

基于灰色白化权函数聚类法的木结构古建筑安全性评估

郭小东^{1,2}, 付体彪³, 徐 帅³

(1. 木结构古建筑安全评估与灾害风险控制国家文物局重点科研基地, 北京 100124;

2. 北京市历史建筑保护工程技术研究中心, 北京 100124; 3. 北京工业大学抗震减灾研究所, 北京 100124)

摘要: 为了评价木结构古建筑的安全性等级, 提出了一种基于灰色白化权函数聚类法的木结构古建筑安全性评估方法. 运用此方法分析了灵水村 114 号院南房的安全性, 首先运用层次分析方法(AHP)确定各指标子因素的权重, 再采用灰色白化权函数聚类法进行聚类分析, 按灰色聚类系数最大值原则确定结构的安全性等级及隶属度. 结果表明: 利用灰色白化权函数聚类法得到的木结构古建筑安全性等级与检测结果相同.

关键词: 灰色白化权函数聚类法; 层次分析法; 木结构古建筑; 安全性评估

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)05-0780-06

doi: 10.11936/bjtxb2016060034

Safety Assessment of Timber Ancient Buildings Based on Grey Clustering Analytical Method

GUO Xiaodong^{1,2}, FU Tibiao³, XU Shuai³

(1. Key Scientific Research Base of Safety Assessment and Disaster Mitigation for Traditional Timber Structure, State Administration for Cultural Heritage, Beijing 100024, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Historic Buildings Protection, Beijing 100024, China;

3. Institute of Earthquake Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To evaluate the safety level of the timber ancient buildings, grey whitenization weight function clustering method of timber ancient buildings was proposed in this paper. The safety of southern room, No114, lingshui village was analyzed by the method. Firstly, different weight of sub-factors of each index was determined by using analytic hierarchy process (AHP). Then cluster analysis was made by grey whitenization weight function clustering method. Furthermore, safety level and subordination degree of timber building was confirmed according to the principle of the maximum of grey clustering coefficient. The results show that the safety level of the timber ancient buildings obtained by grey whitenization weight function clustering method has good agreement with testing result.

Key words: grey whitenization weight function clustering method; analytic hierarchy process (AHP); timber ancient buildings; safety assessment

古建筑是中华民族的瑰宝,我国古建筑以木结构为主,历史悠久,具有很高的科学与文化研究价值.保护木结构古建筑的任务迫在眉睫,因此,合理的安全性评估对加固和保护木结构古建筑具有重要

意义.过去对于木结构古建筑的保护,由于缺乏对建筑物合理的安全性评估,很多工程人员往往根据经验进行加固,有些建筑物加固保护效果不甚理想,因此,木结构古建筑的安全性评估对保护这些珍贵

收稿日期: 2016-06-13

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAK01B03)

作者简介: 郭小东(1977—),男,副研究员,主要从事文化遗产防灾减灾方面的研究, E-mails: gxd@bjut.edu.cn

的文化遗产具有重要的意义。

目前,关于古建筑安全性评估的行业规范主要采用以定性鉴定为主、以定量鉴定为辅的评估方法。其他普遍使用的方法有层次分析法、静荷载试验评定法、残损状况指标法等^[1]。现行规范中关于木结构安全性量化评估方法方面的内容还较少,因此,补充相关安全性评估方法可以使评估结果更准确。

对于一些木结构古建筑,由于其结构的复杂性和文物保护等原因,部分构件无法使用仪器进行检测,即存在灰色信息(“灰色”的含义是指信息不完全性)。灰色白化权函数聚类法属于灰色系统理论,是由我国著名学者邓聚龙教授^[2]创立的“以部分信息已知,部分信息未知”的“少数据、贫信息”不确定系统为研究对象的一门系统科学。目前,灰色系统理论已经广泛应用于社会科学、工程技术的各个领域,如航空、信息等,都取得了显著的社会效益和经济效益^[3-4]。王威等^[5]提出了利用灰色聚类分析方法评估建筑结构可靠性的新方法,通过实例分析,证明采用该方法评价建筑结构的可靠性与传统方法相比具有简单、准确的优势。余慧等^[6]提出了历史建筑评价指标等级划分标准及量化标准,并依据灰色聚类法建立了历史建筑综合评价模型。在木结构古建筑的安全性评估方面,灰色聚类理论的应用还不广泛。

本文采用基于灰色白化权函数聚类的木结构古建筑安全性评估方法,对木结构古建筑的安全性等级进行评估。对工程人员评估并加固木结构古建筑具有参考作用。

1 灰色白化权函数聚类法

设有 n 个聚类对象, m 个聚类指标, s 个不同灰类。根据第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个对象关于 j ($j=1, 2, \dots, m$) 指标的样本值 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) 将第 i 个对象归入第 k ($k=1, 2, \dots, s$) 个灰类之中,称为灰色聚类^[2,4]。灰色白化权函数聚类是灰色聚类的一种,是将聚类对象对于不同的聚类指标所拥有的白化数,按几个灰类进行归纳,通过计算所有指标的综合效果,判断聚类对象所属类型。其具体做法是要根据拟划分的灰类和对应的聚类指标,设定白化权函数,确定不同聚类指标的权重,并据此计算灰色聚类系数。

1.1 聚类指标以及聚类灰类

该文的研究对象为木结构古建筑安全,聚类对

象为需要评估的木结构建筑,聚类指标是木结构安全评价指标,聚类灰类是木结构的安全性等级。

1.2 白化权函数

将 n 个对象关于指标 j 的取值相应地分为 s 个灰类,称之为 j 指标子类。 j 指标 k 子类的白化权函数记为 $f_j^k(\cdot)$ ^[4]。一般白化权函数是由转折点决定的在 $[0, 1]$ 上取值的分段线性函数。对于所有的聚类指标都必须确定对应于各灰类的白化权函数,这是灰色聚类评估的关键步骤。而评价结果的准确性与白化权函数的构造有直接的关系,因此,白化权函数不同相当于评价准则不同,其评价结果也可能不同。木结构古建筑安全性评估的白化权函数可根据各指标分级标准与实践经验结合确定。

1.3 灰色聚类权值^[4]

设 λ_j^k 为 j 指标 k 子类的临界值,则

$$\eta_j^k = \lambda_j^k / \sum_{j=1}^m \lambda_j^k \quad (1)$$

为 j 指标 k 子类的权,由此可计算得到各聚类指标对各子类的灰色聚类权值。

1.4 灰色聚类系数

设 x_{ij} 为对象 i 关于指标 j 的观测值(即评估量化值),则

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \eta_j^k \quad (2)$$

称为对象 i 属于灰类 k 的灰色聚类系数。

灰色白化权函数聚类法的其中一种模型为灰色变权聚类评估模型。当聚类指标的量纲含义不同,或者在数量上差异悬殊时,采用灰色变权聚类可能会导致某些指标参与聚类的作用十分微弱。此时不宜应用灰色变权聚类模型。解决的一种途径是:先采用初始化合算子将各个指标样本值化为量纲一数据,并归一化,然后进行聚类分析^[4]。本文采用此方法进行安全性评估。

灰色白化权函数聚类法评估木结构古建筑安全性的步骤如下^[7]:

- 1) 确定聚类指标、聚类灰类,并对聚类指标进行量纲归一化;其中聚类指标是指木结构安全评价指标(裂缝、变形、承载能力等)。
- 2) 通过专家评估各主要构件检测项目的等级,得到各聚类指标对等级的隶属度矩阵,利用层次分析法得到木构架整体各聚类指标的等级量化值。
- 3) 确定所有的聚类指标对应于各聚类灰类的白化权函数。
- 4) 根据各聚类指标及其子类相对应的临界值

确定各指标灰色聚类权值。

5) 根据白化权函数、聚类指标样本值以及聚类权值,确定灰色聚类系数。

6) 根据灰色聚类最大值原则(即灰色聚类系数最大值所对应的灰类作为聚类对象所属灰类),判断聚类对象所属灰类,进行安全性等级评估。

2 案例分析

2.1 工程概况

灵水村114号院南房,建于清朝末年,位于北京市门头沟区斋堂镇灵水村。该房屋为旧式单层木骨架双面坡合瓦屋面房屋,基础为柱础形式,结构高度(室外地坪至屋顶半坡高度)为3.95 m,檐口高度(至室内地面)为2.90 m。该建筑檐柱截面尺寸为D240 mm,檩条截面尺寸为D180 mm,三架梁和五架梁的截面尺寸均为300 mm×300 mm。其平面布置如图1所示。

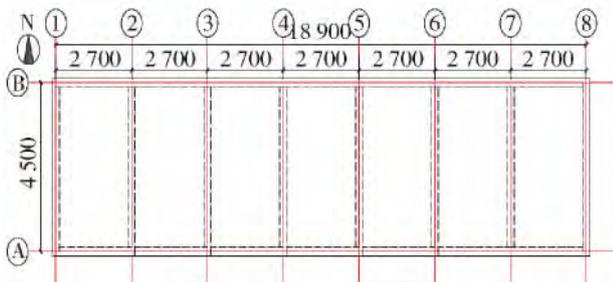


图1 114号院南房结构平面布置图

Fig.1 Structure plan of southern room, No.114

2.1.1 划分鉴定子单元和构件并编号

依据现行标准《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB50292—2015)^[8]和《古建筑结构安全性鉴定技术规范 第一部分:木结构》(DB11/T1190.1—2015)^[9],古建筑安全性鉴定项目应分为构件、子单元、鉴定单元3个层次。其中构件的等级划分为 a_u 、 b_u 、 c_u 、 d_u ;子单元的等级划分为 A_u 、 B_u 、 C_u 、 D_u ;鉴定单元的等级划分为 A_{su} 、 B_{su} 、 C_{su} 、 D_{su} 。本文以整个南房为一个鉴定单元,将其分为上部承重结构、围护结构和地基基础3个子单元。根据轴网编号对构件进行逐一编号。以整个南房为一个鉴定单元,将其分为上部承重结构、围护结构和基础3个子单元。根据轴网编号对构件进行逐一编号。

2.1.2 检测内容与检测方法

依据现行标准^[8-9],木结构古建筑现状检测应包括地基基础、上部承重结构和围护结构3个部分。其中上部承重结构的检测包括以下内容:

1) 结构构件及其连接,包括材料强度、构件之间的连接形式。

2) 结构缺陷与损伤情况,包括构件的木节、裂缝等缺陷,与木材的虫蛀、空洞、腐朽等损伤。

3) 结构变形与位移,包括层间位移、构件的挠度与倾斜。围护结构的检测应包括围护墙体的歪闪、风化以及与主体结构连接,屋面的塌陷与渗漏情况。地基基础应包括地基的沉降、裂缝、变形等。

木构件内部缺陷检测可采用经验检查法和非破损检测法。其中经验检查法是依靠有经验的检测人员,目视检查构件外观质量,同时锤击构件,根据声音变化判断构件内部缺陷。非破损检测法可用微钻阻力仪检测和应力波检测。

2.1.3 初步检测情况

该建筑外观损坏情况较严重,主要存在下列问题:

1) 多数柱存在柱根腐朽、顺纹开裂等现象,如图2(a)所示。

2) 梁、枋普遍存在局部顺纹开裂现象,部分梁、枋与柱的连接节点存在拔榫现象,如图2(b)所示。

3) 檐檩、椽条存在较严重的渗漏、霉变现象,如图2(c)所示。

4) 围墙风化严重,山墙向北倾斜明显且已经开裂,如图2(d)所示。

5) 屋面普遍存在较严重的渗漏现象,其中3-B(见图1)轴线附近的屋面塌陷严重。

6) 利用阻抗仪检测木材内部结构缺陷,确定是



图2 建筑外观损坏情况

Fig.2 Damage of exterior of the structure

否存在内部缺陷,其中对 6-B 柱(见图 1)在距柱础 1.07 m 处由南向北进针进行检测,检测结果见图 3。检测结果显示从内侧进针约 7 cm 处有长度约 2 cm 的空洞分布,与现场检测的表面裂缝一致。

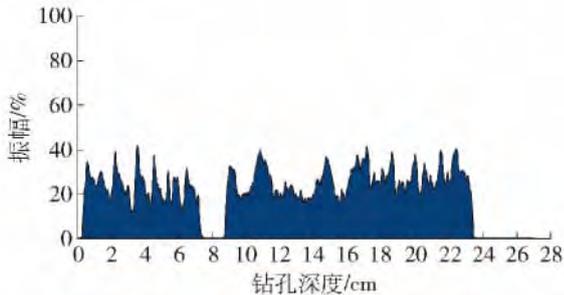


图 3 6-B 柱距柱础 1.07 m 处由南向北阻抗仪进针

Fig.3 Insert impedance from the south to the north at a distance of 1.07 m at the bottom of the column 6-B

2.2 灰色聚类法安全性评估

2.2.1 确定聚类指标与聚类灰类

根据工程实践经验,可取以下 6 个聚类指标:裂缝、变形、承载能力、构造与连接、虫蛀、糟朽。这些聚类指标不是相互独立的,其间存在错综复杂的

关联。综合考虑以上聚类指标,可以更全面有效地评估结构的安全性状况。

整体结构的聚类指标等级取决于结构中各主要构件的等级,由专家评分确定主要构件的等级量化值,对应得到整体结构各个聚类指标的等级量化值。

上部承重结构的承载能力主要取决于梁、柱、枋、椽、檩等 5 类构件的承载能力。本文上部承重结构构件的承载力等级评估准则依据现行标准^[8-9],如表 1 所示。

表 1 木结构构件及其连接承载力等级评估

Table 1 Bearing capacity grade assessment of timber member and connection

构件类别	$R/(\gamma_0 S)$			
	a_u 级	b_u 级	c_u 级	d_u 级
	≥ 1.00	≥ 0.95	≥ 0.90	< 0.90

注:表中 R 为结构或构件抗力; S 为结构或构件的作用效应; γ_0 为结构重要性系数。

其他 5 个聚类指标的分级及量化相同,整理得各聚类指标的灰类等级划分见表 2。

表 2 各聚类指标灰类等级划分

Table 2 Grey grades of clustering indexes

聚类灰类 k	聚类指标 j					
	裂缝	变形	承载能力	构造与连接	虫蛀	糟朽
a_u	[0.80, 1.00]	[0.80, 1.00]	[0.80, 1.00]	[0.80, 1.00]	[0.80, 1.00]	[0.80, 1.00]
b_u	[0.60, 0.80]	[0.60, 0.80]	[0.60, 0.80]	[0.60, 0.80]	[0.60, 0.80]	[0.60, 0.80]
c_u	[0.30, 0.60]	[0.30, 0.60]	[0.30, 0.60]	[0.30, 0.60]	[0.30, 0.60]	[0.30, 0.60]
d_u	[0.00, 0.30]	[0.00, 0.30]	[0.00, 0.30]	[0.00, 0.30]	[0.00, 0.30]	[0.00, 0.30]

裂缝、虫蛀、糟朽、构造与连接、变形这 5 个聚类指标都通过结构主要承重构件梁、柱、枋、椽、檩来评估。

对上部承重结构的构件检测并进行评估,根据构件等级划分结果,统计各类构件(比如梁、柱、枋等)隶属于不同等级的数量,得到各类构件的等级隶属度矩阵。

以聚类指标——裂缝为例进行评估(其他聚类指标评估方法相同),由专家对上部承重结构的各类主要构件的裂缝进行评估,最终确定结构的裂缝等级。设上部承重结构的主要构件集为 K (梁、柱、枋、椽、檩) = $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5)$,其中 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 的取值分别为对应等级各类构件的数量。经统计后

裂缝的等级评价表见表 3。

2.2.2 确定各指标的隶属度矩阵 T

对表 3 中的各数据均除以各类构件总数并转置,可得到裂缝指标对等级的隶属度矩阵 T_1 。

表 3 主要构件裂缝评价表

Table 3 Crack evaluation of domination member

等级	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
a_u	16	13	50	0	34
b_u	0	1	14	280	14
c_u	0	2	0	0	0
d_u	0	0	0	0	0

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.81 & 0.06 & 0.13 & 0.00 \\ 0.78 & 0.22 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.71 & 0.29 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

2.2.3 确定各个因素的重要性权重向量 $w^{[10]}$

记裂缝、变形、承载能力、构造与连接、虫蛀、糟朽等指标分别为 $N_1、N_2、N_3、N_4、N_5、N_6$ 。建立各聚类指标对主要构件集 K 的判断矩阵 P_i (i 取 1、2、3、4、5、6)，并利用方根法对判断矩阵进行计算和一致性检验。参考文献 [11] 判断矩阵 P_1 的计算结果见表 4。

$$P_i = \begin{bmatrix} k_{11}^i & k_{12}^i & k_{13}^i & k_{14}^i & k_{15}^i \\ k_{21}^i & k_{22}^i & k_{23}^i & k_{24}^i & k_{25}^i \\ k_{31}^i & k_{32}^i & k_{33}^i & k_{34}^i & k_{35}^i \\ k_{41}^i & k_{42}^i & k_{43}^i & k_{44}^i & k_{45}^i \\ k_{51}^i & k_{52}^i & k_{53}^i & k_{54}^i & k_{55}^i \end{bmatrix}$$

矩阵中的数值为不同构件相对重要性之比，例如 k_{12}^1 表示柱与梁关于裂缝指标的重要性之比。

当 $R_c < 0.1$ 时，可认为判断矩阵的一致程度在容许范围内，有满意的一致性，由表 4 知，可认为判断矩阵通过一致性检验。裂缝指标的重要性权重 $\eta_1 = 1 / (1 + 1 + 1/4 + 1/2 + 1) = 0.267$ ，其他同理，故其重要性权重向量为 $w = (0.267, 0.267, 0.067, 0.133, 0.267)$ 。裂缝指标的综合评价隶属度为 $S_1 = w \times R_1 = (0.725, 1, 0.241, 2, 0.035, 0.000, 0)$ ，因此其评价等级量化值为

$$V_1 = 0.725 \times 1 \times 0.90 + 0.241 \times 2 \times 0.70 + 0.035 \times 0.45 + 0 \times 0.15 = 0.84$$

其中 0.90、0.70、0.45、0.15 为各等级界限值的中间值。同理，对于其他聚类指标，按照以上方法计算出各指标的等级量化值，见表 5。

表 4 判断矩阵 P_1 及其检验结果

Table 4 Judgment matrix of P_1 and its inspection result

项目	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	λ_{max}	I_c	I_R	R_c
k_1	1	1	1/4	1/2	1				
k_2	1	1	1/4	1/2	1				
k_3	4	4	1	2	4	5.0	0.0	1.12	0.0 < 0.1
k_4	2	2	1/2	1	2				
k_5	1	1	1/4	1/2	1				

注： λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值，其值等于判断矩阵 P_1 的阶数 n ； I_c 为一一致性检验指标，表示判断矩阵偏离一致性的程度，其计算公式为 $I_c = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ ； I_R 是对 I_c 的修正系数，由表查得出； R_c 为随机一致性比率 $R_c = I_c / I_R$ 。

表 5 各聚类指标等级量化值

Table 5 Grey grades quantized value of clustering indexes

木结构安全性评估主要影响因素						
聚类指标	裂缝	变形	承载能力	构造与连接	虫蛀	糟朽
等级量化值	0.84	0.81	0.85	0.75	0.74	0.65

$$f_1^2(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0.60, 1.00] \\ \frac{x - 0.60}{1.00 - 0.60}, & 0.60 \leq x < 0.80 \\ \frac{1 - x}{1.00 - 0.80}, & 0.80 \leq x < 1.00 \end{cases} \quad (4)$$

$$f_1^3(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0.30, 0.80] \\ \frac{x - 0.30}{0.60 - 0.30}, & 0.30 \leq x < 0.60 \\ \frac{0.80 - x}{0.80 - 0.60}, & 0.60 \leq x < 0.80 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_1^4(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0.00, 0.30] \\ \frac{x - 0.30}{0.60 - 0.30}, & 0.30 \leq x < 0.60 \\ 1, & 0.00 \leq x < 0.30 \end{cases} \quad (6)$$

2.2.4 构造白化权函数

聚类指标——裂缝的白化权函数表达式为

$$f_1^1(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0.80, \infty) \\ \frac{x - 0.80}{1.00 - 0.80}, & 0.80 \leq x < 1.00 \\ 1, & x \geq 1.00 \end{cases} \quad (3)$$

同理，可以得出其余各个聚类指标的白化权函数表达式。

2.2.5 灰色聚类权值

由表2可知所有聚类指标对各子类的临界值。根据式(1)容易得到第 j 个指标对第 k 个等级的聚类权为 $\eta_j^k=0.167(j=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots,s)$ 。

2.2.6 确定灰色聚类系数

由式(2)可求得 $\sigma_1^1=0.084$, $\sigma_1^2=0.701$, $\sigma_1^3=0.217$, $\sigma_1^4=0.000$ 。很容易看出 $\sigma_1^2>\sigma_1^3>\sigma_1^1>\sigma_1^4$,按照灰色聚类系数最大值原则,上部承重结构安全性等级隶属于 B_u 级的程度最大,建议判定安全性等级为 B_u 级。由于 $\sigma_1^4=0.000$,上部承重结构安全性等级隶属于 D_u 级的程度几乎为零。

2.2.7 安全性评估结果

木结构古建筑的安全性等级鉴定,划分为构件、子单元、鉴定单元3个层次。分别鉴定每一受检构件的等级,并取其中最低一级作为该构件的安全性等级;根据构件及子单元各检测项目的评定结果确定子单元等级;根据子单元等级确定单元的等级。结合基础和围护结构的检测结果:柱础子单元的安全性评级为 B_u 级;围护墙普遍存在严重的风化和酥碱现象,东、西两端山墙存在明显的倾斜、开裂现象,外墙及门窗存在明显外闪、前倾现象。根据损伤程度,该围护结构的安全性等级评为 D_u 级。根据地基本基础和上部承重结构的判定结果,该建筑的安全性等级判定为 B_{su} 级。而依据现行标准^[9],当鉴定单元的安全性等级按照地基本基础和上部承重结构的结果判定为 B_{su} 级,而围护结构的等级为 D_u 级时,可将鉴定单元的等级降低一级或二级,最终等级不应低于 C_{su} 级。故该建筑的安全性等级评为 C_{su} 级。

3 结论

1) 灰色白化权函数聚类法不仅能按灰色聚类系数最大值原则确定木结构古建筑的安全性等级,并且可以准确得到研究对象隶属于不同等级的隶属度,这更有利于了解研究对象的全面信息。

2) 灰色白化权函数聚类法用于木结构古建筑的安全性评估,利用“贫信息”得到整体结构的安全性等级,用定量结果补充定性结果,结果明确可靠。可建立聚类指标量化评级标准、权重向量、白化权函数的数据库和评估系统,以便应用时更加便捷、准确,且评价准则得到统一,结果更权威。

3) 木结构古建筑的安全性评估由于评价指标的子因素较多,且存在相对性和模糊性,普通评估方法难以定量评估。应用灰色白化权函数聚类法,可以得到相对合理的安全性等级及隶属度。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 412-413.
- [3] 肖新平,毛树华. 灰预测与决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1.
- [4] 刘思峰,谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 6版. 北京: 科学出版社, 2013: 11-85.
- [5] 王威,韩阳,赵月平. 灰色聚类分析在建筑结构可靠性评定中的应用[J]. 工业建筑, 2006, 36(增刊1): 235-237.
WANG W, HAN Y, ZHAO Y P. Application of grey cluster analysis to building construction reliability assessment [J]. Industrial Construction, 2006, 36(Suppl 1): 235-237. (in Chinese)
- [6] 余慧,刘晓. 基于灰色聚类法的历史建筑综合评价评价[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(5): 240-242.
YU H, LIU X. Appraising method of comprehensive value of historic buildings based on grey clustering method [J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(5): 240-242. (in Chinese)
- [7] 陆洲导,李灿灿,李刚. 灰色聚类法在已有建筑物可靠性鉴定中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(7): 874-879.
LU Z D, LI C C, LI G. Application of grey clustering method to appraisal of reliability of existing buildings [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(7): 874-879. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑可靠性鉴定标准: GB50292—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [9] 北京市文物局. 北京地方标准 古建筑结构安全性鉴定技术规范 第1部分: 木结构 DB11/T 1190. 1—2015[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2015.
- [10] 王化中,强凤娇,陈晓敏. 模糊综合评价中权重与评价原则的重新确定[J]. 统计与决策, 2015(8): 24-27.
WANG H Z, QIANG F J, CHEN X T. The redetermination of the weight and the principle of evaluation in fuzzy comprehensive evaluation [J]. Statistics & Decision, 2015(8): 24-27. (in Chinese)
- [11] 孙宏才,田平,王莲芬. 网络层次分析法与决策科[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 33-47.

(责任编辑 郑筱梅)