

木构架古建筑基本周期的分析方法

袁建力¹, 杨韵²

(1. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 扬州市建筑设计研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要:针对现行规范近似公式存在的不足,结合单层、两层砖围护墙木构架古建筑的构造特征,构建了设有集中质量和连续分布质量的悬臂杆分析模型,以考虑屋顶、楼盖的质量和位置,以及围护墙、木构架的质量和刚度分布规律。依据结构动力学原理,采用等效质量法将分析模型等效为单质点悬臂杆模型,推导了中部集中质量和连续分布质量的等效公式,以及基本自振周期的计算公式。所研制的分析模型较好地反映了古建筑的大屋顶、楼盖及围护墙对结构自振周期的影响,相应的计算公式可以得出结构的横向和纵向基本周期。结合3座典型古建筑的动态特性试验研究,介绍了计算公式的运用方法,并将基本周期的计算值与实测值进行了对比,表明提供的分析方法适用于围护墙在横向、纵向不同布置的木构架古建筑的基本周期分析。

关键词:木构架古建筑;自振周期;结构动力学;力学模型;抗震分析

中图分类号:TU366.2

文献标识码:A

Analysis method for fundamental period of ancient timber frame buildings

YUAN Jianli¹, YANG Yun²

(1. College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Yangzhou Architectural Design and Research Institute, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In view of the shortcomings of the approximate formula in current standards, combining with the structural characteristics of single-story and two-story brick enclosure wall-timber frame ancient buildings, a cantilever analysis model with concentrated mass and continuous distributed mass is constructed to consider the mass and position of the roof and floor, as well as the distribution law of the mass and stiffness of the enclosure wall and timber frame. According to the principle of structural dynamics, the analytical model is equivalent to a single point cantilever model by using the equivalent mass method. The equivalent formulas of the central concentrated mass and the continuous distributed mass and the calculation formulas of the fundamental period are derived. The developed analytical model can well reflect the influence of the large roof, floor and wall on the natural vibration period of the ancient buildings, and the corresponding calculation formula can be used to obtain the transverse and longitudinal fundamental period of the structure. Combined with the experimental study of the dynamic characteristics of three typical ancient buildings, the application method of the calculation formula is introduced, and the calculated value of fundamental period is compared with the measured value. It shows that the analysis method provided in this paper is suitable for the analysis of the fundamental period of the ancient timber frame buildings with different transverse and longitudinal arrangement of the enclosure walls.

Key words: ancient timber frame building; natural vibration period; structural dynamics; mechanical model; seismic analysis

收稿日期:2022-12-20; 修回日期:2023-05-21

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51338001)

作者简介:袁建力(1951—),男,教授,主要从事古建筑保护研究。E-mail:yjl@yzu.edu.cn

0 引言

结构自振周期是古建筑抗震分析的重要参数。木构架古建筑采用木材、砖和瓦等不同材料建造、结构体系刚柔结合,其自振周期的理论分析复杂,相应的研究成果甚少。利用无损测试仪器实测古建筑的自振周期,可获得较为准确的数据^[1-5],但受设备经费和现场工作条件的限制,难以在实际工程中普遍推广。运用有限元程序分析结构动力特性是当前流行的方法,受建模技术的制约,其力学模型难以反映古建筑的构造特征及质量、刚度的变化,需要依据现场实测动力特性值进行校准和修正。实际工程中,为简化结构分析,通常按照现行 GB/T 50165—2020《古建筑木结构维护与加固技术标准》^[6]和 GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》^[7]提供的近似公式,直接计算古建筑的自振周期;这些公式虽然源于现场实测和统计归纳,但针对性较弱,不同类型和构造的古建筑常常算得相同的自振周期。

木构架古建筑通常由台基、木构架、砖围护墙和瓦屋顶四部分组成,台基是上部结构的基础,木构架是结构的主要承重体系,围护墙、屋顶与木构架在地震中共同受力。木构架古建筑的自振周期与组成部分的构造密切相关,在建立结构动力学模型时,应合理反映其构造特征和质量、刚度的分布规律。理论分析表明,木构架古建筑的基本周期(第一自振周期)在结构的振动中起主导作用;以基本周期为目标构建合理的力学模型、提炼简化分析公式,是改善现存问题的有效途径之一。本文在评析现行规范近似公式的基础上,依据结构动力学原理并结合古建筑的构造特征,建立等效质量分析模型,提供适合工程应用的基本周期计算公式。

1 现行规范计算公式的评析

1.1 《古建筑木结构维护与加固技术标准》公式的评析

鉴于木结构古建筑的基本自振周期难于按弹性系统分析,GB/T 50165—2020《古建筑木结构维护与加固技术标准》^[6]建议按实测值确定,但考虑到实际工作中的现场测试困难,所以在附录 H 中给出了简略的近似计算公式。

1) 基本自振周期计算公式

横向基本自振周期:

$$T_1 = 0.05 + 0.075H \quad (1)$$

纵向基本自振周期:

$$T_1 = 0.05 + 0.072H \quad (2)$$

式中: T_1 为结构基本自振周期(s); H 为柱高(m),对于单层古建筑木结构, H 为从室内地面到大梁底部或斗拱下的柱子高度;对于采用通高柱的多层古建筑木结构, H 为从室内地面到大梁底部或斗拱下的柱子高度;对于采用叠柱的多层古建筑木结构,当首层联有刚度较大的附属建筑物时, H 为从首层室内地面到二层楼面高度;当首层无附属建筑物或联有刚度较小的附属建筑物时, H 为首层室内地面到顶层大梁底部或斗拱下的柱子高度。

2) 古建筑的适用条件

适用条件:①建筑平面为正方形或矩形;②以木构架为主要承重结构;③柱全高不超过 20 m,且有山墙。

由式(1)、式(2)可知,确定结构自振周期的参数仅为柱高 H ,其他影响因素如屋顶、墙体的质量和刚度均被忽略,难以反映不同古建筑的类型、布置与构造特征。因此,该标准还建议,当古建筑木结构为复杂结构时,其基本周期可按 GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》^[7]计算。

1.2 《古建筑防工业振动技术规范》公式的评析

中国兵器工业第五设计研究院在编制 GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》^[7]前,收集了多处砖、木古建筑的资料,并实测了结构动力特性,在此基础上建立了力学模型^[7-8];鉴于木结构的实测振型曲线接近剪切振动,故将木结构简化为剪切悬臂杆模型。该规范给出的古建筑木结构固有频率的计算公式如下:

$$f_j = \frac{1}{2\pi H} \lambda_j \psi \quad (3)$$

式中: f_j 为结构第 j 阶固有频率(Hz); H 为结构计算总高度(m),对于单檐木结构, H 为台基顶至檐柱顶的高

度;对于重檐殿堂、楼阁, H 为台基顶至顶层檐柱顶的高度; λ_j 为结构第 j 阶固有频率计算系数,对于单檐木结构, λ_1 取1.571;两重檐的殿堂和两层楼阁, λ_j 根据二层与底层的高度比 H_2/H_1 ,以及面积比 A_2/A_1 查表确定; ψ 为结构质量刚度参数(m/s);对于单檐和两重檐殿堂,有围护墙取52,无围护墙取33,楼阁和两重檐以上殿堂,取60。

公式(3)已考虑了有、无围护墙,以及上下层高度比、面积比等因素,但尚不能反映屋顶质量、围护墙布置及尺寸等因素对结构周期的影响。此外,由于采用了剪切悬臂杆模型,其剪切刚度仅与剪切模量和横截面面积有关,所得的结构周期在建筑的纵、横2个主轴相同^[9],不适用于纵、横向刚度差别较大的古建筑的抗震分析。

2 基于构造特征和等效质量的分析方法

建筑结构基本周期的近似计算方法有能量法、等效质量法和顶点位移法等,这些方法已广泛用于钢结构、钢筋混凝土结构的抗震分析中^[9-11]。本文依据结构动力学原理,针对木构架古建筑的构造特征,提出基于等效质量法的分析模型和计算公式。

2.1 等效质量分析模型

木构架古建筑中的殿堂、厅堂等多为单层建筑,民居、楼阁多为两层建筑,建立结构分析模型时,需考虑其构造特征及质量、刚度的影响。在构造做法上,砖围护墙通常自基础连续砌筑至屋檐并与木构架拉结,瓦屋顶与木屋盖整体结合置于木构架的顶部,两层楼阁的木构架中部设有木楼盖,单层两重檐殿堂的底层檐柱顶设有屋檐。根据上述特征,参照GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》^[7]并借鉴有围护墙及吊车荷载单层厂房的建模方法^[9-10],采用顶部及中部有集中质点的连续质量悬臂杆模型,以考虑屋顶、楼盖、底层檐的质量和位置,以及围护墙、木构架沿建筑高度的质量和刚度分布规律,如图1、图2所示。

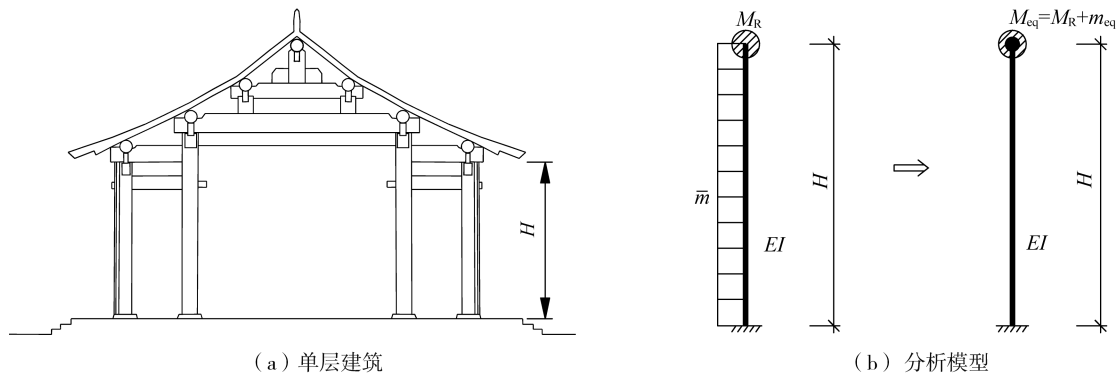


图1 单层建筑分析模型
Fig. 1 Analysis model of single-story building

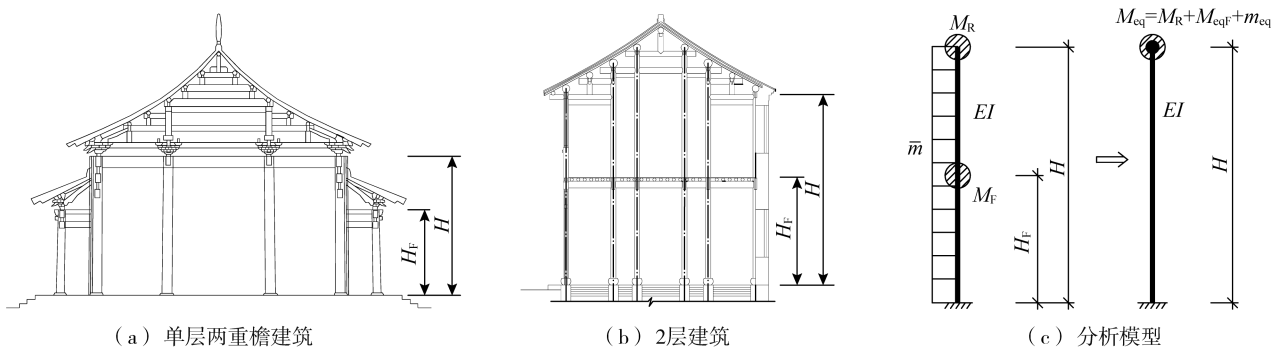


图2 2层或单层两重檐建筑分析模型

Fig. 2 Analysis model of two-story or single-story double eaves buildings

图1分析模型中, H 为台基顶至檐柱顶的高度, EI 为围护墙与木构架的弯曲刚度, \bar{m} 为围护墙与木构架沿高度方向的单位长度质量, M_R 为屋顶的质量;总等效质量 M_{eq} 为屋顶的质量 M_R 与连续分布质量的等效质量 m_{eq} 之和。

图 2 分析模型中, H 为台基顶至顶层檐柱顶的高度, M_F 为楼盖或底层檐的质量, H_F 为楼面或底层檐柱顶的高度, EI 、 \bar{m} 、 M_R 的涵义与图 1 分析模型相同; 总等效质量 M_{eq} 为屋顶的质量 M_R 、楼盖或底层檐的等效质量 M_{eqF} 以及连续分布质量的等效质量 m_{eq} 之和。

2.2 等效质量的求解

对于图 3(a) 所示的多自由度体系, 在求解基本频率时, 为了简化计算, 可根据频率相等的原则, 将全部质量集中到体系的顶点, 用一个等效单质点体系代替原来的体系, 此集中所得的质量即为等效质量。按照这一思路, 可将楼盖或底层檐集中质量、围护墙与木构架连续分布质量等效为相应的顶点集中质量, 分别如图 3(b)、(c) 所示。

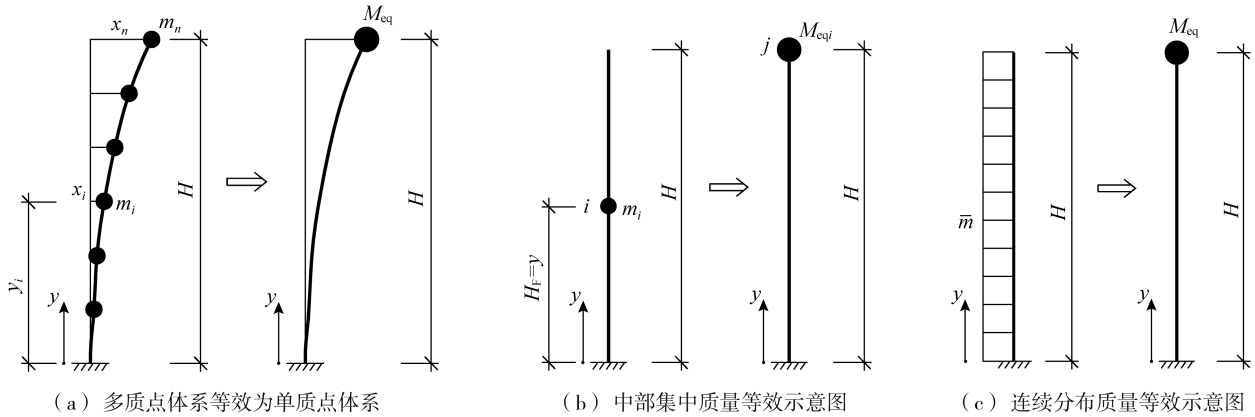


图 3 等效质量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of equivalent mass

1) 中部集中质量的等效

在图 3(b) 中, 位于悬臂杆中部高度 y 的集中质量 m_i 代表楼盖或底层檐质量, 位于悬臂杆顶部高度 H 的集中质量 m_{eqi} 代表等效后的楼盖或底层檐质量。由于这 2 个单自由度体系的频率相等, 则有

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{ii}}{m_i}} = \sqrt{\frac{k_{jj}}{m_{eqi}}} \tag{4}$$

由式(4)可得等效质量为

$$m_{eqi} = \frac{k_{jj}}{k_{ii}} m_i \tag{5}$$

式中, k_{ii} 、 k_{jj} 分别为 2 个等截面悬臂杆的刚度系数, $k_{ii} = 3EI/y^3$, $k_{jj} = 3EI/H^3$, EI 为悬臂杆的弯曲刚度。将刚度系数代入式(5), 得

$$m_{eqi} = \frac{y^3}{H^3} m_i = \left(\frac{y}{H}\right)^3 m_i \tag{6}$$

对于图 2 中的楼盖或底层檐集中质量 M_F , 相应的等效集中质量 M_{eqF} 为

$$M_{eqF} = \left(\frac{y}{H}\right)^3 M_F = \alpha^3 M_F \tag{7}$$

式中, α 为楼面或底层檐柱顶高度与结构计算高度的比值, $\alpha = y/H$ 。

2) 连续分布质量的等效

先考察图 3(a) 中的多质点体系, 设体系有 n 个集中质量, 可按照式(5)的形式将每个质量转换到顶点, 则顶点的总等效质量 m_{eq} 为各等效质量之和, 即

$$m_{eq} = k_{jj} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{k_{ii}} = \frac{3EI}{H^3} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{3EI/y_i^3} = \frac{1}{H^3} \sum_{i=1}^n y_i^3 m_i \tag{8}$$

对于图 3(c) 的连续分布质量体系, 设均布质量 $m_i = \bar{m}dy$, 相当于式(8)的顶点总等效质量为

$$m_{eq} = \frac{1}{H^3} \int_0^H y^3 \bar{m} dy = \frac{H^4}{4H^3} \bar{m} = 0.25 \bar{m}H \tag{9}$$

式(9)中的 m_{eq} 即为围护墙与木构架连续分布质量的等效质量。

3) 分析模型的总等效质量

对于图 1 所示的单层古建筑分析模型,作用于顶部的总等效质量 M_{eq} 为

$$M_{eq} = M_R + m_{eq} = M_R + 0.25 \bar{m}H \quad (10)$$

对于图 2 所示的 2 层或单层两重檐古建筑分析模型,作用于顶部的总等效质量 M_{eq} 为

$$M_{eq} = M_R + m_{eq} + M_{eqF} = M_R + 0.25 \bar{m}H + \alpha^3 M_F \quad (11)$$

2.3 分析模型的基本周期

对于图 1、图 2 中的等效单质点体系,其侧移刚度 $K = 3EI/H^3$,相应的基本周期为

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{eq}}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{eq}H^3}{3EI}} = 3.628 \sqrt{\frac{M_{eq}H^3}{EI}} \quad (12)$$

将式(10)代入式(12),得单层古建筑的基本周期为

$$T_1 = 3.628 \sqrt{\frac{(M_R + 0.25 \bar{m}H)H^3}{EI}} \quad (13)$$

式中: H 为结构计算高度(m),单层古建筑取台基顶至檐柱顶的高度,2层或单层两重檐古建筑取台基顶至顶层檐柱顶的高度; M_R 为屋顶的质量($\text{kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$); \bar{m} 为围护墙与木构架沿高度方向的单位长度质量($\text{kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$)。

将式(11)代入式(12),得 2 层或单层两重檐古建筑的基本周期为

$$T_1 = 3.628 \sqrt{\frac{(M_R + 0.25 \bar{m}H + \alpha^3 M_F)H^3}{EI}} \quad (14)$$

式中: a 为楼面或底层檐柱顶高度 y 与结构计算高度 H 的比值; M_F 为楼盖或底层檐的质量($\text{kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$); EI 为结构的弯曲刚度($\text{kN} \cdot \text{m}^2$),是围护墙弯曲刚度与木构架弯曲刚度之和。

需要说明的是,式(13)、式(14)是依据弯曲悬臂杆模型推导而得,没有考虑剪切变形。理论分析表明,如果计入剪切变形,自振周期将随结构刚度和振型阶次的增大而增大,但对基本周期的影响较小,增大值在 15% 之内^[11]。因此,可将式(13)、式(14)计算的周期值乘以一个增大系数,以考虑剪切变形的影响,对于单层古建筑,建议取 1.15,对于两层古建筑,建议取 1.10。

2.4 质量与刚度的计算要点

1) 质量的计算要点

结构的质量可通过测量、计算古建筑各组成部分的尺寸及材料的自重获得,材料的自重可参照现行《建筑结构荷载规范》取值,各组成部分的构造还可参照古建筑建造时期的工程定额如宋《营造法式》、清《工程做法》以及近代的《营造法原》确定。

由于木构架古建筑在抗震鉴定时,要求进行详细的工程勘查,各组成部分的尺寸和材料数据均可确定,因此,质量的计算并不复杂,且计算结果是基本准确的。

2) 弯曲刚度的计算要点

结构的弯曲刚度 EI 由木构架的弯曲刚度 EI_T 和围护墙的弯曲刚度 EI_W 组成,应根据古建筑的结构布置沿横向、纵向分别计算弯曲刚度 EI 。

木构架的构件采用榫卯结合,节点刚度较弱,计算木构架 EI_T 时,可忽略结构的空整体性,取构架中全部木柱截面的弯曲刚度之和。

计算砖砌围护墙 EI_W 时,根据墙体沿悬臂杆高度连续分布质量的假设,仅计入自基础连续砌筑至屋檐的墙体,开门窗洞的墙体仅计入无洞口的部位;此外,考虑木柱对围护墙的分隔,可取木柱之间的墙体分别计算弯曲刚度,然后求和。

3 工程实例对比研究

结合北京雍和宫雍和门^[3]、扬州准提寺藏经楼^[4]和宜宾双河文庙主殿^[5,12]的动力特性研究,依据现场实测基本周期值,检验本文所提供的分析模型与方法的可行性,并与现行规范公式的计算结果进行对比。

3.1 建筑概况与基本数据

1) 雍和宫雍和门

雍和门为单层单檐歇山顶建筑,琉璃筒瓦屋顶,五开间通面阔 24.57 m,进深三间 11.3 m,檐柱顶高度 4.83 m;抬梁式木构架六楹,木材为硬木松;东、西各一道山墙,C 轴两稍间各一道纵墙,墙体为砖砌填芯,如图 4 所示。

基本周期计算参数如下:①台基顶至檐柱顶高度 H 为 4.83 m;②屋顶质量 M_R 为 $254(\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m})$;③围护墙与木构架沿高度方向的单位长度质量(为 $67(\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$;④木构架弯曲刚度 EI_T 为 $657\times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$;⑤围护墙弯曲刚度的横向 EI_{WT} 为 $10581\times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$,纵向 EI_{WL} 为 $2954\times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ 。

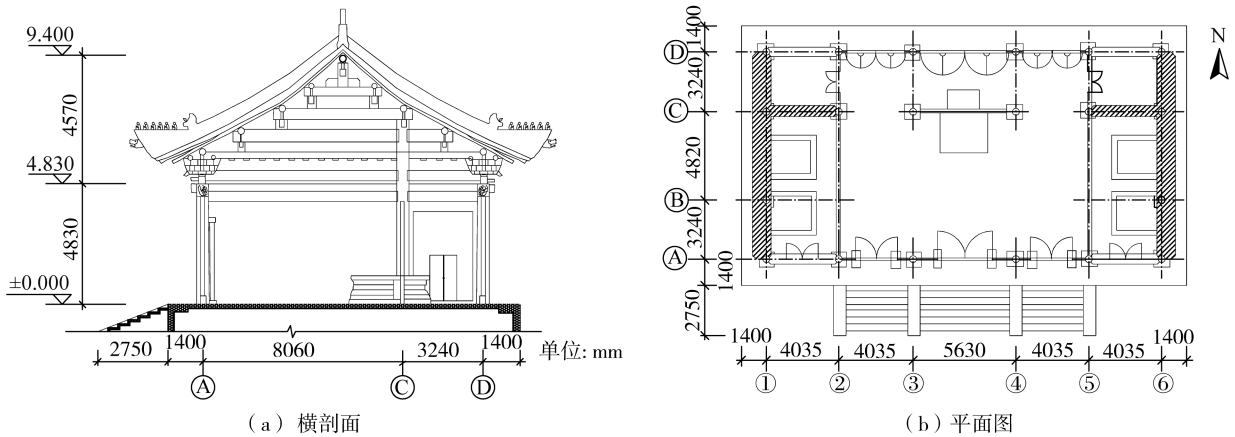


图 4 雍和门结构图^[3]

Fig. 4 Structural diagram of the Yong-he Gate^[3]

2) 准提寺藏经楼

藏经楼为两层木构架建筑,青瓦屋顶;楼面高度 4.85 m,二层檐顶高度 8.60 m,面阔五间 20.20 m,进深 13.75 m,硬山封檐,东西两侧设山墙,北面为后檐墙,墙体为清水砖墙,木构架用杉木制作,明、次间采用抬梁式木构架,山墙部位为穿斗式木构架,如图 5 所示。

基本周期计算参数如下:①台基顶至二层檐柱顶高度 H 为 8.60 m;②楼面高度 y 为 4.85 m,楼面高度与结构高度的比值 a 为 0.56;③屋顶质量: M_R 为 $75.1(\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m})$;④围护墙与木构架沿高度方向的单位长度质量 \bar{m} 为 $34.6(\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2)$;⑤楼盖的质量 M_F 为 $13.7(\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m})$;⑥木构架弯曲刚度 EI_T 为 $198\times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$;⑦围护墙弯曲刚度的横向 EI_{WT} 为 $28068\times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$,纵向 EI_{WL} 为 $5306\times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$ 。

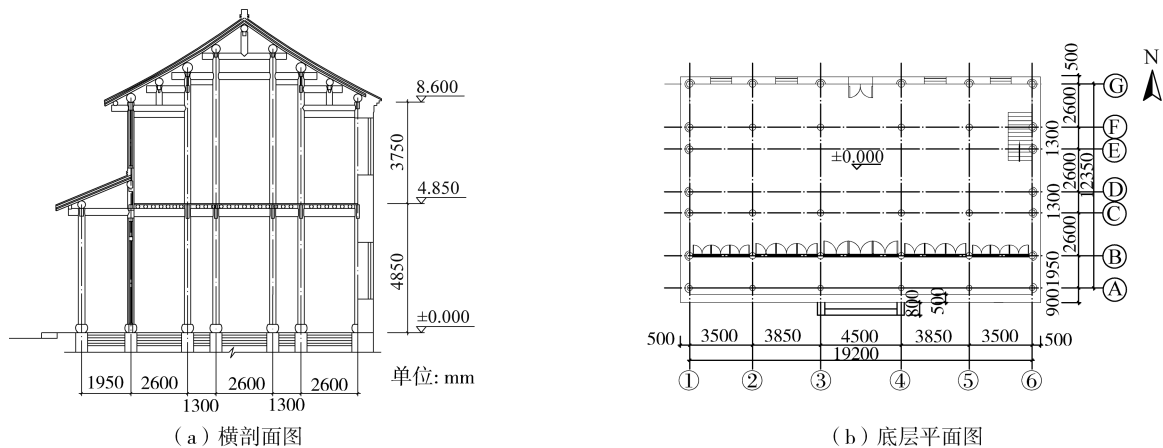


图 5 藏经楼结构图^[4]

Fig. 5 Structural diagram of the Sutra Collection Building^[4]

3) 双河文庙主殿

文庙主殿为单层两重檐木构架建筑,琉璃瓦庑殿顶,底层檐柱顶高度 5.7 m,顶层檐柱顶高度 9.0 m。面阔三间加东西外廊共 18.41 m,进深三间加南北外廊共 12.54 m。纵、横向均采用穿斗式木构架,木材为杉木,

无砖围护墙,仅在内廊柱间设木板围护,如图6所示。

基本周期计算参数如下:①台基顶至顶层檐柱顶高度 H 为9.0 m;②底层檐柱顶高度 y 为5.7 m,底层檐柱顶高度与顶层檐柱顶高度的比值 a 为0.63;③屋顶质量 M_R 为66 kN·s²/m;④底檐质量 M_F 为33 kN·s²/m;⑤木构架沿高度方向的单位长度质量 \bar{m} 为2.5 kN·s²/m²;木构架弯曲刚度 EI_T 为764×10³ kN·m²。

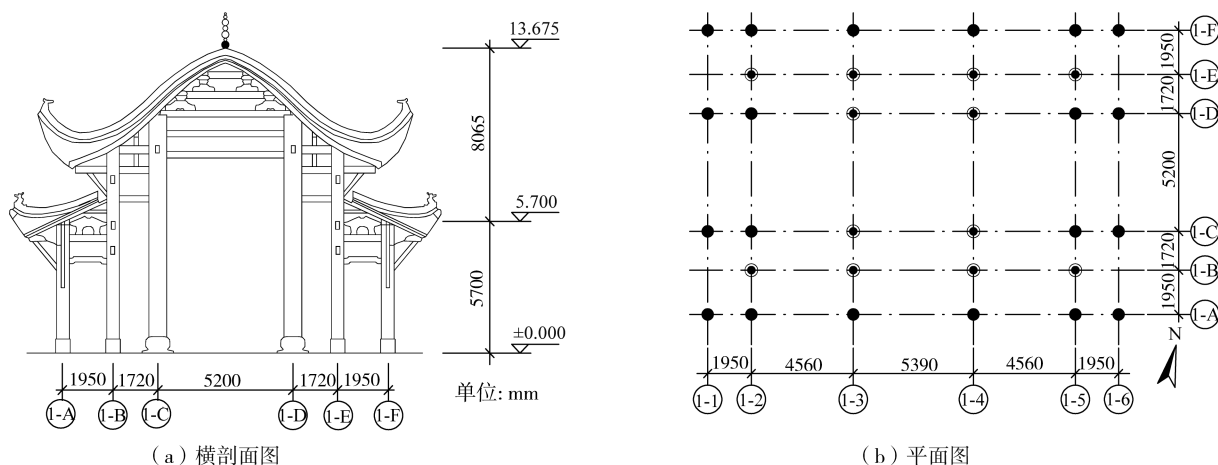


图6 文庙主殿结构图^[12]

Fig. 6 Structural diagram of main palace of the Confucian Temple^[12]

3.2 基本周期对比与评价

按照 GB/T 50165—2020《古建筑木结构维护与加固技术规范》^[6]、GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》^[7]和本文公式分别计算了3座古建筑的基本周期与相应的实测周期,如表1所示。

表1 基本周期的分析值与实测值对比

Table 1 Comparison of analysis values and tested values of the fundamental period

古建筑	分析值 1		分析值 2		分析值 3		实测值	
	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向
雍和门	0.41	0.42	0.37		0.25	0.41	0.33	未提供
准提寺藏经楼	0.76	0.75	0.55		0.21	0.48	0.18	0.36
文庙主殿	不适用		0.92		1.00	1.00	0.67	0.67

注:分析值1、分析值2、分析值3分别按 GB/T 50165—2020《古建筑木结构维护与加固技术规范》^[6]、GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》^[7]、本文公式计算;实测值分别摘自参考文献[3]、[4]、[5]。

对比表1中数值可知,各分析值与实测值均有一定的差距,结合分析模型和建筑特征分析如下:①GB/T 50165—2020《古建筑木结构维护与加固技术规范》^[6]的简化公式在纵、横向基本相同,难以反映墙体在2个方向不同布置的影响,与藏经楼的实测值相差较大;此外,公式适用条件为有山墙的建筑,不可用于无围护墙的文庙主殿的分析;②GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》^[7]采用了悬臂杆剪切模型,其分析值在横向、纵向相同,与藏经楼的实测值相差较大,但与无围护墙的文庙主殿实测值有较好的对应性;③本文采用的悬臂杆弯曲模型,可考虑墙体布置的影响,其分析值与3座古建筑在纵、横方向的实测值均有较好的对应性,但与文庙主殿的实测值在数量上相差较大,可能是木构架弯曲刚度的简化计算低估了纯木结构的抗侧刚度。

4 结论与建议

1) 针对单层、两层木构架古建筑的构造特征,构建了设有集中质量和连续分布质量的悬臂杆分析模型,可较好地反映屋顶、楼盖、重檐的质量与位置,以及围护墙、木构架的质量与刚度对结构自振周期的影响。

2) 依据结构动力学原理,采用等效质量法将分析模型等效为单质点悬臂杆模型,给出了结构基本周期计算公式,为木构架古建筑基本周期的理论分析提供了实用简化方法。

3)以3座不同类型的古建筑为样本,计算了结构的基本周期,并与现场实测值进行了对比。对比分析表明,本文提供的方法可用于围护墙在横向、纵向不同布置的古建筑基本周期的分析。

4)木构架古建筑因构架类型、建造材料、损伤程度的不同,对结构的动力特性影响较大。运用本方法确定基本周期时,需要根据相应的构造特征、材料性能和损伤程度,对计算参数进行合理的调整。

5)本文提供的分析模型和计算方法,尚需通过更多单层、两层木构架古建筑的动力特性实测资料进行校准和修正,以提高其合理性和适用性。

参考文献:

- [1] 俞茂宏,刘晓东,方东平,等. 西安北门箭楼静力与动力特性的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 1991, 25(3): 55-62.
YU Maohong, LIU Xiaodong, FANG Dongping, et al. An experimental study of static and dynamic characteristics on the front tower over the ancient Xi'an City wall[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1991, 25(3): 55-62. (in Chinese)
- [2] 魏剑伟,李铁英,李世温. 独乐寺观音阁动力特性实测分析[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(4): 430-432.
WEI Jianwei, LI Tiejing, LI Shiwen. Dynamic characteristic analysis of Kwanyin Pavilion in Doule Temple[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2002, 33(4): 430-432. (in Chinese)
- [3] 张涛,杜德杰,黎冬青,等. 北京市清代雍和门结构检测鉴定[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(2): 53-59.
ZHANG Tao, DU Dejie, LI Dongqing, et al. Inspection and appraisal of the structure of the Qing Dynasty Yonghemen in Beijing[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2016, 28(2): 53-59. (in Chinese)
- [4] 袁建力. 墙体参与工作的木构架古建筑抗震分析方法[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 45-52.
YUAN Jianli. Seismic analysis method considering wall participation for ancient timber frame buildings[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 45-52. (in Chinese)
- [5] BAI W, MOUSTAFA M A, DAI J W, et al. Damage assessment of Shuanghe Confucian Temple after Changning earthquake mainshock and aftershocks series[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021, 19(14): 5977-6001.
- [6] GB/T 50165—2020 古建筑木结构维护与加固技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
GB/T 50165—2020 Technical standard for maintenance and strengthening of historic timber building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [7] GB/T 50452—2008 古建筑防工业振动技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
GB/T 50452—2008 Technical specifications for protection of historic buildings against man-made vibration[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 潘复兰. 古建筑防工业振动的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2008, 20(增刊1): 104-108.
PAN Fulan. Study on protection of historic building against man-made vibration[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2008, 20(S1): 104-108. (in Chinese)
- [9] 沈聚敏,周锡元,高小旺,等. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
SHEN Jumin, ZHOU Xiyuan, GAO Xiaowang, et al. Seismic engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese)
- [10] 丰定国,王社良. 抗震结构设计[M]. 2版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003.
FENG Dingguo, WANG Sheliang. Seismic structural design[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [11] Anil K. Chopra. 结构动力学: 理论及其在工程中的应用[M]. 4版. 谢礼立, 吕大刚译. 北京: 高等教育出版社, 2016.
CHOPRA A K. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering[M]. 4th ed. XIE Lili, LV Dagang translated. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese)
- [12] 周彬,宗刚,周球尚. 宜宾双河文庙震损模拟及抗震分析[J]. 世界地震工程, 2023, 39(1): 69-77.
ZHOU Bin, ZONG Gang, ZHOU Qiushang. Earthquake damage simulation and seismic analysis of Shuanghe Confucious Temple in Yibin[J]. World Earthquake Engineering, 2023, 39(1): 69-77. (in Chinese)