

激光与光电子学进展

利用 FBG 传感器监测拉索断丝信号的实验研究

余文成^{1,2,3}, 骆小勇^{1,2,3}, 覃荷瑛^{1,2,3*}¹桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;²桂林理工大学有色金属矿产勘查与资源高效利用协同创新中心, 广西 桂林 541004;³广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 钢绞线在复杂的工程环境中可能会出现断丝现象,为了有效识别断丝信号,制作了一种将光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器内嵌预压至钢绞线中心丝的自感知钢绞线。分析自感知钢绞线对断丝信号识别的灵敏性,探讨了拉索损伤面积和损伤位置与断丝信号强弱的关联性。以普通钢绞线损伤面积、损伤位置和传感器位置为研究变量,对由 16 束普通钢绞线和 3 束自感知钢绞线组成的拉索展开三组张拉断丝实验。实验结果表明:各自感知钢绞线能精确识别断丝信号,且断丝信号与自感知钢绞线中 FBG 的分布位置无关;各自感知钢绞线识别到断丝信号的时间基本一致,且 FBG 传感器采集的断丝信号强弱与普通钢绞线的损伤位置和程度有关。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅传感器; 断丝信号; 自感知钢绞线; 预警值

中图分类号 TP212 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212969

Experimental Study on Monitoring Cable Broken Wire Signal by FBG Sensor

Yu Wencheng^{1,2,3}, Luo Xiaoyong^{1,2,3}, Qin Heying^{1,2,3*}¹College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;²Collaborative Innovation Center for Exploration of Nonferrous Metal Deposits and Efficient Utilization of Resources, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;³Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract Wire breakage may occur in steel strands in complex engineering environments. In order to effectively identify broken wire signals, a self-sensing steel strand with fiber Bragg grating (FBG) strain sensor embedded and pre-stressed to the center wire of the steel strand is fabricated in this paper. The sensitivity of self-sensing steel strand to the identification of broken wire signals is analyzed to explore the correlation between the damage area and location of cables and the strength of broken wire signals. Taking the damage area, damage location and sensor location of ordinary steel strands as research variables, three groups of tension wire breaking tests are carried out on cables composed of 16 ordinary steel strands and 3 self-sensing steel strands. The test results show that the respective sensing strands can accurately identify the broken wire signal, and the identification of broken wire signal is independent of the distribution position of FBG measuring points in the self-sensing steel strand. The time period of the broken wire signal detected by each sensor is basically the same, and the strength of the broken wire signal collected by the FBG sensor is related to the location and degree of the common steel strand damage.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating sensor; broken wire signal; self-sensing steel strand; warning value

1 引言

拉索内部的钢绞线是索体系桥梁的主要受力承载构件,其应力分布状态是评价索体系桥梁健康状况的重要指标。索体系桥梁^[1-2]中的拉索断裂会导致部分

拉索承载力失效,带来重大安全事故和经济损失,如斜拉桥中的斜拉索断裂原因主要是热缩双壁 PE 护套破坏引起的钢材锈蚀和钢材本身的疲劳。因此,实时监测拉索内部钢绞线是否断丝非常重要。

常用于检测拉索内部断丝的技术主要有外观检查

收稿日期: 2021-11-16; 修回日期: 2021-11-30; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2022-01-05

基金项目: 广西科技计划项目(桂科 AD20159085)

通信作者: *qinheyinglex@163.com

法、磁通量检测法和索力测定法等^[3-5]。外观检查法是有经验的技术人员通过观察拉索表面有无缝隙判定拉索有无损伤,这种方法具备投资少、操作简单的优点,但耗时且无法准确识别损伤。磁通量检测法根据磁化金属(钢绞线或钢丝)中的磁通量变化判定拉索是否断丝。如辛荣亚等^[6-8]利用磁通量检测法检测拉索中钢丝纵向是否有断丝信号并确定断丝损伤程度和断丝点位置,取得了较好的结果,但该方法易受电磁干扰,且存在磁极老化等缺点。压力表索力测定法、频率索力测定法等只能测量拉索整体的大致索力,无法准确反映拉索内部钢丝的实际健康状况,存在一定的局限性。

用上述方法监测拉索健康状态时均不满足现代大跨度索类工程结构对索力内部监测的需求。光纤布拉格光栅(FBG)传感器问世以来,就被国内外学者广泛应用于桥梁工程领域^[9-12]。如:加拿大的 Beddington

Trail 大桥使用 FBG 传感器进行应力测量并长期监测桥梁结构^[13];国内的东洲湘江大桥采用 FBG 传感器进行长期健康状况监测^[14]。FBG 传感器具有体积小、重量轻、抗电磁干扰能力强以及可远程实时监测等优点,目前将 FBG 传感器应用于工程领域的相关技术已较为成熟,但利用 FBG 传感器对桥梁拉索内部断丝信号进行实时监测的研究较少。因此,本文利用 FBG 传感器监测拉索索力的方法对由 19 束钢绞线组成的拉索断丝信号进行实验研究。

2 FBG 传感器

FBG 传感器通过外界参量变化对自身中心波长的调制实现传感。由衍射原理可知,当一束光进入光栅时,只有某种特定波长的光被反射,其余波长的光则会穿过光栅继续向前传输,如图 1 所示。

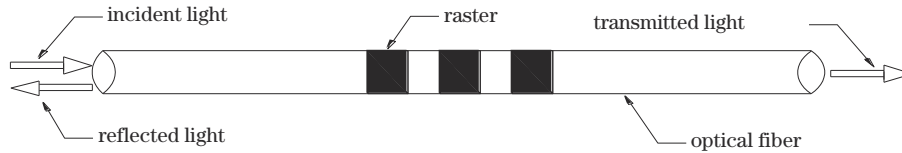


图 1 FBG 的传感原理

Fig. 1 Sensing principle of the FBG

被光栅反射的光波波峰对应的波长 λ 可表示为

$$\lambda = 2n\Lambda, \quad (1)$$

式中: n 为光纤纤芯对中心波长的有效折射率; Λ 为 FBG 的周期。利用 FBG 解调仪测得 FBG 传感器的初始波长 λ_0 , 当 FBG 传感器感知的应变 ϵ_g 发生变化时, 弹光效应会使光栅的折射率和周期发生变化, 此时利用解调仪测得 FBG 传感器的中心波长 λ_B , λ_B 与 λ_0 的差即为 FBG 的波长漂移量 $\Delta\lambda$ 。 $\Delta\lambda$ 与 ϵ_g 的关系可表示为

$$\Delta\lambda = \left\{ 1 - n^2 [P_{12} - u(P_{11} + P_{12})] / 2 \right\} \lambda_B \epsilon_g = K_e \Delta\epsilon_g, \quad (2)$$

式中: u 为泊松比; P_{11} 、 P_{12} 为光弹效应系数; K_e 为 FBG 的应变灵敏度。FBG 的应变 ϵ_g 与被监测基体(钢绞线)应变 ϵ_m 之间与应变传递率 β 关联, 即

$$\Delta\epsilon_g = \beta \Delta\epsilon_m, \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得到

$$\Delta\lambda = K_e \beta \Delta\epsilon_m = K'_e \Delta\epsilon_m, \quad (4)$$

式中, K'_e 为 FBG 监测的应变灵敏度, 可通过标定确定。监测基体的应变 ϵ_m 与索力 F 的关系可表示为

$$\Delta\epsilon_m = F / (E\Delta A), \quad (5)$$

式中: E 为被监测基体的弹性模量; ΔA 为被监测基体的横截面积变化量。将式(5)代入式(4), 得到

$$\Delta\lambda = K'_e F / (E\Delta A). \quad (6)$$

在荷载没有变化的情况下, 受力面积的变化会导致拉索的应力产生变化。因此, 将 FBG 应变传感器内嵌预压至钢绞线中心丝制成自感知钢绞线。自感知钢绞线受外荷载作用产生应变, 传递给嵌入钢绞线中心

丝的 FBG 传感器, 引起 λ_B 的变化。实验前对自感知钢绞线进行标定, 利用已知的 F 及 $\Delta\lambda$ 计算的 K'_e 和 FBG 传感器监测的 $\Delta\lambda$ 变化识别内部钢绞线是否有断丝现象。

3 拉索断丝实验研究

3.1 实验设计

用机械打散钢绞线取出中心丝, 在中心丝上设置深为 1 mm、宽为 1 mm 的凹槽, 对中心丝进行张拉, 在持荷状态下用环氧树脂将 FBG 应变传感器粘贴于凹槽内, 粘贴长度关于光栅所在位置中心对称, 且不小于 40 mm。当环氧树脂达到足够强度时, 卸载中心丝制备得到智能中心丝, 再将智能中心丝与边丝扭绞成自感知钢绞线, 如图 2 所示。

实验采用的钢绞线为 1×7 标准型, 由 1 根直径为 5.2 mm 的中心丝和 6 根直径为 5.0 mm 的边丝绕中心丝扭绞而成, 标准强度 $f_{pk} = 1860$ MPa, 极限承载力为 260.4 kN, 公称直径为 15.2 mm, 公称面积为 140 mm², 弹性模量 $E_p = 1.95 \times 10^5$ MPa。FBG 的中心波长范围为 1536~1560 nm, 裸光栅长度为 1 cm, FBG 传感器的带宽为 0.3 nm, 反射率大于等于 85%。解调仪为 HCM4CH100HZ-1 光谱仪, 采样频率为 100 Hz, 波长精度为 2.5 pm, 分辨率为 1 pm。环氧树脂的弹性模量大于 2.5 GPa。

取长为 5 m 的普通低松弛预应力钢绞线(1×7 标准型) 57 束, 共分三组实验, 每组由 19 束钢绞线组成, 如

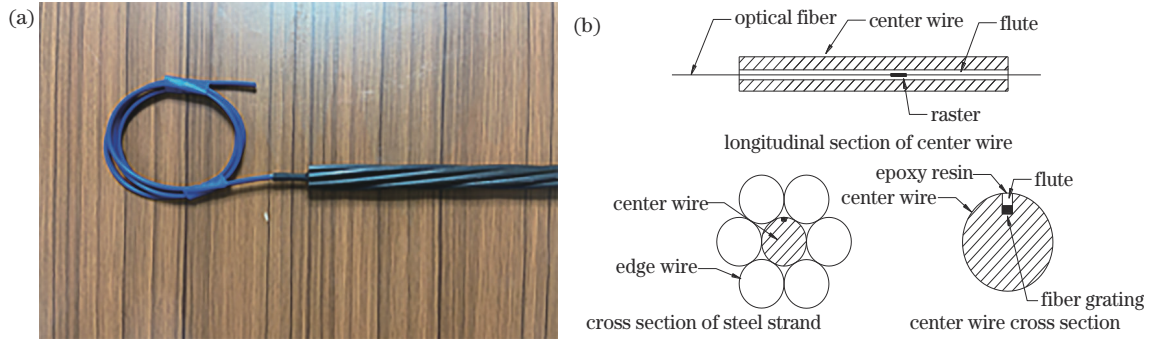


图 2 自感知钢绞线的结构。(a)实物图;(b)原理图

Fig. 2 Structure of self-sensing steel strand. (a) Physical drawings; (b) schematic diagram

图 3 所示。每组实验中的 A 试件为自感知钢绞线, B_{ij} 、 C_{ij} 、 D_{ij} 试件是以普通钢绞线单根边丝损伤面积和损伤位置为变化参数的试件。每组实验包含 A 试件 3 束、 B_{ij} 试件 6 束、 C_{ij} 试件 6 束、 D_{ij} 试件 4 束, 具体参数如表 1 所示。其中: A_1 、 A_2 、 A_3 表示相同型号、波长的自感知钢绞

线且光栅测点位置分别位于索长的 1/2、1/3、2/3 处; B_{ij} 、 C_{ij} 、 D_{ij} 的下标 i 表示同种试件在不同位置损伤的编号, j 表示同种试件在相同损伤位置的顺序编号。如 B_{12} 试件中的下标 1 表示 B 型试件在索长 1/4 处的损伤, 下标 2 表示 B 型试件损伤位置在索长 1/4 处的编号是 2。

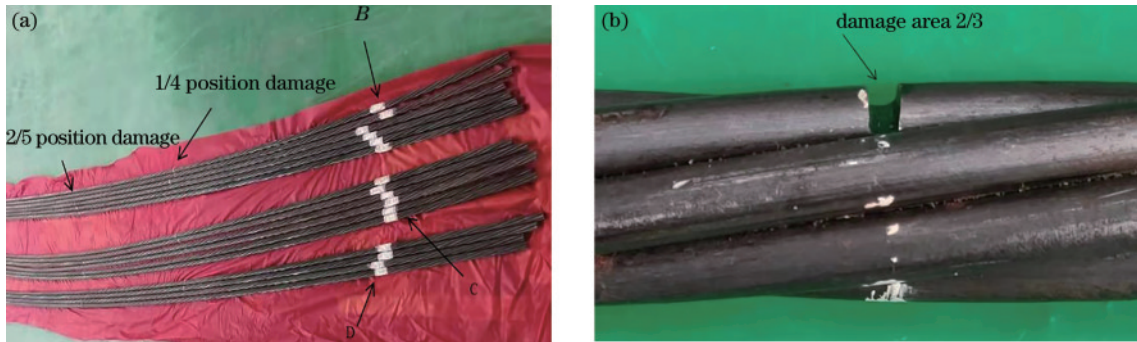


图 3 普通钢绞线的损伤位置分布。(a)每组钢绞线的损伤位置;(b) B_{11} 钢绞线 2/3 单股的损伤面积

Fig. 3 Damage location distribution of common steel strands. (a) Damage location diagram of each set of steel strand; (b) damage area of single strand of B_{11} steel strand 2/3

表 1 每组各试件的边丝损伤情况

Table 1 Edge wire damage of each group of specimens

Specimen type	Specimen number	Damage area degree	Damage location of cable length /m
A	A_1	0	0
	A_2		
	A_3		
B_{ij}	B_{11}, B_{12}, B_{13}	2/3	1/4
	B_{21}, B_{22}, B_{23}		2/5
C_{ij}	C_{11}, C_{12}, C_{13}	3/5	1/4
	C_{21}, C_{22}, C_{23}		2/5
D_{ij}	D_{11}, D_{12}	1/2	1/4
	D_{21}, D_{22}		2/5

3.2 实验方案及加载方式

采用 19 束钢绞线组成拉索共进行三组实验, 钢绞线在锚具板中的分布如图 4 所示。其中: 黑色圆圈代表自感知钢绞线; 白色圆圈代表普通钢绞线。每一组实验中: 损伤面积程度相同的 B 型钢绞线在索长不同位置损伤各 3 束, 共 6 束; C 型钢绞线各 3 束、D 型钢绞

线各 2 束, 共 10 束。张拉机的实物图如图 5 所示。其中: 左侧为张拉端; 右侧为锚固端。做好安全措施后, 进行加载实验, 具体步骤: 1) 检查 2000 t 荷载实验机各部件是否正常工作, 将千斤顶行程打出 100 mm, 锁紧油路; 2) 在实验采用锚具的 19 孔内壁打上退锚灵, 同时在夹片外打上退锚灵, 使钢绞线能顺利从 2000 t 荷载实验机中取出; 3) 将每束钢绞线经过对准仪器两边

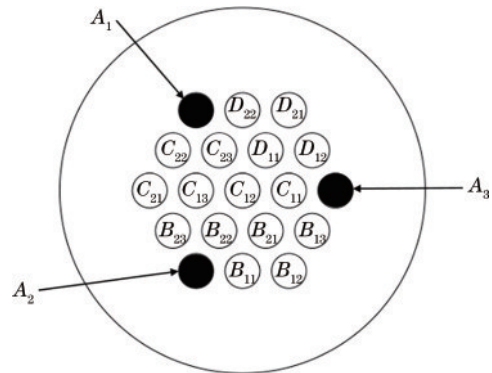


图 4 钢绞线在锚具板中的分布

Fig. 4 Distribution of steel strands in the anchorage plate

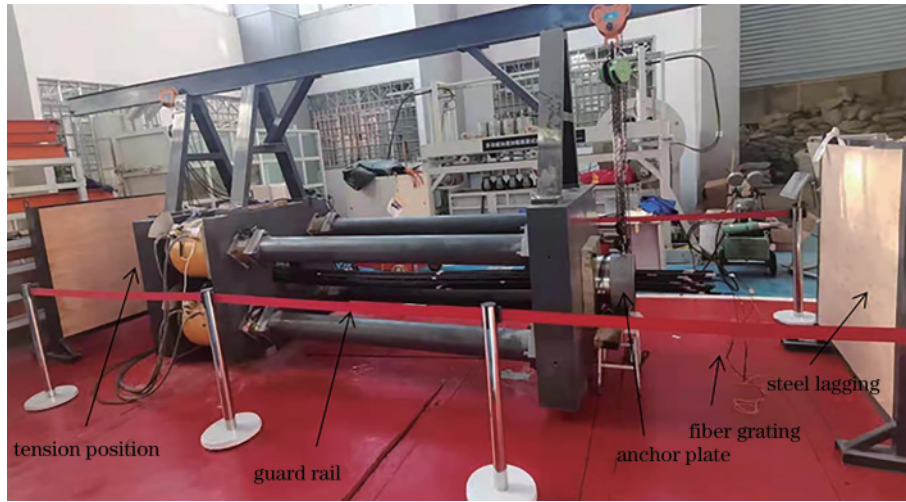


图 5 张拉机的实物图

Fig. 5 Physical drawing of the pretest tensioning machine

的锚具进行对应锚固,防止错位,同时用 240Q 千斤顶进行预紧锚固,使拉索的每束钢绞线受力均匀,然后记录自感知钢绞线的初始波长;4)用解调仪实时采集数据,匀速缓慢加载,当发生钢丝断丝时停止加载并记录索力值,然后继续加载,直至所有缺陷钢丝断裂后卸载到 0 kN;5)重复步骤 1)~步骤 4);6)完成每组实验后,保存相关数据和照片。实验中解调仪连接自感知钢绞线实时采集数据,采样频率为每秒 100 次,根据解调仪所得波长的变化监测拉索振动情况,判别断丝信号。

4 实验数据整理与分析

实验过程中,自动预紧钢绞线后,手动缓慢进行加载,钢绞线索力达到 648.135 kN 时,钢绞线发生断丝,停止手动加载,确定钢绞线断丝类型,然后继续缓慢手动加载,直至有损伤的钢绞线全部断裂,如图 6 所示。



图 6 钢绞线断丝后的整体图

Fig. 6 Overall picture of steel strand after wire breaking

为确认自感知传感器能否识别拉索张拉过程中的断丝信号,探讨了拉索损伤面积和损伤位置与断丝信号强弱的相关性,通过传感器实时采集数据。为方便研究,实验中只讨论了 B 型、D 型两种试件,每组试件均采用 200 个数据进行绘图。 B_{11} 、 D_{12} 、 D_{22} 试件(第一组)断丝信号的变化曲线如图 7 所示, B_{11} 、 D_{12} 、 D_{22} 试件(第二组)断丝信号变化如图 8 所示, B_{11} 、 D_{12} 、 D_{22} 试件(第三组)断丝信号变化如图 9 所示。

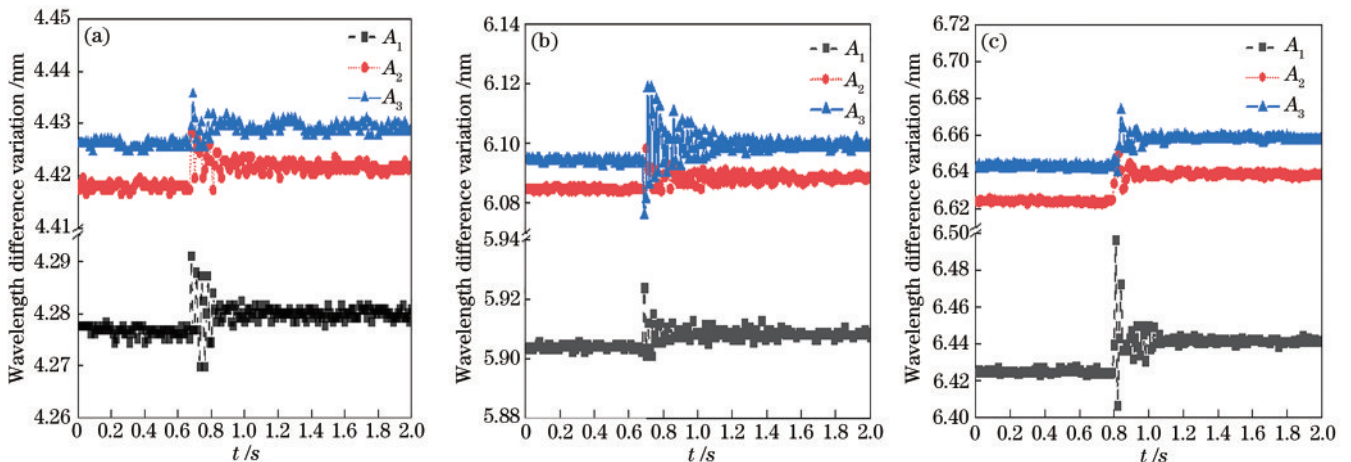


图 7 第一组试件加载过程中的断丝信号变化。(a) B_{11} ; (b) D_{12} ; (c) D_{22}

Fig. 7 Changes of broken wire signal of the first group of specimens in loading process. (a) B_{11} ; (b) D_{12} ; (c) D_{22}

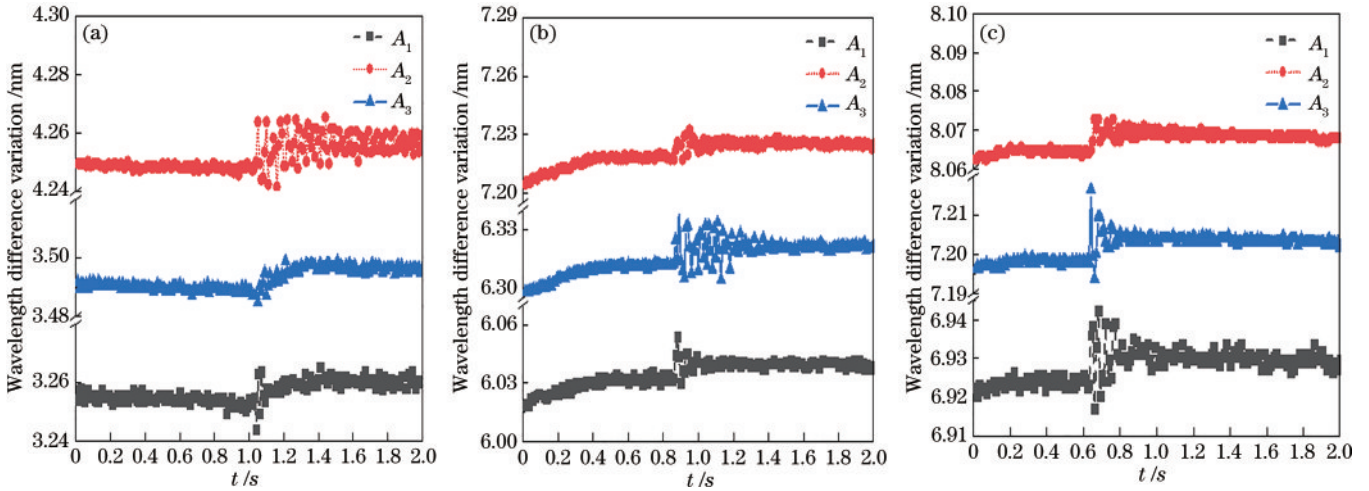


图 8 第二组试件加载过程的断丝信号变化。(a) B_{11} ; (b) D_{12} ; (c) D_{22}

Fig. 8 Changes of broken wire signals of the second group of specimens in loading process. (a) B_{11} ; (b) D_{12} ; (c) D_{22}

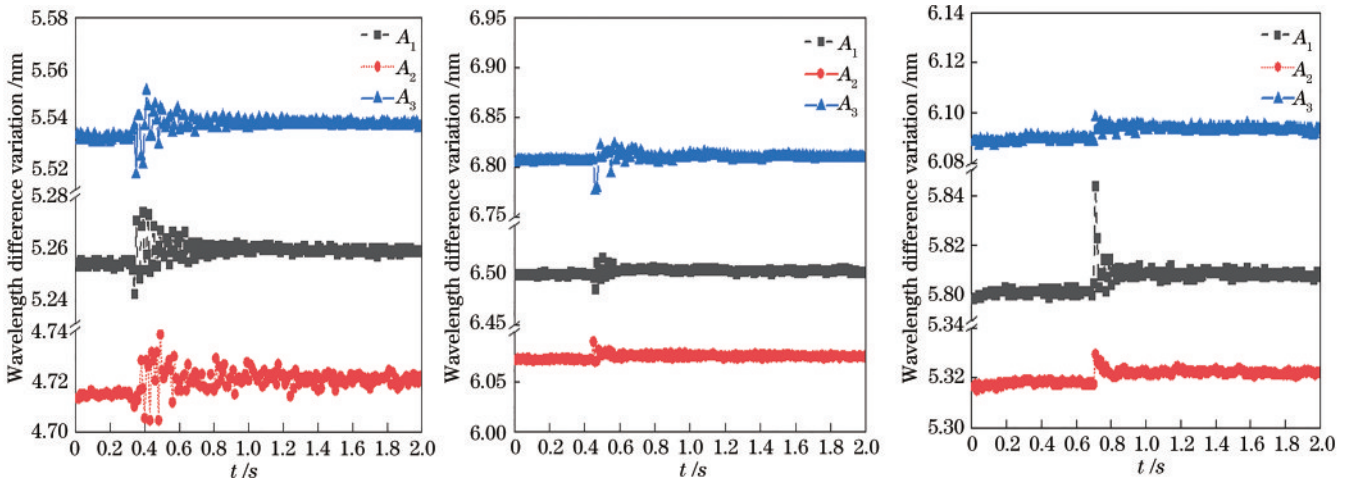


图 9 第三组试件加载过程的断丝信号变化。(a) B_{11} ; (b) D_{12} ; (c) D_{22}

Fig. 9 Changes of broken wire signal of the third group of specimens in loading process. (a) B_{11} ; (b) D_{12} ; (c) D_{22}

从图7~图9可以发现:第一组实验中的断丝顺序为 B_{11} 、 D_{12} 、 D_{22} 试件;第二组实验中的断丝顺序为 B_{11} 、 D_{12} 、 D_{22} 试件;第三组实验中的断丝顺序为 B_{11} 、 D_{22} 、 D_{12} 试件。此外,采集到断丝时刻的信号起始时间相同,结束时间基本一致。对比发现,各自感知钢绞线采集到的断丝信号强弱与边丝损伤面积和位置有关:当损伤位置相同时,损伤面积越小,自感知钢绞线采集到的断丝信号就越强,当损伤面积相同时,损伤位置距端部越近,自感知钢绞线采集的信号越强,同时各自感知钢绞线识别到断丝信号与自感知钢绞线中FBG测点位置无关。

根据各试件被自感知采集到的断丝数据,抽取第一组断丝试件 B_{11} 、第二组断丝试件 D_{12} 、第三组断丝试件 D_{22} 的数据如表2~表4所示。其中, $\Delta\lambda$ 为相邻数据波长的差值。从表2可以发现,试件 B_{11} 断丝瞬间被各自感知钢绞线采集到的时间相同,都在 0.67 s, A_1 、 A_2 、 A_3 采集到断丝信号结束的时间分别为 0.82、0.87、0.85 s。从表3可以发现,试件 D_{12} 断丝瞬间被各自感知钢绞线

表 2 B_{11} 试件断丝时的数据

Table 2 Data of B_{11} specimen wire breaking unit: nm

Specimen	Wavelength variation		
	A_1	A_2	A_3
B_{11} specimen	0.0158	0.0110	0.0063
	-0.0142	0.0000	-0.0047
	0.0000	-0.0087	-0.0040
	0.0110	0.0056	-0.0015
	-0.0110	0.0015	0.0031
Maximum value of adjacent wave peak	0.0158	0.0110	0.0063
Minimum value of adjacent wave peak	-0.0142	-0.0087	-0.0047
$\Delta\lambda$	0.0300	0.0197	0.0110

采集到的时间相同,都在 0.67 s, A_1 、 A_2 、 A_3 采集到断丝信号结束的时间分别为 1.09、1.02、1.08 s。从表4可以发现,试件 D_{22} 断丝瞬间被各自感知钢绞线采集到的时间相同,都在 0.69 s, A_1 、 A_2 、 A_3 采集到断丝结束的时

表 3 D_{12} 试件断丝时数据
Table 3 Data of D_{12} specimen wire breaking unit: nm

Specimen	Wavelength variation		
	A_1	A_2	A_3
D_{12} specimen	0.0119	-0.0072	0.0126
	0.0095	0.0120	-0.0102
	-0.0103	0.0007	0.0277
	-0.0134	-0.0103	-0.0285
	0.0063	0.0127	-0.0048
Maximum value of adjacent wave peak	0.0119	0.0127	0.0277
Minimum value of adjacent wave peak	-0.0134	-0.0103	-0.0285
$\Delta\lambda$	0.0253	0.023	0.0562

表 4 D_{22} 试件断丝时数据
Table 4 Data of D_{22} specimen wire breaking unit: nm

Specimen	Wavelength variation		
	A_1	A_2	A_3
D_{22} specimen	0.0387	0.0119	0.0095
	-0.0205	-0.0024	-0.0048
	-0.0198	-0.0015	0.0016
	0.0047	0.0015	0.0016
	0.0008	-0.0039	-0.0056
Maximum value of adjacent wave peak	0.0387	0.0119	0.0095
Minimum value of adjacent wave peak	-0.0205	-0.0024	-0.0048
$\Delta\lambda$	0.0592	0.0143	0.0143

间分别为 0.81、0.76、0.84 s。对比发现:1)试件断丝瞬间各自感知钢绞线波峰差 $\Delta\lambda \geq 0.01$ nm;2)各自感知钢绞线具有良好的监测性能,能全程监测拉索实时受力情况;3)各自感知钢绞线识别到断丝信号起始时间相同,结束时间基本一致且识别到的断丝信号时间非常短,仅为 0.07~0.23 s。

根据每组试件加载过程的断丝信号变化图和断丝数据可知:各自感知钢绞线能全程监测拉索实时受力情况,存活率为 100%;各自感知钢绞线都能准确识别到所有钢绞线断丝信号;各自感知钢绞线识别到断丝信号的起始时间相同,结束时间基本一致,且监测到断丝信号时间非常短,仅为 0.07~0.23 s;各自感知钢绞线采集的断丝信号强弱与普通钢绞线在锚具板中断裂区域位置有关。自感知钢绞线临近位置断裂的钢绞线采集的信号较强,且各自感知钢绞线采集到的断丝信号强弱与普通钢绞线损伤位置和程度有关:当损伤位置相同时,损伤程度越小,采集的断丝信号越强;当损伤程度相同时,损伤位置距端部越近,采集的信号越强。此外,当各自感知钢绞线采集到的信号波峰差值 $\Delta\lambda \geq 0.01$ nm 时,可作为断丝信号的识别值,且各自感

知钢绞线识别到的断丝信号与自感知钢绞线中 FBG 的测点位置无关。

5 结 论

针对现有拉索内部结构钢绞线的断丝现象,以 FBG 传感器为依托,提出一种内嵌 FBG 钢绞线监测整体拉索内部结构断丝信号的方法,并对 19 束钢绞线进行三组张拉试验监测。实验结果表明:各自感知钢绞线能准确识别每束钢绞线断丝时刻的断丝信号,且识别到的断丝信号与自感知钢绞线中 FBG 的测点位置分布无关;各自感知钢绞线采集的断丝信号时间段基本相同,当各自感知钢绞线采集到的信号波峰差值大于等于 0.01 nm 时可作为拉索断丝预警值。同时,FBG 传感器采集到断丝信号的强弱与普通钢绞线损伤位置、损伤程度和断裂区域有关:当损伤位置相同时,损伤程度越小,自感知钢绞线采集的断丝信号越强;当损伤程度相同时,损伤位置距端部越近,自感知钢绞线采集的信号越强;当自感知钢绞线临近位置钢绞线断裂,自感知钢绞线采集的信号较强。

参 考 文 献

- [1] 彭春阳,李启富,植磊,等.聚脲在悬索桥主缆防腐中的应用[J].施工技术,2021,50(3):76-78.
Peng C Y, Li Q F, Zhi L, et al. Application of polyurea in anti-corrosion of main cable of suspension bridge[J]. Construction Technology, 2021, 50(3): 76-78.
- [2] 李彦兵.大跨径斜拉桥断索危害性研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
Li Y B. Research of broken cable hazard for long scale cable-stayed bridge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [3] 梁亚斌,蔡思佳,冯谦,等.基于无人机航拍的武汉天兴洲长江大桥桥索 PE 外观检测技术[J].大地测量与地球动力学,2019,39(11):1207-1210.
Liang Y B, Cai S J, Feng Q, et al. Cable PE appearance inspection in the Tianxingzhou River Bridge using unmanned aerial vehicle based aerial photo technique[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(11): 1207-1210.
- [4] 贲安然.在役平行钢丝拉索断丝漏磁检测方法及其装置[D].武汉:华中科技大学,2012.
Ben A R. Magnetic flux leakage testing method and tool for broken wires in parallel wire cables in service[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [5] 刘志勇.斜拉桥斜拉索索力测试方法综述[J].铁道建筑,2007,47(4):18-20.
Liu Z Y. Testing method of cable force of cable-stayed bridge[J]. Railway Engineering, 2007, 47(4): 18-20.
- [6] 辛荣亚,张启伟,李元兵.桥梁拉索金属面积损失的磁通检测信号特征[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(10):1326-1333,1347.
Xin R Y, Zhang Q W, Li Y B. Characteristic of signal from magnetic flux examination of loss of metallic area in bridge cables[J]. Journal of Tongji University (Natural

- Science), 2018, 46(10): 1326-1333, 1347.
- [7] 辛荣亚, 张启伟. 基于漏磁检测的桥梁拉索断丝识别 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 458-466.
Xin R Y, Zhang Q W. Broken wire identification in bridge cables based on magnetic flux leakage examination [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(4): 458-466.
- [8] 辛荣亚, 张启伟. 基于漏磁检测的桥梁拉索钢丝损伤评估 [J]. 桥梁建设, 2019, 49(3): 51-56.
Xin R Y, Zhang Q W. Assessment of steel wire damages in bridge cables based on magnetic flux leakage examination [J]. Bridge Construction, 2019, 49(3): 51-56.
- [9] 张俊. 光纤光栅传感器在桥梁振动监测中的应用研究 [J]. 交通科技, 2016(6): 12-15.
Zhang J. Fiber Bragg grating sensor applied to bridge vibration monitoring [J]. Transportation Science & Technology, 2016(6): 12-15.
- [10] 王天鹏, 周果子. 基于光纤光栅测力环的桥梁拉索索力监测及温度补偿研究 [J]. 中外公路, 2017, 37(3): 112-117.
Wang T P, Zhou G Z. Research on cable force monitoring and temperature compensation of bridge based on fiber grating force measuring ring [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(3): 112-117.
- [11] Tochaei E N, Fang Z, Taylor T, et al. Structural monitoring and remaining fatigue life estimation of typical welded crack details in the Manhattan Bridge [J]. Engineering Structures, 2021, 231: 111760.
- [12] Sujon M, Dai F. Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: state-of-the-art review [J]. Automation in Construction, 2021, 130: 103844.
- [13] Rizkalla S H, Tadros G. Smart highway bridge in Canada [J]. Concrete International, 1994, 16(6): 42-44.
- [14] 庞晰中. 基于光纤光栅的东洲湘江大桥索力实时监测系统 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
Pang X Z. Real-time monitoring system of cable force of Dongzhou Xiangjiang Bridge based on fiber grating [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.