DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.004

传统木结构直榫节点恢复力模型参数识别

姜俊成[1,2], 孙光宇[1,2], 潘　文[1,2], 苏何先[1,2]

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省工程抗震研究所, 云南 昆明 650500)

摘要: 以云南传统木结构中的直榫节点为研究对象,通过低周往复试验得到荷载-位移关系滞回曲线,分析讨论在试验准备阶段引入的误差,结合直榫节点的荷载-位移关系滞回曲线特点,在荷载时程中确定荷载误差,计算出对应的位移误差,从而实现对滞回曲线的修正。依据直榫节点的嵌压-摩擦理论,分析直榫节点中嵌压耗能、摩擦耗能和弹性势能的产生原因及计算方法,并探讨使用SAWS恢复力模型描述直榫节点滞回特性的合理性。本文的参数识别方法首先根据骨架曲线、卸载曲线和摩擦滑移段进行初步的参数确定,再以形状相似度使用贝叶斯优化算法对剩余的参数进行识别,最终得到直榫节点的恢复力模型。该参数识别方法简单有效,可以为类似传统木结构的设计或评估提供参考。

关键词: 直榫节点; 参数识别; SAWS恢复力模型; 低周反复加载试验

中图分类号: TU366　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1006-7930(2026)04-0502-10

Parameter identification of restoring force model for traditional timber structure straight mortise-tenon joint

JIANG Juncheng[1,2], *SUN Guangyu*[1,2], *PAN Wen*[1,2], *SU Hexian*[1,2]

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics ,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650500, China; 2. Seismic Institute in Yunnan Province,Kunming 650500,China)

Abstract: Taking the straight mortise-tenon joint in Yunnan traditional timber structure as the research object, the load-displacement hysteresis curve is obtained by low-cycle reciprocating test, and the error caused in the preparation stage of the test is analyzed and discussed. Combined with the characteristics of the load-displacement hysteresis curve of the straight mortise-tenon joint, the load error is determined in the load time history, and the corresponding displacement error is calculated, so as to realize the correction of the hysteresis curve. Based on the embedment and friction theory of the straight tenon joint, the causes and calculation methods of embedment energy, friction energy and elastic potential energy in the straight tenon joint are analyzed, and the rationality of using SAWS restoring force model to describe the straight tenon joint is discussed. For the proposed parameter identification method, primary parameters are firstly determined according to skeleton curves, unloading curves and frictional slip segments. Thereafter, the Bayesian optimization algorithm is employed to calibrate residual parameters with the shape similarity as the optimization objective, and the final restoring force model for straight tenon joints is established. The proposed identification method is concise and effective, which can provide references for the design and performance evaluation of similar traditional timber structures.

Key words: straight mortise-tenon joint; parameter identification; SAWS model; low cycle repeated loading test

传统木结构房屋由于其良好的抗震性能、节能固炭、文化传承等优点一直沿用至今,房屋梁柱构件间通过榫卯节点拼接。榫卯节点作为主要荷载传递构件,其力学性能对传统木结构的抗震性能影响明显。在地震作用下,损伤会集中于结构薄弱部位,产生不可逆的损伤,而榫卯节点作为传统木结构的薄弱部位,主要通过节点转动和嵌压-摩擦机制的耗能减小地震响应。其中,榫卯节点的嵌压变形会在地震的往复作用下节点的刚度和承载力会明显降低,影响传统木结构的结构安全。研究榫卯节点的在重复加载下的力学性能并使用合适的恢复力模型来描述对传统木结构的研究具有重要

收稿日期: 2024-04-11　　**修回日期**: 2025-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(52368019)

第一作者: 姜俊成(1999—),男,硕士生,主要从事抗震防灾研究。 E-mail:939166183@qq.com

通信作者: 孙光宇(1991—),男,博士,讲师,主要从事结构和振动控制研究。 E-mail:1051097519@qq.com

意义[1-4]。

低周往复加载试验作为研究传统木结构榫卯节点的基本研究方法，许多学者针对榫卯节点进行了一系列相关试验，并结合荷载-位移理论，对不同榫卯节点的力学性能进行了研究。王双永等[5]在结合理论分析的基础上，对穿斗式木结构直榫边节点足尺模型进行扒钉和角钢加固的试验，揭示穿斗式木结构直榫边节点的破坏模式，对比分析两种加固方式对节点承载性能的影响。潘毅等[6]在已有大量试验研究的基础上，结合数值模拟，考虑尺寸及材性的影响，建立燕尾榫节点的转角-位移力学模型及计算式。杨娜等[7]对西南传统民居穿斗式木结构中的直榫建立几何方程、平衡方程和物理方程，推导了节点的荷载-位移关系，并探讨了摩擦系数、榫头宽度和榫卯间初始间隙对节点转动刚度和抗弯承载力的影响。余石斌等[8]提出一种适用于传统木结构榫卯节点增强的黏弹性阻尼器，推导了直榫节点的加固前后的骨架曲线，并进行低周往复加载试验验证。

滞回模型可以描述榫卯节点的荷载-位移滞回耗能特性，是建立数值模型的关键。以模拟数据和试验数据之间的误差为目标函数，使用优化算法对目标函数进行优化，可以实现对模型参数进行识别。章红梅等[9]提出一种非线性自适应遗传算法，并通过4片不同配筋和加载条件的RC剪力墙的低周往复加载试验对Bouc-Wen模型参数识别的效果进行了验证。代旷宇等[10]以峰值指向型改进Ibarra-Medina-Krawinkler（I-M-K）材料模型作为恢复力模型，采用OpenSEES有限元平台对所选择的RC圆柱试验数据进行数值模拟，识别得到了每一RC圆柱的恢复力模型参数。樊晓伟等[11]提出由两组 Bouc-Wen 模型及一组线弹性模型共同构成的支撑非线性原理模型，基于PS-SCED支撑拟静力试验结果，利用遗传算法对PS-SCED 支撑原理模型的 7 个控制参数进行参数识别，并对不同模型的分析结果进行对比研究。

常用的优化算法包括高斯牛顿法[12]、遗传算法[13]、进化算法[14-15]、差分进化算法[16-17]、粒子群算法[18-19]、多目标优化算法[20]及马尔可夫链蒙特卡罗算法[21]等。

榫卯节点力学模型是以节点受力机理分析为基础，考虑构造尺寸、损伤和构造措施等影响因素，建立的荷载-位移关系[22-24]。榫卯节点力学模型的建立方法主要有两种，第一种方法根据理论推导，根据节点的几何、物理的平衡条件，推导节点力学的模型和理论方程来描述节点的荷载-位移曲线；第二种方法是在试验研究的基础上，根据实测的荷载-位移曲线，通过数值模拟的方法建立数值模型。

然而，根据理论推导得到的榫卯节点模型主要考虑榫卯节点的几何和塑性变形特性，而木材间的摩擦，由于测量和计算上的困难，大多没有涉及。导致此类模型难以考虑榫卯节点在重复加载时的变化。现阶段使用数值模型的研究中，主要使用有限元软件建立节点的模型，考虑榫头及卯口的塑性变形和接触摩擦来实现，需要复杂的建模过程并需要耗费大量时间进行求解。

为合理描述榫卯节点的荷载-位移关系模型，同时尽可能简化其计算，采用OpenSEES中的零长度单元和单轴材料，将榫卯节点简化为一个单自由度转动模型，荷载-位移模型使用SAWS恢复力模型。采用实测的直榫节点滞回曲线数据，考虑试验加载时的误差，计算并修正实测数据，使之与实际相符，并使用贝叶斯优化算法对修正后的数据进行参数识别，得到直榫节点的荷载-位移数值模型，可为传统木结构的评估和加固提供参考。

1　直榫节点试验

1.1　木材力学性能

本文使用的直榫节点试件均使用云南松木制作，经试验测量该批次木材的平均密度为0.493 g/cm^3，含水量为17.2%。此外，参照相关标准[25-27]对木材顺纹抗压强度、横纹全表面抗压强度、横纹局部面抗压强度、抗弯强度、顺纹抗压强度模量、横纹径向抗压强度模量和横纹弦向抗压强度模量分别进行检测，材性试验结果见表1所示。

表1　材性试验结果

Tab. 1　Material property test results

强度类型	强度值/MPa
顺纹抗压强度	26.28
横纹径向全表面抗压强度	3.72
横纹弦向全表面抗压强度	4.64
横纹径向局部面抗压强度	7.05
横纹弦向局部面抗压强度	7.93
抗弯强度	61.47
顺纹抗压强度模量	10 732.37
横纹径向抗压强度模量	375.81
横纹弦向抗压强度模量	196.44

1.2　试验概况

选用云南松木，参考宋代《营造法式》与云南通海地区传统木结构榫卯节点现场调研资料，制作的

2个相同节点ZS-1和ZS-2。节点尺寸及细部构造如图1所示。

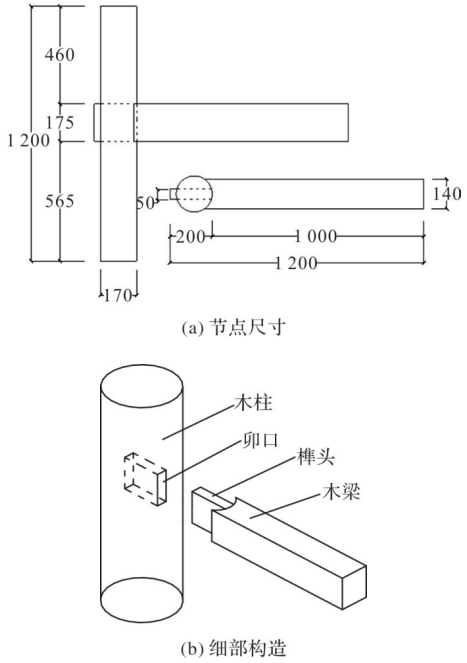


图1 直榫节点示意图(mm)

Fig. 1 Diagram of straight mortise-tenon joints(mm)

试验加载装置及测点布置如图2所示。根据《木结构设计标准》对两层多跨穿斗式民居进行竖向荷载计算,柱顶荷载约为50 kN[28]。利用液压千斤顶在柱顶施加50 kN的轴向荷载,采用电液伺服作动器在悬挑梁端部0.5 m处施加低周往复荷载。参照《古建筑木结构维护与加固技术标准》(GB/T 50165—2020)中规定罕遇地震下结构层间位移角不得超过1/30,对应楼层最大节点转角为0.033 rad[8],本次试验中最大加载位移取60 mm,对应转角为0.119 rad,远超规范限值。

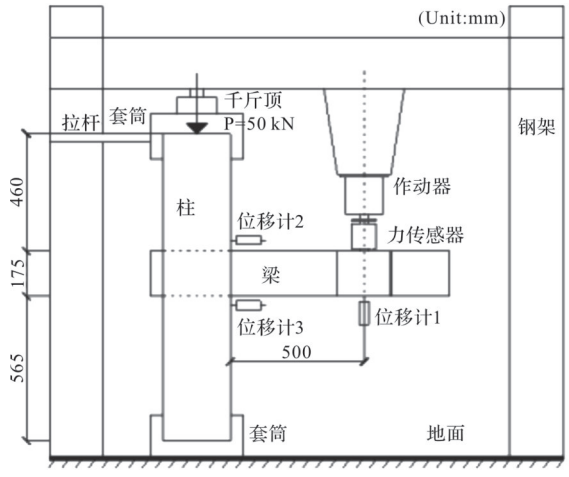


图2 试验加载装置及测点布置

Fig. 2 Test loading device and measuring point layout

参考《建筑抗震试验规程》,低周往复试验采用位移控制加载,每级加载位移幅值以5 mm或10 mm递增,直到60 mm时结束,每级往复循环3周,2个直榫节点的加载制度分别如图3所示。

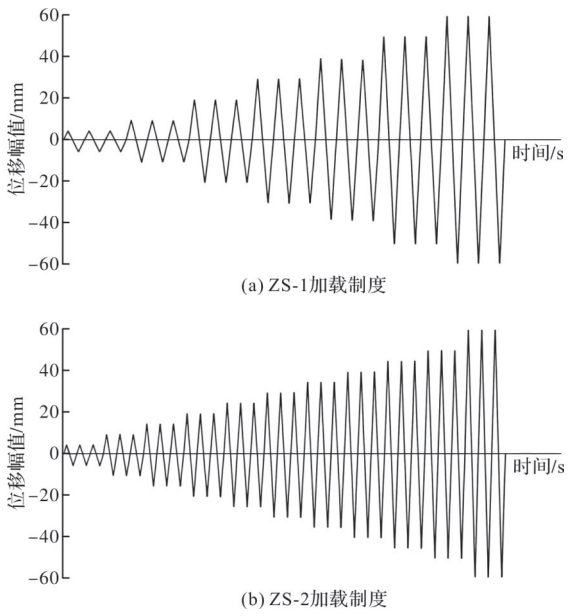


图3 试验加载制度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test loading system

1.3 试验中存在的误差

在固定试验装置时,梁将会在加载装置预压或试件自重的作用下产生一个初始荷载,由于榫卯节点在转动中心处的刚度较小,同时导致直榫节点产生一个初始位移。在拟静力试验开始之前,位移计和荷载传感器都会被清零,此时根据归零后的位移计进行位移加载就会导致偏移,使位移加载的开始点不是榫卯节点的转动中心。加上荷载传感器被清零的荷载,导致滞回曲线出现偏移。如图4所示,其中ZS-1节点的位移误差不明显,ZS-2节点有一个比较明显的位移误差,这可能是是因为ZS-2节点在存在初始的嵌压损伤,在初始荷载下有较大的位移。

如图5为ZS-1和ZS-2节点的第1、2级位移加载的滞回曲线,从中可以明显看出由于位移加载出现的偏移导致滞回曲线正负加载方向滞回曲线不对称。其中,ZS-2的第1级(正负5 mm位移加载)滞回曲线几乎不存在负向位移加载,而正向存在大约10 mm的位移加载。类似的,第2级滞回曲线(正负10 mm位移加载)负向大约为5 mm位移加载,正向大约为15 mm位移加载。

直榫节点的受力机制简单明确,嵌压变形主要发生在榫头与卯口上下连接部位。在低周往复加载过程中,直榫节点的荷载-位移滞回曲线较饱满,正反方向对称,呈倒"Z"形[16]。由于直榫节点的几何和物理特性关于转动中心对称,其荷载-位移滞回

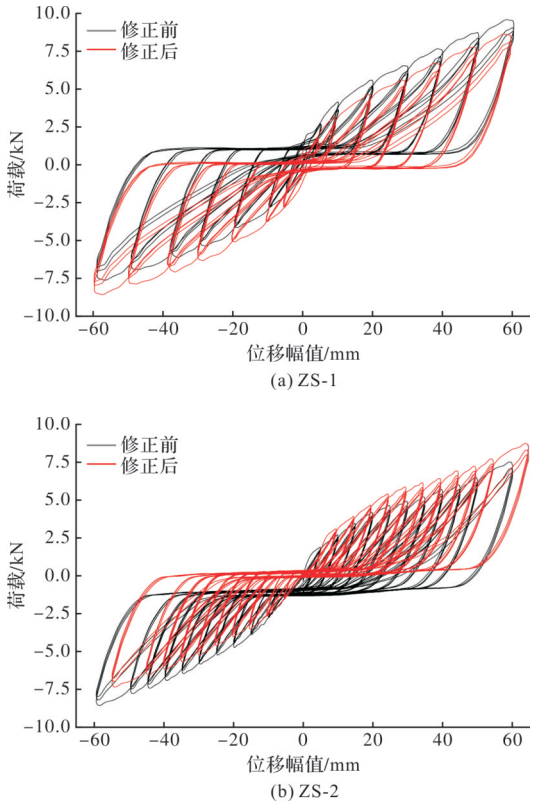


图 4　直榫节点修正前后的滞回曲线

Fig. 4　Hysteretic curves of straight mortise-tenon joint before and after modification

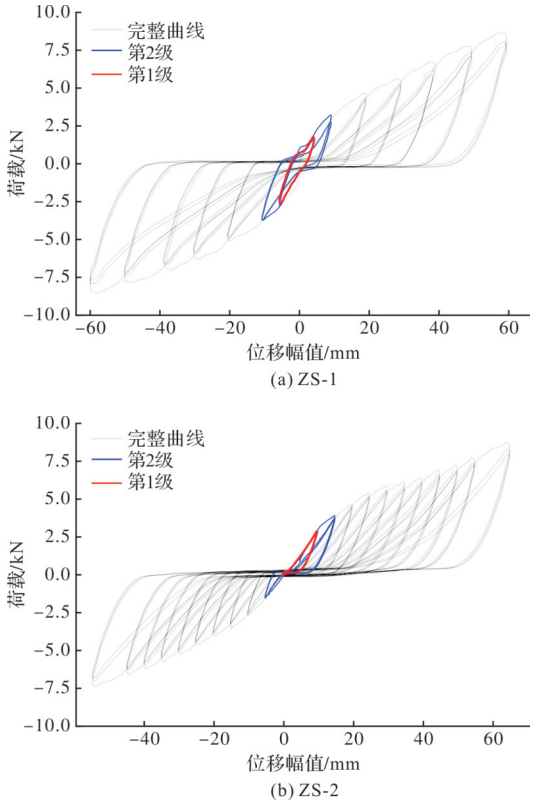


图 5　直榫节点第 1、2 级的滞回曲线

Fig. 5　hysteresis curve of first and second displacement loading

曲线也应呈现正反方向对称的特点，通过对比 ZS-1 和 ZS-2 节点修正前的滞回曲线可以发现，ZS-1 的偏移量较小，根据计算为 0.80 mm，滞回曲线基本对称；ZS-2 节点由于偏移量角较大，根据计算有 4.23 mm，而第 1 级加载位移为 5 mm，两者已经非常接近，这也反映在滞回曲线左侧的滞回环不明显。

对于有明显偏移的滞回曲线，有必要对其滞回曲线进行修正。对于规范规定的层间位移角限值为 1/30，对应楼层最大节点转角为 0.033 rad，对应位移幅值约为 17 mm，如果未经修正，4.23 mm 的误差将明显影响榫卯节点在规范限值内的滞回曲线，进而影响骨架曲线、刚度退化曲线以及等效阻尼比结果的准确性。在进行节点参数识别时，由于位移加载时程和荷载响应时程的不对应也会明显影响参数识别的效果。

根据榫卯节点的力学特点，转动刚度和位移加载幅值都比较小，虽然固定装置时引入的误差很小，仅有几毫米大小，从节点尺度来说如此小的误差很难通过肉眼分辨，难以在试验时及时发现并处理，导致位移加载时程不对称，对试验数据造成比较明显的影响。在试验数据的处理阶段对此种误差进行修正，是合理且必要的。

2　试验数据分析

2.1　直榫节点的嵌压－摩擦机制

以 ZS-1 试件为例，分析直榫节点的嵌压-摩擦机制。试件的骨架曲线如图 6 所示；刚度退化曲线采用割线刚度，将滞回曲线分为正负两个半环分别计算，如图 7 所示；计算节点耗能时也分为正负两个半环分别计算，同时由于在拟静力试验中，加载速率较小，忽略节点中的动能和粘滞阻尼耗能，节点的能量方程可以表示为：

$$E_I = E_R + E_H \tag{1}$$

$$E_H = E_E + E_F \tag{2}$$

其中，E_I 为输入到节点中的总能量，E_R 为节点的弹性势能，E_H 为节点滞回耗能，包括嵌压耗能 E_E 和摩擦耗能 E_F。

总输入能 E_I 通过和弹性势能 E_R 根据滞回环和坐标轴围成的面积进行计算，滞回耗能 E_H 为滞回环所包围的面积。如图 8 所示，以某一级位移的滞回环为例，计算嵌压-摩擦耗能。在正向或负向加载至峰值点时，弹性势能达到峰值，在正向或负向卸载后，弹性势能释放，最终耗能量仅包含嵌压耗能 E_E 和摩擦耗能 E_F。

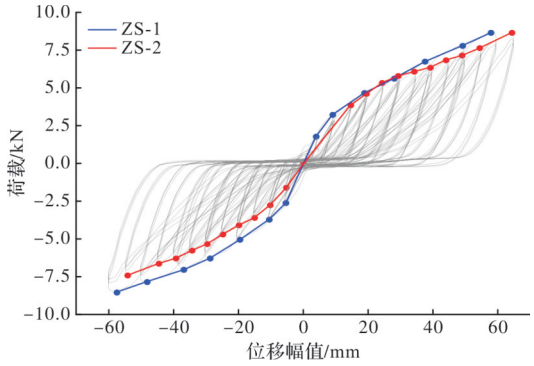


图 6 骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves

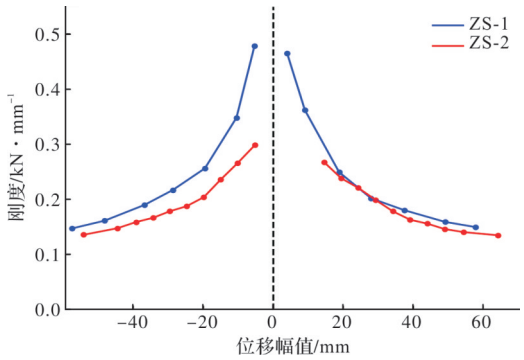


图 7 刚度退化曲线

Fig. 7 Stiffness degradation curves

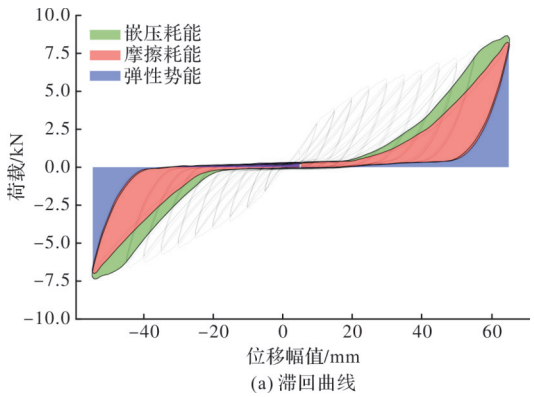


图 8 耗能计算方法

Fig. 8 Calculation method of energy dissipation

首先对第一圈的滞回曲线面积进行计算,得到的耗能为嵌压耗能 E_E 和摩擦耗能 E_F 的总和。由于嵌压耗能仅发生在第一圈滞回曲线中,计算第二圈或第三圈的滞回曲线面积得到的耗能为摩擦耗能 E_F。计算上述两组耗能的差值即为嵌压耗能 E_E,对应于图 8 中的绿色阴影部分。

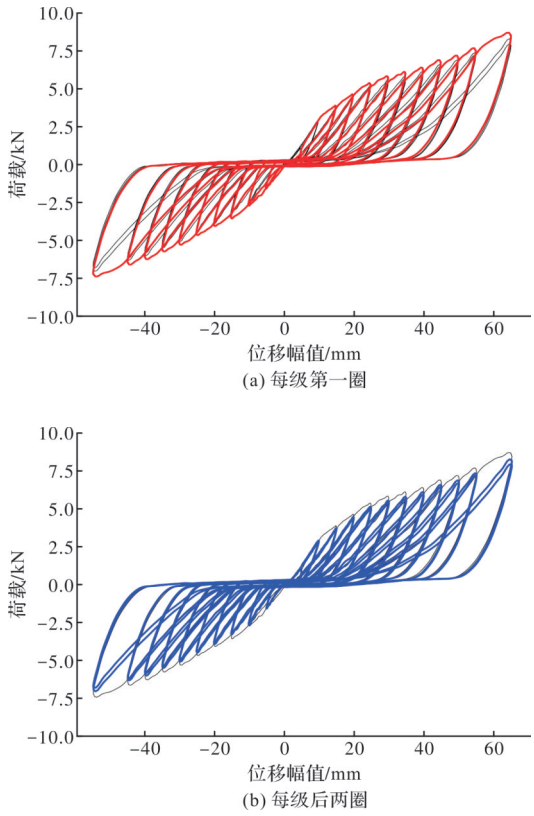


图 9 滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curve

每级加载由 3 段相同大小的位移加载过程组成。观察图 8、图 9 可以发现:

(1) 节点试件的滞回曲线形状呈对称的倒“Z”型,同一加载位移下的第一圈滞回曲线明显大于后两圈,其开始时沿着前一加载位移的最后一圈滞回曲线,达到前一级加载位移后沿着骨架曲线屈服,直至目标位移,说明由榫头和卯口嵌压接触面的应力达到木材的屈服强度,嵌压变形主要发生于每级第一圈中。

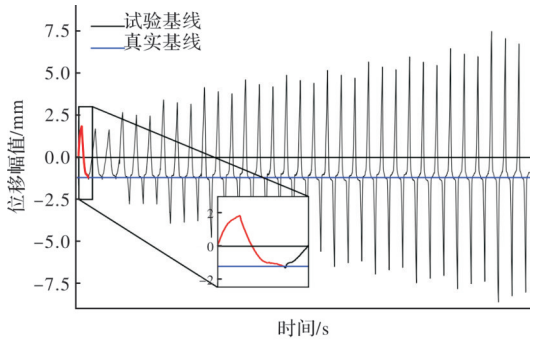
(2) 后两圈滞回曲线基本相同,强度稍有退化,说明耗能主要由摩擦耗能提高。每圈滞回曲线中间为一条窄带,基本没有转动刚度,窄带的耗能仅由榫头和卯口转动时侧面的摩擦力提供,随着转角位移增大,榫头和卯口嵌压接触面压力增大,摩擦耗能也随之增大,节点吸收的能量迅速增加。卸载时荷载迅速下降,节点的弹性势能释放。由此判断,直榫节点的吸收的能量主要由榫头和卯口嵌压

接触面的摩擦力产生，弹性势能在节点吸收的能量中只占比很小，并在卸载时很快释放。

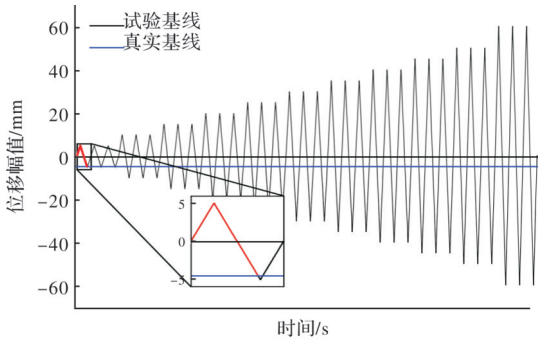
（3）在经历一个较大的加载位移后，直榫节点在重复加载到某个较小的位移时的割线刚度和耗能能力都由明显下降。

2.2　滞回曲线修正方法

以ZS-2节点为例，简述误差修正的原理。由于在重复加载的过程中，榫卯节点的刚度退化，在节点转角较小时仅剩下榫头和卯口转动时侧面的摩擦力，表现为一条窄带，在荷载时程中也能明显分辨出其存在。由于这部分摩擦力很小，可以考虑滞回曲线的实际荷载为零，而试验得到的荷载时程在窄带处的荷载取值就是固定试验装置时的误差，如图10(a)所示，荷载误差为－1.18 kN。根据窄带确定荷载误差的大小，作为荷载修正量，就可以找到对应位移大小，作为位移修正量，如图10(b)所示，位移修正量为－4.23 mm，对应需要删除的加载段为红色段。



(a) 荷载修正



(b) 位移修正

图10　误差修正原理

Fig. 10　schematic of correction method

3　恢复力模型参数识别方法

3.1　SAWS恢复力模型

SAWS恢复力模型是内置于CASHEW木剪力墙分析程序中，用于计算木框架剪力墙在任意拟静力往复加载时荷载-位移关系和滞回耗能的数值模型，该模型在复杂性和可计算性之间达成平衡，并经过全尺寸的木剪力墙试验验证[29]。由于直榫节点的转角-位移曲线与木剪力墙在往复荷载作用下有捏缩效应、强度和刚度退化的非线性特性，SAWS恢复力模型也可以用于描述直榫节点的荷载-位移关系。

SAWS模型包含屈服强度F_0、初始刚度K_0、捏缩强度F_1、极限位移δ_u、四个滞回曲线参数r_1、r_2、r_3、r_4以及刚度退化参数α和β共10个参数，具体参数的作用参考图11所示。

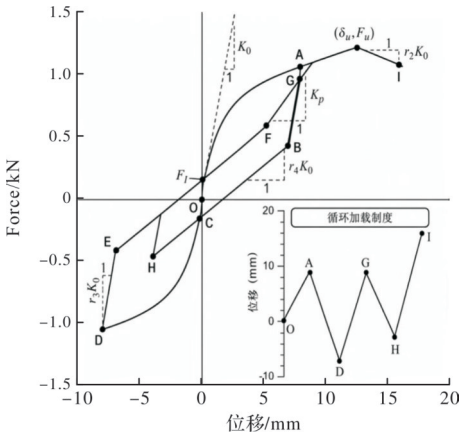


图11　SAWS模型荷载-位移曲线

Fig. 11　Load-displacement curve of SAWS model

3.2　初步参数确定

恢复力模型中的F_0、K_0、r_1、r_2、δ_u参数可以通过试验得到的骨架曲线确定。本文使用的试验数据对应转角位移为0.12 rad，远超规范限值。但在此位移下，榫卯节点骨架曲线没有出现破坏的迹象，故用于描述骨架曲线下降段的r_2、δ_u参数对本文中的榫卯节点并无意义，只需要考虑F_0、K_0和r_1参数即可。恢复力模型卸载段由参数r_3控制，物理意义为卸载段的刚度。参数确定结果如图12(a)所示。

恢复力模型摩擦滑移段由参数r_4和F_1控制，物理意义为摩擦滑移区的摩擦刚度和摩擦力。参数确定过程如图12(b)所示。

恢复力模型重复加载段可以根据公式(3)确定，

$$K_p = K_0\left[\frac{\delta_0}{\delta_{\max}}\right]^{\alpha} \tag{3}$$

式中：$\delta_0 = \dfrac{F_0}{K_0}$和$\alpha$是决定刚度退化的程度的模型参数。而$\delta_{\max} = \beta\delta_{un}$为上一次卸载位移$\delta_{un}$和另一个模型参数$\beta$计算得到。模型参数$\alpha$和$\beta$需要通过拟合试验数据获得，其取值不同将影响恢复力模型滞

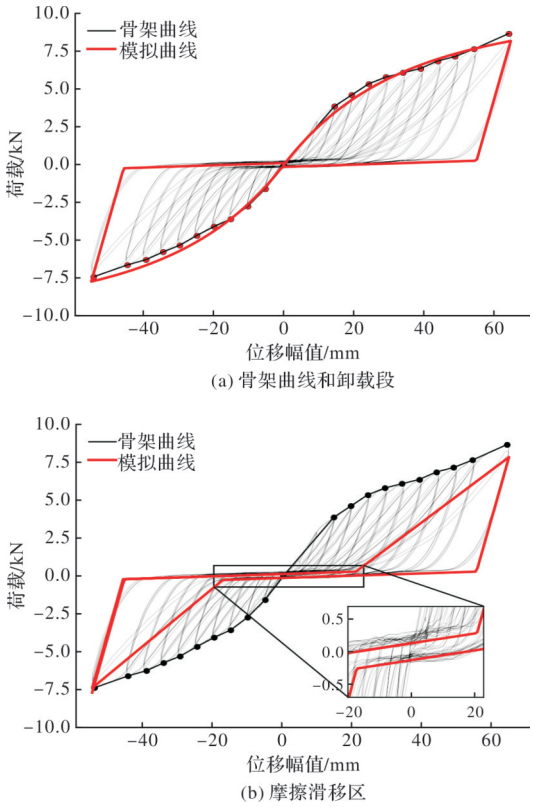


图 12 SAWS模型初步参数确定

Fig. 12 Preliminary parameter determination of SAWS model

回曲线形状,参数识别过程借助贝叶斯优化优化算法。

3.3 剩余参数确定

为选取合适的模型参数α和β,通过贝叶斯优化算法对最优参数进行参数识别。贝叶斯优化算法是一种全局优化算法,使用高斯过程作为先验模型来建模未知的目标函数,通过对目标函数的一系列评估和迭代,可以根据当前模型的置信度,选择下一个最有希望改善性能的输入点进行预测。

剩余参数α和β取值范围分别取0.5~1和1~1.2。引入考虑非线性恢复力模型的误差函数来计算模型滞回曲线和试验曲线间形状相似度,表达式为

$$F(i)=\frac{1}{\max\left[\left|F_e^{(i)}\right|\right]}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}\left[F_e^{(i)}-F_m^{(i)}\right]^2} \tag{4}$$

式中:$F_m^{(i)}$和$F_e^{(i)}$分别为直榫节点SAWS模型滞回曲线和试验曲线中第i个非线性恢复力值;n为直榫节点SAWS模型滞回曲线和试验曲线中非线性恢复力值的总个数;$\max\left[\left|F_e^{(i)}\right|\right]$为直榫节点试验滞回曲线中非线性恢复力绝对值的最大值。

此外,本文还采用Pearson相关系数ρ来反映直榫节点SAWS模型滞回曲线和试验曲线中非线性恢复力值的相关性。一般地,当$\rho>0.8$时我们认为两者之间相关性较强。Pearson相关系数ρ表达式如下:

$$\rho=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(F_e^{(i)}-\overline{F}_e\right)\left(F_m^{(i)}-\overline{F}_m\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(F_e^{(i)}-\overline{F}_e\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(F_m^{(i)}-\overline{F}_m\right)^2}} \tag{5}$$

式中:$\overline{F}_e$和$\overline{F}_m$分别其余参数的含义和(4)中的相同。

使用贝叶斯优化算法对剩余参数的最优取值进行优化求解,使用OpenSees有限元软件对恢复力模型进行求解。以ZS-1为例,算法迭代过程如图13所示。得到的恢复力模型参数如表2所示。

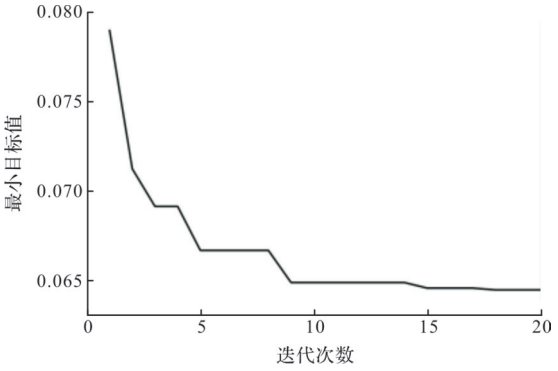


图 13 贝叶斯优化算法迭代过程

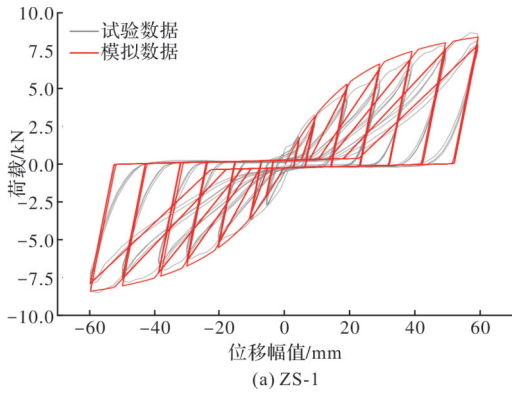
Fig. 13 Iterative process of Bayesian optimization algorithm

表 2 恢复力模型参数

Tab. 2 Parameters of restoring force model

节点	F_0	K_0	r_1	r_3	r_4	F_1	α	β
ZS-1	8	0.43	0.029	2.5	0.012	0.25	0.617	1.05
ZS-2	7.5	0.3	0.05	2.7	0.025	0.13	0.387	1.07

得到的荷载-位移滞回曲线如图14所示。从图中可以看出,两组直榫节点试件模拟和试验的滞回曲线吻合良好。



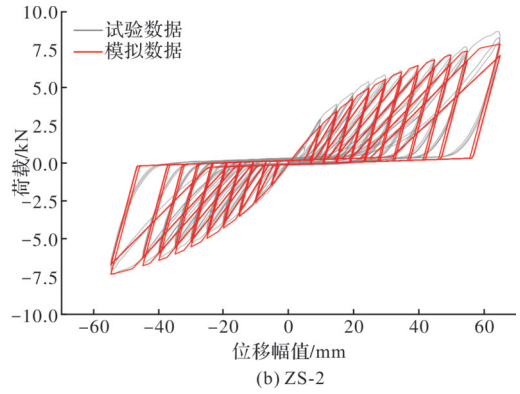


图 14　模拟及试验滞回曲线对比

Fig. 14　Comparison of simulated and experimental hysteretic curves

根据式(3)计算两组试件的 Pearson 相关系数，ZS-1 为 0.978，ZS-2 为 0.991。均在 0.9 以上，表明直榫节点 SAWS 恢复力模型低周往复荷载试验模拟和试验值两组数据间有较强的相关性。

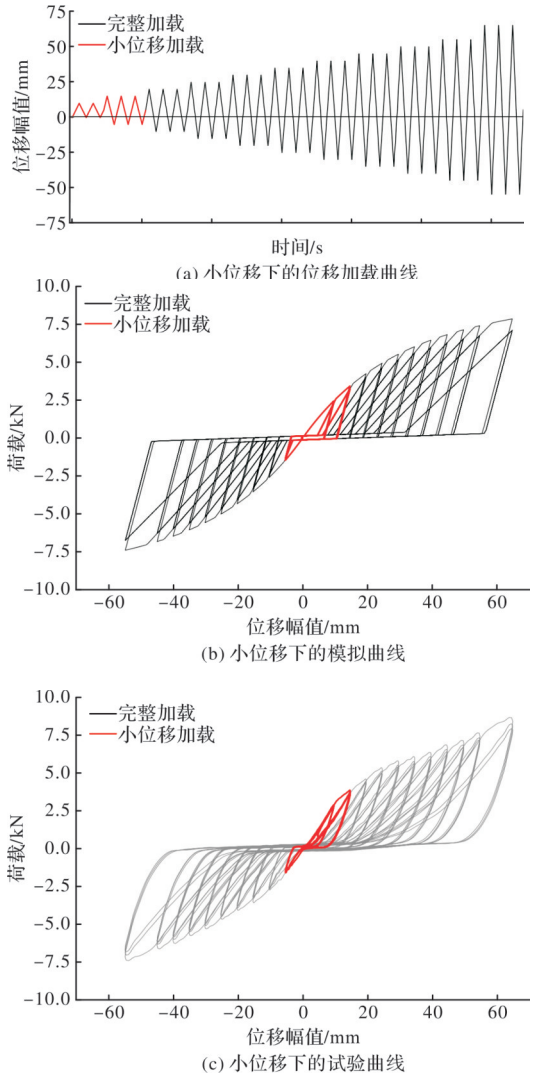


图 15　小位移下误差修正效果

Fig. 15　Error correction effect under small displacement

如图 15 所示，对比 ZS-2 模拟数据和试验数据可以发现，使用修正后的荷载时程和位移时程进行参数识别是可以还原实际加载时，特别是小位移下的情况，使得到的结果更加合理。

4　结论

本文基于两组直榫节点滞回试验数据，使用 SAWS 恢复力模型，利用 OpenSEES 有限元平台，对传统木结构直榫节点进行荷载-位移模型的建模，计算出位移加载的误差，修正实测数据，然后对直榫节点参数进行参数识别，本文结论如下：

(1) 本文提出的方法可以识别出传统木结构直榫节点的荷载-位移模型参数，可以较好模拟试验结果中的刚度、强度退化、滑移段现象，各参数有明确的物理意义，适合用于描述直榫节点的荷载-位移关系。

(2)分析了直榫试件误差产生的原因，计算出位移加载误差，修正滞回曲线的试验数据。修正方法有明确的物理意义，可以反映滞回曲线在较小加载位移下的试验现象。

(3)对直榫节点的试验数据进行参数识别，首先根据骨架曲线、摩擦滑移区宽度、下降段斜率确定出有明确物理意义的参数，使用贝叶斯优化算法使用形状相似度为目标函数对剩余参数进行识别。识别得到的模型的荷载-位移关系和滞回耗能与试验结果较为吻合。

值得指出的是，本文中采用的传统木结构节点为直榫节点，是因为其受力机制简单明确，理滞回曲线对称，有利于验证本文提出的误差修正方法。该方法同样可以用于其他具有不对称特性的传统木结构节点，如燕尾榫、半榫等。但此时的转角-位移单元需要采用考虑滞回曲线不对称的恢复力材料，如 HystereticSM[30]。

参考文献 References

[1] 吴国源，蔡楠，李陆斌. 中国传统木构建筑结构、构造与空间关联分析路径初探[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2023，55(6)：871-881.
WU Guoyuan, CAI Nan, LI Lubin. A preliminary study on the analysis path of traditional Chinese wooden building structure, structure and spatial correlation [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2023, 55(6): 871-881.

[2] 王浩祚，蒋欢军. 带新型可更换墙脚部件剪力墙的抗震性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2023，55(2)：159-165.

WANG Haozuo, JIANG Huanjun. Seismic performance analysis of shear walls with new replaceable foot components [J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2023, 55(2): 159-165.

[3] 潘文,薛建阳,白羽,等. 土木结构民居抗震性能及加固设计方法[M]. 北京:科技出版社,2017.
Pan Wen, Xue jianyang, Bai Yu, et al. Seismic performance and reinforcement design method of civil structure residential building [M]. Beijing: Science Press, 2017.

[4] FILIATRAULT A, STIEDA C K A. Seismic weaknesses of some residential wood framed buildings: confirmations from the 1994 Northridge earthquake[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 403-414.

[5] 王双永,郭婷,邓昊,等. 穿斗式木结构直榫边节点承载性能试验研究[J]. 木材科学与技术,2022,36(1): 57-62.
WANG Shuangyong, GUO Ting, DENG Hao, et al. Study on seismic performance of straight tenon-type joints in Chuan-dou style timber structure [J]. Wood Science and Technology, 2022, 36(1): 57-62.

[6] 潘毅,张启,王晓玥,等. 古建筑木结构燕尾榫节点力学模型研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):151-159.
PAN Yi, ZHANG Qi, WANG Xiaoyue, et al. Ancient timberwork dovetail mortise nodes mechanical model study [J]. Journal of Building Structures, 2021(8): 151-159.

[7] 杨娜,郭婷,崔玥等. 传统民居穿销直榫中节点弯矩-转角关系理论分析[J]. 工程力学,2025,42(5): 60-67.
YANG Na, GUO Ting, CUI Yue, et al. In the traditional local-style dwelling houses in pin straight mortise node bending moment-corner relations theory analysis[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(5): 60-67.

[8] 余石斌,潘文,苏何先,等. 支撑型黏弹阻尼器增强传统木结构直榫节点试验及理论研究[J]. 工程力学,2026,43(6):41-53.
YU Shibin, PAN Wen, SU Hexian, et al. Experimental and theoretical study on strengthening straight tenon joints of traditional wooden structures with supported viscoelastic dampers [J]. Engineering Mechanics ,2026,43(6):41-53.

[9] 章红梅,胡帆,段元锋. Bouc-Wen模型参数识别的非线性自适应遗传算法和试验验证[J]. 工程力学,2022,39(6):191-201.
ZHANG Hongmei, HU Fan, DUAN Yuanfeng. Nonlinear adaptive genetic algorithm and experimental verification for parameter identification of Bouc-Wen model [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2019, 39(6): 191-201.

[10] 代旷宇,于晓辉,王硕,等. 基于改进Ibarra-Medina-Krawinkler材料模型的RC圆柱恢复力模型参数识别[J]. 工程力学,2021,38(1):154- 163, 173.
DAI Guangyu, YU Xiaohui, WANG Shuo, et al. Parameter identification of RC cylinder restoring force model based on improved Ibarra-Medina-Krawinkler material model [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2021, 38(1): 154-163,173.

[11] 樊晓伟,徐龙河,李忠献. 预压弹簧自恢复耗能支撑非线性原理模型参数识别及试验验证[J]. 土木工程学报,2018,51(7):29-35.
FAN Xiaowei, XU Longhe, LI Zhongxian. Parameter identification and experimental verification of nonlinear principle model for self-restoring energy dissipation support of preloaded spring [J]. Journal of Civil Engineering, 2018, 51(7): 29-35.

[12] ZHANG H, FOLIENTE G C, YANG Y, et al. Parameter ide-ntification of inelastic structures under dynamic loads [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002,31(5): 1113-1130.

[13] 关晓迪,郭宏超,王洪臣,等. 基于遗传算法的TMD参数优化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2023,55(2):211-216.
GUAN Xiaodi, GUO Hongchao, WANG Hongchen, et al. Research on optimization of TMD parameters based on genetic algorithm [J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2023, 55(2): 211-216.

[14] CHARALAMPAKIS A, KOUMOUSIS V. Identification of Bouc-Wen hysteretic systems by a hybrid evolutionary algorithm[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008 , 314(3-5): 571-585.

[15] GIUCLEA M, SIRETEANU T, MITU AM. Use of genetic algorithms for fitting the Bouc-Wen model to experimental hysteretic curves [J]. Revue Roumaine des Sciences Techniques. Mecanique Appliquee, 2009, 54(1): 3-10.

[16] KYPRIANOU A, WORDEN K, PANET M. Identification of hysteretic systems using the differential evolution algorithm [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(2): 289-314.

[17] WORDEN K, MANSON G. On the identification of hysteretic systems. Part I: Fitness landscapes and evolutionary identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2012,29(5):201-212.

[18] YE M, WANG X. Parameter estimation of the Bouc - Wen hysteresis model using particle swarm optimization [J]. Smart Materials & Structures, 2007, 16(6): 2341-2349.

[19] CHARALAMPAKIS A, DIMOU C. Identification of Bouc - Wen hysteretic systems using particle swarm optimization[J]. Computer & Structure, 2010, 88(21 - 22): 1197 - 1205.

[20] ORTIZ G A, ALVAREZ D A, BEDOYA-RUIZ D. Identification of Bouc-Wen type models using multi-objective optimization algorithms [J]. Computer & Structure, 2013, 114-115(1): 121-132.

[21] ORTIZ G A, ALVAREZ D A, BEDOYA-RUÍZ D. 2015. "Identification of Bouc - Wen type models using the transitional Markov Chain Monte Carlo method" [J]. Computer & Structure, 2015, 146 (1): 252 - 269.

[22] 潘毅，安仁兵，游文龙. 古建筑木结构榫卯节点力学性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2024, 45 (7): 226-241.
PAN Yi, AN Renbing, YOU Wenlong. Research progress on mechanical properties of mortise and tenon joints of ancient wooden structures [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45 (7): 226-241.

[23] 褚云朋，曾梦倩，李正兴，等. 局部残损长木柱轴压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2026, 58 (1): 1-14, 34.
CHU Yunpeng, ZENG Mengqian, LI Zhengxing, et al. Experimental study on axial compressive performance of locally damaged long wooden columns [J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2026, 58 (1): 1-14, 34.

[24] 吴占景，薛建阳，隋龑，等. 装配式钢结构仿古建筑梁-柱节点抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), (2026-06-04), [2026-06-20]. https://link. cnki. net/urlid/ 61. 1295. TU. 20260603. 1510. 002.
WU Zhanjing, XUE Jianyang, SUI Yan, et al. Experimental study on seismic performance of beam-column joints inprefabricated steel Chinese antique buildings [J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), (2026-06-04), [2026-06-20]. https://link. cnki. net/urlid/ 61. 1295. TU. 20260603. 1510. 002.

[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 木材顺纹抗压弹性模量测定方法: GB/T 15777—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People′s Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Method for determination of the modulus of elasticity in compression parallel to grain of wood, General Administration of Quality Supervision, GB/T 15777—2017. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[26] 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. 无疵小试样木材物理力学性质120工程力学试验方法第11部分：顺纹抗压强度测定：GB/T1927. 11—2022[S]. 北京：中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens-Part 11: Determination of ultimate stress in compression parallel to grain: GB/T 1927. 11—2022. [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[27] 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. 无疵小试样木材物理力学性质试验方法第12部分：横纹抗压强度测定：GB/T 1927. 12—2021[S]. 北京：中国标准出版社, 2017.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens-Part 11: Determination of elasticity in compression perpendicular to grain: GB/T 1927. 13—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[28] 甘殊荣. 黏弹性阻尼器加固传统木结构榫卯节点抗震性能试验研究与工程示范[D]. 昆明：昆明理工大学, 2023.
GAN Shurong. Experimental study and engineering demonstration on seismic performance of traditional wooden mortise and tenon joints reinforced by viscoelastic dampers [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology. 2023.

[29] FOLZ Bryan, FILIATRAULT Andre. A computer program for the cyclic analysis of shearwalls in woodframe structures. CUREE-Caltech Wood frame Project Report W-08 [CP]. Stanford Digital Repository. 2022.

[30] SILVIA Mazzoni, 2023 Opensees uniaxialMaterial Demo: HystereticSM [EB/OL]. https://opensees.github. io/OpenSees Documentation/user/manual/material/uniaxialMaterials/examples/HystereticSM_materialDemo. html

（编辑　吴海西）