

引用本文:朱万旭,凌云翔,刘鹏,等.玻璃幕墙外置式光纤光栅索力传感器的设计与应用[J].光通信技术,2025,49(5):72-77.

玻璃幕墙外置式光纤光栅索力传感器的设计与应用

朱万旭^{1,2},凌云翔^{1,2},刘鹏^{4*},刘丰荣^{1,2,3}

(1. 桂林理工大学 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室,广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 广西壮族自治区智慧结构材料工程研究中心,广西 桂林 541004;

3. 广西汉西鸣科技有限责任公司,广西 桂林 541004;4. 广东省建筑设计研究院集团股份有限公司,广州 510599)

摘要:为实现对幕墙索力的精准测量,提出一种玻璃幕墙外置光纤布喇格光栅(FBG)索力传感器。通过开展应变标定试验验证其静态性能;结合温度补偿试验以消除应变与温度的交叉敏感性,并经过索力标定试验建立了索力与FBG波长变化量之间的标定关系,最终将其应用于实际工程。试验结果表明:该传感器经过增敏设计后,应变灵敏度为 $1.9\text{ pm}/\mu\epsilon$,为裸贴光栅的1.58倍。工程上,在0~110 kN内,传感器实测值与油压千斤顶荷载的最大相对误差为3.41%,满足工程需求,具有广阔的应用前景。

关键词:幕墙;拉索;索力;光纤布喇格光栅;传感器

中图分类号:TN929.1;TP212 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0072-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.013

Design and application of external fiber Bragg grating cable force sensor for glass curtain wall

ZHU Wanxu^{1,2}, LING Yunxiang^{1,2}, LIU Peng^{4*}, LIU Fengrong^{1,2,3}

(1. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Intelligent Structural Materials Engineering Research Center, Guilin University of

Technology, Guilin Guangxi 541004, China; 3. Guangxi Hanximing Technology Co., Ltd., Guilin Guangxi 541004, China;

4. Guangdong Architectural Design and Research Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510599, China)

Abstract: To achieve accurate measurement of cable force in curtain walls, an external fiber Bragg grating (FBG) sensor for glass curtain wall cable force monitoring is proposed. Static performance is verified through strain calibration tests, while temperature compensation tests are conducted to eliminate strain-temperature cross-sensitivity. A calibration relationship between cable force and FBG wavelength shift is established via cable force calibration tests, and the sensor is subsequently applied in practical engineering. Test results demonstrate that after sensitivity enhancement design, the strain sensitivity of the sensor reached $1.9\text{ pm}/\mu\epsilon$, which is 1.58 times that of a bare fiber Bragg grating. In engineering applications, within the range of 0~110 kN, the maximum relative error between the sensor-measured values and the load applied by the hydraulic jack is 3.41%, meeting engineering requirements and demonstrating broad application prospects.

Key words: curtain wall, cable, cable force, fiber Bragg grating, sensor

收稿日期:2025-05-10。

基金项目:国家自然科学基金项目(51768014)资助。

作者简介:朱万旭(1972—),男,博士,教授级高级工程师,博士研究生导师,主要从事预应力结构及结构智能健康监测方面的研究工作,长期主持国家及省部级科研项目,包括广西创新驱动发展专项、国家重点研发计划课题等,研究方向涵盖智能预应力结构、复合材料索锚体系及大型索网施工技术。

***通信作者:**刘鹏(1978—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为高性能围护结构设计研究与应用、建筑幕墙与金属屋面抗风设计研究与应用、异形空间曲面建筑表皮设计方法。



0 引言

在现代建筑工程中,随着结构设计的创新与发展,幕墙形式日益多样化,涌现出单索支撑幕墙、索网幕墙和肋支撑玻璃幕墙等多种结构。其中,预应力拉索作为幕墙的关键构件,对结构的安全施工和长期稳定运行至关重要^[1-2]。

目前,传统幕墙索力测量方法主要有磁通量法^[3-4]、法弓式测力计法(也称三点弯曲法)^[5]、油压表法^[6-7]。其中,磁通量法通过电磁传感器测量索张力,但易受电磁干扰影响;法弓式测力计法利用钢索的几何刚度

推算张力,但缺乏成熟的轴向刚度直接测量技术;液压表法可快速获取索力值,但仅适用于张拉过程,无法实现长期实时监测。相比之下,光纤布喇格光栅(FBG)传感器因其高精度、小体积、高灵敏度及抗电磁干扰等优势,可实现多点分布式实时监测,有效克服传统测量方法的局限性^[8-10]。ZHENG R等人^[11]通过在电缆钢丝中嵌入FBG应变传感器,制成可对自身索力进行实时监测的智能索,验证了其可靠性,但光纤元件植入拉索的封装工艺复杂,存活率低、成本高,且难以现场安装或更换。王旭泽等人^[12]通过设计一种基于FBG应变传感器的卡箍测量法,能有效针对拉索径缩和扭转带来的测量问题,但索力测量误差较大,未能运用在实际工程中。孙晓等人^[13]通过将FBG应变传感器安装在底座焊接于索头线性应变区域轴向,并成功运用在FAST工程的索力监测,但该方法对索体具有损伤性,且传感器不可更换,长期可靠性存在固有问题。此外,唐军等人^[14]提出FBG基座夹具体外布置法及内布置法,并成功应用于昆山市西部服务中心拉索幕墙工程中,验证了方法的可行性和准确性,但其使用的FBG应变传感器灵敏度较低(仅1.116 pm/ $\mu\epsilon$),在微小变形和噪声干扰下,应变灵敏度不足以有效捕捉细微的应变变化^[15]。

为解决上述问题,本文基于FBG夹具测量法原理,设计一种具有增敏效果的玻璃幕墙外置式FBG索力传感器,以有效降低安装误差对测量精度的影响,提高索力测量精度。

1 传感器设计原理

本文首先通过推导FBG应变与索力的关系,对传感器进行增敏设计。

1.1 光纤光栅索力监测原理

当FBG受到轴向应力和温度变化时,其中心波长偏移量 $\Delta\lambda_B$ 计算公式如式(1)所示。

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\epsilon + \lambda_B(\alpha_f + \zeta)\Delta T = K_\epsilon\Delta\epsilon + K_T\Delta T \quad (1)$$

其中, $\Delta\lambda_B$ 为光栅中心波长偏移量, λ_B 为光栅初始中心波长, P_e 为有效弹光系数, α_f 为热膨胀系数, ζ 为热光系数, K_ϵ 为光栅应变灵敏度系数, K_T 为光栅温度灵敏度系数, $\Delta\epsilon$ 为应变变化, ΔT 为温度变化。

针对FBG存在的应变-温度交叉敏感问题,本文采用参考光栅法,即在传感器中设置仅受温度影响的参考光栅FBG₂。测量时,用夹具将FBG索力传感器与幕墙拉索固定一起。假设幕墙拉索与FBG索力传感

器发生协同变形,可以推导出幕墙拉索的索力 F 与FBG中心波长变化量的关系为

$$F = E_0 A_0 \epsilon_0 = \frac{E_0 A_0}{K_\epsilon} \left(\Delta\lambda_{B1} - \frac{K_{T1} \Delta\lambda_{B2}}{K_{T2}} \right) \quad (2)$$

其中, ϵ_0 为幕墙拉索产生的应变, E_0 为幕墙拉索的弹性模量, A_0 为幕墙拉索的横截面积, $\Delta\lambda_{B1}$ 为FBG₁中心波长变化量, $\Delta\lambda_{B2}$ 为FBG₂中心波长变化量, K_{T2} 为FBG₂的温度灵敏度系数。

1.2 应变增敏原理

试验使用的幕墙拉索的直径为24 mm的高钒索,其截面积为340.69 mm²,弹性模量为1.45×10⁵ N/mm²,在110 kN的设计预应力下,索体产生的应变为2 226.72 $\mu\epsilon$,远低于光纤光栅的极限应变。为提高测量精度,基于检测需求和FBG传感器灵敏度可调原理^[16],FBG索力传感器的原理如图1所示。图中, L 为光纤夹持杆件两端之间的跨度, L_0 为支座中点间距。

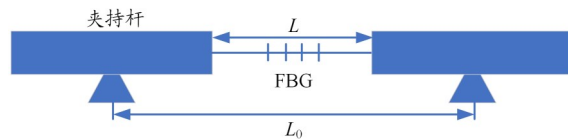


图1 FBG索力传感器原理图

根据变形协调原理,由于夹持杆的刚度远大于光纤, L 的变形量 ΔL 与 L_0 在被测对象受力产生的变形量 ΔL_0 近似相等,因此应变关系可以表示为

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L_0}{L} = \frac{\epsilon_0 L_0}{L} \quad (3)$$

由式(3)可知,FBG的应变响应 ϵ 与 ϵ_0 的比值等于支座中点间距 L_0 与光纤夹持杆件跨度 L 的比值。当温度不变时,根据式(1)和式(3)可得

$$\epsilon = \frac{\Delta\lambda_B L_0}{K_\epsilon L} \quad (4)$$

令 $K_{\text{FBG}} = \frac{K_\epsilon L}{L_0}$, K_{FBG} 为FBG索力传感器的理论应变灵敏度,得出

$$\Delta\lambda_B = \frac{K_\epsilon L}{L_0} \epsilon = K_{\text{FBG}} \epsilon \quad (5)$$

由式(5)可知, K_{FBG} 只与 L 和 L_0 有关,只需通过改变 L 和 L_0 的比值,即可增大外置式FBG索力传感器的应变灵敏度。

1.3 安装误差影响分析

在实际工程中,索力传感器在幕墙拉索上的安装容易因人为失误导致夹紧力不足,从而在张拉过程中发生相对滑移,严重影响索力测量的精度。在安装过

程中, 夹具通过与幕墙拉索和传感器的接触传递正压力和切向力, 依靠摩擦力防止相对滑移, 为确保测量准确性, 夹具与传感器之间的切向作用力必须小于最大静摩擦力。FBG 索力传感器安装示意图如图 2 所示。以夹具与传感器接触点为坐标原点, 建立坐标系 X_i, Y_i, Z_i , 夹具对传感器和幕墙拉索施加的摩擦力与法向接触力的合力需位于摩擦锥内。

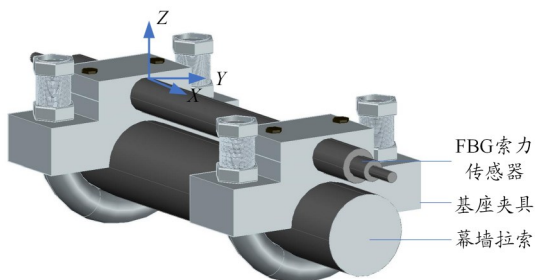


图2 FBG索力传感器安装示意图

设接触点上传感器与夹具之间的摩擦系数为 μ 。根据库仑摩擦定理, X 轴方向的滑移条件可表示为

$$F_{Xi} \leq \mu_i F_{Ni} \quad (6)$$

其中, μ_i 表示在 i 点的摩擦系数, F_{Xi} 为 Y 轴向切应力, F_{Ni} 为 i 点夹具和传感器接触传递的正压力, 是夹紧力 F_c 的分量。 F_{Xi} 可根据胡克定律算出, $F_{Xi} = K\Delta l$, K 为传感器的轴向刚度, Δl 为传感器测量拉力产生的变形量, 代入式(6)可得

$$K\Delta l \leq \mu_i F_{Ni} \quad (7)$$

由此可见, 在使用传感器测量同一根幕墙拉索时, 如果传感器的轴向刚度越小, 则在产生相同的变形量的情况下, 所需的固定正压力也越小。这意味着仅需较小的夹紧力 F_c 即可有效地固定传感器。

2 传感器试验分析

本文对所提传感器开展应变标定试验、温度补偿试验及索力标定试验, 得出传感器实测值与中心波长变化值的标定公式, 并应用在实际工程中。

2.1 结构设计

本文提出的外置式 FBG 索力传感器结构示意图如图 3 所示。该结构采用光纤两端锚固、光栅悬空的封装形式, 由光纤固定杆 1、光纤固定杆 2 和变形机构 (弹簧、防护外壳和紧定螺钉) 组成。光纤两端通过粘结胶锚固于光纤固定杆 1 和光纤固定杆 2 中, 应变光栅 FBG_1 悬空置于变形机构内部, 温度光栅 FBG_2 置于光纤固定杆 1 中。索力传感器装配时, 弹簧呈压缩状态, 对光纤施加一定的预拉力, 并通过紧定螺钉使其

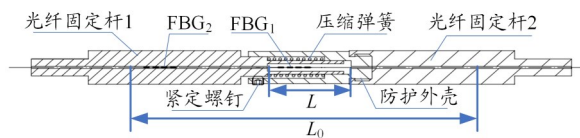


图3 FBG索力传感器结构示意图

FBG 保持预拉状态, 消除初始误差。传感器安装至幕墙拉索后, 松开紧定螺钉, 变形结构恢复可变形状态, 实现索力传感器与幕墙拉索变形协同。根据式(5)可知, 通过增大 L 便可达到增敏效果。且因其 FBG 索力传感器的轴向拉伸刚度接近于光纤本身, 故刚度极低。这不仅实现了低轴向刚度的设计, 也有效降低了安装误差。

2.2 应变标定试验

为验证所提 FBG 索力传感器的静态性能指标, 本文在常温下对传感器进行应变标定试验, 试验装置如图 4 所示。试验步骤: 将传感器放在张拉标定试验台固定, 连接 FBG 解调仪。加载过程采用分级增量方式, 正向加载时以 $500 \mu\epsilon$ 为增量步长逐级施加应变载荷, 每个加载阶段保持 30 s 稳定时间, 待信号稳定后采集中心波长数据, 直至达到 $2500 \mu\epsilon$, 随后以相同步长进行卸载逆向试验。重复以上步骤 3 次, 完成应变标定试验。

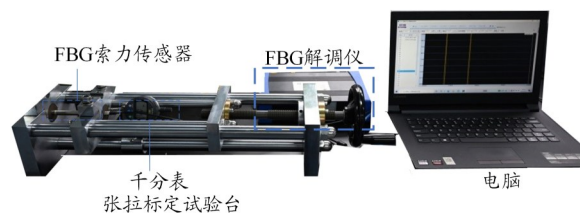
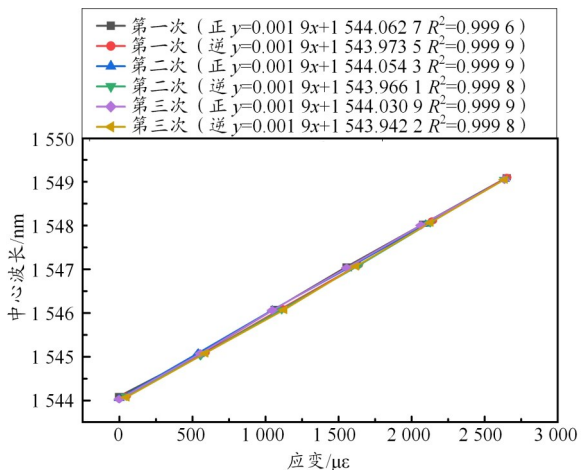


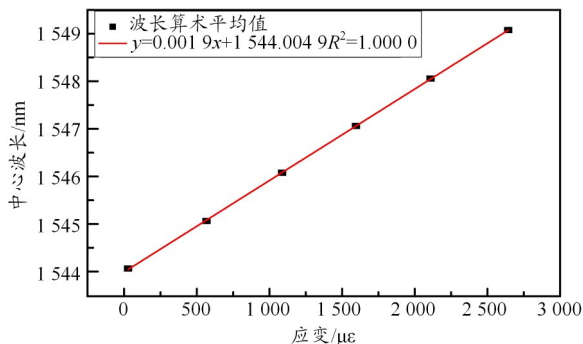
图4 应变标定试验装置

传感器应变标定试验结果如图 5 所示。图 5(a) 为 3 次正、逆行程中应变与 FBG 中心波长的线性关系, 6 组试验数据的线性拟合度 R^2 均大于 0.999。图 5(b) 为 6 组试验数据的平均应变与波长的关系, 通过线性拟合计算得到的 FBG 索力传感器的灵敏度为 $1.9 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。相较于裸光纤光栅 ($1.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$), 所提传感器的灵敏度提高了 58%, 增敏效果明显。

为确保索力传感器的测量精度和可靠性, 其静态特性需满足严格的性能标准。依据 DL/T1736—2017《光纤光栅仪器基本技术条件》的规定, 静态性能的关键指标包括灵敏度、线性度、重复性和迟滞性。通过应变标定试验的数据计算分析可知, 本文所采用的 FBG 索力传感器表现出优异的静态特性, 其中线性度为 1.08%、重复性为 1.40%、迟滞性为 1.10%, 具有良好



(a) 应变与波长的关系



(b) 平均应变与波长的拟合曲线

图5 FBG索力传感器标定试验结果

的应变检测性能,满足土木工程结构健康监测的技术要求。

2.3 温度补偿试验

为消除FBG₁的应变-温度交叉敏感,本文搭建了温度补偿试验台,如图6所示,以得出FBG₁与FBG₂的温度灵敏度系数的比值 $K_1=K_{T1}/K_{T2}$ 。试验步骤:在高低温恒温槽内注入适量清水,将初始温度设置为10℃,待温度稳定后,将FBG索力传感器浸入恒温槽中,传感器静置30 min后,分别记录应变光栅和温度光栅的中心波长数据。恒温槽从10℃升温至60℃,步长为10℃,

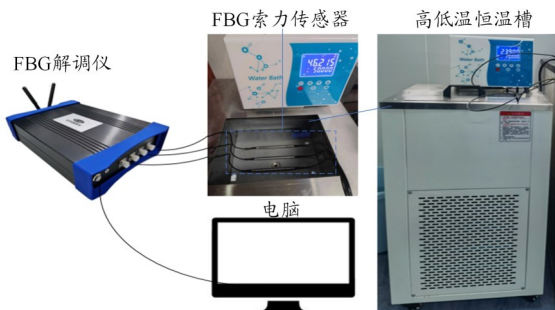


图6 温度补偿试验台

每次升温完成后保持1 h,待波长稳定后同时记录,再以相同步长降温至10℃。重复以上步骤3次,完成温度补偿试验。

温度补偿试验结果如图7所示。可以看出,在10~60℃温度内,随着温度的升高,各光栅中心波长呈线性增长,线性拟合度 R^2 均大于0.99,计算得出FBG₁、FBG₂的平均波长与温度之间的拟合方程分别为: $\lambda_{\text{FBG1}}=0.025\ 3T-0.270\ 2$ 、 $\lambda_{\text{FBG2}}=0.024\ 5T-0.253\ 1$,即FBG₁、FBG₂的灵敏度分别为25.3、24.5 pm/℃。

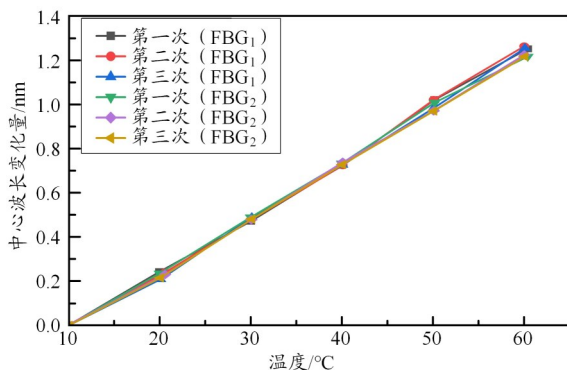


图7 FBG索力传感器温度补偿试验结果

在不同温度下,试验测得FBG₁与FBG₂的中心波长差均值与理论拟合值的最大偏差分别为0.011 5、0.011 3 nm。依据JG/T 421—2013《土木工程用光纤光栅温度传感器》的技术规范进行误差分析,计算得出FBG₁和FBG₂的温度测量误差分别为0.45、0.49℃,满足温度补偿要求,能够有效保障测量数据的准确性。

2.4 索力标定试验

为了得到幕墙索力与FBG传感器测得波长变化量之间的公式系数,本文以桂林漓江歌剧院幕墙拉索的索力检测为依托,所选用直径 Φ 为24的幕墙索(316不锈钢钢绞线),设计预拉力为110 kN,最小破断力 F_m 为400.14 kN。根据式(2),并通过线性拟合计算标定系数,最终得出传感器实测值与中心波长变化值之间的标定公式。为避免初始弯曲影响应变传递的准确性,试验开始前对幕墙拉索施加约20 kN的预紧力。

索力标定测量试验装置如图8所示。将设计的3个FBG索力传感器(1#、2#、3#)通过夹具固定在幕墙拉索上,并按以下步骤进行试验:荷载从20 kN开始,每次以20 kN为步长逐步加载,直至140 kN,再以相同步长逐级卸载至20 kN,每次加载或卸载完成后,保持荷载稳定10 s再读取数据。以上步骤重复3次,最终完成索力标定试验。

根据式(2)对1#、2#、3#FBG索力传感器索力标定

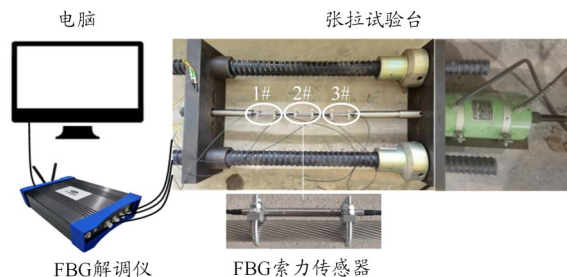


图8 索力标定测量试验装置

试验结果分别进行拟合后,得到的测量结果如图9~图11所示。可以看出,传感器具有良好的线性度,现行拟合曲线 R^2 均大于0.999。

通过求出1#、2#、3#传感器的试验数据的平均值,拟合后得到1#、2#、3#传感器的索力标定公式为

$$F_1 = 25.6545 \Delta\lambda_{F1} + 20.8273 \quad (8)$$

$$F_2 = 17.4989 \Delta\lambda_{F2} + 19.6295 \quad (9)$$

$$F_3 = 17.1517 \Delta\lambda_{F3} + 19.6067 \quad (10)$$

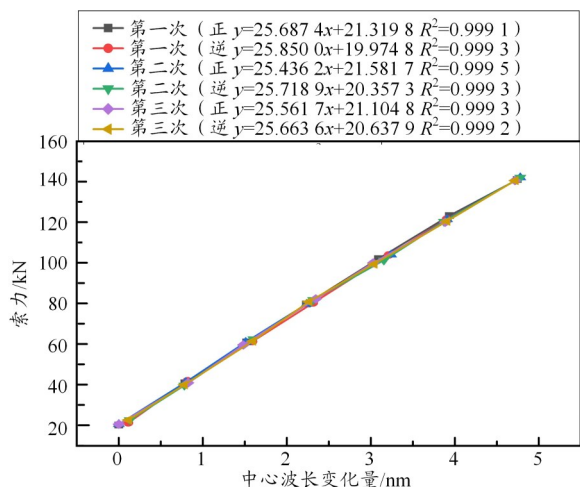


图9 1#FBG 索力传感器索力张拉测量结果

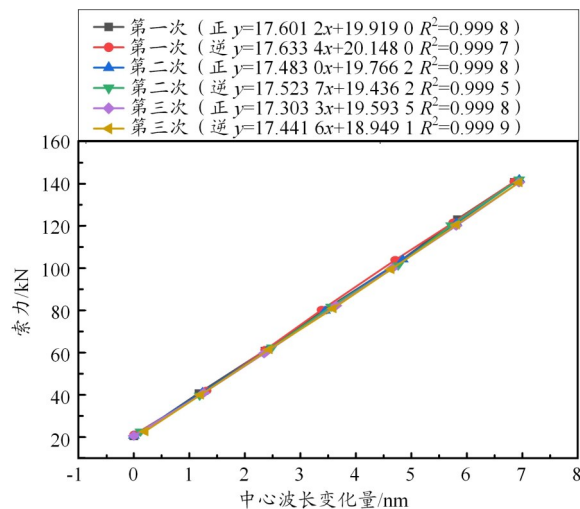


图10 2#FBG 索力传感器索力张拉测量结果

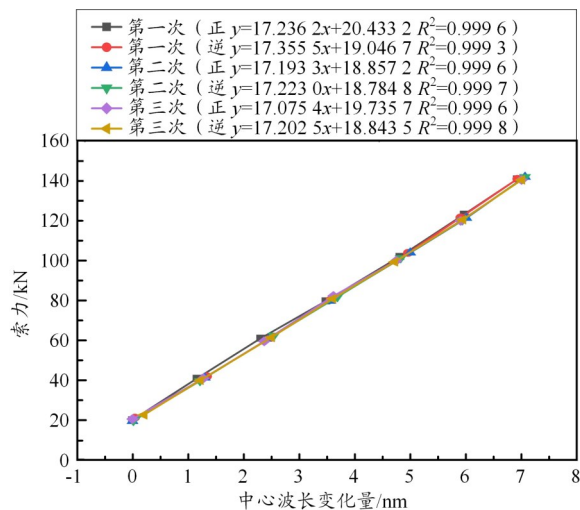
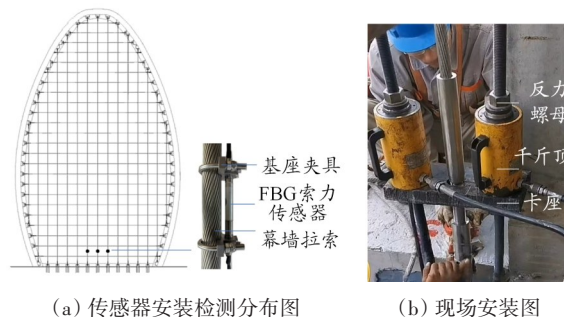


图11 3#FBG 索力传感器索力张拉测量结果

3 工程应用

本文将所提传感器与油压千斤顶显示的拉力进行对比,验证外置式FBG 索力传感器的有效性和可靠性。

桂林漓江歌剧院采用双曲面流线型幕墙索网结构,其幕墙部分高度为28.421 m,宽度为16.102 m,其分布图和现场安装图如图12所示。该索网沿左右方向布置15根 $\Phi 32$ 不锈钢拉索,相邻拉索间距约1.1 m;沿上下方向布置24根 $\Phi 24$ 不锈钢拉索,相邻拉索间距约1.2 m。为全面准确地反映索网结构的受力情况,并避免交叉横索约束对索力的干扰,索力传感器被安装在曲面最低点的张拉端,该区域承载了曲面的大部分重量和反作用力,具有关键的支撑作用。



(a) 传感器安装检测分布图 (b) 现场安装图

图12 传感器安装检测分布图与现场安装图

图12中,从左往右依次分别选取编号为 S_1 、 S_2 、 S_3 的3根拉索作为检测对象,分别安装1#、2#、3# FBG 索力传感器进行监测。张拉过程分为4个加载阶段:第一阶段施加25%预拉力(27.5 kN),第二阶段增至50%(55 kN),第三阶段达到75%(82.5 kN),最终阶段张拉至预拉力设计值(110 kN)。根据式(8)~式(10),通过

表1 S_1 、 S_2 、 S_3 索力检测数据

索编号	F_a/kN	λ/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	λ_p/nm	$\Delta\lambda_p/\text{nm}$	F_{FBG}/kN	相对误差/%
S_1	0.0	1 543.978 0	0.000 0	1 535.789 7	0.000 0	0.0	0.00
	27.5	1 545.002 4	1.024 4	1 535.787 4	-0.002 3	26.6	3.18
	55.0	1 546.036 4	2.058 4	1 535.786 6	-0.003 1	53.5	2.79
	82.5	1 547.073 0	3.095 0	1 535.785 8	-0.003 9	80.4	2.59
	110.0	1 548.126 8	4.148 8	1 535.785 0	-0.004 7	107.7	2.08
S_2	0.0	1 546.054 6	0.000 0	1 535.682 7	0.000 0	0.0	0.00
	27.5	1 547.564 6	1.510 0	1 535.676 4	-0.006 3	26.9	2.12
	55.0	1 549.040 9	2.986 3	1 535.675 4	-0.007 3	53.1	3.38
	82.5	1 550.582 3	4.527 7	1 535.675 7	-0.007 0	80.5	2.42
	110.0	1 552.121 6	6.067 0	1 535.674 8	-0.007 9	107.8	1.96
S_3	0.0	1 544.014 9	0.000 0	1 535.505 7	0.000 0	0.0	0.00
	27.5	1 546.546 7	1.531 8	1 535.505 0	-0.000 7	26.7	2.75
	55.0	1 547.056 7	3.041 8	1 535.503 4	-0.002 3	53.1	3.41
	82.5	1 548.616 0	4.601 1	1 535.501 8	-0.003 9	80.4	2.59
	110.0	1 550.165 4	6.150 5	1 535.499 5	-0.006 2	107.4	2.33

FBG 索力传感器的波长变化值计算出拉索检测荷载, 并与张拉设备的显示值进行对比, 得出的数据结果如表1所示。

由表1可知, S_1 、 S_2 、 S_3 索上的FBG 索力传感器实测索力值 F_{FBG} 与油压千斤顶荷载 F_a 的最大相对误差分别为 3.18%、3.38%、3.41%, FBG 索力传感器测得的结果始终与张拉设备的显示值基本保持一致。误差的主要来源是实测过程中油压千斤顶无法维持稳定压力, 当油压表显示目标强度后, 立即记录当前传感器的波长值, 导致数据记录时存在一定误差, 但在设计预应力为 110 kN 的测量节点处, 最大相对误差为 2.33%, 处于工程允许误差范围内, 这验证了外置 FBG 索力传感器在索力检测中的准确性和可靠性。

4 结束语

本文设计了一种玻璃幕墙外置式FBG 索力传感器。该传感器结构易于安装, 仅需微小固定力, 操作简便且不损伤索体或改变其受力状态。试验结果表明: 所提传感器应变灵敏度达 $1.9 \text{ pm}/\mu\text{e}$, 较裸光纤光栅提高 58%, 线性度、重复性与迟滞性分别为 1.08%、1.40% 和 1.10%; 在 10~60 °C 范围内温度补偿误差均小于 0.5 °C, 抗温漂效果显著; 工程应用中索力测量最大相对误差仅为 3.41%, 在 110 kN 关键节点处误差仅

2.33%, 满足幕墙索力检测要求。该传感器为幕墙施工提供了高精度、无损的可靠监测手段。

参考文献:

- [1] PARK S H, WON H J, CHUNG J W. Wind resistance performance evaluation of cable-type curtain wall system on reinforced concrete high-rise buildings[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2019, 13 (2): 243-253.
- [2] 李沛尧, 赵地, 张铭哲, 等. 点支式玻璃幕墙拉索索力测试研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 295-297.
- [3] SYAMSI M I, WANG C Y, NGUYEN V S. Tension force identification for cable of various end-restraints using equivalent effective vibration lengths of mode pairs [J]. Measurement, 2022, 197: 1113191-1-1113191-5.
- [4] 王晓琳, 朱茂华, 章鹏, 等. 磁通量索力传感器的研究进展[J]. 广西科学, 2023, 30(3): 434-444.
- [5] 陈建勋, 崔大光, 林晓明, 等. 电梯曳引钢丝绳三点弯曲法张力偏差测试精度的研究[J]. 中国特种设备安全, 2018, 34(4): 26-30, 34.
- [6] 贺电. 浅谈桥梁预应力后张法施工及张拉计算[C]//河南省土木建筑学会. 河南省土木建筑学会2010年学术研讨会论文集. 郑州: 郑州市市政工程总公司, 2010: 217-219.
- [7] 鄢光显. 频率法及千斤顶法在钢桁架悬索桥病害检测中的应用[J]. 江西建材, 2024(2): 82-84.
- [8] WANG Y W, ZHAO Q X, LI Y D, et al. Detecting cable force anomalies on cable-stayed bridges using the STA/LTA method[J]. Sustainability, 2022, 14(18): 11373-11373.
- [9] QIN H, LI C, LUO B, et al. Force monitoring in steel-strand anchor cables using quasi-distributed embedded FBG sensors[J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137192-137192.
- [10] 覃荷瑛, 祝健强, 李纯德, 等. 光纤光栅索力传感器的酸碱耐久性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(20): 8606-8614.
- [11] ZHENG R, LIU L, ZHAO X, et al. Investigation of measurability and reliability of adhesive-bonded built-in fiber bragg grating sensors on steel wire for bridge cable force monitoring[J]. Measurement, 2018, 129: 349-357.
- [12] 王旭泽, 李国东, 王心刚, 等. 新型工程化光纤光栅索力监测用传感器的研制[J]. 河南科学, 2023, 41(6): 793-800.
- [13] 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.
- [14] 唐军. 光纤光栅基座夹具测量法在索力监测中的应用研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- [15] 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.
- [16] 覃荷瑛, 倪敏. 灵敏度可调FBG 应变传感器在桥梁监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2023, 63(9): 69-74.