

Bridge Health Evaluation in Tibet Based on Fuzzy Synthetic Evaluation Method and Analytic Hierarchy Process

Zengshun Chen, Jianting Zhou, Cheng Zhang, Jie Tang, Nan Xiang

School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing
Email: chenzs2007@163.com

Received: Dec. 14th, 2012; revised: Jan. 6th, 2013; accepted: Jan. 18th, 2013

Abstract: It is significant for decision makers to evaluation bridge health. In this paper, the fuzzy comprehensive evaluation model of bridge healthy situation was built with multiarrangement fuzzy evaluation scientific method. Combined with specific engineering example, the applied analysis was carried out. The analytical results indicated that combination AHP method with multiarrangement fuzzy evaluation make bridge health evaluation in Tibet not only scientific but also enhanced confidence level of bridge health evaluation. It also provides an evidence for the management of the bridge.

Keywords: Bridge; Analytic Hierarchy Process; Fuzzy Synthetic Evaluation

基于变权层次分析法和模糊综合评价法的西藏地区桥梁健康状况评估及应用

陈增顺, 周建庭, 张 承, 唐 杰, 向 楠

重庆交通大学土木建筑学院, 重庆
Email: chenzs2007@163.com

收稿日期: 2012 年 12 月 14 日; 修回日期: 2013 年 1 月 6 日; 录用日期: 2013 年 1 月 18 日

摘 要: 桥梁健康状况的评估对决策者具有重要意义。本文采用变权层次分析法和模糊综合评估的科学方法, 建立了桥梁健康状况的评估模型, 并结合具体工程实例进行了应用分析。分析结果表明: 用变权层次分析法和模糊综合评价法对西藏地区桥梁进行评估, 既便捷又科学, 提高了桥梁健康评估的可靠度, 为西藏地区桥梁的管理提供了依据。

关键词: 桥梁; 层次分析法; 模糊综合评判

1. 引言

桥梁作为公路交通大动脉的重要组成部分, 在国家经济建设与社会发展中起着极为重要的地位。桥梁的安全性是指桥梁在各种作用下防止倒塌、保护人员不受伤害的能力, 是桥梁最重要的质量指标^[1]。西藏幅员辽阔, 公路网密度相对较低, 高原地区的桥梁更是架通“天路”的咽喉, 是西藏人民奔向小康的希望

之桥、幸福之桥。然而, 常规的桥梁承载力评定技术在高寒地区具有局限性, 仅能评估出桥梁目前的安全状况, 不能判别其今后使用情况和耐久性, 不利于公路建设部门对其服役期间状态进行判别并采取科学的决策^[2]。本文在常规地区评估方法的基础上, 考虑西藏地区特殊的气候条件, 提出相应的评估方法。

针对服役中的桥梁通常有三种处置措施: 一是桥

梁状态较好,继续利用;二是加固处治后再利用;三是拆除重建^[3]。对于西藏而言,公路建设资金缺乏,建设材料欠缺,桥梁建设环境差且可建设周期短,如对在役桥梁采取拆除重建方案,非但耗资巨大,而且需要时间,中断交通,社会影响较大,因而拆除重建方案是下策。如何通过科学、合理、客观的评估后,继续利用桥梁或通过加固处治后利用桥梁,是西藏公路建设过程中桥梁处置措施中的上策,也是放在西藏公路桥梁建管者面前亟待解决的重要问题。

2. 西藏桥梁健康评估指标体系

2.1. 基于变权层次分析法的西藏桥梁健康评估

影响桥梁的因素众多,进行西藏地区在役桥梁综合状态评估指标研究时,主要是从承载力、耐久性、功能性、加固经济性以及美观性,并且对每个指标的影响因素给予了挖掘^[4]。运用 AHP 法解决问题大致可以分为以下几个步骤: a) 建立递阶层次结构; b) 构造两两比较判断矩阵; c) 由判断矩阵计算被比较元素的相对权重; d) 计算各层元素在总目标下的最终权重。西藏地区桥梁健康状况评估层次分析框图如图 1 所示。

2.1.1. 构造判断矩阵

以西藏地区桥梁状况从好到差排序为目标层,以挖掘出的各影响因素为准则层,第三层为方案层。首先,考虑准则层对目标层的影响的情形。用

$c_1, c_2, c_3, \dots, c_k$ 表示 k 项指标的影响,以

$p_1, p_2, p_3, \dots, p_m$ 表示 m 座桥梁。由于不同的影响因素对桥梁的健康状况不同,因此可以在模型中提高或降低某些指标的权重, c_i 与 c_j 对目标层的影响之比为: u_{ij} , 则准则层对目标层的判断矩阵:

$$A = (u_{ij})_{k \times k}$$

2.1.2. 层次排序

在准则 c_k 下,要获得 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 的排序结果,需要对其权重进行计算。对于判断矩阵

$$A = (u_{ij})_{n \times n} = \left(\frac{W_i}{W_j} \right) = \begin{pmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & \dots & W_2/W_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & W_n/W_n \end{pmatrix}$$

显然, A 为正互反矩阵,且

$$A = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{W_1} & \frac{1}{W_2} & \dots & \frac{1}{W_n} \end{pmatrix}$$

记

$$\bar{W} = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix}$$

并右乘矩阵,则有

$$A\bar{W} = \begin{pmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \dots & \frac{W_1}{W_n} \\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \dots & \frac{W_2}{W_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{W_n}{W_1} & \frac{W_n}{W_2} & \dots & \frac{W_n}{W_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix} = n\bar{W}$$

即

$$(A - nE)\bar{W} = 0$$

结果表明, $\bar{W}$ 为 A 的特征向量, n 为其特征值。根据矩阵理论可知, A 具有惟一非零的最大特征值 λ 求解判断矩阵特征值的一般方法为: 一般矩阵 $\rightarrow$ 压缩矩阵(Hessenberg 矩阵) $\rightarrow$ 三对角阵、Frobenius $\rightarrow$ 特征值。矩阵的特征值与特征向量意义与矩阵的构成有关,对于一致的判断矩阵来说,其排序向量即为 A 的特征向量,也就是说只有保证了判断矩阵的一致性才能将其特征向量作为权重来使用。

2.1.3. 变权原理求解权重

在综合评估过程中,各评估指标的权重既可以改变,也可以不改变。常规状态下的常权综合模式为:

$$V_0 = \sum_{j=1}^m w_j^{(0)} r_j$$

其中 m 为评价指标个数, $w_j^{(0)}$ 为第 j 个指标的权重, r_j 为第 j 个指标的评价值。对于桥梁整体综合状态评估而言,由于影响指标众多,当个别影响指标导致桥梁构件出现严重缺陷时,最终评估结果 V_0 不一定会出现太大的变化,使得结果不能反映出桥梁结构的真实状况。这时应采用变权模糊综合的方法对各评估指标权重进行适当调整。

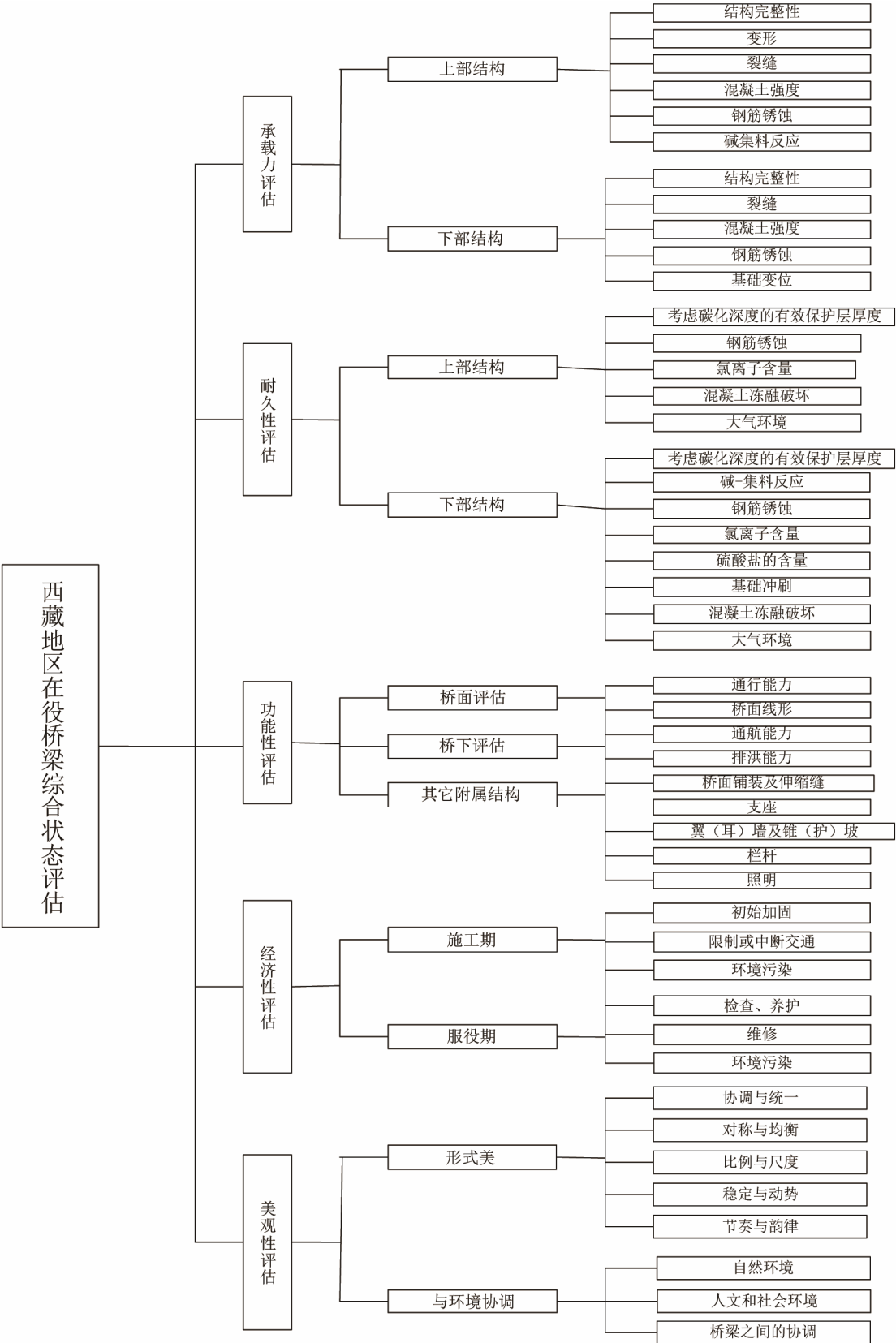


Figure 1. Bridge health evaluation diagram in Tibet
图 1. 西藏地区桥梁健康状况评估框图

变权模式为: $V = \sum_{j=1}^m w_j (r_1, \dots, r_m, w_1^{(0)}, \dots, w_m^{(0)}) r_j$,

其中变权值 w_j 应满足变权的三条公理如下:

归一性: $\sum_{j=1}^m w_j (r_1, \dots, r_m) = 1$;

连续性: $w_j (r_1, \dots, r_m)$, $(j=1, 2, \dots, m)$

关于每个变元连续;

惩罚性: $w_j (r_1, \dots, r_m)$, $(j=1, 2, \dots, m)$

关于变元 x_j 单调减少。

当采用均衡函数:

$$\sum_a (r_1, \dots, r_m) = \sum_{j=1}^m r_j^a \quad (0 < a < 1)$$

时, 得到变权公式:

$$w_j (r_1, \dots, r_m) = \frac{w_j^{(0)} r_j^{a-1}}{\sum_{k=1}^m w_k^{(0)} r_k^{a-1}} \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

对变权系数 a , 可以由采用专家调查法、调值法、高低值法、倒推法等方法确定。经过多次计算比较, 本文认为 $a = 0.2$ 便可适用于一般工程中的大多数情况。

2.1.4. 一致性检验

由一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1}$$

随机一致性指标 RI (心理学上规定 1~9 个尺度):

$$RI \neq 0$$

知一致性比率:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

当 $CR < 0.1$ 时, A, B_k 均为一致矩阵。

本文旨在通过定量的方式说明各项指标对西藏地区桥梁健康状况的影响大小, 最后定性的进行逐一比较、判断, 使得决策者能够把复杂的问题顺理成章, 得到桥梁健康状况的排序。

2.2. 基于模糊数学的西藏桥梁健康评估

2.2.1. 模糊综合评价法的步骤^[5]

1) 建立综合评价的因素集 u 及 u_i ;

2) 建立各因素的评价集 V ;

3) 确定各因素的权重 A 和 A ; 参考《公路桥涵养护规范》确定桥梁技术状况因素权重集;

4) 确定隶属关系, 建立单因素模糊评价矩阵 R_i

5) 多级模糊综合评价:

①对第二层次的每个子因素集 u_i 做一级模糊综合评价得:

$$B_i = A_i \cdot R_i$$

②对 u 中每一个因素, 用 B_i 作为单因素评价向量, 则可构成一个 $p \times m$ 阶矩阵 $\tilde{R}_i$ 。得到 u 的二级模糊评价结果为:

$$B = A \cdot R$$

2.2.2. 桥梁健康状况各因素之间的关系

通过变权层次分析法或模糊综合评价法找到桥梁健康状况的排序后, 通过模糊数学中的隶属度这一指标找到影响桥梁健康状况各因素之间的关系, 可以找到影响桥梁健康状况最大的因素。

首先建立条件隶属度的模型, 来对这一关系进行刻画根据受益隶属度的定义, 设有两个模糊集合 A, B , 隶属度分别为^[6,7]:

$$\mu_{\tilde{A}}(\sum x_i), \mu_{\tilde{B}}(\sum x_i),$$

则称

$$\mu_{B_w}(\sum x_i | A) = \frac{\mu_{\tilde{A}} - \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(\sum x_i)}{\mu_{\tilde{A}}}$$

为模糊集合 A 发生的条件下, 模糊集合 B 的受益隶属度(其中, $\sum x_i$ 表示第 i 座桥梁 n 项指标之和)。

其次, 建立综合指标、功能性、美观性、耐久性等有关隶属度:

$$\mu_{\tilde{A}}(\sum x_i) = \frac{x_i}{150}$$

$$\mu_{\tilde{B}}(\sum y_i) = \frac{y_i}{50}$$

$$\mu_{\tilde{C}}(\sum z_i) = \frac{z_i}{50}$$

$$\mu_{\tilde{D}}(\sum s_i) = \frac{s_i}{50}$$

其中 $\mu_{\tilde{A}}(\sum x_i)$ 、 $\mu_{\tilde{B}}(\sum y_i)$ 、 $\mu_{\tilde{C}}(\sum z_i)$ 、 $\mu_{\tilde{D}}(\sum s_i)$

分别表示综合指标、功能性、美观性、耐久性的隶属度。

最后，得模型：

$$p_1^{(2)} = \mu B_W \left(\sum x_i | A \right) + \mu B \left(\sum y_i \right)$$

$$p_2^{(2)} = \mu B_W \left(\sum x_i | A \right) + \mu C \left(\sum z_i \right)$$

$$p_3^{(2)} = \mu B_W \left(\sum x_i | A \right) + \mu D \left(\sum s_i \right)$$

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{15 \times 15}$$

然后得到判断矩阵：

$$B_k = \left(b_{ij}^{(k)} \right)_{48 \times 48}, \quad b_{ij}^{(k)} = \frac{x_i^{(k)}}{x_j^{(k)}}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, 15; \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 48$$

即：

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{x_1^{(1)}}{x_2^{(1)}} & \dots & \frac{x_1^{(1)}}{x_{48}^{(1)}} \\ \frac{x_2^{(1)}}{x_1^{(1)}} & 1 & \dots & \frac{x_2^{(1)}}{x_{48}^{(1)}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{x_{48}^{(1)}}{x_1^{(1)}} & \frac{x_{48}^{(1)}}{x_2^{(1)}} & \dots & 1 \end{bmatrix}_{48 \times 48}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{x_1^{(2)}}{x_2^{(2)}} & \dots & \frac{x_1^{(2)}}{x_{48}^{(2)}} \\ \frac{x_2^{(2)}}{x_1^{(2)}} & 1 & \dots & \frac{x_2^{(2)}}{x_{48}^{(2)}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{x_{48}^{(2)}}{x_1^{(2)}} & \frac{x_{48}^{(2)}}{x_2^{(2)}} & \dots & 1 \end{bmatrix}_{48 \times 48}, \dots, B_{48} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{x_1^{(48)}}{x_2^{(48)}} & \dots & \frac{x_1^{(48)}}{x_{48}^{(48)}} \\ \frac{x_2^{(48)}}{x_1^{(48)}} & 1 & \dots & \frac{x_2^{(48)}}{x_{48}^{(48)}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{x_{48}^{(48)}}{x_1^{(48)}} & \frac{x_{48}^{(48)}}{x_2^{(48)}} & \dots & 1 \end{bmatrix}_{48 \times 48}$$

通过前面提到过的求判断矩阵的权向量的 *matlab* 方法以及各指标数据 $x_i^{(k)}$ ，可得上面 48 个判断矩阵的权向量，以每个权向量为列向量构成矩阵，记为 $w^{(3)}$

因此，第三层对第一层的组合权向量：

$$W = w^{(3)} \times w^{(2)}$$

根据 *matlab* 计算结果，最后得到：

$$W^1 = \begin{bmatrix} 0.0205 & 0.0268 & 0.0225 & 0.0238 & 0.0266 & 0.0253 & 0.0308 & 0.0322 & 0.0274 & 0.0265 & 0.0262 & 0.0252 & 0.0204 & 0.0203 & 0.0206 & 0.0266 & 0.0235 & 0.0186 & 0.0197 & 0.0232 & 0.0214 & 0.0284 & 0.0289 & 0.0278 & 0.0160 & 0.0175 & 0.0198 & 0.0080 & 0.0076 & 0.0135 & 0.0158 & 0.0171 & 0.0161 & 0.0122 & 0.0102 \end{bmatrix}$$

其中， $p_1^{(2)}$ 、 $p_2^{(2)}$ 、 $p_3^{(2)}$ 分别表示功能性评估、美观性评估、耐久性评估。用相关的软件得到 n 座桥梁各影响因素之间的关系。

3. 应用实例

应用本文的方法，取了西藏某地区的 48 座桥梁 (15 项影响因素) 进行分析，得到 48 座桥梁健康状况的排序 (从差到好依次排序)。

首先，对 15 项影响因素的权重进行处理，

$$\begin{bmatrix} 0.0166 & 0.0193 & 0.0209 & 0.0349 & 0.0349 & 0.0147 \\ 0.0133 & 0.0174 & 0.0263 & 0.0190 & 0.0211 & 0.0075 \\ 0.0075 \end{bmatrix}$$

有上述结果即可得到桥梁健康状况从差到好的排序，可为管养单位提供决策。具体排序如表 1 (本文取前 6 名)。

在得到桥梁健康状况从差到好的排序后，用模糊数学隶属度知识找到各影响因素对桥梁健康状况影响的大小。表 2 以选出的 6 座桥梁以及与功能性评估、美观性评估、耐久性评估之间的关系：

下面只需根据这些数据，用相应软件将数据两两组合处理后得到以下均值和方差，将得到的均值和

Table 1. Bridge condition sort from bad to good
表 1. 桥梁状况从差到好的排序

序号	1	1	3	4	5	6
指标顺序	0.0349	0.0349	0.0322	0.0308	0.0289	0.0284
桥梁排序	P ₃₉	P ₄₀	P ₈	P ₇	P ₂₃	P ₂₂

Table 2. The relationship of functional evaluation, beautiful sex evaluation and durability evaluation
表 2. 功能性评估、美观性评估、耐久性评估之间的关系

桥梁编号	功能性评估	美观性评估	耐久性评估
40	0.96	1	0.98
39	0.948169	1	0.947042
8	0.92	0.902222	0.94
7	0.88	0.863256	0.92
23	0.876279	0.866512	0.879535
22	0.872813	0.859063	0.87625

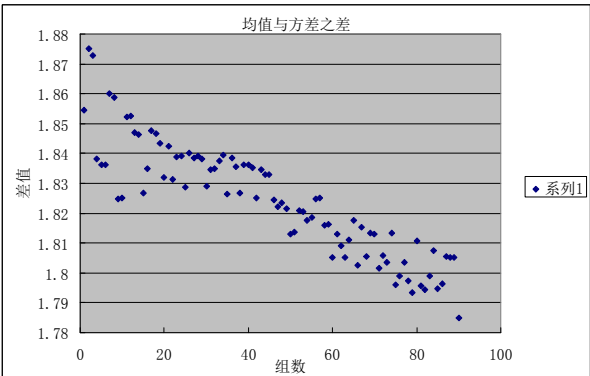


Figure 2. The chart after subtraction by mean and variance
图 2. 均值和方差相减后图表

方差相减，得到图 2。

由图 2 可知：第二组数据最大，桥梁健康状况和最大影响因素的对应关系为：

P₇、P₈——功能性；P₃₉、P₂₂——美观性；P₄₀、

P₂₃——耐久性

即：在功能性、美观性、耐久性这三个因素中，第 7 座和第 8 座桥梁受功能性的影响较大；第 39 座和第 22 座桥梁受美观性的影响较大；第 40 座和第 23 座桥梁受耐久性的影响较大。

4. 结语

服役桥梁在管养过程中，其安全状况等级如何、是否需要进行治疗以及加固、重建方案是怎样的均是当前急需解决的问题。本文在对西藏地区在役桥梁病害调查的基础上，从承载力、耐久性、功能性、加固经济性以及美观性五大影响因素出发，运用变权层次分析法和模糊综合评判法，构建出了西藏在役桥梁的状态评估模型，并通过实例进行了验证了评估方法的合理性，避免了仅从个别因素就做出判断而带来的片面性，提高了桥梁健康评估的可靠性。与此同时，桥梁健康状况的评估对为管养单位提供加固治疗、管养决策提供了重要依据。

参考文献 (References)

- [1] 陈肇元, 徐有邻, 钱稼茹. 土结构工程的安全性及耐久性[J]. 建筑技术, 2002, 33(4): 248-253.
- [2] 蓝勇. 高寒地区桥梁承载力快速评估技术[D]. 重庆交通大学, 2010.
- [3] 戴灿. 三峡库区县乡公路桥梁实用加固处治技术研究[D]. 重庆交通大学, 2009.
- [4] 卢颖. 基于状态评估的西藏地区在役钢筋混凝土桥梁处置决策分析[D]. 重庆交通大学, 2011.
- [5] 梁潇, 杨益. 基于模糊数学的桥梁健康评估模型[J]. 山西建筑, 2009, 35(5): 287-288.
- [6] 梁保松. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用(第 3 版)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.