

doi:10.3788/gzxb20154407.0706002

锚头植入式应变均化光纤布喇格光栅测力传感器

吴俊¹, 陈伟民², 舒岳阶¹, 刘礼华³, 赵霞³

(1 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

(2 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

(3 江苏法尔胜集团, 江苏 无锡 214433)

摘 要:将整个光纤布喇格光栅区的非均匀应变简化为多个受到均匀轴向应变光纤光栅基元的级联作用, 仿真分析了锚头典型锚固深度非均匀应变对光纤布喇格光栅输出光谱的影响, 结果表明常规光纤布喇格光栅无法适用于斜拉索锚头内部轴向非均匀应变测量. 为了克服非均匀应变对光纤布喇格光栅应变测量效果的影响, 提出了利用毛细管对光纤布喇格光栅区进行应变隔离的新型应变均化传感器结构, 并对传感器的测量原理与力学特性进行分析, 得出毛细管材料与壁厚选型的基本公式. 利用碳纤维复合材料作为封装材料, 试制出应变均化 FRP-OFBG 测力传感器, 并进行了力学拉伸试验. 试验结果表明该传感器具有良好的应变传感性能, 且测量量程、刚度满足测量要求. 将两只传感器植入试验缆索进行实索张拉试验, 缆索张拉过程中, 同步监测的光纤布喇格光栅输出光谱未受锚头非均匀应变影响, 说明利用毛细管对锚头应变均化的传感器结构方案可行, 且光纤布喇格光栅反射谱中心波长与缆索张力呈较好的线性关系, 说明锚头植入传感器与锚头结合良好, 测力功能满足索力测量需求.

关键词:智能缆索; 光纤布喇格光栅; 应变均化; 锚头; 毛细管封装; 碳纤维复合材料; 实索试验

中图分类号: TB133

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0706002-6

Embedded Strain Homogenized FBG Sensor for Smart Cables

WU Jun¹, CHEN Wei-min², SHU Yue-jie¹, LIU Li-hua³, ZHAO Xia³

(1 Southwest Research Institute of Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

(2 The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(3 Jiangsu Fasten Group, Wuxi, Jiangsu 214433, China)

Abstract: The overall non-uniform gratings were simplified cascading multiple uniform sub-gratings, the effects of three typical non-exponential decays on the output spectrum of Fiber Bragg Gratings (FBGs) were simulated. Simulation results show that the conventional FBG strain sensor is not suitable for anchor axial strain measurement. The structure of FBG strain sensors packaged in thin-walled capillaries was proposed, and the measurement principle and mechanical characteristics were analyzed, the basic formula of capillary material and thickness selection was deduced. The sensor samples were developed with carbon fiber composite materials, and the mechanical tests were carried out. The test results show that the sensors' performance expectations are achieved. Two FBG strain sensors were pre-implanted into the test anchor, during the tensile process. FBG spectrum occurs no broadening, fission sign, which can meet all the requirements of the prototype cable tests. The relationship between FBG outputs and cable tension are of good consistency, and are of good reproducibility and linearity, which proves that the tension measurement method is entirely feasible.

基金项目: 国家科技支撑计划 (No. 2007BAE15B04), 重庆市基础与前沿研究计划项目 (No. CSTC2014JCYJA70006) 资助

第一作者: 吴俊 (1981-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为光纤智能结构、水工量测技术. Email: wujun_gd@126.com

导师 (通讯作者): 陈伟民 (1955-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电技术及系统. Email: wmchen0802@126.com

收稿日期: 2015-05-05; 录用日期: 2015-07-02

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

Key words: Smart cable; Fiber Bragg Gratings (FBG); Strain homogenized; Cable anchor; Thin-walled capillaries packaging; Carbon fiber composite materials; Full-scale cable test

OCIS Codes: 060.2370; 060.3735; 050.2770; 130.6010

0 引言

“智能缆索技术”是将传感元件在缆索制作过程中植入缆索结构,赋予缆索全寿命自感知能力的一种新技术。“智能缆索技术”能够实现缆索与测量部件之间的高效融合,保证缆索生产、安装、服役全过程的无缝监测,而且无需额外添加外部检测部件进行测量,因此该技术已成为桥梁等大跨度结构健康的发展方向^[1-3]。

缆索索力是反映结构受力特性的重要参量,缆索索力自感知测量技术是“智能缆索技术”的重要组成部分。文献[4]通过对缆索全长沿程力学特性的分析发现,缆索锚头结构可将索身无法测量的超大应变衰减为常规应变测量元件可测的应变,并在此研究基础上,提出了在锚头植入应变测力传感器的智能型索力测量优化方案。该方案选用与缆索索力成正比的钢丝应变为测量对象,较磁弹性法^[5]、振频法^[6]等传统索力测量方法而言,具有直接测量、不受缆索边界条件影响的优点,是测量准确度较高、测量效果更为可靠的一种手段。

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)元件具有应变测量准确度高、寿命长、可复用、无电磁干扰、易于温度补偿等显著优点^[7],是植入缆索锚头内部,进行索力测量的最理想的测量手段。虽然锚头的应变自衰减特性为测量缆索应变提供了可能,然而锚头内部的非均匀应变也为FBG测量应变提出了更高的要求。由于常规FBG应变传感器中FBG栅区与封装材料直接粘接,被测对象应变直接传递至FBG,若采用常规FBG传感器测量锚头衰减型非均匀应变,FBG元件感受到的将是非均匀应变,由于FBG的光波耦合机理是基于轴向均匀应变的前提下推导得出的,如果FBG栅区感受的轴向应变非均匀,会导致FBG反射谱的畸变与剧烈抖动,造成测量值不准确^[8-9]。

为此,本文在评估常规FBG传感器适用性的基础上,兼顾缆索锚头结构、工艺特点,根据锚头的应变衰减特点与量程范围研究并开发出了具备应变均化能力的专用FBG测力传感器。

1 斜拉索锚头应变衰减特性分析

斜拉索是承受主梁自重及其桥面荷载的关键构件,它主要由索体(包含索身与连接筒)、锚头两大部分组成,如图1所示。

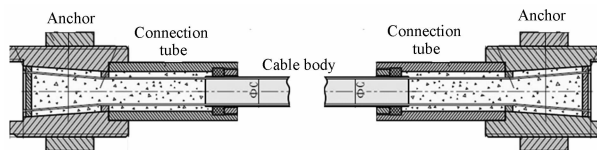


图1 斜拉索基本结构体系

Fig.1 Schematic structural diagram of stayed cables

锚头作为缆索与大跨度结构的受力连接点,是斜拉索结构最为复杂的承力结构,锚头结构如图2所示,索身钢丝在锚杯内呈放射状散开,穿过定位板上对应的孔眼,并通过墩头定位,锚杯安装后,灌注特制环氧填充料对锚杯中的空隙进行填充。环氧固化后,钢丝、锚固料和锚杯结合成为一个整体。

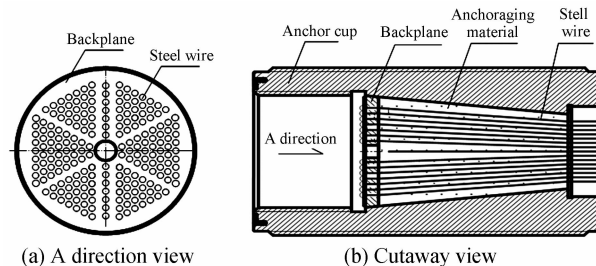


图2 斜拉索锚头结构

Fig.2 Structure of anchor

将斜拉索锚头材料的实际特性参量代入锚头钢丝应力衰减本构模型,其钢丝应变衰减公式^[4]为

$$\sigma_z^s = \left(C_1 e^{\sqrt{Mz}} + C_2 e^{-\sqrt{Mz}} + \frac{N}{M} \right) \sigma_0 = (0.9807 \cdot e^{-9.27z} + 0.02) \sigma_0 \quad (1)$$

式中, σ_0 为锚头起始端应力, z 为锚固深度, 锚头起始端 $z=0$, σ_z^s 为锚固深度为 z 处钢丝应变。钢丝应力衰减仿真结果如图3所示。

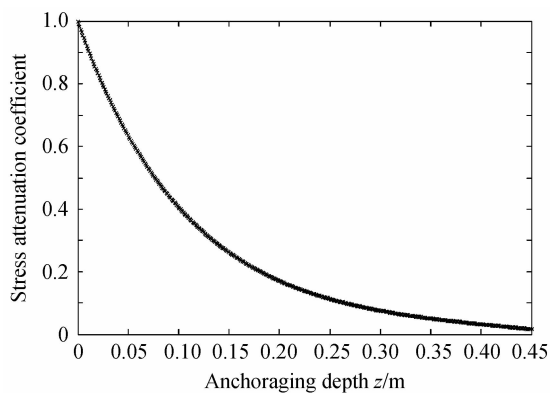


图3 锚头内沿轴线方向的钢丝应力分布

Fig.3 Stress distribution of steel wire in anchorage zone

2 斜拉索锚头应变衰减特性分析

2.1 锚头轴向非均匀应变简化

由图3可见,锚头内钢丝轴向应力呈指数衰减趋势,由于FBG栅区仅有10mm,为了方便起见,将每个FBG栅区内应变简化为线性衰减应变.根据式(1),当FBG分别植入深度分别为10cm、15cm、20cm时,其简化的线性应变衰减公式分别为

$$y = -13.532x + 1623.8 \quad (0 \leq x \leq 10 \text{ mm})$$

$$y = -8.358x + 1050.7 \quad (0 \leq x \leq 10 \text{ mm})$$

$$y = -5.170x + 688.5 \quad (0 \leq x \leq 10 \text{ mm})$$

式中, x 为光纤光栅轴向坐标,以光纤光栅一端为坐标零点, $0 \leq x \leq l$, l 为光栅长度, $l = 10 \text{ mm}$.

2.2 线性非均匀应变对FBG应变传感性能的影响分析

当线性非均匀应变作用于光纤光栅栅区时,会引起FBG栅距与折射率分布的双重变化,使得其反射谱特性与FBG光谱特性出现较大差异.假设光纤光栅轴向应变为 $\epsilon_z = kx + \epsilon_0$,其中 x 为光纤光栅轴向坐标,以光纤光栅一端为坐标零点, $0 \leq x \leq l$, k 为斜率, ϵ_0 为起始端应变.

线性非均匀应力作用下,光纤光栅栅区微观结构如图4所示.

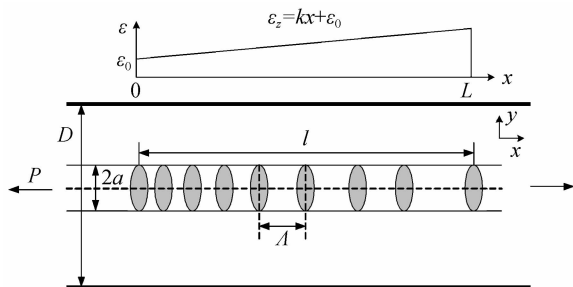


图4 光纤光栅轴向非均匀受力微观结构

Fig.4 Microstructure of FBG under axial non-uniform force

假设光纤光栅栅区长度为 l 、栅区基元长度为 dl .光纤光栅可简化为由 $N(N = l/dl)$ 个栅区基元级联而成,而每段光纤光栅均可表示成^[10]

$$\begin{bmatrix} E_i^+(0) \\ E_i^-(0) \end{bmatrix} = T_{\text{FBG}i} \cdot \begin{bmatrix} E_i^+(dl) \\ E_i^-(dl) \end{bmatrix} \quad (2)$$

所以长为 l 的光纤光栅可表示为

$$\begin{bmatrix} E^+(0) \\ E^-(0) \end{bmatrix} = \prod_{i=0}^N T_{\text{FBG}i} \cdot \begin{bmatrix} E^+(l) \\ E^-(l) \end{bmatrix} \quad (3)$$

当光纤光栅受到应变为 $\epsilon_z = kx + \epsilon_0$ 轴向非均匀应变作用时,可以认为单个栅区基元内的应力是均匀的.为此,整个FBG栅区的非均匀应力就简化为 N 个受到均匀轴向应变光纤光栅基元的级联作用.

将计算简化得到的锚固深度10cm、15cm、20cm三个典型位置的线性应变加载于FBG栅区,利用式(3)可仿真得到如图5所示的反射光谱仿真结果:非均匀线性应变作用下,锚固深度10cm、15cm、20cm三个典型位置的FBG均出现不同程度的光谱展宽、光谱移位及峰值降低现象:1)锚固深度10cm处,应变变化率最大,其光谱畸变最严重,光谱主峰已出现明显的裂变,中心波长峰值强度降低为83.6%,两竞争旁瓣峰值波长差为0.176nm;2)锚固深度15cm处,应变变化率较大,其光谱畸变较严重,光谱主峰已出现明显的裂变,已出现竞争旁瓣,但旁瓣峰值较主峰仍较小,主峰反射强度降低为93.3%,两竞争旁瓣峰值为86.6%,波长差为0.189nm;3)锚固深度20cm处,应变变化率较小,其光谱畸变程度较轻,光谱主峰随未出现明显的裂变,但已有明显的光谱展宽迹象,主峰反射强度为98.32%.

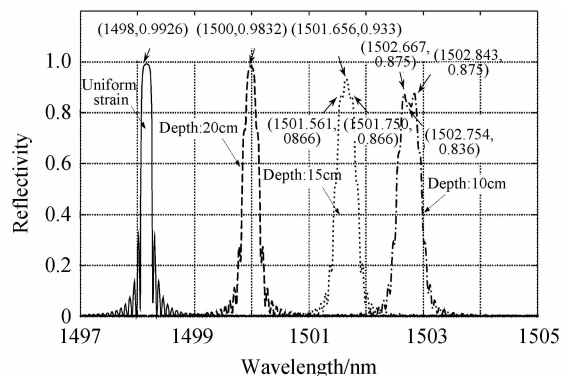


图5 仿真结果

Fig.5 Simulation Results

综合以上,常规FBG应变传感器无法适用于锚头轴向应变测量.

3 应变均化FBG测力传感器

3.1 传感器均化结构

由前述分析可知,斜拉索锚头非均匀应变作用下,常规FBG无法适用.为了克服非均匀应变对FBG应变测量效果的影响,提出了如图6所示的应变均化FBG传感器.

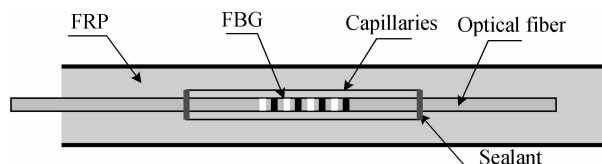


图6 应变均化FBG测力传感器结构

Fig.6 Strain homogenization structure of FBG sensors

如图6所示,应变均化传感器将FBG直接与有机胶粘接的方式改进为将FBG封装在薄壁毛细管内,利用毛细管对封装材料传递至FBG栅区的应变进行隔离,整个FBG栅区仅有两端受力,保证FBG栅区应力

的绝对平均。

设毛细管起始端锚固深度为 h_1 , 毛细管长度为 L , 钢丝弹性模量 E_1 , 由式(1) 可推导得毛细管沿程的总变形量为

$$\Delta L = \int_{h_1}^{h_1+L} \frac{(0.9807 \cdot e^{-9.27z} + 0.02)\sigma_0}{E_1} dz \quad (4)$$

经简化后

$$\Delta L = \frac{0.9807\sigma_0}{9.27E_1} (e^{-9.27h_1} - e^{-9.27(h_1+L)}) \quad (5)$$

测得传感器的理想均化应变为

$$\epsilon_m = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0.9807 \cdot \sigma_0}{9.27 \cdot E_1 \cdot L} (e^{-ah_1} - e^{-a(h_1+L)}) \quad (6)$$

3.2 传感器力学特性分析

对于如图 6 所示的传感器结构而言, 毛细管材料的选择对于传感器性能将会有较大的影响. 设毛细管外径为 d , 壁厚为 t , 弹性模量为 E_m . 截取毛细管锚固深度为 z 微元体进行分析, 其受力分析图如图 7 所示。

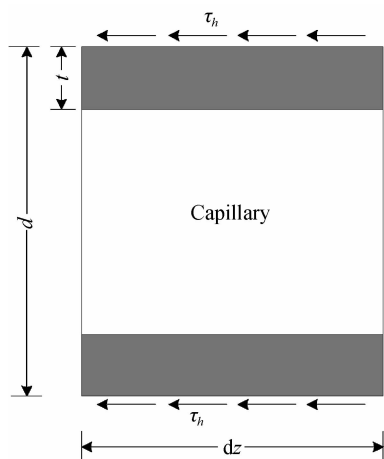


图 7 毛细管微元体

Fig. 7 Micro unit of capillary

锚固深度为 z 处毛细管微元体的应变值为

$$\epsilon_{hm} = \frac{\tau_h \cdot \pi d \cdot dz}{E_m \cdot \pi d \cdot t} \quad (7)$$

未植入毛细管状态下, 截取锚固深度为 z 处, 与毛细管相同直径锚固填料微元体进行分析. 设锚固填料外径也为 d , 弹性模量为 E_2 , 其受力分析图如图 8 所示。

由于毛细管直径较小, 锚固填料径向应变近似均匀. 设锚固填料弹性模量为未植入毛细管状态下, 锚固深度为 z 处毛细管微元体的应变值为

$$\epsilon_{hr} = 4 \frac{\tau_h \cdot \pi d \cdot dh}{E_2 \cdot \pi d^2} \quad (8)$$

为了保证测得应变与原先应变值相同, 应满足

$$\epsilon_{hm} = \epsilon_{hr} \quad (9)$$

经推导可得

$$\frac{E_2 d}{4 E_m t} = 1 \quad (10)$$

所以, 在传感器制作中, 应依据式(10), 选择合适的毛细管材料与厚度。

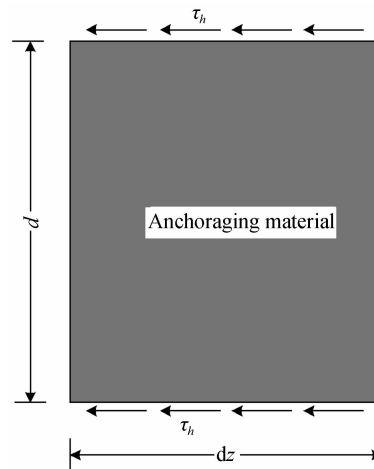


图 8 锚固填料微元体

Fig. 8 Micro unit of anchoring material

4 传感器制作与测试

4.1 毛细管规格

根据锚固填料力学试验结果, 其弹性模量约为 30 GPa.

为了不影响传感器植入后环氧砂浆在锚头内的正常流动, 避免空区的出现, 植入传感器的直径不能过大, 但传感器如果过细, 又很难保证传感器的成活率. 综合以上的因素, 传感器直径设定为 3 mm, 毛细管直径选定为 0.5 mm.

选择石英玻璃为毛细管材料, 其弹性模量为 75 GPa. 由式(10)计算可得, 毛细管厚度为 0.05 mm.

4.2 传感器制作

为了不影响锚头的原有结构与受力特性, 满足强度相容、界面相容与场分布相容等要求, 必须使传感器封装材料与环氧砂浆所用材料极性匹配, 且制作的传感器刚度与环氧填料刚度相同^[11-14]. 为此, 传感器选用碳纤维增强复合材料进行封装, 并通过调整碳纤维与环氧的配合比调整传感器刚度^[15].

传感器制作参量如表 1 所示。

表 1 传感器制作参量

Table 1 Sensor production parameters

| Parameter | Value |
|--------------------------------------|---------|
| Diameter of capillary | 0.5 mm |
| Thickness of capillary | 0.05 mm |
| Length of capillary | 1.5 cm |
| Proportion of carbon fiber and epoxy | 1 : 7.5 |
| Diameter of the sensor | 3 mm |
| Length of the sensor | 30 cm |

进行多次试制后, 成功制作出了如图 9 所示的植入式 FBG 应变传感器。

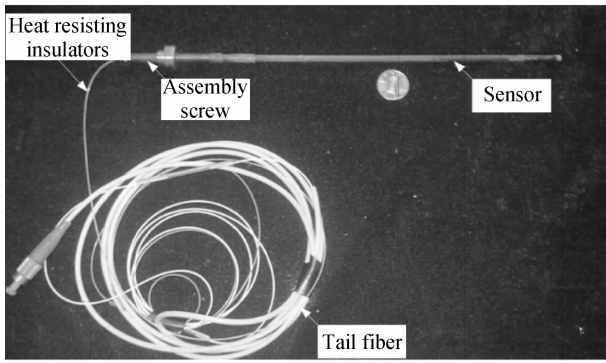


图9 FRP-OFBG 传感器
Fig.9 FRP-OFBG sensors

4.3 传感器测试

传感器包括传感段、装配段与尾纤三部分.为了测试传感器长度方向的均匀性,传感器段中封装有两个FBG应变均化测量单元,两测量单元的间隔距离为15cm.传感器性能在材料试验机上分别进行了测试,试验结果如图10所示.

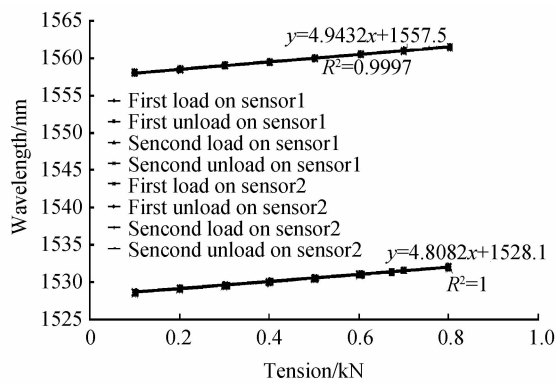


图10 力学实验结果
Fig.10 Mechanical test results

由图10可见,传感器中 sensor1 与 sensor2 均具备较好的线性与重复性,线性度均达到 0.99 以上.在同样的受力条件下,sensor1 与 sensor2 的应变变化量分别为 $3\ 594\ \mu\epsilon$ 与 $3\ 496\ \mu\epsilon$,应变灵敏系数相差 2.8%.通过计算,sensor1 处刚度为 30.6 GPa,sensor2 处的刚度为 31.48 GPa.

测试试验结果表明,受传感器封装材料内部均匀性的影响,传感器沿长度方向的刚度存在一定的不均匀性,但不均匀性较小,仅为 2.8%.传感器的量程及刚度满足设计要求.

5 原型缆索实验

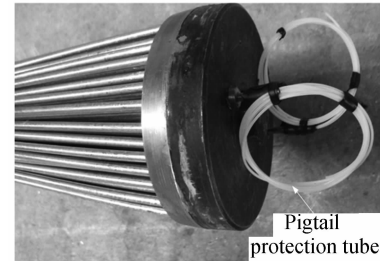
传感器性能通过考核后,还需在实际缆索上进行验证试验.试验用缆索的规格如表2所示.

试验缆索的锚头植入两根测力传感器,现场装配及试验图如图11所示.

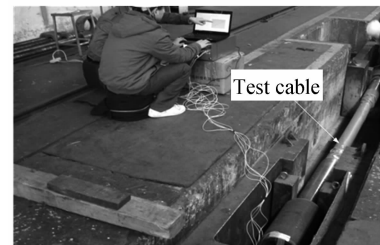
缆索张拉过程中实时监测 FBG 输出光谱,各个张力作用下 FBG 输出光谱图如图12所示.

表2 试验索规格参量
Table 2 Test cable specifications

| Parameter | Value |
|---------------------------|----------|
| Length of cable/m | 5 |
| The number of steel wires | 139 |
| Diameter/mm | $\Phi 7$ |
| Length of anchor/cm | 45 |

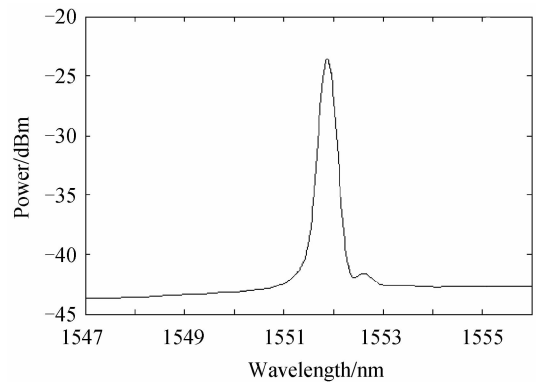


(a) Site map of planting sensors into anchor

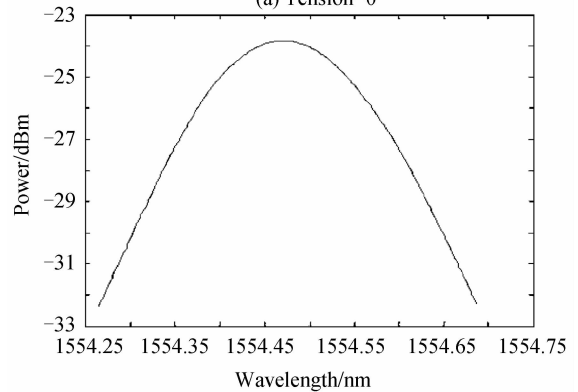


(b) Field test

图11 实索试验
Fig.11 Site map of tensile test



(a) Tension=0



(b) Tension=4.5MN

图12 缆索张拉过程中 FBG 输出光谱
Fig.12 Output spectrum of FBGS under cable tensioning process

由图 12 可见,除光谱中心波长随拉力发生变化外,未出现反射谱的畸变与剧烈抖动现象。

两根传感器输出中心波长与缆索张力的测试试验曲线如图 13 所示。

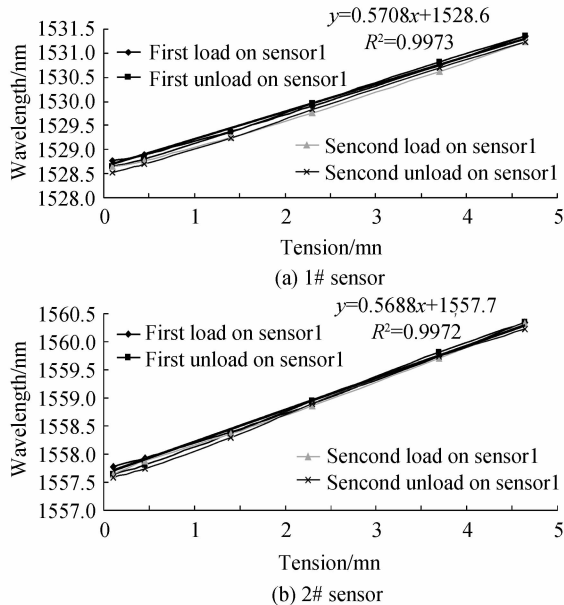


图 13 张拉试验结果

Fig. 13 Mechanical tensile test results

张拉试验结果表明,缆索索力与 FBG 输出中心波长在多次张拉过程中均具有较好的重复性,且呈较好的线性关系,拟合一次曲线的相关性达到 0.99 以上。

6 结论

由于常规 FBG 传感器无法适应锚头衰减型非均匀应变,提出了利用毛细管对 FBG 栅区进行应变隔离的应变均化 FBG 测力传感器结构。

根据传感器力学特性分析结果,研究确定了传感器制作参量,成功试制了锚头植入式应变均化 FBG 传感器,并进行了力学测试试验,试验结果表明传感器测量量程、刚度满足试验需求。将两只传感器成功植入试验缆索锚头内部,进行原型缆索力学拉伸试验,试验过程中对 FBG 反射光谱与 FBG 中心波长进行了实时监测,结果表明 FBG 输出光谱未受锚头非均匀应变影响,未出现反射谱的畸变与剧烈抖动现象,证明利用毛细管对锚头应变均化的传感器结构方案是成功的,且 FBG 反射谱中心波长与缆索张力呈较好的线性关系,说明锚头植入传感器与锚头结合良好,表明设计的锚头植入式 FBG 应变传感器能够满足智能型索力测量方案的应变测量需求。

参考文献

[1] LI H, OU J P, ZHOU Z. Applications of optical fibre Bragg gratings sensing technology-based smart stay cables[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, **47**(10): 1077-1084.

[2] ZHAO Xia, LIU Li-hua, LI Shen, *et al.* Review of intelligent cable[J]. *Metal Products*, 2011, **32**(1): 69-75.
赵霞,刘礼华,李盛,等. 智能缆索综述[J]. *金属制品*, 2010, **36**(3): 1-4.

[3] WU Jun, CHEN Wei-min, ZHANG Peng, *et al.* A novel cable tension monitoring method based on self stress attenuation feature in cable anchor head[J]. *Sensor Letters*, 2012, **10**(7): 1366-1369.

[4] WU Jun, CHEN Wei-min, YIN De-qiang, *et al.* Optimization of strain sensing for smart cable[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(1): 69-75.
吴俊,陈伟民,尹德强,等. 智能缆索传感方案优化[J]. *仪器仪表学报*, 2011, **32**(1): 69-75.

[5] JIANG Jian-shan, CHEN Wei-min, HUANG Shang-lian, *et al.* Magnetic circuit and parameters of cable tension sensor based on magneto-elastic effect [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(4): 738-743.
姜建山,陈伟民,黄尚廉,等. 基于逆磁致伸缩的索力传感器磁路分析与参量设计[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(4): 738-743.

[6] LIU Lin, CHEN Wei-min, ZHANG Peng, *et al.* Spectrum-multiplication of fundamental frequency for cable force monitoring using frequency method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(11): 2443-2448.
刘琳,陈伟民,章鹏,等. 振频法索力监测中自振频率的频谱倍增方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, **32**(11): 2443-2448.

[7] 李宏男,任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[8] TANG Da-qing, YANG De-xing, LIAO Wei, *et al.* Joystick transducer based on fiber bragg gating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 1993-1997.
汤大卿,杨德兴,廖威,等. 光纤光栅式飞机驾驶杆杆力传感器研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(11): 1993-1997.

[9] WU Hui-juan, LI Shan-shan, LU Xiang-lin, *et al.* A novel method for simultaneous intrusion detection and fire alarm in a single FBG-based fiber fence monitoring system configuration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1671-1676.
吴慧娟,李姗姗,卢祥林,等. 一种新型光纤光栅围栏防火防入侵同步预警系统[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1671-1676.

[10] 吴朝霞,吴飞. 光纤光栅传感原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[11] ZHU Xiang, YANG Yuan-hong. Spectrum of dual-wavelength phase shift FBG and its application in fiber sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906007.
朱翔,杨远洪. 双波长相移光纤光栅的光谱特性及传感应用[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0906007.

[12] MI Lin, YANG De-xing, JIANG Ya-jun, *et al.* Investigation of FBG voltage sensor based on joule heat[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906005.
米林,杨德兴,姜亚军,等. 基于焦耳热的光纤布喇格光栅电压传感器研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0906005.

[13] DONG Xin-yong, WEN Wu-qi, WEI Yu-hua, *et al.* Electricity tuning fiber bragg grating by metal coating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 422-424.
董新永,温午麒,魏玉花,等. 光纤布喇格光栅的金属管封装与电调谐[J]. *光子学报*, 2001, **30**(4): 422-424.

[14] LÜ Quan-chao, ZHAO Jian-lin. Fiber bragg grating sensor for simultaneous measurement of current and temperature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2810-2815.
吕全超,赵建林. 一种同时测量电流和温度的光纤光栅传感器[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2810-2815.

[15] PAL S, SUN T, GRATTA K T V, *et al.* Non-linear temperature dependence of Bragg gratings written in different fibres, optimised for sensor applications over a wide range of temperatures[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, **112**(2): 211-219.