

DOI: 10.12086/oe.2018.180106

角钢结构光纤光栅位移传感器的研究

谢凯^{1,2}, 谭滔^{1,2}, 穆博鑫², 段超², 李卓枢²,
孟怡晨², 吕中宾^{1,2}, 魏建林¹, 田野², 柴全²,
刘艳磊², 张建中^{2*}, 杨军², 苑立波²

¹国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450000;

²哈尔滨工程大学纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

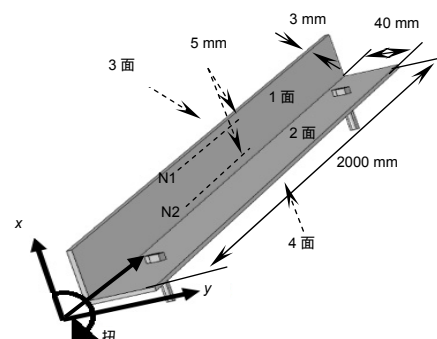
摘要: 本文提出将两个纤维增强复合材料(FRP)封装的光纤光栅(FBG)安装于角钢梁的两个面上, 用来实现对角钢梁位移大小和方向的测量, 实现对角钢结构的健康检测。本文将传感器分别安装在角钢梁不同面上的各个位置, 通过有限元分析模拟了角钢梁结构的位移和传感器应变传递的关系, 对传感器的安装位置进行优化设计, 并进行了实验验证。仿真模拟和实验结果表明, 传感器安装在合理位置能够实现角钢梁一端位移的大小测量和方向判别。研究结果对于利用光纤传感器实现对角钢构成的结构如桥梁、电塔、吊车等的健康监测提供了基础研究。

关键词: 电塔角钢; 光纤 Bragg 光栅; FRP; 应变传递

中图分类号: O439; TN253

文献标志码: A

引用格式: 谢凯, 谭滔, 穆博鑫, 等. 角钢结构光纤光栅位移传感器的研究[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 180106



Study on fiber Bragg grating displacement sensor with angle steel structure

Xie Kai^{1,2}, Tan Tao^{1,2}, Mu Boxin², Duan Chao², Li Zhuoshu², Meng Yichen², Lv Zhongbin^{1,2},
Wei Jianlin^{1,2}, Tian Ye², Chai Quan², Liu Yanlei², Zhang Jianzhong^{2*}, Yang Jun², Yuan Libo²

¹Lab of Transmission Line Galloping Prevention Technique, State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou, Henan 450000, China;

²Key Lab of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract: In this paper, two fiber reinforced polymer/plastic (FRP) encapsulated fiber Bragg grating (FBG) sensors were installed on the two sides of the angle steel beam, which was used to measure the displacement and direction of the diagonal steel beam, so as to realize the health inspection of the angle steel structure. The sensors were respectively installed on the different positions of angle steel beam, and the relationship between displacement and strain transmission of angle steel beam was simulated by the finite element analysis. The optimum design of sensors installation were discussed and the experimental verification was carried out. The simulation and experimental re-

收稿日期: 2018-02-09; 收到修改稿日期: 2018-05-13

基金项目: 国家电网项目(52170215000R); 国家自然科学基金资助项目(61377096、61775045、61605030); 教育部“111引智”项目(B13015)

作者简介: 谢凯(1975-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事智能电网方面的研究。E-mail: hetaoyuanhit@163.com

通信作者: 张建中(1978-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤器件和光纤传感方面的研究。E-mail: zhangjianzhong@hrbeu.edu.cn

sults show that the sensor has the capacity to discriminate the direction and measure the size of one side of the angle steel beam displacement when installed in a reasonable position. To realize the health monitoring by using optical fiber sensors on the structures composed by angle steel, such as bridges, electric towers and cranes, and so on, a basic research was provided.

Keywords: angle steel of electric tower; fiber Bragg grating; fiber reinforced polymer/plastic; strain transfer

Citation: Xie K, Tan T, Mu B X, *et al.* Study on fiber Bragg grating displacement sensor with angle steel structure[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(9): 180106

1 引言

角钢梁作为一种基本的工业支撑构件,广泛地用于桥梁^[1]、输电塔^[2]、铁道^[3]、起重运输机械、船舶^[4-6]、工业炉、反应塔^[7]、钢架^[8]等各种大型建筑结构和工程结构中,因而角钢梁往往长期工作在各种极端恶劣环境,承受着超大载荷。在这些极端恶劣环境下角钢梁容易产生应力集中、疲劳损伤从而产生裂纹、发生弯折断裂,进而影响到整个钢架结构的稳定性,轻者结构发生小幅度振动,产生小范围破坏,严重则会导致结构倒塌,造成重大安全事故^[9]。鉴于此,对角钢梁结构的形变进行长期健康监测就显得尤为必要。角钢梁的传统监测中,通常使用应变片、加速度计等电学传感器采用分布式布置在角钢梁上的方法进行监测,虽然简单实用,但由于角钢梁的测量天气环境往往非常恶劣,传统电学传感器的稳定性将受到影响,从而无法得到角钢梁的真实状态。近年来,随着光纤传感器技术的日益成熟,且光纤光栅传感具有不受电磁干扰、电绝缘性好等优点,在各种恶劣环境中有更好的应用前景^[10-11],因此光纤光栅传感器用于角钢梁监测具有较大的优势。

光纤光栅传感器使用在角钢梁领域,通常可以采用直接粘贴裸光纤光栅传感器的方法^[12],但角钢梁结构经常在室外使用,直接粘贴的方法无法满足在室外长期监测的要求,因此需要对光栅进行封装保护和安装设计。光栅的封装一般选用金属槽式^[13]、管式^[14]、纤维增强复合材料^[15](fiber reinforced polymer/plastic, FRP)的方式进行保护。槽式封装通常是用环氧树脂将光纤光栅封装在设计金属槽里,这种封装方式使光纤光栅与待测物之间有两层传递材料,传感器与待测物的应力应变传递关系更加复杂,传递系数不高;而管式封装一般是将光纤光栅封装在毛细钢管、金属管中,封装过程中,管内封装介质控制较难,通常分布不均匀,因此光纤光栅容易发生啾啾,会导致传感器的性能较低;而采用 FRP 封装方式,封装材料与光纤

光栅直接紧密接触,既能保持较高的传递系数,又能使得材料对光纤光栅均匀作用,保持传感器有较高的传感性能,且 FRP 材料性能稳定,质轻耐腐蚀,可以保护光栅传感器免受环境的侵蚀,保持性能稳定性,因此这种封装方式更适合电塔的恶劣环境。把光栅传感器固定在角钢梁上一般可采用胶粘、可拆卸式等方法固定,胶粘的方式通常运用在短时、外部环境稳定的条件,在角钢梁的恶劣工作环境中,恶劣的天气造成粘贴胶的老化以及角钢表面铁锈都会对粘贴效果造成影响,这种方式不能保证传感器能够长期可靠地工作,不能保证传感器性能的稳定性;而可拆卸的安装方式可以避免角钢梁表面铁锈的影响,且夹具均采用与角钢梁一致的材料,受天气影响与角钢一致,所以选用可拆卸的安装方式更加合适,且能够改变监测位置,在角钢上运用比其他方式更具有优势。

本文将光纤光栅传感技术应用于角钢梁的长期位移监测研究,选用了两个在恶劣环境中性能更加稳定的 FRP 封装光纤光栅传感器和设计了一种便于长期实时监测角钢位移的传感器安装夹具,将传感器安装在角钢梁不同面对角钢梁位移大小和方向进行监测研究,并通过仿真模拟和实验探讨了夹具安装对角钢的应变影响以及传感器安装位置与角钢位移之间的关系,详细分析了传感器安装在不同位置的灵敏度和误差,最终选择最优的安装方案,依此优化了传感器的布置方案。

2 纤维增强复合材料封装光纤光栅传感器

纤维增强复合材料,是由纤维材料与基体材料(树脂)按一定的比例混合后形成的高性能材料,现有碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer/plastic, CFRP)、玻璃纤维增强塑料(glass fiber reinforced plastic, GFRP)、芳纶纤维增强聚合物(aramid fiber reinforced polymer, AFRP)、玄武岩连续纤维增强

塑料(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)等, 质轻而硬、不导电、机械强度高、回收利用少、耐腐蚀。由于 FRP 材料的高比强度和优异的耐腐蚀特性, 在工程领域得到了广泛的应用。因此用 FRP 来封装光纤光栅传感器, 使得封装后的传感器既具有光纤光栅传感器的优点, 又能够在复杂条件下稳定工作^[16-18]。

本文选用的纤维增强复合材料封装传感器为标准生产的 FRP 光纤光栅传感器, 具体生产过程如图 1(a) 所示, 将在拉伸状态下的光纤光栅包裹在纤维束中, 通过混合树脂加热固化最终制作成如图 1(b) 所示的传感器。图 1(b) 中整个传感器长度 112 mm, 直径 3 mm, 两端为固定用的螺母。通过固定在角钢梁上的夹具将 FRP 传感器沿角钢梁长度方向固定在角钢梁的某一面

上, 使用传感器两端的螺母固定在夹具上, 并使 FRP 传感器距离角钢梁表面始终保持 16.5 mm 的高度, 实现对角钢的传感。

3 角钢应变实验

在本研究中, 通过分析角钢变形产生的位移来分析角钢的健康状态, 通过固定角钢梁的一端, 研究另一端在不同方向上的位移与表面安装的 FRP 传感器的关系, 通过传感器的响应来判断角钢梁的位移大小和位移方向, 因此需要建立角钢形变量(在各方向的位移)和传感器响应的关系, 分析二者之间的关系。

本文研究选用的角钢梁是宽 40 mm、厚 3 mm、长度 2000 mm 的 4# 等边角钢, 如图 2(a) 所示, 角钢梁

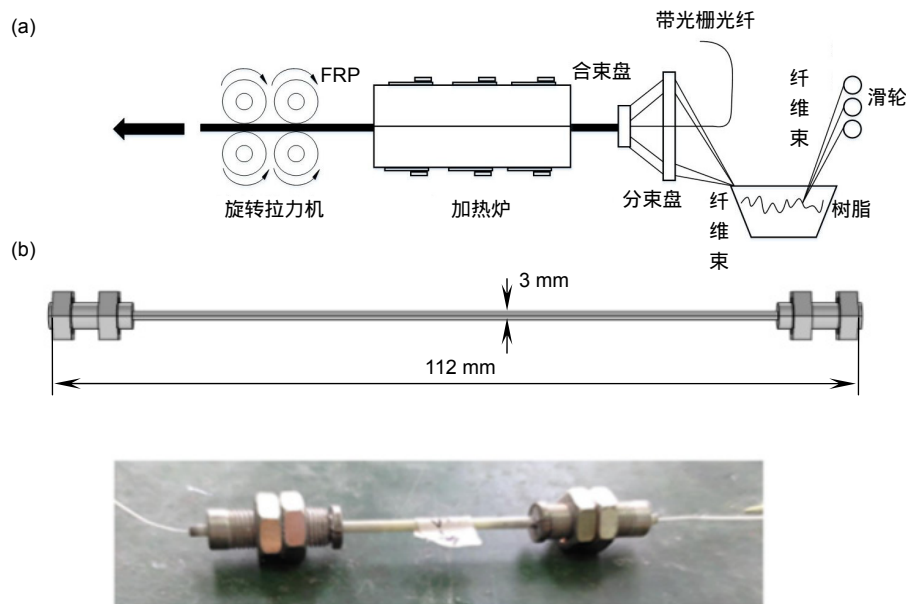


图 1 (a) FRP 光纤光栅传感器生产示意图; (b) FRP 封装光纤光栅传感器
Fig. 1 (a) FRP fiber grating sensor production diagram; (b) FRP fiber grating sensor

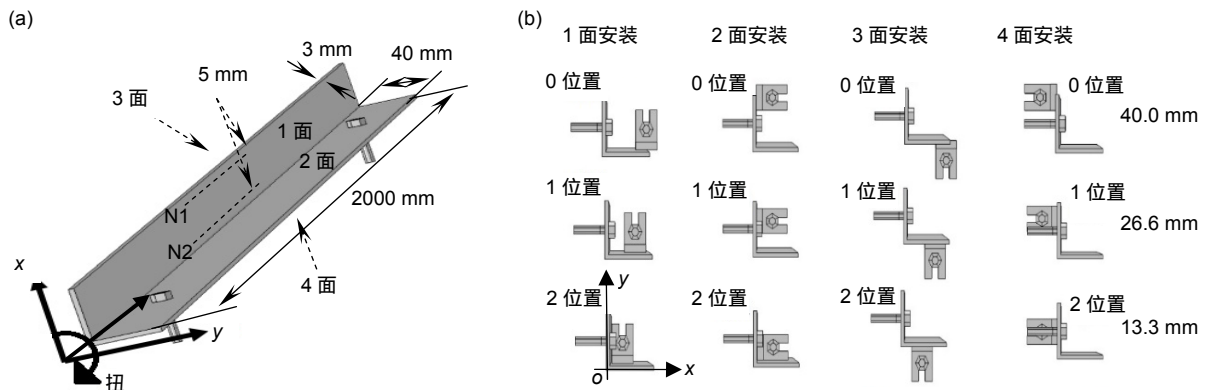


图 2 (a) 角钢梁示意图; (b) 各面夹具安装示意图
Fig. 2 (a) Angle steel diagram; (b) Installation of various fixtures

各个面分别为 1、2、3、4 面。N1、N2 为角钢测试面上布置的两个裸光栅，用来表示布置光栅处角钢梁的真实应变，来研究夹具安装对角钢应变分布的影响，光栅距离各自相邻棱边 5 mm。为了便于 FRP 封装后的光纤光栅传感器在角钢上安装，实现长期稳定监测，我们设计了一种可以通过螺丝固定的夹具，如图 2(b) 所示，夹具安装在角钢正中间 N1、N2 处，在夹具上 FRP 传感器可以保持距离角钢 16.5 mm 始终不变，还可以通过夹具上的滑槽沿 X、Y 方向改变位置，来研究安装位置对传感器传递的影响。选择研究的三个位置 0、1、2 的坐标分别为 40 mm、26.6 mm、13.3 mm。

3.1 夹具安装对角钢梁的影响

对角钢梁进行有限元模拟分析，分析夹具安装对角钢形变的影响。在每个面上依次改变 FRP 传感器的安装位置，分析安装夹具前后 N1、N2 的应变响应，

分别以夹具安装前后 N1、N2 的应变为横、纵坐标作图，并取每个位置的曲线斜率作图，曲线的斜率表示传感器安装前后 N1、N2 的线性关系，如图 3 所示。根据曲线斜率判断安装夹具产生的影响，斜率为 1 说明安装夹具对角钢应变无影响。分析图中所有曲线斜率总体上基本为 1，安装面为 1、2 面时有部分安装位置斜率不为 1，说明在这些位置夹具安装对角钢梁应变产生了影响，安装面为 3、4 面时斜率均为 1，因此 3、4 面为最理想的安装面。因此可以认为传感器安装对 N1、N2 处的应变影响不大，可以忽略 L 型夹具和 FRP 传感器安装位置对于角钢梁应变的影响。

3.2 角钢梁上夹具安装位置的理论分析

基于夹具安装对角钢梁的影响分析结果显示夹具安装对角钢梁应变没有影响，在此基础上分析角钢梁不同面上 FRP 传感器在不同位置处与角钢梁位移之间

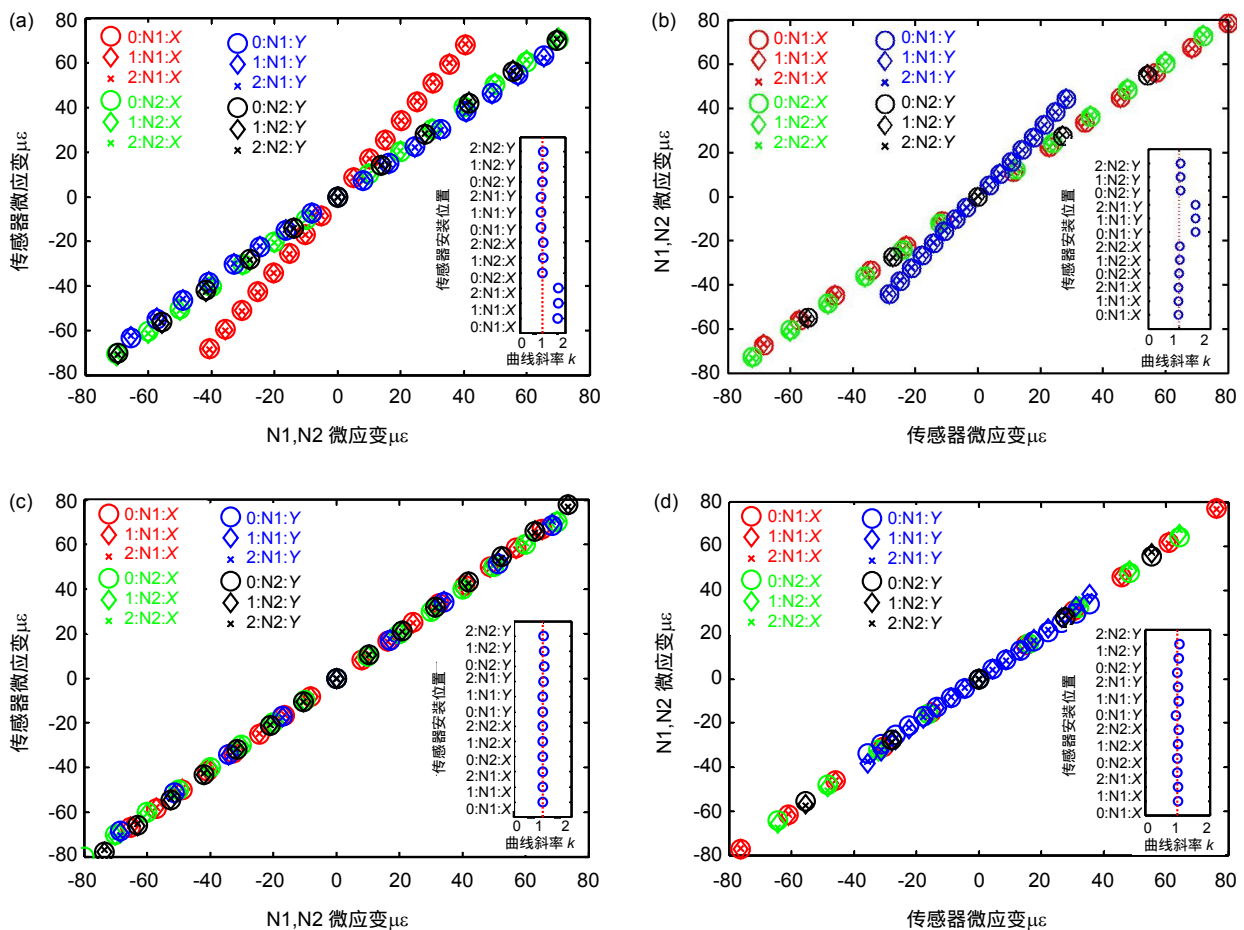


图 3 角钢梁各面夹具安装不同位置 N1、N2 的应变响应。(a) 1 面；(b) 2 面；(c) 3 面；(d) 4 面

Fig. 3 N1, N2 strain response in different positions of the fixture installed in each side of the angle steel. (a) Surface 1; (b) Surface 2; (c) Surface 3; (d) Surface 4

的传递关系,从理论上来优化 FRP 传感器在角钢梁上的安装位置。

在角钢梁的 XOY 坐标系中,对角钢梁分别施加在 X、Y 方向上的位移 s_x 、 s_y , 得到角钢上传感器的响应 ε , 则角钢梁形变与传感器响应 ε 的关系为

$$\varepsilon = k_x \cdot s_x + k_y \cdot s_y, \quad (1)$$

其中: k_x 、 k_y 分别为传感器应变在角钢梁位移 X、Y 方向的灵敏度。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = k_x, \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = k_y。$$

通过仿真模拟可以得到 FRP 传感器的应变 ε 以及 FRP 传感器与角钢梁 X、Y 方向形变的传递关系 k_x 、 k_y , 因此要解出角钢梁的位移则需要两个方程组才可以求解。选取角钢同一形变下两个不同安装位置处的两个传感器 FRP1、FRP2 的应变响应建立方程组:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = k_{x1} \cdot s_x + k_{y1} \cdot s_y \\ \varepsilon_2 = k_{x2} \cdot s_x + k_{y2} \cdot s_y \end{cases}, \quad (2)$$

由式(2)解出传感器测量出的应变与角钢量位移对应的关系, 如式(3):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} k_{x1} & k_{y1} \\ k_{x2} & k_{y2} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{k_{x1} \cdot k_{y2} - k_{x2} \cdot k_{y1}} \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} k_{y2} & -k_{y1} \\ -k_{x2} & k_{x1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix}。 \end{aligned} \quad (3)$$

因此, 只要得到安装在不同位置处的两个 FRP 传感器的响应值 ε_1 、 ε_2 , 带入式(3)中就可以得到角钢的形变大小和方向了。

在实际测量中, 传感器由于受到外界环境以及实验仪器等影响会产生误差 δ , 根据式(3)分析计算得到的位移误差 Δs_x 、 Δs_y 的大小:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} s_x + \Delta s_x \\ s_y + \Delta s_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{k_{x1} \cdot k_{y2} - k_{x2} \cdot k_{y1}} \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} k_{y2} & -k_{y1} \\ -k_{x2} & k_{x1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 + \delta \\ \varepsilon_2 + \delta \end{bmatrix}。 \end{aligned} \quad (4)$$

令 $A = \frac{1}{k_{x1} \cdot k_{y2} - k_{x2} \cdot k_{y1}}$; 展开式(4)得:

$$\begin{cases} s_x = A \cdot (k_{y2} \cdot \varepsilon_1 - k_{y1} \cdot \varepsilon_2) \\ \Delta s_x = A \cdot \delta \cdot (k_{y2} - k_{y1}) \\ s_y = A \cdot (-k_{x2} \cdot \varepsilon_1 + k_{x1} \cdot \varepsilon_2) \\ \Delta s_y = A \cdot \delta \cdot (-k_{x2} + k_{x1}) \end{cases}。 \quad (5)$$

据式(5)可得, Δs_x 、 Δs_y 为位移计算的位移误差,

与传感器的安装位置的灵敏度和误差大小 δ 有关。

因此, 根据以上结论可以得到: 只需要知道安装在不同位置处的两个传感器与角钢梁位移的响应关系, 就能够建立起传感器响应计算角钢位移的矩阵表达, 得到角钢梁一端位移的大小和方向。再由式(3)~式(5)建立矩阵分析角钢梁位移计算的误差大小, 最后选择响应灵敏度最高、相对误差最小的安装位置安装传感器, 对传感器安装位置实现优化。

角钢模型以及各面安装位置示意图如图 2 所示。通过各个面上传感器安装位置的仿真模拟计算, 得到传感器的响应和角钢施加位移的关系如图 4 所示, 据式(1)得到在各个方向下各个位置上 FRP 传感器响应与角钢梁施加位移的斜率关系就代表着传感器的灵敏度, 如表 1 所示。对灵敏度分析可知, 各个面上传感器安装在 0 位置处的灵敏度都要小于其他位置处的灵敏度, 且 2 位置处的灵敏度最大, 灵敏度在位置上的差异可以从角钢梁的 L 型结构得到解释。

仿真结果得到传感器与角钢位移的灵敏度关系, 因此将两个传感器同时安装在不同面上同一个安装位置 0、1、2 位置处进行误差分析。由于传感器的信号受实验仪器本身误差的影响和实验环境的干扰, 会产生 ± 5 微应变左右的误差, 根据式(3)~式(5)对传感器的响应施加误差, 分析计算得到的角钢梁位移值与理论值的变化率的大小来判断同一个误差下不同安装位置的优劣。以每个安装位置计算得到的角钢梁的位移值的变化率为纵坐标, 以角钢梁位移为横坐标分析, 如图 5 所示。

从图 5 整体分析得到的位移相对误差最小的安装位置。在同一个安装位置下角钢梁的施加位移越大, 最后得到的位移误差就越小; 从安装位置 0、1、2 来分析, 在各个安装面上传感器安装在 2 位置得到的位移相对误差最小, 0 位置处的位移相对误差最大。因此结合以上分析, 传感器安装方案可以选择安装在 2 位置的任意两个面上, 或者是安装在 3、4 面上的任意两个位置, 这样在同一个误差下得到的位移误差最小。

根据传感器安装位置的要求: 高灵敏度、小误差, 结合灵敏度分析结果和位移误差分析结果得到, 满足要求的安装位置为任意面上 2 位置以及 3、4 面上的 0、1、2 安装位置。

3.3 角钢梁应传递关系实验分析

基于角钢梁上夹具安装位置的理论分析结果, 夹具安装在 3、4 面对角钢梁表面应变没有影响, 且传感

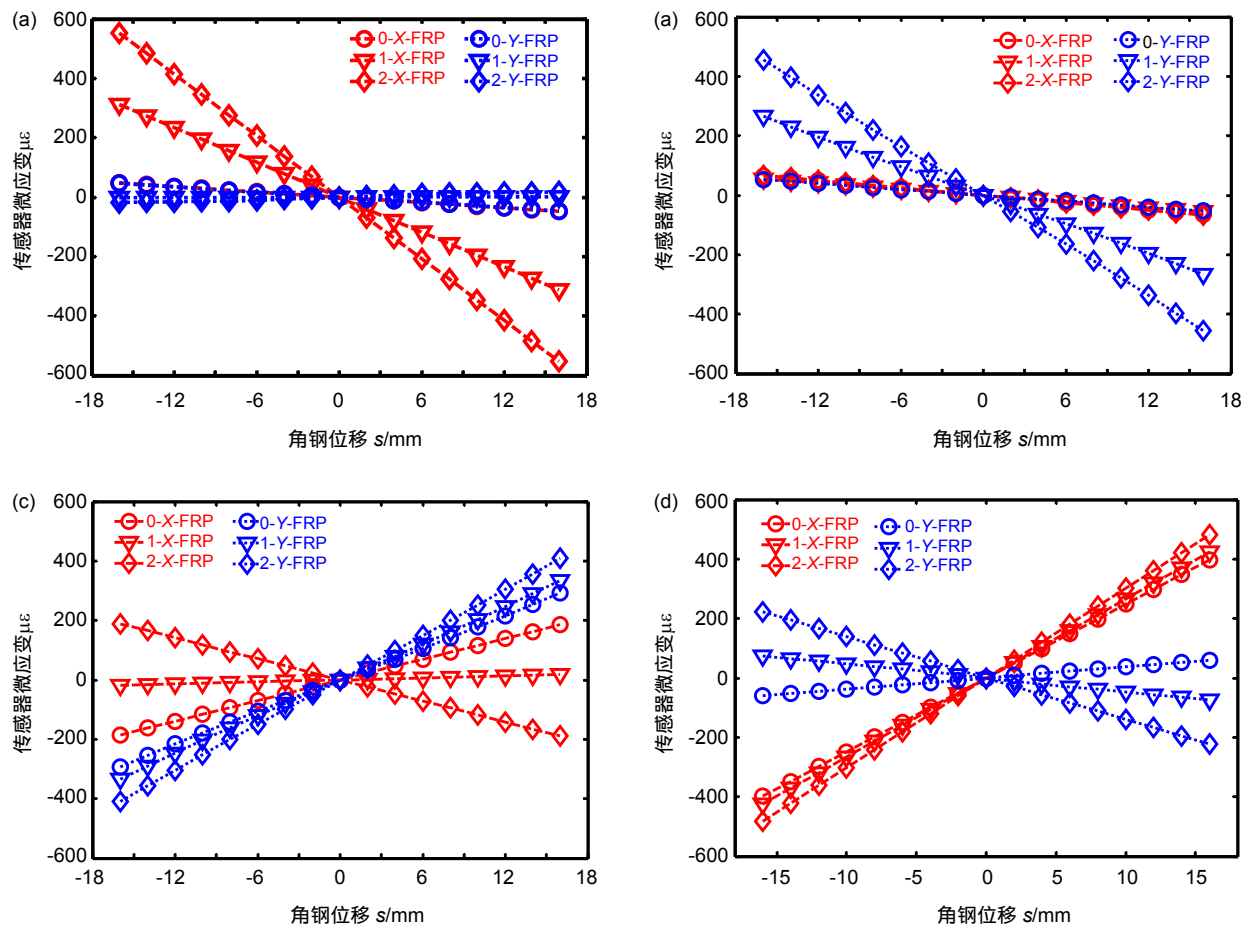


图 4 各面上传感器的响应与角钢位移关系。(a) 1 面安装; (b) 2 面安装; (c) 3 面安装; (d) 4 面安装
Fig. 4 The response of the sensors on each side is related to the displacement of the angle steel. Installation on (a) surface 1, (b) surface 2, (c) surface 3 and (d) surface 4

表 1 传感器在各面及各位置处 X, Y 方向的灵敏度

Table 1 The sensor responds on all sides to the angular displacement (με/mm)

Position	Surface 1		Surface 2		Surface 3		Surface 4	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0	-2.966	-2.865	-4.083	-3.275	11.584	18.012	24.835	3.687
1	-19.487	0.120	-3.464	-16.356	1.137	20.574	26.539	-4.704
2	-34.545	1.271	-4.239	-28.142	-11.831	25.402	30.166	-13.951

器安装在 3、4 面得到的传感器的响应灵敏度大、计算得到的位移误差较小,因此选择在 3 面安装设计的 L 型夹具进行传感器响应实验。夹具和传感器安装如图 6 所示,实验结果如图 7 所示,对各点做拟合得到 FRP 传感器灵敏度如表 2。

从图 7 分析,FRP 传感器安装在 3 面的仿真和实验结果具有一致性,传感器在各个位置上与角钢位移的关系基本一致,结合仿真实验结果详细分析传感器在每个位置上的灵敏度,在 0、2 位置上传感器在两个方向的灵敏度较大,但是安装在角钢上的传感器既要

能传感出角钢的位移大小,还要能够分辨出角钢梁的位移方向,而 2 位置处传感器在两个方向上的灵敏度呈现相反的关系,因此分析得到选择 2 位置安装传感器可以达到检测要求,实现对角钢梁的实时健康监测。

但传感器与角钢梁位移的灵敏度关系有着一些差异,如表 2。实验灵敏度普遍要小于仿真灵敏度,分析其原因是仿真模拟的角钢梁模型与实际角钢梁结构不完全一样,实际角钢梁的材料特性不均匀,以及结构并

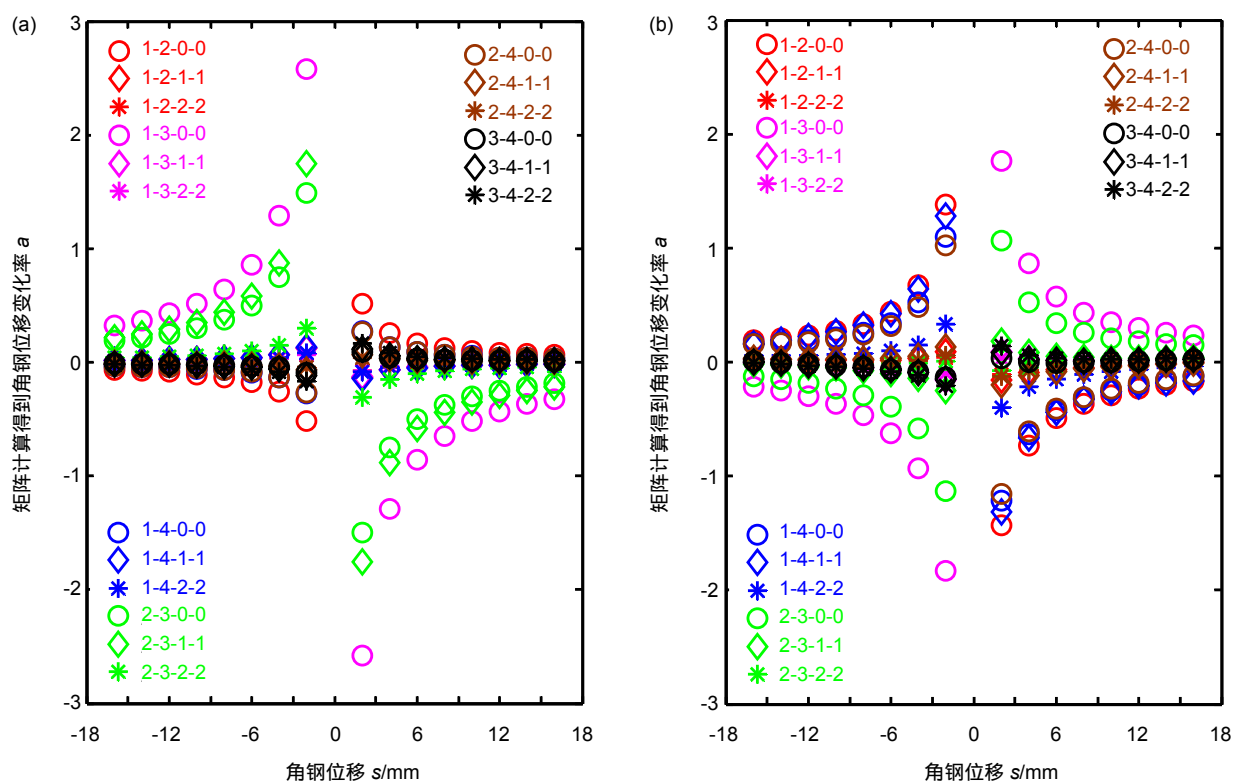


图 5 各面上传感器响应与位移关系。(a) X 方向位移下 x 的误差; (b) Y 方向位移下 y 的误差

Fig. 5 Sensor response and displacement on each surface. (a) The error of x under the direction of X displacement; (b) The error of y under the direction of Y displacement

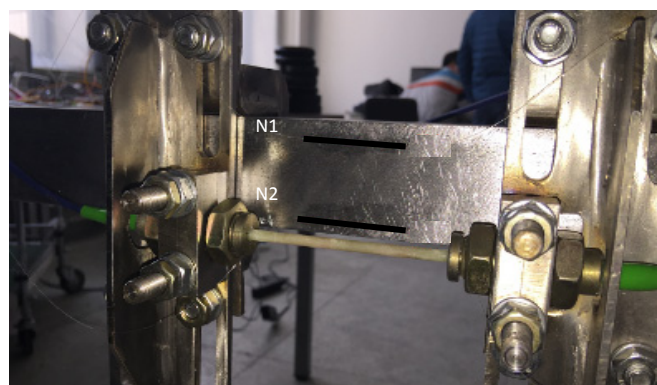


图 6 3 面上的 L 型夹具安装示意图

Fig. 6 The L-type fixture installation diagram on the surface 3

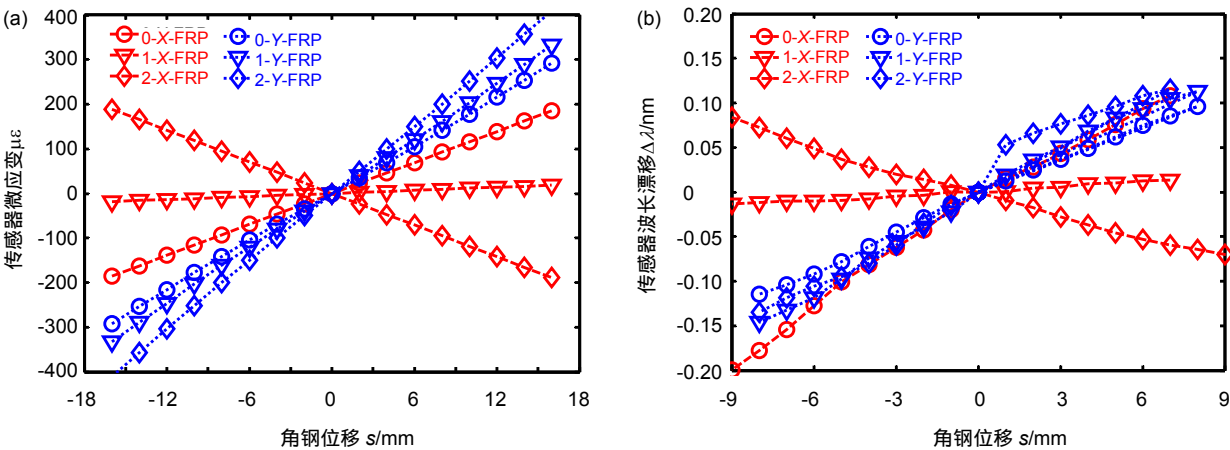


图 7 3 面上传感器的响应。(a) 仿真; (b) 实验
Fig. 7 Sensor response on the surface 3. (a) Simulation; (b) Experiment

表 2 3 面上传感器的灵敏度
Table 2 Sensitivity of the sensor on the surface 3 ($\mu\epsilon/\text{mm}$)

Position	Simulation		Experiment	
	X	Y	X	Y
0	11.584	18.012	15.741	11.191
1	1.137	20.574	1.425	14.149
2	-11.831	25.402	-7.341	15.229

不像模型一样各处理想，导致角钢在指定位移下的变形不完全一致，但仿真实验结果基本满足一致性。

4 结 论

为了实现对角钢梁结构的长期位移监测，本文从传感器的封装和安装两方面对光纤光栅传感器的运用进行了研究。通过对光纤光栅采用 FRP 材料进行封装，保证了光纤传感器在实际恶劣条件下能够保持良好的应力应变传递关系，保持较好的稳定性；通过仿真模拟得到夹具以及传感器的安装对角钢梁的应变不会产生影响，并得到了 FRP 光栅传感器的在不同安装位置上与角钢梁位移的灵敏度关系，从理论上分析得到了两个安装在不同位置的 FRP 传感器来实现在角钢位移大小和方向的监测的安装方案，分析了不同安装位置的误差大小，得到传感器位置布置在任意两个面上的 2 位置或者是 3、4 面上的任意 0、1、2 位置均能够得到较小的位移误差和较高的灵敏度；同时通过在 3 面进行传感器安装响应实验，实验结果和仿真结果具有较好的一致性，并得到 3 面最优的安装位置为 2 位置，

具有高灵敏度且能够分辨出角钢变形形式，能够实现感知角钢梁变形位移方向的同时保持较高灵敏度的实时监控。本文基于 FRP 封装光纤光栅传感器实现在角钢梁位移的大小方向的实时监控，为角钢梁构成的大型钢架结构如输电塔、桥梁、吊车、钻井平台的整体结构健康监测提供了基础研究。

参考文献

[1] Zhang L W, Zhang H. Exploration and research on application of steel frame for bridge strengthening[J]. *Architecture Technology*, 2010, **41**(09): 818–820.
张利伟, 张慧. 钢架用于桥梁加固的探索与研究[J]. *建筑技术*, 2010, **41**(09): 818–820.

[2] Guo Y, Shen J G, Ying J G. Stability analysis on the multiple angle members of transmission towers[J]. *Steel Construction*, 2012, **27**(1): 11–16.
郭勇, 沈建国, 应建国. 输电塔组合角钢构件稳定性分析[J]. *钢结构*, 2012, **27**(1): 11–16.

[3] Roveri N, Carcaterra A, Sestieri A. Real-time monitoring of railway infrastructures using fibre Bragg grating sensors[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, **60–61**: 14–28.

[4] An L, Hu Y. FE simulation and analysis of ship frames vertical-bending in cold-bending processing[J]. *Ship & Ocean Engi-*

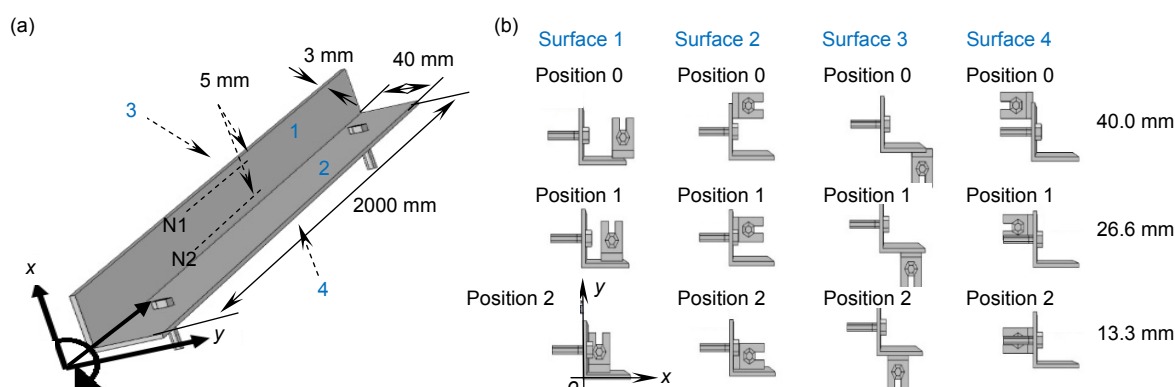
- neering, 2011, **40**(3): 40–43.
安雷, 胡勇. 船舶肋骨冷弯中旁弯的有限元模拟分析研究[J]. 航海工程, 2011, **40**(3): 40–43.
- [5] Wang N, Chen Z P, Yan L B, *et al.* Pure torsional experiment and damage analysis of angle steel truss reinforced concrete beams[J]. *Building Structure*, 2014, **44**(9): 15–21.
王妮, 陈宗平, 燕柳斌, 等. 角钢桁架型钢筋混凝土梁纯扭试验及损伤分析[J]. 建筑结构, 2014, **44**(9): 15–21.
- [6] Fan Y P, He X B, Zhang Q G, *et al.* Research and development of higt strength shipbuilding hot rolled angle steel[J]. *Henan Metallurgy*, 2010, **18**(6): 12–13, 17.
范银平, 何晓波, 张全刚, 等. 高强度热轧船用角钢的研制与开发[J]. 河南冶金, 2010, **18**(6): 12–13, 17.
- [7] Miao H Y, Xu H, Wang N, *et al.* Stress analyse of the large combined tubular reactor (1)—finite element model for stress analysis[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2003, **20**(5): 26–28, 33.
缪红燕, 徐鸿, 王楠, 等. 大型组合管式反应塔的应力分析(一)—有限元应力分析模型[J]. 压力容器, 2003, **20**(5): 26–28, 33.
- [8] Yang H, Zhou G Q. Experimental Research of JJ225/43-K Drilling Derrick Model[J]. *Oil Field Equipment*, 2011, **40**(02): 47–50.
杨慧, 周国强. JJ225/43-K 型井架模型试验研究[J]. 石油矿场机械, 2011, **40**(02): 47–50.
- [9] Zhao Q B. Power transmission tower angli iron bar critical load of compressive member[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004: 9–19.
赵庆斌. 送电铁塔单角钢受压极限承载力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004: 9–19.
- [10] Xu G Q, Xiong D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(3): 306–317.
徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, **6**(3): 306–317.
- [11] Hou J F, Pei L, Li Z X, *et al.* Development and application of optical fiber sensing technology[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, **29**(06): 7–12, 17.
杜志泉, 倪锋, 肖发新. 光纤传感技术的发展与应用[J]. 光电技术应用, 2014, **29**(06): 7–12, 17.
- [12] Zhang G H. Study on principle of surface adhesive for fiber Bragg grating sensor monitoring and its experiments[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013: 15–39.
张桂花. 表面黏贴式光纤光栅传感原理及其实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013: 15–39.
- [13] Zhan Y G, Cai H W, Geng J X, *et al.* Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristics of FBG sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 952–955.
詹亚歌, 蔡海文, 耿建新, 等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(8): 952–955.
- [14] Gan W, Wang H Q, Xie C, *et al.* Steel capillary packaging technique for fiber Bragg grating sensor[J]. *Optical Instruments*, 2016, **38**(6): 544–548.
甘望, 王华强, 谢忱, 等. 光纤光栅管式封装工艺研究[J]. 光学仪器, 2016, **38**(6): 544–548.
- [15] Ye L P, Feng P. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, **39**(3): 24–36.
叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(3): 24–36.
- [16] Wang Y L, Zhou Z, Hao Q D, *et al.* Research on fabrication technique and sensing properties of smart FRP-FBG composite laminates[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2007, **18**(8): 900–902.
王言磊, 周智, 郝庆多, 等. FRP-FBG 智能复合板的制作及其传感器特性研究[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(8): 900–902.
- [17] Zhang Z C, Wang C, Zhou Z, *et al.* FBG monitoring results analysis for fabrication processing of FRP bars[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2005, **35**(S1): 23–26.
张志春, 王川, 周智, 等. FRP 筋拉挤成型工艺过程的光纤光栅监测与结果分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, **35**(S1): 23–26.
- [18] Pramanik A, Basak A K, Dong Y, *et al.* Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – a review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, **101**: 1–29.

Study on fiber Bragg grating displacement sensor with angle steel structure

Xie Kai^{1,2}, Tan Tao^{1,2}, Mu Boxin², Duan Chao², Li Zhuoshu², Meng Yichen², Lv Zhongbin^{1,2}, Wei Jianlin^{1,2}, Tian Ye², Chai Quan², Liu Yanlei², Zhang Jianzhong^{2*}, Yang Jun², Yuan Libo²

¹Lab of Transmission Line Galloping Prevention Technique,
State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou, Henan 450000, China;

²Key Lab of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China,
Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China



(a) Angle steel diagram; (b) Installation of various fixtures

Overview: In this paper, two fiber reinforced polymer/plastic (FRP) encapsulated fiber Bragg grating (FBG) sensors are installed on the two sides of the angle steel beam, which are used to measure the displacement and direction of the diagonal steel beam, so as to realize the health inspection of the angle steel structure. Compared with the traditional angle sensors, fiber Bragg grating is chosen as the sensor in this paper for its excellent characteristics of small volume, light weight, anti-electromagnetic interference, good electrical insulation and stable performance in harsh environment. The FBG is protected by FRP encapsulation to ensure that the sensor can work steadily in the severe working environment of the angle steel. Besides, according to the shape of the angle steel beam, the sensor installation fixture is designed to facilitate changing the installation position of the sensor on the angle steel beam. The influence of the installation of the sensor and the sensor fixture on the angle steel beam is analyzed by the finite element method. It is found that the fixture installation has no effect on the strain distribution on the surface of the angle steel beam. Based on these, the transfer relationship between sensor strain and displacement of angle beam are carefully analyzed on the different sensor installation positions of the angle beam. The sensitivity and errors of sensor are analyzed at each side of position 0, 1, 2 and gets the result that the sensor can achieve maximum sensitivity and minimum errors when being installed at position 2 on any surfaces or at any installation positions on surface 3 or 4. Finally, sensor mounted on surface 3 is chosen for experimental verification. The experimental results are in agreement with the simulation results. At the same time, it can be seen that the displacement and direction of the diagonal steel beams can be measured by the sensor installed at the position 2 on the surface 3. In this paper, optimization design of the installation positions of the FRP fiber Bragg grating sensor on the different surfaces of the angle steel beam are discussed and the experimental verification is carried out the experimental. To achieve the health monitoring by using optical fiber sensors on the structures composed by angle steel, such as bridges, electric towers and cranes, and so on, a basic research is provided.

Citation: Xie K, Tan T, Mu B X, *et al.* Study on fiber Bragg grating displacement sensor with angle steel structure[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 180106

Supported by State Grid Project (52170215000R), National Natural Science Foundation of China (61377096, 61775045, 61605030), and 111 Project (B13015)

* E-mail: zhangjianzhong@hrbeu.edu.cn