

激光与光电子学进展

基于光纤光栅的智能拉索张力监测技术研究

胥献忠¹, 胡志远¹, 周怀健¹, 孙玉涛¹, 徐建丰², 成莎^{2*}¹中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004;²桂林理工大学土木工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 拉索是大跨空间索网结构非常重要的传力构件,发生损伤和破坏的潜在危险性较大,是安全运营关注的焦点,实时掌握拉索的受力状态十分必要。采用中心丝内嵌光纤光栅的智能拉索,在有效避免运输和安装过程中传感单元损坏的同时,实现拉索对自身索力的实时感知。经标定后,将智能拉索应用于顺德区德胜体育中心游泳馆的马鞍形空间索网上,并对索网张拉安装的过程进行索力监测,结果表明:张拉索和稳定索的荷载监测灵敏度分别在约 6.6 pm/kN 和约 2.6 pm/kN;张拉完成时智能拉索测量得到的索力与千斤顶油压差值在 5% 以内,二者较为相近;在索网张拉安装过程中的实测索力值与理论分析的变化趋势相吻合,小于拉索破断力的 40%。通过在索网结构中应用智能拉索,可以在索力监测方面发挥重要作用。

关键词 智能拉索; 光纤光栅; 索力监测; 空间索网

中图分类号 TP212

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP241406

Tension Monitoring Technology of Intelligent Cable Based on Fiber-Optic Grating

Xu Xianzhong¹, Hu Zhiyuan¹, Zhou Huaijian¹, Sun Yutao¹, Xu Jianfeng², Cheng Sha^{2*}¹China Construction Fifth Engineering Bureau Co. Ltd., Changsha 410004, Hunan, China;²College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract Cable is a vital force-transmission component of the long-span space-cable-network structure and is the core of safety operations because of the potential risk of damage and destruction. Thus, the force state of cables in real time must be elucidated. An intelligent cable with fiber Bragg grating embedded in a center wire can effectively avoid damage to a sensing unit during transportation and installation as well as realize the real-time perception of the cable force. In this study, a calibrated intelligent cable is applied to the saddle-like space cable network of the Shunde Sports Center swimming pool, and the cable force is monitored during the installation of the cable-network tension. The sensitivities of cable load monitoring and stable cable load monitoring are approximately 6.6 and 2.6 pm/KN, respectively, and the difference in the measured cable force and jack is within 5% after the tension is completed. The cable force measured by the intelligent cable is similar to the value of oil pressure. The measured cable force during the installation of the cable-network tension is consistent with the theoretical-analysis trend. The measured cable force is less than 40% of the cable breaking force. Applying intelligent cables to cable-network structures can facilitate cable-force monitoring.

Key words intelligent cable; fiber grating; cable force monitoring; space cable network

1 引言

人民群众的美好生活需要,促进了许多大型体育场馆的兴建,同时公众对索网结构的形态、安装精度和长期安全等方面也提出了新的要求^[1-3]。拉索是许多大型运动场馆空间索网结构的核心构件,其受力状态

影响着索网结构的安全和稳定,但由于其构造设计,随着环境腐蚀、疲劳累积,拉索在后续的工作中发生损伤是必然趋势,而损伤的拉索潜藏着极大的安全隐患,一旦引发事故将产生严重的后果^[4-6],因此,对大跨空间索网体系长期进行实时监测,对于分析拉索受力情况、提供结构安全预警具有重要意义。

收稿日期: 2024-06-03; 修回日期: 2024-07-01; 录用日期: 2024-07-05; 网络首发日期: 2024-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(52068014)

通信作者: *936117097@qq.com

索力是拉索结构健康监测的重要指标^[7-8],但相对于桥梁拉索,大跨空间索网多为密索体系,结构更复杂,索力采集困难、数据量大、数据处理繁琐、监测成本高,实际工程中鲜有对大型运动场馆内空间索网进行索力监测的研究。目前主要运用压力传感^[9-10]、振动频率法^[11-13]和磁通量法^[14-15]来获取索力。在拉索结构的索力监测方面,王天鹏等^[16]基于设置承压凸台的新型光纤光栅测力环对桥梁拉索的索力进行监测,具有较高的测量精度,但测力环结构不适合安装于连接索网的耳板上;Koščo等^[17]基于高阶频率法解决了未知弯曲刚度的问题,并且根据索力与固有频率的关系进行索力识别,对单根钢丝张力和拉索张力进行测量和比较;Schoenekess等^[18]基于磁通量法,将涡流线圈以串联的方式环绕在被测钢缆索四周,通过提前校准目标钢绞线的阻抗与应力变化的规律推算钢缆索的索力,但在电压和线圈匝数等参数的选取上还需进一步优化,安放磁通量传感器对后续索网结构防火涂料等施工有影响;周储君^[19]基于有限元软件对大跨度马鞍形单层正交索网结构的施工全过程进行模拟分析,与在施工过程中的索网索力、位形和环桁架应力进行比对,发现索力与理论值的偏差在 10% 以内;Guo等^[20]提出一种结合光纤光栅传感原理的卡箍式力计和千斤顶联合监测方法,通过卡箍与索体的协同变形,将应变传递给光纤传感器来测量索力,但传感器固定在拉索外围,受索体弯曲变形带来的测量误差影响较大。基于光纤光栅传感器在拉索索力检测方面的研究进展^[21-25],为了解决大跨空间索网索力监测问题,本文以顺德区德胜体育中心游泳馆智能拉索设计制作、标定及安装张拉为背景,将光纤光栅传感器集成到拉索内部,制成自身可测索力的智能拉索,避免在拉索制作、运输及安装过程中

的损坏;在游泳馆索网的服役期间,通过索力监测数据计算分析拉索的受力状况,为索网安装阶段结构设置的准确性提供监测手段,同时为后期游泳馆整体索网结构的安全性及可靠度评估以及拉索的维护提供参考依据。

2 智能拉索原理及结构设计

2.1 光纤光栅

宽带光在光纤光栅(FBG)中传输时,符合FBG反射条件的光将被反射回来,反射光的中心波长 λ_B 可以表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为FBG的有效折射率; Λ 为FBG的周期。

依据FBG应变测量原理,假设外力作用引起沿FBG纵向的应变为 $\Delta\epsilon$,FBG的初始反射波中心波长为 λ_B ,则由外力作用引起的反射波中心波长偏移 $\Delta\lambda_B$ 可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\epsilon = K_e \cdot \Delta\epsilon \quad (2)$$

式中: P_e 为光纤材料的弹光系数; $K_e = 1 - P_e$ 为FBG的应变系数。

2.2 智能拉索

根据FBG的应变和波长的对应关系,在拉索中心丝表面沿长度方向刻置深为 1 mm、宽为 0.5 mm 的凹槽,并对中心丝进行张拉,在持荷状态下用特种胶粘剂将FBG粘贴于凹槽内,封装时须在每个光栅及其两端 20 mm 范围内均匀覆盖胶粘剂,待胶粘剂到达指定强度后卸载,再用捻股机将嵌有光纤光栅的中心丝和外围圆截面钢丝、Z型截面钢丝制作成智能拉索,并将光纤从索体端部引出,在外力作用下二者协同变形,通过识别FBG的波长变化来感知钢丝的应力应变,如图1所示。

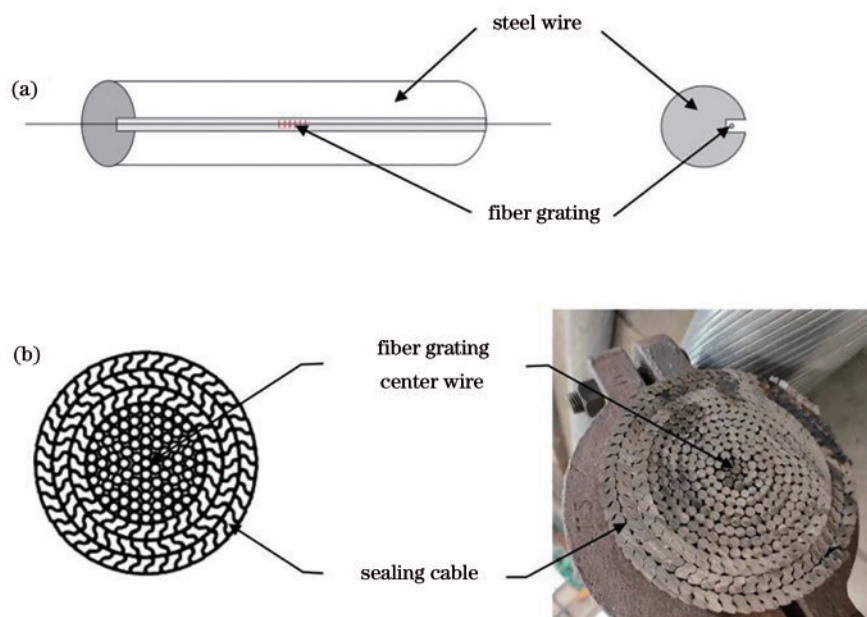


图1 智能拉索。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 1 Intelligent cable. (a) Schematic diagram; (b) object picture

根据拉索结构的计算模型,假定拉索是理想柔性的,只能承受拉力。当拉索受力之后,应力与应变(单位变形量)之间呈线性关系,即:

$$\Delta F = k \Delta x \quad (3)$$

式中: ΔF 为单位长度的索力增量; Δx 为单位长度索的伸长量; k 为索体的抗拉刚度,与索体的材料、截面尺寸、状态等因素有关。

对于长度为 L 、索截面有效面积为 A_e 、索体材料弹性模量为 E 的拉索,当索体在外荷载的作用下发生变形时,固定在中心丝内的FBG的波长变化为 $\Delta\lambda_B$,则中心丝对应的应变值 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{1}{K_\epsilon} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

外围钢丝通过排丝、扭绞、灌锚等工序后缠绕在中心丝的外围,考虑到外围钢丝螺旋缠绕的特点,当索体受到拉力作用而伸长变形时,外围钢丝和中心丝的变形并不是完全相同的,所以引入一个相关系数为 K ,用中心丝的应力应变来代表索的应力应变。设当中心丝产生应变 ϵ 时,对应的索力:

$$F = EA_e \epsilon = \frac{EA_e \Delta\lambda_B}{K_\epsilon \lambda_B} = K \Delta\lambda_B \quad (5)$$

在实际应用中,通过解调仪测得中心丝波长变化量 $\Delta\lambda_B$,根据标定试验确定相关系数 K ,代入 $F = K \Delta\lambda_B$ 中即可得到对应的索力值。此外,为了解决应力和温度的交叉敏感问题,利用参考FBG法进行温度补偿。

由于拉索并不是直线型,而是有一定弧度的,故还需探讨弯曲影响应变产生的力 F_1 对智能拉索的影响:

$$F_1 = EA_s \cdot \frac{y}{\rho} \quad (6)$$

式中: A_s 为中心丝的有效截面面积; y 为光纤中心至中心丝中心的距离; ρ 为曲率半径。

3 光纤光栅智能拉索的标定

3.1 智能拉索的标定试验

在完成智能拉索的制作后,对拉索的工作特性进行检验,以获取新型智能拉索的性能指标。标定试验在广东坚朗索具厂加工车间进行,张拉设备采用液压千斤顶,光纤光栅中心波长采集设备采用通为科技生产的TV 125型解调仪,张拉和采集设备如图2所示。

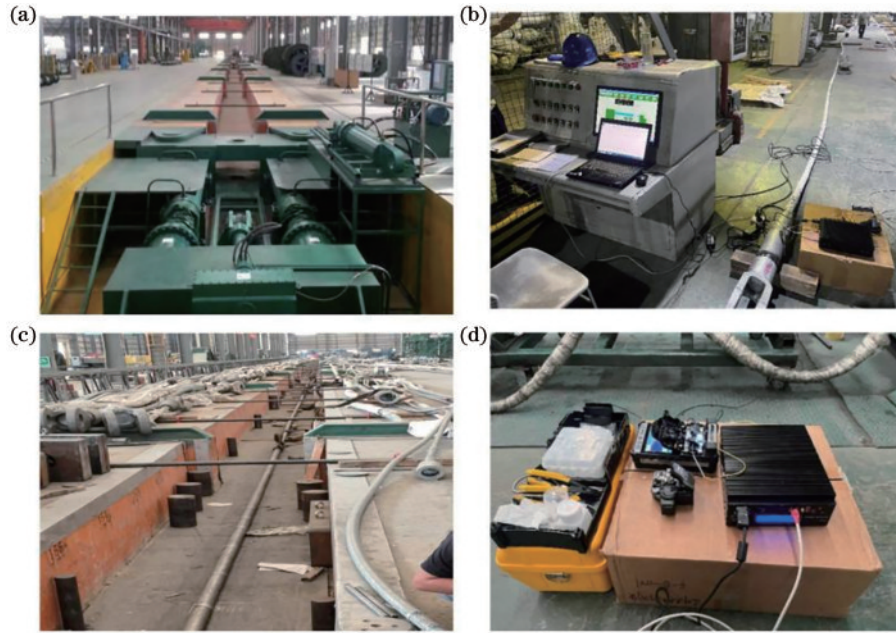


图2 智能拉索标定试验过程。(a)张拉台座;(b)控制平台;(c)张拉图示;(d)数据采集

Fig. 2 Calibration experiment of intelligent cable. (a) Stretching bed; (b) control platform; (c) tension diagram; (d) data collection

试验流程如下:1)将智能拉索与光纤光栅解调仪连接;2)将拉索与张力千斤顶连接,预紧拉索后放松,拉索处于伸直状态,记录张拉初始数据;3)分级张拉,最大拉力控制为拉索破断力的40%,并按标定总量程的10%、40%、60%、80%、100%分5级进行标定,分别记录每一级张拉波长数据和对应张拉设备的控制力,每根拉索张拉3组。每根拉索内部设置2个光栅测点,2个测点串联在一根光纤线上,根据试验采集到的索力与波长变化的数据,对其中HZ 13、ZS 7和ZS 13三

根索的张拉标定的3次循环数据进行比对,结果如图3所示。

根据图3中HZ 13、ZS 7和ZS 13这3根索张拉标定的结果,未加荷载时的波长数据与分级张拉的结果存在明显错位,原因是张拉力卸载后,索体存在弯曲。分级张拉结果显示:索力值与智能拉索内部嵌有光纤光栅中心丝测点的波长变化之间存在良好的线性关系,相关系数均在0.998以上;其中第2组与第3组相对于第1组的重复性更好,原因是智能拉索在张拉测

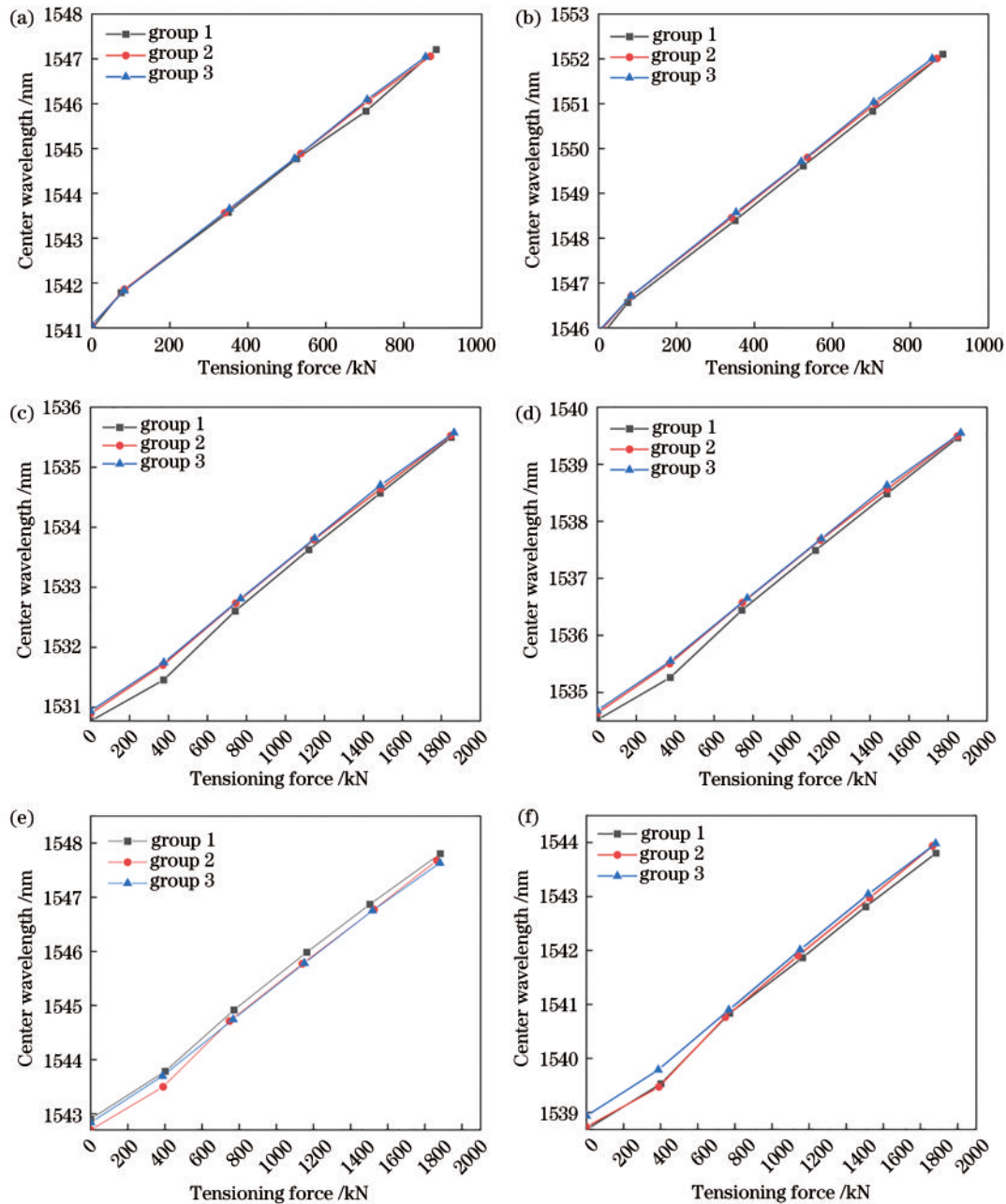


图3 三组张拉标定结果。(a)HS 13-测点1;(b)HS 13-测点2;(c)ZS 7-测点1;(d)ZS 7-测点2(e)ZS 13-测点1;(f)ZS 13-测点2
Fig. 3 Tension calibration results of three groups. (a) HS 13-measuring point 1; (b) HS 13-measuring point 2; (c) ZS 7-measuring point 1; (d) ZS 7-measuring point 2; (e) ZS 13-measuring point 1; (f) ZS 13-measuring point 2

试之前,外围钢丝通过捻股机缠绕在中心丝外围,二者之间还存在间隙,通过张拉台座施加拉力,外围钢丝与中心钢丝之间的结合更加紧密,拉索的非弹性变形被消除,呈现较好的重复性。

根据张拉标定的结果,对拉索的相关系数 K 进行计算,计算结果如表1所示。

4 基于智能拉索的索力的监测

4.1 工程概况

顺德区德胜体育中心游泳馆采用单层马鞍形索网+钢结构V撑、环梁+混凝土框架的结构形式。如

表1 智能拉索相关系数 K 的计算

Table 1 Calculation of correlation coefficient K of intelligent cable
unit: $\text{kN} \cdot \text{nm}^{-1}$

Cable number	HS 13	ZS 7	ZS 13
Measuring point 1	150.376	387.597	370.370
Measuring point 2	145.773	353.357	350.877

图4所示。

向下凹的为承重索(ZS),向上凸的为稳定索(HS),两组曲率相反的单层索网相交形成马鞍形索网结构。稳定索采用尺寸为 $2\Phi 45\text{ mm}$ 的高强密封索,承重索采用尺寸为 $2\Phi 65\text{ mm}$ 的高强密封索,拉索制作采

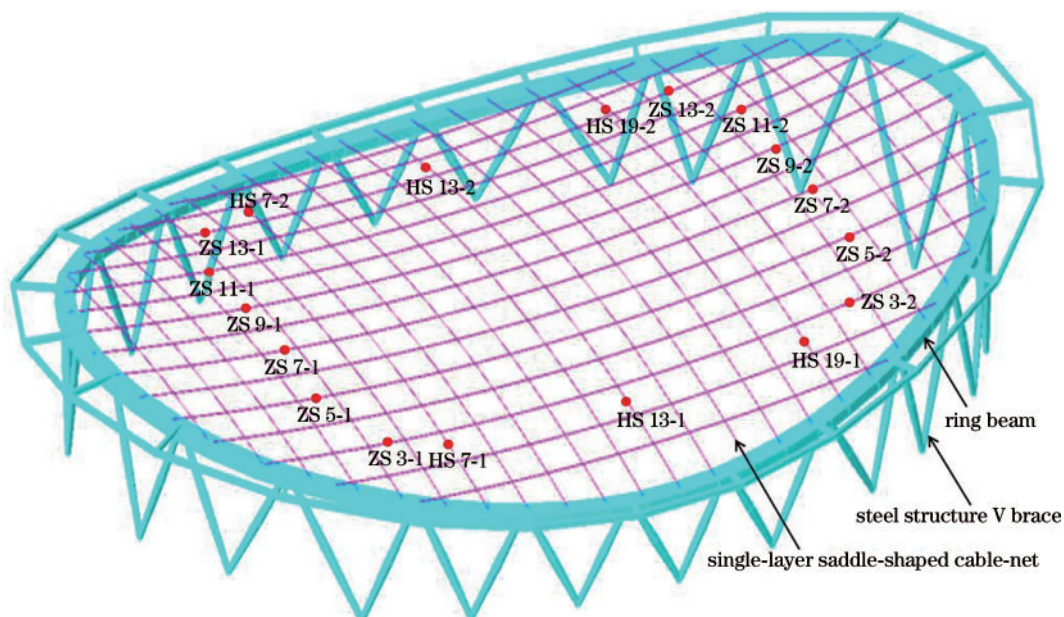


图4 德胜体育中心游泳馆结构与测点布置示意图

Fig. 4 Structure and measuring point layout diagram of Desheng Sports Center Natatorium

用的所有钢丝强度均为 1570 MPa。结构投影平面近似为椭圆形,投影尺寸约为 $114\text{ m} \times 76.5\text{ m}$,索网部分长轴为 109 m,短轴为 71 m,马鞍形索网短向矢跨比为 $4/71=1/17.75$,长向矢跨比为 $4/109=1/27.25$ 。索网安装过程的具体工况如表 2 所示。

德胜体育中心游泳馆的单层马鞍形索网结构一共设置了9根智能拉索,考虑到索长和位置等因素的影响,承重索的设计索力值较大,对应拉索的长度也比稳定索长,是索力监测的重点。分别对称选取3根横索和6根纵索作为智能拉索,每根智能拉索内部设置2个光栅测点,如图4所示。关于索网的安装,首先采用高空溜索的方式,从中间向两侧依次安装承重索(包括下层索夹)并锚接到位;待所有承重索锚接到位后,沿垂直与承重索的方向水平铺设猫道板,再从两侧向中间依次张拉安装稳定索,并通过锁夹连接稳定索与承重索;最后根据测量数据调节索网的标高和形状,以达到设计要求,即完成单层索网的安装,如图5所示。

4.2 智能拉索在安装过程中的监测

索力控制是索网安装过程的重点工作,拉索在使

表2 拉索安装过程对应工况

Table 2 Corresponding working conditions of cable installation process

Mode	Construction process
Mode 1	All load-bearing cables are anchored in place
Mode 2	Stretching HS 1, HS 25
Mode 3	Stretching HS 2, HS 24
Mode 4	Stretching HS 3, HS 23
Mode 5	Stretching HS 4, HS 22
Mode 6	Stretching HS 5, HS 21
Mode 7	Stretching HS 6, HS 20
Mode 8	Stretching HS 7, HS 19
Mode 9	Stretching HS 8, HS 18
Mode 10	Stretching HS 9, HS 17
Mode 11	Stretching HS 10, HS 16
Mode 12	Stretching HS 11, HS 15
Mode 13	Stretching HS 12, HS 14
Mode 14	Stretching HS 13

用中,按照规范设计,索力一般不超过破断力的40%,所以了解索力的真实值对评价工程结构安全尤为重要。

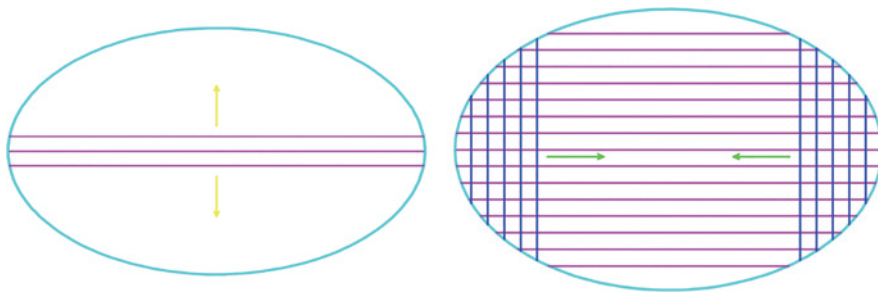


图5 智能拉索设置与索网安装流程图

Fig. 5 Flow chart of intelligent cable setting and cable net installation

要。在索网结构中选择代表性位置设置光纤光栅智能拉索,对索网安装过程中的索力变化进行监测,确保结构安全规范。

稳定索为主动张拉索,承重索为被动张拉索,稳定索 HS 13 在张拉过程中的波长数据记录如表 3 所示。

表 3 HS 13 安装过程索力数据记录

Table 3 Cable force data record of HS 13 installation process

Jack /kN	Wavelength /nm	Increment /kN	Actual measurement /kN	Difference /%
—	0	0	41.441	—
115.101	0.453	68.120	109.459	4.9
231.253	1.237	154.135	295.195	-27.7
349.672	2.089	314.135	355.105	-1.6
465.826	2.753	413.985	454.805	2.4

根据表 3 的张拉数据记录,可以发现,在通过液压千斤顶对 HS 13 进行张拉的过程中,油压数据与实测索力存在一定差距,索力初始值不为零,原因是拉索两端与耳板铆接后,处于悬挂状态,此时通过智能拉索测量的索力值为 41.4 kN。随后通过千斤顶施加拉力,调节锚杯连接螺杆的长度来张拉拉索。在第一、二级荷载张拉过程中,光纤光栅测量的数据换算后所得的索力值与实际实验过程中油压表所显示的张拉力值之间的偏差较大,随着张拉力值的逐渐增加,光纤光栅测量换算出的

索力值与油压表读出的张拉力值的误差越来越小,张拉完成时二者差值仅为 2.4%。通过智能拉索对索网安装过程的索力监测,发现结果与油压值较为吻合,这对索网张拉安装过程中的索力监测具有重要参考价值。

同时,智能拉索也能对张拉安装过程中被动张拉索的索力实现同步监测,分别计算每级张拉荷载变化下的波长差,然后代入标定公式,获得相应索力增量值,如表 4 所示,为工况 8 下张拉稳定索 HS 7、HS 19 后 6 根智能承重索的索力变化情况。

表 4 工况 8 安装过程 ZS 数据记录表

Table 4 ZS data record table of working condition 8 installation process

Number	Wavelength /nm			Coefficient $K/(kN \cdot nm^{-1})$	Cable force increment /kN
	Before stretching	After stretching	Difference		
3	1532.097	1532.871	0.774	313.480	242.6
5	1539.479	1539.888	0.409	369.004	150.9
7	1531.741	1532.179	0.438	387.597	169.8
9	1540.337	1540.753	0.416	381.679	158.8
11	1530.929	1531.401	0.472	359.712	169.8
13	1539.165	1539.697	0.532	334.448	177.9

通过表 4 中张拉过程的索力增量对比发现,在安装稳定索的过程中,承重索的索力均匀增加,对称布置的拉索除 ZS 3 与 ZS 13 外,另外两组中的 ZS 5 与 ZS 11 和 ZS 7 与 ZS 9 的索力增长幅度基本相同。

将式(6)的计算结果与拉索张拉完成时的索力值进行比较,如表 5 所示,发现弯曲影响应变产生的力对智能拉索索力值的影响最大只有 0.30%,可以忽略不计。

4.3 实测索力与理论索力的对比

理论索力的来源,是采用有限元软件 ANSYS,对索网安装张拉工序的各个工况分别进行模拟计算分析。有限元计算不同工况下的索力分布云图如图 6 所示,分别列举了稳定索在工况 9、14 下和承重索在工况 1、14 下对应的索力云图。

考虑索体弯曲会造成拉索测点位置较大的波长误差,因此在对索网张拉过程进行分析时,选取索体悬挂绷直后为起点。如图 6(a)所示,稳定索在张拉时索力

表 5 弯曲影响力在实测值中的占比

Table 5 Proportion of bending influence in the measured value

Number	Cable force /kN	F_1 /kN	Proportion of F_1 /%
ZS 3	584.326	0.368	0.06
ZS 5	707.380	0.368	0.05
ZS 7	854.585	0.368	0.04
ZS 9	825.191	0.368	0.04
ZS 11	628.417	0.368	0.06
ZS 13	603.010	0.368	0.06
HS 7	186.763	0.565	0.30
HS 13	448.649	0.565	0.13
HS 19	365.557	0.565	0.15

较大,后期张拉其他组稳定索后,索力值逐步下降。待所有稳定索张拉到位后,承重索的索力沿索长度方向并非均匀分布,如图 6(b)所示,原因是使用索夹连接承重索与稳定索,索力值在经过索夹时会发生突变,导致在沿索长度方向上的索力呈阶梯变化。

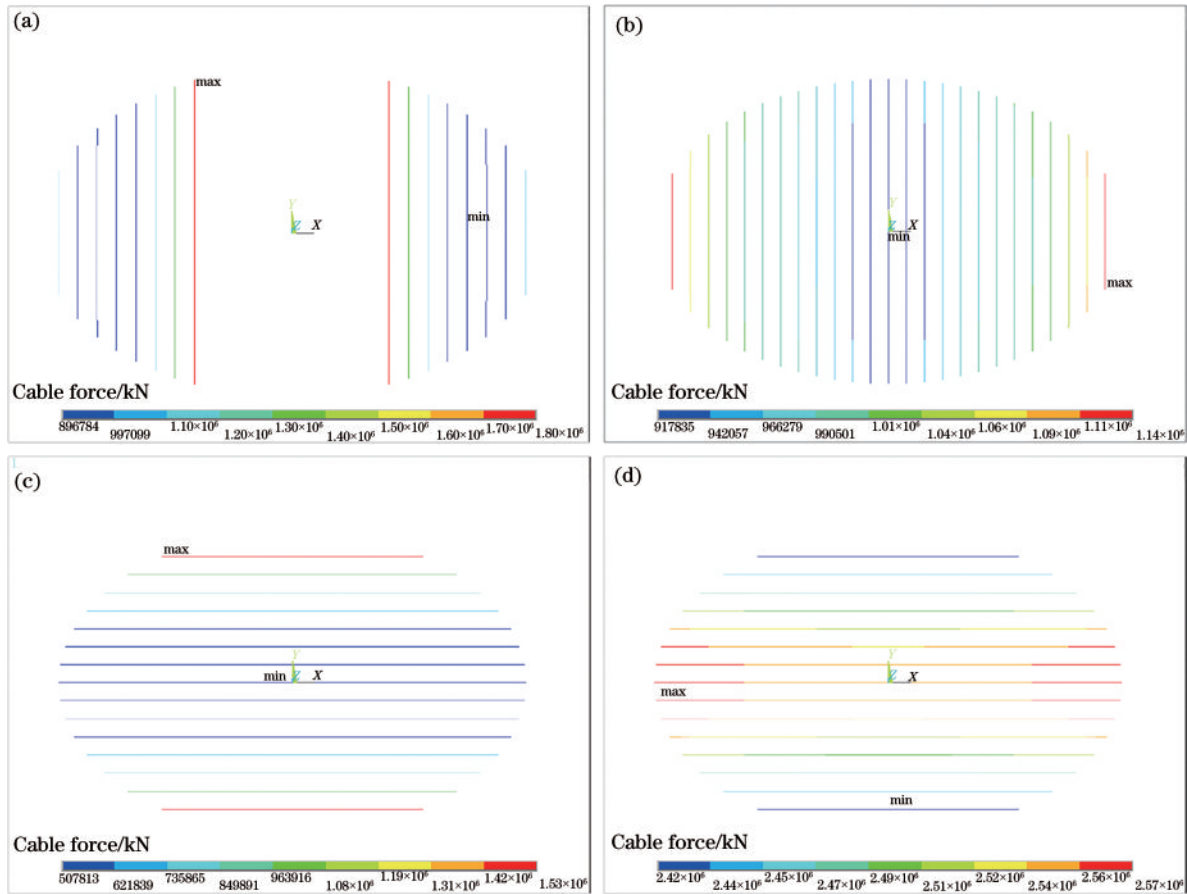


图6 索力云图。(a)稳定索在工况9下;(b)稳定索在工况14下;(c)承重索在工况1下;(d)承重索在工况14下

Fig. 6 Cloud map of cable force. (a) Stable cable under working condition 9; (b) Stable cable under working condition 14; (c) load-bearing cable under working condition 1; (d) load-bearing cable under working condition 14

将采集到的索力数据对应不同工况条件进行分析处理,并分别就承重索、稳定索测点1、2在不同工况下对应的索力与理论分析的索力进行对比分析。

对比不同工况下的承重索的索力值变化,如图7(a)~(c)所示。承重索作为被动张拉索,索力值随着稳定索的安装呈现不断上升的趋势,但工况2(张拉

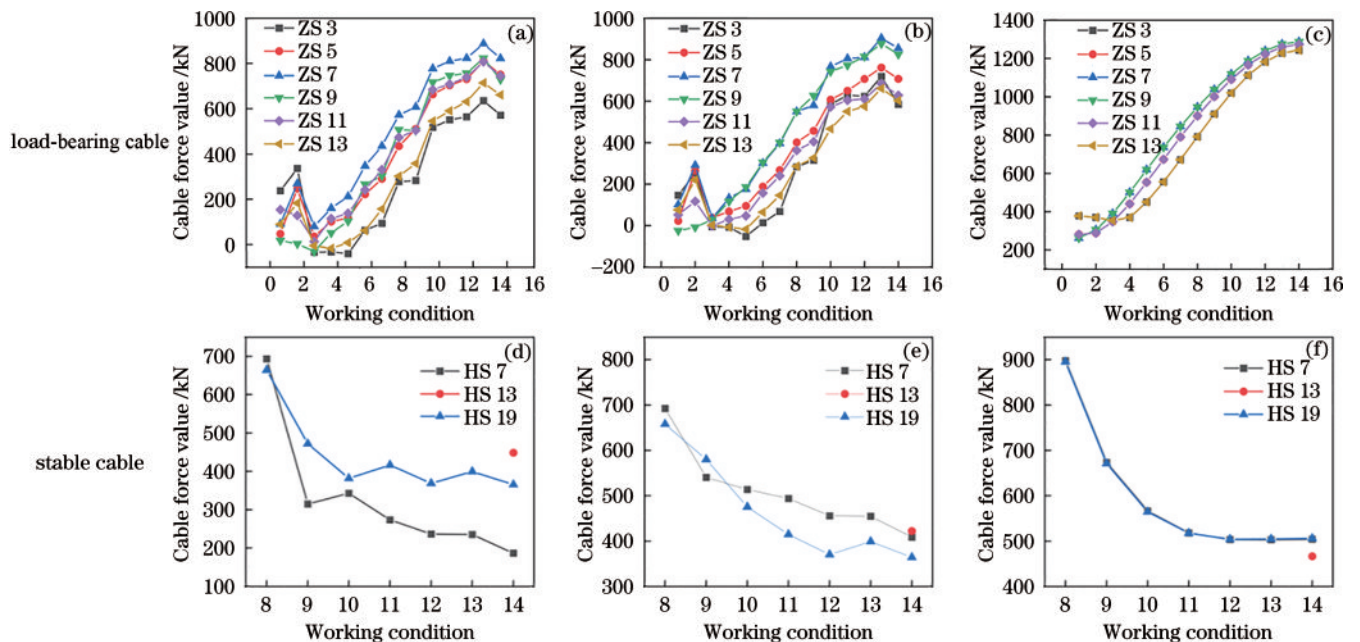


图7 不同工况下的索力值。(a)(d)测点1;(b)(e)测点2;(c)(f)理论分析

Fig. 7 Cable force values under different working conditions. (a) (d) Measurement 1; (b) (e) measurement 2; (c) (f) theoretical analysis

的稳定索 HS 1、HS 25) 的承重索索力增幅较为明显, 原因是张拉的稳定索位于索网外侧, 对外围承重索影响较大; 将实测索力与理论分析的索力变化进行对比, 容易发现测点 1、2 的索力变化情况总体相同, 而将实测索力与理论索力进行对比, 发现实测索力的变化范围和趋势与理论分析相符合; 实测索力值与理论索力值最大差值在 200 kN 以内, 相差在 15% 以内, 说明通过智能拉索进行索力监测的方法是可行的, 而造成实测索力偏小的原因, 主要是承重索采用索夹与多根稳定索相接, 索夹、索体自重以及稳定索传递的作用力, 造成承重索越靠近两端, 截面的索力值越大, 智能拉索的光栅测点布置位置位于拉索中间部位, 实测的索力偏小; ZS 3 和 ZS 13、ZS 5 和 ZS 11、ZS 7 和 ZS 9 在索网中位置相对称, 在张拉过程中也表现出较好的相似性, 每组拉索的索力随着工况的变化趋势接近, 与理论分析相吻合。

对比不同工况下稳定索的索力值变化, 如图 7(d)~(f) 所示。HS 7、HS 13 和 HS 19 作为主动张拉索, 在张拉时索力最大, 后随着其他稳定索的安装逐步下降; HS 7 的测点 1 处索力较测点 2 偏小, 测点位置光栅受损的可能性较大; 对比稳定索的理论索力, 实测索力值偏小, 原因与承重索相似, 主要是光栅测点偏于拉索中部造成的。总体而言, 智能拉索实测索力变化与理论分析的结果相吻合。但由于该工程是首次将光纤光栅智能拉索应用于大跨索网工程上, 问题考虑不够完善, 需要在以后的工程应用中进行改进, 将光栅测点设置位置适当靠近拉索的端部。

5 结 论

针对大跨空间索网结构索力监测困难的问题, 对应用于实际工程中的光纤光栅智能拉索在索网张拉安装过程中的索力监测情况进行分析, 结论如下:

1) 将光纤光栅传感器封装在拉索内部中心丝, 能有效避免安装中传感单元损坏和索力测量对施工过程的影响, 通过对光纤光栅智能拉索的标定, 可知其灵敏度高、稳定性好。

2) 根据对应的工况, 运用有限元软件对索网安装过程进行理论分析和计算, 得到不同工况下的拉索索力变化情况; 采用智能拉索在索网安装过程中监测索力变化趋势, 发现智能拉索监测结果总体上与理论分析的索力变化趋势相吻合; 张拉过程中出现部分索力增长较快情况, 为确保结构安全, 对大跨空间索网结构进行索力监测十分必要。

3) 基于智能拉索在顺德区德胜体育中心游泳馆马鞍形索网中的应用, 智能拉索在索网张拉安装过程中的索力变化与千斤顶油压相符合, 能有效地反映拉索受荷状态; 同时与安装过程中的油压进行比对, 可避免拉索张拉过程中产生较大的施工误差, 更好地保证工程结构的安全。

参 考 文 献

- [1] 李久林, 陈利敏, 陈彬磊, 等. 国家速滑馆智慧场馆建设和集成应用研究[J]. 北京体育大学学报, 2022, 45(1): 13-24.
- [2] 黄彬彬. 2022 世界杯主场馆鱼尾式索网屋面结构形态分析[J]. 施工技术, 2021, 50(8): 1-5.
- [3] 张旭苹, 周广南, 王浩然, 等. 基于分布式光纤声场传感的预应力钢管混凝土管断丝监测研究进展[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 0106006.
- [4] 李艳霞, 孙晓岭. 基于结构拓扑的不规则钢桁架体育馆抗倒塌分析[J]. 建筑结构, 2024, 54(8): 67-73.
- [5] Lee Y C, Shariatfar M, Rashidi A, et al. Evidence-driven sound detection for prenotification and identification of construction safety hazards and accidents[J]. Automation in Construction, 2020, 113: 103127.
- [6] 邱文亮, 吴广润. 悬索桥吊索断裂动力响应分析的有限元模拟方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(11): 22-30.
- [7] Wang L, Wu B, Gao J Y, et al. A new cable force identification method considering cable flexural rigidity[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2018, 68(2): 227-235.
- [8] Wang Y W, Li K Y, Chen Y, et al. Research on non-contact and non-fixed cable force measurement based on smartphone[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 8902.
- [9] Cho S, Yim J, Shin S W, et al. Comparative field study of cable tension measurement for a cable-stayed bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(8): 748-757.
- [10] 郑锐, 刘礼华, 吴建峰, 等. 高温暴露对索力监测用胶接植入光纤光栅传感器的测试性能影响研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(11): 1634-1639, 1647.
- [11] 任伟新, 陈刚. 由基频计算拉索拉力的实用公式[J]. 土

- 术工程学报, 2005, 38(11): 26-31.
- Ren W X, Chen G. Practical formulas to determine cable tension by using cable fundamental frequency[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 26-31.
- [12] 蔡玉龙, 李周, 危媛丞, 等. 考虑频率测试结果不确定性的拉索索力识别方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(17): 314-319.
- Cai Y L, Li Z, Wei Y C, et al. Identification of tension in cables with uncertainty frequency measurement using set inversion via interval analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(17): 314-319.
- [13] 夏巨伟, 张宇鑫, 邓华, 等. 乐清体育场月牙形索桁张力罩棚结构的索力监测[J]. 空间结构, 2014, 20(2): 46-54, 70.
- Xia J W, Zhang Y X, Deng H, et al. Cable pretension monitoring for the crescent-shaped cable-truss tensile canopy structure of Yueqing Stadium[J]. Spatial Structures, 2014, 20(2): 46-54, 70.
- [14] Duan Y F, Zhang R, Dong C Z, et al. Development of elasto-magneto-electric (EME) sensor for in-service cable force monitoring[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2016, 16(4): 1640016.
- [15] 刘小锋, 冯志敏, 胡海刚, 等. 基于磁通量法索力测量模型参数的调适研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(7): 926-931.
- Liu X F, Feng Z M, Hu H G, et al. Research on adjustment method for model parameters of cable tension measurement based on the elasto-magnetic effect[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(7): 926-931.
- [16] 王天鹏, 周果子. 基于光纤光栅测力环的桥梁拉索索力监测及温度补偿研究[J]. 中外公路, 2017, 37(3): 112-117.
- Wang T P, Zhou G Z. Research on bridge cable tension monitoring and temperature compensation based on fiber grating force measuring ring[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(3): 112-117.
- [17] Koščo T, Margetin M, Chmelko V, et al. Bridge cable tension estimation using the vibration method[J]. Structures, 2024, 63: 106332.
- [18] Schoenekess H C, Ricken W, Liu J G, et al. Special constructed and optimised eddy-current sensors for measuring force and strain in steel reinforced concrete[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 106(1/2/3): 159-163.
- [19] 周储君. 大跨度马鞍形单层正交索网结构施工关键技术研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- Zhou C J. Study on the key technology of construction of large span saddle shaped orthogonal monolayer cable net structure[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [20] Guo N, Wang X G, Lan C G. The technology and application of cable force monitoring for spatial cable structure[J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2021, 18(8): e416.
- [21] 余文成, 欧维, 朱万旭, 等. 光纤光栅型钢绞线成品拉索的研制[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(15): 1506001.
- Yu W C, Ou W, Zhu W X, et al. Development of finished fiber-optic grating type steel strand ties[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(15): 1506001.
- [22] 刘晓江, 周智, 白石, 等. 超高灵敏度工程化光纤光栅索力传感器[J]. 中国测试, 2020, 46(12): 60-66.
- Liu X J, Zhou Z, Bai S, et al. Engineered FBG cable force sensor with ultra-high sensitivity[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(12): 60-66.
- [23] Ju M, Park K, Moon D, et al. On strain measurement of smart GFRP bars with built-in fiber Bragg grating sensor[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2018, 65: 155-162.
- [24] 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): 0206002.
- Zhu W X, Shen Q X, Qin H Y. Research and application of FBG monitoring technology in internal prestressed steel strand[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(2): 0206002.
- [25] 余文成, 骆小勇, 覃荷瑛. 利用FBG传感器监测拉索断丝信号的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0106003.
- Yu W C, Luo X Y, Qin H Y. Experimental study on monitoring cable broken wire signal by FBG sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 0106003.