

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.136



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于模糊层次综合分析的残损状态纯木结构 安全评估方法

杨庆山¹, 赵剑波¹, 刘纲¹, 王娟²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 现存古建筑大多带伤服役, 体内残损状态复杂多样, 且对古建筑进行的加固维修与原有残损对结构本体的安全性能影响截然相反。为实现对古建筑的预防性保护, 需要量化古建筑纯木结构中的残损状态及修缮措施对其安全状态的影响。基于山西万荣飞云楼各构件残损状态普查统计数据, 结合现有规范及工程经验对构件残损状态等级详细划分, 建立 4 级模糊层次分析模型, 确定结构体中承重构件及构件残损类型的权重值及判断矩阵, 通过模糊层次分析方法对飞云楼进行安全状态评估。结果表明, 建立的模糊层次安全评价模型能反映残损状态及修缮措施对飞云楼安全状态的影响, 有效将结构评价与构件评价联系起来, 验证了修缮措施能有效增强古建筑结构本体的安全性及稳定性, 该模型及方法可以应用到多层古建木结构的安全等级评价中。

关键词: 飞云楼; 纯木结构; 残损状态; 修缮加固; 模糊层次分析方法; 安全评估

中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)01-0110-08

Safety assessment of wood structure in damaged state based on fuzzy analytical hierarchy approach

YANG Qingshan¹, ZHAO Jianbo¹, LIU Gang¹, WANG Juan²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

Abstract: Most of the existing ancient buildings are in service with injuries, and the internal damage state is complex and diverse. Meanwhile, the reinforcement and maintenance of the ancient buildings carried out by the later generations and the original damage have the opposite impact on the safety performance of the original structure. In order to realize the preventive protection of ancient buildings, it is necessary to quantify the impact of damaged state and repair measures of pure wooden structures on the safety state of ancient buildings. Based on the statistical data of the damaged state of various components of Feiyun Wood Pavilion in Wanrong, Shanxi Province, and combined with existing norms and engineering experience, this paper divides the damaged state of components in detail, establishes a four-level fuzzy hierarchical analysis model, and determines the weight value and judgment matrix of the load-bearing components and the damage types of components in the structure. The security state of Feiyun Wood Pavilion is evaluated by fuzzy analytical hierarchical approach. The results

收稿日期: 2023-08-03

基金项目: 重庆市科技计划(2022YSZX-JCX0013CSTB)

作者简介: 杨庆山(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构风工程和古建筑木结构研究, E-mail: qshyang@cqu.edu.cn。

Received: 2023-08-03

Foundation item: Chongqing Science and Technology Program Plan (No. 2022YSZX-JCX0013CSTB)

Author brief: YANG Qingshan (1968-), professor, doctoral supervisor, main research interests: structural wind engineering and ancient architectural wood structure research, E-mail: qshyang@cqu.edu.cn.

show that the fuzzy analytical hierarchy safety evaluation model established can reflect the damage state and the impact of repair measures on the safety state of Feiyun Wood Pavilion, effectively link structural evaluation with the component evaluation, and verify that the repair measures can effectively enhance the safety and stability of the ancient building structure. The model and method can be applied to the safety grade evaluation of multi-storey ancient wooden structures.

Keywords: Feiyun Wood Pavilion; wood structure; state of impairment; repair and reinforce; fuzzy analytical hierarchical approach; safety assessment

古建筑是中国传统文化的重要载体,其安全状态评估是实现由抢救性维护向预防性保护转变的重要前提。由于材性、人为和环境影响,现存古建筑往往带伤服役,且残损类型复杂多样、差异性大、难以量化,仅根据现行规范难以对古建筑整体安全状态进行评定。为了维持结构安全性能,人们对残损构件开展了不同程度的加固修缮,但残损与加固对结构安全性能的影响截然相反,目前仍缺乏详细的加固等级鉴定方法,导致安全评估更为困难。因此,综合考虑残损与加固的作用对古建筑安全状态评估具有重要意义。

目前,古建筑整体结构安全评估方法主要包括灰色理论、层次分析法等,这些方法能在一定程度上反映结构的安全状态,在实际工程中得到了广泛应用。郭小东等^[1-2]运用灰色白化权函数聚类法确定了结构安全等级和隶属度,基于灰色系统理论和模糊数学,提出了古建筑木结构灰色模糊安全性评估方法。徐帅等^[3]基于层次分析法,将古建筑木结构作为鉴定单元,从子单元、构件构造、检测项目3个层次进行评价,结果表明,层次分析法能综合利用抽样检测结果,评估结论具有一定可信度。徐志胜等^[4]利用层次分析法建立了古建筑火灾风险评估方法,但使用过程中需进行大量统计分析,对数据精确度有一定要求,因此存在一定的人为主观判断。

为使数据的获取更加灵活和广泛,同时降低人为判断带来的主观性,众多学者基于模糊理论发展了模糊层次综合评价方法,该方法能够更好地适应实际问题的复杂性和不完备性,充分考虑各种因素之间的模糊关系和相互影响,提高评价结果的准确性和可靠性。通过引入隶属度函数对评价因素与评价等级之间的从属关系模糊化,在钢筋混凝土、石拱桥等现代结构的损伤评定、加固优化中已得到成功应用^[5-6]。近年来,该方法逐步在砖石木结构、藏式石砌体等古建筑结构的安全评估中得到初步应用^[7-9],但该方法的评估精度取决于评估体系中指标的全面性与多样性,尚缺乏同时考虑古建筑体内残损状态和加固措施的相关报道。

笔者采用飞云楼构件状态普查统计数据,结合

现有规范及工程经验,对构件残损状态和加固措施进行等级划分细化,引入残损点和加固点作为评估指标,建立飞云楼模糊层次综合评价模型,厘清构件等级与结构等级之间的联系,使得对结构安全状况评估由构件层面上升至整体结构层面,并通过建立有无加固措施作为评价因素的两种评价体系,探究加固措施对古建筑安全状态的影响程度。

1 飞云楼现状

飞云楼地处山西省万荣县东岳庙内,楼身方形,层设明三层暗五层,楼高为23.19 m,楼身下设方形矮台基,东西宽为15.30 m,南北宽为15.30 m。1层面阔进深五开间,南北贯通,东、西两面筑有砖墙;2层暗层平面为折角十字,明层为正方形,各面凸出歇山抱厦;3层暗层平面为双十字花形,明层平面每面凸出垂莲柱式抱厦一间,半个十字歇山顶为顶,山花向外。飞云楼楼体内檐四角4根金柱直通3层平板枋下,柱高为15.00 m,由2段柱身拼接而成,柱间有额枋、间枋、地袱等多层枋木相连,形成一个正方形的井筒式结构,各层外檐与抱厦的结构梁枋与井筒结构相连^[10]。整个结构精巧繁复,美学与力学共存一体,其结构示意图如图1所示。

2015年修缮工作结束后,2016年结合无损检测制定了构件残损情况快速普查方法和构件损伤等

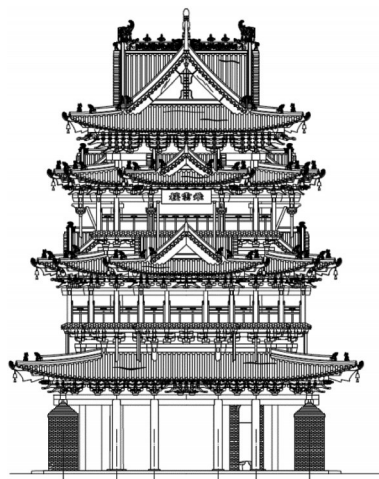


图1 飞云楼结构示意图

Fig. 1 The structure of Feiyun Wood Pavilion

级鉴定方法,对飞云楼进行相关构件普查统计(如表 1 所示),获得了 129 根木柱、204 根梁枋、212 朵斗拱的各类残损和加固修缮情况的实测数据(如图 2 所示),而后对飞云楼的构件等级进行评估^[11]。统计结果表明,飞云楼各构件残损类型包含材性、结构等多个方面,不同构件残损类型在种类、程度、位置等方面存在差异;无法简单地用数量来衡量裂缝的长度、深度残损对构件及结构的影响。

表 1 飞云楼快速普查项目及内容

Table 1 The rapid general survey items and contents of Feiyun Wood Pavilion

普查项目	具体内容
木柱残损状态	材质残损、柱础、倾斜变形、裂缝、残缺和先期加固
梁枋残损状态	材质残损、裂缝、残缺、变形、节点损伤和先期加固
斗拱残损状态	材质残损、裂缝、残缺和拔榫
木柱修缮措施	欠补、剔补、拉结、套箍、支顶立柱和替换
梁枋修缮措施	欠补、剔补、钉箍、套箍和替换

飞云楼体内存在大多古建筑木结构在安全状态鉴定过程中发现的共性问题:残损状态类型复杂多样、差异性大且部分残损类型难以量化,无法从构件残损状态获得结构整体的健康状况。更重要的是,大量构件存在先期加固措施,这些措施不同于残损状态对结构的损害作用,其部分恢复了构件及结构整体的承载能力。评估古建筑现状需要考虑修缮加固措施对结构的作用,但加固措施与残损状态对结构的影响不同,如何将多种残损类型与加固措施作为指标量化引入同一个评价体系成为问题的关键。

2 模糊层次分析方法安全评估

2.1 因素集与评价集

现有研究表明,古建木结构处于下部的结构层对整体结构的影响明显大于上部结构层^[12],故将飞云楼 1~3 层划分为层次分析法中第 1 层次因素集;考虑到飞云楼各层承重构件主要由木柱、梁枋和斗拱组成,只对承重构件进行评估既能减少构件鉴定工作量,又能保证安全评估具有较高的准确度,故各层的木柱、梁枋和斗拱为第 2 层次因素集;结构体中木柱、梁枋和斗拱存在的残损状态以及加固措施各不相同,针对各承重构件的残损状态和加固措施建立第 3 层次因素集;对于各构件的部分残损状态可从多角度去评价描述,将其作为第 4 层次因素集。飞云楼具体层次划分如图 3 所示。

另外,还需建立单独的一套评价集对各性能进行等级划分,根据因素集性质和特点,结合规范与工程经验划分 A、B、C、D 四个等级,每个等级分别



图 2 飞云楼局部残损状态及加固措施

Fig. 2 The part of damage status and reinforcement measures in Feiyun Wood Pavilion

对应安全、较安全、较危险、危险。

将柱、梁枋、斗拱设定为飞云楼安全评估分析的关键因素,围绕承重构件的残损状态建立下层因素集,多方面描述残损状态,层层叠进,搭建 4 层飞云楼安全模糊层次评价模型(见图 3)。

2.2 分级标准

考虑到各残损类型和修缮措施的特点,同时也为使评估结果更加客观,建立分级标准应从定量及定性两个方面考虑。

定量评价主要针对评价体系中材质残损、裂缝数量等残损类型和先期加固措施,以残损点和加固点为评价指标。采用王晓丽^[11]提出的残损点等级鉴

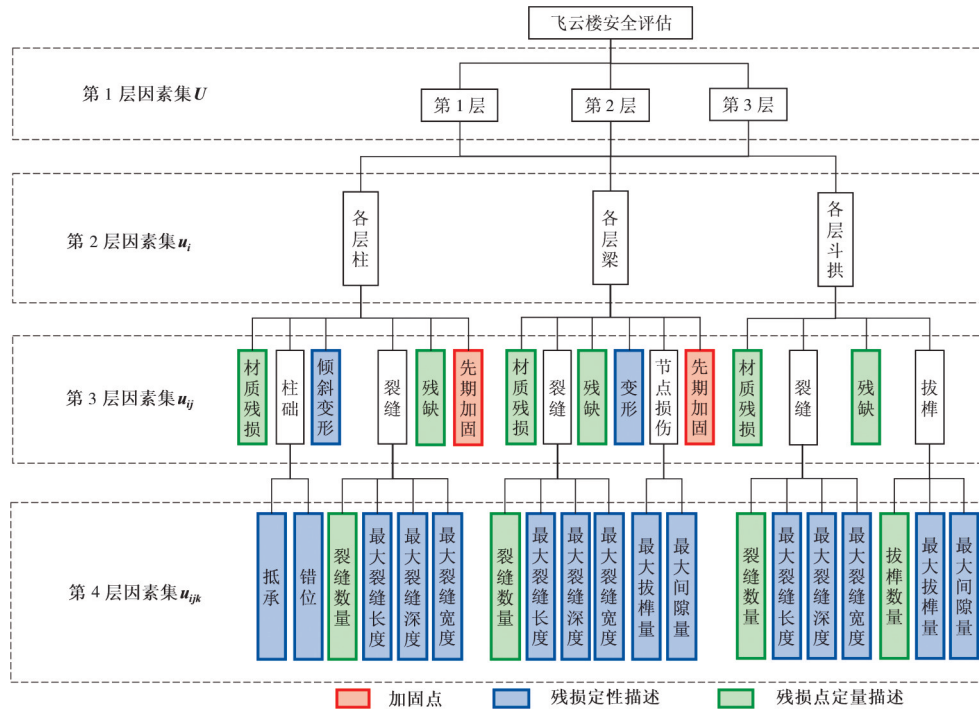


图3 飞云楼结构模糊层次评价模型

Fig. 3 The fuzzy hierarchical safety evaluation model of Feiyun Wood Pavilion

定划分,根据残损点数量将构件残损状态等级划分为A、B、C、D四个等级,残损点数量越多,构件的安全等级越低。

常见的对现存古建筑木结构构件的修缮加固措施主要有欠补、剔补、拉结、套箍、支顶立柱和替换等。规范^[13]中对加固等级的判定是基于木柱和梁枋的套箍、挖补、灌浆和拼接等检查项目的完好程度和现存状态。已有的分级标准无法包括古建筑各种加固手段,鉴定人员需具备较高的专业素养,且斗拱作为古建筑中重要的承重构件,尚未建立相应的加固等级鉴定标准。为简化鉴定环节,降低对专业鉴定能力要求,根据常见的修缮措施数量、残损是否得到修缮、加固对构件及整体可能带来的影响等多方面因素,将修缮加固措施视作点位,引入加固点作为指标,建立相应的加固等级鉴定方法。加固点数量越多,构件的安全等级越高,同样划分为A、B、C、D四个等级,见表2。

定性评价主要针对最大间隙量、最大拔榫量等残损类型。不能简单地以数量来衡量这些残损类型对构件的影响,需要根据残损类型自身的特点单独建立残损类型等级划分,并且同一种残损类型对承重木柱、梁枋和斗拱的影响程度不一样,需要分别对不同构件的残损状态进行定性等级划分。

定性残损类型的等级划分主要参考规范限值,规范^[13-14]中已给出危险状态与非危险状态的界限值,即B等级与C等级的界限值,未给出其他等级之间的界限值。在现有古建筑木结构残损点评估界

表2 加固点等级鉴定标准

Table 2 Grade evaluation standard of reinforcement points

评价等级	分级标准
A	构件中存在以往加固的3个或3个以上加固点,对构件关键承重位置着重修缮加强,大大提升构件的稳定性及安全性,延长了构件的正常使用状态
B	构件中存在以往加固的1~2个加固点,加强构件的稳定性,保证建筑物的正常使用
C	构件中不存在原有的加固点,且现有的残损点尚未得到加固,但还不影响建筑物的安全使用
D	构件中不存在原有的加固点,且现有的残损点尚未得到加固,但构件已处于危险状态,严重影响建筑物的安全使用,随时可能发生意外

注:快速普查项目为先期加固;评价指标为将先期加固作为加固点,考虑加固点对结构的加固作用。

限的研究中,提出规范中个别条文应按现场实际需要分类对待^[15];按照规范限值进行构件残损状态快速普查的准确性有待提高,可结合无损检测等手段,提出改进后构件残损等级鉴定指标^[11]。因此,为提高评估结果的客观性和准确性,定性残损等级划分应以规范要求为基础,结合工程实际情况及现有研究,通过特定的技术手段,确定更确切和符合古建筑残损现状的等级限值。以承重木柱为例,其具体等级鉴定标准按表3采用。

2.3 模糊权向量

各因素对结构评价的影响程度不同,需确定各因素在评价体系中所占权重,通常计算模糊权向量表示各因素的重要程度。一般方法是使用1~9标

表 3 承重木柱鉴定等级划分

Table 3 Classification of load-bearing timber columns

快速普查项目	评价指标	评价等级	残损情况
最大裂缝深度 h_1	根据柱身表面最大裂缝深度 h_1 与柱径 d 之比来衡量	A	$h_1/d \leq 1/8$
		B	$1/8 < h_1/d \leq 1/4$
		C	$1/4 < h_1/d \leq 1/2$
		D	$h_1/d > 1/2$
最大裂缝长度 l_1	测量裂缝走向和长度,取最大裂缝长度 l_1 比柱长 l	A	$l_1/l \leq 1/8$
		B	$1/8 < l_1/l \leq 1/4$
		C	$1/4 < l_1/l \leq 1/2$
		D	$l_1/l > 1/2$
最大裂缝宽度 b	根据柱身表面裂缝最大开裂宽度来衡量	A	$b \leq 6 \text{ mm}$
		B	$6 \text{ mm} < b \leq 13 \text{ mm}$
		C	$13 \text{ mm} < b \leq 20 \text{ mm}$
		D	$b > 20 \text{ mm}$
抵承	柱脚与柱础的抵承情况及抵承比例 S_1/S	A	$S_1/S \geq 3/4$
		B	$3/4 > S_1/S \geq 1/2$
		C	$1/2 > S_1/S \geq 1/4$
		D	$S_1/S < 1/4$
错位	测量柱脚与柱础的对位情况及错位距离 L_1/d_1	A	$L_1/d_1 \leq 1/15$
		B	$1/15 < L_1/d_1 \leq 1/7$
		C	$1/7 < L_1/d_1 \leq 1/4$
		D	$L_1/d_1 > 1/4$
倾斜变形	比较实测值与柱高/界限值的大小情况	A	$\delta < l/300$
		B	$l/300 < \delta \leq l/250$
		C	$l/250 < \delta \leq l/200$
		D	$\delta > l/200$

注: δ 为衡量柱身倾斜变形的参数。

度法,比较各因素的重要性程度,按重要性标度进行赋值,得到各层次因素集的判断矩阵 P ,表示为

$$P = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{m1} & u_{m1} & \cdots & u_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: u_{mn} 为各因素的重要性标度,其中 m 和 n 均表示各层级重要性比较的不同因素类型。

通过比较各因素重要性得到的判断矩阵,受判断者主观意愿与客观事物复杂性影响,很难一致性相合。矩阵构造时在一定范围内允许有不一致,但当不一致太大时,其最大特征根变大,特征向量偏差变大,从而导致误差过大^[9]。为限制由判断矩阵不一致引起的权向量误差过大,矩阵构造后需进行一致性检验,而后将特征向量归一化得到因素对应的模糊权向量 $W = (W_1, W_2 \cdots W_n)^T$ 。

以第 1 层因素集模糊权向量为例,计算结果如表 4 所示。

该权向量矩阵的特征向量为 $W = [0.701, 0.213, 0.085]^T$,权重结果经一致性检验,满足要求。

同理,明确各层因素集评价集权重顺序,进行

表 4 第 1 层因素集模糊权向量判断矩阵

Table 4 First layer factor set fuzzy weight vector

judgment matrix			
判断矩阵	第 1 楼层	第 2 楼层	第 3 楼层
第 1 楼层	1	4	7
第 2 楼层	1/4	1	3
第 3 楼层	1/7	1/3	1

各层模糊权向量计算。在第 1 层因素集中第 1 楼层所占权重最大,其次是第 2 楼层,第 3 楼层所占权重最小;在第 2 层因素集中斗拱所占权重值最大,其次是承重木柱,梁枋权重值最小,需符合“强柱弱梁、强节点强锚固”的原则;在第 3 层因素集中,承重木柱的残损状态权重值排序为柱础、倾斜变形、残缺、先期加固、裂缝、材质残损,梁枋的残损状态权重值排序为节点损伤、变形、先期加固、残缺、裂缝、材质残损,斗拱的残损状态权重值排序为残缺、拔榫、裂缝、材质残损;在第 4 层因素集中,对于柱础残损来说,错位权重值大于抵承权重值,而在裂缝残损细化指标中,最大裂缝深度所占权重值最大,其次是最大裂缝宽度、裂缝数量,最大裂缝长度所占权重值最小,在梁枋节点损伤残损细化指标中,最大拔榫量权重值大于最大间隙量权重值,与梁枋节点损伤相比,斗拱拔榫多引入拔榫数量来衡量斗拱组件数量多带来的残损,最大拔榫量权重值最大,其次是最大间隙量,拔榫数量权重值最小。

最终所得各层模糊权向量中,相同的残损状态在不同构件中的权重值存在较大差异,这是考虑到残损状态在不同结构类型中表现形式有区别,比如,残缺在斗拱中表现为组成构件的缺失,而对于木柱和梁枋则表现为结构本体木材大面积空缺,因此,对结构安全的影响程度也不同,如表 5 所示。

表 5 评价因素模糊权向量

Table 5 Fuzzy weight vector of evaluation factors

因素集	模糊权向量
第 1 层因素集	$W = [0.701, 0.213, 0.085]^T$
第 2 层因素集	$W_1 = [0.193, 0.083, 0.724]^T$
第 3 层因素集	$W_{i1} = [0.031, 0.459, 0.247, 0.052, 0.126, 0.085]^T$
	$W_{i2} = [0.030, 0.046, 0.074, 0.249, 0.459, 0.141]^T$
	$W_{i3} = [0.043, 0.127, 0.600, 0.231]^T$
第 4 层因素集	$W_{i12} = [0.333, 0.667]^T$
	$W_{i14} = W_{i22} = W_{i32} = [0.090, 0.045, 0.574, 0.291]^T$
	$W_{i25} = [0.75, 0.25]^T$
	$W_{i34} = [0.122, 0.648, 0.230]^T$

2.4 评判矩阵的确定

为建立各评价因素与评价等级之间的对应关系,需对各项因素对应等级做出相应评估,得到评判向量,集合各因素评判向量形成评判矩阵。但对

残损状态的评判中涉及定量和定性两套评判准则,例如,对裂缝的评判举证需要通过裂缝数量定量评判和对裂缝宽度、裂缝深度、裂缝长度定性评判,于是分别建立定量和定性体系下的评判向量的确定方法,由定量评判向量与定性评判向量共同组成评判矩阵 A_{ijk} 。

$$A_{ijk} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: a_{mn} 为各因素对应等级的评判因子,共同组成各因素评判向量。

在定量评价体系中,根据古建筑木结构构件残损情况的快速普查方法对飞云楼各构件进行残损状态普查统计,对构件中出现的残损点数量、加固点数量、分布恶化程度、对结构局部或整体可能造

成的影响根据等级划分标准进行安全等级评定。为简化评估方法,可按照层次分析法的基本原则,通过统计各评价因素下各等级构件的数量,按照比例分配确定定量评价体系中的底层评判向量。

对于考虑采用定性划分等级的残损状态,引入隶属度函数建立评价因素与评价等级之间的对应关系。岭形分布评价函数连续,计算简单,符合残损评价的实际情况^[16]。同时,残损状态测量值越大导致构件越偏于危险,故采用偏小型降岭形分布作为隶属度函数,假设构件评估因素对应残损测量值为 x ,规定 x_1 、 x_2 、 x_3 分别为从 A~D 等级之间的等级限值,为保证安全储备能力,扩大对 C 级划分区间,建立对应各等级的隶属度函数,可得式(3)~式(6),其隶属度函数曲线如图 4 所示。

等级 A 对应的隶属度函数为

$$G_A(x) = \begin{cases} 0, & x > (2x_1 + x_2)/3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{3\pi}{x_2 - x_1} \left(x - \frac{5x_1 + x_2}{6} \right), & x_1 < x \leq 2x_1 + x_2/3 \\ 1, & x \leq x_1 \end{cases} \quad (3)$$

等级 B 对应隶属度函数为

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

等级 C 对应隶属度函数为

$$G_C(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \frac{x_1 + 2x_2}{3} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{6\pi}{3x_3 - 2x_2 - x_1} \left(x - \frac{x_1 + 2x_2 + x_3}{4} \right), & \frac{x_1 + 2x_2}{3} < x \leq \frac{x_1 + 2x_2 + 3x_3}{6} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{3x_3 - 2x_2 - x_1} \left(x - \frac{9x_3 + 2x_2 + x_1}{4} \right), & \frac{x_1 + 2x_2 + 3x_3}{6} < x \leq x_3 \\ 0, & x > x_3 \end{cases} \quad (5)$$

等级 D 对应隶属度函数为

$$G_D(x) = \begin{cases} 0, & x \leq (x_3 + x_2)/2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{x_3 - x_2} \left(x - \frac{3x_3 + x_2}{4} \right), & (x_3 + x_2)/2 < x \leq x_3 \\ 1, & x > x_3 \end{cases} \quad (6)$$

飞云楼涉及承重构件数量多,将每一项检测结果带入隶属度函数确定影响因素评价等级的隶属度会造成步骤烦琐等问题。因此,通过隶属度函数确定底层因素集的各构件在不同残损状态下的隶属向量 $R = \{r_1, r_2, r_3 \cdots r_n\}$,对隶属向量归一化后确定该构件在该残损状态下的等级,再按照比例分配

法确定定性评价体系中的底层评判向量。

2.5 计算评价等级向量

每层因素模糊权向量 W_i^T 及评判矩阵 A_{ijk} 确定后,按式(7)分别确定评定等级向量 X_{ijk} 。

$$X_{ijk} = W_{ij}^T \cdot A_{ijk} \quad (7)$$

式中: i 为飞云楼层数; j 为承重构件,1 表示木柱,2

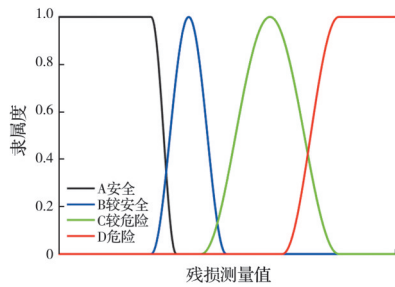


图 4 倾斜变形隶属度函数图

Fig. 4 Evaluation factor fuzzy weight vector membership function of inclined deformation

表示梁枋, 3 表示斗拱; k 为各残损类型。

评定等级向量 X_{ijk} 即代表每层模糊评价向量, 确定每层模糊评价向量后, 逐层计算, 最终按式 (8) 确定结构评定等级向量 X 。

$$X = W^T \cdot A \quad (8)$$

评定等级向量 X 即代表整体结构模糊评价向量, 可按照最大隶属度原则, 确定结构安全等级。按照模糊层次评价流程 (见图 5) 对飞云楼进行结构安全状态评估, 经计算可得 $X = W^T \cdot A = [0.924 \ 0.052 \ 0.023 \ 0.002]$, 表明飞云楼的安全等级评估为 A 级, 结构状态安全。

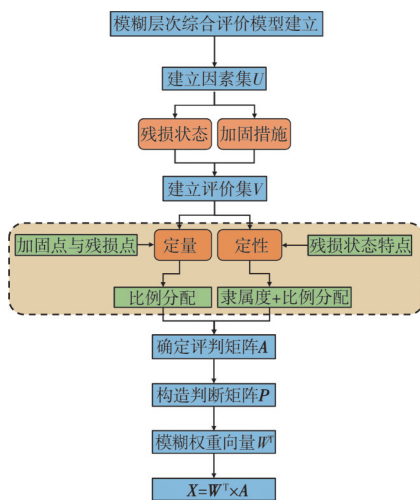


图 5 模糊层次评价模型建立流程

Fig. 5 Evaluation factor fuzzy weight vector membership function of inclined deformation

3 加固措施稳定效果评定

通过假设古建筑体内仅存在残损, 不存在任何对结构体修缮的加固措施, 建立仅有残损状态的评价体系, 在计算评判矩阵时, 去除加固措施的评价因素, 其他因素占比保持不变, 而后经过相同的模糊层次综合评估流程后可得到飞云楼相应的安全等级评估结果, 即 $X = W^T \cdot A = [0.854 \ 0.041 \ 0.010 \ 0.002]$ 。

与考虑残损和加固的模糊层次评价结果 $X =$

$[0.924 \ 0.052 \ 0.023 \ 0.002]$ 对比可看出, 在模糊层次安全等级评估中, 加固措施增大了结构对 A 等级的隶属度, 意味着对古建筑进行修缮加固的各类措施提高了结构的安全性, 增强了建筑结构的稳定性。

4 结论

应用 4 级模糊层次评价法对修缮后的飞云楼进行安全评估, 主要结论如下:

1) 基于 4 级模糊层次评价方法构建的体系框架体现了楼层与承重构件间的关系, 能从各层及各层承重构件的模糊评价结果中找出各层薄弱构件及整体结构的薄弱层, 同时考虑不同构件对结构安全状态的影响程度以及不同残损状态对同一构件安全状态的影响程度, 实现结构安全状态评估由构件层面上升至整体结构层面。对于其他古建筑类型, 可将建筑层数作为基本评价架构, 利用构件的多种残损状态和加固措施作为评价因素进行综合安全评估。

2) 评价体系中考虑了现存古建筑中残损状态与修缮措施并存的现状, 将两者对结构本身的负面及正面影响进行量化, 引入加固点和残损点作为评价指标; 另外还考虑到残损类型多样, 特点不一, 基于此原因将残损类型分为定量评价与定性评价, 并基于规范与工程经验, 针对定性评价提出一套评价分级标准。

3) 分别建立有无加固措施作为评价因素的两种评价体系来评估加固对古建筑安全状态的影响, 结果表明, 加固措施能有效加强古建筑结构安全状态。

参考文献

[1] 郭小东, 付体彪, 徐帅. 基于灰色白化权函数聚类法的木结构古建筑安全性评估[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(5): 780-785.
 GUO X D, FU T B, XU S. Safety assessment of timber ancient buildings based on grey clustering analytical method [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(5): 780-785. (in Chinese)
 [2] 郭小东, 徐帅, 宋晓胜, 等. 基于灰色模糊分析法的古建筑木结构安全性评估[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(3): 393-398.
 GUO X D, XU S, SONG X S, et al. Safety assessment of ancient timber buildings based on gray-fuzzy analytical method [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(3): 393-398. (in Chinese)
 [3] 徐帅, 郭小东, 黄瑞乾, 等. 基于层次分析法的古建筑木结构安全性评估方法[J]. 工业建筑, 2016, 46(12):

- 180-183.
XU S, GUO X D, HUANG R Q, et al. Safety assessment of ancient timber buildings based on analytical hierarchy process [J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(12): 180-183. (in Chinese)
- [4] 徐志胜, 刘顶立, 曹欢欢, 等. 基于AHP的古建筑火灾风险评估方法研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2015, 12(3): 690-694.
XU Z S, LIU D L, CAO H H, et al. Study on fire risk assessment of historic buildings based on AHP [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(3): 690-694. (in Chinese)
- [5] ZHOU J T, LIU L, LU P. Application of FAHP for stone arch bridge strengthening scheme optimization [J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2012, 18(7): 981-989.
- [6] HAMDIA K M, ARAFA M, ALQEDRA M. Structural damage assessment criteria for reinforced concrete buildings by using a fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Underground Space*, 2018, 3(3): 243-249.
- [7] 潘毅, 李玲娇, 王慧琴, 等. 木结构古建筑震后破坏状态评估方法研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(1): 132-142.
PAN Y, LI L J, WANG H Q, et al. Research on evaluation methods for post-earthquake damage state of ancient wooden buildings [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(1): 132-142. (in Chinese)
- [8] 秦本东, 李泉, 檀俊坤. 基于模糊层次分析法的砖石木结构古建筑安全评价[J]. *土木工程与管理学报*, 2017, 34(5): 52-59.
QIN B D, LI Q, TAN J K. Construct safety evaluation of the ancient masonry and wood buildings based on fuzzy analytic hierarchy process method [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2017, 34(5): 52-59. (in Chinese)
- [9] 白凡, 杨娜, 常鹏, 等. 基于模糊层次法的藏式砌体劣化风险权重系数试验标定研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(2): 158-164.
BAI F, YANG N, CHANG P, et al. Experimental calibration of risk weight coefficient of Tibetan masonry based on fuzzy analytic hierarchy method [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(2): 158-164. (in Chinese)
- [10] 张力中. 山西万荣县飞云楼大木作营造研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017: 20-21.
ZHANG L Z. Study on the construction of Feiyun building in Wanrong County, Shanxi Province [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017: 20-21. (in Chinese)
- [11] 王晓丽. 古建木结构承重构件残损状态快速普查及鉴定方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
WANG X L. Study on rapid general survey and identification method of damaged state of load-bearing members of ancient wooden structures [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [12] 滕东宇. 藏式石砌体静力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 106-107.
TENG D Y. Study on static performance of Tibetan stone masonry [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 106-107. (in Chinese)
- [13] 古建筑木构件安全性鉴定技术规范: LY/T 3141—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Technical code on appraisal rating for wooden member of ancient timber building: LY/T 3141—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [14] 古建筑木结构维护与加固技术规范: GB 50165—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
Technical code for maintenance and strengthening of ancient timber buildings: GB 50165—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [15] 乔冠峰. 古木楼阁飞云楼损伤机理与修缮保护研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017: 61-90.
QIAO G F. Study on damage mechanism and repair protection of Feiyun building in ancient wooden pavilions [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017: 61-90. (in Chinese)
- [16] 李玲娇. 基于模糊数学理论的古建筑震后评估方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 9-31.
LI L J. Research on post-earthquake evaluation method of ancient buildings based on fuzzy mathematics theory [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014: 9-31. (in Chinese)