

FRP-FBG桥梁智能拉索开发和传感特性研究应用

李冬生 周智 欧进萍

(大连理工大学土木工程学院, 辽宁, 大连 116024)

摘要:针对传统力传感器监测桥梁拉索应力布设不方便、测试精度低及其裸光纤光栅传感器比较脆、极限应变比较低等弊端, 提出利用高耐久性和高强度的玻璃纤维材料封装光纤光栅传感器, 研制出了光纤光栅智能筋复合传感器(GFRP-OFBGS)监测桥梁拉索应力。首先, 给出了GFRP-OFBGS的加工工艺及其在桥梁拉索中的布设方法, 使之与桥梁拉索协同变形。并根据不同的布设方法, 开发了粘结式和取代式两种自监测智能拉索。然后, 对不同直径GFRP-OFBGS传感特性进行了研究, 得出裸光纤光栅通过FRP封装后, 它的应变灵敏系数没有改变, 温度灵敏系数提高了1.7倍。随着GFRP-OFBGS的直径增加, 极限应变也相应增加。其次, 对粘结式和取代式两种自监测智能拉索分别进行了张拉试验, 其测试结果很好地表征了整个张拉过程和张拉力的大小。最后, 对GFRP-OFBGS传感器在拱桥系杆的布设工艺进行了探索, 并在四川峨边大渡河拱桥系杆施工中得到了具体实施和应用, 成功地监测了系杆的整个张拉过程。基于一年的监测数据, 检验了系杆张拉效果并判断了目前的运营状况。

关键词:桥梁拉索 光纤光栅 智能筋复合传感器 拉索应力 健康监测 拉索损伤

1 引言

作为桥梁主要承重元件——拉索, 其造价占全桥的25%~30%。由于桥梁跨越江河湖海, 易受周围大气、温度、湿度及天气的影响而发生劣化以及长期承受动荷载等特点, 很容易发生腐蚀和疲劳损伤。很多桥梁服役十几年, 甚至几年, 就不得不进行换索, 而换索的造价为新建的3~4倍。因此, 在这些工程结构中增设长期的健康监测系统, 以监测结构施工过程中和服役过程的安全状况, 并为研究结构服役期间的损伤演化规律提供有效的、直接的方法, 具有重要的意义。

目前, 通过大量的研究表明, 根据测试桥梁拉索的索力来评价它的安全状况, 可能是最有效、最简单的方法。索力监测的方法可以分为间接法和直接法。间接法最典型的就是采用频率法测试索力, 对于已经张拉好的拉索, 进行内力的测量, 频率法可能是唯一的选择。但是频率法测索力有一些局限性, 譬如对于长度比较短的拉索, 它的测试精度非常低。而且它只能得到拉索的张拉力, 张拉力的大小并不能完全反映拉索的真实安全状态, 这是因为尽管测的力不大, 但由

于腐蚀等原因, 拉索横截面削减的很多, 它的应力可能很大, 而真正评价吊杆的安全状态, 应该采取应力这一指标来衡量。测量吊杆应力的方法有: 磁通量法、电阻应变传感器、光纤光栅传感器等方法。采用磁通量法测应力优点是除磁化拉索外, 它不会影响拉索的任何力学和物理特性。但是, 该法的缺点是必须现场标定, 受温度场、电磁场的干扰很大, 而且费用很高。电阻应变片测应力的技术非常成熟, 但它的使用寿命有限, 温漂和零漂较严重, 只适合短期监测。

同传统的传感器相比较, 光纤光栅传感器有许多显著的特点, 如寿命长、抗电磁干扰、便于构成准分布光纤传感网络、体积小、重量轻、结构简单、埋入后对基体材料性能影响小等, 将之应用于土木工程结构应力监测是非常理想的。近十年来, 大型土木工程结构如桥梁、大坝、高层建筑、大跨空间结构、海洋平台、输油管道等应变监测基本上都采用了光纤光栅传感器监测结构的应力。但是裸光纤比较脆, 如果不封装, 很难满足土木工程结构粗放式施工的需求; 更甚的是裸光纤光栅的极限应变大概在 $4500\mu\epsilon$ 左右, 而拉索的屈服应变达到 $10000\mu\epsilon$ 左右, 如直接将裸光纤光栅黏贴在拉索上, 显然不能进行拉索失效

本文荣获第四届欧维姆优秀预应力论文二等奖。
原载于Measurement.

全应力监测。

为了解决这两个问题,本文提出利用纤维材料封装光纤光栅传感器,形成光纤光栅智能复合筋传感器,并对传感器的制作、传感特性进行了一系列的研究。并利用玻璃纤维—光纤光栅传感器(GFRP-OFBG)来监测拱桥吊杆应力,制作了两种不同类型的智能筋复合吊杆,对GFRP-OFBG传感器在吊杆中的布设工艺及其传感特性进行了详细的研究。最后,利用布设在系杆中的GFRP-OFBG传感器,成功地实现了四川峨边大渡河大桥的系杆张拉施工监测。

2 GFRP智能复合筋传感器(GFRP-OFBG)的制作

在生产GFRP筋的过程中,将带有光栅传感器的裸光纤搭在分束盘正中间的玻璃纤维束上,随着旋转拉力机的牵引,经过加热炉,光纤与玻璃纤维束一起固化,形成一个整体,与玻璃纤维束一起受力,这样就形成了GFRP智能筋复合传感器(FRP-OFBG)。其制作工艺流程和GFRP智能筋复合传感器如图1、2所示。

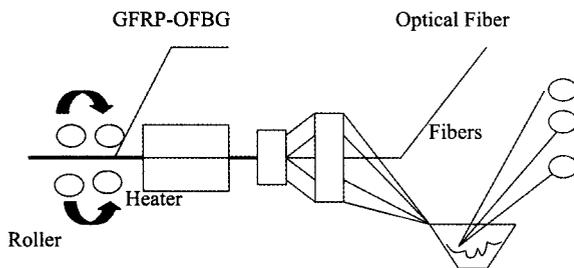


图1 GFRP-OFBG筋制作流程

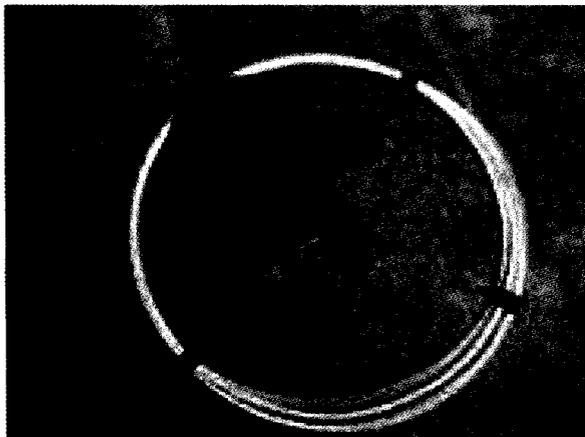


图2 GFRP-OFBG智能传感器

3 GFRP-OFBG传感器传感特性研究

通过GFRP封装后,光纤光栅的传感特性如何,是否改变了光纤光栅的传感特性,它的灵敏度是否降低了?这一系列的问题,我们可以通过标定实验来验证。在标定GFRP-OFBG应变传感特性的时候,我们将直径为5mm、中心波长为1551nm的GFRP-OFBG传感器直接布在 $\phi 15.24\text{mm}$ 的钢绞线上,并在同位置处布设高精度应变传感器,然后进行张拉试验,由于试验时间较短,不考虑温度变化。试验装置为钢绞线专用张拉台座。得到的实验结果如图3所示。从图3看出,光栅波长与应变具有良好的线性关系,其相关系数到达0.999以上,可见为一种理想的应变传感元件,应变灵敏系数为 $0.00121\text{nm}/\mu\epsilon$,从而可以得到裸光纤光栅尽管通过GFRP封装,但它的传感特性并没有发生改变。

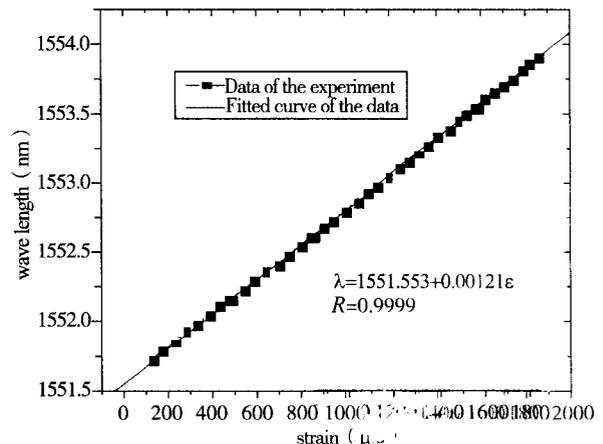


图3 GFRP-OFBG应变传感特性

同样,为了研究温度对传感器性能的影响,将直径为 $\phi 5\text{mm}$ 中心波长为 1549nm 的GFRP-OFBG传感器置于TYC-1低温检定无水乙醇槽和水槽中进行试验,温度范围为 $-50^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$,温度场精度为 0.01°C 。记录温度计的温度值和光纤光栅的波长值,得到的结果如图4所示,GFRP-OFBG的温度传感系数为 $17.24\text{pm}/^\circ\text{C}$,约为裸光纤光栅的($10\text{pm}/^\circ\text{C}$)1.7倍。

4 不同直径GFRP-OFBG传感器极限应变比较

我们分别将 $\phi 3.5\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 7\text{mm}$ GFRP-OFBG智能筋传感器用AB胶粘结在 $\phi 15.24\text{mm}$ 的钢绞线上,然后通过钢绞线专用张拉台座进行张

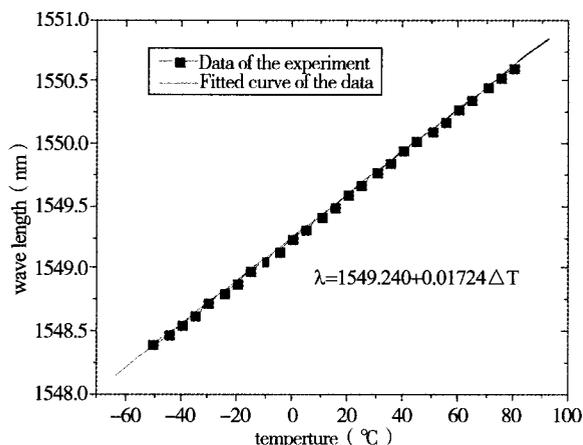


图4 GFRP-OFBG温度传感特性

拉。不同直径的智能传感器分别进行三组试验，GFRP-OFBG传感器能监测到钢绞线的应力和应变最终结果如表1~3所示。

表1 $\phi 3.5\text{mm}$ 智能传感器测试结果

实验分组号	1	2	3	平均值
光栅监测应力 (MPa)	759.15	888.85	832.02	826.67
GFRP-OFBG传感器 极限应变 ($\mu\epsilon$)	4401.65	4921.13	4609.09	4644.00

表2 $\phi 5\text{mm}$ 智能传感器测试结果

实验分组号	1	2	3	平均值
光栅监测应力 (MPa)	1293.82	1313.75	1262.33	1289.97
GFRP-OFBG传感器 极限应变 ($\mu\epsilon$)	6575.72	6820.70	6225.62	6540.68

表3 $\phi 7\text{mm}$ 智能传感器测试结果

实验分组号	1	2	3	平均值
光栅监测应力 (MPa)	1375.61	1337.57	1435.23	1388.47
GFRP-OFBG传感器 极限应变 ($\mu\epsilon$)	8030.02	7666.35	8631.19	8109.19

从表1~3可以看出，不同直径GFRP-OFBG智能筋传感器的极限应变是不同的，随着直径的增大而增大。从表3可以看出，贴在钢绞线上 $\phi 7\text{mm}$ 的GFRP-OFBG传感器的极限应变约为8000个微应变，它的极限应变约为裸光栅的1.8倍；它能监测到钢绞线极限应力的75%（ $\phi 15.24\text{mm}$ 钢绞线的极限应力为1860MPa），尽管GFRP-OFBG传感器还不能监测钢绞线损伤破坏全过程，但由规范可知，拱桥吊杆的设计荷载应小于钢绞线极限承载力的40%。因此从这个意义上来说， $\phi 7\text{mm}$ 的GFRP-OFBG传感器完全能够满足拱桥

吊杆的安全监测要求。同时从表中我们可以看出，利用GFRP-OFBG传感器来监测吊杆应力变化，宜选用大直径智能筋传感器，但是考虑在吊杆制作中方便布设，最好选用 $\phi 7\text{mm}$ 的GFRP-OFBG传感器。

5 GFRP-OFBG智能筋传感器在吊杆中的布设

利用GFRP-OFBG复合智能筋取代7丝 $\phi 5\text{mm}$ 钢绞线的中丝，使智能筋和钢绞线成为一个整体，形成取代式智能吊杆。具体做法是先把成型的钢绞线打开，取出中丝，然后根据钢绞线的长度截取等长智能筋作为中丝，为了匹配，智能筋的直径选为5mm，最后把散开的钢丝和智能筋旋转一定的角度，就得到新的智能钢绞线。这种钢绞线在现场施工非常方便，不需要改变施工设备，常规施工即可。加工成型的智能钢绞线如图5所示。

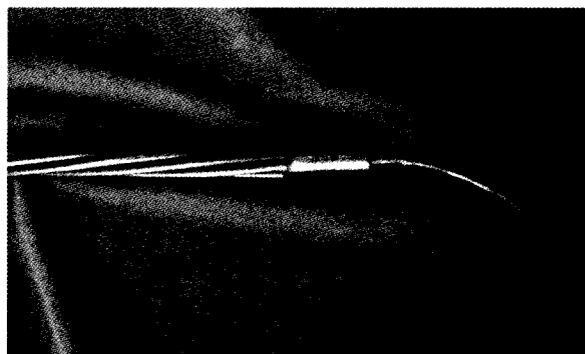
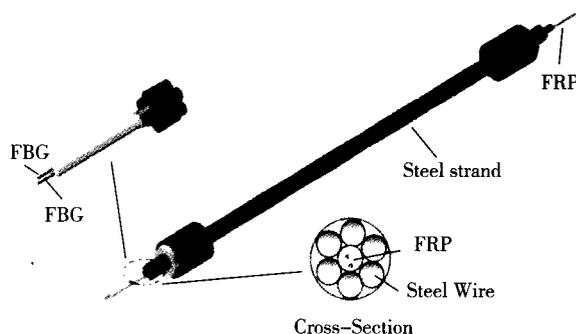


图5 GFRP-OFBG智能钢绞线

6 GFRP-OFBG智能吊杆实验

为了验证上述两种不同的布设方法能否准确监测吊杆的应力变化，这些布设工艺是否具有有效性，我们分别对这两种方法进行了试验。我们制作了2根长度约为5米的取代式智能吊杆，然后

在专用钢绞线张拉台座上进行试验，试验具体操作步骤为：首先把取代式智能吊杆穿过张拉台座、锚固力传感器、千斤顶和单孔锚具，然后用夹片夹紧钢绞线。在试验的时候，利用锚固力传感器测试吊杆的内力变化，光纤光栅解调仪解调智能筋的波长变化，同时在试验的时候用记号笔在钢绞线的端部给智能筋做好标记，实时观察智能筋是否出现了滑移，一旦出现滑移立即停止加载。试验测试加载装置如图6所示。

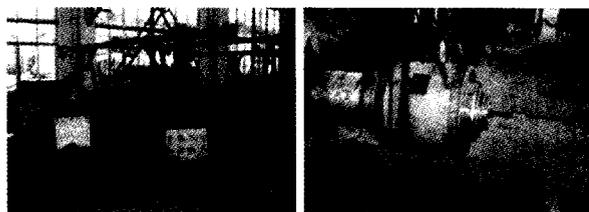


图6 智能吊杆拉伸试验

在加载之前，首先估算一下这种取代式智能吊杆的极限强度，我们可以这样估算，假设钢绞线每丝的承载能力相同且不考虑GFRP筋的承载力，现在由于用GFRP筋替代了钢绞线中的中丝，因此钢绞线的极限强度应为原来的6/7倍，大约为229kN。具体加载步骤为：先加载至0.2倍公称破断力 P_b 进行预张拉，再卸载至20kN。由20kN开始，每级20kN，加载速度不大于100MPa/min，逐级加载至80kN，持荷5分钟再卸载至20kN，按此过程再重复加载卸载两次；最后由20kN开始，每级20kN，逐级加载直到所有的光栅读数消失或者智能筋滑移为止。测试结果如图7~8所示。

从图7~8可以看出，取代式智能吊杆传感器也具有很好的重复性，能准确实时监测吊杆张拉过程，灵敏地反映出了试验中吊杆的受力变化，传感器光栅中心波长与吊杆内力变化成线性关系。在试验的过程发现，智能筋与钢绞线没有发生滑移，随着钢绞线断裂而破坏。这也说明取代式智能吊杆也能够准确反映吊杆内力变化。在实际设计吊杆内钢绞线根数的时候，我们只要注意到取代式智能钢绞线极限荷载为一般钢绞线极限荷载的6/7倍这个问题，增加一些钢绞线即可。

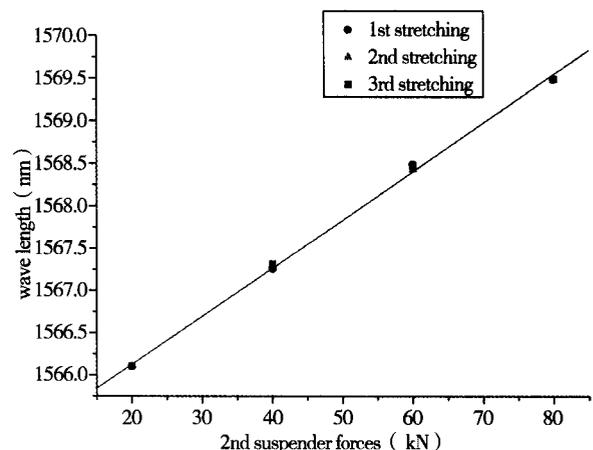
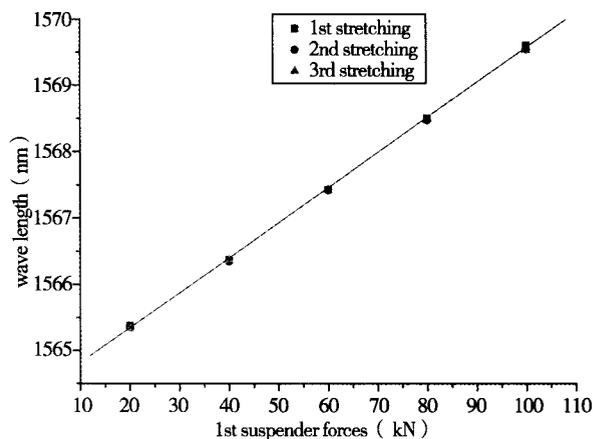


图7 取代式智能吊杆重复性试验

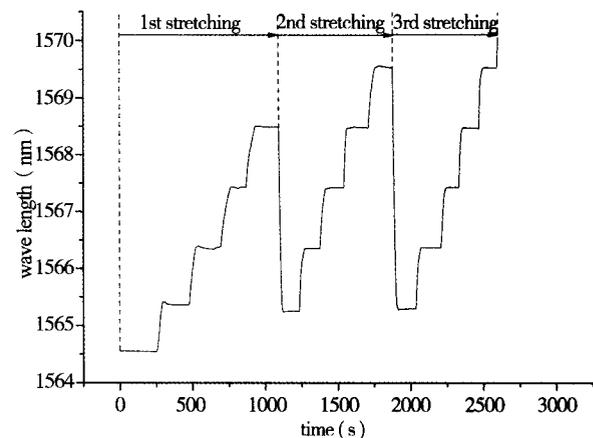


图8 取代式智能吊杆监测张拉过程

7 工程应用

四川峨边大渡河大桥的系杆主要包括锚具和系杆两部分，锚具采用31孔可换式系杆锚具，系杆杆身采用环氧喷涂无粘结钢绞线成品系杆。全桥共8根系杆，其中4根内放置了GFRP-OFBG传感筋，形成光纤光栅智能系杆，如图9所示。系杆张拉之前，先计算出剥开系杆外层PE及无粘结钢绞线PE

的长度,露出智能传感FRP筋,擦掉无粘结钢绞线外的油脂;然后确定智能传感FRP筋的光纤接头位置,引出FRP筋中光纤;最后用熔接机将铠装光缆中光纤与FRP筋中光纤连接好,在锚具的连接筒内,用粘结夹具将全长布置GFRP智能筋两端与某根钢绞线固定,将铠装光纤引线从锚板的排气孔引出锚具,再从保护罩上的孔引出到光纤保护盒中。

7.1 GFRP-OFBG传感器监测张拉过程

该桥系杆张拉施工采用单端悬浮式张拉工艺,上下游系杆同步进行张拉,并且新体系建立

与旧体系拆除交错进行。根据设计要求,上下游钢绞线束同时张拉到原8根旧钢绞应力时,割断8根旧钢绞线,然后再张拉到16根旧钢绞线的应力,再割断8根旧钢绞线...,以此类推,最后完成新旧体系的转换。

系杆张拉过程中,利用千斤顶油压表读数和千斤顶行程、GFRP-OFBG智能传感筋同时监测张拉力变化,其中以千斤顶行程控制为主。每根旧系杆共割4次,光纤光栅监测系杆张拉施工整个过程典型曲线见图10。

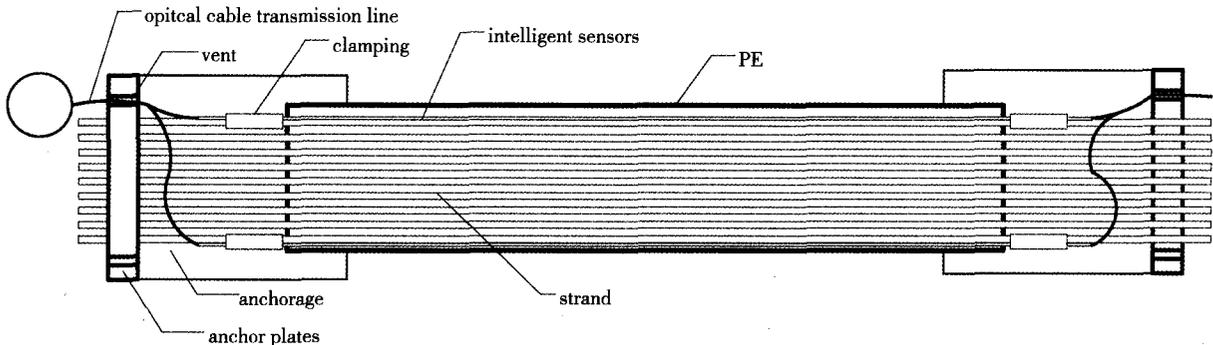
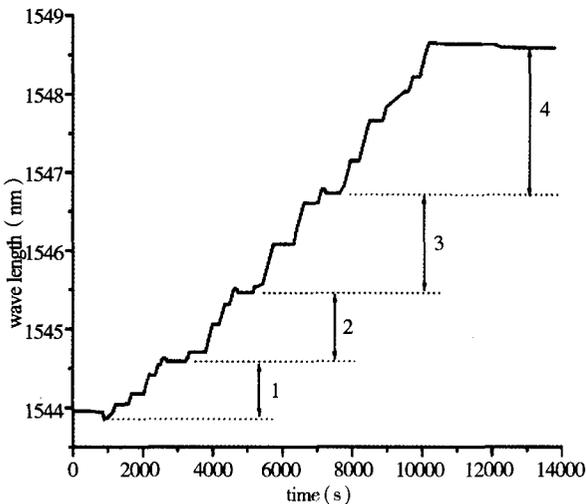
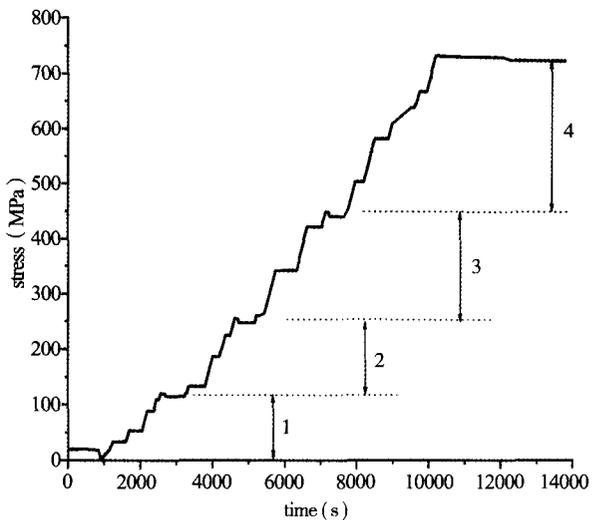


图9 GFRP-OFBG智能筋布设及走线方式



(a) 系杆张拉过程中GFRP-OFBG智能传感器中心波长值变化



(b) GFRP-OFBG智能传感器监测系杆张拉力变化

图10 GFRP-OFBG智能传感器监测系杆整个张拉过程

从曲线图10可以看出,两次割系杆之间,分多次张拉,从图上第4个张拉过程还可以发现,在锚固时拧紧螺母回油过程,张拉的吨位出现降低现象,这进一步表征GFRP-OFBG智能传感筋能够很好地跟踪整个张拉过程。张拉过程中,各传感器读数比较如表4所示。

从表4可以看出,如果采用油表值作为最终张拉力控制指标,将会产生一定的误差,导致张拉力小于设计力。如果利用布置在系杆中的GFRP-OFBG智能筋传感器,就能很好地解决这个问题,我们可以边锚固边观测智能筋的读数,不断调整油表读数,最终使张拉值等于设计值。

(下转第13页)

正确、方便和有效的。

(4) 本文方法可推广应用到预应力网壳结构, 以及可简化为线性分析的预应力索桁、索拱等多种预应力结构体系。

参考文献

- [1] 董石麟. 我国预应力大跨度空间钢结构的应用与发展. 空间结构, 2001, 7(4): 3□14.
Dong Shilin. The application and prospect of prestressed long-span steel space structures [J]. Spatial structures, 2001, 7(3): 3-4. (in Chinese)
- [2] Kirsch U. Two-level optimization of prestressed structures [J]. Engineering Structures, 1997, 19(4): 309-317.
- [3] Levy R. Optimal design of prestressed trusses [J]. Computers and Structures, 1992, 43(4): 741-744.
- [4] Sener M, Utku S, Wada Ben K. Geometry control in prestressed adaptive space trusses [J]. Smart Materials and Structures, 1994, 3(2): 219□225.
- [5] Kwan A S K, Pellegrino S. Prestressing a space structure[J]. AIAA Journal, 1993, 31(10): 1961□1963.
- [6] Kawaguchi, Ken-Ichi, Hangai, Yasuhiko, Pellegrino, Sergio, Furuya, Hiroshi. Shape and stress control analysis of prestressed truss structures [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1996, 15(12): 1226□1236.
- [7] Kitaori T, Ohsaki M, Fujiwara J, Mizutani T, Hosozawa O. Prestress optimization of a cable-supported frame: determination of prestress order [R]. Summaries of technical papers of annual meeting of Architectural Institute of Japan, 2000: 1017□1020.
- [8] Kouno H, Kato S, Nakazawa S. A study of decision method of initial tension force in structure with cables [R]. Summaries of technical papers of annual meeting architectural institute of Japan, 2000: 1021□1022.
- [9] 卓新, 袁行飞. 预应力索分批张拉过程中张力的仿真分析 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 27-30.
Zhuo Xin, Yuan Xingfei. Emulational analysis of the tensile forces of prestressed cables during multistage tensioning construction [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(9): 27-30. (in chinese)
- [10] Dong S L, Yuan X F. Prestension process analysis of prestressed space grid structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(3): 406-411.

(上接第7页)

表4 各种传感器读数比较

智能系杆编号	未锚固油表值 (kN)	锚固后光纤光栅监测值 (kN)	设计值 (kN)	张拉误差 (%)
1	2908.79	2686.81	2893.54	7.69
2	3058.35	2844.27	2978.79	4.73
3	2922.39	2648.87	2893.54	9.24
4	3003.97	2663.02	2978.79	11.86

8 结论

本文利用玻璃纤维材料封装光纤光栅传感器, 研制出了光纤光栅智能筋复合传感器, 对光纤光栅智能筋复合传感器和智能吊杆的传感特性进行了详细的研究, 并在实际工程中得到了具体实施。其主要结论如下:

(1) 裸光纤光栅传感器采用玻璃纤维封装之后, 它的应变传感特性不变, 其应变灵敏系数为 $0.00121\text{nm}/\mu\epsilon$; 它的温度传感系数为 $17.24\text{pm}/^\circ\text{C}$, 约为裸光纤光栅的 ($10\text{pm}/^\circ\text{C}$) 1.7倍。

(2) 对不同直径的GFRP-OFBG智能筋的极限应变进行了比较, 得出随着直径的增大, 智能

筋的极限应变也增大。直径为7mm的GFRP-FBG传感器的极限应变达到了 $8000\mu\epsilon$, 为裸光栅的1.8倍, 建议选用 $\phi 7\text{mm}$ 的智能筋来监测吊杆应力变化。

(3) 提出了将GFRP-OFBG传感器布设到拱桥吊杆当中, 并形成了自监测智能吊杆。对它们各自的布设方法进行了详细和传感特性进行了详细的研究, 其实验结果表明, 这两种智能吊杆都能很好地表征吊杆张拉全过程和张拉力的大小。

(4) 提出了GFRP-OFBG智能筋传感器在系杆中的布设工艺, 发现智能筋能够很好地跟踪整个张拉过程, 其测试值与实际情况非常吻合。