光频域反射计技术的混凝土裂缝识别与监测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 241201.
Wu J H, Liu H, Yang P, et al. Identification and monitoring of concrete cracks based on optical frequency domain reflectometry technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 241201.
- [15] 章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0410001.
Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0410001.
- [16] 徐施施, 冯文林. 基于薄芯-三芯细锥-薄芯光纤结构的应变传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1806002.
Xu S S, Feng W L. Strain sensor based on thin core-tapered three cores-thin core fiber structure[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1806002.
- [17] 黄炳森, 高社成, 黄新成, 等. 高敏光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0606002.
Huang B S, Gao S C, Huang X C, et al. High-sensitivity fiber Fabry-Pérot interferometer strain sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0606002.
- [18] 章亚男, 范迪, 沈林勇, 等. FBG 细径形状传感器的应变传递和精度实验[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1481-1491.
Zhang Y N, Fan D, Shen L Y, et al. Strain transmission and accuracy experiment on fiber Bragg grating small-diameter shape sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(7): 1481-1491.