

# 木结构庙宇建筑整体平移前的加固技术

王建永<sup>1</sup> 卢文胜<sup>2</sup> 李伟<sup>3</sup> 张凤亮<sup>2</sup> 谢丽宇<sup>2</sup> 谷志旺<sup>4</sup> 邱会安<sup>1</sup>

1. 上海天演建筑物移位工程股份有限公司 上海 200336; 2. 同济大学 上海 200092;  
3. 上海建筑设计研究院有限公司 上海 200041; 4. 上海建工四建集团有限公司 上海 201103

**摘要:** 上海玉佛寺大雄宝殿需带佛像进行整体平移, 故不仅要加固建筑结构, 而且要加固所有佛像。为保证项目万无一失, 加固措施要求能够抵抗 $0.05g$ 水平加速度 ( $g$ 为重力加速度), 经过方案比选, 采用轻型钢桁架及框架夹板式加固方案对木结构及佛像进行加固。之后, 在建筑整体平移施工过程中对加固构件、原结构构件进行实时监测, 监测数据显示加固措施效果良好, 证明临时加固方案达到了预期效果, 可为木结构建筑平移提供参考。

**关键词:** 木结构; 平移; 顶升; 加固; 钢桁架; 庙宇

**中图分类号:** TU746.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-1001(2018)03-0302-04 **DOI:** 10.14144/j.cnki.jzsg.2018.03.003

## Reinforcement Technology Before Integral Translation of Wood Structure Temple Building

WANG Jianyong<sup>1</sup> LU Wensheng<sup>2</sup> LI Wei<sup>3</sup> ZHANG Fengliang<sup>2</sup> XIE Liyu<sup>2</sup> GU Zhiwang<sup>4</sup> QIU Hui'an<sup>1</sup>

1. Shanghai Evolution Building Shift Engineering Co., Ltd., Shanghai 200336, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China;  
3. Institute of Shanghai Architectural Design and Research Co., Ltd., Shanghai 200041, China;  
4. Shanghai Construction No.4 (Group) Co., Ltd., Shanghai 201103, China

**Abstract:** The main hall of Shanghai Jade Buddha Temple needs to have an integral translation, not only to reinforce the structure, but also to reinforce all the Buddha statues. In order to ensure the project safe, reinforcement measures required to withstand  $0.05g$  horizontal acceleration. After comparison and selection of project scheme, the reinforcing scheme of lightweight steel truss and frame plate type has been adopted for the reinforcement of wood structure and Buddha statue. After that, in the construction process of monolithic building translation, the real-time monitoring of reinforcement components and original structural components has been carried out. The monitoring data show that the reinforcement measures are effective, which proves that the temporary reinforcement scheme can achieve expected results, and can provide reference for the translation of similar structural buildings.

**Keywords:** wood structure; translation; lifting; reinforcement; steel truss; temple

建筑物整体平移在国内已经有数百个成功的实例, 相关的技术规程及标准也相继出台。PLC同步控制技术在平移工程中得到了广泛的应用, 大大提高了同步控制精度, 平移时正常加速度小于 $0.01g$ 。但是在文物建筑平移工程中, 考虑到文物建筑建造年代久远, 材料强度低、整体性差等特点, 以及台风、较大差异沉降、地震等不可预见情况, 结构的临时加固还是必须重点考虑的关键技术。

### 1 工程概况

上海玉佛寺为外观2层的仿宋宫殿式木结构建筑, 是上海优秀历史建筑和普陀区文物保护单位。由于在城市发展过程中, 地势变低, 交通拥挤, 年久失修, 存在很大

的安全隐患, 已不满足实际使用需求, 故需对玉佛寺进行整修, 采用可编程逻辑控制器 (PLC) 同步控制系统控制相应设备, 将大雄宝殿整体向北平移 $30.66\text{ m}$ , 顶升 $0.85\text{ m}$ 。为保障平移万无一失, 平移前设计阶段重点考虑临时加固技术, 不仅要求临时加固措施要抵抗 $0.05g$ 水平加速度, 而且加固措施在受力拆除时不能对结构造成损伤。

### 2 木结构整体临时加固

#### 2.1 临时加固措施比选

平移临时加固措施常用的方式有满堂脚手架加固和轻型钢桁架加固。脚手架钢管之间的连接为标准化连接安装, 质量容易保证, 整体刚度相对较弱。轻型钢桁架在既有建筑里加固, 杆件数量规格较多, 施工不便, 但整体刚度及强度优于脚手架钢管。本工程整体加固措施采用轻型钢桁架, 脚手架作为局部失效时的备用方案<sup>[1-2]</sup>。

本工程采用空间钢桁架的形式, 钢架的钢柱锚固在上托换盘上。钢架自身独立成体系, 在纵横向都有较大的刚度。其目的是在意外情况发生或受到不利工况扰动的情

基金项目: 上海市科学技术委员会科研项目课题  
(15DZ2282600)。

作者简介: 王建永 (1984—), 男, 硕士, 工程师。

通信地址: 上海市天山路641号3号楼205室 (200336)。

电子邮箱: wkingjy@163.com

收稿日期: 2017-12-13

下能够控制整体木构架的水平变形，保持结构的侧向稳定性，对整体建筑进行侧向的限位保护。独立钢架体系不改变主体结构的体系和原有受力状态，只有在建筑产生相对较大的变形时钢架侧向保护作用才启动，因此给主体木结构预留了一定自适应的变形空间，正常情况下钢架和主体结构的受力互不干扰，各自受力模式也比较清晰。但对一些不利工况，临时钢架起到的保护作用有限，如柱托换过程中，如果托换失效或底部产生比较大的竖向变形，则独立钢架体系不能起到保护作用。因此专门考虑一个备选方案，以期能够保证这种不利工况发生时整体建筑的安全。

大殿内为木结构，不能进行明火焊接作业，加固钢桁架设计为螺栓连接，钢结构主要构件为立柱、水平支撑、斜向支撑及抱箍等，杆件数量较多（图1）。其中立柱采用RHS160 mm×8 mm，数量34根、共计43节；水平支撑为2C16A，数量25根；斜向支撑为∠100 mm×63 mm×8 mm，数量52根；抱箍16个（图2、图3）。

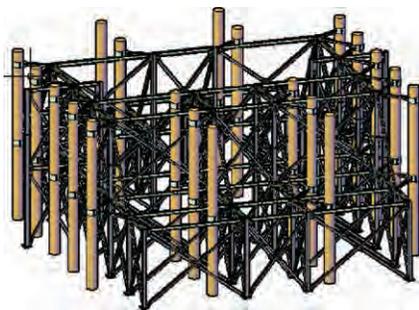


图1 钢架空间模型

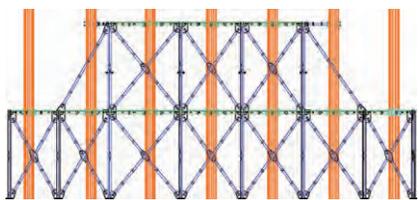


图2 钢结构加固

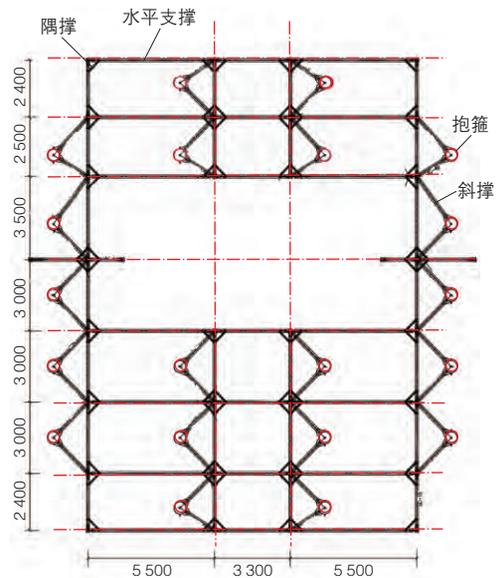
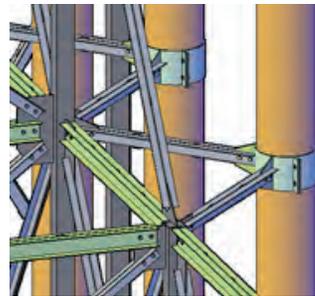


图3 加固平面示意



(a) 效果图

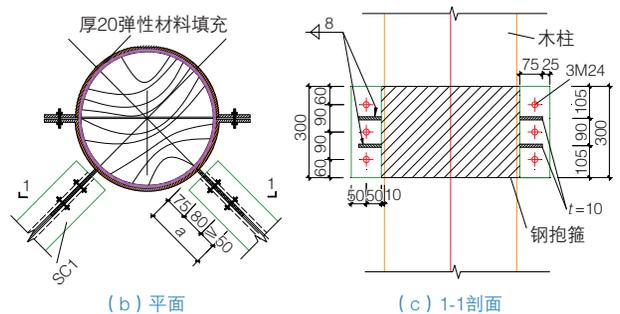


图4 木柱与钢结构支撑连接关系

## 2.2 木柱与钢结构连接

在木柱周围包钢板与水平钢支撑通过螺栓连接，为保护木柱节点在受力时不损伤接触表面，在木柱与抱箍间填充厚20 mm橡胶板。节点做法只限制其水平位移，不限制竖向位移，使加固体系与原结构体系受力及传力互不干扰（图4）。施工过程中由于木柱间距、木柱直径、木柱倾斜等各不相同，导致钢架与木柱间的连接杆件长度及角度必须以实际情况为准，最后安装前进行测量。

## 2.3 局部节点的加固

在损伤严重且有施工空间的各节点梁和柱上设拉结，对节点进行限位加固，减少各种变形的发生，对大梁和柱节点采用隅撑加固；对托梁式结构的梁柱节点采用2个能对称扣合锁固在梁、柱表面的扁钢卯（图5、图6）。

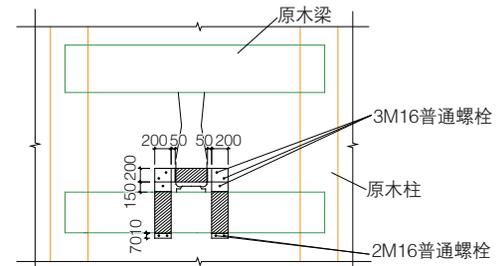


图5 木柱与梁节点加固

## 3 佛像加固

### 3.1 佛像倾覆简化分析

将佛像结构假设为均质结构，根据形状确定重心位置（图7），水平加速度考虑0.05g，计算佛像的倾覆可能

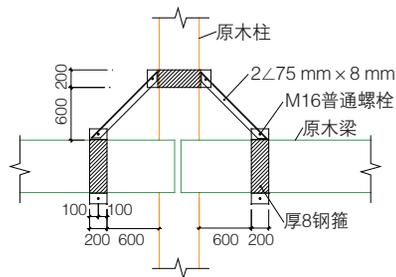


图6 梁与托柱节点加固

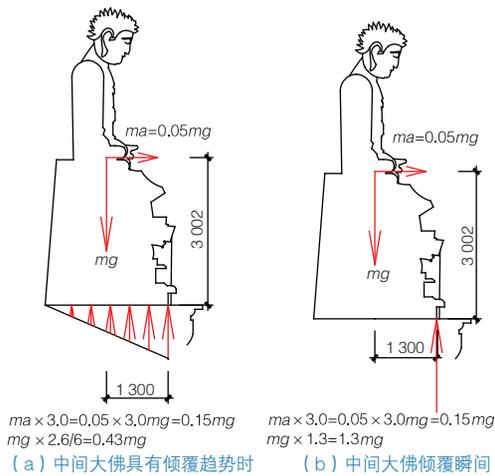


图7 佛像倾覆简化分析

施，且应避免四肢等脆弱部位。设计阶段对比了封闭式加固、绑带式加固、框架夹板式加固等加固方案。

1) 封闭式加固。佛像四周模板封闭，内部填充乒乓球、稻壳等轻质材料。该方案内部封闭体积巨大，填充材料可观，乒乓球需要300万个，质量8 t，可能压坏佛像，而且封闭后在平移过程中无法观察。

2) 绑带式加固。弹性材料绑带前后绑扎固定。该方案绑扎时施工的预应力无法控制。

3) 框架夹板式加固。脚手架作为支撑，夹板作为固定。该方案脚手架钢管间的连接为标准化连接安装，质量比较容易保证，节点摩擦强度足够满足支撑力要求(图8)。

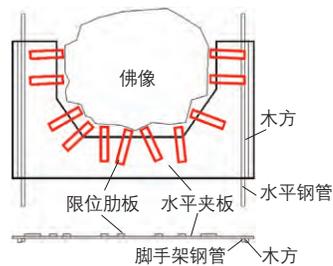


图8 框架夹板式加固

当佛像发生倾覆趋势时，主要的受力与传力途径为：佛像水平力→接触海绵→支撑木方→固定模板→支撑脚手架及斜杆。主要的施工工序与传力路径相反：先施工支撑脚手架→加工与佛像体型大致吻合的固定模板(模板与佛像不接触)→安装并固定木方(木方顶端粘贴海绵)。

东西两侧佛像加固2道夹板支撑，中间佛像加固2道夹板支撑，并用木方固定底座莲花台座。南海观音佛像加固支撑杆件顶端粘贴海绵与接触点接触，并且避开所有佛像的位置。

#### 4 平移过程加固措施监测数据

在整个施工过程中对大殿进行实时监测，安装静力水准仪监测大雄宝殿整体姿态，安装倾角仪监测墙体、木柱、佛像的倾斜；安装位移传感器监测佛像位移、榫卯节点变形。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，2017年9月12日开始顶升，于2017年9月17日顶升到位。在此期间，木柱倾角仪的数据如表1所示。

通过对钢桁架应变计、佛像激光测距仪的变化曲线和倾角仪的读数进行分析，可得出以下结论：

1) 安装在墙面的静力水准仪、倾角仪、激光测距仪测量数据在平移顶升前后几乎保持不变，可知整体结构在平移顶升过程并未发生显著的偏移、下沉或旋转。

2) 安装在佛像墙面上的静力水准仪和倾角仪，以及

性。

1) 在0.05g水平加速度作用下，中间大佛依靠自身质量具有足够稳定性，没有倾斜和倾覆倾向，倾覆安全系数8.6。

2) 按0.05g水平加速度计算南海观音像的倾覆稳定性，计算不考虑南海观音像根部锚固与黏结作用，假设为平放于佛台上部，倾覆安全系数为4.4。

由此可知，佛像在0.05g水平加速度作用下的倾覆可能性很小，但考虑到平移过程中各种不可预见的情况，为保证万无一失，应对佛像进行必要的临时性加固。

#### 3.2 佛像加固方案选择

由于佛像为非受力构件，表面不能受力，形状不规则，且为重点保护部位，加固措施不能采用限位及扶持措

表1 部分木柱倾角仪数据

时间	读数/(°)					
	仪器1	仪器2	仪器3	仪器5	仪器6	仪器7
2017-08-29	-0.04	1.50	1.46	2.73	-0.15	1.23
2017-08-30	-0.08	1.53	1.46	2.67	-0.12	1.25
2017-08-31	-0.08	1.54	1.53	2.58	-0.07	1.25
2017-09-01	-0.03	1.54	1.53	2.74	-0.06	1.25
2017-09-02	-0.03	1.53	1.60	2.75	-0.06	1.25
2017-09-03	-0.01	1.55	1.52	2.72	-0.05	1.26
2017-09-04	-0.01	1.55	1.56	2.75	-0.06	1.26
2017-09-05	0.01	1.52	1.55	2.73	-0.08	1.26
2017-09-06	-0.01	1.56	1.54	2.75	-0.05	1.26
2017-09-07	0.02	1.54	1.52	2.77	-0.03	1.27
2017-09-08	0.00	1.55	1.54	2.80	-0.03	1.27

正对佛像的激光测距仪的测量数据在平移前后几乎保持不变，可知佛像在平移过程与整体结构几乎保持相对静止，并未发生显著的相对移动、倾斜或旋转。

3) 安装在柱子上的倾角仪以及安装在大殿顶部横向、纵向梁上的激光测距仪的测量数据在平移前后几乎保持不变，可知柱子在平移过程并未发生显著的倾斜或下沉；大梁与木柱交界的卯榫节点部位没有明显的变形。

4) 钢结构应变在平移顶升过程中的数据变化幅度 <math>45 \mu\epsilon</math>，设计规定的钢结构微应变在  $-100 \sim 100 \mu\epsilon$  范围内（按钢材设计强度的1/10取值），满足要求。

## 5 结语

1) 只要严格控制各阶段的设计指标，平移顶升施工的风险就可以控制得很低，因而，结构安全可靠度是有保证的。

2) 临时加固结构应自成体系，与原结构传力不能互相干扰，拆除时不影响原受力传力路径。

3) 应用PLC同步控制系统平移顶升建筑物对结构的扰动很小，木结构建筑平移时采用轻型钢桁架加固过于保守，类似项目可考虑选择满堂脚手架加固方式。

4) 木结构建筑整体平移顶升工程可不考虑屋架体系及屋面瓦片的加固。

## 参考文献

- [1] 吴二军,李爱群.建筑物整体平移工程的可靠度计算和风险评估[J].建筑技术,2004,35(6):412-414.
- [2] 王建永,吴二军,蓝戊己,等.砖木结构文物建筑复杂移位工程托换加固技术[J].施工技术,2011,40(6):32-34,43.

(上接第301页)

## 7 基础连接

大雄宝殿带佛像整体平移顶升就位后进行基础连接。作为传统木构架承重的大雄宝殿，梁柱榫卯连接、柱础铰接，大殿本身具有良好的抗震性能。为了充分利用和发挥大殿结构抗震性能，本工程采用以弹性滑板支座+黏滞阻尼器+厚层橡胶隔震支座+复位节点等组成的摩擦滑移隔震体系，在移位托盘（大殿底板）与轨道（新址基础）进行组合隔震连接。具体做法如下：在大殿木柱下方对应布置一个弹性滑板支座，厚层橡胶支座仅布置于大殿基础结构四角处，黏滞阻尼器布置于结构四周，x向、y向各4个（图8、图9）。

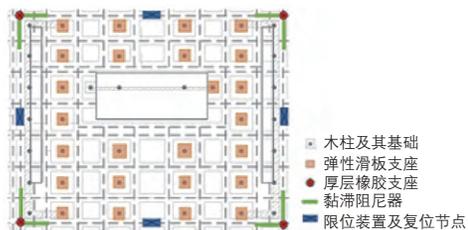


图8 隔震体系分布示意

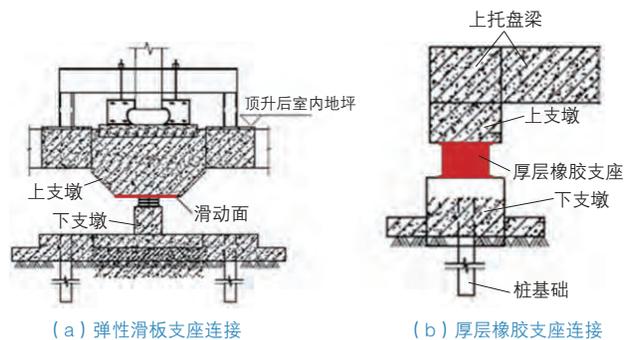


图9 隔震支座连接节点示意

措施、高精度的移位施工控制，上海玉佛禅寺大雄宝殿带佛像整体安全平稳地水平移位30.66 m，竖向顶升0.85 m。该工程开创国内木结构庙宇建筑带佛像整体移位的先河，为今后木结构建筑本体带附属构筑物整体同步移位施工积累了经验。

## 参考文献

- [1] 赵士永.古建筑群整体移位的关键技术和理论分析[D].天津:天津大学,2013.
- [2] 张鑫,岳庆霞,贾留东.建筑物移位托换技术研究进展[J].建筑结构,2016(5):91-96.

## 8 结语

通过合理的移位结构体系设计、有效的临时加固保护