

文章编号 1004-924X(2015)04-0919-07

光纤 Bragg 光栅应变计在 500 m 口径球面射电望远镜工程索力监测中的应用

孙 晓*, 王启明, 朱 明, 吴明长

(中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要:为了实时监测 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)索网支承结构的典型索力,避免传统索力监测方法对索网支承结构的影响和工作中的电磁干扰,提出了一种间接获取索力值的方法。该方法使用光纤布拉格光栅(FBG)传感器监测索头应变值来间接测量索力。测量时将 FBG 应变计与补偿温度计通过专用安装底座焊接于索头线性应变区域轴向,防止直接焊接对索头结构性能的影响;然后使用温度应变补偿法补偿温度变化对 FBG 应变计测量结果的影响。在索体出厂预张拉过程中对该方法进行标定得到相关索力换算公式系数,从而在实际工程应用中实现了索力的测量。试验结果表明,索力与索头应变线性拟合度高达 0.98,实际测量中绝对误差均方差为 1.38 t,在 FAST 工程主索工作索力范围内相对误差优于 3%,满足工程需求。该方法无电磁干扰,耐用性久,布线灵活简单,已成功应用于 FAST 工程中的 316 根典型主索的索力监测中。

关键词:光纤 Bragg 光栅;应变计;索力监测;温度补偿;射电望远镜

中图分类号:TN253;TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152304.0919

Application of optical fiber Bragg grating strain gauge to cable force monitoring of FAST

SUN Xiao*, WANG Qi-ming, ZHU Ming, WU Ming-chang

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

* Corresponding author, E-mail: sunxiaol0@mails.gucas.ac.cn

Abstract: To monitor the cable force of the cable-net supporting structure of the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope(FAST) and to avoid the effect of traditional measuring methods on the cable-net supporting structure and the electromagnetic interference, this paper presents a method to obtain the cable force values indirectly. The method uses Fiber Bragg Grating(FBG) sensors to monitor the cable connector strain to measure the cable force indirectly. In the measurement, a FBG strain gauge was installed at the linear strain region of the cable connector axially by using a dedicated welded base, by which the adverse effect of welding directly on the performance of cable connector structure was avoided. A temperature compensation method was used to compensate the effect of temperature changes on the FBG strain gauge measurement. The correlation coefficients were acquired by the calibration of the cable prestressing process. The cable force monitored then was calculated from

收稿日期:2014-09-29;修订日期:2014-11-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11173035, No. 11273036)

the calibrated relation in actual engineering applications. Test results indicate that the fitting linearity of the cable force and the cable connector strain is up to 0.98 and the Root Mean Square (RMS) error in practical measurement is 1.38 t. The relative error is better than 3% within the range of the cable force for the FAST. The method is characterized by no electromagnetic interference, simple wiring, good reliability and long duration. It has been successfully applied to the cable force monitoring of 316 typical cables of the supporting cable-net in the FAST project.

Key words: Fiber Bragg Grating(FBG); strain gauge; cable force monitoring; temperature compensation; radio telescope

1 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器是一种典型的波长调制型光纤传感器^[1],其波长变化与外部环境物理量(温度、应力、应变)存在关联。自 1989 年 Melt 等人实现了 FBG 的紫外写入技术^[2]以来,FBG 传感器以其灵敏度高、尺寸小、重量轻、复用性好、信号传输距离远、抗电磁干扰能力强、可串联布线等诸多优点,被广泛应用于岩土^[3]、建筑物^[4]、桥梁^[5]等诸多领域的健康监测^[6]。

500 m 口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)^[7]是在贵州喀斯特洼地建造的巨型射电望远镜,采用整体索网结构作为反射面的支承结构,共需 6 670 根主索及 2 225 根下拉索,通过促动器牵动下拉索来控制主索节点位置,在 500 m 口径范围内的不同部位形成不同指向抛物面。在 FAST 工作时,索网结构一直处于变幅、不等应力水平的往复载荷作用,其应力松弛、变形、疲劳都将会影响 FAST 的整体结构,所以,索力监测对于 FAST 工程的安全评估以及维护有着至关重要的意义。

目前,广泛应用的索力测量方法有锚索计法^[8]、频率法^[9]以及磁通量法^[10]。其中,锚索计法需要串联安装,由于体积与重量较大,安装在索网结构中不但会对索网构成压力,而且会影响索网的耐疲劳性能;频率法要求索网为均质材料,不计自身重力,两端连接为铰支,仅做微幅振动且无横向外推力,因而频率法的应用受到了限制;磁通量法在工作时需要产生高电平脉冲激励信号,这对于在工作时对电磁环境有着极高要求的射电望远镜非常不利。由此可见,以上方法均不适用于

FAST 工程索力的长期监测,因此,选择一种适用于 FAST 工程的长期索力监测方法成为一项难题。

由于索体内力与索头表面应变之间存在很强的线性关系,所以本课题组尝试通过监测索头表面应变的方法来间接测量索体内力,而 FBG 应变计具有灵敏度高、耐用性久、布线简单等优点,尤其是在采集设备解调仪进行电磁屏蔽处理之后,FBG 应变计采集数据时对外界不会产生任何电磁干扰,从而非常有利于 FAST 工作时的实时索力监测。

本文提出了一种通过使用 FBG 式传感器监测索头的表面应变从而间接获取索力值的方法,使用专用的安装底座将 FBG 应变计安装于拉索索头线性应变区域的轴向,并使用保护外壳将补偿 FBG 温度计与应变计进行一体固定保护,确保传感器的安全耐用以及 FBG 应变计与温度计的温度一体性。使用温度-应变补偿法来解决 FBG 应变计在实际应用中存在的应变温度交叉敏感^[11]问题。利用拉索出厂的预张拉过程标定了传感器实测值与索力换算公式的相关系数,从而达到在实际工程中间接测量索力的目的。该方案具有耐用性久、无电磁干扰、布线简单等诸多优点,非常适用于 FAST 工程的索力监测。

2 工作原理

2.1 索力监测原理

FAST 工程所采用主索为 OVM. ST 型高应力幅拉索,长度为 11~12 m,公称截面积为 140~1 319 mm²,工作时最大应力值为 85.3×10^4 kg,最大应力幅可达 459.1 mPa,由钢绞线束成品索与两端的锚具、连接件组成,具有优异的动静载性能和隔离防腐能力。由于索体在工作状态中的应

变幅度较大,而且其外部高密度聚乙烯(HDPE)保护层不可破坏,所以无法将传感器直接固定在索体上。通过简化分析发现,作为索体连接部分的索头锚具,其表面轴向应变与索体内力之间存在很强的线性关系,因此可在索头表面轴向安装 FBG 应变计,通过测量索头应变来间接测量索力。

索头受力与拉索受力相等,并且与其弹性模量 E_c 、横截面积 A_c 、表面应变 ϵ_c 之间存在如下关系:

$$F_c = \epsilon_c A_c E_c = K_c \epsilon_c, \quad (1)$$

式中: $K_c = A_c E_c$ 为一常数。当索体受力发生变化时,索头受力为:

$$F_c = K_c (\Delta \epsilon_c + \epsilon_{c0}) = K_c \Delta \epsilon_c + K_c \epsilon_{c0}, \quad (2)$$

式中: ϵ_{c0} 为索头表面的初始应变, $\Delta \epsilon_c$ 为索头表面的应变变化量。由式(2)可知,当确定了索头初始应变以及常数 K_c 以后,通过测量索头表面的应变变化即可获取索力。而考虑到索头材质的非匀质性以及加工误差,初始应变以及常数 K_c 的计算数值与实际数值会有较大差异。所以为确保准确性,在拉索制索过程中提前安装传感器,在出厂张拉测试过程中,通过测量应变以及实际索力的对应关系,标定得出初始应变和 K_c 。

2.2 FBG 传感原理

由耦合模理论^[12]可知,FBG 对入射光可进行有选择的反射,其反射中心波长 λ_B 为:

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda, \quad (3)$$

式中: n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅周期。

当光栅外界应变(应力)发生变化时,弹光效应会引起光栅周期 Λ 以及有效折射率 n_{eff} 的变化^[13],即有:

$$\Delta \lambda_{B\epsilon} = \lambda_B (1 - P_e) \Delta \epsilon = K_\epsilon \Delta \epsilon, \quad (4)$$

式中: P_e 为有效弹光系数; $K_\epsilon = \lambda_B (1 - P_e)$, 为光栅的应变灵敏系数。

当光栅所处环境的温度发生变化时,发射中心波长产生变化:

$$\Delta \lambda_{BT} = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T = K_T \Delta T, \quad (5)$$

式中: α 为光栅热膨胀系数; ξ 为光栅热光系数; $K_T = \lambda_B (\alpha + \xi)$, 为光栅的温度灵敏系数。

当 FBG 的外界温度、应变(压力)同时发生变化时,反射中心波长会同时受到这两项因素的影响,即存在温度应变交叉敏感的问题。此时有:

$$\Delta \lambda_B = K_T \Delta T + k_\epsilon \Delta \epsilon + K_{\epsilon T} \Delta T \Delta \epsilon, \quad (6)$$

式中: $K_{\epsilon T}$ 为温度、应变交叉敏感系数,可表示为:

$$K_{\epsilon T} = \frac{K_T K_\epsilon}{\lambda_B} - 2 \lambda_B P_e \xi. \quad (7)$$

当温度、应变(压力)的变化范围不是很大时,交叉项对波长变化的影响很小,因此通常舍去交叉项,一般有:

$$\Delta \lambda_B = K_T \Delta T + K_\epsilon \Delta \epsilon. \quad (8)$$

当需要测量应变时,如何排除温度造成的干扰便成为 FBG 实际工程应用中的一项难题。

3 FBG 温度补偿问题

当 FBG 传感器作为应变计使用时,环境温度变化导致的波长漂移会对输出造成较大的影响。1993 年以来,人们就已经开始研究 FBG 传感器的温度应变交叉敏感问题。所提出的主要解决方案有^[14] 双波长矩阵运算法、双参量矩阵运算法^[15]、应变(温度)补偿法等。

针对工程需求,这里选择了应变(温度)补偿法,即在每个 FBG 应变传感器的附近安装 1 个仅受温度影响的 FBG 温度传感器,将 FBG 应变传感器由于温度以及应变共同引起的中心波长总漂移 $\Delta \lambda_B^\epsilon$ 减去对应的 FBG 温度传感器测得的中心波长漂移,从而得出仅由应变引起的波长漂移 $\Delta \lambda_{B\epsilon}$ ^[16]:

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{B\epsilon} &= \Delta \lambda_B^\epsilon - \Delta \lambda_{BT}^\epsilon = \Delta \lambda_B^\epsilon - K_T^\epsilon \Delta T = \\ &= \Delta \lambda_B^\epsilon - \frac{K_T^\epsilon}{K_\epsilon^\epsilon} \Delta \lambda_{BT}^\epsilon, \end{aligned} \quad (9)$$

式中: K_ϵ^ϵ , K_T^ϵ 分别为应变传感器和温度传感器的 FBG 温度灵敏系数。

根据式(8)和式(9)得到 FBG 应变传感器测得的应变值为:

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta \lambda_B^\epsilon}{K_\epsilon^\epsilon} - \frac{K_T^\epsilon}{K_T^\epsilon K_\epsilon^\epsilon} \Delta \lambda_{BT}^\epsilon, \quad (10)$$

式中: K_ϵ^ϵ 为应变传感器的应变灵敏系数。

本试验和工程中所使用的应变传感器和温度传感器的型号分别为 BGK-FBG-4150 型和 BGK-FBG-4700S 型,它们的工作温度均为 $-20 \sim 80$ °C,并且在此温度范围内可有效地补偿温度。但需要注意的是,由于日照不均匀等问题,该方法在室外应用时 FBG 应变传感器与温度传感器的温升很有可能出现较大差别,所以在安装时需使用保护外壳进行一体式覆盖。

此外,由于钢制索头在温度发生变化时表面亦会发生温差应变,所以测量索头因应力产生的应变值 $\Delta\epsilon_F$ 时应当排除温差应变造成的干扰,综合式(10),实际测得的应变值为:

$$\Delta\epsilon_F = \Delta\epsilon - \alpha \times \Delta T, \quad (11)$$

式中: $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 为索头热膨胀系数。

4 实 验

4.1 传感器的安装与数据采集

为了监测索头应变,FBG 应变传感器必须可靠地安装于索头轴向,而现有的安装方式通常使用黏结剂直接将传感器固定于被测结构表面,这种方法在长期监测中随着黏结剂的老化,传感器容易脱落失效。为了确保传感器安装的可靠性,本文采取焊接的方式安装传感器。但直接对索头表面进行焊接安装会破坏索头表面的防腐层,影响索头的耐腐蚀性能,且易产生焊接应力,影响索头寿命。为了解决这一问题,本文根据应变传感器尺寸设计了相应的安装底座,将底座提前与索头焊接并一起进行热处理,以不影响索头的结构性能。在后期安装传感器时,只需将传感器直接焊接于底座即可,传感器与索头之间实现了可靠的刚性连接。

在外部,本文设计了相应尺寸的保护外壳,将 FBG 应变计与温度计进行一体式覆盖保护,并在外壳中使用玻璃胶灌注固定,即避免了传感器在施工过程中遭到磕碰而失效,同时也保证了其温升的一致性,改善了防水性能,安装示意图如图 1 所示。

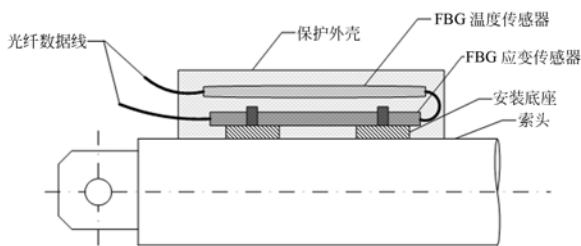


图 1 FBG 传感器的安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG sensor installation

应变计与温度计均采用优质的不锈钢外壳封装,具备优越的防水性能,可以应对绝大多数情况下的环境需求,在室外环境应用时能够保证信号稳定性和精度不受潮湿、电磁干扰及信号传输距离的影响。在本文的工程应用中,防护外壳以及

硅胶灌注密封进一步隔离了传感器与外界不利的环境条件。焊接安装有效防止在长期室外应用时可能产生的传感器松动、脱落等问题,保证了传感器的稳定性和寿命。

FBG 传感器的数据采集可以直接由解调仪完成,读出每个对应 FBG 传感器的中心波长实时值,从而得到每个 FBG 传感器的中心波长变化 λ_B 。每条光纤通道可串联多个 FBG 传感器,在本工程中,为保证采集的效率和稳定性,每条光纤通道最高串联 10 只 FBG 传感器,即 5 只 FBG 应变计以及与其相对应的 5 只 FBG 温度计。

4.2 传感器标定

将 FBG 应变传感器以及对应的补偿 FBG 温度计可靠地安装于索头上,之后根据式(10)测得其应变值。拉索制索出厂的过程中,需要对索体进行预张拉测试,利用这个过程,将提前安装好的 FBG 传感器测得的中心波长变化值与实时索力一一对应进行记录,并在换算为应变值后,通过式(8)进行线性拟合得出标定系数,从而得到索力与 FBG 传感器测得应变值之间的标定公式。

因安装底座为金属薄片结构,具备足够刚性,且应变计弹性模量远低于索头,所以安装后传感器所测得的应变值可近似等于索头表面的应变值^[17]。在索体预张拉过程中,索体受力不断发生变化,使用光纤光栅解调仪可读取 FBG 应变传感器与温度传感器输出中心波长的变化,根据传感器的出厂数据检测证书,查到相关系数,通过式(11)和式(5)换算得到索头表面的应力应变变化 $\Delta\epsilon_F$ 以及温度变化 ΔT 为:

$$\Delta\epsilon_F = 1\,558.06 \times \Delta\lambda_B^s - 2\,583.55 \times \Delta\lambda_{BT}^T - 1.2 \times 10^{-5} \times \Delta T, \quad (12)$$

$$\Delta T = 101.389 \times \Delta\lambda_B^T, \quad (13)$$

式中: $\Delta\lambda_B^s$ 为 FBG 应变计的波长变化量, $\Delta\lambda_{BT}^T$ 为对应 FBG 温度应变计的波长变化量。同时,记录下此时安装在拉索两端的拉力传感器实测的索力值 F_a 。

在试验过程中,选定一根索并在其出厂预张拉过程中对它进行标定。通过多次标定得到一组数据,然后根据式(2)的线性关系进行一次拟合后可得到索力换算公式,如图 2 所示。试验测得的标定公式为:

$$F = 0.135\Delta\epsilon_F + 55.1463, \quad (14)$$

与标定数据组的线性度高达 0.98。

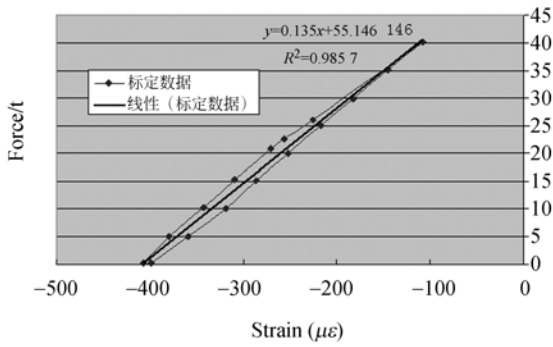


图 2 标定公式

Fig. 2 Calibration formula

4.3 索力监测试验

在室外温度为 19~32 ℃ 下利用拉索试验台模拟索力工作情况进行了 3 组试验,拉索试验台如图 3 所示,索头上应变计的焊接安装如图 4 所示。



图 3 拉索试验台

Fig. 3 Test bench for cable stress relaxation

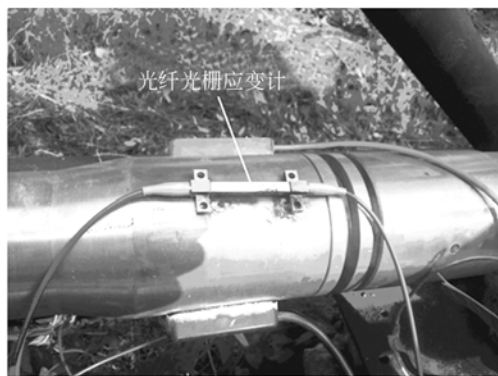


图 4 索头应变计的安装

Fig. 4 Gauge installation on cable connector

试验过程中,对索体进行逐级加载,加载为

0~40 t,每级增或减载 5 t 左右,每次荷载稳定后,记录下传感器的输出值与安装在拉索试验台另一端压力传感器对应的索力值,经换算得到索头应力应变与索力的分布关系,如图 5 所示。

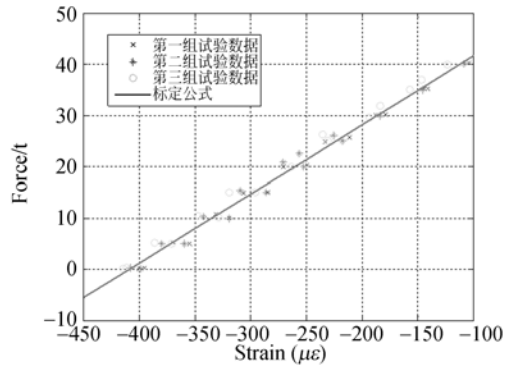


图 5 分组试验数据

Fig. 5 Different data sets

将试验所测得的 3 组试验数据应变值代入式 (14) 可得计算索力值 F , 减去每个测点索上压力传感器测得的实际索力值 F_{ai} , 可得绝对误差值:

$$e_i = F_i - F_{ai} = 0.135\Delta\epsilon_{Fi} + 55.1463 - F_{ai},$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

经计算,偏差值分布如图 6 所示,最大正偏差为 2.267 2 t,最大负偏差为 -3.024 8 t,均方差为 1.381 6 t。

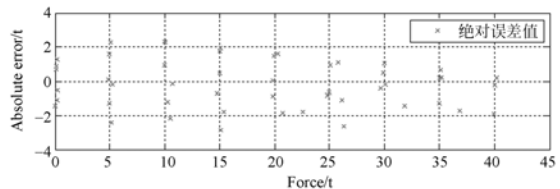


图 6 FBG 压力传感器实测索力的绝对误差值

Fig. 6 Absolute errors of cable force measured by FBG

由相对误差分析可见,量程越大,相对误差越小。由于在 FAST 实际工程应用中,被监测索体的荷载较大,工作索力主要在 40~80 t 左右,为排除低量程阶段的误差干扰,定义相对均方差为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum (\frac{e_i}{F_{ai}})^2}{N}},$$

$$(F_{ai} \geq F_{a_{min}}, i = 1, 2, \dots, n).$$

对应不同的最小索力测值,相对均方差如图 7 所示。可见在最小索力测值超过 25 t 时,相对均方差优于 3%。

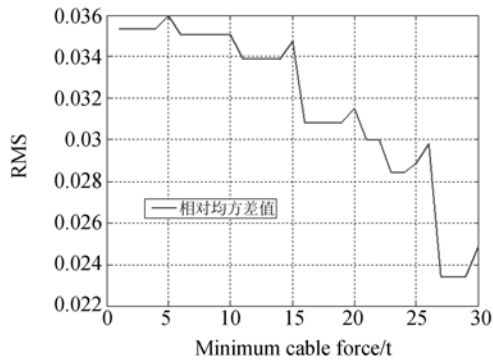


图 7 不同量程的相对均方差值

Fig. 7 RMSs of relative errors with different cable force ranges

5 结 论

本文根据 FAST 索网结构的特性,提出了一种使用 FBG 应变计监测拉索索头应变来间接测量索体索力的方法。测量时,使用温度应变补偿

法对 FBG 应变计在实际工程应用中最重要温漂进行了补偿。通过专用的安装底座安装 FBG 应变计,以有效防止直接焊接对索头性能破坏。使用一体式防护外壳对应变计和补偿温度计进行覆盖,在保护传感器的同时保证了温升一体性,提高了温度补偿效果。试验结果显示,索头应变值与索体索力的线性拟合度高达 0.98,使用该方法测量的索力与压力传感器误差值的均方差为 1.38 t,在 FAST 主索的工作索力范围内,相对误差优于 3%,满足工程需求。

将 FBG 应用于大射电望远镜 FAST 的索力测量最大的优点是该方案对外界不会产生电磁干扰,即传感器可以在望远镜工作时实时采集数据,而不干扰望远镜的工作。同时,FBG 具有结构轻便、寿命长久、布线简单等优势,在长期的索力监测中,简化了布线工程量,延长了监测系统的工作寿命,而在实际工程中大大提高了整体索力监测系统的工作性能。目前,该方案已经成功应用于 FAST 工程索网 316 根典型主索的索力监测中。

参考文献:

- [1] 唐炜,史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. 光学精密工程,2002,10(1):79-83.
TANG W, SHI Y K. Optical fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(1):79-83. (in Chinese)
- [2] MELTZ G. Formation of Bragg ratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Opt. Lett.*, 1989, 14(15): 823-825.
- [3] YAO W Y, VENU G M A, CHAO W, et al.. Application of multiplexed FBG and PZT impedance sensors for health monitoring of rocks [J]. *Sensors*, 2008,8:271-289.
- [4] 王天昊,兰春光. 基于光纤传感技术的预应力混凝土收缩徐变损失监测[J]. 仪表技术与传感器, 2014,6:61-64.
WANG T H, LAN CH G. Monitoring prestressing loss caused by shrinkage and creep of concrete based on optical fiber sensing technology [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014,6:61-64. (in Chinese)
- [5] LARISSA S, JOHN B, THOMAS G, et al.. Delamination detection and characterization of bridging tractions using long FBG optical sensors[J]. *Science Direct*, 2007,38:2087-2096.
- [6] 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.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(3): 306-317. (in Chinese)
- [7] NAN R D. Five Hundred Meter Aperture Spherical Radio Telescope (FAST) [J]. *Science in China: Series G: Physics Mechanics & Astronomy*, 2006,49(2):129-148
- [8] 徐红清. 锚索测力计在唐河水电站改线公路滑坡治理工程中的应用[J]. 山西水利科技, 2013,4(13): 13-14.
XU H Q. Application of anchor cable ergometer in landslide treatment engineering on rerouted highway of Tanghe hydroelectric power station [J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 2013,4(13):13-14. (in Chinese)
- [9] 曹洪,张奔牛,黄月华. 基于振频法的索力监测系统的应用[J]. 山西建筑, 2013,39(9):142-145.
CAO H, ZHANG B N, HUANG Y H. Research on cable force monitoring system based on vibration frequency method and its application [J]. *Shanxi Architecture*, 2013,39(9):142-145. (in Chinese)
- [10] 李居泽,周彗天,彭渝舒. 一种基于磁通量传感技

- 术的预应力监测方法[J]. 城市建筑, 2013, 24: 308-309.
- LI J Z, ZHOU Y T, PENG Y SH. A prestressed monitoring method on the basis of flux sensing technology [J]. *Urbanism and Architecture*, 2013, 24: 308-309. (in Chinese)
- [11] 王雯珍, 刘月明. FBG 应变传感器温度交叉敏感补偿技术研究[J]. 光电技术应用, 2014, 29(2): 51-56.
- WANG W ZH, LIU Y M. Research on temperature cross sensitivity compensation technology of FBG strain sensor[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(2): 51-56. (in Chinese)
- [12] MAASKANT R, ALAVIE T, MEASURES M R, *et al.*. Fiber optic Bragg grating sensors for bridge monitoring [J]. *Cement and Concrete Composite*, 1997, 19: 21-33.
- [13] 李玉龙, 胡勇涛. 光纤布拉格光栅在焊接监测中的应用[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2803-2812.
- LI Y L, HU Y T. Application of optical fiber Bragg grating in welding monitoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2803-2812. (in Chinese)
- [14] 陈丽娟, 贺明玲, 王坤. 光纤光栅传感器交叉敏感问题解决方案[J]. 数字通信, 2012, 6(4): 15-17.
- CHEN L J, HE M L, WANG K. Solutions of optical fiber grating sensor cross sensitivity[J]. *Digital Communication*, 2012, 6(4): 15-17. (in Chinese)
- [15] 赵明富, 王念, 罗彬彬, 等. 可同时测量蔗糖浓度和温度的组合光纤光栅传感器[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 476-482.
- ZHAO M F, WANG N, LUO B B, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and concentration of sugar solution based on hybrid fiber grating sensor[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 476-482. (in Chinese)
- [16] 郭明金, 姜德生, 袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 324-330.
- GUO M J, JIANG D SH, YUAN H C. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 324-330. (in Chinese)
- [17] 吴入军, 郑百林, 贺鹏飞, 等. 埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 24-30.
- WU R J, ZHENG B L, HE P F, *et al.*. Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 24-30. (in Chinese)

作者简介:



孙 晓(1987—),男,山东临沂人,博士研究生,2010年于曲阜师范大学获得学士学位,主要从事大射电望远镜结构健康监测的研究。E-mail: sunxiao10@mails.gucas.ac.cn

导师简介:



王启明(1961—),男,辽宁沈阳人,博士,研究员,博士生导师,1982年于吉林大学获得学士学位,1995年,2000年于东北大学分别获得硕士、博士学位,主要从事机、电、自动控制和结构工程,天文技术与方法的研究。E-mail: qm-wang@bao.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)