

厦门后溪长途汽车站移位监测系统的设计与实现

谢丽宇^{1,2,*} 管 帅¹ 卢文胜^{1,2} 蓝戊己^{2,3} 束学智^{2,3}

(1. 同济大学结构防灾减灾工程系, 上海 200092; 2. 同济大学建筑物移位技术研究中心, 上海 200336;
3. 上海天演建筑物移位工程股份有限公司, 上海 200336)

摘 要 在厦门后溪长途汽车站进行整体旋转移位过程中, 为保证房屋整体在移位过程中的安全, 使用了移位监测系统对结构进行监测。首先介绍了厦门后溪长途汽车站移位施工的方案和主要技术流程; 说明了厦门后溪长途汽车站移位监测系统的设计原则和方案, 布置各传感器的测点位置, 介绍了各传感器的参数及现场安装状态; 最后, 对移位全过程的传感器数据进行分析总结。结果表明, 厦门后溪长途汽车站移位过程平稳, 传感器无异常数据, 在移位过程中结构处于安全状态。此次监测为移位工程的监测设计起到示范和推动作用, 具有一定的借鉴意义。

关键词 厦门后溪长途汽车站, 托盘梁, 移位, 监测系统, 传感器

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2022.06.010

Translocation Monitoring System of Xiamen Houxi Bus Station : Design and Implementation

XIE Liyu^{1,2,*} GUAN Shuai¹ LU Wensheng^{1,2} LAN Wuji^{2,3} SHU Xuezhizhi^{2,3}

(1. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Tongji University Building Replacement Technology Research Center, Shanghai 200336, China;
3. Shanghai Tianyan Building Shift Engineering Co., Ltd., Shanghai 200336, China)

Abstract In order to ensure the safety of the bus station during the process of translocation of Xiamen Houxi long-distance bus station, the whole houses were monitored by the translocation monitoring system. First of all, a brief introduction of Xiamen Houxi long-distance bus station translocation construction scheme and the main technical process was introduced. Then, the site installation scheme of Xiamen Houxi long-distance bus station translocation monitoring system was illustrated, and the positions of each sensor installed on site were explained. Finally, the sensor data of the whole process of the translocation were analyzed and summarized. The results show that the translocation of Xiamen Houxi long-distance bus station is stable, the sensors have no abnormal data, and the structure is in a safe state during the translocation process. The monitoring plays a demonstrational and promotional role for the monitoring system design of the translocation project, and has certain reference significance.

Keywords Xiamen Houxi long-distance bus station, tray beam, shift, monitoring system, sensors

0 引 言

建筑移位技术因其节能环保、成本低、工期短等优点, 在建筑工程领域受到了广泛欢迎^[1]。并

且因其对原有建筑的损害程度较小, 故也会被用于古建筑物移位保护中^[2]。例如在上海四川北路独栋别墅花园移位项目^[3]中, 其监测的钢柱最大压应力和最大拉应力变化均在 25 MPa 之内, 对结构安全产生较小影响; 在上海玉佛寺大雄宝殿移

收稿日期: 2021-08-09

* 联系作者: 谢丽宇, 男, 副教授, 主要从事结构健康监测、智能传感器和结构抗震与防灾的研究。E-mail: liyuxie@tongji.edu.cn

位过程中,张睿等^[4]设计了一套监测系统,可连续测量整体结构、各个部件和内部雕像的相对位移和倾斜度,以确保建筑的完整性。

厦门后溪长途汽车站位于厦门市集美后溪镇厦门(新)站西北侧,于2014年建成。因新规划福厦高铁过汽车站,出于节约成本、节能减排的目的,故对厦门后溪长途汽车站进行整体旋转移位。厦门后溪长途汽车站主体结构是钢筋混凝土框架-剪力墙结构,且建筑移位距离最远处超过300 m,创造了“建筑物整体旋转移动弧长最长”吉尼斯世界纪录。为保证汽车站在移位过程中的安全,因此使用了移位监测系统对房屋整体进行监测。此工程对移位监测提出了要求:在建筑旋转移位过程中需特别监测房屋的姿态、关键部位内力及整体结构动力特性、房屋振动效应。具体来说,旋转移位过程中步履式连续顶推的位移应与旋转半径成比例,在旋转移位施工过程中,外力施加方向需要进行不断变化,以保持顶推力的方向与转动圆弧相切^[5],避免较大的侧向变形,因此为保证结构的水平方向变形在合理范围内,需要对结构的水平方向变形进行监测。由于移位切割位置在地下室二层,托换层的安全受单柱轴力及柱底弯矩影响较大,故需对关键托换节点进行监测。原结构设计中部分梁板存在预应力钢绞线布置,同时结构由于功能需求存在大跨结构,故需对大跨结构进行安全监测。托盘梁表面不平,对建筑物竖向变形产生影响,故需对结构整体竖向变形进行安全监测。

在施工方面,为解决上述问题,保证建筑物的整体性,交替顶推技术及 PCL (Programmable Logic Controller) 移位控制技术被用以解决建筑物平移不均的问题。物联网、BIM 和云计算等技术已经有效地运用到建筑物移位过程中^[6],可有效提高监测效率,提高移位监测的时效性和准确性。厦门后溪长途汽车站移位监测系统由传感器系统、数据采集与无线传输系统、数据管理分析系统和网络终端组成,实现监测的自动化、实时性、网络化和集成化,为主体结构整体平移提供可靠保证。

1 工程概况

主站房正立面图如图 1 所示,其结构为钢筋混凝土框架-剪力墙结构,设计使用年限为 50 年。

根据现行《建筑抗震设计规范(2016年修订版)》(GB 50011—2010),建筑抗震设防类别为乙类,建筑结构安全等级为二级,所在地区抗震设防烈度为 7 度(0.15g),设计地震分组为第三组;场地类别为 II 类;特征周期为 $T_g=0.45$ s。

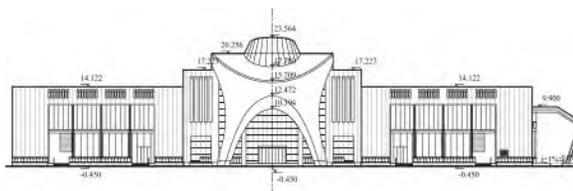


图 1 主站房正立面图(基本对称)

Fig.1 Front view of the main station building (basically symmetrical)

2 移位施工方案

建筑移位时,首先在地下二层进行切割,然后进行托换,进而通过步履式连续顶推方式进行旋转移位,如图 2、图 3 所示。

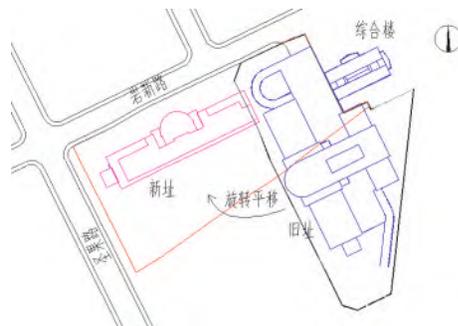


图 2 建筑周边情况及其旋转平移示意图

Fig.2 Schematic diagram of the building translocation and the surroundings

建筑结构状况依据《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—2015)评定,该幢建筑所划定界限内的(6轴~24轴交 A 轴~E 轴区域主体结构)鉴定单元安全性等级可定为 B_{su} 级,即该建筑的安全性略低于标准对 A_{su} 级的规定,尚不显著影响整体承载。此次方案针对移位过程中的可能薄弱环节作重点监测,包括托换、切割、旋转移位及接柱连接等各个施工工况。

移位控制技术是建筑物整体移位工程顺利实施的核心技术^[7]。此移位项目采用交替式步履走行器及 PLC 移位电脑控制技术,可精确控制各项推点的位移距离,使各项推点具有相同角速度,确保建筑物安全稳定地旋转平移。现场由 368 个



图3 主站房旋移中远景图

Fig.3 The far view of the main station building during translocation

200 t 步履行走器和 148 个 400 t 步履行走器共同组成交替式步履行走器群。其中,一个步履行走器由 1 个顶升千斤顶和两个顶推千斤顶组成,每个移位控制点布置 4 个行走器,分 A、B 组,每组有 2 个行走器。现场步履行走器照片如图 4 所示。



图4 步履行走器图

Fig.4 The figure of step-by-step machine

步履行走器参数如表 1 所示。

表 1 步履行走器参数表
Table 1 The parameters of step-by-step machine

参数	200 t 步履行走器	400 t 步履行走器
顶升千斤顶起重量/t	200	400
顶升千斤顶油源压力/MPa	70	70
顶升千斤顶行程/mm	140	140
顶推千斤顶个数	2	2
顶推千斤顶起重量/t	10	10
顶推千斤顶油源压力/MPa	35	35
顶推千斤顶行程/mm	150	150

PCL 移位控制系统由液压系统和计算机自动控制系统组成,其存在各控制点同步偏差小、所有油缸可同步控制、建筑物移位精确等优点。通过调整行走器的前进角度、高度及速度以使建筑在移位过程中使水平变形及纵向变形保持在一定范围内。因此可对上述托盘梁表面不平、建筑物因长度大产生不均匀变形大等问题进行控制。

3 移位监测系统

3.1 监测系统设计目的

为保证主体结构在移位施工期间的安全,可引入移位监测系统对主体结构进行监测^[8]。相较平移、抬升过程而言,旋转过程中的建筑物的受力状态更加复杂,不确定因素更多^[9]。且厦门后溪长途汽车站作为旋转移位项目中移位建筑面积最大的项目,因此在旋转中需特别监测房屋的姿态、关键部位内力及整体结构动力特性、房屋振动效应。

在监测过程中,可通过托盘梁的变形及健康状况推测出结构本身的健康状况。监测系统应着重对以下几点进行监测:

(1) 建筑移位距离最远处超 300 m,旋转移位过程中步履式连续顶推的位移应与旋转半径成比例,确保结构的纵向保持一定的平直,避免较大的横向变形,故需对结构整体姿态进行监测;

(2) 由于移位切割位置在地下室二层,托换层安全受单柱轴力及柱底弯矩影响较大,故需对关键托换节点进行监测;

(3) 原结构设计中部分梁板存在预应力钢绞线,同时结构由于功能需求存在大跨结构,故需对大跨结构进行安全监测;

(4) 对结构既有薄弱环节进行安全监测;

(5) 在建筑移位过程中,重点监测对象除托盘梁外,还应增加部分建筑本身构件的监测。

而 PCL 移位控制系统的应用对托盘梁及建筑物的变形起到较好控制作用,因此移位监测数据也可对 PCL 系统的控制效果起到验证作用。

3.2 监测系统构成

监测系统由传感器系统、数据采集及无线传输系统和数据管理分析系统三部分组成。其中安装在施工现场的传感器系统由静力水准仪、激光位移计、光纤光栅加速度传感器、光纤光栅应变传感器、光纤光栅温度传感器组成,进行托盘梁及建筑结构监测数据的采集工作。

3.3 传感器系统

为保证监测系统数据能准确反映结构的安全状况,传感器系统需具有较高的精度。

本移位工程的建筑整体姿态监测由小型化静力水准仪和激光位移传感器组成。其中,小型化静力水准仪系统由半封闭连通管、大容量储液罐、高精度压力传感器、温度传感器、RS485 串口通信总线、特定功能的计算机(包括本系统数据采集及数据处理软件、带无线通信的 GPRS 或 3G 终端)、排气装置、通液、通气软管等组成。其中,系统设置两个测量基点,两个基点之间的高差固定,在所有基点和待测点都安装一个高精度压力传感器和温度传感器。静力水准仪现场安装图如图 5 所示。



图 5 静力水准仪现场安装图
Fig.5 The static level instrument

本移位工程采用的 DM_ST_V15001 结构体激光位移传感器主要进行结构体变形的监测。监测原理如下:监测建筑物动态变形时,激光器安装于托盘梁上,并发射激光束到安装于跨中的靶标,当有变形产生时,靶标与激光器产生上下(Y轴)和左右(X轴)相对位移,此时靶标中的处理器解调出该相对位移,并将其传输给安装于 RTU 中的控制盒实现双轴位移采集。激光位移计的现场安装图如图 6 所示。



(a) 激光发射器 (b) 激光接收器
图 6 激光位移计现场安装图
Fig.6 The laser displacement meter

本移位工程所使用的光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器作为一种新型光纤传感器,其应用领域非常广泛^[10]。光纤光栅传感技术是利

用传感器内部敏感元件——光纤光栅反射的光学频谱对温度、应力的敏感特性,通过光纤光栅传感网络分析仪内部各功能模块完成对光纤光栅传感器的输入光源激励、输出光学频谱分析和物理量换算,以图表和数字方式给出各监测点的温度、应变、位移、压力等物理量信息。光栅光纤应变传感器、光栅光纤加速度传感器、光栅光纤温度传感器的现场安装图分别如图 7—图 9 所示。

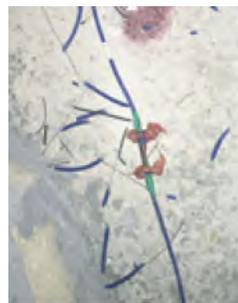


图 7 应变传感器图
Fig.7 The strain sensor



图 8 温度传感器图
Fig.8 The temperature sensor



图 9 加速度传感器图
Fig.9 The accelerometer

各传感器型号及技术参数如表 2 所示。

4 移位监测方案

4.1 结构整体姿态监测

房屋整体姿态监测主要包括房屋不均匀沉降

表2 传感器系统仪器设备表

Table 2 The sensor system equipment table

序号	设备名称	传感器型号	技术参数
1	静力水准仪	GSTP-YC11	量程: 1 000 mm 测量精度: $\leq 0.1\%FS$ 工作温度: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$
2	激光位移计	DM_ST_V15001	量程: Y轴 $\pm 30\text{ mm}$, X轴 $\pm 25\text{ mm}$ 测量精度: 0.1 mm 工作温度: $-25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
3	光栅光纤加速度计	GTSP-Z1	量程: $\pm 2\text{ g}$ 测量精度: 0.05%FS 工作温度: $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
4	光栅光纤应变计	GTSP-FBG-330	量程: $\pm 1\ 500\ \mu\epsilon$ 测量精度: $\leq 0.3\%FS$ 工作温度: $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
5	光栅光纤温度计	GSTP-FBG270	量程: $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量精度: $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

监测、关键部位的位移监测。测量时以反映建筑实时准确的形态为原则,防止其发生倾斜倒塌和整体偏转。监测采用光学测量和静力水准仪测量两种方法结合的方式,经后续两方法的数据结合处理,可实时准确地监测房屋不均匀沉降、房屋不同步变形等房屋整体变形姿态。

4.1.1 房屋不均匀沉降测量

在建筑物托盘梁的顶面,安装静力水准仪。通过水准仪测量的数据,推算出建筑物测点间的相对不均匀沉降,共10个测点。静力水准仪测点位置选取以均匀覆盖托盘梁为原则。静力水准仪的设定位置如图10所示,静力水准仪用JL表示。

4.1.2 结构在水平方向上变形差异的监测

因建筑物为框架剪力墙结构,整体刚度较大,

且托盘梁的刚度大,因此假设激光位移计发射点与接收点之间的转角可忽略不计。因此对激光位移计与静力水准仪之间的数据关联提供了条件。

通过在建筑物中选定纵向方向上的位置放置两对激光位移计,来测定激光发射器与接收靶之间的相对位移。激光位移计的设定位置如图10所示,可以监测结构在水平及竖向方向上变形差异。其中激光发射点用FS表示,接收点用JS表示。鉴于前期工程经验,为了防止结构变形大于激光位移计的量程,因此将激光发射点与接收点之间距离设置为45 m内。

本文在2号激光位移计的发射点与接收点位置处分别放置一台静力水准仪,对其竖向位移进行关联。拟将2号激光水准仪测量出的Y向位移变化量级与3号及4号静力水准仪的位移变化量级进行对比,以验证监测数据的准确性。2号激光位移计与3号及4号静力水准仪的具体相对关系如图10所示。

4.2 房屋应变测量

应变变化是结构内力变化的表现,应变监测的内容是对应变较大区域进行监测,主要是监测托换梁系在平移过程中的应变变化,观察其是否出现异常情况。应变计测点位置分为4大类:托盘梁节点位置处、托盘梁跨中位置处、托盘梁千斤顶上部位置处及建筑大跨梁位置处。根据移位设计资料,托盘梁的应变监测测点布置如图10所示,其中在托盘梁上布置12个测点,在跨度为25.2 m的一层结构梁的跨中上表面放置1个测点,共计13个测点。应变测点用YB表示。

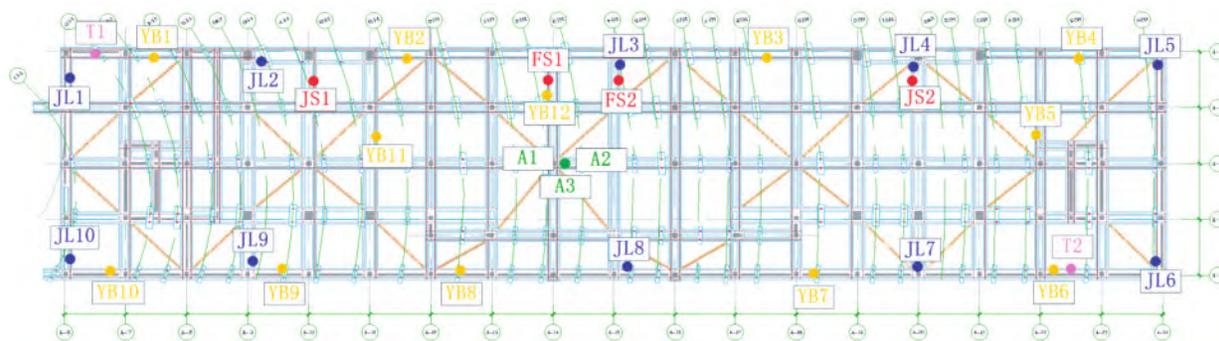


图10 传感器的设定位置图

Fig.10 The location of sensors

4.3 房屋振动测量

结构实时动态监测主要是指对建筑物在抬升、旋转时的最大加速度进行监测,以避免加速度过大使结构构件产生过大的应力及非结构构件受到过大外力而影响其使用功能。在监测过程中,在建筑物托盘梁表面放置加速度传感器 3 个,编号为 A1—A3;在托盘梁加速度测点正上方的二层柱脚放置加速度传感器 2 个,编号为 A4—A5。如图 10 所示,加速度传感器用 A 表示,其中 A1、A2、A3、A4、A5 分别为测量建筑物纵向、横向、垂直向、横向、纵向加速度的加速度传感器。

4.4 房屋温度监测

建筑物托盘梁上安放 2 个温度监测传感器,以监测现场温度变化,具体位置如图 10 所示。温度测点用 T 表示。

5 房屋结构整体安全性评判

移位监测系统可有效地监测结构的性能状态,通过数据分析,可将移位施工过程对结构性能的影响进行评估并对结构的安全性能进行评价^[11]。由于托盘梁与上部结构连接,因此托盘梁的变形将直接反映到上部结构中,故将托盘梁的安全作为评判上部结构安全的依据。

5.1 应变监测

根据监测方案,应变预警值为 $150 \mu\epsilon$,报警值为 $300 \mu\epsilon$ 。经数据处理得知,YB1—YB13 号应变传感器的峰值应变小于应变预警值,且小于应变报警值。传感器应变变化值与传感器所在区域的托盘梁刚度及传感器所在托盘梁位置有关。YB7 号传感器所在位置为千斤顶上方、托盘梁跨中且远离斜向加固托盘梁,故应变变化值较大。YB7 号传感器在移位过程中最大应变值如图 11 所示。

由图 11 可知,YB7 号传感器的最大应变值小于应变预警值 $150 \mu\epsilon$,满足安全要求。根据图 11 应变变化趋势得知,应变传感器的最大应变值呈增加趋势,原因可能为托盘梁受到千斤顶的作用,发生较小且不可恢复的变形。

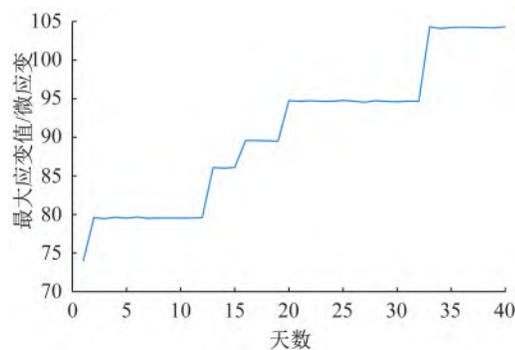


图 11 YB7 号应变传感器应变变化图

Fig.11 The strain graph of strain sensor YB7

5.2 静力水准仪数据监测

根据监测方案,建筑物竖向不均匀变形预警值为 2.5 mm ,报警值为 5 mm 。根据监测数据得知,JL4 号静力水准仪的变化幅度最大,前后沉降量变化值为 3.53 mm ,大于建筑物竖向不均匀变形预警值 2.5 mm ,小于报警值 5 mm 。变化值大于 2.5 mm 是由于建筑物托盘梁不平造成的。JL4 号静力水准仪数据变化图如图 12 所示。

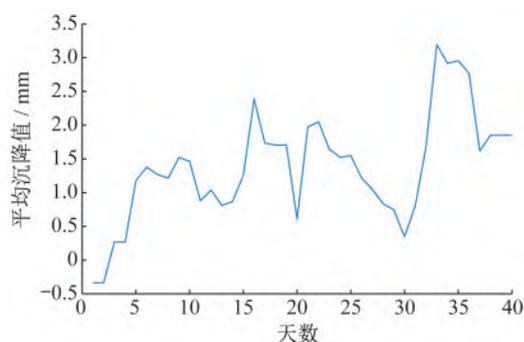


图 12 JL4 号静力水准仪测点变化图

Fig.12 The static level graph of static level sensor JL4

5.3 激光位移计

根据监测方案得知,激光位移计监测的建筑变形预警值为 2‰ ,报警值为 4‰ 。根据监测时间内的激光位移计数据得知,沉降变形小于监测方案预警值 2‰ ,且小于监测方案报警值 4‰ 。2 号激光位移计竖向沉降变形图如图 13 所示。

根据 2 号激光位移计 Y 轴位移变化图得知,位移变化值为毫米级,而 JL2 号和 JL4 号位移计的相对位移变化也为毫米级。因此,一定程度上可验证监测数据的正确性。

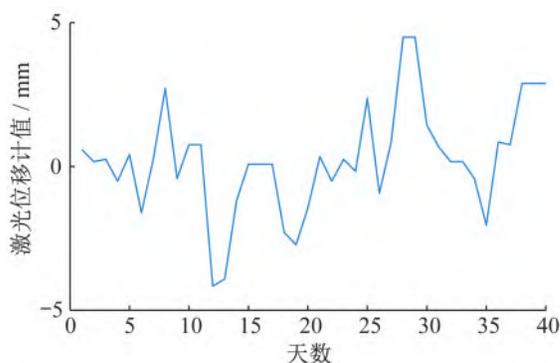


图13 2号激光位移计Y轴偏移值

Fig.13 The Y axis displacement of laser displacement meter 2

5.4 振动监测

根据监测方案得知,移位时加速度预警值小于或等于0.025g,报警值小于或等于0.05g。监测期间的加速度传感器数据最大值如表3所示。

根据监测数据得知,A1号加速度传感器的加速度值峰值最大,为0.06479g,超过报警值0.05g,因为在实际移位过程中,存在步履式千斤顶局部摩擦过大而产生偶然震动的现象,对结构安全性无显著影响;A3号加速度传感器的加速度值峰值最小,为0.00562g,因为在移位过程中,振动方向主要为横向和纵向。A2号—A5号振动加速度值在方案允许范围之内。

表3

加速度传感器数据表

Table 3

The datas of the accelerometer

传感器编号	A1	A2	A3	A4	A5
最大值/0.1g	0.6479	0.1751	0.0562	0.0603	0.1853

6 结 语

通过安装在托盘梁上的静力水准仪、加速度传感器、激光位移计、应变传感器测得的数据可知,在建筑物从移位开始到结束的时间范围内,建筑物的传感器数据正常,变化范围在规范允许范围之内,并且经现场检查复核,托盘梁上无明显结构性裂缝,可以证明此建筑移位的稳定性和安全性。此移位工程的成功完成成为相关建筑旋转移位工程以及移位项目的监测提供了宝贵的经验。

参 考 文 献

- [1] 冯虎.对建筑整体迁移的新认识[J].城市开发,2011(18):46-47.
Feng Hu.A new understanding of the overall migration of buildings[J].Urban Development,2011(18):46-47.(in Chinese)
- [2] 谷志旺.上海玉佛禅寺保护性修缮工程中的施工关键技术[J].建筑施工,2018,40(3):297-298.
Gu Zhiwang.Key construction technology for protective renovation project of Shanghai jade buddha temple[J].Building Construction,2018,40(3):297-298.(in Chinese)
- [3] 杨风庆.复杂工况下的保留建筑平移、旋转与顶升施工技术[J].建筑施工,2018,40(9):1576-1578.
Yang Fengqing.Construction technology for translation,

rotation and jacking of preserved buildings under complex working conditions[J].Building Construction,2018,40(9):1576-1578.(in Chinese)

- [4] Zhang R,Xue S,Xie L,et al.Structural monitoring and safety assessment during translocation of mahavira hall of jade buddha temple [J].Sustainability,2019,11(19):5477.
- [5] 鄢仁辉.福州泛船浦教堂神父楼整体旋转平移设计及施工[J].福建建筑,2010(2):71-76.
Yan Renhui.Integral rotation and translation design and construction of Fuzhou fan chuan pu church priest building [J].Fujian Architecture and Construction,2010(2):71-76.(in Chinese)
- [6] 陈菁.玉佛寺项目基于BIM的施工策划与远程监控技术研究[C]//第三届全国BIM学术会议,中国上海,2017:311-315.
Chen Jing.Research on construction scheme planning and remote monitoring technology based on BIM for jade buddha temple project [C]//3rd National BIM Academic Conference, Shanghai, China, 2017: 311-315.(in Chinese)
- [7] 吴二军,李爱群,张兴龙.建筑物整体移位技术的发展概况与展望[J].施工技术,2011,40(6):1-7.
Wu Erjun,Li Aiqun,Zhang Xinglong.Development and prediction of building monolithic moving technology [J].Construction Technology,2011,40(6):1-7.(in Chinese)
- [8] 张睿,谢丽宇,张凤亮,等.玉佛寺大雄宝殿移位监测系统(I):监测系统的设计与实现[J].结构工

- 程师,2020,36(4):196-203.
- Zhang Rui, Xie Liyu, Zhang Fengliang, et al. Translocation monitoring system for the mahavira hall of jade buddha temple (I): design and implementation[J]. Structural Engineers, 2020, 36(4): 196-203. (in Chinese)
- [9] 张新中,张振辉,崔万杰,等.建筑物整体移位工程中的旋转技术[C]//首届全国既有结构加固改造设计与施工技术交流会,中国北京,2007:475-477,485.
- Zhang Xinzhong, Zhang Zhenhui, Cui Wanjie, et al. Rotary technology in building shifting engineering [C]//The First National Existing Structure Reinforcement Design and Construction Technology Exchange Conference Proceedings, Beijing, China, 2007:475-477,485. (in Chinese)
- [10] 廖延彪,黎敏.光纤传感器的今日与发展[J].传感器世界,2004(2):6-12.
- Liao Yanbiao, Li Min. The development of optical fiber sensors[J]. Sensor World, 2004(2): 6-12. (in Chinese)
- [11] 张睿,谢丽宇,张凤亮,等.玉佛禅寺大雄宝殿移位监测系统(II):结构形变监测数据的分析[J].结构工程师,2020,36(4):10-15.
- Zhang Rui, Xie Liyu, Zhang Fengliang, et al. Translocation monitoring system for the mahavira hall of jade buddha temple(II): analysis of monitoring data [J]. Structural Engineers, 2020, 36 (4) : 10-15. (in Chinese)