

激光与光电子学进展

光纤光栅传感技术在异形结构健康监测中的应用

张鼎博¹, 李俊^{1*}, 张维², 段兴超³, 张新炜¹, 马天¹, 王伟峰¹

¹西安科技大学安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

²西安外事学院工学院, 陕西 西安 710077;

³西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 当前技术发展针对建筑结构物健康监测存在一定的探索应用领域,作为传感器性能尚佳的光纤光栅类传感器在土木结构中的应用较为广泛。基于此技术,将光纤光栅物联网传感应用于异形结构健康监测,主要介绍了光纤光栅的结构原理和性能优势,结合工程项目实例,研究了光纤布拉格光栅(FBG)在异形结构健康监测中的相关应用方式并进行数据分析。该研究表明,FBG类传感器可以应用于异形结构健康监测中,同时对于其他相关土木基建结构也存在一定的推广及应用价值。

关键词 结构健康监测; 光纤传感; 异形结构; 光纤光栅

中图分类号 TU899

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0505001

Application of Fiber Bragg Grating Sensing Technology in the Health Monitoring of Special-Shaped Structures

Zhang Dingbo¹, Li Jun^{1*}, Zhang Wei², Duan Xingchao³, Zhang Xinwei¹,
Ma Tian¹, Wang Weifeng¹

¹College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology,
Xi'an, Shaanxi 710054, China;

²Institute of Technology, Xi'an International University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

³School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract The current technological development has a certain field of exploration and application for the health monitoring of building structures. As a sensor with good performance, the fiber grating sensor is widely used in civil structures. The fiber Bragg grating (FBG) Internet of Things sensing is applied in the health monitoring of special-shaped structure based on the technology. The structure principal and performance advantage of fiber gratings are mainly introduced. Combined with engineering project examples, the relevant application methods of FBG in the health monitoring of special-shaped structures is studied. and data analysis is carried out. The research shows that FBG sensors can be used in the health monitoring of special-shaped structures, and there are also certain promotion and application values for other related civil infrastructure structures.

Key words structural health monitoring; optical fiber sensing; special-shaped structure; fiber Bragg grating

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-06-03; 录用日期: 2021-06-11

通信作者: ljsiom@126.com

1 引言

随着社会经济的飞速发展,越来越多的大型异形建筑物已经作为各地的标志性建筑立于各个城市之中。重大工程结构的健康监测与诊断越来越受到社会各界的广泛重视,对灾害的提前预警或在灾害发生后的第一时间可以评估结构的损伤程度以及剩余寿命已经成为当前各国学者们研究的热点^[1]。建筑结构的健康监测作为新兴方向与学科,结合土木专业、建筑、水利、传感、精密仪器、通信、计算机等多个学科,把人复杂的感知、信息处理和响应的机能外推映射到工程结构中,从而使该技术具有像人一样自我感知、自我诊断和自我调节并适用环境的功能,是未来工程结构的发展方向^[2]。其本质是利用布设于建筑本体的传感器获取建筑结构的实时参数信息,类似于在建筑本体嵌入或贴合各种“神经末梢”,采用有线或者无线的传输方式将结构本身的参数状态上传至服务器,统一由服务器结合智能算法对建筑结构本身进行 24 h 不间断的智能监测,实现在异常环境下提前预警结构的健康状态,为结构的养护加固、事故分析救援及后期的修缮提供重要的数据及技术支持。

作为健康监测的“神经元”,传感器的选型及匹配度至关重要。光纤类传感器由于其各项突出的性能特点而成为结构健康监测中的首选传感器,其应用十分广泛^[3]。本文针对异形结构建筑的特点,选取温度、应变、位移等参数,应用光纤光栅传感技术开发异形结构健康监测预警系统,并通过后期采集的相关数据进行理论分析。

2 光纤光栅传感器的技术介绍

光纤的全称是光导纤维,光导纤维的应用是传感器领域的重大突破,其起源于光纤通信。在光通信中研究人员发现温度、应力等环境变化,会引起光纤传播中的光波强度、相位、频率、偏振态等改变,而测量光波量的变化,就可以知道导致这些变化的温度、应力等物理量的大小,根据这类原理可以制备出相应的光纤传感器^[4]。光纤传感中的一大旁支叫作光纤光栅(Fiber Bragg Grating)传感器,其本质是通过工艺手法使光纤中的一段范围内的纤芯折射率发生周期性变化,常规情况下通过的光会全部穿过此布拉格光栅而不受影响,只有特定波长的光在布拉格光栅处反射后会再返回到原来的方向^[5]。光纤光栅结构原理图如图 1 所示。

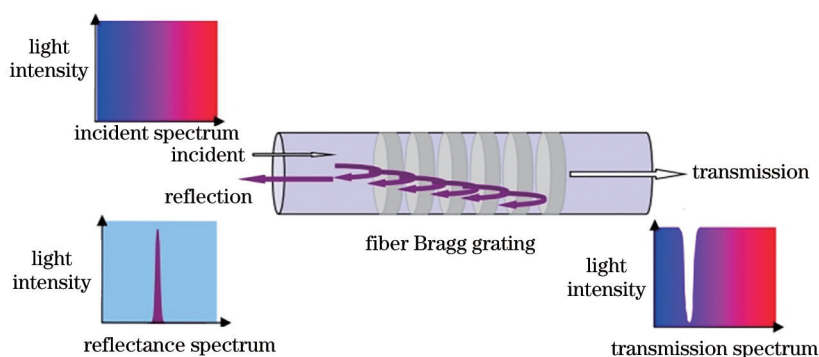


图 1 光纤布拉格光栅的结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of fiber Bragg grating

根据模耦合理论^[6],满足以下关系式的波长能够被光纤光栅反射回去,其余光波将沿光纤继续透射向后传播,

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

式中: λ_B 为光纤光栅的中心波长; Λ 为光栅的周期; n 为光纤纤芯的有效折射率。由(1)式可知反射的中心波长 λ_B ,与光栅周期 Λ 和纤芯折射率 n 都有关。若外界待测参量能够引起光栅周期或折射率发生变化,则会导致被光栅反射的光的中心波长发生变化。因此,就能通过探测到的光纤光栅中心波长的

变化来测量所需参量^[7]。

根据此类原理可以制备出多种类型的光纤光栅传感器,如温度、应变、倾角、沉降、位移等^[8]。同时光纤光栅传感器具备多种优势,如:灵敏度高,由于其核心器件光栅具有极高的灵敏度,转换封装为传感器时同样具备极高的灵敏度,可以应用于微灵敏探测;不受电磁干扰,由于光纤光栅本体由光导纤维(二氧化硅)制备,同时信号的感知及传播均通过激光实现,故可以免于电磁干扰,可应用于强磁强电等场景,如发电厂、变压器站等;器件无源,光

光纤栅传感器由于其无源特性,特别适用于石油、化工、煤矿等易燃易爆行业^[9-12]。

3 异形结构介绍及传感器布设

3.1 异形结构介绍

金融中心塔(图 2)是一高层建筑,位于福建某地,中国东南沿海城市。该建筑有两座高 137 m 的



图 2 金融中心塔

Fig. 2 Financial center tower

塔楼还有一座长 42 m 的天桥,将两座塔楼连接起来,形成门形结构体。天桥与塔楼之间采用刚性连接,增强结构强度,但这对塔之间的相对变形非常敏感^[13]。

由于沿海地区长期受海洋季风、台风、地震等外界因素影响,同时福建地区高温多雨,特殊地理环境下建设异于常规的大型建筑结构物具备更高的挑战性。为保障该结构后期的安全运营,项目方拟计划组建一套结构物健康监测预警系统。根据其“门”形结构的特殊性,相关土木建筑专家论证,需要在该结构的刚性连廊处监测温度、位移、应变、沉降、倾斜等相关参数来确保结构的安全性和完整性。

3.2 监测系统组成

该健康监测预警系统主要架构包括四个子系统:1)传感器子系统;2)数据采集与传输子系统;3)数据分析与处理子系统;4)安全预警子系统。其整体的健康监测预警系统拓扑图如图 3 所示。

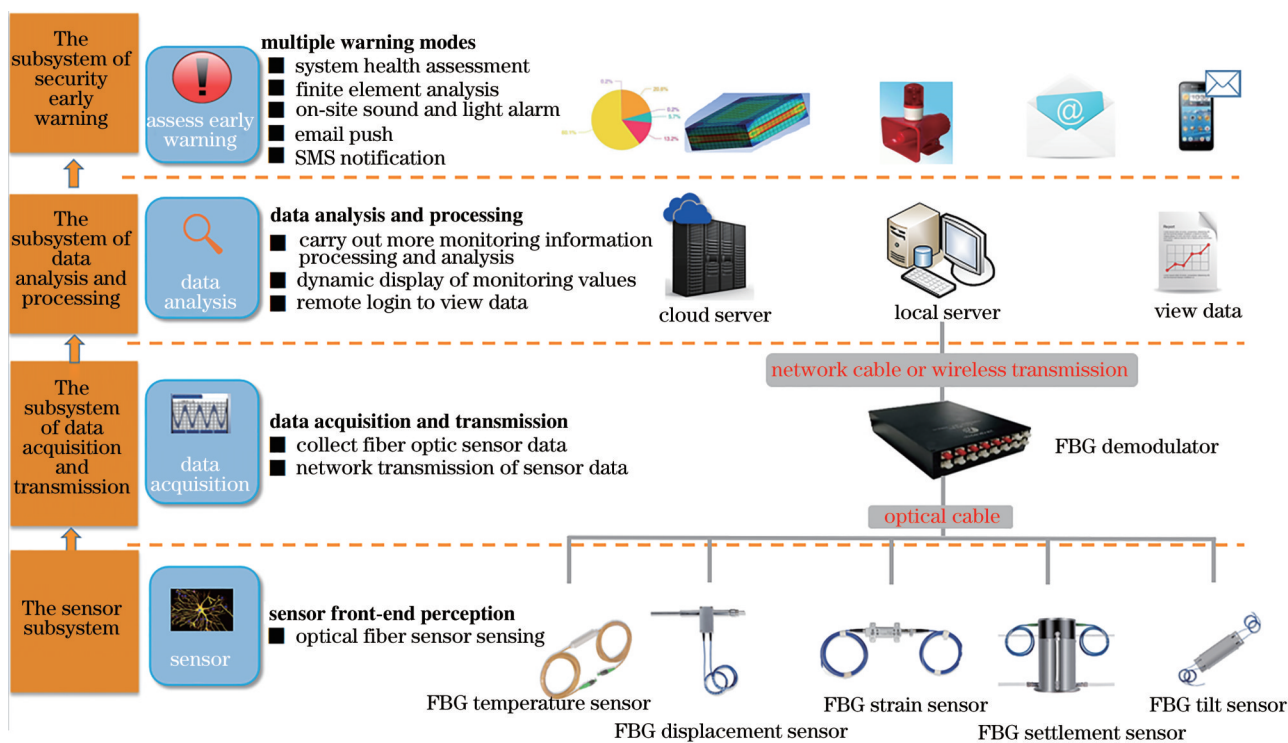


图 3 健康监测预警系统拓扑图

Fig. 3 Topology diagram of health monitoring and early warning system

传感器子系统包括安装在钢桥连廊层的 78 个传感器,其中包括光纤光栅温度传感器,光纤光栅位移传感器,光纤光栅应变传感器,光纤光栅沉降传感器,光纤光栅倾斜传感器。数据采集与传输子系统主要由数据采集仪(即光纤光栅解调仪)、有线

网络(运行商专网)组成。数据分析与处理子系统主要是基于服务器为硬件基础进行 B/S 架构下的系统软件实现,通过该软件可以实现用户登录后的数据处理、分析、下载等操作。安全预警子系统由于涉及信息较多,目前仍处于开发阶段,预计开发

完成后可以成功实现数据异常自动识别、系统健康评估、有限元阶段分析等功能。

3.3 传感器布设及安装方案

3.3.1 光纤光栅温度传感器

温度传感器布置在钢连廊层的 4 个角落,室内

及室外各布置 1 个传感器,故共有 8 个传感器,现场实际安装效果参考图 4。

由于传感器分为室内和室外两种测点,根据现场情况采用打磨和胶粘的方式进行安装,现场实际安装效果参考图 5。

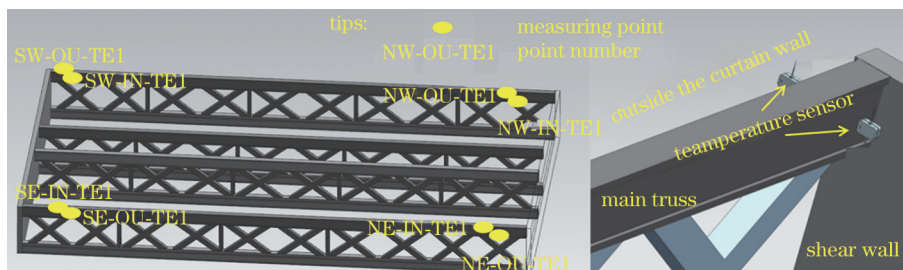


图 4 温度传感器布设图

Fig. 4 Temperature sensor layout diagram



图 5 温度传感器现场安装效果图

Fig. 5 Effect picture of on-site installation of temperature sensor

3.3.2 光纤光栅位移传感器

相对位移传感器布置在钢连廊层,具体在每根主桁架与南北主塔剪力墙连接处分别设有 1 个监测区、2 个监测点,每个监测区均在底部和腹部分别布

置 1 个位移传感器监测主桁架 2 个方向上的相对位移,共有 16 个相对位移传感器,布设信息参考图 6。根据现场情况采用焊接底座的方式进行安装,现场实际安装效果参考图 7。

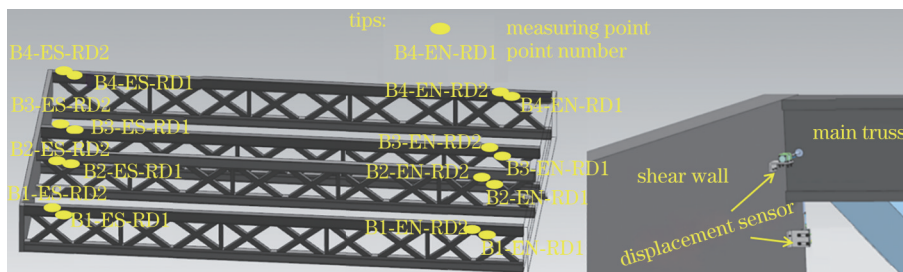


图 6 位移传感器布设图

Fig. 6 Displacement sensor layout diagram

3.3.3 光纤光栅应变传感器

应变传感器布置在连廊层及上层,总共布置了 48 个传感器。具体在每层楼的每根主桁架与南北主塔剪力墙连接处分别设有 1 个监测区和 2 个监测

点,每个监测区均在底部布置 1 个应变计监测主桁架面内弯曲应变,腹部布置 1 个应变计监测主桁架面外扭转应变;每层楼的每根主桁架中间两处的焊接位置分别设有 1 个监测区和 1 个监测点,每个监

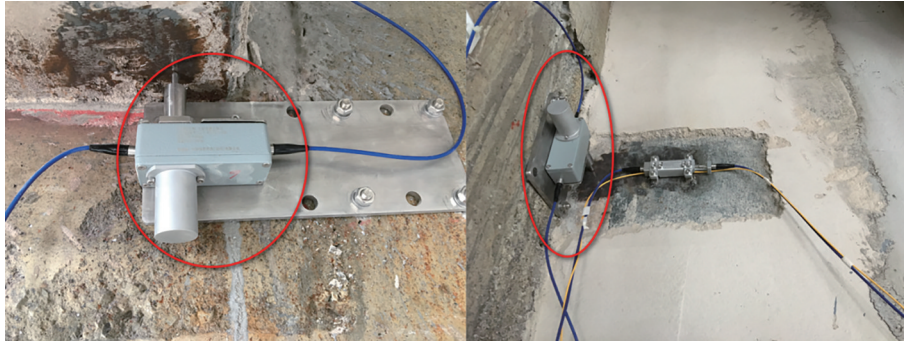


图 7 位移传感器现场安装效果图

Fig. 7 Effect picture of on-site installation of displacement sensor

测区均在底部布置 1 个应变计监测主桁架面内弯曲应变, 布设信息参考图 8。根据现场情况采用焊接

底座的方式进行安装, 现场实际安装效果参考图 9。

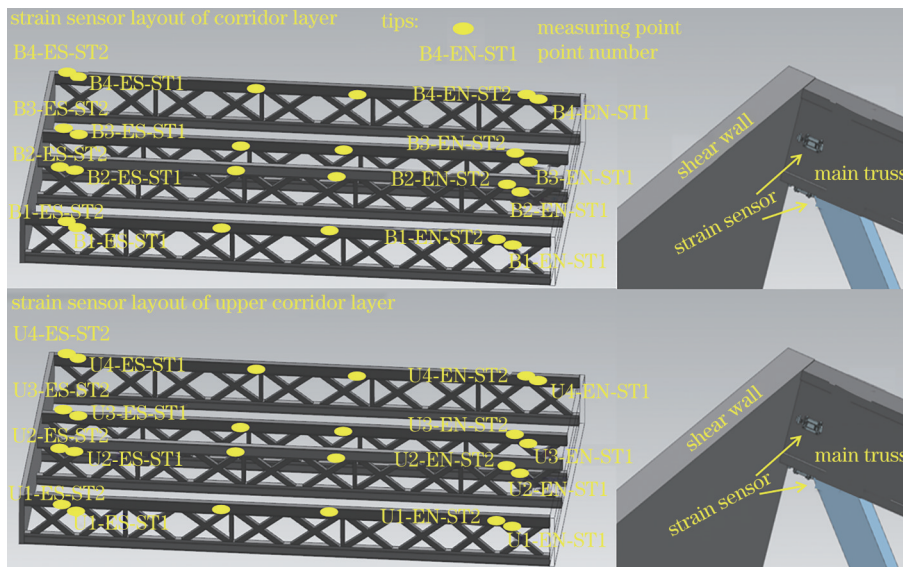


图 8 应变传感器布设图

Fig. 8 Strain sensor layout diagram

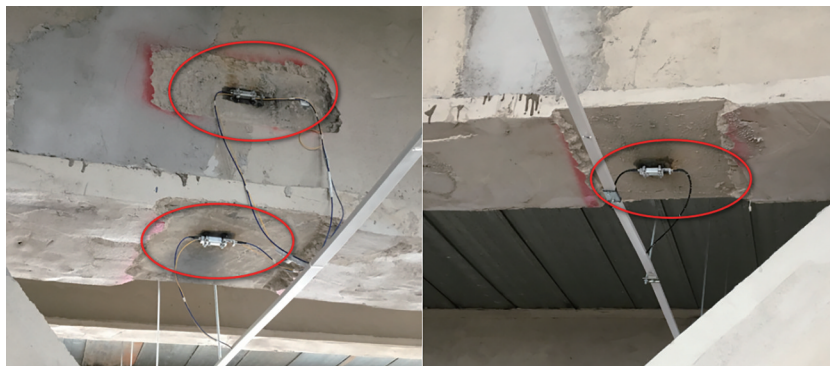


图 9 应变传感器现场安装效果图

Fig. 9 Effect picture of on-site installation of strain sensor

3.3.4 光纤光栅沉降传感器

连廊结构转换层的南北塔的 4 个角落, 每个角落均在剪力墙上分别安装 1 个沉降传感器, 共设

4 个沉降传感器用于监测 4 个固定点的相对沉降量。在监测之初, 通过测量放样和初始调平, 使得 4 个监测点位于同一监测平面上。转换后, 从传感器实测

的物理量可直接反映监测点相比初始监测平面的相对沉降量, 布设信息参考图 10。根据现场情况采

用支座固定的方式进行安装, 现场实际安装效果参考图 11。

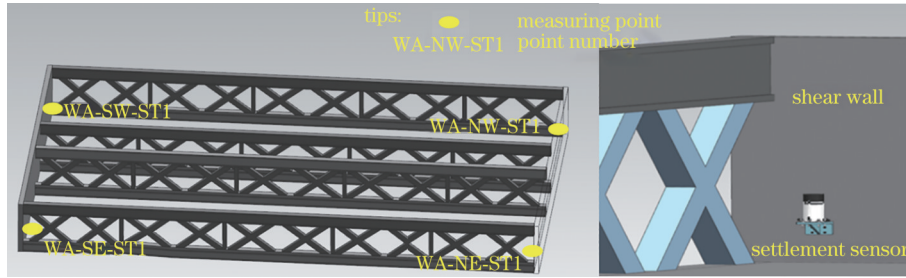


图 10 沉降传感器布设图

Fig. 10 Settlement sensor layout diagram



图 11 沉降传感器现场安装效果图

Fig. 11 Effect picture of on-site installation of settlement sensor

3.3.5 光纤光栅倾斜传感器

连廊结构转换层的南北主塔剪力墙上, 位于 2#、3#主桁架中间位置处分别设有 1 个监测点, 每个监测点均布置了 1 个倾斜传感器, 共有 2 个传感器

用于测量大楼东西两侧的倾斜角, 布设信息参考图 12。根据现场情况采用底板固定的方式进行安装, 现场实际安装效果参考图 13。

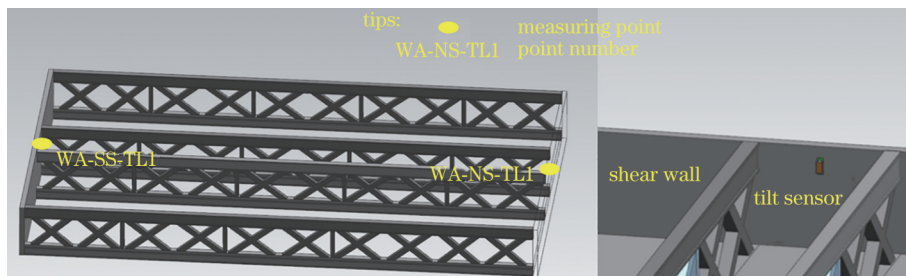


图 12 倾斜传感器布设图

Fig. 12 Tilt sensor layout diagram



图 13 倾斜传感器现场安装效果图

Fig. 13 Effect picture of on-site installation of tilt sensor

4 数据采集及分析

整体系统搭建完成后,确认传感器安装合格无损伤异常,同时完成系统的联合调试。待系统稳定运行 2 个月后,对目前采集的数据进行初步的相关分析。由于时间过长,数据量过大,这里优先选取 9 月份连续 25 d 内的数据进行综合分析。

4.1 环境温度数据监测

采用“健康监测预警系统软件”的数据分析功能模块,选择传感器来源“SW-OU-TE1”及时间范围“2020-09-01—2020-09-25”,即可得到该传感器 9 月份每日数据的最大值、最小值和平均值的箱体

图,如图 14 所示。由图可知,9 月份的日统计温度数据表现出很好的规律性,均在合理范围内波动。表 1 列出某日温度统计和该月温度统计结果,数据真实可信。

为了直观地分析温度数据一天内变化的情况,选择布置在连廊西南角室内及室外的温度传感器的 10 d(9 月 1 日—10 日)数据做展示,时程曲线如图 15 所示。由该图可知,在每天凌晨 4 时左右温度达到最低值,在中午 14 时达到最高值。室外温度(SW-OU-TE1)与室内温度(SW-IN-TE1)的变化趋势一致,但前者比后者有更大的温度变化幅度。

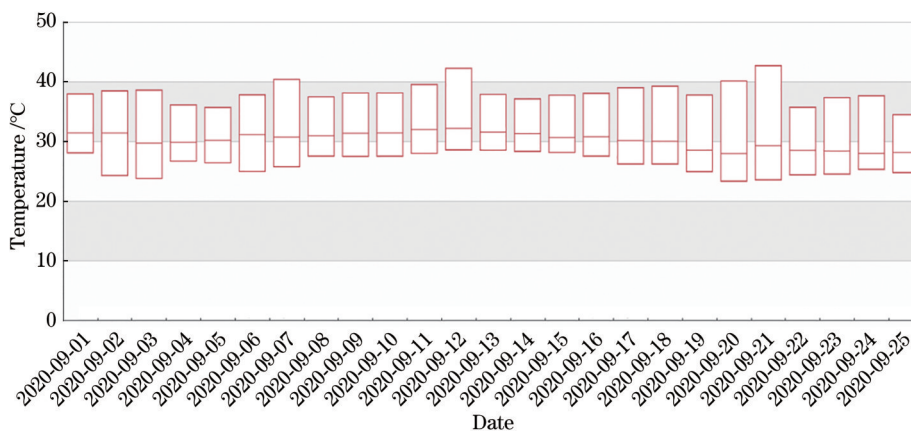


图 14 9 月份某温度传感器(SW-OU-TE1)每日数据统计图

Fig. 14 Daily data statistics of a temperature sensor (SW-OU-TE1) in September

4.2 主桁架相对位移监测

采用“健康监测预警系统软件”的数据分析功能模块,选择传感器来源“B1-ES-RD1”及时间范围

“2020-09-01—2020-09-25”,即可得到该传感器 9 月份每日数据的最大值、最小值和平均值的箱体图,如图 16 所示。由图可知,9 月份的日统计相对位移

表 1 实测温度统计表

Table 1 Measured temperature statistics table

Measuring point number	Daily temperature statistics / °C			Monthly temperature statistics / °C	
	Minimum	Mean	Maximum	Minimum	Maximum
SW-OU-TE1	26.3779	30.1449	35.6400	23.8678	40.4932
SW-IN-TE1	29.1902	30.0392	31.2556	28.9614	32.8688
SE-OU-TE1	26.0495	29.4269	33.3908	23.0988	35.0663
SE-IN-TE1	29.5577	31.2969	33.0520	29.5577	33.9024
NE-OU-TE1	25.8242	29.9297	34.0298	24.0533	36.1452
NE-IN-TE1	29.0367	30.4321	31.7483	29.0367	32.9006
NW-OU-TE1	26.2913	30.5612	38.0400	23.8871	35.1821
NW-IN-TE1	30.2228	31.2600	32.4377	30.0480	33.8883

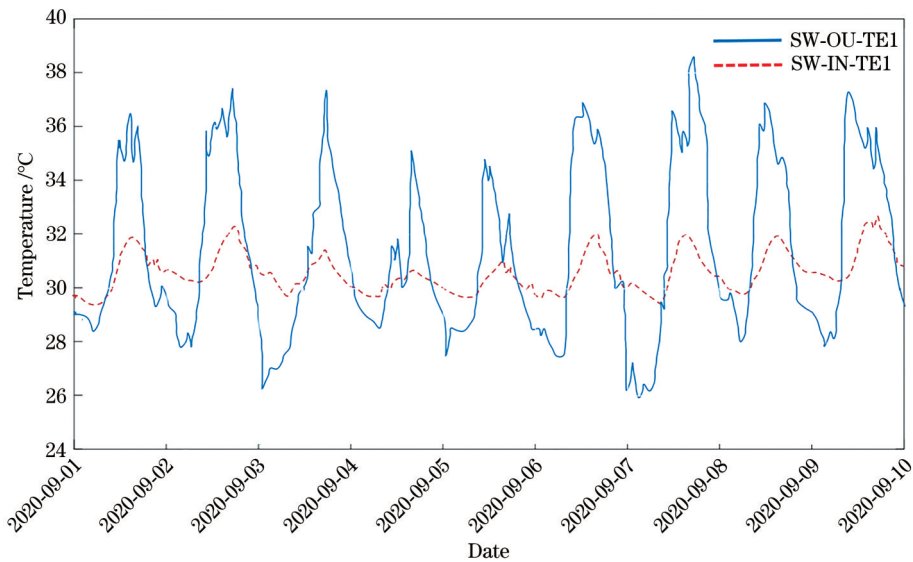


图 15 连廊西南角温度时程曲线

Fig. 15 Temperature time history curve in the southwest corner of the corridor

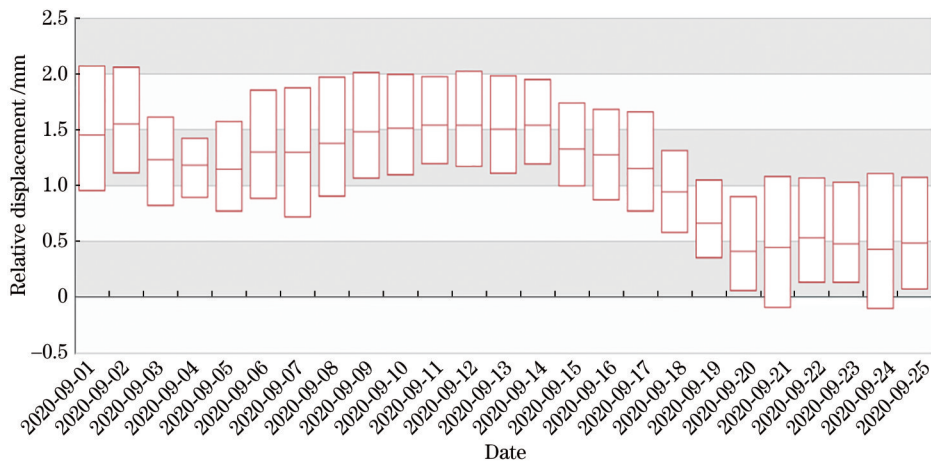


图 16 9 月份某位移传感器(B1-ES-RD1)每日数据统计图

Fig. 16 Daily data statistics of a displacement sensor (B1-ES-RD1) in September

数据表现出很好的规律性,均在合理范围内波动。
表 2 列出某日相对位移统计和该月相对位移统计结果,数据真实可信。

为了更直观地分析位移数据一天内变化的情

况,选择布置在连廊层 1#主桁架与剪力墙端部连接处,分别布在底板和腹板的相对位移传感器(B1-ES-RD1和B1-ES-RD2)的 10 d(9月 1 日—10 日)数据做展示,时程曲线如图 17 所示。由该图可知,传

表 2 部分实测相对位移统计表

Table 2 Part of the measured relative displacement statistics table

Measuring point number	Daily relative displacement statistics /mm			Monthly relative displacement statistics /mm	
	Minimum	Mean	Maximum	Minimum	Maximum
B1-ES-RD1	0.76891	1.14570	1.57170	0.71888	2.0693
B2-ES-RD1	0.77387	1.21020	1.71980	0.77387	2.3912
B3-ES-RD1	0.38826	0.64112	0.92464	0.24782	1.6396
B4-ES-RD1	0.78830	1.21100	1.77750	0.78258	2.9257
B1-EN-RD1	0.75056	1.15450	1.59110	0.57049	2.0286
B2-EN-RD1	0.94625	1.63350	2.29660	0.94625	3.1153
B3-EN-RD1	1.35690	1.69730	2.06480	1.35380	2.7788
B4-EN-RD1	1.11460	1.92570	2.82590	1.11460	4.1192

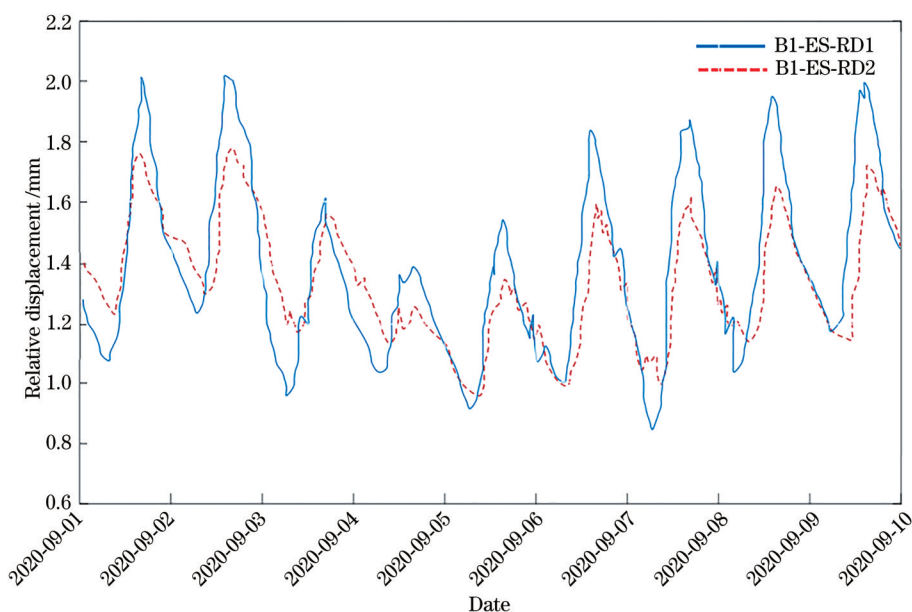


图 17 连廊相对位移时程曲线

传感器读数在每天凌晨 4 时左右位移达到最低值,在中午 14 时达到最高值。对比图 15 的温度变化,发现位移数据的变化规律与温度变化表现出很强的相关性。该现象可以解释为每日温度的周期性变化,导致结构热胀冷缩,从而产生了一定量的相对位移,但该相对位移变化缓慢,且在很小的范围波动。

4.3 主桁架应变监测

采用“健康监测预警系统软件”的数据分析功能模块,选择传感器来源“B1-ES-ST1”及时间范围“2020-09-01—2020-09-25”,即可得到该传感器 9 月份每日数据的最大值、最小值和平均值的箱体图,如图 18 所示。由图可知,9 月份的日统计相对位移数据表现出很好的规律性,均在合理范围内波动。表 3 列出某日相对位移统计和该月相对位移统计结果,数据真实可信。

为了更直观地分析应变数据一天内变化的情况,选择布置在连廊 25 层 1#主桁架与剪力墙端部连接处,分别布在底板和腹板的应变传感器(B1-ES-ST1 和 B1-ES-ST2)的 10 d(9 月 1 日—10 日)数据做展示,时程曲线如图 19 所示。由该图可知,传感器读数在每天凌晨时段应变达到最高值,在中午时段达到最低值。对比图 15 的温度变化,发现应变变化与温度变化的相关性很强,随着温度改变,每日的应变数据呈现明显周期性变化的规律。

4.4 连廊沉降监测

采用“健康监测预警系统软件”的数据分析功能模块,选择传感器来源“WA-SE-ST1”及时间范围“2020-09-01—2020-09-25”,即可得到该传感器 9 月份每日数据的最大值、最小值和平均值的箱体图,如图 20 所示。由图可知,该传感器沉降量波动

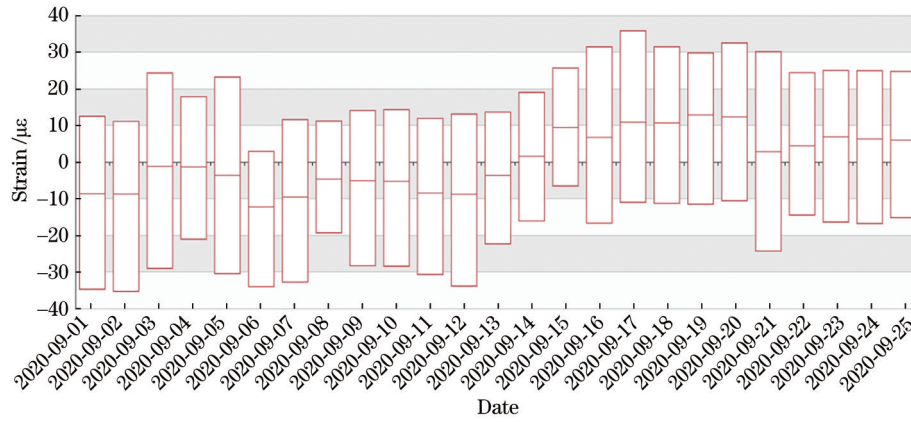


图 18 9 月份某应变传感器(B1-ES-ST1)每日数据统计图

Fig. 18 Daily data statistics of a strain sensor (B1-ES-ST1) in September

表 3 部分实测应变统计表

Table 3 Part of the measured strain statistics table

Measuring point number	Daily strain statistics / $\mu\epsilon$			Monthly strain statistics / $\mu\epsilon$	
	Minimum	Mean	Maximum	Minimum	Maximum
B1-ES-ST1	-30.3690	-3.6755	23.0649	-35.3610	36.2585
B2-ES-ST1	35.7282	44.6529	56.1756	30.5701	73.1332
B3-ES-ST1	47.4518	58.8503	75.9194	47.4518	98.4956
U1-ES-ST1	-70.7921	-61.8326	-51.6040	-77.8221	-33.9587
U1-ES-ST2	-56.0606	-38.2689	-23.6475	-56.0606	13.0418
U2-ES-ST2	12.4522	24.7638	37.8752	12.4522	63.4232
U3-ES-ST2	-21.8485	-5.0878	16.9891	-21.8485	47.1486

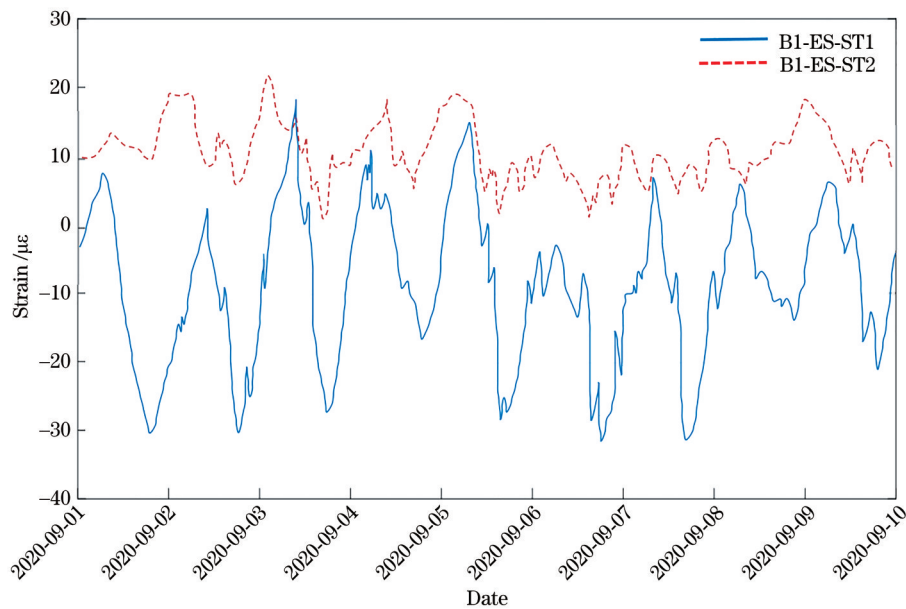


图 19 连廊应变时程曲线

在 0~4 mm 之间,相对沉降量较小,未见有明显的趋势性增大或减少。对比同时期的温度统计数据,可发现若温度变化幅度大,相应地相对沉降量也会增大。例如,9 月 20 日和 21 日两天的数据,温度和

沉降量的变化幅度呈现正相关。表 4 列出某日沉降统计和该月沉降统计结果,该月沉降量波动幅度较小,呈现较好的规律性,数据真实可信。综合分析沉降数据,未见结构有明显异常。

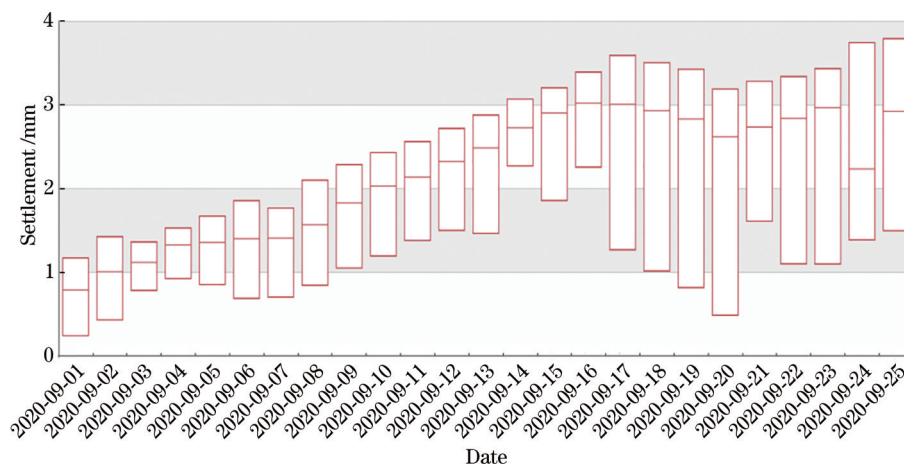


图 20 9 月份某沉降传感器(WA-SE-ST1)每日数据统计图

Fig. 20 Daily data statistics of a settlement sensor (WA-SE-ST1) in September

表 4 实测沉降统计表

Table 4 Measured settlement statistics

Measuring point number	Daily settlement statistics /mm			Monthly settlement statistics /mm	
	Minimum	Mean	Maximum	Minimum	Maximum
WA-SE-ST1	0.84573	0.00013	1.667100	0.2445900	3.789300
WA-SW-ST1	-2.17100	-1.71060	-1.120500	-2.965800	0.171870
WA-NE-ST1	0.12927	0.72236	1.219300	-0.006083	1.835900
WA-NW-ST1	-0.98300	-0.36379	0.052606	-1.403500	0.059309

为了更直观地分析沉降数据一天内变化的情况,选择布置在连廊 26 层 4 个角落的静力水准仪(WA-SE-ST1 和 WA-SW-ST1)的 10 d(9 月 1 日—10 日)数据做展示,时程曲线如图 21 所示。由该图可知,传感器读数在中午 14 时达到峰值,WA-SE-ST1 传感器出现最小值,WA-SW-ST1 传感器则达

到最大值。对比图 15 的温度变化,发现相对沉降量变化与温度变化有很强的相关性。该现象可以解释为每日温度周期性的变化,导致结构热胀冷缩,从而产生了一定的沉降量;另外,由于太阳照射角度导致结构内部存在温度差,不同监测点将产生一定量的相对沉降。

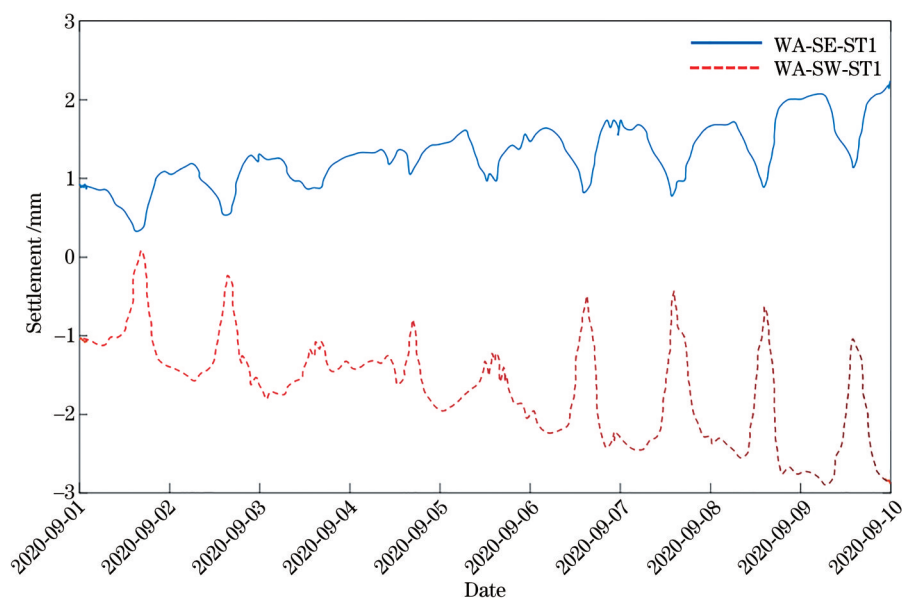


图 21 钢连廊沉降时程曲线

Fig. 21 Settlement time history curve of steel corridor

4.5 剪力墙倾斜角

采用“健康监测预警系统软件”的数据分析功能模块,选择传感器来源“WA-NS-TL1”及时间范围“2020-09-01—2020-09-25”,即可得到该传感器9月份每日数据的最大值、最小值和平均值的箱体图,如图 22 所示。由图可知,9月份的日统计相对倾斜角数据表现出很好的规律性,均在合理范围内波

动。表 5 列出某日相对倾斜角统计和该月相对倾斜角统计结果,数据真实可信。

为了更直观地分析倾角数据一天内变化的情况,选择布置在 2#、3#主桁架中间位置处的倾斜传感器(WA-NS-TL1 和 WA-SS-TL1)的 10 d(9月 1日—10日)数据做展示,时程曲线如图 23 所示。由该图可知,倾角曲线变化的规律性较不明显,但仅在较小的

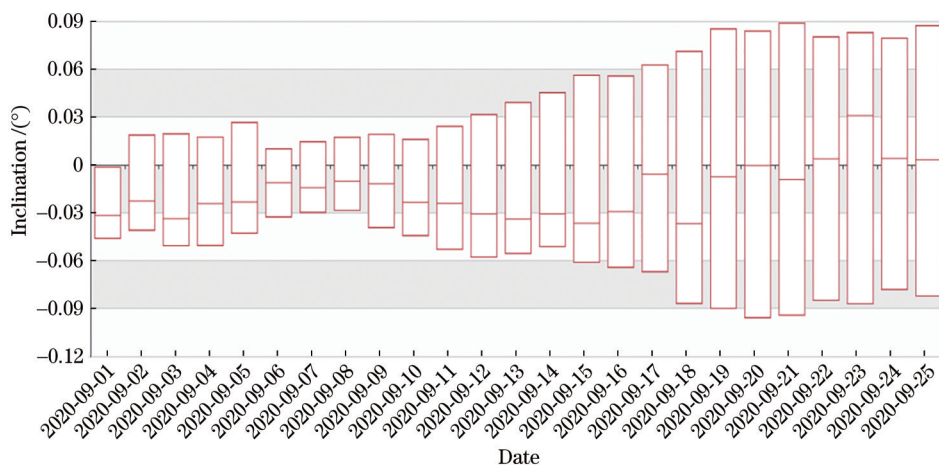


图 22 9 月份某倾斜传感器(WA-NS-TL1)每日数据统计图

Fig. 22 Daily data statistics of a tilt sensor (WA-NS-TL1) in September

表 5 实测倾斜角统计表

Table 5 Measured tilt angle statistics table

Measuring point number	Daily inclination statistics / (°)			Monthly inclination statistics / (°)	
	Minimum	Mean	Maximum	Minimum	Maximum
WA-NS-TL1	0.003229	0.025727	0.042948	-0.004447	0.050897
WA-SS-TL1	-0.008544	0.0045871	0.017695	-0.020248	0.017695

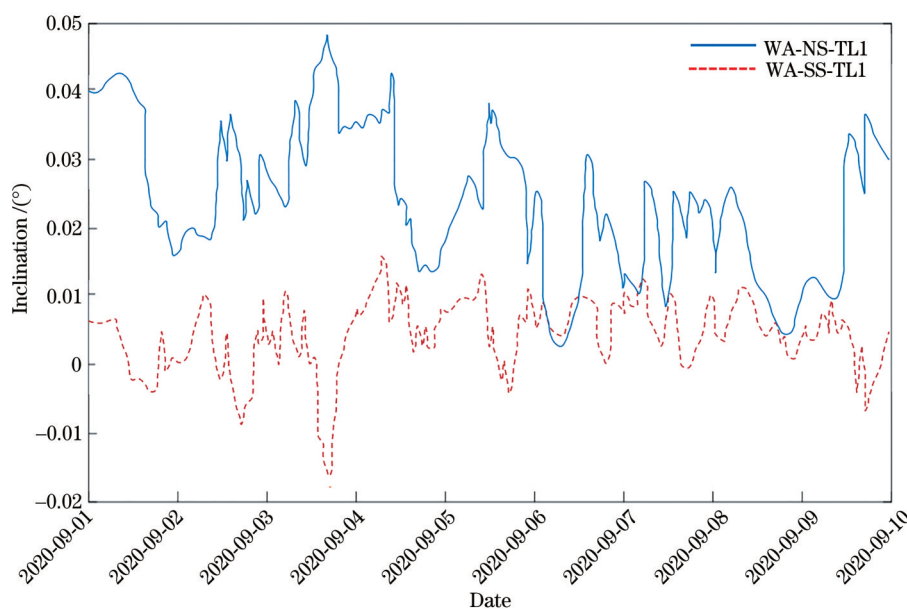


图 23 钢连廊倾斜角时程曲线

Fig. 23 Time history curve of the inclination angle of steel corridor

范围内波动,没有出现较大倾角,也未见有明显的趋势性增加或减少,可认为结构未有异常变形。

5 结 论

通过实施该项目,提出了光纤光栅传感在异形结构建筑上的应用方法。实践证实FBG传感可灵敏反映相应测点的实时数据,利用监测软件可以进行数据的初步采集与解析,同时实时监测局部测点的相关信息,说明光纤光栅传感监测应用于异形结构健康监测中是可行的。系统数据精准可靠,数据分析表明在外界无明显异常的情况下,异形建筑结构中的应力、位移、沉降与环境温度相关性较大。同时该FBG传感系统的系统拓扑及施工方式亦可推广应用于相关的土木类监测项目,如桥梁、隧道、基坑、高支模等。

参 考 文 献

- [1] Li H N, Li D S. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(3): 82-90.
李宏男, 李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(3): 82-90.
- [2] Li H N, Yan S, Lin G. State-of-the-art review for intelligent structural control[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1999, 19(2): 2936-3044.
李宏男, 阎石, 林皋. 智能结构控制发展综述[J]. *地震工程与工程振动*, 1999, 19(2): 2936-3044.
- [3] Liu S C, Zhang D L, Zhang C P. Experimental research on safety monitoring based on FOS for high-speed railway infrastructure[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2011, 35(4): 1-6.
刘胜春, 张顶立, 张成平. 高速铁路路基与边坡结构安全光纤传感监测试验[J]. *北京交通大学学报*, 2011, 35(4): 1-6.
- [4] Li H N, Ren L. Structural health monitoring-fiber Bragg grating sensing technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.
- [6] Sun M X. Study on structural design, fabrication and characteristics of fiber Bragg grating[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
孙蜜雪. 光纤布拉格光栅结构设计、刻制及性能研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [7] Shi Q. Demodulation system of FBG acceleration sensor based on DFB laser[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
师琪. 基于DFB激光器的FBG加速度传感器解调系统[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [8] Wu J H, Ye S M, Zhang J Q, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of Jingxiong high-speed railway based on fiber Bragg grating monitoring technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210603.
吴静红, 叶少敏, 张继清, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 210603.
- [9] Xu Y L, Ni Y, Yu T, et al. Fiber Bragg grating displacement sensor based on beat frequency demodulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170622.
徐雨露, 倪屹, 余涛, 等. 基于拍频解调的光纤光栅位移传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170622.
- [10] Quan Z Q, Fang X Q, Xue G Z, et al. Strain transfer coupling mechanism of surface-bonded fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0104004.
权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0104004.
- [11] Chen Y, Chen Y W, Liu Z Q, et al. A gear fault detection method based on a fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304007.
陈勇, 陈亚武, 刘志强, 等. 基于光纤布拉格光栅传感的齿轮故障检测方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304007.
- [12] Ma J X, Wang Y H, Zhang M Y, et al. Static-pressure penetration field test of PHC pipe pile based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1206004.
马加骁, 王永洪, 张明义, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的PHC管桩现场静压贯入试验研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1206004.
- [13] Chen Z W, Liu K M, Yan W J, et al. Two-stage automated operational modal analysis based on power spectrum density transmissibility and support-vector machines[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2021, 21(5): 2150068.