

CONTENTS

[Artificial Intelligence]

Gasoline Station Sales Prediction Method Based on Deep Learning and Its Application of Promotion Strategy ..... LU Chenhui, FENG Shuo, YI Aihua, YE Xiaojun ( 1 )

Base Station Network Traffic Prediction Method Based on Wide & Deep Learning ..... CHEN Haojie, HUANG Jin, ZUO Xingquan, HAN Jing, ZHANG Baisheng ( 7 )

Improved Co-training Semi-supervised SVM and Its Application in Oil Layer Recognition ..... PAN Yongke, HE Ziping, XIA Kewen, NIU Wenjia ( 14 )

An Improved Ghost-YOLOv5 Infrared Target Detection Algorithm Based on Feature Distillation ..... LI Beiming, JIN Ronglu, XU Zhaofei, LIU Qing, WANG Shuigen ( 20 )

Application of Improved PSO-BPNN Algorithm in Corroded Pipelines Prediction ..... XIAO Bin, ZHANG Hengbin, LIU Hongwei ( 27 )

Identification of Butterfly Species in the Wild Based on YOLOv3 and Attention Mechanism ..... ZHOU Wenjin, LI Fan, XUE Feng ( 34 )

An Adaptive Pheromone Evaporation Coefficient Based Ant Colony Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks ..... WANG Gong, SUN Mingyang, SUN Huiyang, TENG Ziming ( 41 )

[Mechanical Engineering]

Direct Torque Control of Switched Reluctance Motor Based on Cubic Torque Sharing Function ..... BAI Guochang, WU Hesong, ZHENG Peng ( 48 )

Numerical Simulation and Experimental Investigation of Droplet Splitting in Symmetric Y-type Bifurcation Microchannels ..... ZHENG Yanping, ZHANG Ruigen, LIANG Shuai, LI Yang, XU Gang, SHU Haitao ( 55 )

Design and Research of Wrist Rehabilitation Device Driven by Bending Pneumatic Muscle ..... HAN Kunfeng, LIU Yanhong, MAO Xiaobo, ZHANG Jidong, WANG Wei, LU Peng ( 62 )

[Civil Engineering]

Evaluating Technical Condition of Stone Arch Bridge Based on Entropy Method-Cloud Model ..... ZHANG Peng, ZHONG Shan, ZHU Rui, JIAO Meiju ( 69 )

Analysis of Existing Tunnels Deformation Induced by New Othogonal Tunneling Using Park Convergence Model ..... JIN Junwei, FU Boyi, CHEN Yunbin, LIU Gangli, LI Mingyu ( 76 )

Five-phase Mesoscopic Numerical Simulation of Chloride Permeation Resistance in Recycled Aggregate Concrete ..... JIN Libing, YU Hualong, WANG Zhenqing, XUE Pengfei, WU Qiang ( 83 )

[Network Security and Others]

Proactive Defense Model Based on Non-Zero-Sum Signal Game ..... HUANG Wanwei, YUAN Bo, WANG Sunan, ZHANG Xiaohui ( 90 )

Research on Current Harmonic Suppression Strategy of the LCL Grid-connected Inverter ..... LIU Haiyang, DONG Lianghui, GAO Jinfeng, WANG Yaoqiang, HUANG Wenjian ( 97 )

Blockchain-based Secure Data Sharing Mechanism Design in the Vehicular Networks ..... LI Yongqiang, LIU Zhaowei ( 103 )

文章编号:1671-6833(2022)01-0069-07

# 基于熵权法-云模型的石拱桥技术状况评定

张 鹏, 钟 山, 朱 锐, 焦美菊

(郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对现行石拱桥技术状态评定过程中不同技术人员对病害标度认定存在差异的问题,提出了一种基于熵权法-云模型的石拱桥技术状况评定方法。在现有石拱桥评定标准的基础上,首先将评语集、评定数据转换为云模型;再用熵权法对石拱桥部件间的权重进行调整,并引入组合模糊贴近度方法计算相似度获得评定结果;最后以某石拱桥为例,探究该方法在石拱桥技术状况评定中的适用性。结果表明:该石拱桥评价结果为 4 类,云模型的评价结果与《公路桥梁技术状况评定标准》方法得到的结果一致,符合现场检查结果。该方法考虑了病害标度确定的主观随机性和工程项目实际的差异性,其评价结果可以为石拱桥养护提供更加科学合理的决策依据。

**关键词:** 桥梁工程; 技术状况; 云模型; 熵权法; 石拱桥

**中图分类号:** U448.22

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2022.01.002

## 0 引言

石拱桥在我国建造历史悠久,因其取材方便、工艺简单、造价低廉,广泛应用于公路建设中<sup>[1]</sup>。随着荷载等级不断提高以及自然环境的侵蚀,大量在役石拱桥存在严重的安全隐患<sup>[2]</sup>。因此,在役石拱桥的技术状况评定成为一个迫切需要解决的问题。《公路桥梁技术状况评定标准》<sup>[3]</sup>(以下简称评定标准)中的评定方法是进行石拱桥结构养护和技术状况评定最为常规的方法,但评定标准对某些病害标度仅进行定性描述,病害标度的确定十分依赖工程技术人员自身的工作经验。在评定过程中具有较强的模糊性、随机性、差异性,且相邻标度的扣分值变化幅度过大,加剧结果的跳跃性,极易造成石拱桥技术状况评定的“误诊”。

针对上述问题,众多学者尝试采用可靠度理论、层次分析法、模糊理论等手段改进评定标准中桥梁技术状况评定方法的不足<sup>[4-5]</sup>。以上模型方法大多只考虑了不确定性中随机性或模糊性的某一方面,因此难以对桥梁真实技术状况做出全面、客观的评价。而云模型专门研究随机性、模糊性

以及两者之间的关联性<sup>[6]</sup>,已被广泛应用于其他学科领域,但在桥梁工程方面的应用相对较少。许翔等<sup>[7]</sup>在层次分析法的基础上,建立正态云模型对悬索桥技术状况进行评定,有效地解决了模糊评定方法中隶属度函数难以确定的问题,但该方法特异性较强,难以广泛转移应用于同类桥梁评定。周建庭等<sup>[8]</sup>将云模型应用于桥梁技术状况评定,从部件层次出发搭建云模型,并考虑了主要结构部件对桥梁整体安全的影响,使模型更加符合实际工程情况,但该模型仅考虑到部件层次,忽视了评价指标体系中构件病害层次,结果的全面性有待商榷。

鉴于此,本研究主要针对石拱桥病害标度定性描述的模糊性与不确定性,尝试将云模型应用于石拱桥的技术状况评定。为了体现不同专家在具体项目中对指标重要性的认知差异,利用熵权法优化评定标准中部件权重的再分配方式。最终构建了基于熵权法-云模型的石拱桥技术状况评定模型。最后以河南省某石拱桥为例进行分析评价,验证了该评定方法具有一定程度的科学性、合理性与可行性,可为石拱桥技术状况评定的研究提供参考。

**收稿日期:**2021-06-30;**修订日期:**2021-07-28

**基金项目:**河南省杰出青年科学基金资助项目(212300410018);河南省高校科技创新团队支持计划(20IRTSTHN009)

**作者简介:**张鹏(1978—),男,河南方城人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事土木工程结构与材料性能研究,E-mail:zhangpeng@zzu.edu.cn。

1 熵权法-云模型的基本原理

1.1 熵权法

熵权法是一种对评价指标客观赋权的方法,通过计算评价结果的信息熵进而确定各评价指标的权重<sup>[9]</sup>。其计算步骤如下。

(1)构建  $n$  个评价对象,  $m$  个评价指标的判断矩阵  $X$ :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2)标准化处理:

$$\tilde{z}_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj})}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj})} \quad (2)$$

(3)确定指标信息熵值  $e_j$ :

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, \quad j = 1, 2, \cdots, m. \quad (3)$$

式中:  $p_{ij} = \frac{\tilde{z}_{ij}}{\sum_{i=1}^n \tilde{z}_{ij}}$ 。

(4)确定评价指标的熵权:

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m 1 - e_j}, \quad j = 1, 2, \cdots, m. \quad (4)$$

1.2 云模型

云模型是李德毅等<sup>[6]</sup>提出的一种研究定性概念与定量描述不确定之间转换的数学理论。其定义如下:假设  $U$  是一个定量论域,  $C$  是  $U$  上的定性概念,若定量数值  $x$  既属于  $U$ , 又是  $C$  的一次随机实现,如果  $x$  对  $C$  的确定度  $\mu(x) \in [0, 1]$  是有稳定倾向的随机数,则称  $x$  为一个云滴,  $x$  在  $U$  上的分布即为云模型。云模型用  $(Ex, En, He)$  表示一个定性概念的数字特征,其中,  $Ex$  为云滴所在论域区间的期望;  $En$  为熵,表示定性概念的不确定性;  $He$  为超熵,是熵的熵,表示熵的不确定性。

1.2.1 标准评语云的确定

根据评语集不同的形式确定标准评语云的数字特征值  $(Ex_{V_i}, En_{V_i}, He_{V_i})$ , 对于存在双边界  $[x_{\min}, x_{\max}]$  的模糊概念,可用式(5)计算标准评语云数字特征值的大小<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} Ex_{V_i} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}; \\ En_{V_i} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{6}; \\ He_{V_i} = kEn_{V_i}. \end{cases} \quad (5)$$

对于评语集  $\{V_1, V_2, \cdots, V_n\}$  存在代表值  $\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$  的模糊概念,代表值最能反映所属评语的概念。因此本研究以代表值作为该评语的期望并根据云模型中熵的内涵建立了各个评语的标准评语云数字特征值计算公式:

$$\begin{cases} Ex_{V_i} = x_i; \\ En_{V_i} = \frac{\min(x_i - x_{i-1}, x_{i+1} - x_i)}{3}; \\ He_{V_i} = kEn_{V_i}. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $k$  反映熵和超熵的线性关系,一般取  $0.1$ <sup>[11]</sup>。

1.2.2 指标评价云的确定

指标评价云的确定基于  $n$  个专家对某个检测指标的评定数据,采用式(7)可计算第  $i$  个检测指标评价云的数字特征值  $(Ex_{U_i}, En_{U_i}, He_{U_i})$ :

$$\begin{cases} Ex_{U_i} = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}; \\ En_{U_i} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |x_{ij} - Ex_{U_i}|; \\ He_{U_i} = \sqrt{S^2 - En_{U_i}^2}. \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $x_{ij}$  为第  $j$  位专家对第  $i$  个评价指标的评定数据;  $S^2$  为样本方差。

1.2.3 综合评价云的确定

综合评价云数字特征值  $(Ex, En, He)$  的获取是基于下一层的每个指标层云数字特征值  $(Ex_{U_i}, En_{U_i}, He_{U_i})$  和其对应的权重。具体运算法则如式(8)所示:

$$\begin{cases} Ex = \sum_{i=1}^m (Ex_{U_i} \lambda_i); \\ En = \sqrt{\sum_{i=1}^m (En_{U_i}^2 \lambda_i)}; \\ He = \sum_{i=1}^m (He_{U_i} \lambda_i). \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\lambda_i$  为权重系数。

1.2.4 云图的生成

获得用以描述云模型的数字特征值  $(Ex, En, He)$  后,通过正向云发生器绘制云图。正向云发生器计算步骤如下。

(1)以  $En$  为期望值,  $He$  为标准差生成一个正态分布随机数  $En'$ 。

(2)以  $Ex$  为期望值,  $En'$  为标准差生成一个正态分布随机数  $x$ 。

(3)将  $En'$ 、 $x$  代入式(9):

$$y = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2En'^2}} \tag{9}$$

(4)得到一个云滴  $Drop(x_i, y_i)$ 。

(5)重复步骤(1)~(4),直至生成满足要求的云滴。

## 2 基于熵权法-云模型的石拱桥技术状况评定模型

云模型是关注评定过程中评语的模糊性以及专家主观因素的随机性的数学原理。熵权法是考虑主观性和随机性造成观测值间的差异程度来确定指标权重的客观赋权方法。两者均是对评定过程中随机性和主观性的综合考量,在数学内涵上具有关联性与一致性。因此本研究综合运用云模型与熵权法理论,使得评定过程各个环节都能避免主观性和随机性的干扰,实现客观综合评价。

### 2.1 确定评价指标体系

在基于熵权法-云模型的石拱桥技术状态评定中,沿用评定标准<sup>[3]</sup>评价指标体系,从桥面系、上部结构、下部结构 3 个方面构建出桥梁评价指标<sup>[3]</sup>,得到结构至病害的 4 级评价指标,具体见图 1。由于图幅有限,图 1 仅以主拱圈部件为例展示其构件与病害层次具体的评价指标,其余部

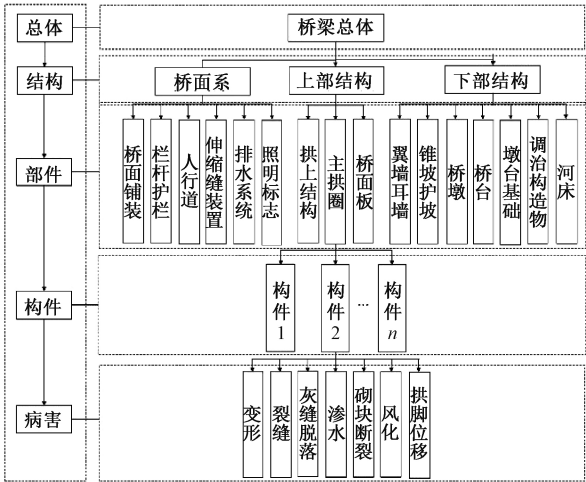


图 1 评价指标体系  
Figure 1 Evaluation system

件可依据评定标准得出。

### 2.2 确定指标标准评语云

#### 2.2.1 构件病害扣分标准评语云的获取

桥梁构件病害扣分过程中指标类别的划分根据评定标准<sup>[3]</sup>查得,病害所能达到的最高等级类别归纳为 3 种情况,每种情况下各个类别中都存在一个代表值。根据式(6)计算各个类别下评语集的标准评语云数字特征值( $Ex_{Vi}$ ,  $En_{Vi}$ ,  $He_{Vi}$ ),结果如表 1 所示。根据 1.2.4 节的步骤生成云滴,效果图如图 2 所示。

#### 2.2.2 桥梁各级评价指标技术状态标准评语云

根据评定标准<sup>[3]</sup>,桥梁各级评价指标技术状态评定等级(除病害)可划分为 5 个类别,对应 5 个评语集区间。采用式(5)获取评语集的标准评

表 1 构件病害标准评语云数字特征值

Table 1 Component disease standard comment cloud digital characteristic value

病害最高等级类别	指标类别				
	1 类	2 类	3 类	4 类	5 类
3 类	(0, 6.7, 0.7)	(20, 5, 0.5)	(35, 5, 0.5)		
4 类	(0, 8.3, 0.8)	(25, 5, 0.5)	(40, 3.3, 0.3)	(50, 3.3, 0.3)	
5 类	(0, 11.7, 1.17)	(35, 3.3, 0.3)	(45, 3.3, 0.3)	(60, 5, 0.5)	(100, 13.3, 1.3)

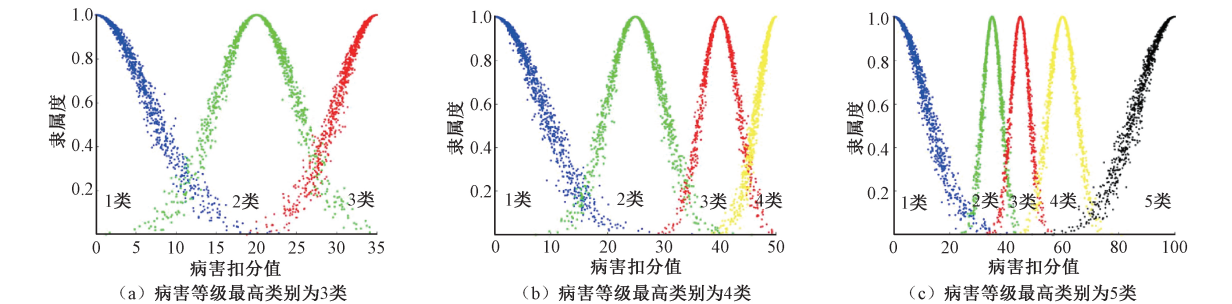


图 2 构件病害标准评语云云图

Figure 2 Cloud graph of component disease standard comment cloud

语云数字特征值( $Ex_{V_i}, En_{V_i}, He_{V_i}$ ), 绘出评语集标准评语云, 数字特征值如表 2 所示, 效果图如图 3 所示。

表 2 评价等级划分及对应的标准评语云数字特征值  
Table 2 Evaluation grade division and corresponding standard comment cloud digital feature value

等级划分	区间划分	标准评语云数字特征值
1	[95, 100]	(97.5, 0.8, 0.05)
2	[80, 95)	(87.5, 2.5, 0.25)
3	[60, 80)	(70.0, 3.3, 0.33)
4	[40, 60)	(50.0, 3.3, 0.33)
5	[0, 40)	(20.0, 6.7, 0.67)

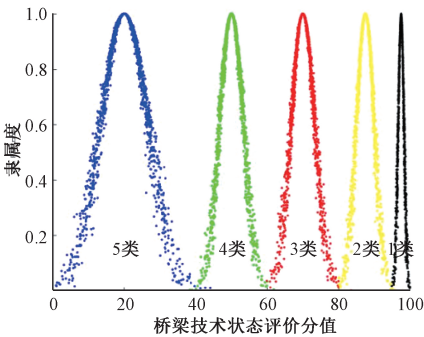


图 3 技术状态评定等级标准评语云云图  
Figure 3 Cloud graph of technical status rating standard comment cloud

2.3 计算构件与部件技术状况得分

邀请多位专家初步判断待测石拱桥构件病害类型并对每一种病害形式进行打分。与评定标准中病害扣分值确定方法不同, 专家打分得到的扣分值不是通过判断构件病害所属标度得到的离散化的扣分值, 而是指标所能达到的最高等级标度与最低等级标度对应的分数所构成的区间内任意数值。在评定过程中, 专家可以根据自己的经验在该区间内对目标构件病害给出一个合适的扣分值。重复上述步骤, 可得构件中各种病害类型的扣分值。沿用评定标准<sup>[3]</sup>中构件与部件的技术状态评分计算公式:

$$PMCI_l(BMCI_l \text{ 或 } DMCI_l) = 100 - \sum_{x=1}^k U_x。 \quad (10)$$

$$\begin{cases} U_1 = DP_{i1}; \\ U_x = \frac{DP_{ij}}{100\sqrt{x}} \left( 100 - \sum_{y=1}^{x-1} U_y \right)。 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} PCCI_i = \overline{PMCI} - \frac{(100 - PMCI_{\min})}{t}; \\ BCCI_i = \overline{BMCI} - \frac{(100 - BMCI_{\min})}{t}; \\ DCCI_i = \overline{DMCI} - \frac{(100 - DMCI_{\min})}{t}。 \end{cases} \quad (12)$$

式中:各变量的定义与评定标准<sup>[3]</sup>相同。

2.4 调整指标权重

根据评定标准可获得石拱桥各部件指标层的权重经验值。当实际工作中某座桥梁没有设置某些部件时, 往往会将此缺失部件的权重值分配给其他部件。评定标准所采用的分配方法仅考虑权重经验值的比例关系进行重新分配, 而没有考虑不同工程项目与评定专家的差异性, 与工程实际情况会存在偏差。因此, 本研究采用熵权法对指标权重进行调整, 引入不同工程独特的实际情况对权重的影响。仍然采用 2.3 节计算得到的部件技术状态得分数据整理成判断矩阵  $X$ , 矩阵的行代表不同专家, 矩阵的列代表各部件指标。按照 1.1 节的步骤计算得到各部件指标的熵权, 将缺失部件权重值用按照熵权的比例进行分配的方法得到各个检测指标的权重修正值, 在既有部件权重的基础上加上各自的权重修正值即可得到调整后的权重  $\lambda_i$ 。计算公式如下:

$$\lambda_i = \left( 1 - \sum_{j=1}^n w_j \right) \cdot \frac{W_i}{\sum W_i} + w_j。 \quad (13)$$

式中:  $w_j$  为第  $j$  个既有部件在评定标准中提供的经验权重值;  $W_i$  为某结构下第  $i$  个部件的熵权。

2.5 计算综合评价云

为了得到结构与总体层次的综合评价云, 将目前已获得的各个病害评定数据、构件评定数据与部件评定数据代入式(7)得到该评定数据所表征的指标评价云的数字特征值。再把部件指标评价云的数字特征值和用 2.4 节方法得到部件调整之后的权重代入式(8)可得结构层次的综合评价云模型, 进而重复上述操作, 将结构综合评价云的数字特征值和评定标准中提供的结构经验权重值代入式(8)得到桥梁总体的综合评价云模型的数字特征值, 即可得到各级指标综合评价云的云图。

2.6 计算相似度、确定评定结果

在进行定性评价时, 可以通过肉眼感知综合评价云与标准评语云的重合相似程度来评定<sup>[12]</sup>。但为了保证评价结果的客观性、科学性, 并考虑评语集的模糊性, 本研究选取组合模糊贴近度方法<sup>[13]</sup>计算相似度来进行检验。该方法从模糊数学的角度利用组合模糊贴近度对正态云相似度进行了分析与描述。计算公式为式(14)~(16), 通过计算综合评价云与标准评语云的相似度确定评价目标的等级, 取相似度最高的标准评语云所代表的评语作为该指标评价结果。同理, 重复上述

步骤,从而能够确定桥梁在各级指标的技术状况评定结果。

$$\xi(l)=\frac{1}{2}+\frac{1}{2\Phi(v)}-\Phi(v); \tag{14}$$

$$\Phi(v)=\int_{-\infty}^v\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)dt; \tag{15}$$

$$v=\frac{|Ex_l-Ex|}{\sqrt{En^2+He^2}+\sqrt{En_l^2+He_l^2}}。 \tag{16}$$

式中:  $C(Ex,En,He)$  为指标评价云的数字特征值;  $C_l(Ex_l,En_l,He_l)$  为第  $l$  个标准评语云的数字特征值。

评定标准中 4.1.8 节规定:当主要部件评分达到 4 类或 5 类且影响安全时,可按照桥梁主要部件最差的缺损状况评定<sup>[3]</sup>。因此本研究也考虑主要部件间荷载传递路径的“串联”性质,引入对主要部件的异常识别。经过综合判断,即可得到桥梁最终的评定结果。

3 工程实例

3.1 工程概况

某单孔实腹式圬工拱桥,桥梁全长约 8 m。桥宽布置为 6.5 m 行车道+2×0.25 m 栏杆。桥梁下部采用明挖扩大基础,桥台为 U 型桥台。桥面采用黄土铺装。在桥梁检查中发现桥面桥头与路堤连接部出现高差、桥头跳车现象,同时伴随严重裂缝出现。该桥上部结构中主拱圈局部均存在渗漏水、晶体析出现象,拱顶出现开裂。该桥下部结构桥台基础填土有局部冲刷。

3.2 构件病害扣分数据的获取

邀请 15 位相关专家,根据自身工作经验对桥梁既有构件中病害进行打分,结果见表 3,表 3 列出了部分构件的病害扣分数据。

3.3 部件权重的调整与综合评价云的确定

根据表 3 数据,由式(10)~(12)计算得到构

表 3 部分构件病害扣分值

Table 3 Partial component disease deduction value

部件名称	构件	病害	专家 1	专家 2	…	专家 15
主拱圈	构件 1	变形	43	44	…	34
		渗水	31	34	…	34
拱上结构	构件 1	沉陷	2	2	…	4
	构件 2	沉陷	4	3	…	6
墩台基础	构件 1	冲蚀	24	26	…	27
	构件 2	冲蚀	20	20	…	24
河床	构件 1	冲刷	6	12	…	8
		变迁	3	4	…	6
桥面铺装	构件 1	变形	31	30	…	35
		裂缝	24	23	…	22
		破损	25	28	…	26
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
栏杆护栏	构件 1	破损	2	3	…	13
	构件 2	破损	6	3	…	2

件与部件的评定数据,再利用式(1)~(4)计算出部件指标的熵权,最后通过式(13)将缺失部件权重进行分配,得到调整后的权重。结构层指标的权重沿用了评定标准<sup>[3]</sup>提供的经验权重值。

根据已经得到的构件与部件的评定数据,由式(7)可计算出构件与部件指标层的综合评价云数字特征值,将各指标权重与相应的数字特征值结合,利用式(8)可计算出结构与总体层的评价云数字特征值,计算结果如表 4 所示。

3.4 评价结果与对比分析

根据表 4 的桥梁技术状态特征值,可获得石拱桥总体的综合评价云云图,如图 4 所示。图 4 显示了桥梁总体的综合评价云云图与标准评语云云图,综合评价云图介于 3~4 类标准评语云图之间,靠近 3 类,因此可初步判定某单孔实腹式圬工拱桥技术状态评定等级为 3 类。利用相似度进行评价结果的检验,分别计算出桥梁总体综合评价云与各标准评语云之间的相似度。由于本研究还考虑了结构部件对桥梁整体安全使用的影响而引

表 4 石拱桥各级指标权重与综合评价云数字特征值

Table 4 Index weights of each level of stone arch bridge and comprehensive evaluation cloud digital characteristic value

总体	特征值 3	结构	权重	特征值 2	部件	调整后的权重	特征值 1
桥梁	(64.03, 3.94, 0.91)	上部结构	0.4	(57.08, 4.50, 1.14)	主拱圈	0.75	(44.24, 5.09, 1.33)
					拱上结构	0.25	(95.65, 1.76, 0.57)
					锥坡护坡	0.10	(67.11, 2.40, 0.97)
		下部结构	0.4	(71.06, 3.39, 0.76)	桥台	0.38	(61.44, 4.09, 0.85)
					墩台基础	0.36	(73.60, 2.86, 0.43)
					河床	0.16	(90.79, 3.15, 1.12)
		桥面系	0.2	(63.88, 3.75, 0.76)	桥面铺装	0.68	(49.23, 4.35, 0.93)
					栏杆护栏	0.32	(94.76, 1.97, 0.41)



入了异常识别机制,对该圯工拱桥的主要结构部件计算其与各类标准评语云的相似度,计算结果如表 5 所示。其中桥梁总体综合评价云与各标准评语云之间相似度的最大值为 0.340,对应的技术状态为“3 类桥”,其相似度远远大于与其他标准评语云的相似度,验证了该拱桥的初步评定结果。但主要部件主拱圈相似度最大值对应的类别为 4 类,因此根据异常识别机制最终将该桥评为 4 类。

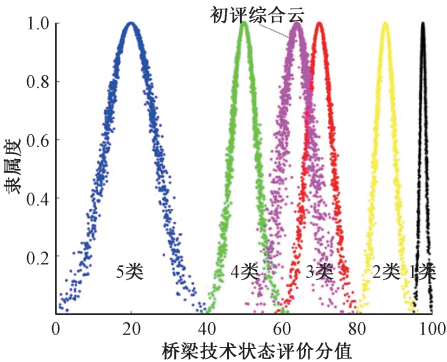


图 4 桥梁总体综合评价云与标准评语云云图

Figure 4 Cloud graph of overall bridge comprehensive evaluation cloud and standard comment cloud

本研究按评定标准中的方法对该圯工拱桥进行评定,与本研究模型的评定结果进行对比

分析,评价结果如表 6 所示。其中桥梁的技术状态评分为 63.4 分,根据规范初步评为 3 类桥。由于主拱圈属于主要部件,其评分为 41.4 分,根据评定标准 4.1.8 节规定,该桥最终被评为 4 类。两种方法得出的最终结果保持一致,符合实际情况,验证了基于熵权法-云模型的石拱桥技术状况评定方法具有一定的适用性、有效性和精确性。本研究提出的方法能使专家更细微地度量病害指标的程度,且能通过相似度刻画评价指标对不同评语的隶属程度,还能够将评定过程通过图像形式直观展示。值得注意的是,本研究提出的方法从隶属度与权重两个方面引入了多位专家扣分值的分散与偏离程度对评定结果的影响,使得评定结果更为精确。对比可见,基于本研究的方法优于评定标准中的方法。

本研究在得出桥梁的最终评价结果中不需要确定构件病害的标度,而是根据专家的经验在标度扣分区间内对目标构件病害给出一个合适的扣分值。但为了与规范的评定过程结果保持一致,本研究可以根据工程实际需要生成病害层次的云图进行技术状况评定。本研究以主拱圈构件的一种病害为例生成云图,如图 5 所示。

表 5 相似度评价结果

Table 5 Similarity evaluation result

评价对象	1 类	2 类	3 类	4 类	5 类	结果
总体	3.30E-05	4.29E-02	3.40E-01	2.58E-04	3.69E-12	3 类
主拱圈	1.55E-16	1.96E-08	2.00E-03	4.18E-01	3.27E-02	4 类
拱上结构	4.03E-01	4.68E-02	5.16E-07	1.55E-16	1.55E-16	1 类
桥台	3.30E-13	7.35E-05	1.99E-01	9.73E-02	1.09E-04	3 类

表 6 评定标准下桥梁总体计算结果

Table 6 Calculation results of assessment standards of overall bridge

总体	得分 3	结构	得分 2	部件	得分 1
桥梁	63.4	SPCI	54.3	主拱圈	41.4
				拱上结构	100
				锥坡护坡	62
				桥台	64
				墩台基础	75
		SBCI	72.3	河床	100
				桥面铺装	54.5
				栏杆护栏	100
		BDCI	63.6		

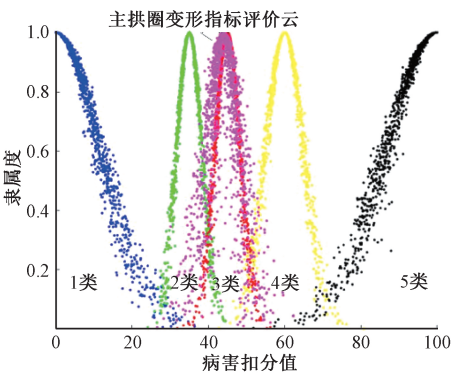


图 5 主拱圈变形指标评价云与标准评语云云图

Figure 5 Cloud graph of deformation index evaluation cloud and standard comment cloud of main arch circle

4 结论

本文提出将云模型应用于石拱桥的评定,构建了基于熵权法-云模型的石拱桥技术状况评定模型。通过采用云模型对评价指标的定性概念进行定量的解释,有效体现桥梁技术状态信息的模糊性和随机性。并对桥梁构件的评定进行了改进,将离散化的扣分值转化为连续的区间,能够更细微地度量指标的程度。同时引入熵权法,用来调整部件间的权重,能够更真实地反映不同工程实际的差异性。

应用该方法对某圯工拱桥进行分析,与规范评价方法的结果一致,在某种程度上证明该方法具有一定的可行性与适用性。从理论方面看,云模型评价方法更科学合理,评价结果更清晰直观,可为石拱桥技术状态评价研究提供参考。

参考文献:

[1] 郑丹,黄才政.考虑砌体本构关系的石拱桥极限承载力研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(5):14-17,68.  
[2] 罗声,康小兵.石拱桥承载能力分析 & 试验检测评定[J].公路工程,2015,40(3):210-212,222.  
[3] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁技术状况评定标准:JTG/T H21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

[4] 刘旭政,黄平明,张永健.基于模糊神经网络的大跨悬索桥安全评估研究[J].郑州大学学报(工学版),2007,28(3):48-51.  
[5] 孙强,杜冰清,江姣姣.基于模糊层次综合评价法的梁桥健康评定方法研究[J].世界桥梁,2017,45(2):45-49.  
[6] 李德毅,刘常昱,淦文燕.正态云模型的重尾性质证明[J].中国工程科学,2011,13(4):20-23.  
[7] 许翔,黄侨,任远.局部变权和云理论在悬索桥综合评估中的应用[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(8):1544-1550.  
[8] 周建庭,张顺,聂志新,等.基于云模型与异常识别的桥梁技术状态评定方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(2):1-6.  
[9] 伍度志,杨帆,赵静.基于信息熵的加权基因关联网络融合方法[J].电子科技大学学报,2018,47(2):286-291.  
[10] 孟晖,王树良,李德毅.基于云变换的概念提取及概念层次构建方法[J].吉林大学学报(工学版),2010,40(3):782-787.  
[11] 何金平,高全,施玉群.基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法[J].系统工程理论与实践,2016,36(11):2977-2983.  
[12] 程道虎.基于区间值犹豫模糊熵-云模型的公路工程DB模式风险评价研究[J].公路,2020,65(11):278-284.  
[13] 龚艳冰,蒋亚东,梁雪春.基于模糊贴近度的正态云模型相似度量[J].系统工程,2015,33(9):133-137.

Evaluating Technical Condition of Stone Arch Bridge Based on Entropy Method-Cloud Model

ZHANG Peng, ZHONG Shan, ZHU Rui, JIAO Meiju

(School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In view of the differences in the identification of disease scales by different technicians in the current process of stone arch bridge technical condition assessment, a method for assessing the technical condition of stone arch bridges based on the entropy method-cloud model was proposed, which based on the existing assessment standards for stone arch bridges. Firstly, the method converted the comment set and evaluation data into a cloud model. Then it used the entropy method to adjust the weights of the stone arch bridge components and introduced the combined fuzzy pasting schedule method calculating the similarity to obtain the evaluation results. Finally, taking a stone arch bridge as an example, the applicability of this method in the evaluation of the technical condition of stone arch bridges was explored, and the results showed that: the evaluation results of the stone arch bridge were classified into 4 categories and the evaluation results of the cloud model were consistent with the results obtained by the “Highway Bridge Technical Condition Evaluation Standards” method, which were in line with the on-site inspection results. The method took into account the subjective randomness of the disease scale determination and the actual difference of the engineering project, which could provide a more scientific and reasonable decision-making basis for the maintenance of stone arch bridges.

**Keywords:** bridge engineering; technical status; cloud model; entropy method; stone arch bridge