

# 江南传统木构建筑模型修正方法研究 ——以津逮楼为例

淳庆<sup>†</sup>, 华一唯, 张承文, 孟哲  
(东南大学 建筑学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**为研究江南传统木构建筑围护结构对整体结构受力性能的影响,并为该类型建筑的抗震和抗风计算提供依据,以典型江南传统木构建筑——甘熙故居津逮楼为例,采用有限元分析和结构动力特性测试的方法对该类型传统木构建筑的结构模型修正方法进行研究。首先,采用 SAP2000 有限元软件分别建立了不考虑围护结构效应的一种模型和考虑围护结构效应的 3 种修正模型,并进行结构动力特性分析;然后,采用结构动力测试分析系统对建筑进行现场测试,并将测试结果与 3 种修正模型计算结果进行比较分析。结果表明:相比于不考虑围护结构效应,考虑围护结构效应后 3 种修正模型的前三阶自振频率明显提高,等效斜撑模型的提高幅度为 220%~307%,等效斜撑+幕墙墙元模型的提高幅度为 228%~345%,而整体简化模型的提高幅度为 230%~295%,但第一阶振型和第二阶振型发生了明显改变。等效斜撑模型的计算结果最接近真实测试结果,误差在 15% 范围以内,是最优的修正模型。等效斜撑+幕墙墙元模型的计算结果与实测结果的误差基本在 20% 以内,是其次可接受的修正模型。而整体墙元模型的计算结果与实测结果严重不符。对该类型传统木构建筑进行振动响应分析、风振作用下的受力性能分析、多遇地震作用下的弹性受力性能分析时,建议采用等效斜撑模型进行计算。当对该类型木构建筑进行设防地震、罕遇地震作用下出现弹塑性变形时的结构分析,需考虑围护结构失效时,建议采用不考虑围护结构效应模型进行计算。

**关键词:**江南传统木构建筑;模型修正;结构动力特性;津逮楼;围护结构  
**中图分类号:**TU375 **文献标志码:**A

## Research on Model Updating Methods of Traditional Timber Buildings in the Yangtze River Region—A Case Study of Jindai Building

CHUN Qing<sup>†</sup>, HUA Yiwei, ZHANG Chengwen, MENG Zhe  
(School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to study the effect of building envelope structures on the structural performance of traditional timber building in the Yangtze River region and to provide the calculation basis of the seismic performance and wind-resistant performance of this type of buildings, Jindai Building, a typical traditional timber building in the Yangtze River region, was taken as an example, and the model updating methods of this building were studied by the methods of finite element analysis and structural dynamical characteristic tests. First, by using finite element software SAP2000, the structural model without consideration of building envelope effects and the three structural mod-

\* 收稿日期:2018-05-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778122,51578127), National Natural Science Foundation of China(51778122, 51578127)

作者简介:淳庆(1979—),男,江苏南京人,东南大学副教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: cqj1979@163.com

els considering building envelope effects were established to analyze their dynamical characteristics. Then, the structural dynamical characteristic test was carried out on site. By comparing the results of the finite element methods and the dynamical characteristic test, some important results can be drawn as follows: in terms of natural vibration frequency, the results of these three updating models considering building envelope effects are obviously higher than that of the model without consideration of building envelope effects. The increment of the equivalent diagonal strut model is 220%~307%, the increment of the equivalent diagonal strut and shell element model is 228%~345%, and the increment of the integral simplified model is 230%~295%, but the first mode shape and second mode shape of this updating model are changed. The results of the equivalent diagonal strut model are very close to the results of the dynamical tests, and the error is smaller than 15%. Therefore, the equivalent diagonal strut model is the best updating model for this building. The results of the equivalent diagonal strut and shell element model are also close to the results of the dynamical tests, and the error is smaller than 20%. Thus, the equivalent diagonal strut and shell element model is the second-best updating model for this building. The results of the simplified model are obviously different from the results of the dynamical tests, so that the integral simplified model is not suitable for the model updating of this building. Finally, the equivalent diagonal strut model is recommended to study the structural performance of this type of traditional timber buildings whose envelopes have no cracks, for example, the condition of environment vibration, wind-induced vibration, and frequently occurred earthquake. The structural model without consideration of building envelope effects is recommended to study the structural performance of this type of traditional timber buildings whose envelopes are failed, for example, the condition of design earthquake or rarely occurred earthquake.

**Key words:** traditional timber buildings in the Yangtze River region; model updating; structural dynamical characteristic; Jindai Building; building envelope

当前,在中国现存的建筑遗产中,木构建筑遗产占大多数。据统计,前六批国家级文保单位的古建筑共1 087处,其中木构建筑就有823处,占76%。在第七批国家级文保单位中,又有近千处的传统木构建筑。这其中有许多木构建筑尽管遭受了多次地震或台风的影响,但依然完整地保留下来,这充分反映了我国传统木构建筑具有较好的结构性能,这与传统木构建筑的结构用材、构架形式、榫卯构造等有关。江南传统木构建筑明显不同于北方传统木构建筑,北方传统木构建筑多偏于官式作法,用料较大,榫卯样式简单;而江南传统木构建筑多偏于民式作法,用料较小,榫卯样式多样。这些建筑遗产使用至今,不可避免地产生损伤累积和抗力衰减,一旦材料或结构损伤、或遭受强外力作用,这些建筑遗产就存在损毁的风险。因此,对这些重要建筑遗产进行健康监测和维护,就变得非常迫切和有必要了。而结构模型修正方法是获取准确的结构计算模型的唯一途径,是建筑遗产健康监测的关键技术之一。

目前,国内外关于建筑遗产健康监测的研究较

为热门。在国外,Cointe等<sup>[1]</sup>基于数值模型和现场测量,提出了诊断和监测历史木构建筑的数值方法,并对木构钟楼的临界动态响应等进行了分析研究;Ranalli等<sup>[2]</sup>采用地质雷达技术对历史建筑立面的保护状态、墙体厚度、砌筑形式及劣化情况等进行了监测;Orlando<sup>[3]</sup>采用多元地质雷达技术对历史建筑的裂缝进行了监测;Bednarz等<sup>[4]</sup>采用高清激光三维扫描技术对波兰的一栋历史教堂建筑进行了为期5年的位移监测,并以该监测数据为基础对建筑现状进行了数值分析,提出了相应的修缮措施;Ceroni等<sup>[5]</sup>基于动态监测系统的监测数据,对意大利砌体宫殿的动力性能进行了分析,并与有限元模型分析结果进行了比较;Gentile等<sup>[6]</sup>研究了不同等级的激励作用下的历史建筑的结构动态特性;Ubertini等<sup>[7]</sup>对帕代尔诺铁拱桥(1889)进行了环境振动测试和状态评估;Ramos等<sup>[8]</sup>对两栋历史砌体建筑进行了监测及模态分析,并对葡萄牙一座教堂进行了结构动态健康监测。在国内,王林安等<sup>[9]</sup>围绕应县木塔结构试验、结构计算及结构监测等几个方面的工作,梳

理和归纳了应县木塔结构监测与试验分析的研究现状,并提出现存问题和建议;王娟等<sup>[10]</sup>通过在某藏式古建筑上的监测试验,验证了遗产建筑的结构健康监测系统,并对其在遗产建筑上应用的特殊性及存在的问题进行了讨论;闫会春等<sup>[11]</sup>以藏式古建筑为例,讨论了古建木结构监测系统预警机制的结构层次及设计方法,详细阐述了单一构件静态数据预警机制的各种预警限值的设定原则;张岩等<sup>[12]</sup>利用在典型藏式古建筑木结构中布设的加速度动力特性监测系统,获得所监测结构在人群荷载等环境随机激励下的振动响应数据和监测结构的动力特性参数;白晓彬等<sup>[13]</sup>以某藏式古建筑监测工程中的木梁为例,建立了温度作用下梁底跨中顺纹方向应变的理论模型;孟昭博<sup>[14]</sup>利用环境激励的结构振动响应数据对西安城墙和鼓楼的结构进行了健康监测和安全评估;时以亮等<sup>[15]</sup>基于布里渊散射光时域反射测量技术对北京东华门城台的北墙体、西墙体和中门洞的变形及渗漏进行了监测.综上所述,国外学者对建筑遗产的健康监测技术研究主要偏重于砖石砌体结构的建筑遗产类型,明显不同于中国的传统木构建筑.而国内仅有少数学者对建筑遗产的健康监测技术开展研究,主要偏重于应县木塔、藏式古建筑、古城墙等特殊建筑遗产类型,明显不同于量大面广的传统古建筑木结构类型,对传统木构建筑的模型修正方法研究鲜有报道.本文将典型江南传统木构建筑——甘熙故居津逮楼为例,采用有限元分析和结构动力特性测试的方法对该类型建筑遗产的模型修正方法进行研究.

## 1 江南传统木构建筑的典型形制构造研究

自北宋以来,江南地区成为中国经济最富庶、文化最发达的地区,木构建筑的建造技艺也早已成熟.江南地区传统木构建筑工艺历史悠久,底蕴丰厚,主要的流派有:香山帮、东阳帮、宁绍帮、徽州帮等.太湖周边的苏州、无锡、嘉兴、湖州等地,是经济发达的中心地区,受北方官式抬梁建筑影响,吸收了多种艺术手法,表现出程式化特征;而浙南山区的穿斗建筑更体现出原生的乡土建筑的特点.北方常见的官式木构建筑构件一般较为粗大,且建筑多采用较多抗侧支撑体系以提升其整体稳定性,而江南传统木构建筑构件则相对纤细,古代江南工匠始终寻求通过提升木作工艺或构造来解决木构建筑

稳定性的问题,这也使得江南传统木构建造工艺在古代中国处于领先地位.根据分析,江南与北方传统木构的差异表现在建筑形制和榫卯节点方面,主要体现在以下4点:1)构架体系造成的差别.北方多受抬梁式构架的影响,而南方则穿斗较多,北方的榫卯连接很少完全穿透构件,榫长较短;南方有专门穿透构件的榫卯类型,如半榫、透榫和箍头榫等.2)比例差异.北方木构件粗大,榫卯粗短;而南方构件纤细,榫卯细长.3)习惯作法差异.北方早期阑额直榫入柱,而南方早期阑额与柱多用镊口鼓卯或燕尾榫相接等.4)官式与民式差异.北方受官式影响大,作法较为成熟固定;而南方为适应实际需要,有较多的变化.

津逮楼位于全国重点文物保护单位——南京甘熙故居中的后花园,该建筑为二层楼阁式木构建筑,面阔 14.6 m,进深 9.4 m,建筑面积为 275 m<sup>2</sup>.该建筑的围护结构主要包括东西山墙的一眼一斗式空斗砖墙和南北面的木窗木门.根据现场测绘和勘察,该建筑的建筑平面布局、梁柱构架体系、木构件尺度、梁柱榫卯构造及空斗墙围护墙体构造做法都基本符合江南传统木构建筑的做法,为典型的清式江南传统木构建筑,建筑现状如图 1 所示.



(a)北立面

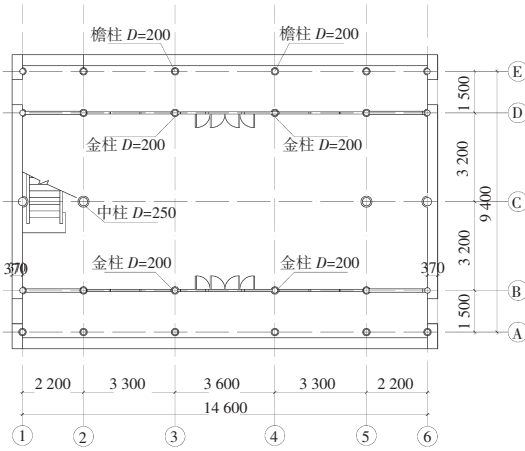


(b)南立面

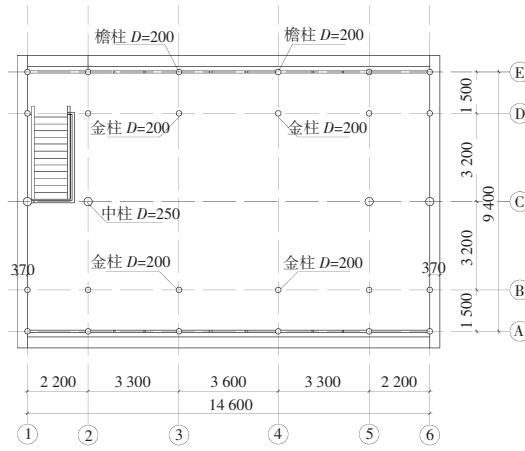
图 1 津逮楼现状

Fig.1 Existing state of Jindai Building

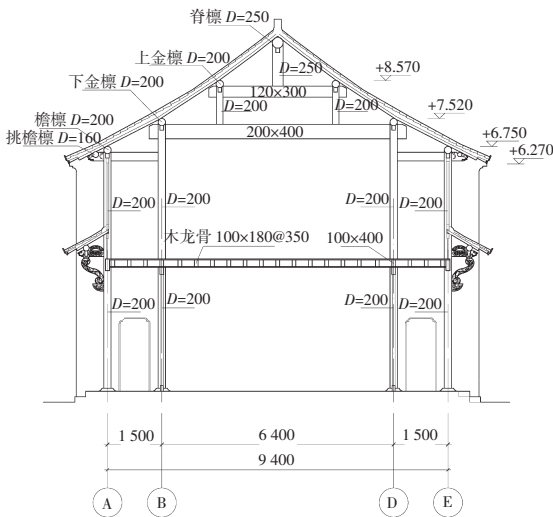
通过现场测绘, 获取了该建筑的几何尺寸, 如图 2 所示. 根据现场勘察和检测, 该建筑用材均为江南地区传统木构建筑常用的杉木.



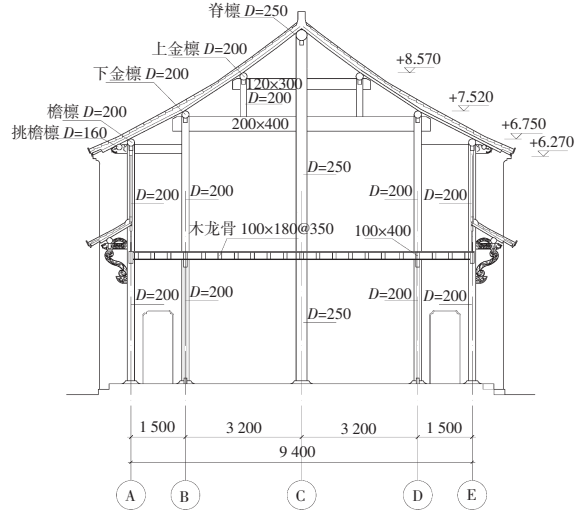
(a) 第一层建筑平面图



(b) 第二层建筑平面图



(c) 明间木构架剖面图



(d) 边贴木构架剖面图

图 2 津逮楼建筑图

Fig.2 Architectural drawings of Jindai Building

## 2 江南传统木构建筑的有限元分析

### 2.1 不考虑围护结构效应的有限元模型

目前, 在进行传统木构建筑的风振响应和地震响应计算时, 常常不考虑围护结构对整体刚度的贡献. 本文先采用有限元软件 SAP2000 建立津逮楼在不考虑围护结构效应时的有限元模型并进行结构动力特性分析. 津逮楼为空间杆件结构体系, 结构有两层, 主要由柱、梁、檩条、木椽、木格栅等构件组成, 梁柱连接均为榫卯连接, 图 3 为津逮楼的 SAP2000 有限元模型, 模型中梁柱连接采用榫卯半刚性连接, 参考文献[16-18], 檐柱与梁连接采用的箍头榫转动刚度值取  $338 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ , 中柱与梁连接采用的半榫转动刚度值取  $95 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ , 瓜柱与梁连

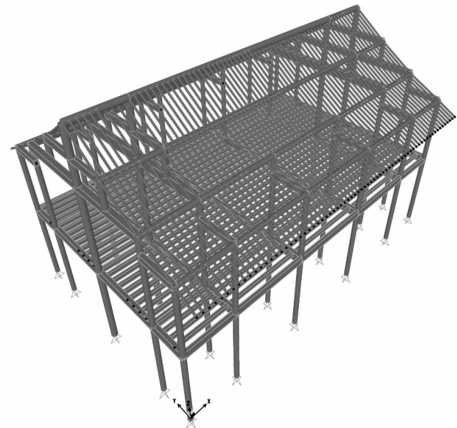


图 3 不考虑围护结构效应时的津逮楼有限元计算模型

Fig.3 Finite element model of Jindai Building without considering building envelope effects

接采用的直榫转动刚度值取  $140 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ , 柱与基础采用铰接, 结构阻尼比取  $0.05$ , 木材强度按照杉木取值, 弹性模量取  $9\,000 \text{ N}/\text{mm}^2$ , 泊松比取  $0.3$ . 该有限元模型中包含连接节点单元  $885$  个, 杆件单元  $865$  个.

根据 SAP2000 计算结果, 津逮楼结构的前  $10$  阶自振周期、自振频率及振型参与质量系数见表 1. 由表 1 可知, 结构基频为  $f=0.602 \text{ Hz}$ . 结构的振型通过振型参与质量系数可以得到: 一阶振型  $UX+UY>RZ$  且  $UY>UX$ , 即一阶振型为  $Y$  向(进深向)水平振动; 二阶振型  $UX+UY>RZ$  且  $UX>UY$ , 即二阶振型为  $X$  向(面阔向)水平振动; 三阶振型  $UX+UY<RZ$ , 即三阶振型为绕  $Z$  轴的扭转振动; 津逮楼结构扭转第一周期和平动第一周期之比为  $0.80$ , 说明整体建筑存在较大的扭转刚度.

表 1 不考虑围护结构效应时津逮楼结构的动力特性

Tab.1 Dynamic characteristics of Jindai Building without considering building envelope effects

振型	自振周期/s	自振频率/Hz	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
1	1.66	0.60	0.00	0.99	0.00	0.01	0.00	0.00
2	1.65	0.61	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.33	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99
4	0.50	2.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.47	2.14	0.00	0.01	0.00	0.26	0.00	0.00
6	0.43	2.32	0.01	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
7	0.38	2.65	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00
8	0.36	2.75	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
9	0.30	3.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
10	0.30	3.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00

注:  $UX$  为  $X$  方向(面阔向)的振型质量参与系数,  $UY$  为  $Y$  方向(进深向)的振型质量参与系数,  $UZ$  为  $Z$  方向(竖向)的振型质量参与系数.  $RX$  为绕  $X$  轴扭转方向的振型质量参与系数,  $RY$  为绕  $Y$  轴扭转方向的振型质量参与系数,  $RZ$  为绕  $Z$  轴扭转方向的振型质量参与系数.

## 2.2 考虑围护结构效应时的有限元模型建立

经过初步的实测和建模分析发现: 津逮楼实测的自振频率远小于有限元建模的计算结果, 这意味着津逮楼的真实结构刚度比有限元模型要大得多. 而在建模中未考虑围护结构的刚度效应和结构效应可能是造成建模结果与实测结果不一致的重要原因. 所以本文将如何考虑围护结构效应提出可能的理论模型, 并进行对比分析.

考虑到该建筑为典型的江南传统木构建筑, 东

西立面为空斗砖墙, 南北立面二层为木板与窗户, 一层为窗下墙与窗户, 作者提出如下 3 种考虑围护结构效应的方法: 1) 整体墙元模型; 2) 等效斜撑模型; 3) 等效斜撑+幕墙墙元模型. 对于第 1 种整体墙元模型, 这种修正方法将忽略一层和二层木窗的抗侧刚度, 而将空斗砖墙简化为板单元进行计算; 对于第 2 种等效斜撑模型, 这种修正方法把所有围护体(空斗砖墙+木板+木窗)等效为杆单元; 对于第 3 种等效斜撑+幕墙墙元模型, 这种修正方法把空斗砖墙看作等效斜撑, 木门窗根据玻璃幕墙的考虑方式, 看作幕墙墙元, 用板单元进行模拟.

### 2.2.1 整体墙元模型

1980 年, 施耀新提出了整体墙元模型, 认为填充墙与框架结构在连接处无裂缝时, 框架结构体系可视为一个由两种材料组合的整体构件<sup>[9]</sup>. 建模时, 直接使用板单元按填充墙的尺寸填充在各个区格之中. 根据对江南传统木构建筑的构造分析, 江南传统木构建筑的边贴木柱多埋于围护墙中或与围护墙有可靠拉结, 因此, 该简化模型可以应用于该建筑. 同样, 本文也利用 SAP2000 计算了该模型的前三阶固有频率和振型, 计算模型参数取值时, 填充墙的弹性模量依《砌体结构设计规范》(GBJ-1988), 按实测得到的 M5 砂浆砌筑的空斗砖墙来计算强度, 取  $930 \text{ MPa}$ , 填充墙的厚度取  $370 \text{ mm}$ , 其余墙取  $240 \text{ mm}$ . 依据上述理论建立了甘熙故居津逮楼考虑围护结构效应时的有限元模型, 如图 4 所示.

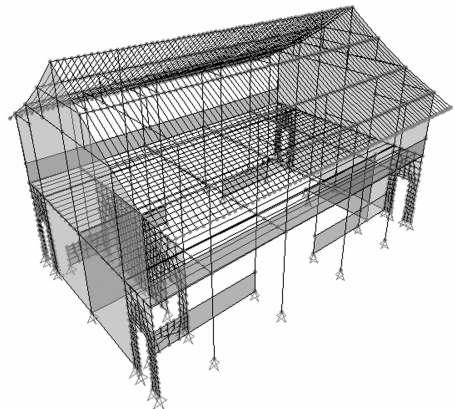


图 4 采用整体简化模型的津逮楼结构有限元模型

Fig.4 Finite element model of Jindai Building with the method of integral simplified model

表 2 为采用整体墙元模型考虑围护结构效应的甘熙故居津逮楼结构的动力特性. 结果表明: 采用整体墙元模型考虑围护结构效应时, 整体的刚度较大, 自振周期明显降低, 并且一阶振型变为  $X$  向(面

阔向),二阶振型变为 Y 向(进深向)。

表 2 采用整体墙元模型考虑围护结构效应的津速楼的动力特性

Tab.2 Dynamic characteristics of Jindai Building with the method of integral simplified model

振型	自振周期/s	自振频率/Hz	振型	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
1	0.50	1.99	X 向平动	0.65	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01
2	0.44	2.28	Y 向平动	0.00	0.31	0.00	0.05	0.00	0.00
3	0.38	2.97	绕 Z 轴扭转	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.09

2.2.2 等效斜撑模型

等效斜撑模型是将围护墙模拟为与梁柱交点铰接且与框架共同工作的抗侧力构件。该等效斜撑如图 5(a)所示,其与墙体材性相同,截面为矩形,长度为梁柱间对角线长度,厚度同围护墙厚度,等效斜撑具有一定宽度,其宽度由式(1)和式(2)确定。本研究采用 Buonopane 等<sup>[20]</sup>提出的开洞围护墙的斜支撑模型来模拟津速楼建筑的围护墙体,如图 5(b)所示,单根斜压杆宽度按照尺寸为洞口两侧墙肢尺寸的非开洞围护墙确定<sup>[21-23]</sup>。

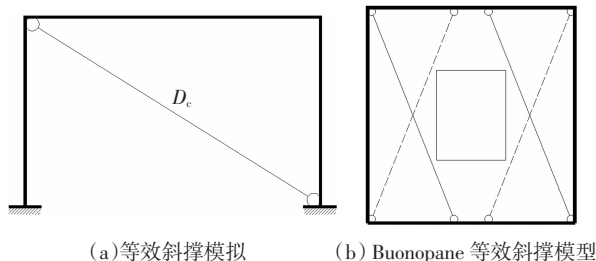


图 5 等效斜撑模拟及 Buonopane 模型

Fig.5 Equivalent bracing simulation and Buonopane model

$$\lambda = \left( \frac{E_w t_w \sin 2\theta}{4E_c I_c H_w} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

$$D_c = 0.175(\lambda H)^{-0.4} \sqrt{H^2 + L^2}. \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为刚度系数; $E_w$  为围护墙的弹性模量; $t_w$  为围护墙的厚度; $\theta$  为围护墙对角线与框架梁之间的夹角; $E_c$  为框架柱的弹性模量; $I_c$  为框架柱的惯性矩; $H_w$  为围护墙体的厚度; $D_c$  为等效斜撑宽度; $H$  为框架柱高度; $L$  为框架梁长度。本文计算模型中,围护墙  $E_w$  取值为 930 MPa; 东西山墙  $t_w$  取值为 370 mm, 其余墙体  $t_w$  取值为 240 mm; $E_c$  取值为 9 000 MPa。依据上述理论建立津速楼考虑围护结构效应的等效斜撑有限元模型,如图 6 所示。

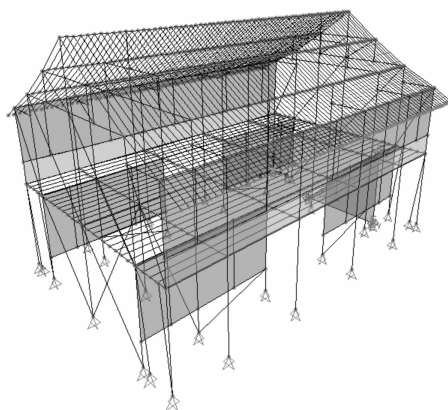


图 6 采用等效斜撑模型的津速楼结构有限元模型

Fig.6 Finite element model of Jindai Building with the method of equivalent diagonal strut

表 3 为采用等效斜撑模型考虑围护结构效应的津速楼结构的动力特性,可以看出与未考虑围护结构效应的计算模型相比,结构的自振周期和振型发生明显变化,自振周期明显减小,结构刚度增大,一阶振型为 Y 向(进深向)水平振动,二阶振型为 X 向(面阔向)水平振动。

表 3 用等效斜撑模型考虑围护结构效应的津速楼动力特性

Tab.3 Dynamic characteristics of Jindai Building with the method of equivalent diagonal strut model

振型	自振周期/s	自振频率/Hz	振型	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
1	0.52	1.93	Y 向平动	0.01	0.67	0.00	0.05	0.00	0.00
2	0.49	2.04	X 向平动	0.60	0.01	0.00	0.00	0.09	0.00
3	0.33	3.06	绕 Z 轴扭转	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00

2.2.3 等效斜撑+幕墙墙元模型

除考虑砖墙围护体的结构效应外,还考虑南北立面的木窗木框围护的结构效应,故提出等效斜撑+幕墙墙元模型,该计算模型中,将砖墙围护体看作等效斜撑,具体参数按照前述方法确定,木窗木框参考相关文献中玻璃幕墙的考虑方式<sup>[24]</sup>。依据上述理论建立津速楼考虑围护结构效应的等效斜撑+幕墙墙元有限元模型,如图 7 所示。本文计算模型中,围护墙厚度、弹性模量参数取值同上两个模型,木窗的厚度按测绘值取  $t=30$  mm。

表 4 为采用等效斜撑+幕墙墙元模型考虑围护结构效应的津速楼结构的动力特性,可以看出与未考虑围护结构效应的计算模型相比,结构的自振周期和振型发生明显变化,自振周期减小,结构刚度

增大,一阶振型为 $Y$ 向(进深向)水平振动,二阶振型为 $X$ 向(面阔向)水平振动。

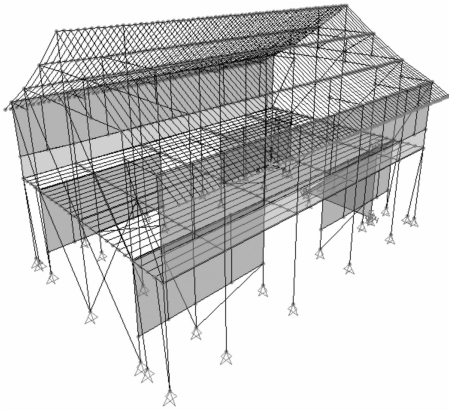


图7 采用等效斜撑+幕墙墙元模型的津逮楼结构有限元模型

Fig.7 Finite element model of Jindai Building with the methods of equivalent diagonal strut model and shell element model

表4 用等效斜撑+幕墙墙元模型考虑围护结构效应的津逮楼的动力特性

Tab.4 Dynamic characteristics of Jindai Building with the methods of equivalent diagonal strut model and shell element model

振型	自振周期/s	自振频率/Hz	振型	$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	0.51	1.97	$Y$ 向平动	0.00	0.67	0.00	0.05	0.00	0.01
2	0.44	2.28	$X$ 向平动	0.49	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
3	0.30	3.24	绕 $Z$ 轴扭转	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.35

#### 2.2.4 对比与总结

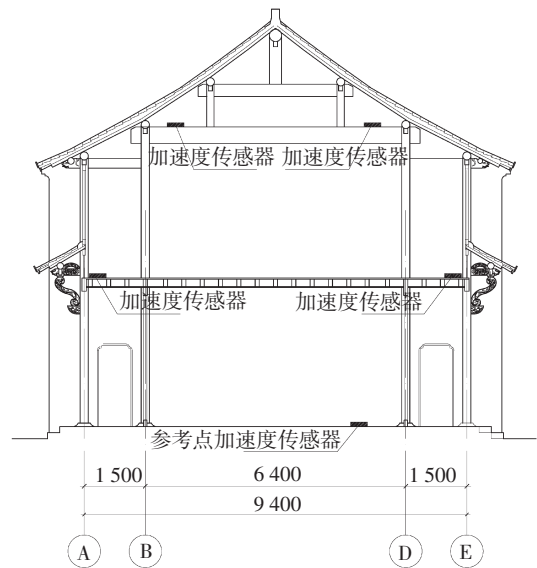
从表2~表4可以看出,相比于不考虑围护结构效应时的前三阶自振频率,考虑围护结构效应后,这3种计算模型的前三阶自振频率明显提高.3种模型都显著提高了结构两个方向平动以及扭转的刚度,等效斜撑模型的提高幅度在220%~307%,等效斜撑+幕墙墙元模型的提高幅度在228%~345%,而整体简化模型的提高幅度在230%~295%,但第一阶振型和第二阶振型明显发生了改变,这主要由于整体墙元模型过度考虑了砖墙的刚度贡献,使得进深向的刚度明显大于面阔向的刚度。

### 3 结构动力特性测试分析

为了验证哪种模型计算结果与实测结果一致,得出最适合于津逮楼计算的修正模型.作者对该建

筑进行了环境激励下的结构动力特性测试.传统的模态识别方法是基于实验室条件下的频率响应函数进行参数识别的方法,它要求同时测得结构上的激励和响应信号.但是,在许多实际工程应用中,工作条件和实验室条件相差很大,对一些工程结构无法施加激励或施加激励费用很高,因此本次测试识别了结构在工作条件下的模态参数.津逮楼位于甘熙故居内,其所受激励主要来自地面振动,可认为是环境的随机激励。

本文采用东华测试的DH5922N动力特性测试分析系统进行现场检测,采样频率为20 Hz,采样时间为30 min,分析方法为频域分析法,截止频率为10 Hz.本次测试共布置了5个加速度传感器,分别布置在建筑的一层( $X$ 向和 $Y$ 向)和二层楼面( $X$ 向和 $Y$ 向)以及梁架上,如图8所示.采集的数据使用Matlab进行处理.将测试采集的数据使用Welch方法进行功率谱估计,处理时加500个数据点宽度的Hanning窗,并按25%的数据重叠率进行平均.测试获得的津逮楼的自功率谱如图9所示。



(a)加速度传感器立面布置图



(b)底层加速度传感器布置



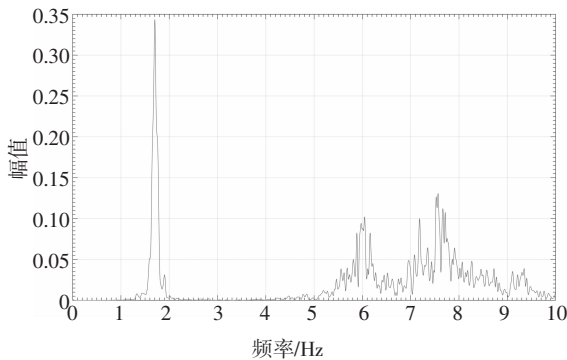
(c) 二层楼面加速度传感器布置



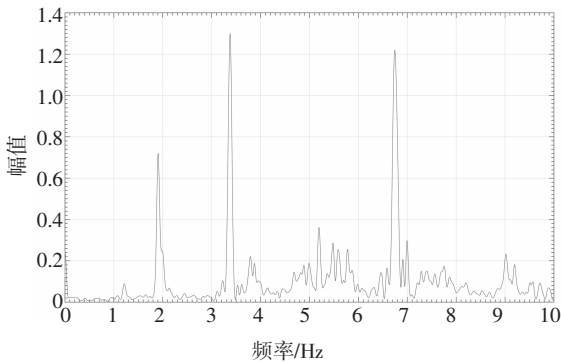
(d) 屋面梁架加速度传感器布置

图 8 加速度传感器布置图

Fig.8 Layout of the acceleration sensors



(a) Y 向(进深向)自功率谱



(b) X 向(面阔向)自功率谱

图 9 FFT 自功率谱

Fig.9 FFT auto-power spectrum

从图 9 可知,该建筑 Y 向(进深向)第一阶自振频率为 1.70 Hz, X 向(面阔向)第二阶自振频率为 1.91 Hz,第三阶(扭转)自振频率为 3.38 Hz.将图 9 中识别出的结果与不考虑围护结构效应时的计算结果、考虑围护结构效应时的计算结果进行比较,如表 5 所示.

表 5 实测结果和有限元计算结果的比较

Tab.5 Comparison between test results and calculations results

振动方向与振型阶数	第一阶	第二阶	第三阶
实测固有频率/Hz	1.70	1.91	3.38
理论固有频率/Hz	0.60	0.61	0.75
修正前的固频误差/%	64.63	68.26	77.75
修正前的理论振型	进深方向 平动	面阔方向 平动	绕 Z 轴 扭转
修正后的理论固有频率/Hz	1.99	2.28	2.97
整体墙元模型修正后的固频误差/%	16.69	19.17	12.14
修正后的理论振型	面阔方向 平动	进深方向 平动	绕 Z 轴 扭转
修正后的理论固有频率/Hz	1.93	2.04	3.06
等效斜撑模型修正后的固频误差/%	13.28	6.60	9.45
修正后的理论振型	进深方向 平动	面阔方向 平动	绕 Z 轴 扭转
等效斜撑+幕墙墙元模型修正后的理论固有频率/Hz	1.97	2.28	3.34
修正后的固频误差/%	15.86	19.49	1.10
修正后的理论振型	进深方向 平动	面阔方向 平动	绕 Z 轴 扭转

由表 5 可以看出,不考虑围护结构效应的津速楼结构的刚度明显偏小,与实际情况明显不符.在作者提出的 3 种修正模型中,等效斜撑模型的计算结果最接近真实测试结果,误差在 15% 范围以内,是最优的修正模型.等效斜撑+幕墙墙元模型的计算结果与实测结果的误差基本在 20% 以内,是其次可接受的修正模型.而整体墙元模型由于过度考虑了砖墙的刚度贡献,使得进深向的刚度明显大于面阔向



的刚度,与实测结果严重不符。

综上,当对典型江南传统木构建筑——津逮楼进行振动响应分析、风振作用下的受力性能分析、多遇地震作用下的弹性受力性能分析时,建议采用等效斜撑模型进行计算。当对津逮楼建筑进行设防地震、罕遇地震作用下出现弹塑性变形时的结构分析时,若考虑围护结构失效,则建议采用不考虑围护结构效应模型进行计算。

## 4 结论

本文以江南传统木构建筑——津逮楼为例,通过对结构构造的分析,提出了3种考虑围护结构效应时的结构模型修正方法,通过现场动力特性测试,将实测结果与模型计算结果进行比较分析,提出了该类型建筑的最优修正模型。

1)该类型建筑在不考虑围护结构效应时,结构基频为 $f = 0.60$  Hz;一阶振型为 $Y$ 向(进深向)水平振动,二阶振型为 $X$ 向(面阔向)水平振动,三阶振型为扭转振动。结构扭转第一周期和平动第一周期之比为0.80,说明该类型建筑整体存在较大的扭转刚度。

2)相比于不考虑围护结构效应时的前三阶自振频率,考虑围护结构效应后,这3种计算模型的前三阶自振频率明显提高,3种模型都显著提高了结构两个方向平动以及扭转的刚度,等效斜撑模型的提高幅度在220%~307%,等效斜撑+幕墙墙元模型的提高幅度在228%~345%,而整体简化模型的提高幅度在230%~295%,但第一阶振型和第二阶振型明显发生了改变。

3)在作者提出的3种修正模型中,等效斜撑模型的计算结果最接近真实测试结果,误差在15%范围以内,是最优的修正模型。等效斜撑+幕墙墙元模型的计算结果与实测结果的误差基本在20%以内,是其次可接受的修正模型。而整体墙元模型由于过度考虑了砖墙的刚度贡献,使得进深向的刚度明显大于面阔向的刚度,与实测结果严重不符。

4)对该类型木构建筑进行振动响应分析、风振作用下的受力性能分析、多遇地震作用下的弹性受力性能分析时,建议采用等效斜撑模型进行计算。当对该类型木构建筑进行设防地震、罕遇地震作用下

出现弹塑性变形时的结构分析,需考虑围护结构失效时,建议采用不考虑围护结构效应模型进行计算。

## 参考文献

- [1] COINTE A,CASTERA P,MORLIER P,*et al.* Diagnosis and monitoring of timber buildings of cultural heritage [J]. *Structural Safety*,2007,29(4):337—348.
- [2] RANALLI D,SCOZZAFAVA M,TALLINI M. Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila,Italy)[J]. *Journal of Cultural Heritage*,2004,5(1):91—99.
- [3] ORLANDO L. Using GPR to monitor cracks in a historical building [C]//4th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. New York:IEEE,2007:327—334.
- [4] BEDNARZ L J,JASIENKO J,RUTKOWSKI M,*et al.* Strengthening and long-term monitoring of the structure of an historical church presbytery [J]. *Engineering Structures*,2014,81:62—75.
- [5] CERONI F,PECCE M,SICA S,*et al.* Assessment of seismic vulnerability of a historical masonry building [J]. *Buildings*,2012,2(3):332—358.
- [6] GENTILE C,SAISI A. Continuous dynamic monitoring of a century iron bridge for structural modification assessment [J]. *Frontiers of Structural & Civil Engineering*,2015,9(1):26—41.
- [7] UBERTINI F,GIULIANO F. Computer simulation of stochastic wind velocity fields for structural response analysis: comparisons and applications [J]. *Advances in Civil Engineering*,2010(3):441—456.
- [8] RAMOS L F,LOURENCO P B. Modeling and vulnerability of historical city centers in seismic areas: a case study in Lisbon[J]. *Engineering Structures*,2004,26(9):1295—1310.
- [9] 王林安,侯卫东,永昕群. 应县木塔结构监测与试验分析研究综述[J]. *中国文物科学研究*,2012(3):62—67.  
WANG L A,HOU W D,YONG X Q. A summary on the research and analysis of testing and monitoring the Yingxian County Timber Pagoda structure[J]. *China Cultural Heritage Scientific Research*,2012(3):62—67.(In Chinese)
- [10] 王娟,杨娜,杨庆山. 适用于遗产建筑的结构健康监测监测系统[J]. *北京交通大学学报*,2010,34(1):100—104.  
WANG J,YANG N,YANG Q S. Structural health monitoring system for heritage buildings[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*,2010,34(1):100—104. (In Chinese)
- [11] 闫会春,杨娜. 古建筑木结构健康监测监测系统预警机制探讨[J]. *武汉理工大学学报*,2010,32(9):266—270.  
YAN H C,YANG N. Research on early warning mechanism of structural health monitoring system on ancient timberwork [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*,2010,32(9):266—

270. (In Chinese)
- [12] 张岩, 杨娜. 环境激励下古建筑木结构模态参数识别与分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9):291—295.  
ZHANG Y, YANG N. The structure modal parameter identification and analysis of environmental stimulus on the ancient timber structure [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(9): 291—295. (In Chinese)
- [13] 白晓彬, 杨娜. 长期监测中藏式古建筑木梁应变-温度模型分析 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11):117—125.  
BAI X B, YANG N. Strain-temperature model analysis of Tibetan ancient timber beam in long-term monitoring [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11):117—125. (In Chinese)
- [14] 孟昭博. 西安钟楼的交通振动响应分析及评估 [D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院, 2009:163—182.  
MENG Z B. Analysis and assessment of the vibration responds traffic-induced of Xi'an Bell Tower [D]. Xi'an: School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, 2009: 163—182. (In Chinese)
- [15] 时以亮, 倪斌, 施斌, 等. 北京故宫东华门城台分布式光纤监测研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5):637—643.  
SHI Y L, NI B, SHI B, *et al.* A study on distributed optical fiber monitoring for platform of Donghua Gate in the Forbidden City, Beijing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(5):637—643. (In Chinese)
- [16] 淳庆, 潘建伍, 韩宜丹. 江南地区传统木构建筑半榫节点受力性能研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1):124—131.  
CHUN Q, PAN J W, HAN Y D. Research on mechanical properties of Ban Mortise-tenon joint of the traditional timber buildings in the south Yangtze River regions [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1):124—131. (In Chinese)
- [17] CHUN Q, HAN Y D, MENG Z. Mechanical properties of monodirectional gutou mortise-tenon joints of the traditional timber buildings in the Yangtze River region [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2016, 32(4):457—463.
- [18] 淳庆, 潘建伍, 董运宏. 江南地区传统木构建筑透榫节点受力性能研究 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5):862—869.  
CHUN Q, PAN J W, DONG Y H. Mechanical properties of Tou Mortise-tenon Joints of the traditional timber buildings in the south Yangtze River regions [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5):862—869. (In Chinese)
- [19] 施耀新. 砖填充墙框架房屋的抗震设计研究 [J]. 建筑结构, 1980, 6(1):10—15.  
SHI Y X. Seismic design research of brick infilled wall frame buildings [J]. Building Structure, 1980, 6(1):10—15. (In Chinese)
- [20] BUONOPANE S G, WHITE R N. Pseudodynamic testing of masonry infilled reinforced concrete frame [J]. Journal of Structure Engineering, 1999, 125(6):578—589.
- [21] HOLMES M. Steel frames with brickwork and concrete infilling [J]. Proceeding of the Institution of Civil Engineers, 1961, 19(4):473—478.
- [22] SMITH B S. Behavior of square infilled frames [J]. Journal of the Structural Division ASCE, 1966, 92(1):381—404.
- [23] 苗凤. 填充墙对钢筋混凝土框架结构动力性能的影响 [D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2006:9—17  
MIAO F. The effect of infill walls on the dynamic behavior of reinforced concrete frames [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2006:9—17. (In Chinese)
- [24] 田敬博. 玻璃幕墙和填充墙对高层隔震钢框架结构动力性能的影响 [D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2014:47—67.  
TIAN J B. The influence of glass curtain wall and infill wall to the dynamic performance of base-isolated high-rise steel frame structure [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014:47—67. (In Chinese)