

# 玉佛禅寺大雄宝殿移位监测系统(I): 监测系统的设计与实现

张睿<sup>1</sup> 谢丽宇<sup>1,2,\*</sup> 卢文胜<sup>1,2</sup> 张凤亮<sup>1</sup>

(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 200092)

**摘要** 上海市玉佛禅寺大雄宝殿为传统砖木结构, 承重结构为抬梁式木构架。为消除安全隐患, 同时改善玉佛禅寺的建筑布局, 大雄宝殿进行了平移和顶升。为保证主体结构在移位施工期间的安全, 引入了移位监测系统对主体结构进行监测。首先, 简要介绍了大雄宝殿移位施工的方案和主要技术流程; 其次, 详细介绍了由传感器系统、数据采集与无线传输系统和数据管理分析系统三部分组成的监测系统的总体设计; 最后, 介绍了大雄宝殿移位监测系统的实现方法, 并用于结构整体姿态和关键部位变形的监测。结果表明: 玉佛寺大雄宝殿移位监测系统的设计 and 实现方法, 为移位工程的监测系统的设计、实施与发展起到了示范和推动作用, 具有一定的借鉴意义。

**关键词** 玉佛禅寺, 大雄宝殿, 移位, 监测系统

DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.04.027

## Translocation Monitoring System for the Mahavira Hall of Jade Buddha Temple (I) : Design and Implementation

ZHANG Rui<sup>1</sup> XIE Liyu<sup>1,2,\*</sup> LU Wensheng<sup>1,2</sup> ZHANG Fengliang<sup>1</sup>

(1. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji University Building Replacement Technology Research Center, Shanghai 200092, China)

**Abstract** The Mahavira Hall of Jade Buddha Temple in Shanghai is a traditional brick and wood structure, the load-bearing structure is wooden beam framework. In order to eliminate potential safety problems and to improve the architectural layout of Jade Buddha Temple, the Mahavira Hall is planning to translocated and then elevated. In order to ensure the safety of the main structure during the shift construction, a translocation monitoring system is introduced to monitor the overall structure. The scheme and technical process of shift construction of the Mahavira Hall is introduced firstly. Then, the overall design of the monitoring system consisting of sensor system, data acquisition and wireless transmission system and data management and analysis system will be introduced in details. Finally, introducing the implementation methods of the monitoring system in Mahavira Hall, which applied to the monitoring of the overall attitude of the structure and deformation of key parts. The results show that the design and implementation method of the translocation monitoring system for the Mahavira Hall of Jade Buddha Temple has played an exemplary and promoting role in the design, implementation and development of the monitoring system for the displacement engineering, which has a certain referential significance.

**Keywords** Jade Buddha Temple, the Mahavira Hall, translation, monitoring system

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0127600)

\*联系作者: 谢丽宇, 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事结构减隔震与结构健康监测的研究。E-mail: liyuxie@tongji.edu.cn

### 0 引 言

移位技术是一种有效的建筑物改造措施,其显著的特点是保持了原有建筑物的外观外貌。因此,对于古建筑或近代优秀建筑,可以采用整体平移的方式加以修缮加固,以改善其安全性能、增强其使用功能并延续建筑寿命<sup>[1]</sup>。移位技术已被广泛应用于各种工程项目<sup>[2-4]</sup>。

上海市玉佛禅寺大雄宝殿是中国传统的木结构建筑,建成于 1918—1928 年间,是佛教寺院举行宗教仪式的主殿。为了扩大主殿前面的空间,大雄宝殿计划向北移动 30.66 m,然后向上抬升 1.05 m。移位过程中,大殿内部的佛像及文物同主体结构一起平移。考虑大殿年代久远,木结构整体性较差,在移位过程中,大殿主体结构容易产生竖向不均匀变形,导致整体结构发生倾斜,进而导致木柱倾斜,进一步导致结构整体姿态的变化。同时木柱、佛像也容易发生倾斜,部分薄弱部位容易产生较大的应力应变。

在移位施工过程中,如果结构产生较大变形或坍塌,会造成严重的人员伤亡和财产损失。因此需要采用相应的评估方法来评估移位过程中结构的安全性。有学者总结了木结构的各种常见评估方法<sup>[5]</sup>,其中外观检测是最基本的方法,因为它提供了木结构中关键部位的信息<sup>[6]</sup>。但是,外观检测提供的信息不足以评估建筑物移位的影响。由于结构监测越来越多地成为制定决策以保护历史建筑的有效方法<sup>[7-8]</sup>,因此有必要设计实时监测系统对建筑物进行实时的监测和诊断,以及时发现和预测结构的性能状态变化<sup>[9]</sup>。玉佛禅寺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了可靠的保证。

### 1 工程概况

大雄宝殿建成于 1918—1928 年间,是上海市优秀历史建筑和区文物保护单位。大雄宝殿是玉佛禅寺第二进殿堂,是寺院建筑的主体部分,为重檐歇山式单层建筑,矩形平面,东西向 24 m、南北向 18.34 m,殿高 18.2 m,台基高 0.96 m,占地面积

约 450 余 m<sup>2</sup>(图 1、图 2)。大殿为中国传统木结构,承重结构为抬梁式木构架,屋架为歇山式木构架,木结构主要采用抬梁式结构体系(图 3),在台基上筑础,立木柱,上施梁枋,梁上叠梁,逐级升高构成举架,举架向上支撑横向桁(檩),桁上架椽,椽上铺木望板,再苫背覆瓦。东、西山墙均采用实心黏土青砖砌筑。殿内中央供奉三尊泥塑大佛,佛高 4 m,大佛背面是大型海岛观音壁塑,殿内两旁是二十诸天像,东西外墙镶嵌着十八罗汉石刻像。

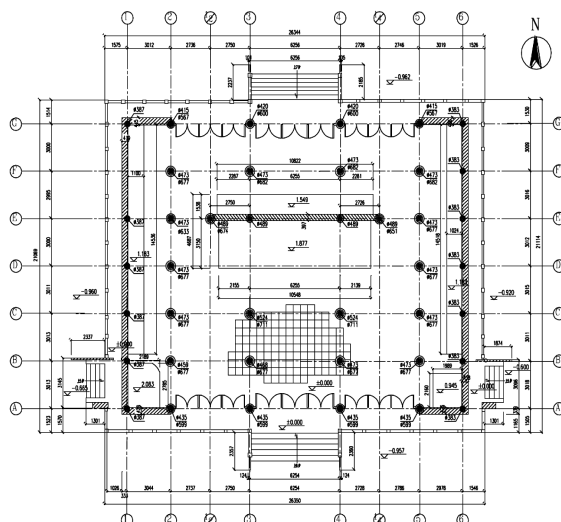


图 1 大雄宝殿平面布置图(单位:mm)

Fig.1 Layout of the Mahavira Hall (Unit:mm)

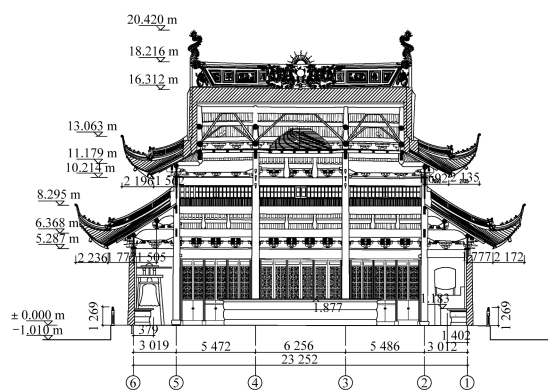


图 2 大雄宝殿立面图(单位:mm)

Fig.2 Elevation view of the Mahavira Hall (Unit:mm)

### 2 移位施工方案

在整体结构移位前需要先对玉佛禅寺大雄宝殿进行结构整体加固<sup>[10]</sup>,并对佛台和木柱等关键部位进行合理托换,由于玉佛禅寺大雄宝殿佛台、

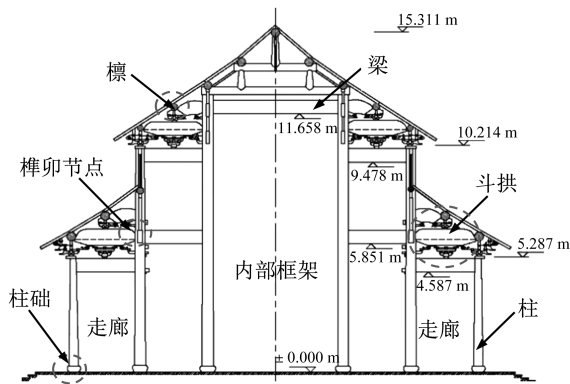


图3 大雄宝殿木结构框架(单位:mm)

Fig.3 Timber frame of the Mahavira Hall (Unit:mm)

佛像与整体结构一起平移,且佛台基础为宽5m的三合土基础形式,均超出了常用托换方式的适用范围,实际工程中采取的是钢筋混凝土托盘梁加静压桩的托换结构<sup>[11]</sup>。

作为托换结构的上托盘梁形成一个水平框架,为整体结构提供了平面内刚度,以转移平移时的水平推进力,上托盘梁底部压入静压桩以传递整体结构竖向载荷。挖掘出上托盘梁底部的土壤,新建钢筋混凝土轨道梁,并在轨道梁底部压入静压桩以增强轨道梁的承载力。之后,将垂直千斤顶放置在托换梁和轨道梁之间,并切断托换梁和轨道梁之间的静压桩,此时整体结构的竖向载荷通过垂直千斤顶传递到底部静压桩(图4)。最后安装水平液压千斤顶将建筑物推向目的地。

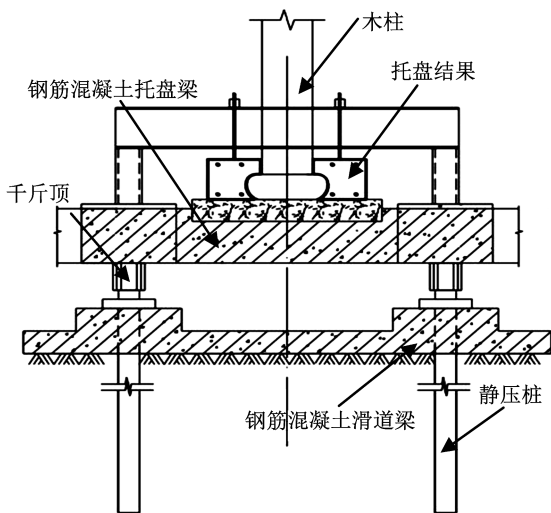


图4 托换系统和轨道系统

Fig.4 Underpinning system and rail system

大雄宝殿于2017年9月2日正式启动平移工程,并于9月8日平移到位,平移距离为30.66m。2017年9月12日开始顶升,于2017年9月17日顶

升到位,顶升高度为1.05m(图5)。在大雄宝殿平移顶升后,采取了隔震就位连接方式,以实现对该建筑的隔震保护<sup>[12]</sup>。

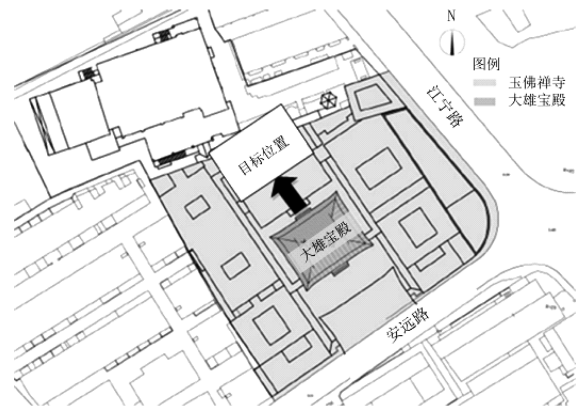


图5 移位路线

Fig.5 Translocation route

大雄宝殿平移后,不仅给寺院建筑布局的合理化留出了改善空间,同时也能够消除安全隐患。平移后,殿前将加建钟鼓楼及观音殿,而即使加盖殿堂,大雄宝殿前的公共空间还是比原来翻了1倍多。同时,借由此次平移,这座大殿还将在整体结构不做任何变动的基础上,增加底部混凝土平层,从而提升主体建筑抗震性,稳固其建筑结构。

### 3 移位监测系统

#### 3.1 监测系统设计目的

与其他移位工程相比,玉佛禅寺大雄宝殿的移位工程有很大不同:第一,玉佛禅寺大雄宝殿是中国传统的木结构建筑,梁柱连接采用榫卯结构,木柱直接搁置在基础礅石上,移位难度很大,需要专门的移位施工方案及其相应的监测方案;第二,内部佛像及文物与整体结构同步完成平移,佛像需要专门的保护措施,同时需要相应的监测方案监测佛像的变形情况;第三,移位施工过渡段为软弱场地土,建筑场地类别为IV类,属抗震不利地段,在建筑移位过程中需实时监测结构的性能状态。因此需要根据玉佛禅寺大雄宝殿的实际情况,设计移位监测系统及移位监测方案,对整体结构、关键部位和佛像进行重点监测。

#### 3.2 监测系统设计原则

建筑物移位监测系统包括数据采集、数据传输、数据处理和反馈四个基本功能,并达到以下基

本要求:①远程监测系统具备长期可靠性,并具有抵抗环境干扰的能力;②系统应具有较高的测量精度,以确保监测数据能准确反映结构的安全现状;③系统应为小尺寸、模块化,以方便仪器的安装和调试;④数据采集自动化、实时化和标准化;⑤稳定可靠的传输能力;⑥较好的数据运算处理能力;⑦远程监测系统可通过互联网等多种方式发布监测信息和预警信息,使相关单位在第一时间能获取数据信息,及时掌握结构的安全状况。

### 3.3 监测系统构成

玉佛禅寺大雄宝殿移位监测系统由传感器系统、数据采集及无线传输系统、数据管理分析系统三部分组成。移位监测系统的构成示意如图 6 所示。

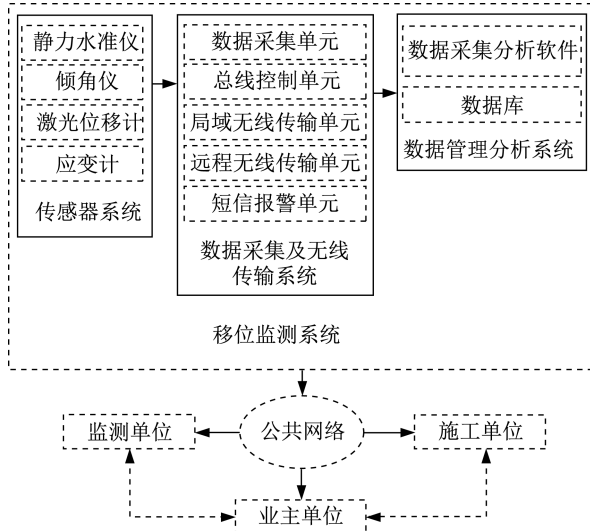


图6 监测系统示意图

Fig.6 Monitoring system diagram

#### 3.3.1 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。本工程的传感器系统由静力水准仪、倾角仪、激光位移计和应变计组成(图7)。

静力水准仪利用高精度微压测量传感器测量测点液体压力从而间接测量测点位移;激光位移计通过发射不同频率的可见激光束,用微处理器计算激光与相应的物体间距离;倾角仪用于测量安装位置被测方向的角度变化以反映结构的倾斜变化;应变计通过将其两端底座固定在结构表面以测量钢结构或混凝土结构的应变。

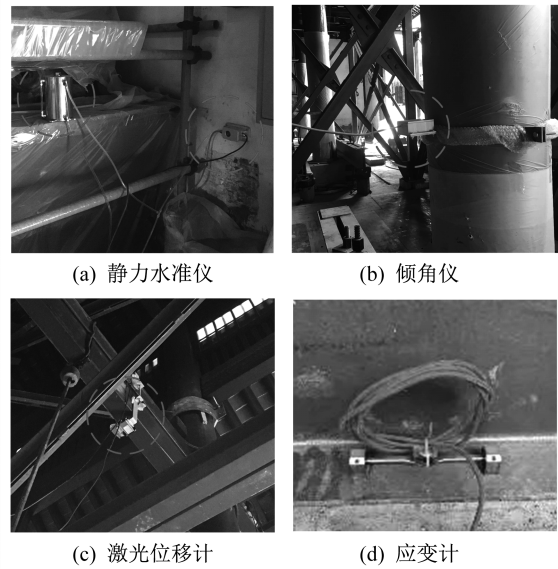


图7 传感器设备

Fig.7 Sensor device

表1 传感器系统仪器设备表

Table 1 Sensor system equipment table

序号	设备名称	型号规格	技术参数
1	静力水准仪	GSTP-YC11	量程:1 000 mm 测量精度:0.5 mm 工作温度:-10 ℃~+70 ℃
2	倾角仪	GSTP-ME610	量程:±30° 测量精度:≤0.1%FS 工作温度:-25 ℃~+60 ℃
3	激光位移计	GSTP-DM	量程:28 m 测量精度:0.1 mm
4	应变计	GSTP-ZX300	量程:±1 500 με 测量精度:≤1%FS 工作温度:-20 ℃~+70 ℃

#### 3.3.2 数据采集及无线传输系统

本工程根据大雄宝殿移位监测系统的等级和信号频率特征等指标选用了不同性能和功能的信号调理设备、数据采集设备和总线方案(图8)。

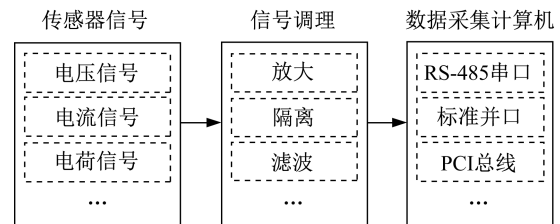


图8 数据采集系统

Fig.8 Data acquisition system

对所有传感器信号的真实记录是数据采集硬件系统选择的最终要求。通常,遵循简单协议和接口标准的基于串口并口的数据采集硬件即可满足单一特征信号及较低信号采样频率等的要

求<sup>[13]</sup>,本工程采用的是RS485串口通信总线控制单元。

数据传输技术分为现场传输和远程传输。现场传输是指从传感器至数据采集计算机,远程传输是指从数据采集计算机至服务器接入Internet网络(实现Internet网络存储和发布数据)。本工程采用的是现场传输,利用GPS系统和无线传感器的无线传输技术将传感器的信号直接传输至数据采集计算机(图9)。

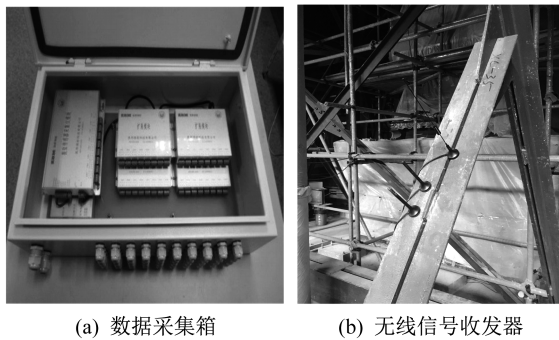


图9 数据采集及无线传输设备

Fig.9 Data acquisition and wireless transmission device

### 3.3.3 数据管理分析系统

数据管理分析系统由数据分析软件和数据库组成。主控计算机接收到监测数据后,通过分析软件对监测数据进行整理、计算和分析,并绘制各种曲线。同时,利用数据库进行数据的存储和管理。

对监测数据进行分析处理后,数据管理分析系统通过互联网将监测信息和预警信息发送至各网络终端,实现数据的远程实时传送,并进行预警。相关单位根据监测数据信息,及时掌握结构的安全状况,以决定是否调整施工步骤及采取相应的控制方法。

## 4 移位监测方案

因此根据玉佛禅寺大雄宝殿的实际情况,结合移位监测系统设定监测方案,针对以下几点进行重点监测:①结构整体姿态与木柱倾斜监测;②榫卯节点变形监测;③佛台变形监测。

### 4.1 结构整体姿态与木柱倾斜监测

#### 4.1.1 监测方法

在移位过程中,整体结构容易产生竖向不均匀变形,导致整体结构发生倾斜,进而导致木柱倾

斜,进一步导致结构整体姿态的变化。因此,通过监测整体结构的竖向变形、整体结构的倾斜和木柱倾斜,可以得到结构整体姿态的变化情况。本工程采用了静力水准仪和倾角仪。

首先,采用静力水准仪监测整体结构的竖向变形,通过每天实时采集的数据,反映静力水准仪所在部位相对于基准点的高程相对变化量,同时,在各测点水平距离已知的条件下,可通过数学关系计算出整体结构的倾斜变化;其次,采用倾斜角监测整体结构和木柱的倾斜变化;最后,通过分析,可得出结构整体姿态的变化情况,并建立静力水准仪和倾角仪监测数据之间的联系。

#### 4.1.2 静力水准仪

为了监测整体结构的竖向变形和倾斜角,在大雄宝殿围墙四个角部分别布置1个静力水准仪,记为HL1-HL4;由于中央佛台上佛像重量较大,在移位施工过程中可能发生较大的竖向相对变形,故在佛台的東西两侧分别布置1个静力水准仪,记为HL5、HL6。其中静力水准仪HL2、HL4和HL5分别是静力水准仪HL1、HL3和HL6的基准点。静力水准仪的平面布置图见图10。

表2 静力水准仪  
Table 2 Hydrostatic leveling

编号	安装位置	备注
HL-1	围墙(轴1/A)	
HL-2	围墙(轴1/G)	基准点1
HL-3	围墙(轴6/A)	
HL-4	围墙(轴6/G)	基准点2
HL-5	佛台(轴3/E)	基准点3
HL-6	佛台(轴4/E)	

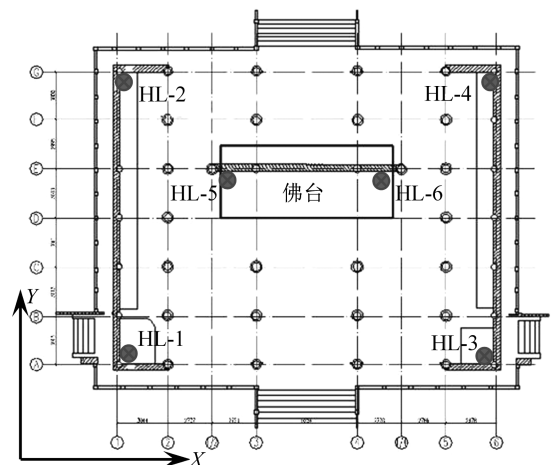


图10 静力水准仪(HL)平面布置图

Fig.10 Hydrostatic leveling (HL) layout

### 4.1.3 倾角仪

与静力水准仪的布置方法相同,为监测整体结构的倾斜角,在大雄宝殿围墙两侧分别布置 1 个倾角仪,记为 IC3、IC4;在佛台的东西两侧分别 1 个倾角仪,记为 IC1、IC2;由于木柱的倾斜状况反映了结构整体姿态的变化,故在某些关键木柱上布置了倾角仪,记为 IC5-IC12。倾角仪的平面布置图见图 11。

表 3 倾角仪  
Table 3 Inclinator

倾角仪编号	安装位置	测量方向
IC-1	佛台(轴 3/E)	双轴(XY)
IC-2	佛台(轴 4/E)	双轴(XY)
IC-3	围墙(轴 1/A)	双轴(XY)
IC-4	围墙(轴 6/A)	双轴(XY)
IC-5	木柱(轴 3/C)	双轴(XY)
IC-6	木柱(轴 4/C)	双轴(XY)
IC-7	木柱(轴 2/E)	单轴(X)
IC-8	木柱(轴 5/E)	单轴(X)
IC-9	木柱(轴 2/C)	单轴(X)
IC-10	木柱(轴 5/C)	单轴(X)
IC-11	木柱(轴 3/B)	单轴(X)
IC-12	木柱(轴 4/B)	单轴(X)

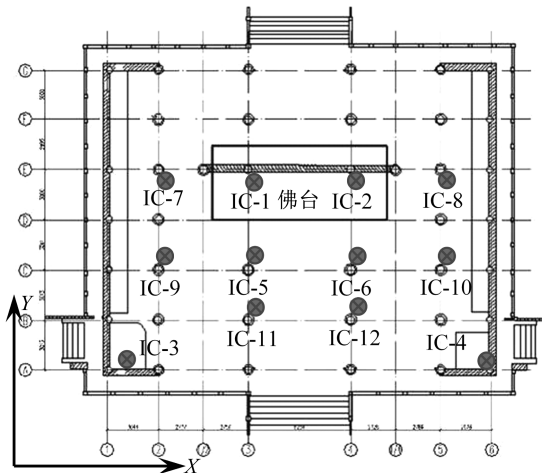


图 11 倾角仪(IC)布置图

Fig.11 Inclinator (IC) layout

### 4.2 榫卯节点变形监测

#### 4.2.1 监测方法

木结构整体性较弱,在移位过程中,榫卯节点容易发生变形。根据施工现场的情况,选择薄弱部位的大梁与木柱交界处的榫卯节点进行监测。本工程采用了激光位移计和倾角仪。

首先,在大梁的上、下表面分别布置激光位移计,可获得大梁相对木柱的转角和榫的相对拔出量;其次,通过监测大梁两端木柱的倾斜角,在木柱、大梁尺寸已知的条件下,可以通过数学关系计算出榫卯的变形量;最后,通过监测数据的分析,可以得出榫卯节点的变形情况,并建立激光位移计和倾角仪两种传感器监测数据之间的联系。

#### 4.2.2 激光位移计

根据施工现场的情况,选择在薄弱部位处的榫卯节点进行监测,分别选取 1 根横梁和 1 根纵梁,在大梁的上、下表面分别布置激光位移计,记为 LR1-LR4。激光位移计的布置图见图 12。

表 4 激光位移计  
Table 4 Laser range finder

倾角仪编号	安装位置	备注
LR-1	横梁(轴 3-4/C)	上表面
LR-2	横梁(轴 3-4/C)	下表面
LR-3	纵梁(轴 3/B-C)	上表面
LR-4	纵梁(轴 3/B-C)	下表面

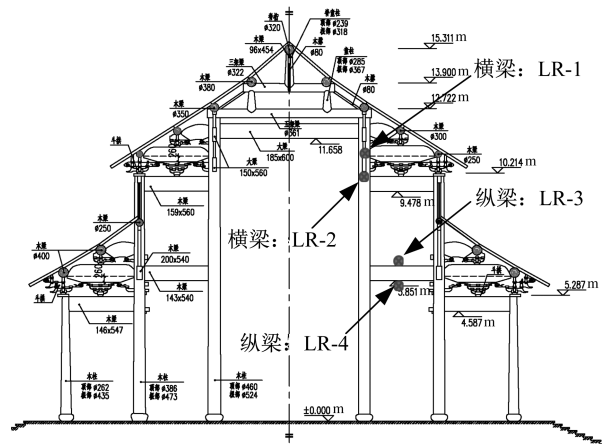


图 12 激光位移计(LR)布置图:梁

Fig.12 Laser range finder (LR) layout: beam

### 4.3 佛像变形监测

#### 4.3.1 监测方法

在移位过程中,如果佛像的托换底盘结构发生倾斜,上部结构佛像也会发生倾斜变形,甚至有开裂的可能。故需要对佛像的托换底盘结构进行应变监测,同时需要对佛像的倾斜变形进行监测。本工程采用了应变计、激光位移计、静力水准仪和倾角仪。

其一,在佛像底部的托换钢架四周布置应变计,获得托换钢架的应变变化;其二,在佛像的支撑框架上布置激光位移计,在佛像高度已知的条

件下,可以通过数学关系计算出佛像南北方向的倾斜变化;其三,在佛台的東西两侧布置静力水准仪,在测点水平距离已知的条件下,可以通过数学关系计算出佛像东西方向的倾斜变化;其四,在佛台的東西两侧布置双轴倾角仪,监测佛台南北方向和东西方向的倾斜变化;其五,通过监测数据的分析,可以得出佛像的倾斜变形,并建立激光位移计、静力水准仪和倾角仪三种传感器监测数据之间的联系。

#### 4.3.2 应变计

在佛像底部的托换钢架的四周表面分别布置1个应变计,分别布置在轴3、轴4与佛台的交界点处,记为SG1-SG4。应变计的平面布置图见图13。

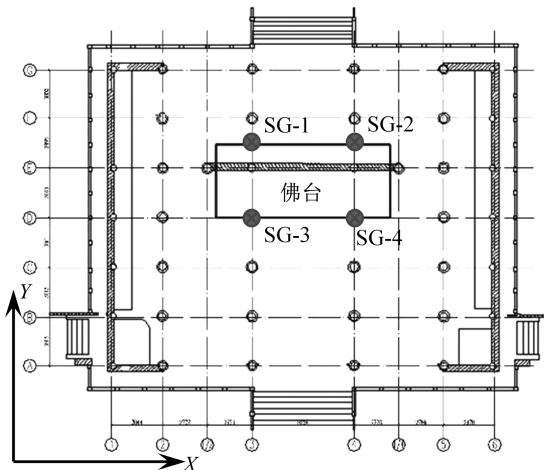


图13 应变计(SG)布置图

Fig.13 Strain gauge (SG) layout

#### 4.3.3 激光位移计

在佛像的支撑框架上布置激光位移计,其中佛像底部布置3个,佛像顶部布置3个,记为LR5-LR10。激光位移计的布置图见图14。

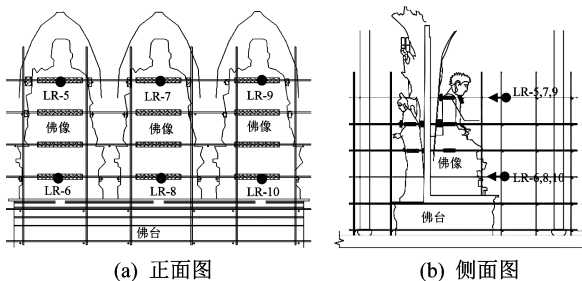


图14 激光测距仪(LR)布置图:佛像

Fig.14 Laser range finder (LR) layout: statue

## 5 结论

本文较系统和全面地研究了玉佛禅寺大雄宝

殿移位监测系统的设计和实现方法,在本文的续篇“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”中,将对本文提出的监测系统所采集的监测数据进行详细的分析,研究移位施工过程中结构整体和局部变形情况,探讨移位施工对结构状态产生的影响,并对结构的安全性能进行评价。本文得到的主要结论总结如下:

(1) 移位监测系统由传感器系统、数据采集与无线传输系统和数据管理分析系统组成。通过监测系统网络云平台的搭建,实现了监测数据的自动化、实时性和网络化,可以全面、真实和有效地监测结构的性能状态。

(2) 玉佛禅寺大雄宝殿是中国传统木结构,本次移位监测系统的设计和实现得到了木结构移位工程中的大量数据,为今后的木结构研究提供了宝贵数据,具有一定的研究价值。

(3) 本文实现的玉佛禅寺大雄宝殿移位监测系统,系统运行良好,为移位工程的健康监测系统的建立提供了系统的雏形,为大型木结构的移位监测系统的设计和实现提供了示范系统,积累了工程实践经验。

## 参考文献

- [1] 梁峰, 卢文胜. 移位技术与建筑结构安全问题[J]. 结构工程师, 2004, 20(5): 24-27.  
Liang Feng, Lu Wensheng. Translocation technology and structural security[J]. Structural Engineers, 2004, 20(5): 24-27. (in Chinese)
- [2] Song Yongsheng, Guo Tong, Di Zhiqiang, et al. Translocation of three historical buildings in renovation of the Porcelain Tower of Nanjing [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32(1): 04017125.
- [3] Xu Jia, Chen Yongzhan, Guo Tong, et al. Protection of historic buildings through structural translocation during construction of deep foundation pit [C]. 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. IEEE, Changsha, China, 25-26 October, 2014, pp.964-967.
- [4] Guo Tong, Li Aijun, Wei Longwu, et al. Horizontal translocation of a high-rise building: case study [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(3): 235-243.
- [5] Dietsch P, Kreuzinger H. Guideline on the assessment of timber structures: summary [J]. Engineering

- Structures, 2011, 33(11): 2983-2986.
- [ 6 ] Riggio M, Anthony R W, Augelli F, et al. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques [J]. Materials & Structures, 2014, 47(5): 749-766.
- [ 7 ] Stefano A D, Matta E, Clemente P. Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2016, 6(1): 83-106.
- [ 8 ] Cigada A, Dell'Acqua L C, Castiglione B M V, et al. Structural health monitoring of an historical building: the main spire of the Duomo Di Milano [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2016, 11(4): 501.
- [ 9 ] 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.
- Li Hongnan, Li Dongsheng. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 82-90. (in Chinese)
- [ 10 ] 王建永, 卢文胜, 李伟, 等. 木结构庙宇建筑整体平移前的加固技术[J]. 建筑施工, 2018, 40(3): 302-305.
- Wang Jianyong, Lu Wensheng, Li Wei, et al. Reinforcement technology before integral translation of wood structure temple building [J]. Building Construction, 2018, 40(3): 302-305. (in Chinese)
- [ 11 ] 王建永, 袁苗苗, 卢文胜, 等. 木结构庙宇建筑整体平移与托换技术[J]. 建筑施工, 2018, 40(3): 306-309.
- Wang Jianyong, Yuan Miaomiao, Lu Wensheng, et al. Monolithic moving and underpinning technology for wood structure temple building [J]. Building Construction, 2018, 40(3): 306-309. (in Chinese)
- [ 12 ] 卢文胜, 李轩. 上海玉佛禅寺大雄宝殿隔震就位连接关键技术[J]. 建筑施工, 2018, 40(3): 310-311, 326.
- Lu Wensheng, Li Xuan. Key technology of seismic isolation connected in place for main hall of Shanghai Jade Buddha Temple [J]. Building Construction, 2018, 40(3): 310-311, 326. (in Chinese)
- [ 13 ] 李宏男, 杨礼东, 任亮, 等. 大连市体育馆结构健康监测系统的设计与研发[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 40-49.
- Li Hongnan, Yang Lidong, Ren Liang, et al. Design and development of structural health monitoring system for the Dalian Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 40-49. (in Chinese)