

doi:10.3788/gzxb20184701.0106002

FBG 应变传感器应力疲劳极限传感寿命评估方法

舒岳阶^{1,2}, 吴俊², 周世良², 周远航²

(1 重庆交通大学 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400074)

(2 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘 要: 光纤光栅应变传感器在应力疲劳作用下不可避免地出现性能衰退, 为了评估其极限传感寿命, 从光纤光栅传感原理出发, 理论推导了应力疲劳作用引起的满度相对误差表达式, 以工业仪表精确度等级作为传感器的极限状态阈值, 提出了基于等强度梁的极限传感寿命测试方法. 利用该方法评估了高桩码头结构健康监测应用环境中光纤光栅应变传感器的极限传感寿命, 以满度相对误差变化 4% 作为极限失效阈值, 对 4 支传感器进行了 1.32 亿应力疲劳实验. 当疲劳至 1.32 亿次时, 2 支传感器达到极限传感寿命, 1 支传感器接近极限传感寿命, 即极限传感寿命约为 1.32 亿次. 实验结果表明, 提出的方法能有效地测试不同结构健康监测需求下, 光纤光栅应变传感器的应力疲劳极限传感寿命.

关键词: 光纤光学; 极限传感寿命; 应力疲劳; 光纤光栅; 满度相对误差; 等强度梁

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)01-0106002-6

Evaluation Method of Ultimate Sensing Life for Stress Fatigued FBG Strain Sensors

SHU Yue-jie^{1,2}, WU Jun², ZHOU Shi-liang², ZHOU Yuan-hang²

(1 Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering of Ministry of Communications, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

(2 South-western Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: The performance degradation of fiber Bragg grating strain sensors is unavoidable under stress fatigue, in order to assess the ultimate sensing life of fiber Bragg grating sensors, the full scale relative error expression of stress fatigue effect is deduced from the principle of fiber Bragg grating, and the industrial instrument accuracy class is used as the limit state threshold of the sensor. And then a method based on the beam of constant strength is put forward to test the ultimate sensing life. The ultimate sensing life of fiber Bragg grating in high pile wharf structural health monitoring application is assessed by this method, the failure threshold of full scale relative error is set as 4%, 4 fiber Bragg grating sensors suffer from 132 million times alternate strain, when the fatigue number reach to 132 million times, 2 sensors reach the ultimate sensing life, 1 sensor proximity reach the limit. That is, the maximum sensing life is 132 million times. Experimental results show that the proposed method can effectively test the ultimate sensing life of stress fatigued fiber Bragg grating strain sensors in different structural health monitoring application.

Key words: Fiber optics; Ultimate sensing life; Stress fatigue; Fiber Bragg grating; Full scale relative

基金项目: 国家自然科学基金(No.51508059)、内河航道整治技术交通行业重点实验室开放基金(No. NHHD-201502)、宁波市交通运输科技项目(No.201704)资助

第一作者: 舒岳阶(1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高桩码头结构健康光纤光栅智能监测. Email: 704537847@qq.com

导 师: 周世良(1972-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为高桩码头结构性能监测与状态评估. Email: zhsl1972@163.com

通讯作者: 吴俊(1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光纤智能结构. Email: wujun_gd@126.com

收稿日期: 2017-08-31; 录用日期: 2017-10-10

<http://www.photon.ac.cn>

error; Equal strength beam

OCIS Codes: 060.3735; 130.6010; 050.2770

0 引言

光纤光栅(Fiber Bragg grating, FBG)具有精度高、寿命长、尺寸小、传输距离远、抗电磁干扰能力强等优点,在桥梁^[1-2]、航空航天^[3]、石化工业^[4]、船舶工程^[5-6]、滑坡^[7]等结构健康监测领域有广阔的应用前景.然而,光纤光栅应变传感器在长期使用过程中,在应力疲劳作用下不可避免地出现性能衰退,传感性能逐渐劣化,甚至失去传感能力,传感器的可靠性及正常传感寿命是构建结构健康系统的关键问题之一^[8].

围绕光纤光栅应变传感器应力疲劳失效问题,目前已有较多的研究.黄国君^[9]等对金属封装传感器进行了疲劳实验,发现随着应力疲劳次数的增加,光纤光栅波长会发生漂移.J. Ang^[10]对表贴式光纤光栅应变传感器进行了应力疲劳实验,以光纤断裂强度作为光纤光栅机械强度寿命的指标.本文作者^[11]结合理论分析与实验研究发现,光纤光栅在应用疲劳作用下,反射光谱会发生畸变,并提出以带宽、应变灵敏度、应变传递效率等作为反映传感器性能衰退过程的指标.Wei Zhang^[12]指出,光纤光栅应变传感器在应力疲劳过程中,应变灵敏度会逐渐下降,反射光谱也会逐渐发生畸变.万里冰^[13]等发现,光纤光栅应变传感器应力疲劳后,最大应变、最小应变、平均应变会发生变化.

现有研究提出了众多指标来表征传感器的应力疲劳失效过程,即光纤光栅在应力疲劳作用下,这些指标都会逐渐发生衰退.但根据这些指标,工程应用中仍然无法确定光纤光栅应变传感器可靠传感的极限寿命,而传感器的极限传感寿命又是结构健康监测系统中不能回避的关键问题之一,现有研究无法指导结构健康监测系统的构建.为此,提出一套完善的评估应力疲劳作用下光纤光栅极限传感寿命的方法,对于促进光纤光栅在结构健康监测中的应用具有重要意义.

1 光纤光栅应变传感器应力疲劳传感极限传感状态失效判据

根据安装方式的不同,光纤光栅应变传感器可分为表贴式和埋入式,这两种方式均由光纤光栅器件(FBG)、粘接层(也称应变传递层,一层或多层)、其它层等组成^[14-15].光纤光栅应变传感器与对象耦合后形成一个传感系统,该传感系统可简化为三部分,即光纤光栅器件—粘接层—被测基底,如图1.

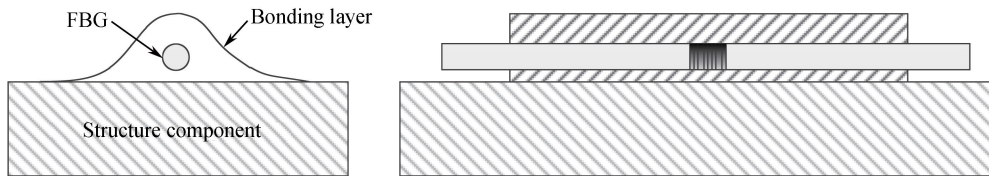


图1 光纤光栅应变传感器结构简图

Fig.1 Schematic diagram of fiber Bragg grating strain sensor

当受到外界力的作用时,光纤光栅会被拉伸或挤压,导致其周期和有效折射率发生改变,从而光纤光栅反射中心波长也随之改变.光纤光栅中心波长与轴向应变之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\epsilon \epsilon_z \quad (1)$$

式中, λ_B 为初始中心波长, ϵ_z 为光纤光栅轴向应变, $\Delta\lambda_B$ 为中心波长的偏移量, K_ϵ 为常数,典型值为0.784.当基底受力发生形变时,光纤光栅随之发生变形,粘接层的存在使得基底的变形不能全部传递到光纤光栅器件,设应变传递系数为 η ($\eta < 1$),基底应变为 ϵ_c ,则光纤光栅器件轴向应变 ϵ_z 为

$$\epsilon_z = \eta \epsilon_c \quad (2)$$

反过来,根据光谱仪解调得到光纤光栅器件中心波长,联立式(1)和(2)即可求得基底应变 ϵ_c 为

$$\epsilon_c = \frac{1}{K_\epsilon \lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\eta} \quad (3)$$

对式(3)求全微分,可得

$$d\epsilon_c = -\frac{\Delta\lambda_B}{\eta^2 K_\epsilon \lambda_B} d\eta + \frac{1}{\eta K_\epsilon \lambda_B} d\Delta\lambda_B \quad (4)$$

式(4)等式右边第一项是由于应变传递系数引起的测量误差;第二项为光谱解调引起的误差.光纤光栅应变传感器在长期工作过程中,应力疲劳作用可导致应变传递系数 η 发生衰减.不考虑由于光谱解调引起的误差,则由应力疲劳引起的基底应变测量误差的绝对值 $\delta\epsilon_c$ 可表示为

$$\delta\epsilon_c = \left| -\frac{\Delta\lambda_B}{\eta^2 K_\epsilon \lambda_B} \delta\eta \right| = \frac{\Delta\lambda_B}{\eta K_\epsilon \lambda_B} \frac{\delta\eta}{\eta} \quad (5)$$

式中, $\delta\eta$ 为应变传递系数变化的绝对值, $\frac{\delta\eta}{\eta}$ 为应变传递系数变化率.由式(5)可以看出,测量误差与应变传递系数变化率成正比.我国工业仪表的准确度等级共有 16 级,据此,在不考虑传感器初始满度相对误差的前提下,以该准确度等级作为传感器应力疲劳极限传感寿命阈值,对于不同的测试精度,选择不同的准确度等级阈值,判据为

$$\frac{\delta\epsilon_{c\max}}{\epsilon_{\max}} = \frac{\Delta\lambda_{B\max}}{\eta K_\epsilon \lambda_B \epsilon_{\max}} \frac{\delta\eta}{\eta} = \frac{1}{\eta} \frac{\delta\eta}{\eta} \begin{cases} < \Gamma & \text{normal} \\ \geq \Gamma & \text{damaged} \end{cases} \quad (6)$$

式中, ϵ_{\max} 为满量程, $\delta\epsilon_{c\max}$ 、 $\Delta\lambda_{B\max}$ 分别为满量程所对应的最大应变误差,最大中心波长变化. Γ 为某准确度等级对应的满度相对误差,例如,若以第 15 等级(满度相对误差变化 $\Gamma=4\%$)作为光纤光栅应力疲劳极限传感阈值,则式(6)高于 4% 表示传感器已失效,低于 4% 表示传感器正常.

2 基于等强度梁的应力疲劳极限传感寿命测试试验方法

结构健康监测系统中,结构动态应变峰值通常只有几百微应变,为此,提出采用简易的基于等强度梁的振动试验装置,测试光纤光栅应变传感器的极限传感寿命.

将光纤光栅粘贴在等强度梁上,使得等强度梁与光纤光栅器件形成一个传感系统,如图 2.设等强度梁的厚度为 h ,宽度为 B ,弹性模量为 E ,长度为 L ,变宽夹角为 2θ ,在梁的尖端施加作用力 F ,取距原点 O 距离为 x 的一段,对其进行受力分析,得到等强度梁表面应变 ϵ_{eq} 为

$$\epsilon_{eq} = \frac{3F}{h^2 E \tan \theta} \quad (7)$$

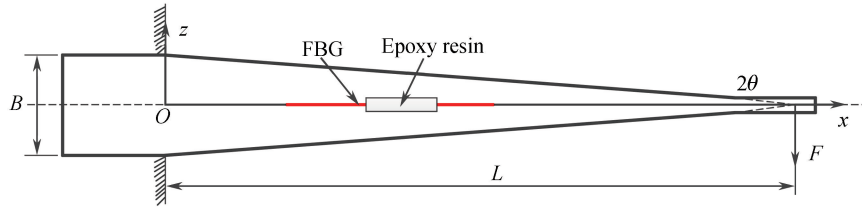


图 2 等强度梁
Fig.2 Uniform strength beam

由式(7)可以看出,等强度梁表面纵向应变均匀分布,避免了不均匀应变对光纤光栅器件造成的不利影响.在等强度梁末端安装偏心电机使梁共振,如图 3,从而在光纤光栅应变传感器上施加交变应变.调节调速电源电压,即可调节振动频率和交变应变幅度.每隔 n 个振动周期,停机并对等强度梁进行静力学加载卸载实验,测试光纤光栅应变传感器的应变传递系数.

由式(1)和(7)可得应变传递系数为

$$\eta = \frac{\epsilon_z}{\epsilon_{eq}} = \frac{\frac{\Delta\lambda_B}{K_\epsilon \lambda_B}}{\frac{3F}{h^2 E \tan \theta}} = \frac{\Delta\lambda_B h^2 E \tan \theta}{3F K_\epsilon \lambda_B} \quad (8)$$

应变传递系数变化率可表示为

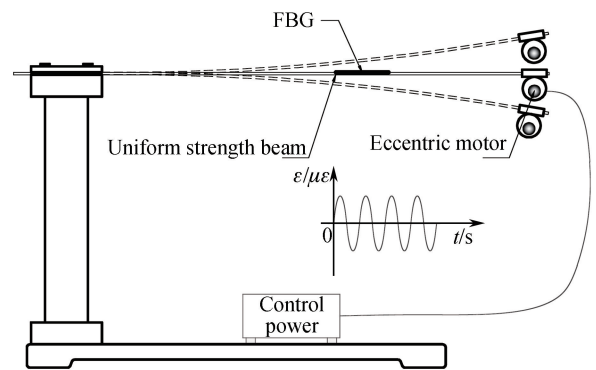


图 3 实验装置结构简图
Fig.3 Schematic diagram of experimental device

$$\frac{\delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{|\eta_i - \eta_0|}{\eta_0} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

式中, η_0 为初始应变传递系数, η_i ($i = 1, 2, \dots$) 为第 i 次应力疲劳后应变传递系数, 根据式(7), 得到光纤光栅应变传感器极限传感寿命判断准则为

$$\frac{\delta\epsilon_{\max}}{\epsilon_{\max}} = \frac{1}{\eta_0} \frac{|\eta_i - \eta_0|}{\eta_0} = \begin{cases} < \Gamma & \text{normal} \\ \geq \Gamma & \text{damaged} \end{cases} \quad (10)$$

当光纤光栅应变传感器疲劳失效时, 停止应力疲劳实验, 否则继续进行实验, 直至光纤光栅应变传感器失效为止.

3 算例

以高桩码头结构健康监测为例, 高桩码头在船舶撞击、风浪流等的联合作用下, 部分构件的动态应变峰值可达 $400\mu\epsilon$ 左右, 利用本文方法评估光纤光栅应变传感器在高桩码头工程应用中的极限传感寿命.

3.1 应力疲劳实验基本参数

基于等强度梁的加速应力疲劳实验装置如图 4. 在等强度梁上下表面分别用环氧树脂胶粘贴 2 支光纤光栅, 共计 4 支光纤光栅应变传感器, 编号分别为 FBG_1 、 FBG_2 、 FBG_3 、 FBG_4 , 对这 4 支光纤光栅应变传感器进行应力疲劳测试. 每隔 400 万个循环, 停机测试传感器的应变传递系数, 直至传感器失效为止.

高桩码头最大动态应变 $400\mu\epsilon$ 左右, 考虑到一定的安全裕度, 通过调节电源设定交变应变幅度为 $500\mu\epsilon$. 以第 15 等级准确度等级作为失效阈值, 对应的满度相对误差极限状态阈值为 4%. 实验详细参数如表 1.

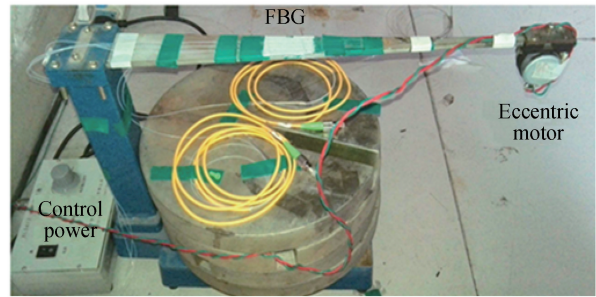


图 4 实验装置
Fig.4 Experimental device

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Serial number	Parameters	Values
1	Size of bonding layer	10 mm×5 mm
2	Amplitude of alternating strain (ϵ_s)	500 $\mu\epsilon$
3	Vibration frequency of equal strength beam (f_s)	18 Hz
4	Thickness of equal strength beam (h)	5 mm
5	Length of equal strength beam (L)	380 mm
6	Width of equal strength beam (B)	40 mm
7	Elasticity modulus of equal strength beam (E)	195 GPa
8	Angle (2θ)	6°
9	The constant coefficient of FBG (K_ϵ)	0.784
10	Central wavelength of FBG (λ_B)	1543 nm
11	The failure threshold of full scale relative error	4%

3.2 实验结果及分析

试验共进行了 1.32 亿次交变应变循环, 应变传递系数如表 2, 满度相对误差如表 3, 应变传递系数变化率曲线如图 5(a), 满度相对误差变化曲线如图 5(b). 其中, FBG_2 由于人为操作不当, 中途损坏, 在结论分析中不考虑这支传感器.

从图 5(a) 可以看出, FBG_1 、 FBG_3 、 FBG_4 在应力疲劳过程中, 应变传递系数初始变化幅度较小, 当疲劳至 1.2 亿次时, 三支光纤光栅应变传感器应变传递系数急剧下降, 随着疲劳次数的继续增加, 三支传感器的应变传递系数也在不断减小. 图 5(b) 为满度相对误差变化, 图中分界线为“光纤光栅应变传感器正常与失效分界线”, 该分界线以满度相对误差变化 4% 作为阈值, 在此线之上表示光纤光栅应变传感器已失效, 在此之下表

表 2 实验结果

Table 2 Experimental result

Fatigue number /million	Strain transfer coefficient				Full scale relative error			
	FBG ₁	FBG ₂	FBG ₃	FBG ₄	FBG ₁	FBG ₂	FBG ₃	FBG ₄
0	0.949 1	0.965 5	0.967 7	0.974 5	---	---	---	---
4	0.947 4	0.960 5	0.973 5	0.969 6	0.20%	0.53%	0.63%	0.52%
8	0.948 7	0.957 5	0.968 6	0.972 6	0.05%	0.86%	0.10%	0.20%
12	0.939 1	0.953 0	0.964 5	0.974 6	1.11%	1.33%	0.34%	0.01%
16	0.945 9	0.942 5	0.972 4	0.982 0	0.36%	2.47%	0.50%	0.79%
20	0.943 3	0.935 7	0.970 2	0.966 4	0.64%	3.20%	0.27%	0.85%
24	0.943 4	0.937 8	0.964 0	0.975 5	0.64%	2.97%	0.39%	0.11%
28	0.951 2	0.938 9	0.963 1	0.975 6	0.24%	2.85%	0.49%	0.12%
32	0.942 3	0.935 3	0.975 3	0.980 0	0.76%	3.23%	0.82%	0.58%
36	0.955 3	0.957 5	0.965 6	0.972 7	0.69%	0.86%	0.23%	0.19%
40	0.939 7	0.925 9	0.973 6	0.976 8	1.05%	4.25%	0.63%	0.24%
44	0.943 4	0.943 6	0.962 4	0.965 8	0.64%	2.35%	0.56%	0.92%
48	0.945 0	0.904 8	0.962 5	0.966 5	0.46%	6.51%	0.55%	0.84%
52	0.947 8	0.914 3	0.966 5	0.963 7	0.15%	5.49%	0.12%	1.14%
56	0.944 7	0.883 8	0.969 2	0.963 5	0.49%	8.76%	0.16%	1.16%
60	0.947 3	0.893 5	0.961 4	0.969 3	0.20%	7.72%	0.67%	0.55%
64	0.945 2	---	0.969 5	0.971 2	0.43%	---	0.20%	0.35%
68	0.949 6	---	0.968 4	0.967 1	0.05%	---	0.08%	0.78%
72	0.949 2	---	0.966 8	0.964 0	0.01%	---	0.09%	1.11%
76	0.948 7	---	0.962 3	0.965 0	0.05%	---	0.57%	1.00%
80	0.942 3	---	0.965 6	0.967 5	0.76%	---	0.23%	0.74%
84	0.950 2	---	0.964 3	0.961 9	0.12%	---	0.36%	1.33%
88	0.945 4	---	0.967 2	0.970 7	0.41%	---	0.05%	0.40%
92	0.950 3	---	0.966 1	0.965 6	0.14%	---	0.17%	0.94%
96	0.942 8	---	0.967 9	0.961 1	0.70%	---	0.02%	1.41%
100	0.952 6	---	0.963 1	0.960 5	0.39%	---	0.49%	1.47%
104	0.945 0	---	0.965 6	0.963 0	0.46%	---	0.22%	1.22%
108	0.941 2	---	0.963 4	0.960 5	0.88%	---	0.46%	1.48%
112	0.943 9	---	0.968 3	0.968 9	0.57%	---	0.07%	0.59%
116	0.951 3	---	0.961 6	0.962 1	0.24%	---	0.65%	1.30%
120	0.929 0	---	0.941 2	0.939 4	2.23%	---	2.82%	3.70%
124	0.920 0	---	0.935 0	0.930 2	3.23%	---	3.49%	4.67%
128	0.921 0	---	0.930 2	0.925 0	3.12%	---	4.00%	5.21%
132	0.910 6	---	0.936 0	0.926 1	4.28%	---	3.38%	5.10%

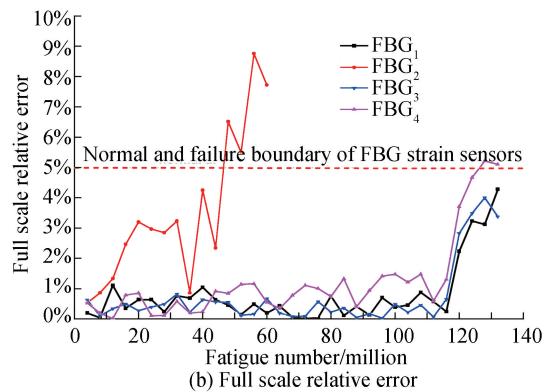
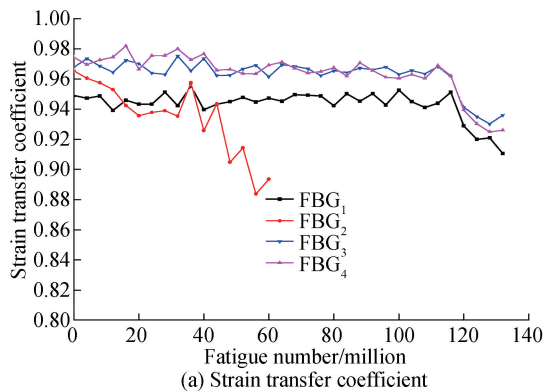


图 5 实验结果

Fig.5 Experimental result

示光纤光栅应变传感器仍能正常工作.经过 1.32 亿次交变应变作用后,三支光纤光栅应变传感器的满度相对误差分别约为 4.28%、3.38%、5.10%,两支已超过 4%,一支接近 4%.因此,从传感角度来看,两支已达到极限传感寿命,另一支接近极限传感寿命.即高桩码头结构健康监测中,光纤光栅应变传感器的应力疲劳极限传感寿命约为 1.32 亿次.

4 结论

本文从传感原理出发,以工业仪表准确度等级作为传感器失效阈值,推导了应力疲劳致满度相对误差变化表达式,提出了光纤光栅应变传感器应力疲劳极限传感寿命评估方法,结果表明:

1) 满度相对误差较灵敏度反映了光纤光栅传感能力的衰退过程,从算例来看,光纤光栅应变传感器的衰退过程不是渐变的,而是突变的,当疲劳次数达到一个限度时,光纤光栅传感性能发生急剧衰退,即满度相对误差变化曲线上存在一个拐点,利用其评估光纤光栅应变传感器的极限传感寿命是可行的.

2) 针对不同的结构健康监测需求,可设置不同等级的满度相对误差阈值,随后利用基于等强度梁的振动实验装置,测试光纤光栅应变传感器的极限传感寿命,该方法简单可靠,可操作性强.

另外,光纤光栅应变传感器的寿命不仅与应力疲劳作用有关,而且还与环境因素有关,本文针对应力疲劳作用下光纤光栅应变传感器的极限传感寿命展开了研究,后续会进一步考虑环境因素对传感器寿命的影响.

参考文献

- [1] LI D, ZHOU Z, OU J. Development and sensing properties study of FRP-FBG smart stay cable for bridge health monitoring applications[J]. *Measurement*, 2011, **44**(4): 722-729.
- [2] CHAN T H T, YU L, TAM H Y, *et al.* Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation[J]. *Engineering Structures*, 2006, **28**(5): 648-659.
- [3] LAU K. Structural health monitoring for smart composites using embedded FBG sensor technology[J]. *Materials Science and Technology*, 2014, **30**(13): 1642-1654.
- [4] FELLI F, PAOLOZZI A, VENDITTOZZI C, *et al.* Use of FBG sensors for health monitoring of pipelines[C]. SPIE, 2016, **9803**: 20-25.
- [5] SHEN W, YAN R, XU L, *et al.* Application study on FBG sensor applied to hull structural health monitoring[J]. *Optic International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, **126**(17): 1499-1504.
- [6] WU Jing, WU Han-ping, HUANG Jun-bin, *et al.* Studying the application of fiber Bragg grating sensor on ship structures health monitoring[J]. *Ship Science and Technology*, 2014, **36**(10): 50-54.
吴晶,吴晗平,黄俊斌,等. 光纤光栅传感器在舰船结构健康监测中的应用[J]. 舰船科学技术, 2014, **36**(10): 50-54.
- [7] PEI H F, Li C, ZHU H H, *et al.* Slope stability analysis based on measured strains along soil nails using FBG sensing technology[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, (5): 1-5.
- [8] SURRE F, SCOTT R H, BANERJI P, *et al.* Study of reliability of fibre Bragg grating fibre optic strain sensors for field-test applications[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2012, **185**(5): 8-16.
- [9] HUANG Guo-jun, YIN Yun-guo, DAI Feng, *et al.* Investigation on the sensibility and fatigue reliability of fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(6): 45-47.
黄国君,殷响毓,戴锋,等. 光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏性及疲劳可靠性研究[J]. 激光杂志, 2003, **24**(6): 45-47.
- [10] ANG J, LI H C H, HERSZBERG I, *et al.* Tensile fatigue properties of fibre Bragg grating optical fibre sensors[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, **32**(4): 762-768.
- [11] SHU Yue-jie, CHEN Wei-min, ZHANG Peng, *et al.* Investigation on evaluation theory of fiber Bragg grating tensile fatigue property[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 805-811.
舒岳阶,陈伟民,章鹏,等. 光纤布拉格光栅器件应力疲劳评价理论研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(7): 805-811.
- [12] ZHANG W, CHEN W, WU J, *et al.* Degradation of sensing properties of fiber Bragg grating strain sensors in fatigue process of bonding layers[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(4): 046102.
- [13] WAN Li-bing, LI Kai-xuan. Research on fatigue property of FBG strain sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, **34**(12): 13-15.
万里冰,李凯旋. FBG 应变传感器的疲劳性能研究[J]. 传感器与微系统, 2015, **34**(12): 13-15.
- [14] ZHOU J, ZHOU Z, ZHANG D. Study on strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2010, **21**(11): 1117-1122.
- [15] WU R, ZHENG B, FU K, *et al.* Study on strain transfer of embedded fiber Bragg grating sensors[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(8): 085105.

Foundation item: The National Natural Science Fund (No. 51508059), the Open Foundation of Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering of Ministry of Communications (No.NHHD-201502) and Ningbo Transportation Science and Technology Project (No.201704)