

# 三向光纤布拉格光栅应变传感器的设计及应变特性

王红珂, 徐德城\*, 林磊, 齐煜炜, 张国栋

苏州热工研究院有限公司材料力学研究所, 江苏 苏州 215004

**摘要** 针对多向应变测量问题, 采用凸台和圆环状基片结构设计了一种三向光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器, 实现了对结构三个方向应变的同步测量。通过振动试验台和不锈钢板进行了同电阻应变片的静态对比实验和振动监测实验。结果表明, FBG 应变传感器和应变片在三个方向的静态应变曲线基本一致, 相关系数分别为 0.98、0.98 和 0.99。振动功率谱分析结果表明, FBG 应变传感器和应变片均观察到了一次谐波和二次谐波, 频率误差分别为 2.77% 和 0.97%, 且应变片还监测到了高次谐波信号。该传感器具有结构简单、尺寸小、测量精度高、定位准确等优点, 在多向应变监测领域具有良好的应用前景。

**关键词** 传感器; 光纤测量; 三向应变; 光纤布拉格光栅; 振动实验

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1128001

## Design and Strain Characteristics of Trifarious Fiber Bragg Grating Strain Sensor

Wang Hongke, Xu Decheng\*, Lin Lei, Qi Yuwei, Zhang Guodong

Material Mechanics Institute, Suzhou Nuclear Power Research Institute,  
Suzhou 215004, Jiangsu, China

**Abstract** Aiming at the problem of multi-directional strain measurement, we design a trifarious fiber Bragg grating (FBG) strain sensor based on a boss and a ring-shaped substrate structure. We realize the simultaneous measurement of the strain in three directions of the structure. Static contrast and vibration monitoring experiments with resistance strain gauges were conducted using the vibration testing machine and stainless steel plate. The results show that the static strain curves of the FBG sensor and strain gauge in three directions are the same. Additionally, the correlation coefficients are 0.98, 0.98, and 0.99, respectively. The results of vibration power spectrum analysis show that the FBG sensor and strain gauge can observe the first and second harmonics; the frequency error is 2.77% and 0.97%. Furthermore, the strain gauge can detect high harmonic signals. The sensor has many advantages, such as simple structure, small size, high accuracy, and accurate location, having a promising application future in multi-directional strain monitoring.

**Key words** sensors; fiber measurements; trifarious strain; fiber Bragg grating; vibration experiment

## 1 引言

应变测量可以获得结构的状态信息, 进而实现结构健康检测、损伤定位和故障诊断<sup>[1-2]</sup>。通常采用

电阻应变片进行结构应变测量, 但高温、腐蚀、潮湿、电磁干扰等恶劣工况常常会导致测量误差较大、应变片使用寿命缩短, 无法实现长期准确的应变测量<sup>[3]</sup>。光纤布拉格光栅(FBG)作为一种新型无

收稿日期: 2021-08-06; 修回日期: 2021-08-30; 录用日期: 2021-09-03

通信作者: \*xudecheng@cgnpc.com.cn

源传感器件,具有结构简单、质量轻、抗电磁干扰能力强以及准分布测量等优点<sup>[4]</sup>,在土木工程、桥梁结构设计、隧道施工等领域得到了广泛应用<sup>[5-8]</sup>。

通常将FBG封装在金属基片或不锈钢管中,通过光栅对应变敏感的特性实现结构应变测量。当结构的主应力方向不确定时,需要同时获得结构测点处多个方向的应变信息,进而得到结构的最大应变值<sup>[9]</sup>。为了实现多向应变测量,Ramos等<sup>[10]</sup>将一根刻有三个FBG的光纤封装成“三角形”应变花,实现了对结构测点区域三个方向的应变测量。该应变花的测量范围较大,可用于结构的损伤定位。王静等<sup>[11]</sup>将三根FBG分别沿横向、纵向和45°方向封装在一个基体平面上,封装后的三向FBG传感器的灵敏度为0.794 μm/με,应变传递系数为0.662。陈勇等<sup>[12]</sup>将三根FBG光纤组成直角应变花结构,通过不同位置的应变花测量结构的主应变方向,进而实现对冲击位置的定位,定位精度可达到2.9 cm。

已有的三向FBG应变传感器通常将多个FBG拼接成不同形状,从而实现对结构多个方向的应变测量,但传感器的尺寸较大、应变定位不准确、等效误差较大。针对这些问题,本文设计了一种三向FBG应变测量传感器,避免了单向应变计组合测量误差大、应用空间受限等问题。通过电动振动试验台和不锈钢板设计了同电阻应变片的静态对比实验和振动监测实验,对传感器的静态测试性能和振动监测性能进行研究,为三向FBG应变传感器的设计及性能研究提供了参考。

## 2 三向光纤布拉格光栅应变传感器

### 2.1 测量原理

三向FBG应变传感器的敏感元件为FBG,当光在FBG中传输时,满足布拉格条件的光会被反射<sup>[13]</sup>,反射光的中心波长 $\lambda_B$ 可表示为

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

式中, $n_{\text{eff}}$ 为光栅的有效折射率, $\Lambda$ 为光栅周期。当FBG受到轴向拉应力时,由于弹光效应和光栅周期的变化,光栅中心波长的漂移量可表示为

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Delta\Lambda + 2 \cdot \Delta n_{\text{eff}} \cdot \Lambda, \quad (2)$$

式中, $\Delta\Lambda$ 为应力作用下光纤的弹性形变, $\Delta n_{\text{eff}}$ 为弹光效应引起的光纤折射率变化。受轴向拉应力作用,光栅波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 与轴向应变 $\varepsilon$ 的关系为

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = K_\varepsilon \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

式中, $K_\varepsilon$ 为光栅相对波长的应变灵敏度系数,可通过标定获得。综上所述,根据光栅波长变化量即可获得结构的应变信息。

### 2.2 传感器的结构

FBG应变传感器的结构如图1所示,主要包括圆环状合金钢基片、三根单模石英FBG、凸台以及基片向外伸出的6个拉伸杆。其中,基片半径 $r$ 为10 mm,厚度为0.2 mm;拉伸杆的长度为15 mm,宽度为3 mm,且拉伸杆端部有一直径为0.2 mm的圆孔,用于传感器三个方向应变灵敏度的标定。三根FBG沿基片直径方向布置,每根光纤上刻制1个FBG,FBG栅区的长度为8 mm。FBG 1和FBG 3分布在FBG 2两侧且均与其呈45°夹角,光栅的栅区

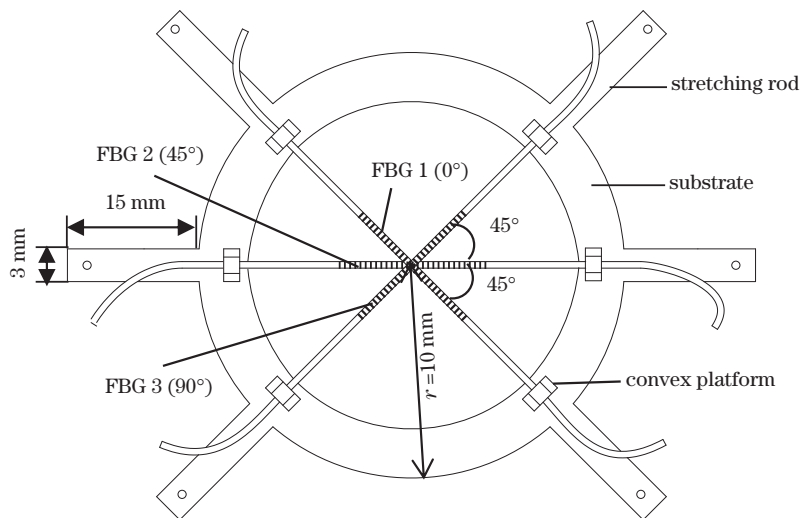


图1 FBG传感器的结构

Fig. 1 Structure of the FBG sensor

位于基片中心区域,光纤两端通过单芯低熔点玻璃焊料焊接固定在凸台上的“V”型槽中。为避免光纤在基片中心交叉碰触产生啁啾现象,分别在FBG 1、FBG 2、FBG 3 光纤固定位置设置高度为 0.6 mm、0.3 mm 和 0.9 mm 的凸台。光纤固定后,在传感器基片上安装金属防护罩对光纤及栅区进行保护。

### 2.3 传感器的封装

图 2 为 FBG 应变传感器的封装过程及实物照片。图 2(a) 为 FBG 的焊接示意图,将两个单芯低熔点管状玻璃焊料穿过 FBG 的一端后放置在凸台上的“V”型槽中,采用电阻丝加热方法将焊料烘烤融化后填充至整个“V”型槽中,然后自然冷却并静置

30 min。冷却后将合金盖板压在光纤上方,并用环氧树脂胶将盖板和凸台粘接在一起。将光纤进行预拉伸,并通过相同的方法完成 FBG 另一端的固定。固定 FBG 后,将金属防护罩通过 6 个金属引脚与传感器基片固定在一起,封装后的 FBG 传感器如图 2(b) 所示。传感器封装后,测得 FBG 1、FBG 2、FBG 3 在无应力条件下的谐振中心波长分别为 1553.779 nm、1550.032 nm 和 1558.387 nm。传感器封装后进行灵敏度标定,标定完成后去除基片上的 6 个拉伸杆以减小传感器尺寸,然后用塑料套管对裸光纤进行防护,标定后的传感器实物如图 2(c) 所示。

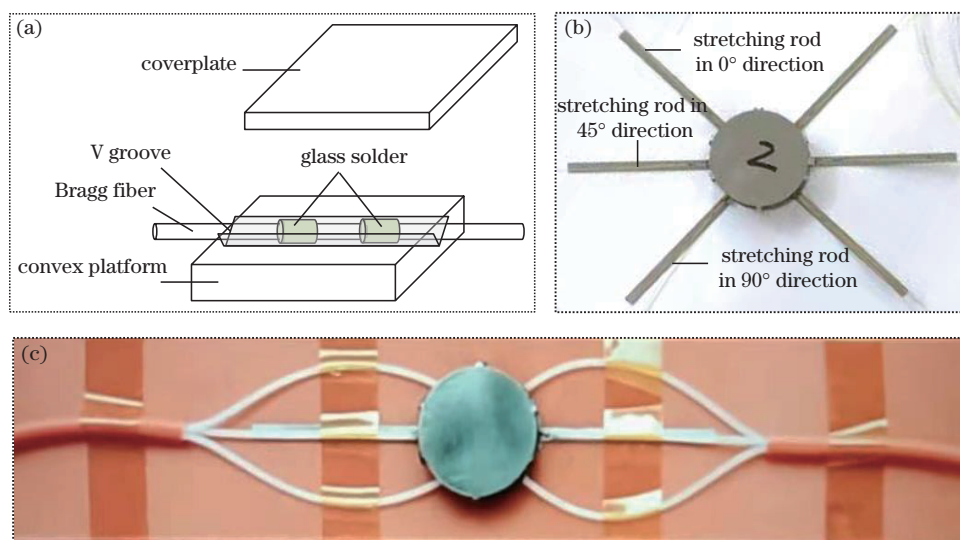


图 2 三向 FBG 应变传感器的封装过程。(a) 焊接示意图; (b) 封装后的照片; (c) 标定后的照片

Fig. 2 Packaging process of trifarious FBG strain sensor. (a) Welding schematic diagram; (b) photo after encapsulation; (c) photo after calibration

### 2.4 传感器的标定

图 3 为传感器的标定装置。将 FBG 应变传感器 45° 方向对应的 2 个拉伸杆固定在位移拉伸平台上,调节右侧手轮使中间滑块每次向右移动 0.1 mm,达到 0.8 mm 后使滑块向左移动,每次移动 0.1 mm,最终回到初始位置。标定过程中,通过百分表读取传感器的拉伸位移,通过 FBG 解调仪给出 FBG 的波长信息。按照相同步骤对 FBG 应变传感器 0° 方向和 90° 方向的拉伸杆分别进行拉伸和卸载,并根据拉伸位移计算对应的应变值。

根据应变与波长变化量的拟合曲线,得到 FBG 应变传感器的灵敏度标定结果如表 1 所示。FBG 应变传感器在 0°、45°、90° 方向的平均灵敏度分别为 0.955 pm/μ $\epsilon$ 、1.259 pm/μ $\epsilon$  和 0.988 pm/μ $\epsilon$ , 三个方

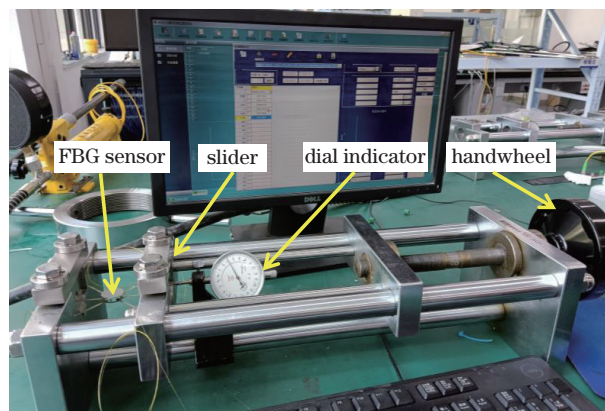


图 3 传感器的标定

Fig. 3 Calibration of the sensor

向上的应变相关系数  $R^2$  均达到 0.999 以上,具有较高的线性度。

表1 FBG 传感器的标定结果  
Table 1 Calibration result of FBG sensor

Process	Parameter	0°	45°	90°
		(FBG 1)	(FBG 2)	(FBG 3)
Load	sensitivity / (pm·μ $\epsilon^{-1}$ )	0.952	1.260	0.985
	R <sup>2</sup>	0.9994	0.9999	0.9999
Unload	sensitivity / (pm·μ $\epsilon^{-1}$ )	0.957	1.257	0.990
	R <sup>2</sup>	0.9999	0.9995	0.9996
Average sensitivity / (pm·μ $\epsilon^{-1}$ )		0.955	1.259	0.988

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 实验设计

实验对象是一厚度为 2 mm 的不锈钢板,将钢

板焊接在尺寸为 150 mm×150 mm 的方形底座上,底座通过螺栓固定在振动试验台上,如图 4 所示。沿不锈钢板中轴线对称布置 1 个 FBG 应变传感器(编号为 F1)和 1 个日本共和 KFG 型三向电阻应变片(编号为 S1)。应变片为粘贴式电阻应变花,电阻值为 120  $\Omega$ , 格栅长度为 3 mm, 通过四分之一桥连接至 LMS 振动应变测试仪, 采样频率为 3.2 kHz。FBG 应变传感器连接至解调仪, 解调仪的光谱范围为 1528~1568 nm, 测量分辨率为 1 pm, 测量重复性小于  $\pm 2$  pm, 采样频率为 1 kHz。传感器安装时, 应保证电阻应变片 45° 方向、FBG 应变传感器 45° 方向与不锈钢板轴线方向一致。振动试验台提供振动激励, 振动方向垂直于不锈钢板面。

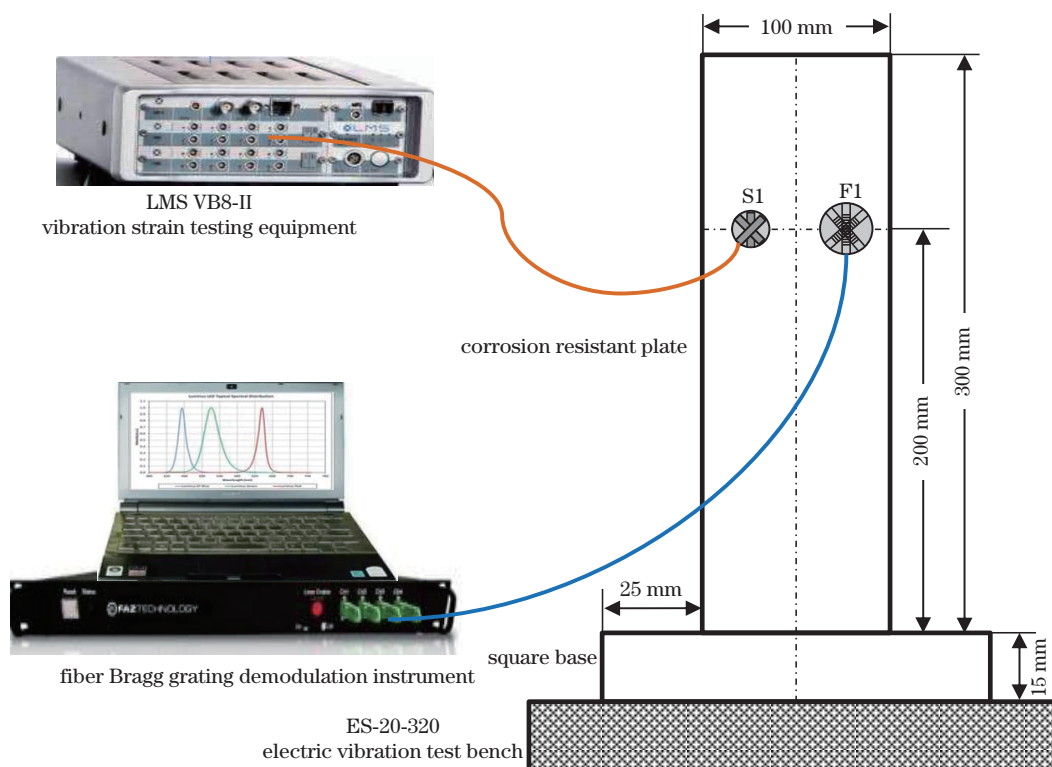


图4 实验装置的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

根据图 4 中的实验装置分别进行电阻应变片与 FBG 应变传感器的静态对比实验和振动监测实验。实验均在恒温恒湿振动实验室中进行, 环境温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ , 实验步骤如下。

1) 静态实验: 垂直于不锈钢板对钢板顶部中点位置施加作用力使其发生弯曲, 然后回到初始状态。再向相反方向施加作用力使其发生弯曲后恢复至初始状态, 多次重复实验并记录整个过程中的应变信息。

2) 振动实验: 在振动试验台上开展正弦扫频实验, 扫频范围为 20~1500 Hz, 振动加速度幅值为 19.6  $\text{m/s}^2$ , 扫频速率为 2 oct/min (oct 表示倍频程), 开展随机振动实验时的具体参数如表 2 所示。

表2 随机振动实验的参数设置  
Table 2 Parameter settings of random vibration experiment

Frequency / Hz	55	110	610	1220
Spectrum values / [(m·s <sup>-2</sup> ) <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> ]	0.01	1.00	1.00	0.01

### 3.2 结果分析

实验在恒温实验室开展且单次振动实验的时间较短,因此不考虑温度对应变测量结果的影响。图 5 为电阻应变片和 FBG 应变传感器的静态实验结果,其中,图 5(a)为电阻应变片三个方向的应变曲线,图 5(b)为 FBG 应变传感器三个方向波长随

时间的变化曲线。可以发现:FBG 应变传感器可以监测到不锈钢板测点位置三个方向的应变信息,应变趋势与电阻应变片一致;FBG 应变传感器和电阻应变片在  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  方向的应变时域信号相关性较高,相关系数分别为 0.98、0.98 和 0.99。

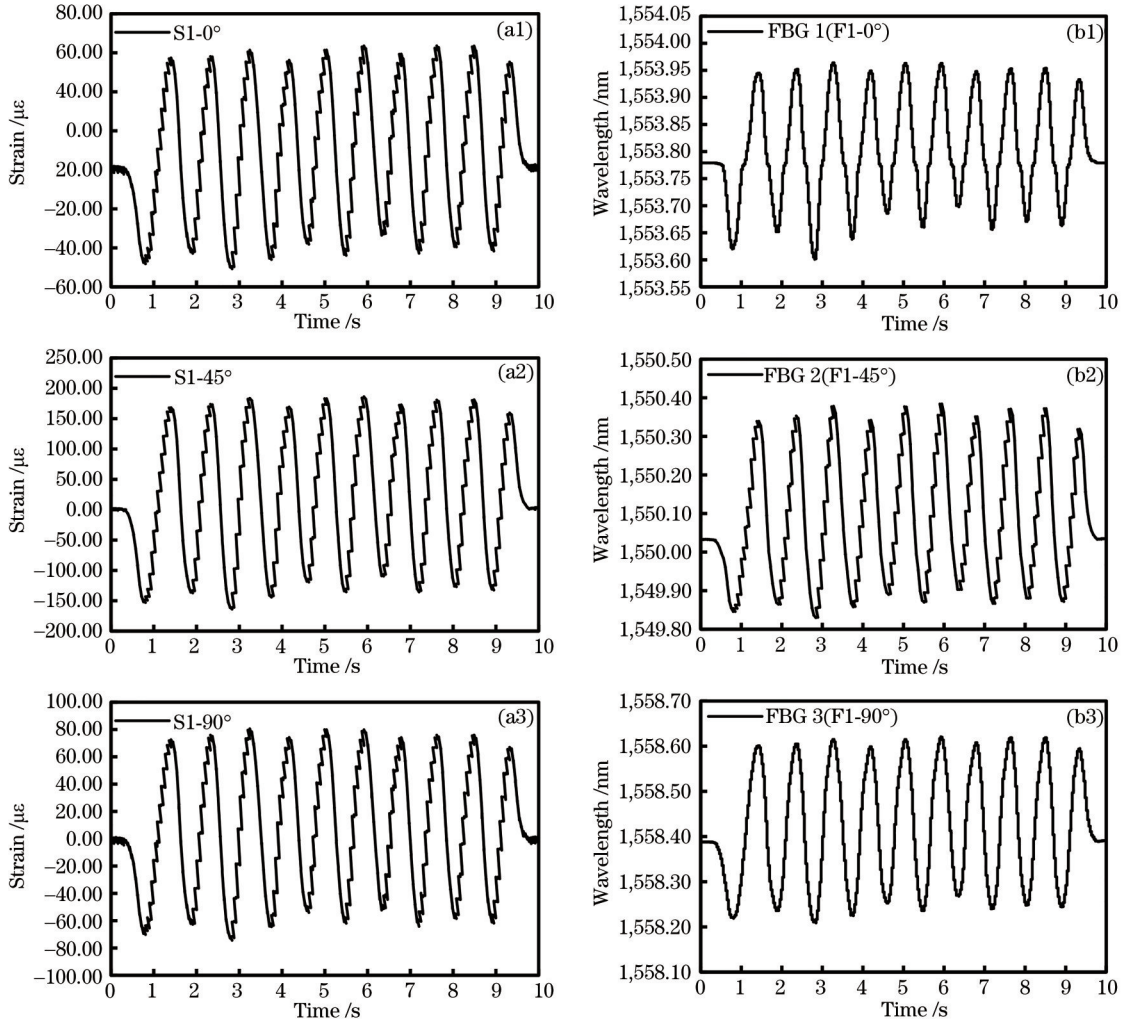


图 5 两种传感器的静态测试曲线。(a)电阻应变片的时域信号;(b)FBG 应变传感器的时域信号

Fig. 5 Static test curves of the two sensors. (a) Time domain signal of resistance strain gauge; (b) time domain signal of FBG strain sensor

根据 FBG 传感器的应变灵敏度及波长漂移量计算传感器对应的应变值,静态应变测试结果如表 3 所示。可以发现,两个传感器均在不锈钢板轴线方向的应变最大,同轴线呈  $\pm 45^\circ$  方向的应变较小且大小基本相同。由于电阻应变片的栅格长度只有 3 mm,应变测量区域小于 FBG 应变传感器,因此电阻应变片三个方向的应变测量值均小于 FBG 应变传感器。

为了验证 FBG 应变传感器的振动监测性能,

在振动试验台上进行了正弦扫频实验,获得不锈钢板的前四阶固有频率分别为 112.29 Hz、613.38 Hz、1214.83 Hz 和 1398.28 Hz。图 6(a)为电阻应变片三个方向的应变时域曲线,可以发现,应变片在前三阶固有频率点处均出现较大的应变幅值,且一阶固有频率处的应变幅值最大。图 6(b)为 FBG 应变传感器的正弦扫频响应曲线与电阻应变片基本一致,且 FBG 应变传感器在第四阶固有频率处也有应

表 3 静态测试结果

Table 3 Results of static test

unit:  $\mu\epsilon$

Category	FBG sensor			Resistance strain gauge		
	F1-0° (FBG 1)	F1-45° (FBG 2)	F1-90° (FBG 3)	S1-0°	S1-45°	S1-90°
Maximum peak	193.72	279.59	216.84	63.5	186.16	80.46
Minimum trough	-186.39	-160.44	-170.16	-50.67	-163.62	-74.30

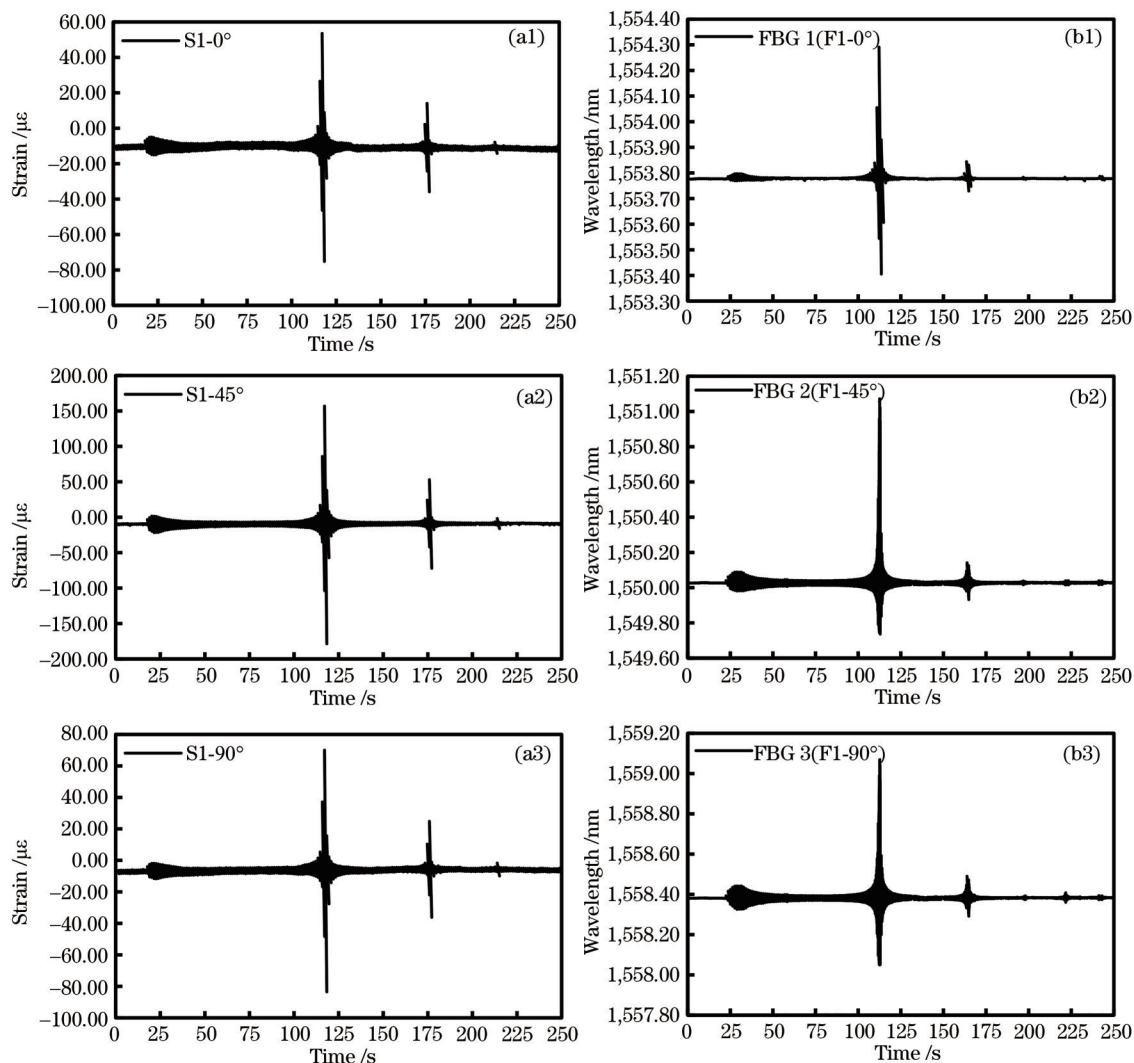


图 6 两种传感器的正弦扫频响应曲线。(a)应变片的时域信号;(b)FBG应变传感器的时域信号

Fig. 6 Sinusoidal sweep response curves of two sensors. (a) Time domain signal of strain gauge; (b) time domain signal of FBG strain sensor

变响应;FBG应变传感器的45°方向和90°方向在第一阶固有频率处的正向应变远大于负向应变,原因是传感器封装后FBG的拉伸量变小,不锈钢板的最大负向应变超出传感器的应变测试范围下限。

图7为随机振动实验条件下两种传感器监测到的应变时域曲线,其中,图7(a)为电阻应变片三个方向的振动时域曲线,图7(b)为FBG应变传感器三个方向的振动时域曲线。可以发现:两种传感器

均监测到不锈钢板的振动应变信息,且应变变化趋势基本一致;FBG 1和FBG 2的正向应变值大于负向应变值,原因是FBG应变传感器封装时FBG光纤的预拉伸量较小,传感器应变测试范围下限小于实际应变幅值。

电阻应变片和FBG应变传感器监测到的振动信号功率谱曲线分别如图8(a)和图8(b)所示。可以发现,电阻应变片监测到的一次和二次谐波频率

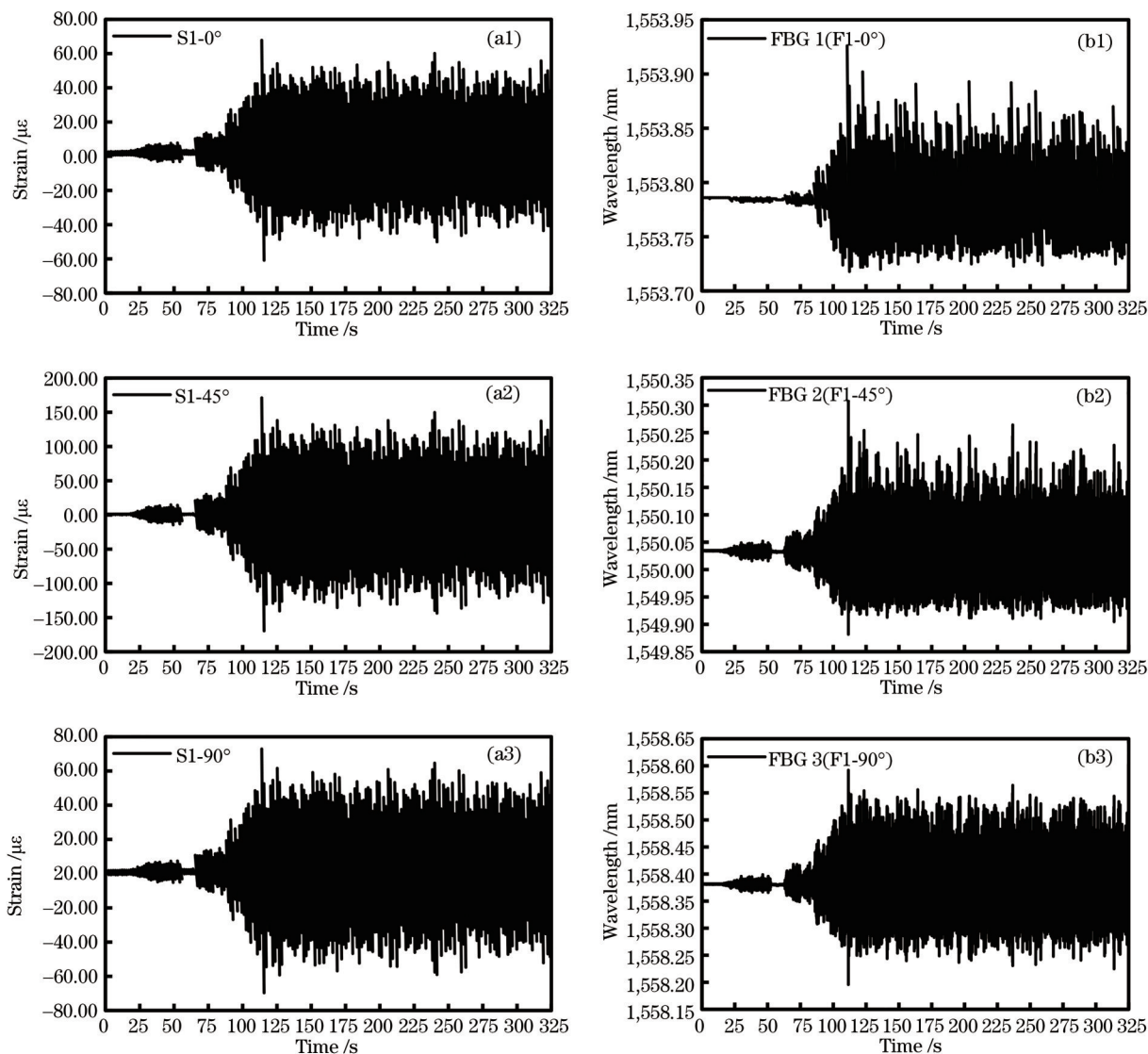


图 7 两种传感器的随机振动时域信号。(a)应变片的时域信号;(b)FBG 应变传感器的时域信号

Fig. 7 Random vibration time domain signals of two sensors. (a) Time domain signal of strain gauge; (b) time domain signal of FBG strain sensor

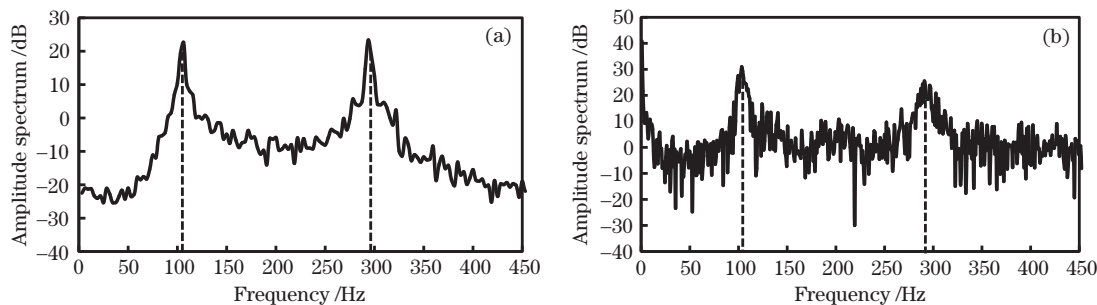


图 8 两种传感器随机振动信号的功率谱。(a)应变片;(b)FBG 应变传感器

Fig. 8 Power spectrum of random vibration signals of two sensors. (a) Strain gauge; (b) FBG strain sensor

分别为 106.25 Hz 和 293.75 Hz,FBG 应变传感器监测到的一次和二次谐波频率分别为 103.31 Hz 和 290.91 Hz,两种传感器的一次谐波和二次谐波频率

误差分别为 2.77% 和 0.97%。此外,电阻应变片还监测到了高次谐波信号,频率分别为 581.25 Hz、953.13 Hz 和 1453.13 Hz。

## 4 结 论

设计了一种三向 FBG 应变传感器,通过在圆环状基片上布置三根 FBG 光纤实现了结构三个方向应变的同步测量。采用振动试验台和不锈钢板进行了同电阻应变片的静态对比实验和振动监测实验。实验结果表明:FBG 传感器与应变片的静态应变曲线一致,三个方向应变时域信号的相关系数分别为 0.98、0.98 和 0.99;FBG 传感器振动测试信号的一次谐波和二次谐波频率误差分别为 2.77% 和 0.97%。此外,应变片还监测到了高次谐波信号。该三向 FBG 传感器具有测量精度高、结构尺寸小、应变定位准确等优点,在结构最大应力、应变监测方面具有良好的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Cui H Y, Du H Y, Zhao F Y, et al. Damage identification in a plate structure based on a cross-direction strain measurement method[J]. *Measurement*, 2020, 158: 107714.
- [2] 陈勇, 陈亚武, 刘志强, 等. 基于光纤布拉格光栅传感的齿轮故障检测方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304007.  
Chen Y, Chen Y W, Liu Z Q, et al. A gear fault detection method based on a fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304007.
- [3] Nie M, Xia Y H, Yang H S. A flexible and highly sensitive graphene-based strain sensor for structural health monitoring[J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(4): 8217-8224.
- [4] 张旭, 侯茂盛, 刘智超, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090603.  
Zhang X, Hou M S, Liu Z C, et al. Surface reconstruction algorithm of plate-shell structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090603.
- [5] 孙丽, 王兴业, 李闯, 等. 基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1406005.  
Sun L, Wang X Y, Li C, et al. New double fiber Bragg grating static level based on equal strength beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1406005.
- [6] Yang J, Hou P, Yang C Q, et al. Study of a long-gauge FBG strain sensor with enhanced sensitivity and its application in structural monitoring[J]. *Sensors*, 2021, 21(10): 3492.
- [7] Górriz B T, Rinaudo P, García P A C. Comparison between point and long-gage FBG-based strain sensors during a railway bridge load test[J]. *Strain*, 2017, 53(4): e12230.
- [8] Li Y, Wang H P, Cai W B, et al. Stability monitoring of surrounding rock mass on a forked tunnel using both strain gauges and FBG sensors[J]. *Measurement*, 2020, 153: 107449.
- [9] 刘鸿文. 材料力学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2011.  
Liu H W. *Mechanics of materials*[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [10] Ramos C A, de Oliveira R, Marques A T, et al. Design and experimental evaluation of a composite strain rosette using fiber Bragg grating[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, 53(8): 1853-1857.
- [11] 王静, 李术才, 施斌, 等. 三向 FBG 应变传感器及在隧道开挖模型试验中的应用研究[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(2): 182-189.  
Wang J, Li S C, Shi B, et al. Trifarious FBG sensor strain transfer characteristics and its application to tunnel excavation model test[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(2): 182-189.
- [12] 陈勇, 刘保林, 刘焕淋, 等. 基于光纤布拉格光栅的载荷定位与检测方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(18): 8-15.  
Chen Y, Liu B L, Liu H L, et al. Load location and measurement system based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(18): 8-15.
- [13] Panopoulou A, Loutas T, Roulias D, et al. Dynamic fiber Bragg gratings based health monitoring system of composite aerospace structures[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 69(7/8): 445-457.