

文章编号:1674-2974(2016)01-0132-11

木结构古建筑震后破坏状态评估方法研究*

潘毅^{1,2†}, 李玲娇^{1,3}, 王慧琴¹, 姚蕴艺¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 陆地交通地质灾害防治技术
国家工程实验室, 四川 成都 610031; 3. 四川省建筑科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要:木结构古建筑震后破坏状态评估涉及众多影响因素,且各因子间还存在相关性和不确定性.为提高木结构古建筑震后破坏状态评估的准确性,本文提出了基于模糊数学理论的评估方法.首先,将木结构古建筑分为地基、基础、上部结构3个部分,结合其震害特点,选取13个指标作为评估因子;然后,由层次分析法确定权系数向量,采用隶属函数和类比法构造评判矩阵,建立三层次两阶段的模糊综合评估模型;最后,以青城山黄帝殿为例,应用该模型对其在汶川地震后的破坏状态进行了评估.结果表明,本文方法能合理、较准确地评估震后木结构古建筑的破坏状态,可为木结构古建筑震后维修措施提供依据.

关键词:木结构古建筑;模糊数学;震后评估;破坏状态

中图分类号:TU366.2

文献标识码:A

Research on Evaluation Methods for Post-earthquake Damage State of Ancient Wooden Buildings

PAN Yi^{1,2†}, LI Ling-jiao^{1,3}, WANG Hui-qin¹, YAO Yun-yi¹

(1. College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong Univ, Chengdu, Sichuan 610031, China;
2. National Engineering Laboratory for Technology of Geological Disaster Prevention in Land Transportation, Chengdu,
Sichuan 610031, China; 3. Sichuan Academy of Building Research, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Post-earthquake damage state evaluation of ancient wooden buildings involves many impact factors and there are correlations and uncertainty among these factors. In order to improve the damage state assessment accuracy of post-earthquake ancient wooden buildings, fuzzy mathematics theory was employed to investigate this issue. Firstly, ancient wooden buildings were decomposed into three parts: sub-soil, foundation and superstructure, and 13 indicators were selected for the evaluation factors based on their damage characteristics. Then, the weight coefficient vector was determined by hierarchy analytical process and the judgment matrix was constructed using membership function and analogy method. Two-phase three-level fuzzy comprehensive evaluation model was built. Finally, taking the Emperor Temple in Qingcheng mountain as an example, the developed model was applied to evaluate its damage state after Wenchuan earthquake. The results show that the evaluation method can reasonably and accurately assess the post-earthquake damage state of ancient wooden buildings, which can provide references to the post-earthquake repair measures of these buildings.

* 收稿日期:2015-03-20

基金项目:中国工程院咨询研究项目(2010-ZD-4);国家留学基金资助项目(20123022)

作者简介:潘毅(1977-),男,重庆人,西南交通大学副教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: panyi@home.swjtu.edu.cn

Key words: ancient wooden buildings; fuzzy mathematics; post-earthquake assessment; damage state

我国古建筑的主要结构形式是木结构,在漫长的历史进程中,受到自然和人为因素的侵蚀,其抗震能力有不同程度的下降.汶川、芦山等几次地震都对大量木结构古建筑造成了不同程度的破坏^[1-2].目前,对木结构古建筑震后评估的研究还不足,相应的评估规范尚未出台.在实际工程中,常用专家经验法,该方法是专家直接对震后结果做出评估,故较为简单、迅速,但评估结果主观性较大,不够准确.李宁等^[3]提出的概率评价法计算简单,结果连续,能用于实际工程,但是该方法中结构损伤指数和最大层间位移角两个评价因子相对独立的假设与实际不符,对评定结构有较大的影响.李铁英等^[4]提出的结构双参数地震损坏评价方法采用的模型能够较准确地反映木结构的变形和耗能情况,但其计算复杂,需要做大量的试验来修正公式中的权重因子,耗时耗力.薛建阳等^[5]提出了基于结构潜能和能量耗散准则的地震破坏评估方法,该方法能较好地反映各构件以及整体结构在不同地震作用下的破坏状态,但其试验结果是基于燕尾榫得到的,在实际工程评估中有一定的局限.

由于木结构古建筑构造的独特性和复杂性,且震后破坏状态评估涉及的众多影响因素之间存在相关性、不确定性和模糊性.而模糊数学是处理不确定性问题的理论,它以模糊集合为基础,通过隶属函数和隶属度来描述模糊集合.本文基于模糊数学理论,建立适用于木结构古建筑的模糊综合评估方法,从

而确定其震后破坏状态,并以汶川地震中受损的青城山黄帝殿为例,应用该方法进行震后评估,与实际的震害情况进行对比,来验证该方法的合理性.

1 模糊综合评估方法的建立

木结构古建筑具有在中、低烈度地震作用下非结构构件的易损性和高烈度地震作用下结构整体有一定抗倒塌性的特点,在地震作用下可能出现基础破坏、榫卯拔脱、柱脚滑移、柱架倾斜、斗拱剪断、梁架歪闪、屋脊破坏、附属部件破坏等多种震害特征^[6].

结合上述结构特点与震害特征,本文的评估方法采用三层次两阶段的模糊综合评估模型.首先,以木结构古建筑震后的破坏状态作为评估目标.然后,把整个结构分为上部结构、基础和地基 3 个相对独立部分,构成系统层,系统层各项选取相应的评估因子,构成因素层.其中,上部结构在地震中所表现出来的破坏特征较为复杂,影响震害的因素较多,选取承载力、梁枋挠度、层间位移角、裂缝、连接构造、腐朽、建筑年代和主要材料等 8 个因素作为评估因子^[7].而基础选择承载力、基础损伤和柱础连接 3 个评估因子.地基则选取承载力和不均匀沉降作为主要的评估因子.最后,通过确定权系数向量和构造评判矩阵,分两个阶段计算,得到目标层的评估结果,从而给出木结构古建筑的震后破坏状态.评估模型如图 1 所示.

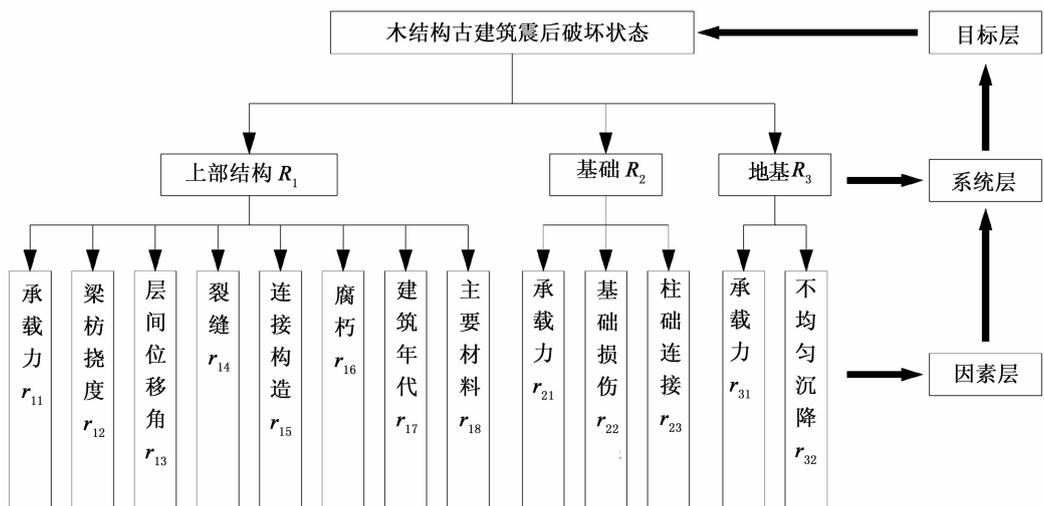


图 1 木结构古建筑的模糊评估模型

Fig. 1 Fuzzy evaluation model of the ancient wooden buildings

2 利用层次分析法确定权系数向量

层次分析法(Alytic Hierarchy Process,简称 AHP)借鉴了二元对比排序法的原理,通过因素间的两两比较,构造判断矩阵,经过运算间接确定各因素的权重.它可以有效处理模糊问题的定量分析研究,对复杂问题做出决策.其具体步骤如下^[8]:第1步,根据问题所包含因素及其相互关系建立层次结构,本文分为3个层次,分别为目标层、系统层和因素层;第2步,对于同一层次各因素对上一层次某因素水平的影响程度进行两两比较,采用比例标度赋值,构造判断矩阵,两两比较重要性赋值见表

表1 两两比较重要性赋值
Tab.1 The pairwise comparison importance assignment

V_i/V_j	相同	稍强	强	很强	绝对强	稍弱	弱	很弱	绝对弱
r_{ij}	1	3	5	7	9	1/3	1/5	1/7	1/9

注: V_i, V_j 为同层次的因素; r_{ij} 为 V_i 和 V_j 重要性的比值;相邻程度的中间值取2,4,6,8,1/2,1/4,1/6,1/8.

表2 平均随机一致性指标 R.I
Tab.2 Mean random consistency index R.I

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R.I	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

用层次分析法构造判断矩阵时,因素间两两比较重要性赋值是基于两因素的性能条件处于同一水平,实际情况往往并非如此,因此实际工程中还需要根据各影响因子的自身性能条件进行修正^[10],即改进 AHP 法,其具体调整方法如下:

首先,假设各因素的性能条件水平相同,仅考虑各因素对整体评价的重要性,应用层次分析法,求得权重向量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)^T$;其次,根据各因素的实际性能条件水平的优劣,按照性能越差的因素对整体性能影响越大的原则,求得权重向量 $\beta =$

$1^{[8-9]}$;第3步,构造出判断矩阵 A 之后,求出最大(绝对值)特征值 λ_{max} 和相应的特征向量 W ,将特征向量 W 归一化处理后,得到的特征向量即为该层次各因素相对上一层次中某因素水平的影响权重值.在两两重要性比值时,为了避免出现逻辑错误,需用最大特征值(绝对值) λ_{max} 进行一致性检验.具体步骤如下:

首先,根据式(1)计算出 C.I 值;其次,由建立的判断矩阵的阶数查表 2 得出平均随机一致性指标 R.I,将其带入式(2)进行一致性检验,当 $C.R < 0.1$ 时,即认为一致性检验通过.

$$C.I = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \tag{1}$$

$$C.R = C.I / R.I \tag{2}$$

$(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$;最后,定义最终的权重向量 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$,其中 ω_i 根据公式(3)计算;对于各因素性能水平均衡的情况 $W = \alpha$.

$$\omega_i = \frac{\alpha_i \beta_i}{\alpha^T \beta^T} \tag{3}$$

木结构古建筑因素层的权系数向量采用 AHP 法计算.通过向有经验的专家发放权重问卷调查表,得出上部结构各项因素间的权重关系,其权系数见表 3.

表3 上部结构各项因素的权系数
Tab.3 Weights of the relevant factors of the upper structure

判断矩阵	承载力	挠度	层间位移角	裂缝	连接构造	腐朽	建造年代	材料
承载力	1	4	2	5	3	4	7	5
挠度	1/4	1	1/3	3	1/2	1	5	3
层间位移角	1/2	3	1	4	2	3	5	4
裂缝	1/5	1/3	1/4	1	1/3	1/2	3	1
连接构造	1/3	2	1/2	3	1	2	5	3
腐朽	1/4	1	1/3	2	1/2	1	4	2
建造年代	1/7	1/5	1/5	1/3	1/5	1/4	1	1/3
材料	1/5	1/3	1/4	1	1/3	1/2	3	1

根据表 3 中各因素的权系数值可构造出判断矩阵 A , 有 $A \cdot W_0 = \lambda_{\max} \cdot W_0$, 即

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 5 & 3 & 4 & 7 & 5 \\ 1/4 & 1 & 1/3 & 3 & 1/2 & 1 & 5 & 3 \\ 1/2 & 3 & 1 & 4 & 2 & 3 & 5 & 4 \\ 1/5 & 1/3 & 1/4 & 1 & 1/3 & 1/2 & 3 & 1 \\ 1/3 & 2 & 1/2 & 3 & 1 & 2 & 5 & 3 \\ 1/4 & 1 & 1/3 & 2 & 1/2 & 1 & 4 & 2 \\ 1/7 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1/4 & 1 & 1/3 \\ 1/5 & 1/3 & 1/4 & 1 & 1/3 & 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \cdot W_0 = \lambda_{\max} W_0$$

计算可得其最大特征值 $\lambda_{\max} = 8.2796$, 再根据式(1)和(2), 计算出 $C.I = 0.0399$, 一致性指标 $C.R = 0.0283 < 0.1$, 通过一致性检验. 根据 λ_{\max} 可求出其对应的特征向量, 将其归一化处理后得到权系数特征向量 $W_1 = [0.3200 \ 0.1037 \ 0.2154 \ 0.0516 \ 0.1430 \ 0.0880 \ 0.0267 \ 0.0516]^T$, 即为上部结构因素层的权系数向量.

基础和地基的权系数见表 4 和表 5. 同理, 可求得基础因素层承载力、损伤和柱础连接各评价因子的权系数向量 $W_2 = [0.5584 \ 0.1219 \ 0.3197]^T$, 地基因素层承载力和不均匀沉降两评价因子的权系数向量为 $W_3 = [0.75 \ 0.25]^T$.

表 4 基础各项因素的权系数

Tab. 4 Weights of the relevant factors of the basis

判断矩阵	承载力	损伤	柱础连接	特征向量	一致性
承载力	1	4	2	0.5584	$\lambda_{\max} = 3.0183$
损伤	1/4	1	1/3	0.1219	$C \cdot R = 0.0158 < 0.1$
柱础连接	1/2	3	1	0.3197	满足

表 5 地基各项因素的权系数

Tab. 5 Weights of the relevant factors of the foundation

判断矩阵	承载力	不均匀沉降	特征向量	一致性
承载力	1	3	0.7500	$n=2$
不均匀沉降	1/3	1	0.2500	无需检验(满足)

表 7 木结构地基各因素的评定标准

Tab. 7 Evaluation criteria of each factor of the wooden foundation

评定等级	承载力 P_d/f_{sc} 或 $P_{dmax}/1.2f_{sc}$	不均匀沉降
A	≥ 1.0	不均匀沉降小于现行国家标准《建筑地基基础设计规范》规定的允许沉降差;或建筑物无沉降裂缝、变形或位移
B	1.0~0.95	不均匀沉降不大于现行国家标准《建筑地基基础设计规范》规定的允许沉降差,且连续两个月地基沉降速度小于每月 2 mm;或上部结构虽有轻微裂缝,但无发展迹象
C	0.95~0.9	不均匀沉降大于现行国家标准《建筑地基基础设计规范》中规定的允许沉降差,或连续两个月地基沉降速度大于每月 2 mm;或建筑物上部结构出现宽度大于 5 mm 的沉降裂缝,且沉降裂缝短期内无终止趋势
D	< 0.9	不均匀沉降远大于现行国家标准《建筑地基基础设计规范》规定的允许沉降差,连续两个月地基沉降速度大于每月 2 mm,且尚有变快趋势;或建筑物上部结构的沉降裂缝发展明显,砌体的裂缝宽度大于 10 mm

注: P_d 为基础底面平均压应力设计值, P_{dmax} 为基础底面边缘最大压应力设计值, f_{sc} 为地基承载力设计值.

木结构古建筑评估模型系统层的权系数向量采用改进 AHP 法. 系统层各因子之间的权系数见表 6, 计算得上部结构、基础和地基三者的权重向量为 $\alpha = [0.6483 \ 0.1220 \ 0.2297]^T$, 根据各因素的实际性能的优劣, 可得 $\beta = [0.2 \ 0.4 \ 0.4]$, 根据式(3)对权系数经调整后, 得到木结构古建筑评估模型系统层上部结构、基础和地基 3 个因子的最终权系数向量为 $W = [0.4796 \ 0.1805 \ 0.3399]^T$.

表 6 系统层间各指标的权系数

Tab. 6 The weights of each index between the system layer

判断矩阵	上部结构	基础	地基	特征向量	一致性
上部结构	1	5	3	0.6483	$\lambda_{\max} = 3.0037$
基础	1/5	1	1/2	0.1220	$C \cdot R = 0.0019 < 0.1$
地基	1/3	2	1	0.2297	满足

3 构造系统层各指标的评判矩阵

系统层各因子的评判矩阵是由对应因素层各因素的隶属向量构造而来, 而因素层各影响因子的隶属向量则根据其各自的特点, 利用单指标隶属度函数法和类比法确定. 其中, 单指标隶属度函数法是根据各因素等级评定标准和相应的单指标隶属度函数确定其隶属向量.

3.1 各因素等级评定标准

1) 地基各评估因素的评定标准

参考文献[11-12], 本文给出木结构地基承载力和不均匀沉降的评定标准, 见表 7.

2) 基础各评估因素的评定标准

参考文献[11], 本文给出基础承载力和基础损伤的评定标准, 见表 8. 参考相关标准[13], 给出柱础连接的评定标准, 见表 9.

3) 上部结构各评估因素的评定标准

参考文献[4, 13-15], 本文给出上部结构各因素的评定标准, 见表 10.

表8 木结构基础承载力和基础损伤的评定标准
Tab.8 Evaluation criteria of basis bearing capacity and basis damage of the wooden buildings

评定等级	承载力 R/r_0S	基础损伤
A	≥ 1.0	无明显损伤,如腐蚀、酥碱、松散、剥落现象
B	$1.0 \sim 0.95$	轻度损伤,基础略有腐蚀、酥碱、松散、剥落现象发生
C	$0.95 \sim 0.90$	中等损伤,比B级损伤程度更高
D	< 0.90	严重损伤,腐蚀、松散、剥落现象明显,已对基础产生很大影响

注: R 为基础强度设计值, S 为基础实际受压强度, r_0 为分项系数.

表9 木结构柱础连接的评定标准
Tab.9 Evaluation criteria of column bases of the wooden buildings

评定等级	柱础连接
A	柱础水平、光滑、不存在偏心、风化和裂缝,柱脚底面与柱础间实际抵承面积与柱脚处柱的原截面面积之比 ρ_c 满足相关规范要求;柱与柱础之间错位置与柱径或柱截面沿错位方向的尺寸之比柱 ρ_d 满足相关规范要求
B	柱础存在偏心、风化和裂缝现象,但柱脚底面与柱础间实际抵承面积与柱脚处柱的原截面面积之比 ρ_c ,柱与柱础之间错位置与柱径或柱截面沿错位方向的尺寸之比柱 ρ_d 满足相关规范要求
C	柱脚底面与柱础间实际抵承面积与柱脚处柱的原截面面积之比 $\rho_c < 3/5$;或柱与柱础之间错位与柱径或柱截面沿错位方向的尺寸之比柱 $\rho_d > 1/6$;柱础出现不止一条可见裂缝,缝宽 $< 1\text{ mm}$
D	柱脚底面与柱础间实际抵承面积与柱脚处柱的原截面面积之比 $\rho_c < 3/5$;且柱与柱础之间错位位置与柱径或柱截面沿错位方向的尺寸之比柱 $\rho_d > 1/6$;柱础可见裂缝,不止一条,缝宽 $> 1\text{ mm}$

表10 上部结构影响因素的评定标准
Tab.10 Evaluation criteria of each factor of the upper structure

评定等级	挠度		腐朽	层间位移角	承载力 R/r_0S	建造年代	主要材料	裂缝	连接构造	
	年代	高跨比								限值
A	< 300	$h/l > 1/14$	$f_1 < l^2/3150 \cdot h$	$\rho < 1/16$	$0 \sim 1/148$	≥ 1.0	$0 \sim 100$	木材	无明显裂缝	构架间连系基本完好,连接方式正确,构造符合国家现行设计规范要求.
		$h/l \leq 1/14$	$f_1 < l/225$							
	> 300	—	$f_2 < f_1 + h/75$							
B	< 300	$h/l > 1/14$	$l^2/3150 \cdot h < f_1 < l^2/2730 \cdot h$	$1/16 < \rho < 1/10.5$	$1/148 \sim 1/48$	$1.0 \sim 0.95$	$100 \sim 300$	石木、砖木混用	有少裂缝且在次要部位	连系构件已残缺;无可靠连接或连接已松脱损坏,榫卯连接件横纹出现压缩变形,榫头有拔出的迹象
		$h/l \leq 1/14$	$l/225 < f_1 < l/195$							
	> 300	—	$f_1 + h/75 < f_2 < f_1 + h/65$							
C	< 300	$h/l > 1/14$	$l^2/2730 \cdot h < f_1 < l^2/2100 \cdot h$	$1/10.5 < \rho < 1/8$	$1/48 \sim 1/16$	$0.95 \sim 0.9$	$300 \sim 500$	砖、石	裂缝不多但在重要部位	连接不当,构造有缺陷,梁柱间拉结很弱,且卯口的长度小于榫头长度的1/2;横纹的压缩变形量不超过4 mm
		$h/l \leq 1/14$	$l/195 < f_1 < l/150$							
	> 300	—	$f_1 + h/65 < f_2 < f_1 + h/50$							
D	< 300	$h/l > 1/14$	$f_1 > l^2/2100 \cdot h$	$\rho > 1/8$	$> 1/16$	< 0.9	> 500	两种以上材料混用	裂缝多且在重要部位	连接不当,构造有严重缺陷,榫卯连接已腐朽、虫蛀或断裂,横纹的压缩变形量超过4 mm
		$h/l \leq 1/14$	$f_1 > l/150$							
	> 300	—	$f_2 > f_1 + h/50$							

注: l 为构件计算跨度, h 为构件高度, ρ 为任意截面腐朽和老化变质截面与整体截面面积之比, R 为上部结构强度设计值, S 为上部结构实际受压强度, r_0 为分项系数.

3.2 单项指标的隶属函数

本文以岭形分布模糊函数为隶属函数,该函数连续、计算简单,满足工程需要.对于承载力这类定量因素,在评估标准中评估标准值越大越安全,因此采用隶属函数中的偏大型升岭形分布处理.设 x 为承载力的评估值,若 $x > x_1$ 为 A 级, $x_1 > x > x_2$ 为 B

级, $x_2 > x > x_3$ 为 C 级, $x < x_3$ 为 D 级,这样对于承载力的 x 值,就可以建立起相应于 A, B, C, D 各等级的隶属函数 $V_A(x), V_B(x), V_C(x), V_D(x)$.同时考虑连续化,即可得到该因素相应于 A, B, C, D 各等级的隶属函数表达式(4)^[11].

A 级的隶属函数

$$V_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq (x_1 + x_2)/2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_1 - x_2} \left(x - \frac{3x_1 + x_2}{4} \right) & (x_1 + x_2)/2 < x \leq x_1 \\ 1 & x > x_1 \end{cases} \quad (4a)$$

B 级的隶属函数

$$V_B(x) = \begin{cases} 0 & x > x_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_1 - x_2} \left(x - \frac{3x_1 + x_2}{4} \right) & (x_1 + x_2)/2 \leq x \leq x_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_1 - x_3} \left(x - \frac{x_1 + x_3 + 2x_2}{4} \right) & (x_3 + x_2)/2 < x \leq (x_1 + x_2)/2 \\ 0 & x \leq (x_3 + x_2)/2 \end{cases} \quad (4b)$$

C 级的隶属函数

$$V_C(x) = \begin{cases} 0 & x > (x_1 + x_2)/2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_3 - x_1} \left(x - \frac{x_1 + x_3 + 2x_2}{4} \right) & (x_1 + x_2)/2 < x \leq x_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_3 - x_1} \left(x - \frac{3x_3 + x_2}{4} \right) & x_3 < x \leq (x_3 + x_2)/2 \\ 0 & x \leq x_3 \end{cases} \quad (4c)$$

D 级的隶属函数

$$V_D(x) = \begin{cases} 0 & x > (x_3 + x_2)/2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_2 - x_3} \left(x - \frac{3x_3 + x_2}{4} \right) & x_3 < x \leq (x_3 + x_2)/2 \\ 1 & x \leq x_3 \end{cases} \quad (4d)$$

按式(4)分别计算地基、基础和上部结构评估因素中的承载力对各等级的隶属度。其中, x_1, x_2, x_3 分别对应表 8、表 9 和表 11 中的 1.0, 0.95, 0.90。

而对于层间位移角、挠度、建造年代、腐朽程度这类定量因素,在评估标准中评估标准值越小越安全,因此采用偏小型降岭形分布处理。设 x 为这类

A 级的隶属函数

$$V_A(x) = \begin{cases} 0 & x > (x_1 + x_2)/2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_2} \left(x - \frac{2x_1 + x_2}{4} \right) & x_1/2 < x \leq (x_1 + x_2)/2 \\ 1 & x \leq x_1/2 \end{cases} \quad (5a)$$

B 级的隶属函数

$$V_B(x) = \begin{cases} 0 & x < x_1/2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_2} \left(x - \frac{2x_1 + x_2}{4} \right) & x_1/2 \leq x \leq (x_1 + x_2)/2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_3 - x_1} \left(x - \frac{x_1 + x_3 + 2x_2}{4} \right) & (x_1 + x_2)/2 < x \leq (x_3 + x_2)/2 \\ 0 & x > (x_3 + x_2)/2 \end{cases} \quad (5b)$$

C 级的隶属函数

$$V_C(x) = \begin{cases} 0 & x \leq (x_1 + x_2)/2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_3 - x_1} \left(x - \frac{x_1 + x_3 + 2x_2}{4} \right) & (x_1 + x_2)/2 < x \leq (x_3 + x_2)/2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_3 - x_1} \left(x - \frac{3x_3 + x_2}{4} \right) & (x_3 + x_2)/2 < x \leq x_3 \\ 0 & x > x_3 \end{cases} \quad (5c)$$

因素的评估值,若 $0 < x \leq x_1$ 为 A 级, $x_1 < x \leq x_2$ 为 B 级, $x_2 < x \leq x_3$ 为 C 级, $x > x_3$ 为 D 级,这样对于某因素的 x 值,就可以建立起相应于 A, B, C, D 各等级的隶属函数 $V_A(x), V_B(x), V_C(x), V_D(x)$ 。同时考虑连续化,即可得到该因素相应于 A, B, C, D 各等级的隶属函数表达式(5)^[11]:

D 级的隶属函数

$$V_D(x) = \begin{cases} 0 & x \leq (x_3 + x_2)/2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_3 - x_2} \left(x - \frac{3x_3 + x_2}{4} \right) & (x_3 + x_2)/2 < x \leq x_3 \\ 1 & x > x_3 \end{cases} \quad (5d)$$

对上部结构的层间位移角、建造年代、腐朽程度按上述方法计算隶属向量,其中, x_1, x_2, x_3 分别对应表 10 中的 $1/148, 1/48, 1/16; 100, 300, 500; 1/16, 1/10.5, 1/8$. 但对于挠度,其评估值的限值与建造年代以及高跨比有关,例如,建造年代小于 300 年及高跨比大于 $1/14$ 的构件,其 x_1, x_2, x_3 分别对应表 10 中的 $l^2/3150 \cdot h, l^2/2730 \cdot h, l^2/2100 \cdot h$, 以此类推.

3.3 类比法确定隶属向量

对于地基的不均匀沉降、基础的基础损伤及上部结构的裂缝、连接构造和主要材料等这类定性因素,采用类比法建立隶属函数. 通过“符合”、“基本符合”、“似符合又似不符合”、“基本不符合”和“不符合”这 5 个语言值来描述, 分别对应 1, 0.75, 0.5, 0.25, 0, 即可建立隶属函数. 例如,木结构上部材料为砖木混用,由表 11 的分级标准,此种情况符合 B

级,则裂缝的隶属向量为 $[0 \ 1 \ 0 \ 0]$.

4 评估流程

在将模糊综合评估法用于实际木结构古建筑评估时,其评估步骤如下:1)建立如图 1 所示的震后模糊评估模型,利用 AHP 法确定上部结构、基础、地基的因素层的权系数向量 W_1, W_2, W_3 ; 2)利用岭形函数分布法确定因素层各因子的隶属向量,构造因素层的评判矩阵 R_1, R_2, R_3 ; 3)由因素层的权系数向量和评判矩阵得出系统层各指标评定等级向量 X_1, X_2, X_3 , 进而构造出整体评判矩阵 D ; 4)采用改进 AHP 法确定系统层的权系数向量 W ; 5)由 D 和 W 确定目标层评定等级向量,根据最大隶属度原则确定最后的评估结果. 该法的评估流程如图 2 所示.

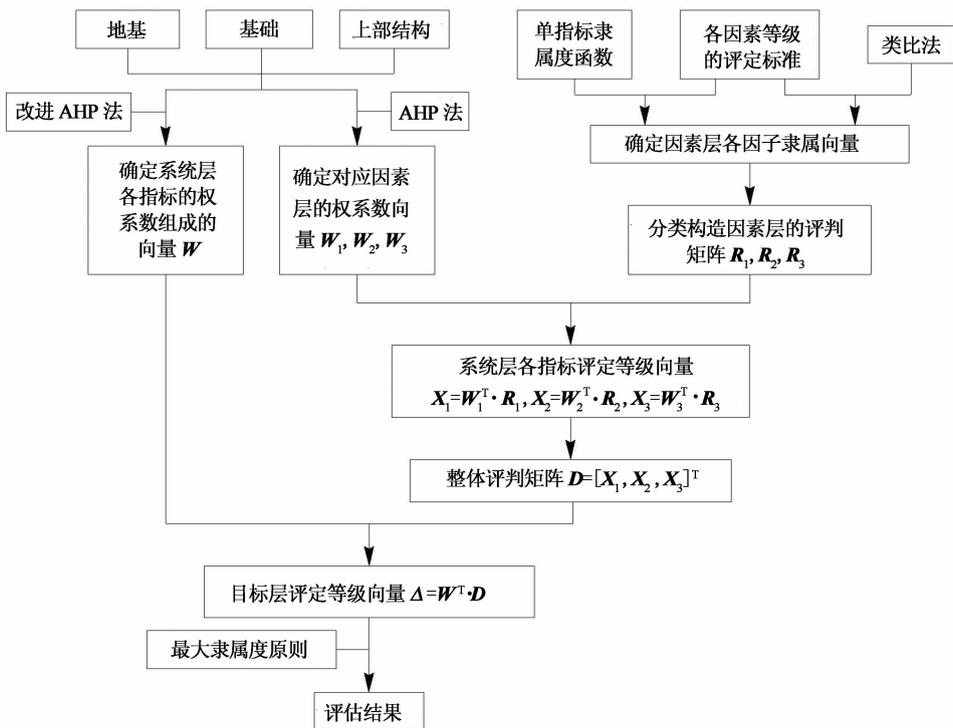


图 2 木结构古建筑的模糊评估流程

Fig. 2 Fuzzy evaluation procedure of ancient wooden building

计算得到目标层评定等级向量 Δ 后,利用最大隶属原则可以最终确定木结构古建筑的评估等级.

参考文献[16],木结构古建筑震后破坏等级和维修措施的对应关系见表 11.

表 11 评估等级、破坏状态和维修措施的对应关系
Tab. 11 The corresponding relationship among assessment level, destruction state and repair measures

评估等级	破坏状态	维修措施
A	基本完好、轻微破坏	小修
B	中等破坏	中修
C	严重破坏	大修
D	接近倒塌	抢救性保护

5 实例分析

本文以世界文化遗产建筑——青城山黄帝殿为例,如图 3 所示.该殿始建于隋代,现存建筑为民国时修复.黄帝殿全高 11.07 m,为两层砖、石、木的混

合结构;明间采用抬梁式构架,构架大梁跨度达 5.4 m,次间为穿斗式,穿枋间填以木板墙或竹编墙,整栋建筑不用斗拱,采用石砌台基,地面用当地的三合土夯实.在构件选材方面,整栋建筑共有 4 种不同材质和形状的柱子:一层前檐两根金柱为直径 400 mm 圆形石柱,其余的柱子均为方形,外圈是 350 mm×350 mm 的砖柱,内圈为 330 mm×330 mm 的石柱,二层柱子均为直径 200 mm 的木柱.除此之外,底层左侧墙裙为 50 mm 厚的石板,而右侧墙裙为木板^[17].

据现场实测,黄帝殿的主要木材为古柏木,其顺纹抗压强度和抗弯强度分别为 15.3 N/mm² 和 14.4 N/mm²,木材的弹性常数见表 12;黄帝殿的砖柱和石柱的材料参数如表 13 所示.

表 12 木材弹性常数表
Tab. 12 Elastic constants of kashiwagi

E_L /GPa	E_R /GPa	E_T /GPa	μ_{TL}	μ_{RL}	μ_{LT}	μ_{LR}	μ_{TR}	μ_{RT}	G_{LT} /GPa	G_{RT} /GPa	G_{LR} /GPa
8.9	19	1.9	0.5	0.52	0.11	0.11	0.35	0.35	0.6	0.2	0.7

注: E 为弹性模量; G 为剪切弹性模量; μ_{ij} 为泊松比,其值为 j 向压应变/ i 向拉应变; L 为纵向; R 为径向; T 为弦向; RT 为横切面; LR 为径切面; LT 为弦切面.

表 13 石材和砖的材料参数
Tab. 13 The material parameters of rocks and bricks

材料	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)
石材	6.72	12	0.3	28
砖	3.27	5.2	0.2	19

由于汶川地震前该殿未安装监测仪器,为了得到地震作用时黄帝殿的最大水平位移和层间位移角,采用现场实测和软件分析相结合的方法,用软件 Midas-gen8.0 建立黄帝殿的有限元模型^[18],如图 4 所示.根据场地的相似性,本文采用汶川地震波, x 方向输入加速度峰值为 956.7 gal 和 y 方向为 652.2 gal,对模型进行时程分析.



图 3 青城山黄帝殿
Fig. 3 The Emperor Temple in Qingcheng Mountain

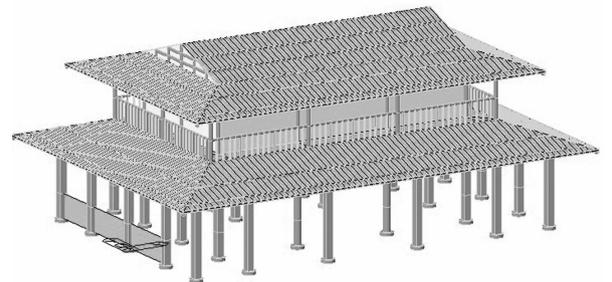


图 4 黄帝殿整体模型
Fig. 4 The whole model of Emperor Temple

5.1 上部结构

根据计算结果和地震后现场勘测数据,由式(4)和表 11 可知上部结构承载力的隶属向量 r_{11} 为 $[0 \ 0.7 \ 0.3 \ 0]$.由于梁枋挠度与工况及梁的高度和跨度有关,由计算结果可知,不同工况下的最大梁枋挠度有 4 种情况,为简化计算,视每种工况处于相同的条件水平,通过调整可得黄帝殿的挠度隶属

向量 r_{12} 为 $[0.190\ 4\ 0.023\ 7\ 0.073\ 6\ 0.712\ 2]$. 考虑结构最不利的情况以及结合时程分析 x 方向得到的最大层间位移角在第二层, 其值为 $1/49$, 再根据式(5)可得其隶属向量 r_{13} 为 $[0\ 0.79\ 0.21\ 0]$. 地震后, 砖柱损坏最严重, 超过半数出现横向裂缝, 底层3根砖柱完全断裂、错位, 木梁、柱也出现多处裂缝, 故裂缝的隶属向量 r_{14} 为 $[0\ 0\ 0.3\ 0.7]$.

地震后, 黄帝殿建筑整体向东倾斜, 东南翼角挑梁拔榫, 柱子倾斜较严重, 3根砖柱完全断裂、错位, 多处出现拔榫现象, 连接构造有缺陷, 门窗也全部损坏, 则连接构造的隶属向量 r_{15} 为 $[0\ 0\ 0.25\ 0.75]$. 梁枋和木柱等主要承重构件腐朽较少, 只有建筑屋面由于瓦片滑落, 漏水严重, 椽子糟朽严重, ρ 约为 $1/15$, 根据式(5)计算得腐朽的隶属向量 r_{16} 为 $[0.038\ 2\ 0.961\ 8\ 0\ 0]$. 黄帝殿至今约有100年的历史^[19], 建筑年代隶属向量根据式(5)可得 r_{17} 为 $[0.75\ 0.25\ 0\ 0]$. 黄帝殿主要材料为木、石和少量砖, 其建筑材料的隶属向量 r_{18} 为 $[0\ 0\ 0.7\ 0.3]$. 由此, 可得出上部结构的评判矩阵 R_1 为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.190\ 4 & 0.023\ 7 & 0.073\ 6 & 0.712\ 2 \\ 0 & 0.79 & 0.21 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.75 \\ 0.038\ 2 & 0.961\ 8 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \end{bmatrix}$$

由此, 可得到上部结构的评定等级向量 $X_1 = W_1^T \cdot R_1$, 即

$$[0.320\ 0\ 0.103\ 7\ 0.215\ 4\ 0.051\ 6\ 0.140\ 3\ 0.088\ 0\ 0.026\ 7\ 0.051\ 6]$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.190\ 4 & 0.023\ 7 & 0.073\ 6 & 0.712\ 2 \\ 0 & 0.79 & 0.21 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.75 \\ 0.038\ 2 & 0.961\ 8 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \end{bmatrix} = [0.043\ 1\ 0.487\ 9\ 0.236\ 3\ 0.232\ 7]$$

5.2 基础部分

黄帝殿采用石砌的高大堡坎作为台基, 震后对

其进行检测, 柱脚均在同一标高上, 无明显沉降, 基础状况完好. 基础与地基连接稳定, 基础承载力能满足要求, 但是上部结构出现整体倾斜, 地基承载力有所下降, 其评级向量 r_{21} 为 $[0\ 0.9\ 0.1\ 0]$. 基础损伤较少, 其评级向量 r_{22} 为 $[0.8\ 0.2\ 0\ 0]$. 底层木、石柱倾斜, 南边倾斜较严重. 另外, 震后黄帝殿整体倾斜, 可知柱脚底面与柱础间实际抵承面积与柱脚处柱的原截面面积之比 $\rho c < 3/5$, 其评级向量 r_{23} 为 $[0\ 0\ 1\ 0]$. 由此, 可得出基础结构的评判因素矩阵 R_2 为:

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

由此, 可得到基础结构的评定等级向量 $X_2 = W_2^T \cdot R_2$, 即

$$X_2 = [0.558\ 4\ 0.121\ 9\ 0.319\ 7]$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = [0.097\ 5\ 0.527\ 0\ 0.375\ 5\ 0]$$

5.3 地基部分

黄帝殿位于青城山半山腰, 地基为坚硬的岩石层, 虽然上部结构整体倾斜, 但建筑地基无明显沉降, 地基状况完好. 经计算, 在地震作用下, 地基承载力能满足要求, 其评级向量 r_{31} 为 $[0\ 1\ 0\ 0]$. 不均匀沉降的评级向量 r_{32} 为 $[0\ 1\ 0\ 0]$. 由此, 可得出基础结构的评判因素矩阵 R_3 为:

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由此, 可得到地基结构的评定等级向量 $X_3 = W_3^T \cdot R_3$, 即

$$X_3 = [0.75\ 0.25] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0\ 1\ 0\ 0]$$

5.4 整体评估

据上部结构、基础和地基的模糊评判结果, 可以得到黄帝殿的评判矩阵 D 为:

$$D = [X_1\ X_2\ X_3]^T = \begin{bmatrix} 0.043\ 1 & 0.487\ 9 & 0.236\ 3 & 0.232\ 7 \\ 0.097\ 5 & 0.527\ 0 & 0.375\ 5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

系统层的权系数向量

$$W = [0.479\ 6\ 0.180\ 5\ 0.339\ 9]^T$$

则总的评定等级向量 A 为:

$$\Delta = W^T \cdot D =$$

$$\begin{bmatrix} 0.4796 & 0.1805 & 0.3399 \\ 0.0431 & 0.4879 & 0.2363 & 0.2327 \\ 0.0975 & 0.5270 & 0.3755 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.0383 & 0.6690 & 0.1811 & 0.1116 \end{bmatrix}$$

根据最大隶属度原则,最大值 0.669 0 落入表 11 中的 B 级,可知黄帝殿的震后评估等级为 B 级,这表明黄帝殿主要部分处于中等程度的破坏,局部处于严重破坏,应进行加固处理。而黄帝殿震后实际破坏情况如图 5 所示,主体基本完好,柱础连接损坏,砖柱出现裂缝,部分木构件出现拔榫等,该方法的评估结果与实际破坏状态基本相符。震后主要对黄帝殿采取了构架纠偏、砖柱更换、节点加固、木构件修缮、装修修缮等措施。



(a) 柱脚破坏



(b) 梁柱拔榫

图 5 震后黄帝殿局部

Fig. 5 The parts of Emperor Temple after earthquake

6 结论

1) 运用模糊数学理论建立了木结构古建筑震后破坏状态的综合评估方法,并给出了该方法的评估模型及评估步骤。

2) 以青城山皇帝殿为例,应用该评估方法对汶川地震后黄帝殿的破坏状态进行了评估,评估结果

与实际情况基本吻合,验证了该方法的正确性。

3) 该评估方法可以定量评估木结构古建筑震后破坏程度,从而为震后木结构古建筑采取何种维修措施提供决策依据。

参考文献

- [1] 潘毅,唐丽娜,王慧琴,等. 芦山 7.0 级地震古建筑震害调查分析[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(1): 140-146.
PAN Yi, TANG Li-na, WANG Hui-qin, *et al.* Investigation and analysis of damage to ancient buildings in Lushan Ms 7.0 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(1): 140-146. (In Chinese)
- [2] 潘毅,王超,季晨龙,等. 汶川地震中木结构古建筑的震害调查与分析[J]. 建筑科学,2012,28(7):103-106.
PAN Yi, WANG Chao, JI Chen-long, *et al.* Investigation and analysis of seismic damage for chinese ancient timber buildings in Wenchuan Earthquake[J]. Building Science, 2012, 28(7): 103-106. (In Chinese)
- [3] 李宁,徐琳,郭小东,等. 基于概率法的木构古建筑地震破坏综合评价方法[J]. 文物保护与考古科学,2012,24(1):44-48.
LI Ning, XU Lin, GUO Xiao-dong, *et al.* A comprehensive method for evaluation of seismic damage in ancient wooden buildings based on probabilistic theory[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012, 24(1): 44-48. (In Chinese)
- [4] 李铁英,魏剑伟,张善元,等. 木结构双参数地震损坏准则及应县木塔地震反应评价[J]. 建筑结构学报,2004,25(2):91-97.
LI Tie-ying, WEI Jian-wei, ZHANG Shan-yuan, *et al.* Double-parameter seismic damage criterion on wooden structure and seismic response appraisalment on Yingxian wooden tower[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 91-97. (In Chinese)
- [5] 薛建阳,张风亮,赵鸿铁,等. 古建筑木结构基于结构潜能和能量耗散准则的地震破坏评估[J]. 建筑结构学报,2012,33(8): 127-134.
XUE Jian-yang, ZHANG Feng-liang, ZHAO Hong-tie, *et al.* Potential and energy dissipation-based seismic damage evaluation of ancient timber structure[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(8): 127-134. (In Chinese)
- [6] 潘毅,赵世春,余志祥,等. 对汶川地震灾区文化遗产建筑震害与保护的几点思考[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(SD):82-85.
PAN Yi, ZHAO Shi-chun, YU Zhi-xiang, *et al.* Analysis and investigation on the seismic damage and protection of cultural heritage architecture in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(SD): 82-85. (In Chinese)
- [7] 周乾,闫维明,杨小森,等. 汶川地震古建筑轻度震害研究[J].

- 工程抗震与加固改造,2009,31(5):101-107.
- ZHOU Qian, YAN Wei-ming, YANG Xiao-sen, *et al.* Study on slight damage of a strengthened chinese ancient building under Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2009,31(5):101-107. (In Chinese)
- [8] 李嘉,张翎. AHP和模糊评价法相结合的公路网规划方案评价研究[J]. 中南公路工程,2006,31(2):51-59.
- LI Jia, ZHANG Yi. Research on method for evaluation of highway network planning based on the combination of fuzzy evaluation and AHP[J]. Central South Highway Engineering, 2006,31(2):51-59. (In Chinese)
- [9] 贾华. 层次分析法中权重算法的一种改进[J]. 武测科技, 1995,20(3):25-30.
- JIA Hua. An improved weighting algorithm in analytic hierarchy process[J]. WTUSM Bulletin of Science and Technology, 1995,20(3):25-30. (In Chinese)
- [10] 王强. 砖木结构房屋抗震性能评价方法研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所,2009:58-59.
- WANG Qiang. The methodological analysis on the assessment of the anti-seismic performance of the brick-wood building[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology,GEA, 2009: 58-59. (In Chinese)
- [11] 顾赫巍. 基于模糊综合评判理论的砖石古塔可靠性评价[D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2009:25-35.
- GU He-wei. Reliability appraisal on ancient stone pagodas based on fuzzy composite appraisal theory[D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2009:25-35. (In Chinese)
- [12] GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:43-44.
- GB 50007-2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011:43-44. (In Chinese)
- [13] GB 50165-92 古建筑木结构维护与加固技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1992:9-13,38-39.
- GB 50165-92 Technical code for maintenance and strengthening of ancient[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992:9-13,38-39. (In Chinese)
- [14] 古建筑木结构维护和加固规范编制组. 古建筑木结构可靠性评定原则及若干界限值的确定问题[J]. 四川建筑科学研究, 1994,20(2):2-7.
- Code drafting group of maintenance and strengthening of ancient timber buildings. Reliability assessment principle of ancient timber buildings and the determination of some boundary value[J]. Sichuan Building Science,1994,20(2):2-7. (In Chinese)
- [15] 姚侃,赵鸿铁,葛鸿鹏. 古建筑木结构榫卯连接特性的试验研究[J]. 工程力学,2006,23(10):168-173.
- YAO Kan, ZHAO Hong-tie, GE Hong-peng. Experimental studies on the characteristic of mortise-tenon joint in historic timber buildings[J]. Engineering Mechanics, 2006,23(10): 168-173. (In Chinese)
- [16] 王广军. 建筑地震破坏等级的工程划分及应用[J]. 世界地震工程,1993,13(2):40-46.
- WANG Guang-jun. Construction engineering division and the application of the earthquake damage level[J]. World Earthquake Engineering,1993,13(2):40-46. (In Chinese)
- [17] 赵世春,戴俭,潘毅,等. 汶川地震文化遗产建筑震害与保护对策[R]. 成都:西南交通大学土木工程学院,2011,60-66.
- ZHAO Shi-chun, DAI Jian, PAN Yi, *et al.* The seismic damage and protection measures of culture heritage buildings in Wenchuan Earthquake [R]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2011, 60-66. (In Chinese)
- [18] 王超. 木结构古建筑榫卯节点力学模型与抗震加固研究[D]. 成都:西南交通大学土木工程学院,2012.
- WANG Chao. Study of mechanics model and seismic strengthening of tenon-mortise joints in chinese ancient timber structure[D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2012. (In Chinese)
- [19] 侯实,曹永康,谭玉峰. 四川都江堰青城山黄帝祠震后抢修工程[J]. 古建园林技术,2011,30(2):22-26.
- HOU Shi, CAO Kang-yong, TAN Yu-feng. Emergency repair project of Yellow Emperor Temple in Dujiang Weir and Qingcheng Mountain after Wenchuan Earthquake[J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 2011,30(2):22-26. (In Chinese)