

基于中心点白化权函数的桥梁技术状况评定

包龙生,郝博,周诗梦,于玲

(沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 在现存桥梁技术状况评定的基础上,结合主观与客观多种因素,提出一种可降低主观因素在桥梁评定时产生影响的方法.方法 通过自然环境、人类活动和桥梁自身状况三方面指标的序列曲线几何形状,应用灰色关联法分析与桥梁状况指数的紧密性,从而确定各指标所占权重.同时,根据实际值结合中心点三角白化权模型,得到三个方面对应的综合聚类系数,以此判断影响桥梁的主要因素,对技术状况进行综合评定.结果 本体系对16年富峰桥技术状况进行评定,由综合聚类表表明自然环境和桥梁自身状况都属于“合格状态”,综合聚类数值分别为0.546 3和0.372 8.结合该桥三方面影响的权重值0.189、0.241、0.570,综合判定该桥梁属于“合格状态”,对原评定结果“不合格状态”进行修正,减少了人为主观在工程评定中的影响.结论 利用灰色系统理论对桥梁技术状况进行评定,可以充分考虑影响桥梁状况的多种因素,降低人为主观造成评定时的误差,能够得到更加准确客观的桥梁技术状况评定结果.

关键词 桥梁技术状况评定;灰色系统理论;中心点白化权函数;权重

中图分类号 TU997

文献标志码 A

Bridge Technique Condition Assessment Based on Central Point Triangle Whiten Weight Function

BAO Longsheng, HAO Bo, ZHOU Shimeng, YU Ling

(School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Based on the assessment of existing bridge technology status, combined with subjective and objective factors, this paper proposed a method to reduce the influence of subjective factors on bridge assessment. Through the sequence curve geometry of the natural environment, human activities and the status of the bridge itself, the gray correlation method is used to analyze the tightness of the bridge condition index, so as to determine the weight of each indicator. At the same time, according to the actual value and the central point triangle whitening weight model, the comprehensive clustering coefficients corresponding to the three aspects are obtained, so as to judge the main

收稿日期:2017-05-26

基金项目:国家十三五重点研发计划重点专项基金项目(2018YFC0809606);辽宁省重点研发计划指导计划项目(2018416028);沈阳市建委城乡系统科研项目(201804)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士研究生导师,主要从事桥梁工程结构方面研究.

factors affecting the bridge and comprehensively evaluate the technical status. This system evaluates the technical status of Fufeng Bridge in 2016, the comprehensive clustering table shows that the natural environment and the bridge itself are in the "qualified state", and the comprehensive clustering values are 0.546 3 and 0.372 8 respectively. Combined with the weight values of the three aspects of the bridge, the factors are 0.189, 0.241, and 0.570. The bridge could be comprehensively judged to belong to the "qualified state", that correct the original evaluation result "unqualified state", which reduces the influence of human subjectivity in engineering evaluation. Using gray system theory to evaluate the technical status of bridges, we can fully consider the various factors affecting the condition of bridges, reducing the error caused by the human subjective assessment, and obtain more accurate and objective evaluation of the bridge technology status.

Key words: bridge technical condition evaluation; grey system theory; center point triangle whiten weight function; weight

随着经济建设的长足发展,人们对于桥梁渐渐从“重建设轻养护”的观念中开始转变.桥梁检测是养护维修的前提条件,如何使检测结果更加准确,更真实直观地反映出桥梁的实际状况,成为国内外研究人员急需解决的首要问题.对于桥梁技术状况的评定,国内外许多学者进行了大量的理论和实践研究,国内的桥梁系统最具代表性的是中国公路桥梁管理系统 CBMS^[1-4],以桥梁养护规范为基础进行细化和改进,并对构件扣分值提出建议.铜陵长江公路大桥结构安全监测系统通过建立层次结构模型,结合模糊数学、融入桥梁健康监测和桥梁巡检养护,即在巡检养护系统界面可以通过链接访问健康监测系统或在健康监测系统界面中提供巡检养护系统的链接方式,当检测桥梁的系统触发报警时,桥梁巡查人员可立即进行人工巡检,采取必要的措施以保障桥梁的正常运行^[5-6].东莞东江大桥巡检养护管理系统对特尔斐专家评估法等理论对评定体系进行改进,集合现代传感、通信技术、数据挖掘和综合预警为一体的综合检测系统,并结合了 C/S 架构和 B/S 架构两种系统开发模式,大大简化了系统维护升级时的操作,使工作效率更高,信息更加安全^[7-8].国外的评价方法主要有德国采用的三阶病害函数,丹麦通过 15 个标准构件对整座桥梁进行评价和美国将构件等级分为 9 级对 4 个构件进行评价^[9].

综上所述,现有的桥梁评定方法仅考虑了桥梁的自身状况,未结合环境因素和人为因素.基于此,笔者根据灰色系统理论综合考虑桥梁的自然环境、人类活动和检测指标数据与状况指数的关系^[10],由灰色关联法得出适合桥梁的权重分配,通过中心点三角权函数建立科学的评价体系;以长春富峰桥桥梁检测工程为研究对象,建立中心点三角白化权模型,对实际检测数据进行分析,由综合聚类系数对桥梁进行客观准确的技术状况评定.

1 桥梁技术状况评定指标体系

1.1 建立桥梁技术状况评定体系

通过桥梁检测经验、相关文献和专家调查,以自然环境、人类活动和桥梁自身三方面为研究对象,对影响桥梁状况各对象下的主要因素,建立二级评定指标,形成桥梁技术状况评定体系.笔者以东北地区为例,综合考虑该地区影响桥梁状况各对象的主要影响指标,建立图 1 所示的桥梁技术状况评定体系.

1.1.1 自然环境的影响

自然环境的变化对桥梁的运营产生一定影响,东北属于温带季风气候,昼夜温差大,降水量多,风力最大可达七到八级且水文条件复杂,结合桥梁材料和结构特性综合考虑自然环境的影响主要包括年降水量、年最大温度差、水文条件和风力条件^[11].

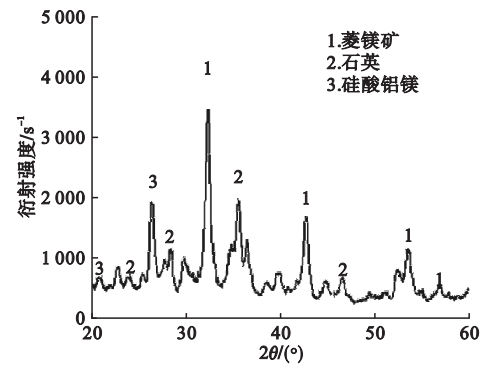


图 1 桥梁技术状况评定体系

Fig. 1 Bridge technical condition evaluation system

1.1.2 人类活动的影响

随着我国经济和交通运输的不断发展,大重型货运汽车在运输车辆中的比例不断增加.东北地区作为我国重工业基地,重车通行频繁,重载、超载现象日趋严重,交通事故时有发生.桥梁管养单位对桥梁的资金投入和桥梁的检测频率等因素都直接影响桥梁的使用状况.综合考虑以上情况,人类活动的影响因素包括重车年交通量、年超载率、事故发生次数、维修养护资金和桥梁检测频率^[12].

1.1.3 桥梁自身的因素

在桥梁运营过程中不可避免地存在破坏缺损等现象,根据规范要求通过专家目测对桥梁状况进行感性打分,难免存在偏差,并且没有考虑针对桥梁客观因素如混凝土强度^[13]、碳化深度、氯离子浓度和钢筋锈蚀^[14]等无法观测到的问题.因此,笔者综合以上情况对影响桥梁自身状况的因素进行评定.

1.2 理论介绍

我国桥梁建设主要集中于二十世纪八九十年代,时至今日桥梁的原始数据十分匮乏,

历年来桥梁检测的数据又十分有限,再加上检测时人为主观因素使数据大起大落,很难找到典型的规律,因而采用常规的分析方法很难得到准确的结论.

灰色理论对于我国桥梁这种信息贫乏,影响因素不确定性的系统是一种可靠的分析方法^[15].统计历年桥梁检测所得的状况指数和从自然环境、人类活动和桥梁自身三方面影响桥梁状况的数据,利用灰色关联法计算不同影响因素与桥梁状况指数序列曲线之间几何形状的紧密性,分配各因素在系统中的权重.结合中心点三角白化权函数评价方法,通过地区所对应的评价指标灰类建立白化权函数模型,将实际值代入进行计算,得到的综合聚类系数对桥梁技术状况进行客观评定^[16],弥补原有规范未对病害产生原因进行考虑与评定结果趋于表象且较为主观的不足.

1.2.1 各指标灰色关联度的确定

以历年桥梁状况指数作为系统特征行为序列,根据不同年份的实际情况设为 $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$,同时以自然环境、人类活动和桥梁自身为研究对象,将研究对象下各对于桥梁的影响因素,如年降水量、年最大温度差等,按照系统特征行为序列的长度和时距设为相关因素序列 $X_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(n)), \dots, X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)), \dots, X_m = (x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(n))$;同时把分辨系数 $\xi \in (0, 1)$ 带入式中,得到各因素第 k 个元素的关联系数 $\gamma(x_0(k), x_i(k))$:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

依据式(2),将数据较多且信息分散的关联系数 $\gamma_{oi}(k)$ 集中于一值,便于确定各因素的灰色关联度.

1.2.2 评价体系各层次权重的确定

由于各因素灰色关联度的大小体现其与桥梁状况的紧密程度,关联度越大紧密性越强,故而以此决定各因素在本体系所占的权重.为了本系统中权重规范化,各灰类的关联

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)) \quad (2)$$

度之和等于1. 先将不同对象*i*的影响因素*j*的灰色关联度相加,再分别求得同一对象*i*的不同影响因素各自所占的比例,最后通过式(3)确定层次权重.

$$\omega_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_{ij}}{n}.$$

(3)

对象*i*的权重 ω_i 可通过式(4)计算各影响因素的灰色关联度,所得平均值作为三个对象*i*平均灰色关联度,再通过不同对象*i*所占平均灰色关联度的比例确定对象*i*所占的权重.

$$\omega_i = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{\rho}_i}{n}.$$

(4)

1.2.3 中心点三角白化权函数模型的建立

结合《城市桥梁养护技术规范》(CJJ99—2017)和《公路桥涵养护技术规范》(JTGH11—2004)的要求,本系统采用五个

灰类,对应规范中规定的五个等级:完好状态(A)、良好状态(B)、合格状态(C)、不合格状态(D)、危险状态(E),详见表1所示.

表1 桥梁技术状况等级处理意见

Table 1 Classification of bridge technical status

等级	处理意见
A	进行日常维护保养
B	进行日常维护保养和小修
C	进行专项检测后保养、小修
D	检测后进行中修、大修工程
E	检测评估后进行大修、加固或改扩建工程

本体系依照规范和实际需要将灰类划分为五个等级,选取灰类最大可能性的点 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ 作为最属于灰类的点,并将各对象下影响因素依据灰类划分为五个小区间 $[\lambda_1, \lambda_2], [\lambda_2, \lambda_3], [\lambda_3, \lambda_4], [\lambda_4, \lambda_5], [\lambda_5, \lambda_6]$,如表2所示.

表2 评价指标灰类

Table 2 Grey class of evaluation index

等级	X_1				X_2					X_3				
	X_{11}	X_{12}	$X_{13}/\%$	X_{14}	X_{21}	$X_{22}/\%$	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}
A	(200,400]	(40, 50]	(0.1, 4]	(1,3]	(20, 30]	(10, 30]	(0,1]	(500, 1 000]	(1,2]	(90, 100]	(1.1, 1.17]	(0,2]	(0.05, 0.1]	(-50, 0]
B	(400,600]	(50, 60]	(4,8]	(3,5]	(30, 40]	(30, 50]	(1,4]	(300, 500]	(2,3]	(80, 90]	(0.93, 1]	(2,4]	(0.1, 0.4]	(-117, -50]
C	(600,700]	(60, 70]	(8, 12]	(5,6]	(40, 50]	(50, 60]	(4,6]	(100, 300]	(3,4]	(65, 80]	(0.85, 0.93]	(4,6]	(0.4, 0.7]	(-183, -117]
D	(700,850]	(70, 75]	(12, 15]	(6,7]	(50, 80]	(60, 70]	(6,8]	(50, 100]	(4,5]	(50, 65]	(0.7, 0.85]	(6,8]	(0.7, 1.0]	(-250, -183]
E	(850,1 000]	(75, 80]	(15, 17]	(7,9]	(80, 100]	(70, 90]	(8, 10]	(10, 50]	(5, 10]	(30, 50]	(0.5, 0.7]	(8, + ∞)	(1.0, 100]	(- ∞, -250]

结合各影响因素的灰类区间建立中心点白化权函数模型,确定灰类最大可能性的点为顶点 $(\lambda_k, 1), k$ 为灰类序号, $k = 1, 2, 3, 4, 5$.将顶点与左右两个区间坐标 $(\lambda_{k-1}, 0)$ 和 $(\lambda_{k+1}, 0)$ 相连,根据本体系中灰类的个数依次建立白化权函数

$$f_j^k(\cdot), j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, s.$$

(5)

最终确定影响因素的模型如图2所示.

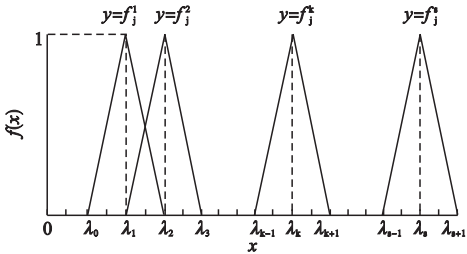


图2 中心点三角白化权函数示意图

Fig. 2 Sketch of triangle whitening weight function of center point

对于影响因素 j 的白化权聚类系数,可由式(6)得到.

$$f_j^k(x)=\begin{cases}0,&x\notin(\lambda_{k-1},\lambda_{k+1})\\ \frac{x-\lambda_{k-1}}{\lambda_k-\lambda_{k-1}},&x\in(\lambda_{k-1},\lambda_k] \\ \frac{\lambda_{k+1}-x}{\lambda_{k+1}-\lambda_k},&x\in(\lambda_k,\lambda_{k+1})\end{cases}\quad (6)$$

通过式(7)可得各对象 $i(i=1,2,\cdots,n)$ 关于灰类 $k(k=1,2,\cdots,s)$ 的综合聚类系数 σ_i^k :

$$\sigma_i^k=\sum_{j=1}^mf_j^k(x_{ij})\cdot\eta_j.$$
$$\text{由}\max_{1\leq k\leq s}\{\sigma_i^k\}=\sigma_i^{k^*},\text{判断对象}i\text{属于}$$

的灰类 k^* ,由此可以观测到各个对象对桥梁

状况的影响情况,同时可了解桥梁损伤破坏的形成原因.最后把各对象不同状况等级的聚类系数与对应权重相乘求和,得到桥梁在不同灰类下的综合聚类,通过最大值对桥梁技术状况进行最终评定.

2 实例分析

2.1 案例背景

笔者以吉林省长春市富峰特大桥项目为例,该桥建成于 1999 年,全桥总长 1 016 m,主桥为 (34.96 + 45 + 34.96) m 预应力混凝土变截面连续梁.设计荷载:汽 - 超 20 级,挂 - 120,如图 3 所示.

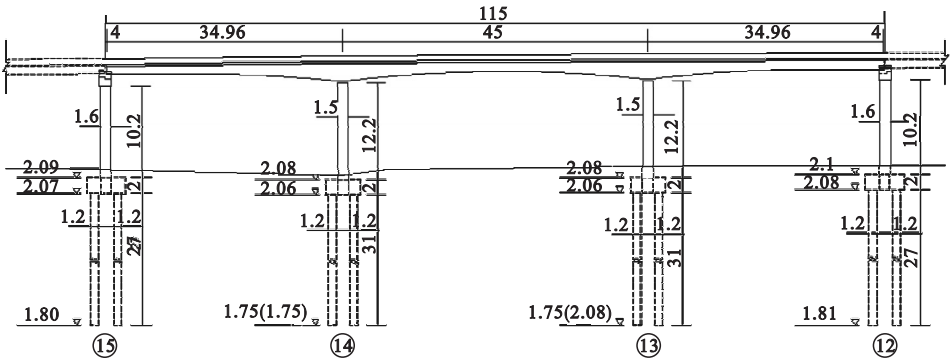


图 3 桥梁主跨立面图

Fig. 3 Elevation diagram of main span of bridge

2.2 确定各指标权重

富峰特大桥自 2002 年起,每两年进行一

次定期检测,根据项目相关资料,得到往年桥梁检测各相关数据,如表 3 所示.

表 3 项目指标统计表

Table 3 Project indicator statistics

年份	$X_{11}/$ mm	$X_{12}/$ ℃	$X_{13}/$ %	X_{14}	X_{21}	$X_{22}/$ %	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{32}	$X_{33}/$ mm	$X_{34}/$ %	$X_{35}/$ mV
2002	492	56	0.80	5	330 114	56	5	2 876 713	3	92.2	0.988	0.31	0.03	-71
2004	545	59	1.98	6	342 118	53	3	2 888 300	2	87.9	0.978	0.68	0.07	-91
2006	634	58	4.65	5	333 493	54	3	2 215 889	2	84.0	0.964	1.04	0.10	-116
2008	718	61	4.41	4	365 304	51	5	2 243 077	2	76.5	0.948	1.34	0.11	-176
2010	733.5	61	4.85	6	391 854	68	4	2 634 648	2	71.2	0.942	1.79	0.14	-126
2012	702.3	60	6.54	7	415 905	59	5	2 429 603	2	68.6	0.936	2.14	0.17	-269
2014	550	58	8.50	5	441 880	59	6	1 597 293	2	65.0	0.924	2.59	0.22	-277
2016	775.1	61	9.10	4	454 260	67	2	1 925 038	2	57.2	0.904	3.04	0.28	-350

由表 3 数据可以看出,各影响因素之间数值的绝对量区别较大,为方便观测各指标的变化趋势,对表中数据进行如下处理:对同

一影响因素,设最大值为 1,其数值一定小于 1.将数据处理后,得到 matlab 仿真软件的模拟趋势变化如图 4 ~ 图 6 所示.

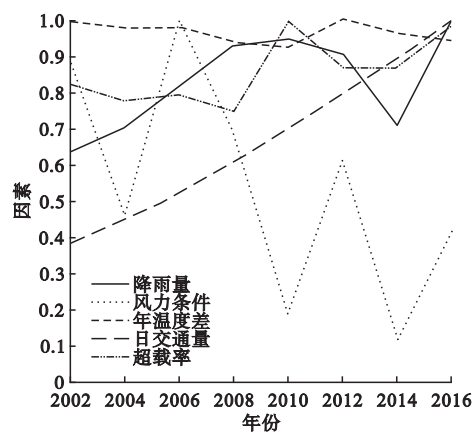


图 4 环境因素变化趋势

Fig. 4 The trends of environmental factors

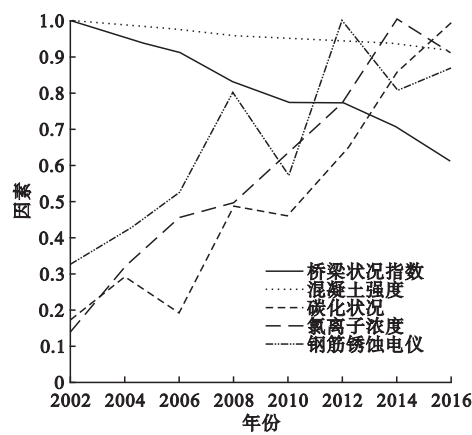


图 5 人类因素变化趋势

Fig. 5 The trends of human factors

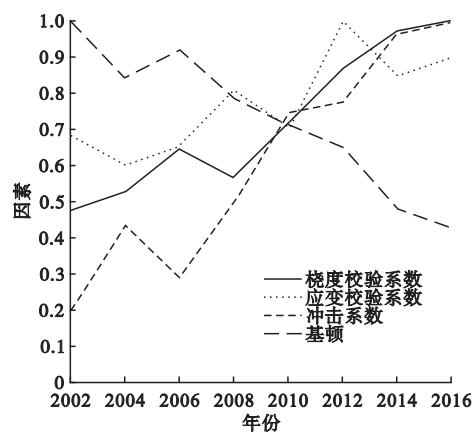


图 6 桥梁自身因素变化趋势

Fig. 6 The trends of bridge own factors

不同对象的历年变化趋势,得出不同对象各层次权重,如表4~表6所示。

表 4 自然环境影响指标权重

Table 4 Index weight of natural environment impact

权重	自然环境影响 X_1 (0.189)			
	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
层次权重	0.246	0.279	0.194	0.281
组合权重	0.046	0.053	0.037	0.053

表 5 人类活动影响指标权重

Table 5 Index weight of human activity impact

权重	人类活动影响 X_2 (0.241)				
	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}
层次权重	0.167	0.197	0.186	0.231	0.219
组合权重	0.040	0.047	0.045	0.056	0.053

表 6 桥梁自身因素的指标权重

Table 6 Index weight of bridge own factor impact

权重	桥梁自身因素 X_3 (0.570)				
	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}
层次权重	0.257	0.249	0.144	0.156	0.194
组合权重	0.146	0.142	0.082	0.089	0.111

依次构建各影响因素的三角白化权函数模型,根据实际值所属区间找到对应的白化权聚类系数。以 X_{11} 为例,建立降雨量三角白化权函数模型,如式(8)~(12)所示,并将实际值带入其中,计算所属区间内降雨量聚类系数,如图7所示。

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (0, 400), \\ \frac{x}{200}, & x \in (0, 200], \\ \frac{400-x}{400-200}, & x \in (200, 400). \end{cases} \quad (8)$$

$$f_j^2(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (200, 600), \\ \frac{x-200}{400-200}, & x \in (200, 400], \\ \frac{600-x}{600-400}, & x \in (400, 600). \end{cases} \quad (9)$$

$$f_j^3(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (400, 700), \\ \frac{x-400}{600-400}, & x \in (400, 600], \\ \frac{700-x}{700-600}, & x \in (600, 700). \end{cases} \quad (10)$$

$$f_j^4(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (600, 850), \\ \frac{x - 600}{700 - 600}, & x \in (600, 700], \\ \frac{850 - x}{850 - 700}, & x \in (700, 850). \end{cases} \quad (11)$$

$$f_j^5(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (700, 1000), \\ \frac{x - 700}{850 - 700}, & x \in (700, 850], \\ \frac{1000 - x}{1000 - 850}, & x \in (850, 1000). \end{cases} \quad (12)$$

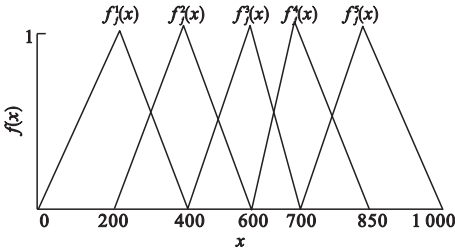


图 7 降雨量三角白化权函数模型

Fig. 7 Triangle whitening weight function model of the rainfall

通过实际值带入相关中点三角权函数,得白化权聚类系数为 $f_j^4(775.1) = 0.499$, $f_j^5(775.1) = 0.501$. 同理,得到其他各影响因素的白化权聚类系数,结果表 7 所示.

表 7 评价指标白化权聚类系数

Table 7 Whitening weight clustering coefficient of evaluation index

影响因素	实际值	X_{ij}^1	X_{ij}^2	X_{ij}^3	X_{ij}^4	X_{ij}^5
X_{11}	775.1	0	0	0	0.499	0.501
X_{12}	61	0	0	0.9	0.1	0
X_{13}	9.1%	0	0	0.725	0.275	0
X_{14}	4	0	0.45	0.55	0	0
X_{21}	45.406 0	0	0.459	0.541	0	0
X_{22}	67%	0	0	0.3	0.7	0
X_{23}	2	0.667	0.333	0	0	0
X_{24}	192.503 8	0	0.463	0.537	0	0
X_{25}	2	0	1	0	0	0
X_{31}	57.2	0	0	0.48	0.52	0
X_{32}	0.904	0	0.675	0.325	0	0
X_{33}	3.04	0	0.48	0.52	0	0
X_{34}	0.28%	0	0.4	0.6	0	0
X_{35}	-350	0	0	0	0	1

据式(7)计算各对象综合聚类系数,结果如表 8 所示.

表 8 准则层与桥梁技术状况综合聚类表

Table 8 Comprehensive evaluation table of criterion layer and bridge technical status

因素	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5
X_1	0	0.126 5	0.546 3	0.204 0	0.123 2
X_2	0.124 1	0.464 5	0.273 5	0.137 9	0
X_3	0	0.299 6	0.372 8	0.133 6	0.194 0
X	0.029 9	0.306 6	0.381 7	0.147 9	0.133 9

由表 8 可以看出,人类活动影响因素属于“良好状态”,未对桥梁状况造成太大影响;自然环境条件属于“合格状态”,不会对桥梁造成过多不利的影响;而桥梁自身状况属于“合格状态”,说明桥梁自身状况的发展属于正常状态.从 2014 年和 2016 年检测报告可知,2014 年桥梁总体技术状况为“合格状态”,2016 年桥梁总体技术状况为“不合格状态”,综合分析两次检测结论,认为差异的原因可能由于人为主观因素影响造成评定的误差,或者是桥梁受到外界严重破坏或自身结构发生严重问题造成桥梁状况指数显著下滑.结合本系统综合聚类表结果显示:桥梁综合聚类系数最大值为 0.381 7,属于“合格状态”灰类.综上所述:2016 年富峰桥技术状况检测结果应为“合格状态”,造成结论不同的原因可能是由于人为主观因素影响的原因^[17-20].但根据综合聚类表的数据可以看出,综合聚类表中 σ_4, σ_5 皆大于 0,说明桥梁已经有明显向“不合格状态”发展的趋势,建议应及时对桥梁进行维修加固,避免事故的发生.

3 结 论

(1)笔者建立的桥梁技术状况评定体系对于不同自然环境、不同人类影响和桥梁自身发展趋势都能进行针对性的、全面的考虑,权重分配也与桥梁各方面条件相适应,解决了不同条件下规范适用具有局限性的问题.

(2)人对桥梁状况等级的判定往往偏重于“很好”和“很不好”两方面,该体系能够客观准确地对桥梁技术状况进行等级评定,减

少日常评定时因对“较好”或“较不好”产生犹豫所造成的评定误差,对桥梁的检测评定具有现实意义。

参考文献

- [1] 张永强.《公路桥梁技术状况评定标准》应用中几个问题探讨[J]. 中外公路, 2015, 35(2): 129-131.
(ZHANG Yongqiang. Discussion on several problems in application of highway bridge technical condition evaluation standard[J]. Journal of China & foreign highway, 2015, 35(2): 129-131.)
- [2] 杨正昕. 公路桥梁技术状况评定标准在工程中的运用[J]. 山西建筑, 2014, 40(11): 213-214.
(YANG Zhengxin. Application of highway bridge technology evaluation criteria in the engineering [J]. Shanxi architecture, 2014, 40(11): 213-214.)
- [3] 马军海, 陈艾荣, 张文学. 公路桥梁技术状况评定体系及其应用[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(4): 77-87.
(MA Junhai, CHEN Airong, ZHANG Wenxue. Evaluation system for condition states of highway bridges and application [J]. Journal of Shijiazhuang railway institute, 2006, 19(4): 77-87.)
- [4] LI Q X, LIU S F. The foundation of the grey matrix and the grey input - output analysis [J]. Applied mathematical modelling, 2008, 32(3): 267-291.
- [5] 谢锡康. 基于模糊数学理论的桥梁技术状况评定方法研究[J]. 湖南交通科技, 2016, 42(2): 128-131.
(XIE Xikang. Research on evaluation method of bridge technical condition based on fuzzy mathematics theory [J]. Hunan communication science and technology, 2016, 42(2): 128-131.)
- [6] 袁可佳, 刘蕊. 公路桥梁技术状况模糊综合评价研究[J]. 南阳理工大学学报, 2015, 7(6): 89-97.
(YUAN Kejia, LIU Rui. Research on fuzzy comprehensive evaluation of highway bridge technology status [J]. Journal of Nanyang university of science and technology, 2015, 7(6): 89-97.)
- [7] 郭杨, 杜勇锋, 李邦映. 模糊数学方法在桥梁技术状况评定中的应用[J]. 安徽建筑, 2008, 15(6): 100-101.
(GUO Yang, DU Yongfeng, LI Banging. Application of fuzzy mathematical method in assessment of bridge technology status [J]. Anhui architecture, 2008, 15(6): 100-101.)
- [8] 徐锦, 缪辉辉. 桥梁技术状况的模糊评价方法研究[J]. 华东公路, 2009, 175(1): 68-70.
(XU Jin, MIU Huihui. Research on fuzzy evaluation method of bridge technical status [J]. East China highway, 2009, 175(1): 68-70.)
- [9] 陈栋梁. 桥梁技术状况评定方法比较研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
(CHEN Dongliang. Comparative study on evaluation methods of bridge technology status [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.)
- [10] 庞伟英, 樊燕燕, 李红, 等. 基于灰色聚类法的大跨径桥梁施工阶段风险评价[J]. 工程管理学报, 2015(2): 101-105.
(PANG Weiyang, FAN Yanyan, LI Hong, et al. Risk assessment of long span bridge construction stage based on grey clustering method [J]. Journal of engineering management, 2015(2): 101-105.)
- [11] 胡丽平, 韩大建. 考虑环境因素影响的动态法桥梁损伤识别[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 117-121.
(HU Liping, HAN Dajian. Vibration based damage detection of bridge considering influence of changing environment [J]. Journal of south China university of technology (natural science edition), 2007, 35(3): 117-121.)
- [12] 魏美玲. 海湾大桥运营期间的风险评估[D]. 西安: 长安大学, 2012.
(WEI Meiling. The risk assessment on the service life of bay bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.)
- [13] 王玉倩. 混凝土强度检测技术在建筑工程中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
(WANG Yuqian. Application of concrete strength testing technology in construction engineering [D]. Changsha: Hunan University, 2007.)
- [14] 张禹. 钢筋锈蚀率对桥梁结构耐久性的影响分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
(ZHANG Yu. The effect analysis of rebar corrosion rate on durability of bridge structures [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.)
- [15] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰. 灰色系统理论及其应用[M]. 7版. 北京: 科学出版社, 2014.
(LIU Sifeng, YANG Yingjie, WU Lifeng. Grey system theory and its application [M]. 7th ed. Beijing: Science Press, 2014.)
- [16] KAWAMURA K, MIYAMOTO A. Condition state evaluation of existing reinforced concrete bridges using neuro-fuzzy hybrid system [J]. Computers & structures, 2003, 81(18): 1931-1940.
- [17] MORCOUS G, LOUNIS Z, MIRZA M S. Identification of environmental categories for markovian deterioration models of bridge decks [J]. Journal of bridge engineering, 2003, 8(6): 353-361.
- [18] GOLMOHAMMADI D, MELLAT-PARAST M. Developing a grey-based decision-making model for supplier selection [J]. International journal of production economics, 2012, 137(2): 191-200.
- [19] FANG Z, LIU S, SHI H, et al. Grey game theory and its applications in economic decision-making [M]. New York: Taylor & Francis Group, 2010.
- [20] LI Q X, LIU S F. The foundation of the grey matrix and the grey input-output analysis [J]. Applied mathematical modelling, 2008(32): 267-291.