

光纤光栅智慧钢绞线在斜拉桥拉索预应力 等值张拉施工中的应用

覃荷瑛¹,王彦峰¹,姜涌²,陈俐光²

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 中国建筑一局(集团)有限公司, 北京市 100161)

摘要:钢绞线作为斜拉桥拉索中的关键受力元件,其张拉力对成桥状态和桥梁服役时的安全可靠至关重要。因此对钢绞线张拉力值的有效监测是保证桥梁质量的重要指标。基于光纤光栅传感原理,介绍一种光纤光栅智慧钢绞线斜拉索等值张拉法施工监测系统。该系统已应用到衡阳东洲湘江大桥的索力监测,监测值对比设计值,二者基本一致。工程应用说明智慧钢绞线监测系统的监测结果精度高、施工便捷,可满足同类型结构的张拉索力监测。

关键词:光纤光栅;智慧钢绞线;等值张拉;索力监测

1 引言

斜拉桥以其跨越能力强和美观的优点被广泛应用到桥梁建设中,而钢绞线作为其主要的承重部分对整座桥的成桥状态和桥梁服役时的安全稳定不言而喻^[1-2],因此对钢绞线施工质量的把控是保障其后期健康服役的有效手段。在中国等值张拉法是斜拉索桥钢绞线施工常用的方法^[3],此种施工方法的质量监测常有千斤顶读数法^[4]、压力传感器读数法^[5]、频率法^[6-7]、磁通量法等^[8-9]。千斤顶读数法是根据液压油表读数来控制张拉力,该方法存在人工操作误差较大及油表精度和漏油等问题。压力传感器读数法是把压力传感器放在张拉锚固端传出张拉力值,施工中拆装传感器繁琐、存在传感器偏心读数不准、温度变化引起测力误差等问题。频率法是由自振频率与索力的关系并通过修正数据来计算索力,误差较大且在施工阶段操作性不强。磁通量法是依据磁弹原理换算索力,其精度不高数据滞后。介于以上监测方法的缺点,该文利用光纤光栅反射波长与应变的关系,提出将光纤光栅传感器和钢绞线耦合制成智慧钢绞线^[10],用于钢绞线的施工过程监测。

光纤光栅传感器具有稳定性好、精度高、便于布置、施工便捷等优点^[11-13],目前应用于建筑结构的光

纤光栅传感器主要以焊接在构件表面及在索体内部植入复合筋进行监测^[14-15],不能实现传感器和结构产生同步应变,数据存在误差。智慧钢绞线是把光纤光栅传感器嵌入钢绞线的中心丝内,实现光纤光栅与钢绞线受力的同步线性变化,能真实测出钢绞线的受力状态^[16-17]。此智慧钢绞线已经应用到衡阳湘江东洲大桥的索力监测,测量值与理论值基本接近,适合拉索施工过程的监测。

2 光纤光栅智慧钢绞线的监测传感原理及研制

2.1 光纤光栅传感原理及智慧钢绞线的研制

光纤光栅传感器的机理是由轴向受力产生应变从而改变其内部传输的波长值来构建应变—波长关系,满足应变—波长的关系式为:

$$\Delta\lambda = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \lambda \epsilon_g = k_{FBG} \epsilon_g \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为波长变化量; p_{11} 、 p_{12} 为弹光效应系数; ν 为泊松比; ϵ_g 为光纤光栅应变; k_{FBG} 为光纤光栅的应变灵敏系数。

结合光纤光栅的传递原理以及钢绞线的受力特性,采用如下制作方法:在钢绞线中心丝上刻制凹槽,用胶黏剂把光纤光栅粘贴在凹槽内从而将二者的丝耦

收稿日期:2021-06-14(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51768014);广西科技重大专项(编号:桂科 AA18118008)

作者简介:覃荷瑛,女,博士,教授。E-mail: qinheynglqx@163.com.

合在一块,再把钢绞线边丝与中心丝机械扭转成型,在端部引出光纤封装制成智慧钢绞线。如图 1、2 所示。

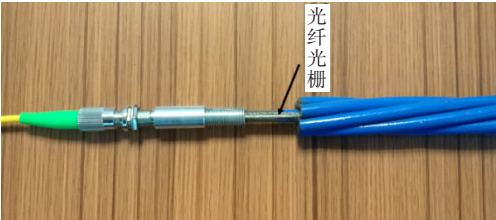


图 1 光纤光栅与钢绞线中心丝耦合

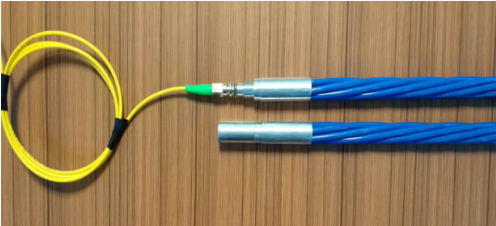


图 2 封装成品的智慧钢绞线

智慧钢绞线的中心丝在与光纤光栅耦合的过程中采用了胶黏剂粘贴工艺,存在钢绞线和光纤光栅在受轴力时不能实现轴向同步变形,即光纤光栅所感知的应变与钢绞线的真实应变之间存在差异,两者之间有应变传递率的问题。由剪滞理论可得到光纤光栅的应变传递率^[18-19]如下:

$$\beta = \frac{\epsilon_g}{\epsilon_m} = 1 - \frac{\cosh(kL) - 1}{kL \sinh(kL)} \quad (2)$$

其中 k 的表达式如下:

$$k^2 = \frac{2G_p}{r_g^2 E_g \ln(r_m/r_g)} \quad (3)$$

式中: ϵ_g 和 ϵ_m 分别为光纤光栅传感器的应变和钢绞线的应变; L 为光纤光栅粘贴长度的一半; G_p 和 E_g 分别为粘贴层的剪切弹性模量和光纤的杨氏模量, r_m 和 r_g 分别为粘贴层的外径和光纤的外径。将 $\epsilon_g = \beta \cdot \epsilon_m$ 代入式(1),得:

$$\Delta\lambda = k_{FBG} \beta \cdot \epsilon_m \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda$ 可由光栅解调专用的光谱仪解调测出; ϵ_m 为钢绞线的应变。由 $\epsilon_m = \frac{F}{EA}$ 即可计算得出钢绞线的受力值。

2.2 光纤光栅智慧钢绞线的标定

为保证光纤光栅智慧钢绞线在工程中的传感性能,对其进行出厂前的标定。标定设备为:张拉台座、穿心千斤顶、智能油泵、光栅解调专用光谱仪,如图 3 所示为张拉设备。标定所用钢绞线为衡阳东洲湘江大桥工程所使用的智慧钢绞线,采用型号为 1×7 标准型钢绞线,公称直径 15.2 mm,截面积 140 mm²,标准强度为 2 000 MPa,在其中心丝刻槽粘贴光纤光栅制作成智慧钢绞线。

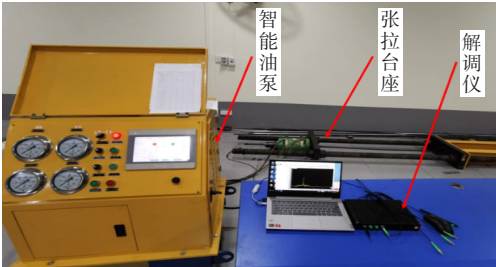


图 3 智慧钢绞线标定设备

试验标定方案为分级加载标定,采用标定张拉设备对其进行分级张拉,每级增加 10% 对应增加力值为 28 kN,张拉完成一次持荷 5 min,待光谱仪读数稳定后再张拉下一级,分 6 次标定完成,最后一级张拉力值为 168 kN 对应钢绞线标准强度的 60%,即完成一次标定。在此分别记录每级的张拉力值以及对应的中心波长,计算出波长变化量。此次标定由于数据众多,选择东洲湘江大桥 10[#]、11[#]、12[#] 桥塔索位编号为 10-S1-01、11-S1-01、12-S1-01 的 3 根智慧钢绞线标定数据进行对比分析,通过标定的数据得到 3 根钢绞线的张拉力值与对应的中心波长值和张拉力值与中心波长变化值如表 1 及图 4、5 所示。

表 1 智慧钢绞线标定力值及中心波长变化

标定荷 载量/%	张拉力/ kN	10-S1-01 中心波长/nm	波长变 化/nm	11-S1-01 中心波长/nm	波长变 化/nm	12-S1-01 中心波长/nm	波长变 化/nm
0	0	1 537.011	0.000	1 537.128	0.000	1 537.029	0.000
10	28	1 538.308	1.297	1 538.401	1.273	1 538.453	1.424
20	56	1 539.609	1.301	1 539.579	1.178	1 539.848	1.395
30	84	1 540.948	1.339	1 540.827	1.248	1 541.215	1.367
40	112	1 542.291	0.663	1 542.055	0.620	1 542.606	0.678
50	140	1 543.704	0.636	1 543.383	0.715	1 544.030	0.722
60	168	1 545.115	0.691	1 544.653	0.626	1 545.463	0.701

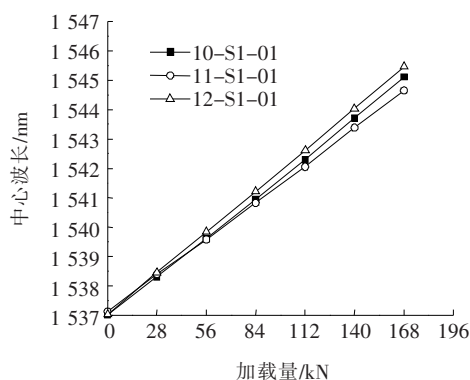


图4 标定智慧钢绞线的拉力-波长变化

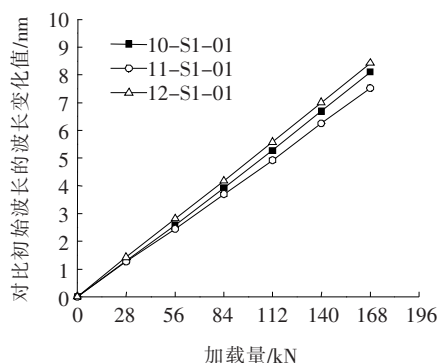


图5 对比初始波长的波长变化值

由图4、5可知:在同级数加载状态下3根智慧钢绞线都呈现线性变化且波长增加量基本相近。3组数据在相同加荷量状态下中心波长变化量不大。由此可看出智慧钢绞线在进入工作状态之前性能良好彼此测量精度一致,且此次标定可为后续智慧钢绞线在实际施工张拉过程中的实测值提供校核标准。

3 智慧钢绞线在拉索桥等值张拉监测中的应用

3.1 工程概况

为验证光纤光栅智慧钢绞线在斜拉索桥等值张拉施工中的索力监测效果,将其率先应用到湖南省衡阳市二环东路湘江大桥,大桥起点位于湖南省衡阳市雁峰区湘江乡东洲村,终点位于珠晖区衡阳轧钢厂,横跨湘江,是采用挂篮施工的单箱梁体最宽的矮塔斜拉索桥。该桥采用整副式斜腹板单箱三室截面,箱梁顶板宽3850 cm,顶板中间300 cm为拉索区,全桥三塔四跨,主桥布置为(120+2×210+120) m斜拉索,10[#]、11[#]、12[#]3个主塔,其中11[#]主墩塔梁墩固结,10[#]、12[#]墩设支座,塔梁固结。3座主塔均为35 m高

(含索塔顶以上4 m装饰段)。斜拉索规格分别为43孔、55孔、61孔,采用钢绞线拉索群锚体系,为三塔单索双排面,每个塔设计16个索位,塔上索距0.8 m,梁上索距4.0 m,斜拉索在索塔上采用分丝管锚固体系,全桥共96根斜拉索,共安装192根光纤光栅智慧钢绞线,其中每个索塔64根。斜拉索均采用单丝涂覆环氧喷涂钢绞线,单根钢绞线公称直径15.2 mm,标准强度2000 MPa。3座桥塔的拉索均采用逐根钢绞线等值张拉的方法进行施工。

3.2 光纤光栅智慧钢绞线在等值张拉施工中的实现

衡阳东洲湘江大桥上的斜拉索是由数量不等的平行钢绞线束组成,因此单根钢绞线的张拉力值直接影响全桥的索力值,该桥平行钢绞线拉索施工时,采用的是逐根钢绞线挂索的方法。在此每根索的钢绞线张拉施工工艺采取等力值张拉施工法。即以每束钢绞线为一组,在该束钢绞线挂索张拉时先把第一根智慧钢绞线张拉到设计值与施工过程力的衰减值之和,第二根钢绞线在张拉时,张拉的力值标准以智慧钢绞线的传输数据是否满足索力设计值为依据。其余钢绞线均采用此方法进行逐根张拉,直至整束钢绞线张拉完成。施工过程的所有索力张拉值均由智慧钢绞线监测并反馈到张拉系统进行张拉,克服了以往施工过程中张拉力值偏差大、施工过程繁琐以及场地局限等缺点,形成了等力值张拉法智能施工监测系统。

光纤光栅智慧钢绞线等值张拉系统的设备组成如图6所示。包括:手提电脑、光纤光栅光谱解调仪、智能液压油泵、高压油管、前卡式穿心千斤顶、光纤光栅智慧钢绞线、光纤光栅专用传输线、锚板、限位板。智能液压油泵主要由电机、油泵塞、控制系统、油箱和液压变送器组成。在张拉索力时的核心工作区域为千斤顶张拉区,具体包括如图7所示的前卡式穿心千斤顶、千斤顶张拉夹持装置、锚具、锚垫板。张拉仪器前卡式穿心千斤顶和张拉夹持装置由螺栓拼接,智能液压油泵根据手提电脑传输的数据控制油压驱动千斤顶进行

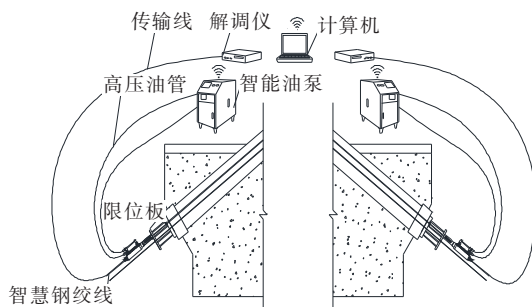


图6 光纤光栅等值张拉系统

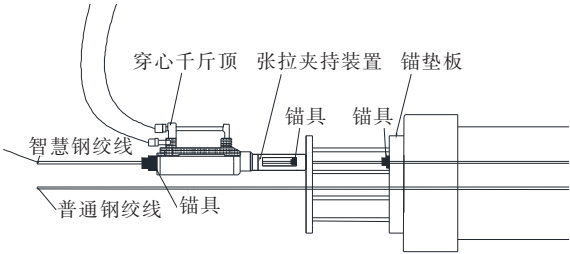


图 7 穿心千斤顶张拉区

张拉施工。

张拉钢绞线的具体实施步骤:该桥的斜拉索为三塔单索双排面布置,拉索区设置在桥面中央,为保证施工过程中每个排面索力均匀,采取同排面钢绞线束单根循环张拉。单束钢绞线张拉方案采用光纤光栅等值张拉系统,即在张拉钢绞线束时,张拉的第一根钢绞线为光纤光栅智慧钢绞线,智慧钢绞线完成上索后其两端依次穿过工作锚板、限位板、穿心千斤顶,将智慧钢绞线和解调仪通过传输线连接,穿心千斤顶与智能油泵通过高压油管连接,电脑无线连接解调仪和智能油

泵,整套组装完毕,做好张拉前的准备工作。施工张拉时提前把索力设计值输入电脑程序中,当智慧钢绞线传出的索力值达到设计标准时,电脑控制智能油泵停止加压进行锚固,完成第一根钢绞线的张拉;在张拉第二根钢绞线时,只需要把穿心千斤顶安装到位即可,其他设备保持不变,张拉的索力值由智慧钢绞线反馈到电脑的数据达到设计要求即完成张拉工作,进行锚固。其余钢绞线的张拉均按照第二根钢绞线的张拉方法进行,在最后一根钢绞线完成张拉工作锚固后,取出千斤顶,拆除限位板,整束钢绞线的挂索及张拉完成。整座桥的斜拉索均按照上述方案进行施工张拉。

3.3 张拉施工过程索力监测分析

按照上节所述光纤光栅智慧钢绞线等值张拉系统对整个斜拉索区的钢绞线进行张拉,现场记录了 3 个索塔单根钢绞线和整束钢绞线的施工张拉力值,由于拉索较多,在此选取 12# 塔 1~16 号索位上游现场张拉的第一根钢绞线索力值以及整束钢绞线的索力值,结果如表 2 所示。

表 2 单根钢绞线及整束钢绞线施工过程张拉索力

索号	单根理论值/kN	单根张拉监测值/kN	监测中心波长值/nm	索力误差比/%	单束理论值/kN	单束张拉监测值/kN	索力误差比/%
1	135	138	1 543.389	2.22	5 812	5 934	2.10
2	135	134	1 543.206	-0.74	5 821	5 762	-1.01
3	136	138	1 543.389	1.47	5 836	5 934	1.68
4	136	135	1 543.252	-1.74	5 857	5 805	-0.89
5	135	136	1 543.298	0.74	5 791	5 848	0.98
6	135	137	1 543.344	1.48	5 819	5 891	1.24
7	132	135	1 543.252	2.27	5 697	5 805	1.90
8	102	103	1 541.782	0.98	5 621	5 665	0.78
9	104	107	1 541.966	2.88	5 725	5 885	2.79
10	105	108	1 542.012	2.86	5 775	5 940	2.86
11	106	109	1 542.058	2.83	5 823	5 995	2.95
12	107	110	1 542.104	2.80	5 871	6 050	3.05
13	116	118	1 542.471	1.72	6 356	6 490	2.11
14	117	120	1 542.563	2.56	6 431	6 600	2.63
15	107	109	1 542.058	1.87	6 498	6 649	2.32
16	108	109	1 542.058	0.93	6 580	6 649	1.05

注:此表中单根张拉值是根据中心波长变化值及其标定数据所得。

由表 2 可以看出:① 钢绞线束中第一根钢绞线在施工过程中的张拉力值与设计值偏差较大的是 9 号

索,相对误差为 2.88%,相对误差较小的为 2 号索与 5 号索,分别为 -0.74% 和 0.74%,单根索的最大最小

误差均满足设计要求(3%以内);②单根钢绞线理论值与实际张拉值基本接近,张拉质量良好;③对于整束钢绞线,对比钢绞线束的设计值,其中力值相差较大的为12号索,误差为3.05%,力值相差较小的为8号索,误差为0.78%。12号桥塔的单束钢绞线施工张拉值基本与设计值接近,达到了整体索力要求。

4 结论

针对光纤光栅智慧钢绞线在等值张拉施工中的应用,对实际工程中的斜拉索钢绞线进行单根张拉索力监测和整束钢绞线张拉索力监测,得到如下结论:

(1)通过对光纤光栅智慧钢绞线的标定,可知其性能好、稳定性高,监测值准确。

(2)整套张拉设备和光纤光栅智慧钢绞线组成光纤光栅智慧钢绞线等值张拉系统,具有智能化高、操作简便、可实施施工动态监测等优点,且弥补了常规传感器控制张拉力值数据滞后的缺点。

(3)通过分析张拉过程的索力值,得到光纤光栅智能钢绞线等值张拉系统的张拉质量优质,满足所有设计标准,是一种优良的拉索桥平行束钢绞线张拉系统,具有广阔的市场发展前景。

参考文献:

- [1] 饶梓彪,刘可,褚东升,等.大直径钢绞线在顶推桥梁结构中的应用[J].水运工程,2019(9):51-55,77.
- [2] SUN C J, WANG X L, WEN Q H. Application of Epoxy Coating Steel Strand Cables in Oblique-Pulling Bridges[J]. Construction Technology, 2004,33(7):63-66.
- [3] 邹力,彭旭民,位东升.平行钢绞线斜拉索等值张拉力精确计算方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(2):7-9,44.
- [4] 张卓杰,王荣辉,甄晓霞,等.平行钢绞线斜拉索索力测试方法评价[J].桥梁建设,2016,46(2):42-47.
- [5] 胡成,吴节松.宽幅矮塔斜拉桥施工与监控技术研究[J].

中外公路,2014,34(2):193-196.

- [6] 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] 姜建山,唐光武,梁华鹏,等.基于频率法的索力测量系统设计[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(5):25-28,154.
- [8] 王先丽.钢绞线斜拉索索力监测与应用[J].公路工程,2016,41(4):188-192.
- [9] 张海东,田章华,段元锋,等.基于磁弹效应的拱桥吊杆索力监测[J].结构工程师,2016,32(4):80-84.
- [10] 覃荷瑛,沈全喜,钟英杰.螺旋倾斜式光纤光栅传感器监测钢绞线应变方法研究[J].铁道建筑,2018,58(11):63-65.
- [11] Liang M F, Fang X Q, Wu G, et al. A Hydraulic Fiber Bragg Grating Force Sensor and its Monitoring System for Axial Bolt Load Measurement in Anchorage Engineering[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(12):1.
- [12] 赵霞,刘礼华,吉俊兵,等.智能缆索在京杭运河泗阳大桥中的应用[J].中外公路,2013,33(2):92-96.
- [13] 吴俊,陈伟民,章鹏,等.基于锚固区光纤布拉格光栅应变传感的智能缆索技术[J].中国激光,2010,37(6):1510-1515.
- [14] 孙晓,王启明,朱明,等.光纤Bragg光栅应变计在500m口径球面射电望远镜工程索力监测中的应用[J].光学精密工程,2015,23(4):919-925.
- [15] 张雪峰,朱志荣,滕军,等.光纤光栅智能索及其在深圳万科中心中的应用[J].工程抗震与加固改造,2011,33(1):118-123.
- [16] 朱万旭,沈全喜,覃荷瑛.体内预应力钢绞线光纤光栅监测技术及其应用[J].光子学报,2019,48(2):68-75.
- [17] 覃荷瑛,朱万旭,张贺丽,等.内嵌预压式大量程光纤光栅传感器的智能钢绞线的研制与性能分析[J].中国激光,2017,44(4):216-223.
- [18] 周智,李冀龙,欧进萍.埋入式光纤光栅界面应变传递机理与误差修正[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(1):49-55.