

文章编号: 0258-7025(2010)06-1510-06

基于锚固区光纤布拉格光栅应变传感的智能缆索技术

吴俊^{1,2} 陈伟民¹ 章鹏¹ 刘琳¹ 刘立¹

(¹ 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030; ² 重庆交通大学西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要 在分析了光纤布拉格光栅(FBG)应变传感及索力测量机理的基础上,根据静力学原理对缆索索身、连接筒、锚固区应变分布进行了分析,提出了一种基于锚固区 FBG 应变传感的新型缆索索力测量技术,并根据 FBG 工作稳定性原则,对 FBG 植入锚固区的位置进行了优化。设计了缩比模型实验,通过将 FBG 植于 3 根钢丝几何中心,保证了 FBG 工作的稳定性。实验结果表明锚固区内 FBG 所测应变值仅为锚固外 FBG 所测应变值的 62%,且锚固区内部 FBG 中心波长与拉力值之间呈较好线性关系。证明了锚头内应变逐渐减小理论的正确性及该索力测量方法的可行性。

关键词 光纤通信;智能缆索;索力;光纤布拉格光栅;应变传感;锚固区

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1510

Smart Cable Technology Based on Fiber Bragg Grating Strain Sensing in Cable Anchorage Zone

Wu Jun^{1,2} Chen Weimin¹ Zhang Peng¹ Liu Lin¹ Liu Li¹

¹ Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400030, China
² Southwest Water Transport Research Department, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China

Abstract The mechanisms of fiber Bragg grating (FBG) strain sensors and cable tension measurement are analysed, and strain distribution of cable body, connecting tube, and anchorage zone are also analysed, and then a new cable tension measurement method based on FBG strain sensing of anchorage zone is proposed. Based on the stability principle of FBG, the embedded location of FBG is studied. Scale model experiments are carried out, and the FBG is embedded in the geometrical center of three steel wires to ensure the work stability of FBG. Experimental results show that the measured strain of anchoring region is only 62% of that of measured strain outside, and the central wavelength of the FBG in anchorage zone has a good linear relationship with the tension. The correctness of the theory and feasibility of the cable force measurement method are proved.

Key words optical communications; smart cable; tension; fiber Bragg grating; strain sensing; anchorage zone

1 引 言

缆索作为大桥的主要承力部件,大桥的线型、内力分布、荷载,缆索本身的衰退、失效,乃至桥梁整体结构安全都会集中表现在缆索的受力上。为便于掌握缆索自身以及全桥的结构安全与营运状态,及时发现事故先兆、防止突发性事故发生,必须对缆索索力进行实时监测^[1,2]。基于应变传感机理的索力测

量方法由于以与张力直接相关的应变为测量对象,较磁弹性法^[3~5]、振频法^[6~8]等传统索力测量方法而言,其具有直接测量、不受缆索边界条件影响的优点,是测量精度较高的一种手段。而将应变传感元件在缆索制作过程中直接植入缆索结构,赋予缆索自感知索力的能力,使其成为“智能缆索”,不仅能够实现传感元件与缆索之间的高效集成及充分融合,

收稿日期:2010-03-25;收到修改稿日期:2010-05-10

基金项目:国家自然科学基金(50975301)和国家科技支撑计划(2007BAE15B04)资助课题。

作者简介:吴俊(1981—),男,博士研究生,主要从事光电技术及系统等方面的研究。E-mail: wujun_gd@yahoo.com.cn

导师简介:陈伟民(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光电技术及系统等方面的研究。

E-mail: wmchen@cqu.edu.cn

以及缆索出厂后全过程的无缝监测,而且在缆索索力监测过程中,无需再添加外部检测部件。因此基于应变测量的“智能缆索”技术成为一个研究热点。

A. L. Kalamkarov 等^[9]将光纤布拉格光栅(FBG)等光纤类裸传感器件嵌入复合材料中,测量复合材料受力时的结构变化情况,后来这种做法逐渐衍生为利用复合材料对光纤器件进行封装制作智能传感结构。王言磊等^[10~12]自 2004 年开始了有关光纤智能筋的研究,并探索了一种将光纤智能纤维增强复合筋埋入钢缆索,利用复合筋与钢丝的协调变形,通过测量智能筋应变实现对缆索索力测量的新方法。基于智能筋的缆索索力测量方法通过将 FBG 进行筋式封装,解决了纤细、脆弱的 FBG 器件埋入缆索过程中成活率低的问题,同时通过全长敷设智能筋的方法,解决了应变传感元件无法精确感知被测对象应变的问题,大大提高了测量精度。但该方法中,纤维增强复合筋智能筋必须在制作过程中沿缆索全长敷设,对工艺要求苛刻、成本较高,且在缆索扭绞过程中,智能筋要随着钢丝一起扭绞,扭绞过程中,智能筋承受较大剪切力作用,较易造成智能筋中应变传递层的结构破坏,对智能筋的长期稳定可靠工作埋下潜在危险。

为了简化智能缆索的植入工艺、降低成本,并尽可能减小植入工艺对传感结构的伤害,必须对现有缆索全长植入智能筋的传感方案进行优化,为此提出了一种基于锚固区 FBG 应变传感的智能缆索新技术。

2 FBG 应变传感及索力测量机理

FBG 是指利用单模掺锗光纤经紫外光照射成栅技术形成的全光纤传感元件。FBG 应变传感元件作为现有光纤传感技术中应变测量范围较大、技术较为成熟的一种,是缆索应变测量的首选。

2.1 应变传感机理

FBG 应变传感的基本原理^[13]可以归结为对布拉格(Bragg)中心波长的测量。FBG 中心波长

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

式中 n 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。

FBG 中心波长变化与应变、温度的关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})] \right\} \epsilon + \left[\alpha + \frac{1}{n} \zeta \right] \Delta T, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为中心波长变化, λ_0 为原始中心波长, ρ_{11} 与 ρ_{12} 为光弹常数, ν 为泊松比, ϵ 为应变, α 为热膨胀

系数, ζ 为热光常数, ΔT 为温度变化。

令

$$K_\epsilon = 1 - \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})],$$

$$K_T = \alpha + \frac{1}{n} \zeta,$$

可得

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T = \frac{\Delta\lambda_\epsilon}{\lambda_0} + \frac{\Delta\lambda_T}{\lambda_0}, \quad (3)$$

式中 K_ϵ 为 FBG 应变传感灵敏度系数, K_T 为 FBG 温度传感灵敏度系数, $\Delta\lambda_\epsilon$ 为由应变引起的中心波长变化, $\Delta\lambda_T$ 为由温度变化引起的中心波长变化。通过温度参考光栅法、双参数矩阵法等对温度影响因素进行隔离^[14],可得应变计算公式为

$$\epsilon = \Delta\lambda_\epsilon / (\lambda K_\epsilon). \quad (4)$$

2.2 索力测量机理

对于弹性变形的钢丝材料而言,钢丝的变形与应力大小成正比

$$\epsilon_s = \sigma_s / E_s, \quad (5)$$

式中 σ_s 、 ϵ_s 分别为钢丝应力、应变, E_s 为钢丝弹性模量。

将 FBG 应变传感元件固定于钢丝,使 FBG 与钢丝协同变形,采用温度补偿方法消除(3)式中温度对中心波长值的影响,根据(4)式可得钢丝应力

$$\sigma_s = \epsilon_s E_s = \frac{\Delta\lambda_\epsilon}{\lambda_0 K_\epsilon} E_s. \quad (6)$$

若缆索内共有 n 根半径为 r 的钢丝,则缆索索力为

$$f_s = \sigma_s n \pi r^2 = \frac{E_s n \pi r^2}{\lambda_0 K_\epsilon} \Delta\lambda_\epsilon = \frac{E_s n \pi r^2}{\lambda_0 K_\epsilon} (\lambda_0 + \Delta\lambda_\epsilon) - \frac{E_s n \pi r^2}{K_\epsilon}, \quad (7)$$

对与特定缆索和 FBG 而言, E_s 、 n 、 r 、 λ_0 、 K_ϵ 均为常值,所以缆索索力公式可简化为

$$f_s = k_s (\lambda_0 + \Delta\lambda_\epsilon) + b_s = k_s \lambda + b_s, \quad (8)$$

式中 $k_s = E_s n \pi r^2 / (\lambda K_\epsilon)$ 、 $b_s = E_s n \pi r^2 / K_\epsilon$ 。

通过标定实验,得到几组 f_s 和 λ 的值后,就可以通过数据拟合求得 k_s 和 b_s 。在实际使用中可通过监测 FBG 中心波长值,实现对缆索索力进行实时测量。

3 基于缆索全长应力分布特性的智能缆索技术

3.1 缆索全长受力分布

由于斜拉桥是目前最主要的缆索承重桥形式,因此斜拉桥用拉索是最主要的缆索。斜拉索一般包

含索身、连接筒、锚固区 3 个部分。为了对缆索全长植入智能筋的传感方案进行优化,首先必须对斜拉索全长的应力分布特性进行分析,以便摸索出植入工艺简单、应变感知精确的新传感方案。由于缆索索力很大程度上反映的是与桥梁结构相关的静力学指标,所以索力监测主要获取索力的静力学数据,因此文中只讨论其静态应力分布特性。

3.1.1 索身受力

现有缆索用钢丝的一般设计标准为 1670 MPa。根据设计规范,缆索正常工作状态下,钢丝承重为设计标准的 40% 左右,由于钢丝弹性模量 E_s 约为 200 GPa,所以在不考虑温致应变的情况下,可得钢丝应变 ϵ_{b1} 为 $\sigma_s \times 40\% / E_s = 3340 \mu\epsilon$ 。

对于索力监测系统而言,不仅需能对正常工作阶段的缆索索力进行监测,更重要的是,必须能对桥梁及缆索结构发生轻微破坏情况下的异常索力进行连续的稳定监测。

一旦桥梁结构发生变异或缆索内部分钢丝发生断裂,缆索应变会大大增加,桥梁、钢丝发生致命损坏的极限状态可以看成是钢丝应力达到设计值 100%,当应力进一步增大时,缆索将会完全断裂。破坏临界状态下的钢丝应变 ϵ_{b2} 为 $\sigma_s \times 100\% / E_s = 8350 \mu\epsilon$ 。

由以上分析可得,在不考虑温致应变的情况下,索身部分钢丝应变变化区间为 $\epsilon_b \in [\epsilon_{b1}, \epsilon_{b2}] = [3340 \mu\epsilon, 8350 \mu\epsilon]$ 。

3.1.2 连接筒受力

连接筒作为索身与锚固区之间的过渡段,其钢丝断面结构与索身一致,区别在于钢丝外围套有套筒,并在套筒内灌有防止钢丝腐蚀的密封填料,但由于填料刚性远远小于钢丝刚性,所以填料基本不承力,连接筒内钢丝受力状态可看成与索身部分钢丝近似相等,其应变与索身部分钢丝相同,仍为 $\epsilon_c \in [3340 \mu\epsilon, 8350 \mu\epsilon]$ 。

3.1.3 锚固区受力

锚固区剖面图如图 1 所示,锚固区内钢丝为便于从锚杯底部的锚固垫板穿出,在锚杯内按规定间隙被分开。为了保证锚固区内各根钢丝均匀受力,且为了减小对锚固垫板的作用力,锚杯内还需灌注锚固填料,并经高温固化使锚固料与钢丝呈一受力整体。

图 1 中单根钢丝及包裹锚固料的局部受力分析图如图 2 所示,钢丝在锚固区内不仅受应力 σ 作用,而且受锚固料的粘接力 τ 作用。在钢丝未与锚固料

发生相互滑移的情况下,钢丝处于静载平衡状态。

设锚固区总长度为 H ,在锚固深度为 h 的位置选取第 i 个钢丝微分体,其受力分析图如图 3 所示。

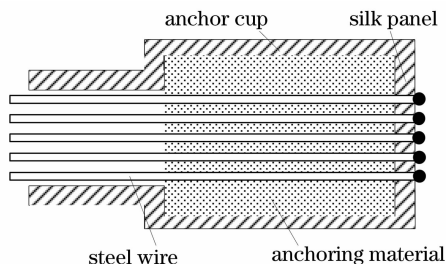


图 1 锚固区剖面图

Fig. 1 Profile of anchorage zone

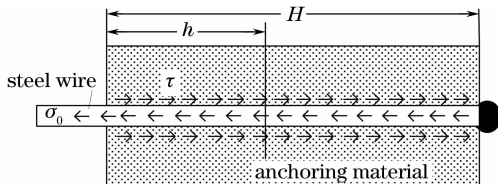


图 2 单根钢丝受力示意图

Fig. 2 Force scheme of a single steel wire

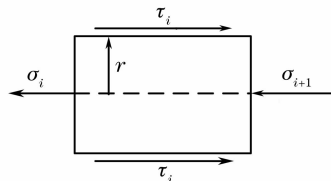


图 3 第 i 个钢丝微分体受力示意图

Fig. 3 Force scheme of the number i differential body of steel wire

由静载平衡条件可得

$$(\sigma_i - \sigma_{i+1})\pi r^2 = 2\pi r\tau_i dh, \quad (9)$$

经推导可得

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i - \frac{2\tau_i}{r} dh, \quad (10)$$

式中 r 为钢丝半径, σ_i, σ_{i+1} 分别为第 i 个钢丝微分体的前、后端应力, τ_i 为锚固料对钢丝的粘接力。锚固区内钢丝应力分布趋近于指数衰减函数^[15], 则锚固深度为 h 的钢丝所受应力为

$$\sigma_h = \sigma_0 \exp(-a_0 h), \quad (11)$$

式中 σ_0 为锚固区起始端应力, a_0 为与钢丝材料、锚固工艺和锚固材料相关的应力衰减系数。锚固深度为 h 的钢丝应变为

$$\epsilon_h = \frac{\sigma_0}{E_s} \exp(-a_0 h) = \epsilon_0 \exp(-a_0 h). \quad (12)$$

3.1.4 缆索全长应变分布

通过分别对索身、连接筒、锚固区应变的分析、计

算,可得缆索全长应变监测区间分布示意图,如图 4 所示。

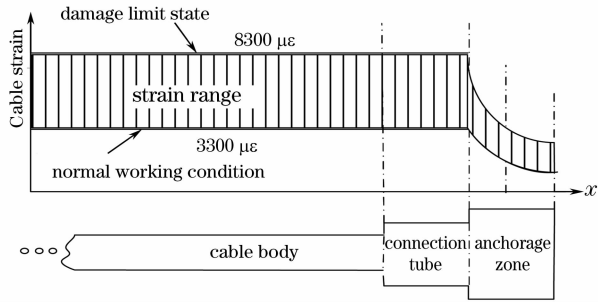


图 4 缆索全长应变分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the whole cable strain distribution

由图 4 可见,在索身处进行应变测量有两个特点:一是应变测量的绝对值大、应变监测区间大,可能达到应变传感器的极限数值(4000 με 以上);二是智能筋必须在缆索全长埋入,工艺较复杂。而由图 4 还可见,在缆索的锚固区内钢丝应变随锚固深度成大幅衰减的趋势,衰减稳定段的应变监测区间是 FBG 完全能适应的应变监测范围。

3.2 基于锚固区 FBG 应变传感的智能缆索方案

由分析发现,索身应变监测范围较大,一般应变传感元件难以满足此要求,而锚固区的应变监测范围却正好能符合 FBG 的测量要求。通过将应变测量位置由索身变换为锚固区,不仅可以简化智能缆索的植入工艺,降低对光纤器件的使用要求及成本,而且还能将索身的大应变测量降低为锚固区的常规应变测量,大大减小对传感元件的性能要求,而且从根本上确保了传感器植入缆索后的长期工作稳定性。为此提出了一种基于锚固区应变测量新型智能索力的测量方案,其示意图如图 5 所示。将 FBG 以适当封装形式植入缆索锚固区,将传感器信号引出线自锚固区底部引出接至专用索力测量仪,就可实现对索力的实时监测。

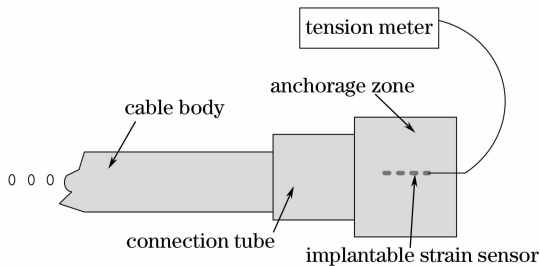


图 5 基于锚固区应变测量的索力测量系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cable tension measurement system based on measuring anchorage zone strain

4 FBG 植入位置优选

为了保证应变传感元件埋入锚固区后的工作有效性和长期可靠性,必须对 FBG 的埋入位置进行比较、选择。

4.1 工作稳定性原则

FBG 为圆柱形结构,工作时其受力示意图如图 6 所示。

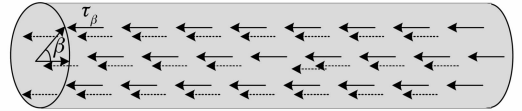


图 6 FBG 工作受力示意图

Fig. 6 Force schematic diagram of FBG

当 FBG 埋于测量基体中,其圆周各面在剪切作用力 τ_β 的作用下,发生变形,达到感受被测对象应变的目的。为了保证 FBG 的正常工作,必须保证剪切力作用下传感元件的结构稳定,即 FBG 仅发生轴向变形,无扭曲变形,所以必须保证^[16]

$$\tau_{\beta_1} = \tau_{\beta_2}, \quad \beta_1, \beta_2 \in [0 \sim 2\pi] \quad (13)$$

(13)式表明圆周各面所受剪切力必须大小相等、方向相同,才能保证传感元件工作安全、可靠。若不能满足(13)式,应变传感元件的结构就会发生扭偏,轻则使测量数据失真,重则使传感元件破坏。

4.2 位置选择

当应变传感元件埋于钢丝内部锚固料时,应变传感元件会同时受到传递于不同钢丝的剪切力作用。选取 3 根钢丝内部锚固料进行受力分析,其受力示意图如图 7 所示。设 3 根钢丝所受应力均为 σ_0 ,锚固区中钢丝均被锚固料所包围。钢丝埋入深度为 h 处,距钢丝轴心 r 处剪切力为

$$\tau(r, h) = \frac{(b^2 - r^2)/r}{(b^2 - a^2)/a} \tau(h), \quad (14)$$

式中 a, b 为待定常数。将(9)式代入(14)式,可得

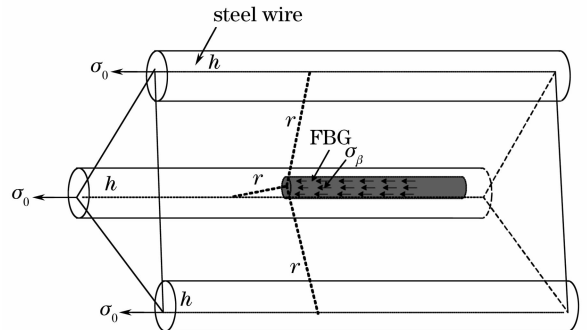


图 7 FBG 植于钢丝内部时的受力示意图

Fig. 7 Force diagram of FBG embedded in the center of steel wires

$$\tau(r, h) = \frac{(b^2 - r^2)}{2(b^2 - a^2)/a} \frac{d\sigma_h}{dh} \quad (15)$$

由(15)式可知,由于3根钢丝受力情况相似,所以当FBG器件处于3根钢丝几何中心时,受到的由钢丝传递来的剪切力大小相等、方向相同。所以将FBG器件植于钢丝包围锚固料的几何中心处,能够满足应变传感元件安全工作条件,是进行应变测量的最佳选择。

5 缩比模型实验

5.1 实验

为了验证理论分析的正确性,必须进行相似的缩比模型实验。为此,设计了如图8所示的实验用实验结构。为了比较锚固区内、外应变测量的结果,同时在锚固区内、外固定FBG1,FBG2。FBG2测得的数据来表征缆索索身应变,FBG1测得的数据来表征缆索锚固区应变,通过FBG1与FBG2数据的对比,检验锚固区内应变变量的衰减情况,如图8(a)所示。为了保证FBG的长期稳定、可靠工作,锚固区内FBG固定在由成 120° 分布3根钢丝包围锚固料的几何中心,如图8(b)所示。钢丝利用 $\phi 5$ mm, 1670 MPa规格钢丝。锚头制作好后,将锚头固定在材料实验机上进行实验。

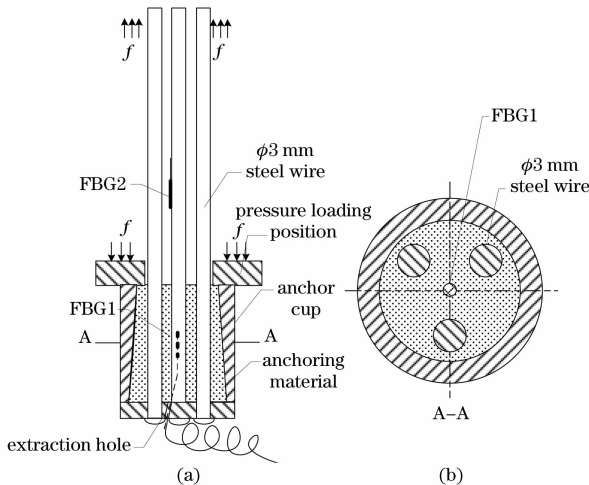


图8 缩比锚头实验装置

Fig. 8 Scaled test equipment

5.2 实验结果及分析

将图8所示缩比实验装置装夹于材料实验机进行拉伸实验。从4~46 kN进行拉伸实验,锚固区内、外FBG1,FBG2中心波长与拉力对应曲线如图9所示。

由图9可以看出,锚固区外的FBG2波长变化率和线性系数分别为0.209 nm/kN和0.9996,锚

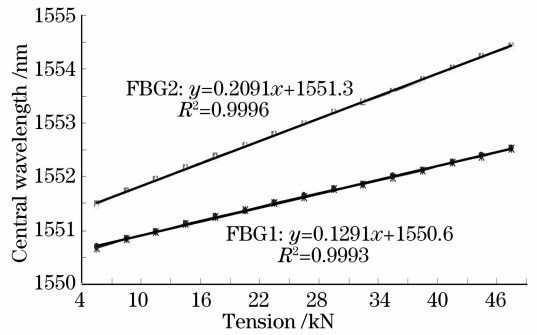


图9 FBG1,FBG2实验结果图

Fig. 9 Experimental results of FBG1 and FBG2

固内的FBG1波长变化率和线性系数分别为0.1291 nm/kN和0.9993。通过相关系数可知,FBG1,FBG2中心波长与拉力之间都具有较好的线性关系。通过比较波长变化率可以看出,在同样受力情况下,锚固区内FBG的波长变化率较锚固区外应变传感元件的波长变化率减少38%,换言之,通过测量位置的变化,使拉索索身的大应变测量可转变为锚固区的小应变测量,从而进一步降低了对FBG的测量要求。该结果与理论分析一致。而且该结果还表明,通过标定锚固区应变与缆索索力的关系,就可通过测量FBG波长变化实现对缆索索力的测量。

6 结 论

通过对缆索全长钢丝应变的分析计算,以及锚固区内部结构受力特性的分析,提出了基于锚固区FBG应变传感的智能缆索方案。实验中,通过将FBG植于3根钢丝几何中心,保证了FBG工作的稳定性,锚固区内FBG所测应变值仅为锚固外FBG所测应变值的62%,且锚固区内部FBG中心波长与拉力值之间呈较好线性关系,证明了锚头内应变逐渐减小理论的正确性,及该索力测量方法的可行性。

参 考 文 献

- 1 Chen Weimin, Zhu Yong, Feng Jun *et al.*. Experimental study on fiberoptic F-P strain sensor system [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, **35**(4): 36~39
陈伟民,朱永,封君等. 光纤法-珀应变传感器系统的实验研究[J]. *土木工程学报*, 2002, **35**(4): 36~39
- 2 Zhu Yong, Fu Yumei, Chen Weimin *et al.*. A health monitoring system for the Dafosi Yangzi river bridge [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, **38**(10): 66~71
朱永,符欲梅,陈伟民等. 大佛寺长江大桥健康监测系统[J]. *土木工程学报*, 2005, **38**(10): 66~71
- 3 Tang Dedong, Huang Shanglian, Chen Weimin. Temperature influence and compensation of cable tension sensor based on

- magneto-elastic effect [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2007, **28**(8): 1353~1357
- 唐德东, 黄尚廉, 陈伟民. 磁弹效应索力传感器的温度影响机理及补偿技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28**(8): 1353~1357
- 4 Tang Dedong, Huang Shanglian, Chen Weimin *et al.*. Research on cable tension sensor based on magneto-elastic effect with bypass excitation [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2007, **28**(7): 1159~1163
- 唐德东, 黄尚廉, 陈伟民等. 旁路励磁的磁弹性索力传感器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28**(7): 1159~1163
- 5 Chen Lu, Zhang Qilin, Du Juan. Investigation on the measurement of cable tension based on elasto-magnetic method [J]. *J. Electronic Meas. Instrum.*, 2007, **21**(5): 18~21
- 陈鲁, 张其林, 杜鵬. 基于弹性工程磁学理论的索张力测试的研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2007, **21**(5): 18~21
- 6 Wu Kangxiong, Liu Keming, Yang Jinxi. Measuring system of cable tension based on frequency method [J]. *China J. Highway and Transport*, 2006, **19**(2): 62~66
- 吴康雄, 刘克明, 杨金喜. 基于频率法的索力测量系统[J]. *中国公路学报*, 2006, **19**(2): 62~66
- 7 Liu Bihui, Ning Xin, Fu Yumei *et al.*. Study on remote real-time measurement technique of cable tension force [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2004, **25**(z3): 53~55
- 刘碧慧, 宁昕, 符欲梅等. 拉索索力远程实时测量技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(z3): 53~55
- 8 Zhao Yanjun, Guo Qi. Key technology of measuring the cable tensile force of cable-stayed bridges with vibration method [J]. *Communications Standardization Issue*, 2006, **11**(1): 87~90
- 赵燕军, 郭琦. 振动法测量斜拉桥索力的关键技术[J]. *交通标准化*, 2006, **11**(1): 87~90
- 9 A. L. Kalamkarov, D. O. MacDonald, S. B. Fitzgerald *et al.*. Reliability assessment of pultruded FRP reinforcements with embedded fiber optic sensors [J]. *Composite Structures*, 2000, **50**(1): 69~78
- 10 Wang Yanlei, Zhou Zhi, Hao Qingduo *et al.*. Research on fabrication technique and sensing properties of smart FRP-FBG composite laminates [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(8): 900~902
- 王言磊, 周智, 郝庆多等. FRP-FBG智能复合板的制作及其传感器特性研究[J]. *光子·激光*, 2007, **18**(8): 900~902
- 11 A. L. Kalamkarov, S. B. Fitzgerald, D. O. MacDonald *et al.*. Smart pultruded composite reinforcements incorporating fiber optic sensors [C]. *SPIE*, 1998, **3400**: 94~105
- 12 Deng Nianchun, Ou Jinping, Zhou Zhi *et al.*. A new type smart parallel wire stay cable [J]. *J. Highway Transportation Research Development*, 2007, **24**(3): 82~85
- 邓年春, 欧进萍, 周智等. 一种新型平行钢丝智能拉索[J]. *公路交通科技*, 2007, **24**(3): 82~85
- 13 Li Hongqiang, Yu Xiaogang, Miao Changyun *et al.*. Research of intelligent clothing for body temperature monitoring based on distributed optical fiber Bragg grating sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 208~212
- 李鸿强, 于晓刚, 苗长云等. 光纤布拉格光栅人体测温的关键问题研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 208~212
- 14 Cao Bin, Ou Pan, Jia Ming *et al.*. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 1959~1961
- 曹彬, 欧攀, 贾明等. 一种新型光纤光栅温度补偿装置[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 1959~1961
- 15 Yang Yong. Study on basic theory and its application of bond-slip between steel shape and concrete in SRC structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2003. 71~106
- 杨勇. 型钢混凝土粘接滑移基本理论及应用研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003. 71~106
- 16 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Research on stress transferring rules for clad fiber Bragg grating by using shear lag theory [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 636~640
- 赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 利用剪滞法对包覆光纤布拉格光栅应力传递规律的研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 636~640