

基于FBG阵列的智能碳纤维传感模块设计

周 玮, 张小燕, 智艳飞

(北京工业职业技术学院, 北京 100043)

摘要:为实现碳纤维复合材料(CFRP)模块在保持其强度特性的同时,具备对外部应力大小与位置的识别能力,设计了一种基于光纤布喇格光栅(FBG)阵列的智能CFRP模块。该模块将8个FBG传感器按碳纤维堆叠方向预埋于CFRP中,形成直径为50 mm的环形结构,并搭建了包含宽带光源、光耦合器与解调仪的感知系统,通过FBG波长偏移反演应力位置与大小。实验结果表明:FBG正上方响应灵敏度最高,达2.37 pm/N,轴向与垂向灵敏度随距离增加而递减,所有应力测试线性度均高于0.97;25个测试点的FBG响应组合具有唯一性,验证了模块在10 mm空间分辨率下实现二维位置识别的可行性。

关键词:碳纤维复合材料;光纤布喇格光栅阵列;智能模块;二维位置感知;识别算法

中图分类号:TU502;TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0074-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.014

Design of intelligent carbon fiber sensing module based on FBG array

ZHOU Wei, ZHANG Xiaoyan, ZHI Yanfei

(Beijing Polytechnic College, Beijing 100043, China)

Abstract: To enable carbon fiber composite (CFRP) modules to identify the magnitude and location of external stress while maintaining their strength characteristics, an intelligent CFRP module based on a fiber Bragg grating (FBG) array is designed. This module embeds eight FBG sensors in the CFRP along the carbon fiber stacking direction, forming a ring structure with a diameter of 50 mm. A sensing system comprising a broadband light source, an optical coupler, and a demodulator is established to deduce the stress location and magnitude from the FBG wavelength shifts. Experimental results indicate that the highest response sensitivity, reaching 2.37 pm/N, occurs directly above the FBG, with axial and vertical sensitivities decreasing as distance increases. All stress tests exhibited a linearity above 0.97. The combination of FBG responses across 25 test points is unique, verifying the feasibility of the module for two-dimensional position identification with a spatial resolution of 10 mm.

Key words: carbon fiber reinforced polymer, fiber Bragg grating array, intelligent module, two dimensional position perception, recognition algorithm

0 引言

碳纤维复合材料(CFRP)^[1]因具有高强度、抗疲劳、

收稿日期:2024-12-26。

基金项目:国家重点研发计划子课题(2022YFC3701904)资助;北京市教育科学“十四五”规划项目(CDDB23232)资助;北京工业职业技术学院重点课题(BGY2024 KY-27Z)资助;北京市职业教育改革项目(CG2022006; CG2022003)资助。

作者简介:周玮(1990—),女,江西吉安人,硕士,讲师,主要研究方向是无机非金属材料、碳材料及其复合光纤传感材料、新能源储能材料、纳米材料光电性能等领域。近几年主持和参与省部级及校内课题12项,发表SCI论文1篇,申请国家发明专利1项。



耐腐蚀及轻质等优异特性,在军事与工业领域^[2]得到了广泛应用。随着结构健康监测需求的不断提升,开发监测精度更高、适应性更广的智能CFRP模块成为当前研究的热点。

在现有研究中,智能CFRP模块主要采用压电传感器与光纤传感器2类技术路线。在压电传感方面,FENG Q等人^[3]将压电陶瓷传感器集成于CFRP中,提升了混凝土结构的承载能力;WEBER I等人^[4]利用电阻法监测CFRP板的弯曲损伤;GOLDFELD Y等人^[5]与HAN C等人^[6]分别从增强效应与导电方向角度对CFRP性能进行了探索。尽管压电陶瓷传感器具备成本低、集成度高的优点,但其易受腐蚀与电磁干扰的特性限

制了其在复杂环境中的应用。相比之下, 光纤布喇格光栅(FBG)传感器以其抗腐蚀、抗电磁干扰以及质量轻等特点, 更适于构建高可靠性的智能CFRP感知模块。例如, BASTIANINI F等人^[7]将光纤传感器固化于CFRP中用于建筑加固; LI S Z等人^[8]与TANG Y S等人^[9]分别通过长标距结构与新型光纤筋设计提升了应变监测范围与精度; 国内学者王珍珍^[10]、覃荷瑛^[11]、邓朗妮^[12]、刘元凤^[13]和刘智超等人^[14-15]也围绕FBG在CFRP中的嵌入方式、结构优化与动态感知等方面开展了系统研究, 显著提高了其实时监测与动态识别能力。

尽管上述研究在CFRP与光纤传感结合方面取得了积极进展, 但目前相关成果多集中于线状或板状结构, 针对具有多状态同步感知能力的智能CFRP模块的定量识别研究仍较为缺乏。为此, 本文提出一种基于FBG阵列的智能CFRP模块设计。

1 智能CFRP模块设计

1.1 结构设计

CFRP模块是由碳纤维材料沿纤维轴向方向堆叠形成的。为增强其各向应力强度, 通常采用多层结构。本模块根据纤维堆叠方向铺设FBG, 使其具备二维感知能力。模块尺寸为100 mm(长)×100 mm(宽)×50 mm(高), 模块中的FBG分布位置如图1所示。

传统CFRP模块通过预埋压电传感器或沿某一轴向的FBG传感器, 虽可获取CFRP的应力变化, 但由于纤维方向性, 导致应力响应精度不一致, 难以量化分

析模块整体应力场分布特性。本模块在纤维堆叠过程中, 沿碳纤维纹理方向预埋FBG传感器, 每个方向布置2个FBG传感器, 相距50 mm, 中心点位于模块正中心。经过4次堆叠, 共计预埋8个FBG传感器, 在CFRP模块中形成直径为50 mm的圆形结构。相连的光纤结构一并埋入模块中, 预留2个LC(Lucent Connector)接口, 分别为输入和输出接口。

1.2 理论分析

智能CFRP模块中, FBG传感器的回波中心波长 λ_B 为

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

其中, n 为FBG的折射率, Λ 为FBG的栅距。FBG受温度和应变的影响都会产生波长偏移, 其波长偏移量 $\Delta\lambda_B$ 与温度变化量 ΔT 和应变变化量 $\Delta\varepsilon$ 之间的函数关系为

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda[(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon] \quad (2)$$

其中, α 为FBG的热膨胀系数, ξ 为FBG的热光系数, P_e 为FBG的弹光系数。当温度对FBG的影响可以采用温度补偿消除时, 则式(2)简化为

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{1 - P_e} \left(\frac{\Delta\lambda_B}{2n\Lambda} + C_T \right) \quad (3)$$

任意物体撞击智能CFRP模块时均分为2种情况: 1) 应力位置位于FBG组成的圆形区域内; 2) 应力位置位于FBG组成的圆形区域外。由于FBG传感器呈对称分布, 若能表征第一象限内任意位置的应力场响应, 即可认为该模块任意位置的应力场均可识别。因此, 推导应力点P和Q的函数表达, 即可作为模块任意位置应力响应的函数模型。设模块正中心是坐标原点(0,0), 则P点坐标为 (x_P, y_P) , Q点坐标为 (x_Q, y_Q) 。由于FBG传感器主要对其轴向应力敏感, 故对于P点而言, 在对应FBG轴向方向的应力分量分别可表示为

$$\begin{cases} F_{\text{axial}}|_{\text{FBG}_3} = F_{\text{FBG}_3} \cos \theta \\ F_{\text{axial}}|_{\text{FBG}_6} = F_{\text{FBG}_6} \cos \phi \end{cases} \quad (4)$$

其中, θ 和 ϕ 分别表示FBG₃和FBG₆中心点在其对应FBG轴向的方向的角度。根据P点坐标和FBG₃、FBG₆的坐标, 利用三角关系可知

$$\begin{cases} \theta = \frac{\pi}{4} - \arctan \frac{x_P - x_{\text{FBG}_3}}{y_P - y_{\text{FBG}_3}} \\ \phi = \arccos \frac{x_P - x_{\text{FBG}_6}}{y_P - y_{\text{FBG}_6}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $(x_{\text{FBG}_3}, y_{\text{FBG}_3})$ 和 $(x_{\text{FBG}_6}, y_{\text{FBG}_6})$ 分别是FBG₃和FBG₆的坐标, 模块固定以后为已知量。而应力 F_{FBG_3} 和 F_{FBG_6} 产

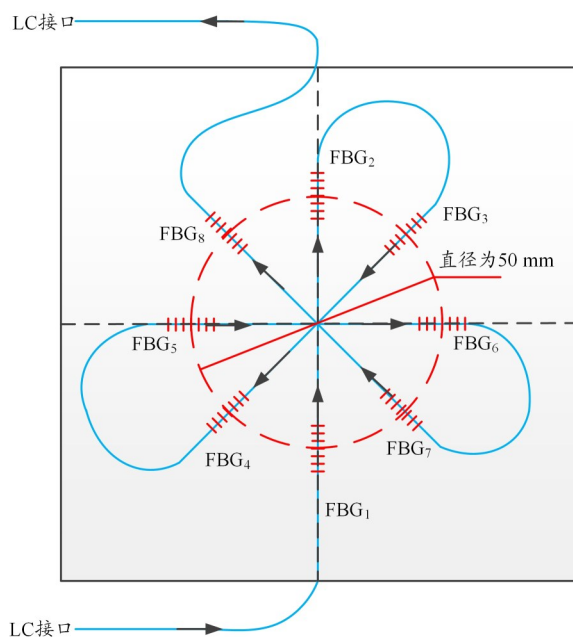


图1 基于FBG阵列的智能CFRP模块

周玮, 张小燕, 智艳飞: 基于FBG阵列的智能碳纤维传感模块设计

生的形变分别是 $\Delta\varepsilon_{\text{FBG}_3}$ 和 $\Delta\varepsilon_{\text{FBG}_6}$, 根据胡克定律, $F = k\Delta\varepsilon$, k 为应变系数, 则将式(3)代入式(4), 有

$$\begin{cases} F_{\text{axial}}|_{\text{FBG}_3} = k\Delta\varepsilon_{\text{FBG}_3} \cos \theta = \\ \quad \frac{k}{1 - P_e} \left(\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG}_3}}{2n\Lambda} + C_T \right) \cos \theta \\ F_{\text{axial}}|_{\text{FBG}_6} = k\Delta\varepsilon_{\text{FBG}_6} \cos \phi = \\ \quad \frac{k}{1 - P_e} \left(\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG}_6}}{2n\Lambda} + C_T \right) \cos \phi \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知, 除了 θ 和 ϕ , 等式右侧仅包含常数系数及可由解调仪测得的波长偏移量。而等式左侧对应FBG位置上的轴向应力可通过标准应力标定获得。结合FBG₃和FBG₆可判断应力点位于第一象限的限定条件, 该二元方程可唯一确定P点的坐标 (x_P , y_P)。对于Q点, 可采用相同方法进行分析。

2 基于智能CFRP模块的感知系统搭建

在智能CFRP模块结构定型后, 本文搭建了面向模块的数据采集与处理系统。系统采用1 535~1 565 nm的宽带光源, 以光纤作为通信媒介。光源发出的光经过光隔离器后进入1×2光耦合器, 其中一路输出连接至智能CFRP模块, 另一路则接收由模块反射的回波信号, 并将其导入解调仪进行解调。系统整体结构如图2所示。系统中, 宽带光源的带宽为30 nm, 可同时为多个智能CFRP模块提供光源信号。光隔离器用于保证光信号的单向传输。1×2光耦合器通过LC接口实现CFRP模块与解调仪之间的连接。解调仪采用四通道设计, 其中一路接入用于温度补偿的FBG传感器, 以计算温漂引起的误差。最终, 计算机基于FBG阵列的应力反演算法, 完成对CFRP模块应力场的分析。

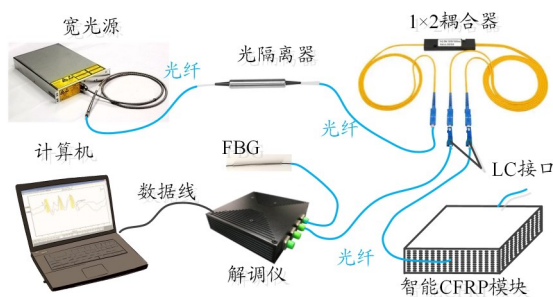


图2 基于智能CFRP模块的感知系统

3 仿真分析

为验证当应力作用于CFRP模块不同位置时, 各

FBG的响应能够反演出应力点的位置与大小, 本文对模块进行了仿真分析。模块材料选用碳纤维, 密度为2.14 g/cm³, 杨氏模量为210 GPa, 泊松比为0.267。分别在模块中心点、y轴(与x轴效果对称)、P点(FBG圆形环外)和Q点(FBG圆形环内)4个位置施加1 000 N应力进行测试, 仿真结果如图3所示。

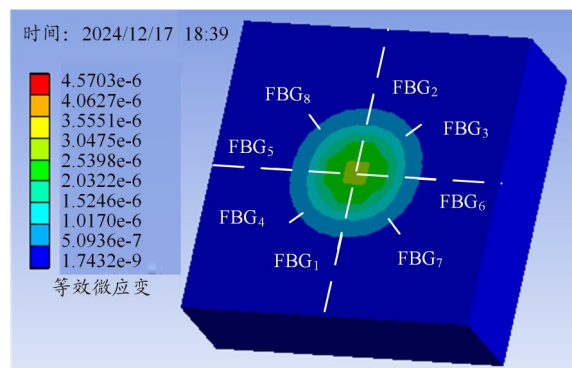
从图3(a)可以看出, 当应力作用于模块中心时, 8个FBG均产生响应信号, 且数值相近, 应力分布区域对应的等效微应变约为 1.1×10^{-6} 。

从图3(b)可以看出, 当应力作用于y轴时, FBG₂响应最强, 等效微应变约为 3.4×10^{-6} , 同时FBG₃和FBG₈也出现一定波长偏移, 其余FBG则无响应信号。

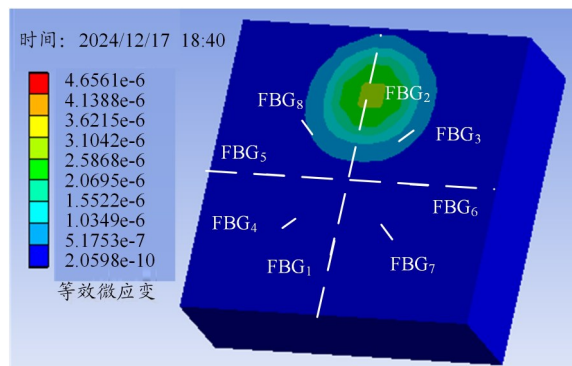
从图3(c)可以看出, P点应力场使FBG₈响应最大, 等效微应变约为 1.8×10^{-6} , 且由于该点更靠近FBG₂, 其等效应变强于FBG₅。

从图3(d)可以看出, Q点应力场同样使FBG₈响应最大, 等效微应变约为 2.7×10^{-6} , 同时FBG₂、FBG₅、FBG₃和FBG₄均有响应, 其中FBG₃和FBG₄响应较小。

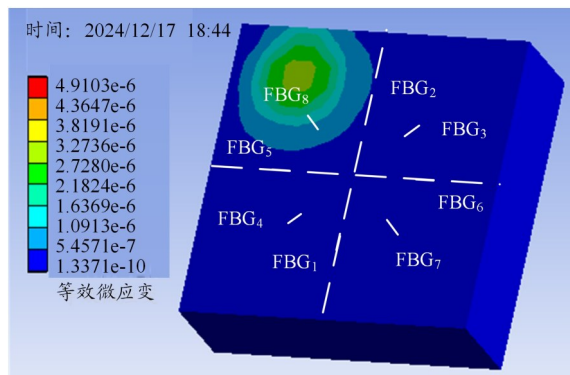
由此可见, 应力施加的具体位置可根据不同FBG的编号及其响应强度进行反演, 从而解算出应力点位置。在应力大小已知标定的条件下, 不仅能反演应力



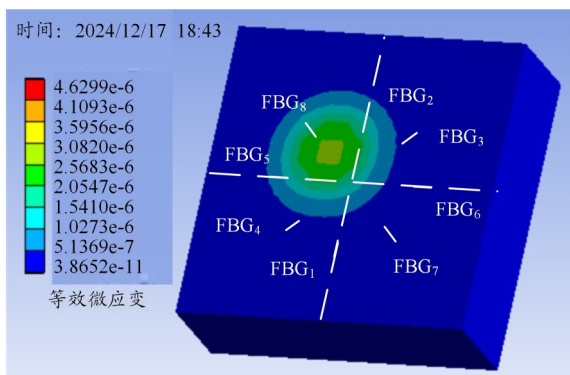
(a) 模块中心点



(b) y轴上



(c) P点位置



(d) Q点位置

图3 应力位置不同时智能CFRP模块上的应力场分布

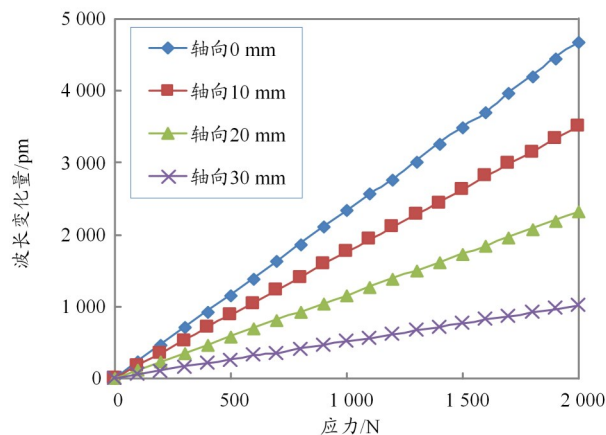
点位置,还可计算其应力值,实现CFRP模块的智能化二维感知。

4 CFRP模块感知实验

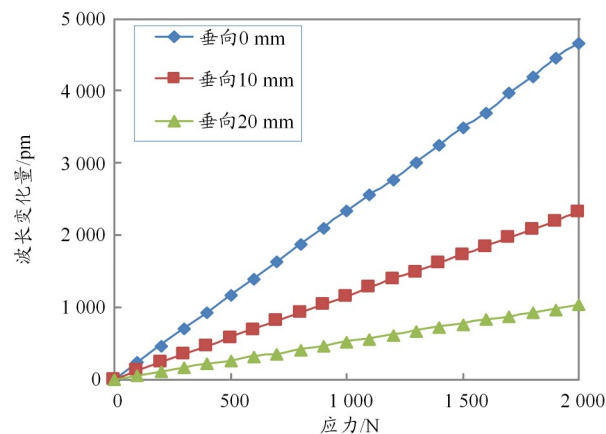
实验采用的自制智能CFRP模块尺寸为100 mm(长)×100 mm(宽)×50 mm(高),并按图1所示顺序预埋8个FBG传感器,每个FBG传感器的带宽约为2.0 nm。宽带光源选用INNOALL公司的ASE-FL7010型C波段光源,波长范围为1 530~1 560 nm,输出功率大于16 dBm。解调部分采用通为公司TV1600型光纤光栅解调仪。

4.1 位置响应度标定测试

为量化应力点与FBG之间的位置响应关系,本文采用标准应力分别施加在FBG传感器轴向0、10、20、30 mm位置,以及垂向0、10、20 mm位置。当轴向超过30 mm、垂向超过20 mm时,FBG响应过小,可忽略不计。由此获得FBG的感知范围及其对不同距离应力的响应度,该响应度可用于根据FBG测试值反演未知应力点的坐标与大小。测试结果如图4所示。



(a) 轴向的位置响应度



(b) 垂向的位置响应度

图4 应力在距FBG不同位置的响应曲线

从图4(a)可以看出,在0 mm位置处,FBG响应效果最佳,应力在0~1 000 N内变化时,经计算得出波长偏移量的线性度为0.99,灵敏度均值为2.37 pm/N;在10 mm位置处,波长偏移量的线性度为0.98,灵敏度均值为1.75 pm/N;在20 mm处灵敏度均值为1.14 pm/N;在30 mm处灵敏度均值为0.51 pm/N。测试结果表明,该CFRP模块中任意位置在10 mm间隔下均可识别。任意2个FBG间距为50 mm,而轴向最远识别距离为30 mm,两侧共计60 mm,可实现区域内响应全覆盖。

从图4(b)可以看出,0 mm位置处响应与轴向一致。在10 mm位置处,经计算得出波长偏移量的线性度为0.97,灵敏度均值为1.09 pm/N;在20 mm处灵敏度均值为0.47 pm/N;在30 mm处及以上位置几乎无响应,因此不作为判别依据。在位置解算过程中,以响应最大的FBG轴向位置为依据反演应力点位置,从而提高模块应力位置识别精度。对比图4(a)与图4(b),仅0 mm位置响应一致;随着轴向和垂向距离变化,相

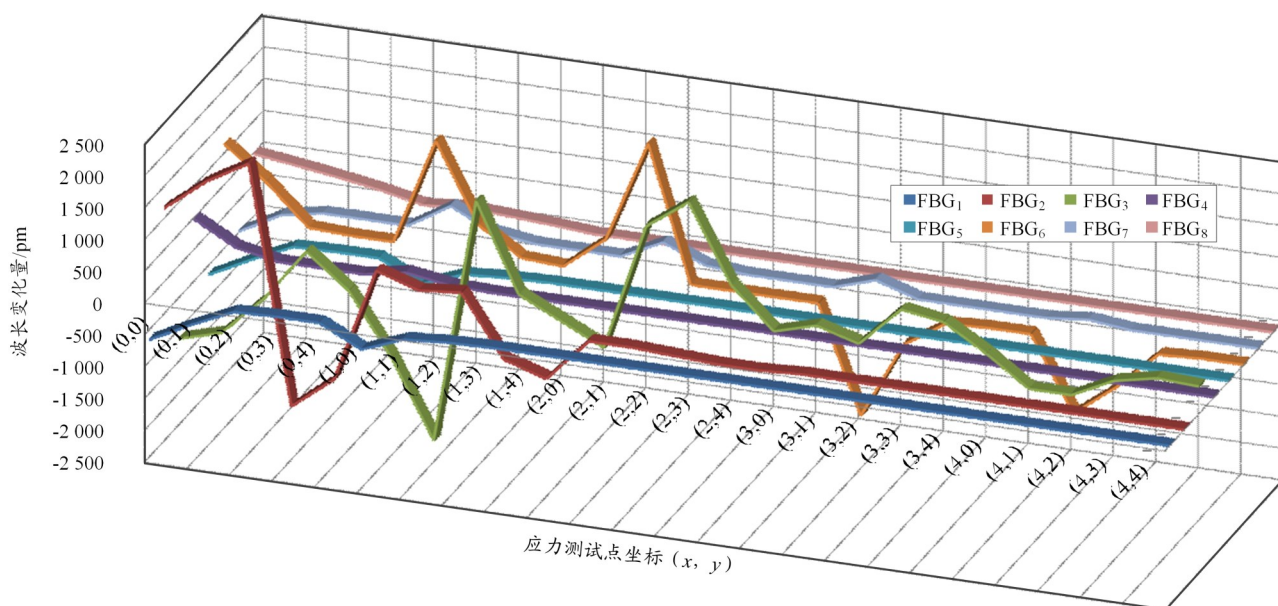


图5 8个FBG在第一象限中25个测试点上的响应分布

同应力下波长变化斜率差异明显,但线性度相近,这也是二维位置可被响应度表征的依据。

各位置响应度标定结果表明:对于单个FBG而言,应力在其轴向和垂向的作用强度可被量化,且符合线性关系;FBG对轴向应力敏感度高,其中心位置两侧 ± 30 mm为有效感知区域。因此,8个FBG的位置可覆盖整个智能CFRP模块,且在不同位置各FBG响应具有唯一性。

4.2 多FBG组合的二维位置识别测试

为直观比较智能CFRP模块的二维识别能力,本文选取模块上具有一般表征性的任意2个点进行载荷递增测试。以第一象限为例,该象限被划分为25个空间位置,分别为(0,0)、(1 mm,0)、 $\cdots$ 、(4 mm,0)、 $\cdots$ 、(4 mm,4 mm),共25个点。采用1 000 N标准应力依次对各点进行25次测试,得到8个FBG的测试数据分布如图5所示。

在25次测试中,每次对一个位置施加1 000 N标准应力,获取8个FBG的波长偏移。响应强度最大值出现在(1 mm,1 mm)和(2 mm,2 mm)位置,分别为-2 165、2 162 pm。从图5可以看出,任意2个位置之间至少有2个FBG的响应强度存在显著差异。因此,可根据8个FBG的响应值反演出应力点坐标,实现二维位置识别。同时,由于4.1节已验证应力强度与波长偏移具有良好的线性关系,当应力变化时,图5中波长变化量仍符合二维位置识别的反演条件。实验结果表明,第一象限任意应力点位置均可通过FBG组合识别,其它象限情况类似,仅FBG编号不同。

5 结束语

本文设计了一种基于FBG阵列的智能CFRP模块,通过将FBG传感器以等间距环形分布方式预埋于CFRP模块中,实现了对外应力位置与大小的准确识别。仿真分析验证了FBG分布方案的合理性,实验测试量化了应力位置与FBG波长变化量之间的函数关系,并基于其良好的线性特征,提出了通过等比计算方法反演应力大小的方法。实验结果表明,所有测试位置上的FBG响应组合均具有唯一性,验证了该感知系统的可行性与有效性。

参考文献:

- [1] 侯智懿,李彦,邵洪峰,等. 高强度光纤光栅与碳纤维的复合及应变传感特性研究[J]. 半导体光电, 2020, 41(1): 85-88.
- [2] 李浩洋,陈满意,童杏林,等. 基于FBG的复合材料环形构件残余应变研究[J]. 激光技术, 2022, 46(5): 668-673.
- [3] FENG Q, OU J. Self-sensing CFRP fabric for structural strengthening and damage detection of reinforced concrete structures[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4137-1-4137-16.
- [4] WEBER I, SCHWARTZ P. Monitoring bending fatigue in carbon-fibre/epoxy composite strands: a comparison between mechanical and resistance techniques[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(6): 849-853.
- [5] GOLDFELD Y, YOSEF L. Electrical structural characterisation of smart carbonbased textile reinforced concrete beams by integrative gauge factors[J]. Strain, 2020, 56(4): e12344-1-e12344-18.
- [6] HAN C, HUANG S, SUN B, et al. Electrical resistance changes of 3D carbon fiber/epoxy woven composites under short beam shear loading along different orientations[J]. Composite Structures, 2021, 276(1): 114549-1-114549-14.

- [7] BASTIANINI F, CARGNELUTTI M. Distributed brillouin fiber optic strain monitoring applications in advanced composite materials[J]. Smart Structures and Materials, 2003. 478-485.
- [8] LI S Z, WU Z S. Development of distributed long-gage fiber optic sensing system for structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(2): 133-143.
- [9] TANG Y S, WU Z S. Distributed long-gauge optical fiber sensors based self-sensing FRP bar for concrete structure[J]. Sensors, 2016, 16(3): 286-1-286-18.
- [10] 王珍珍, 任鹏, 程鸿伟, 等. 新型加固用智能碳纤维板及感知性能试验[J]. 中国测试, 2016, 42(3): 113-117.
- [11] 覃荷瑛, 霍婷婷, 朱万旭. 螺旋倾斜复合技术对光纤布拉格光栅传感器的减敏作用[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 83-87.
- [12] 邓朗妮, 刘雁冰, 李华, 等. 基于长标距光纤光栅传感技术的智能碳纤维筋性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(7): 2815-2826.
- [13] 刘元凤, 万波莉, 陈诗, 等. 基于埋入式FBG风力发电机桨叶复合材料监测[J]. 激光杂志, 2024, 45(4): 209-215.
- [14] 刘春辉, 刘智超, 殷礼鑫. 光纤感知阵列在线滑觉测试系统[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 415-421.
- [15] LIU Z C, YANG J H, WANG J, et al. Design of modified model of intelligent assembly digital twins based on optical fiber sensor network[J]. Digital Communications and Networks, 2024, 10(5): 1542-1552.