

# 基于云重心理论的桥梁技术状态评定方法

郝天之<sup>1,2,3</sup> 谢正元<sup>1</sup> 陈齐凤<sup>3</sup> 王龙林<sup>3</sup>

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005 2 哈尔滨工业大学 黑龙江哈尔滨 150090

3 广西交通科学研究院有限公司 广西南宁 530007)

**摘要:** 鉴于现行桥梁技术状态评定方法未体现评定过程模糊性和随机性的不足, 本文将云重心评价理论及劣化模型引入到桥梁技术状态评定当中, 在桥梁技术状态的云划分方法的基础上, 分别建立各层级结构与构件的云模型, 将桥梁技术状态划分为5个云图, 建立基于云重心理论的桥梁技术状态评定方法, 获得了桥梁技术状态劣化模型, 对南宁大桥采用云重心方法及现行规范方法进行详细的技术状态评价, 研究表明, 本文提出的方法与规范方法评估结果等级相同, 但本文提出的模型同时考虑了桥梁技术状态评定过程中的随机性和模糊性, 在桥梁技术状态评定中具有很高的可信度和广泛的适用性。

**关键词:** 云重心理论 桥梁技术状态评估 模糊性与随机性 劣化模型 钢拱桥

## 引言

桥梁技术状态评定过程中, 依据《公路桥梁技术状况评定标准》中桥梁技术状态评定指标有些是既可定量、也可定性描述的。定量或定性的评定指标往往受仪器设备可靠性、精度及技术人员的操作经验、主观性或熟练程度不同, 导致评定分值具有模糊性、随机性与差异性。而以前规范的评定方法缺乏相应的应对方法和指导意见。为考虑桥梁结构工程评估过程的模糊性、随机性与差异性, 国内外学者开展了一系列研究:

马建勋等提出服役结构可靠性模糊综合评判的基本理论与实施方法, 对现有结构评判方法中随机性、主观性过大的缺陷作出了改进<sup>[1]</sup>; 兰海等引用变权重、灰聚类分析综合的概念, 实现了评价指标的量化与综合<sup>[2]</sup>。Elhag等采用证据推理方法对桥梁技术状态进行评定, 得出更符合实际的桥梁技术状态级别划分<sup>[3]</sup>。黄侨等建立了钢管混凝土拱桥4层次评价模型, 通过正态关联函数进行关联度的计算, 确定了模型的评价指标和分级标准, 形成成套的考虑不确定性的钢管混凝土拱桥评价指标体系及方法<sup>[4]</sup>。沈培文等建立了递阶层次模型的钢管混凝土拱桥评定方法<sup>[5]</sup>。宗周红等提出结合群判断理论、加权集值统计理论的变权桥梁综合评定方法, 该评定方法可以考虑评定过程中的随机性与模糊性<sup>[6]</sup>。李爱群等建立了参

数识别的动态结构可靠度评定方法, 应用于某运河大桥的施工控制中<sup>[7]</sup>。Sasmal等利用模糊理论结合层次分析法, 提出了既有桥梁状态等级评定方法, 在桥梁构件组成优化一致向量的基础上采用多目标决策模型(MADM)对单个构件进行状态评定<sup>[8-9]</sup>。

综上所述, 国内外学者对桥梁技术状态评定已经开展了一系列的研究, 在一定程度上考虑了评定过程中的随机性与模糊性, 但目前的评定方法体系在同时考虑客观复杂因素与主观评定的模糊性与随机性时, 显得极为困难, 故本文引入一个可同时考虑客观复杂因素与主观评定的模糊性与随机性的强大数学工具, 即云理论, 在计算过程中云理论算法两次用到高斯随机数的生成, 且一次随机数是另一次随机数的基础, 因此引入云理论算法具有随机性和模糊性。由于具有处理模糊性、随机性问题的突出优势, 云理论已在交通运输、国防工业等涉及模糊与随机概念的专业领域获得广泛的应用<sup>[10-12]</sup>。

本文基于云重心理论, 提出了桥梁工程的技术状态评定方法, 在桥梁技术状态的云划分方法的基础上, 将桥梁技术状态划分为5个云图, 采用云重心位置的改变来最终评定桥梁的技术状态等级。采用文中提出的方法, 对一座在役钢拱桥进行了检测评定, 并与现有规范技术评估方法进

转自《土木工程学报》

行了对比,结果显示,本文提出的基于云重心理论的桥梁工程技术状态评定方法具有充分的适用性和稳定性。

## 1 云重心评定方法的提出

### 1.1 云模型的桥梁技术状态评定过程

对于桥梁技术状态的评定,由细部到总体分为构件、部件、结构(桥面系、上部结构、下部结构)和全桥评定。云模型的桥梁技术状态评定同样可按照构件、部件、结构、全桥分层进行综合评定。

首先依据检测数据,将各项细分的评定指标用云模型表示,利用综合云将各评定指标进行综合,构建出构件技术状态评定云。由构件技术状态评定云,依据云重心评定理论,进而评定出部件技术状态云。依据全桥技术状态云和桥梁技术状态评定等级划分标尺对全桥技术状态进行最终评定,云模型的桥梁技术状态评定过程如图1所示。

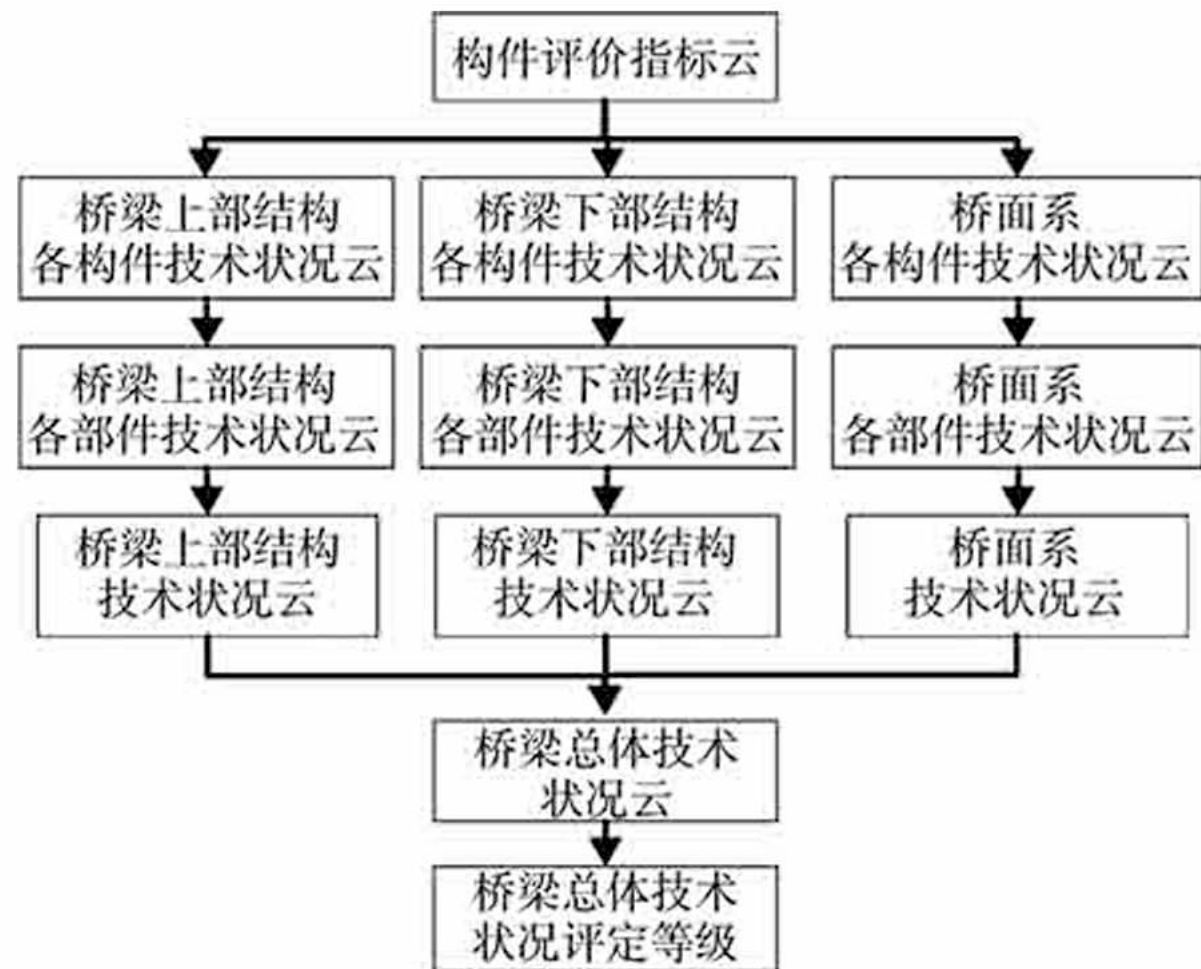


图1 云模型的桥梁技术状态评定过程

### 1.2 桥梁技术状态评定等级的云模型表示

桥梁技术状态评定等级为定性描述,划分为1类~5类,对应的值域为[0, 100],可根据规范或专家确定各技术等级对应的数域变化区间,见表1。设评定等级的区间为 $[C_{\min}, C_{\max}]$ ,其中 $C_{\min} < C_{\max}$ ,根据云模型的3En规则,可将评定等级转化为云模型<sup>[13]</sup>:

$$D_i(Ex_i, En_i, He_i), \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (1)$$

式中:

$$Ex_i = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2}, \quad En_i = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6}, \quad He_i = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6\delta_i}$$

表1 桥梁技术状态定性等级对应的数域变化区间

技术状态 评分	技术状态等级 $D_j$				
	5类	4类	3类	2类	1类
$D_r$	$[0, C_1)$	$[C_1, C_2)$	$[C_2, C_3)$	$[C_3, C_4)$	$[C_4, 100]$

### 1.3 桥梁构件评定指标的云模型构建

针对桥梁某一构件的某一定量评定指标,  $n$ 个桥梁检测专家对其进行打分。每个专家的打分不是一个具体的数值,而是该项指标应打分的一个区间,则产生 $n$ 个评定区间:

$$p_1(a_1, b_1), p_2(a_2, b_2), \dots, p_i(a_i, b_i), \dots, p_n(a_n, b_n), \quad \text{其中 } a_i \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad p_i \text{ 表示第 } i \text{ 个专家。}$$

根据云模型的3En规则,可将每个专家的评定结果转化为一朵云<sup>[14-15]</sup>:

$$p_i(Ex_i, En_i, He_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} Ex_i = \frac{a_i + b_i}{2} \\ En_i = \frac{b_i - a_i}{6} \\ He_i = \frac{b_i - a_i}{6\delta_i} = \frac{En_i}{\delta_i} \end{cases}$$

$\delta_i$ 一般为大于3的常数。

对这一定量指标,由 $n$ 个专家的评定结果评定得到了 $n$ 朵云,由此 $n$ 朵云进而将此定量指标表示为1个一维云模型:

$$P(Ex, En, He) \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} Ex = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ex_i = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (a_i + b_i) \\ En = \frac{\max(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n) - \min(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n)}{6} \\ He = \frac{En}{\delta} \end{cases}$$

由此,可将定量指标用1个综合云表示<sup>[16]</sup>。针对桥梁某一构件的某一定性评定指标,  $n$ 个桥梁检测专家按评语集对其进行定性评定。由此获得针对这一评定指标的 $n$ 个评语。设评语对应的数域区间为 $[c_i, d_i]$ ,其中 $c_i < d_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。根据云模型中的3En规则,可将 $n$ 组评语转化

为 $n$ 个云模型<sup>[17]</sup>:

$$p_i(Ex_i, En_i, He_i), i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} Ex_i = \frac{c_i + d_i}{2} \\ En_i = \frac{d_i - c_i}{6} \\ He_i = \frac{d_i - c_i}{6\delta_i} \end{cases}$$

对该定性指标, 由 $n$ 个专家的评定结果评定得到了 $n$ 朵云, 同样根据云模型的3En规则, 将每个专家的评定结果转化为1个一维云模型<sup>[18-19]</sup>:

$$P(Ex, En, He) \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} Ex = \frac{Ex_1En_1 + Ex_2En_2 + \dots + Ex_nEn_n}{En_1 + En_2 + \dots + En_n} \\ En = (En_1 + En_2 + \dots + En_n) \\ He = \frac{En}{\delta} \end{cases}$$

由此, 可将定性指标用1个综合云进行表示。

#### 1.4 桥梁技术状态评定云模型构建及评定

对于有 $m$ 个定性或定量评定指标构件, 每个评定指标包含有 $n$ 个专家评定得出的 $n$ 朵云。对于此构件, 便可构建成 $m$ 维的决策矩阵 $U_G$ :

$$U_G = \begin{Bmatrix} P_{11} & P_{21} & \dots & P_{m1} \\ P_{12} & P_{22} & \dots & P_{m2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1n} & P_{2n} & \dots & P_{mn} \end{Bmatrix} = \{P_1, P_2, \dots, P_m\} \quad (6)$$

各指标的权重值用 $W=\{W_1, W_2, \dots, W_m\}$ 表示。

引入云重心概念, 将各指标 $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 的期望向量 $g=\{EX_1, EX_2, \dots, EX_m\}$ 视为云重心的位置, 而权重向量 $W=\{W_1, W_2, \dots, W_m\}$ 视为云重心高度, 得到构件的实际综合云重心向量:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\} \quad (7)$$

其中:  $S_i = g_i \cdot W_i, i=1, 2, \dots, m$

设构件理想状态下云重心向量为 $S^0 = \{S_1^0, S_2^0, \dots, S_m^0\}$ , 将构件理想状态下云重心向量作为参

考, 对云重心向量 $S=\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 进行归一化, 得到归一化云重心向量:

$$S^T = \{S_1^T, S_2^T, \dots, S_m^T\} \quad (8)$$

式中:

$$S_i^T = \begin{cases} \frac{S_i - S_i}{S_i}, & S_i > S_i \\ \frac{S_i - S_i}{S_i}, & S_i \leq S \end{cases}$$

引入实际构件技术状态与理想状态之间的偏离度概念, 将归一化后的实际云重心向量乘以权重值并相加, 得到实际构件技术状态与理想状态的加权偏离度:

$$\theta = \sum_{j=1}^m S_j^T \cdot W_j \quad (9)$$

由求得的加权偏离度 $\theta$ , 生成定性云模型, 作为构件实际技术状态的评定云 $G(Ex, En, He)$ 。将评定云置于构件评定标尺中, 评定构件的实际技术状态。

对于有 $N$ 个构件的部件, 构建完成构件实际技术状态的评定云后, 便可构建成 $N$ 维的部件评定决策矩阵 $U_B$ 。

$$U_B = \{G_1, G_2, \dots, G_N\} \quad (10)$$

采用与评定构件技术状态同样的方法, 得到部件实际技术状态与理想状态的加权偏离度。

$$\theta_B = \sum_{j=1}^N G_j^T \cdot W_j \quad (11)$$

进而得到部件实际技术状态的评定云 $B(Ex, En, He)$ 。将评定云置于部件评定标尺中, 评定部件的实际技术状况和完整性<sup>[20]</sup>。

亦可采用同样的方法, 利用桥梁部件的技术状况的云模型 $B(Ex, En, He)$ , 加权运算得到桥梁上部结构、下部结构及桥面系的技术状态的云模型 $J(Ex, En, He)$ , 进而加权运算得到全桥整体技术状态的云模型 $A(Ex, En, He)$ 。将评定云置于全桥评定标尺中, 评定得出全桥的实际技术状态。

## 2 技术状态评定结果的桥梁劣化模型确定

对于运营初期的桥梁, 由于未进行过桥梁养护维修作业, 因此其劣化模型的构建采用文献

[21]自然状态下的劣化模型。对于自然状态下的桥梁技术状态,引入参数 $\lambda$ ,桥梁技术状态的劣化模型为:

$$D(n)=\begin{cases} D(1)=D_c \\ D(n-1)\times\exp\left[-\left(\frac{\lambda\cdot n}{N_d}\right)^A\right] \end{cases} \quad n\geq 2, \lambda>0 \quad (12)$$

以上模型适用于正常适用状态下,桥梁自然老化(未经结构性修复的桥梁类型)的各种桥型(包括梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等)。在实际桥梁运行过程中,会定期对桥梁进行检测和技术状态评定。如果桥梁进行了 $k$ 次检测评定,则桥梁检测评定时间对应的桥龄序列表示为 $N=\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ ,采用前述的云重心评定方法评定得出的 $k$ 次检测评定结果表示为 $D=\{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ 。式(12)中, $\lambda$ 及 $A$ 为劣化模型的待定参数。可以利用已有 $N$ 次的检测评定结果,采用广义最小二乘法,寻找一组最佳的解 $\lambda^*$ 及 $A^*$ ,进而确定桥梁的劣化模型。为了求解 $\lambda^*$ 和 $A^*$ ,构造如下目标函数 $M(\lambda, A)$ :

$$M(\lambda, A) = \sum_{j=1}^k [D(n_j) - D_j]^2 \quad (13)$$

式中:

$$D(n_j) = D_c \times \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{N_d}\right)^A \cdot (n_j^A + (n_j-1)^A + \dots + 2^A)\right] \quad (14)$$

当目标函数 $M(\lambda, A)$ 取得极小值时的一组解,也就是 $\lambda^*$ 和 $A^*$ 的最佳解<sup>[22]</sup>。

$$\frac{\partial M(\lambda, A)}{\partial \lambda} = 2 \sum_{j=1}^k [D(n_j) - D_j] \cdot \frac{\partial D(n_j)}{\partial \lambda} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial M(\lambda, A)}{\partial A} = 2 \sum_{j=1}^k [D(n_j) - D_j] \cdot \frac{\partial D(n_j)}{\partial A} = 0 \quad (16)$$

式(15)和式(16)同时成立时,可使的函数 $M(\lambda, A)$ 取得最小值。

分解计算后可得两个二元一次方程,联立求解即可得到 $\lambda^*$ 和 $A^*$ 的唯一解。将求解得 $\lambda^*$ 和 $A^*$ 的唯一解代入式(12),即可确定桥梁技术状况的劣化模型。

$$D(n) = \begin{cases} D(1) = D_c \\ D(n-1) \times \exp\left[-\left(\frac{\lambda^* \cdot n}{N_d}\right)^{A^*}\right] \end{cases} \quad (17)$$

对于成桥后仅进行过一次检测评定的桥梁,由于仅有一组检测时桥龄和评定结果数据 $[N, D_N]$ ,无法求解两个待定参数 $\lambda$ 及 $A$ ,可先采用文献[21]中表2-2按经验直接确定参数 $A$ 的值,再利用检测时桥龄和评定结果数据建立方程求解参数 $\lambda$ ,即:

$$D_N = D_c \times \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{N_d}\right)^A \cdot (N^A + (N-1)^A + \dots + 2^A)\right] \quad (18)$$

求得参数 $\lambda$ 为:

$$\lambda = -N_d \cdot \sqrt[A]{\frac{\ln\left(\frac{D_N}{D_c}\right)}{(N^A + (N-1)^A + \dots + 2^A)}} \quad (19)$$

### 3 评定方法的实际工程应用

#### 3.1 工程概况

本节将技术状态劣化模型及云重心评定方法应用于实际的桥梁检测评定工程当中,同时采用云重心评定方法和规范中的评定方法对桥梁进行技术状态评定,通过两种方法得出的评定结果来验证云重心评定方法的适用性。选取南宁大桥检测评定项目作为本文工程背景。南宁大桥桥梁全长734.50m,引桥长434.00m,主桥采用300.50m跨径曲线蝴蝶拱,该桥于2009年9月21日建成通车。

该桥主要技术标准为城-A;大桥梁总体布置图如图2所示,横断面如图3所示。

#### 3.2 云模型评定指标体系及权重确定

根据本文上述的云模型的桥梁技术状态评定过程,对南宁大桥主桥的评定采用构件、部件、结构和全桥四个层次进行评定。将全桥划分为上部结构、下部结构、桥面系。上部结构包括拱肋、横向联结系、主梁、吊杆、系杆这5个部件;下部结构包括桥墩基础1个部件;桥面系包括桥面铺装、伸缩缝、人行道、护栏、排水系统、照明标志这6个部件。其中拱肋、横向联结系、主梁等部件再根据桥梁的结构组成划分为不同的构件。针对南宁大桥中的不同结构层次与结构构件,采用本文前述的不确定层次分析法来确定各指标的权重。限于篇幅,下文以上部结构中

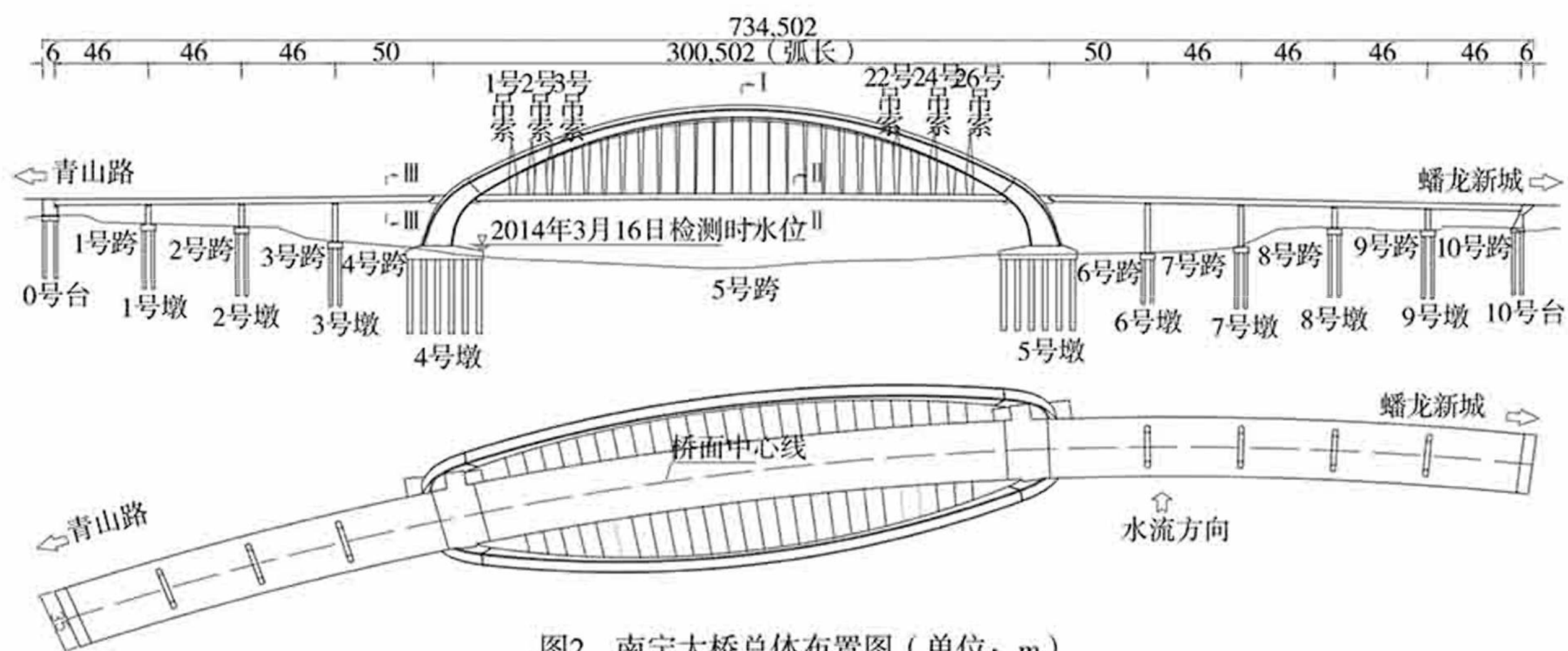


图2 南宁大桥总体布置图 (单位: m)

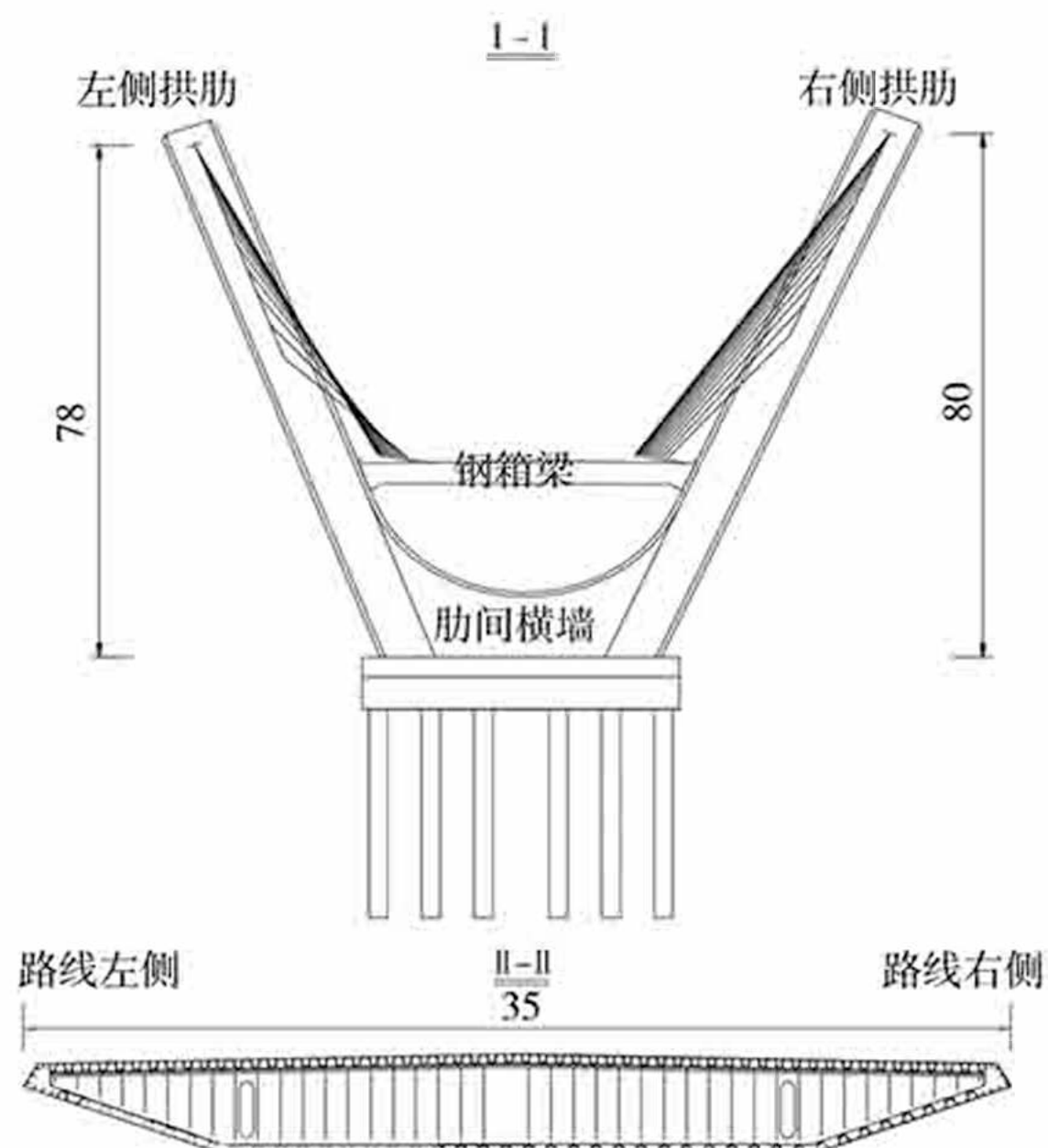


图3 南宁大桥横断面图 (单位: m)

的5个部件指标为例, 对各层次的评定指标进行权重的确定。将拱肋、横向联结系、主梁、吊杆、系杆这5个部件评定指标用 $B_1, B_2 \dots B_5$ 表示。根据专家意见, 将5个部件评定指标的相对重要性进行两两比较, 形成的两两比较判断矩阵A:

$$A = \begin{bmatrix} [1,1] & [1.9,2.3] & [2.6,3] & [2.3,2.5] & [1.5,2] \\ [\frac{1}{2.3}, \frac{1}{1.9}] & [1,1] & [1.7,2] & [1.5,1.8] & [0.8,0.9] \\ [\frac{1}{3}, \frac{1}{2.6}] & [\frac{1}{2}, \frac{1}{1.7}] & [1,1] & [0.8,0.9] & [0.5,0.6] \\ [\frac{1}{2.5}, \frac{1}{2.3}] & [\frac{1}{1.8}, \frac{1}{1.5}] & [\frac{1}{0.9}, \frac{1}{0.8}] & [1,1] & [0.7,0.9] \\ [\frac{1}{2}, \frac{1}{1.5}] & [\frac{1}{0.9}, \frac{1}{0.8}] & [\frac{1}{0.6}, \frac{1}{0.5}] & [\frac{1}{0.9}, \frac{1}{0.7}] & [1,1] \end{bmatrix} \quad (20)$$

由:

$$A^- = \begin{bmatrix} 1 & a_{12}^- & \dots & a_{1n}^- \\ \frac{1}{a_{12}^-} & 1 & \dots & a_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}^-} & \frac{1}{a_{2n}^-} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad A^+ = \begin{bmatrix} 1 & a_{12}^+ & \dots & a_{1n}^+ \\ \frac{1}{a_{12}^+} & 1 & \dots & a_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}^+} & \frac{1}{a_{2n}^+} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

因此可得:

$$A^- = \begin{bmatrix} 1 & 1.9 & 2.6 & 2.3 & 1.5 \\ \frac{1}{2.3} & 1 & 1.7 & 1.5 & 0.8 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 0.8 & 0.5 \\ \frac{1}{2.5} & \frac{1}{1.8} & \frac{1}{0.9} & 1 & 0.7 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{0.9} & \frac{1}{0.6} & \frac{1}{0.9} & 1 \end{bmatrix} \quad A^+ = \begin{bmatrix} 1 & 2.3 & 3 & 2.5 & 2 \\ \frac{1}{1.9} & 1 & 2 & 1.8 & 0.9 \\ \frac{1}{2.6} & \frac{1}{1.8} & 1 & 0.9 & 0.6 \\ \frac{1}{2.3} & \frac{1}{1.5} & \frac{1}{0.8} & 1 & 0.9 \\ \frac{1}{1.5} & \frac{1}{0.8} & \frac{1}{0.5} & \frac{1}{0.7} & 1 \end{bmatrix}$$

得:

$$\omega_k^- = \frac{\left[ \prod_{i=1}^n \frac{a_{ki}^- a_{kk}^-}{a_{ik}^- a_{ii}^-} \right]^{\frac{1}{2n}}}{\sum_{j=1}^n \left[ \prod_{i=1}^n \frac{a_{ji}^- a_{jj}^-}{a_{ij}^- a_{ii}^-} \right]^{\frac{1}{2n}}}, \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (21)$$

$$\omega = [k\omega^-, m\omega^+] = \begin{bmatrix} 0.324283 & 0.360982 \\ 0.178631 & 0.198847 \\ 0.105944 & 0.117933 \\ 0.121222 & 0.139246 \\ 0.191701 & 0.213395 \end{bmatrix}$$

$$\omega_k^+ = \frac{\left[ \prod_{i=1}^n \frac{a_{ki}^+ a_{kk}^+}{a_{ik}^+ a_{ii}^+} \right]^{\frac{1}{2n}}}{\sum_{j=1}^n \left[ \prod_{i=1}^n \frac{a_{ji}^+ a_{jj}^+}{a_{ij}^+ a_{ii}^+} \right]^{\frac{1}{2n}}}, \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (22)$$

取权重区间的中值作为指标的权重值, 则有:

$$\omega' = \frac{1}{2}(k\omega^- + m\omega^+) = \begin{bmatrix} 0.350 \\ 0.193 \\ 0.115 \\ 0.134 \\ 0.208 \end{bmatrix}$$

得:

$$\omega^- = (\omega_1^-, \omega_2^-, \omega_3^-, \omega_4^-, \omega_5^-) = (0.335183 \quad 0.184635 \quad 0.109505 \quad 0.125296 \quad 0.198144)$$

$$\omega^+ = (\omega_1^+, \omega_2^+, \omega_3^+, \omega_4^+, \omega_5^+) = (0.350331 \quad 0.192979 \quad 0.114454 \quad 0.135138 \quad 0.207099)$$

权重系数 $k$ 、 $m$ 的公式如下:

$$k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}}, \quad m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}} \quad (23)$$

$$k = 0.966417, \quad m = 1.030403$$

则权重向量为:

从以上权重计算结果可知, 本桥两拱肋间的肋间平台为重要的承重, 与常规桥梁中横向联系有所区别, 因此其权重较规范中的权重有较大区别。最终权重的计算结果更加适用于本桥的评定, 也反映出不确定型层次分析法在桥梁检测评定中根据桥型特点确定各指标权重的适用性。采用同样的方法, 可确定全桥的云模型评定指标体系中各指标的权重, 各指标权重见表2。

表2 云模型评定指标体系权重

结构	部件	构件	评定指标
上部结构 0.40	拱肋 0.350	钢拱肋 0.73	(1) 涂层缺陷; (2) 焊缝开裂; (3) 构件扭曲变形、局部损伤; (4) 腐蚀、生锈; (5) 主拱圈挠度; (6) 拱肋位移
		混凝土拱肋 0.27	(1) 混凝土裂缝; (2) 蜂窝麻面; (3) 空洞; (4) 混凝土保护层厚度; (5) 钢筋锈蚀; (6) 混凝土碳化; (7) 主拱圈挠度; (8) 拱肋位移
	横向联结系 0.193	肋间平台 0.82	(1) 混凝土裂缝; (2) 蜂窝麻面; (3) 空洞; (4) 混凝土保护层厚度; (5) 钢筋锈蚀; (6) 混凝土碳化
		肋间横墙 0.18	(1) 混凝土裂缝; (2) 蜂窝麻面; (3) 空洞; (4) 混凝土保护层厚度; (5) 钢筋锈蚀; (6) 混凝土碳化
	主梁 0.115	主梁 1.00	(1) 涂层劣化; (2) 锈蚀; (3) 焊缝开裂; (4) 铆钉损失; (5) 构件裂缝; (6) 跨中挠度; (7) 构件变形; (8) 结构变位
	吊杆 0.134	吊杆 1.0	(1) 渗水; (2) 锈蚀; (3) 锚头损坏; (4) 防护套损坏; (5) 断丝
系杆 0.208	系杆 1.0	(1) 锈蚀; (2) 外部涂层脱落; (3) 系杆连接松动; (4) (1) 锚头防护套损坏; (5) 断丝	
下部结构 0.40	基础 1.0	基础 1.0	(1) 冲刷淘空; (2) 剥落露筋; (3) 冲蚀; (4) 沉降; (5) 滑移; (5) 裂缝
桥面系 0.20	桥面铺装 0.41	桥面铺装 1.0	(1) 变形; (2) 泛油; (3) 破损; (4) 裂缝
	伸缩缝 0.25	伸缩缝 1.0	(1) 凹凸不平; (2) 锚固区缺陷; (3) 破损; (4) 失效
	人行道 0.10	人行道 1.0	(1) 破损; (2) 缺失
	护栏 0.10	护栏 1.0	(1) 破损; (2) 缺失
	排水 0.10	排水 1.0	(1) 排水不畅; (2) 泄水管缺陷
	照明 0.05	照明 1.0	(1) 损坏; (2) 缺失

### 3.3 桥梁检测结果

通过对南宁大桥病害的详细调查,该桥主要病害有:(1)吊索部分上锚头锈蚀、下锚头涂层脱落、局部锈蚀。(2)拱肋内侧积水、斜向裂缝泛碱、渗水、灼伤、锈蚀、拱肋内四壁潮湿。(3)钢箱梁内、外侧锈蚀、螺栓松动、补强处未防腐。(4)系杆索漏油。(5)肋间平台、横墙各向裂缝、空洞、雨后积水。(6)桥台竖向裂缝、斜向裂缝、横向裂缝;主桥桥墩网状裂缝、竖向裂缝。(7)桥面系开裂、伸缩缝堵塞等具体统计情况由于篇幅所限,此处不进行赘述。

### 3.4 根据现行规范的南宁大桥技术状态评定

南宁大桥主桥参照城市桥梁技术状态评定方法进行评分,以体现桥梁部件损坏程度。结果见表3,获得南宁大桥的总体技术状态得分为83分。

表3 按现行规范的南宁大桥技术状态评定

评定要素	分项得分	权重	分值	部位得分	权重	总体技术状态得分
桥面系	桥面铺装	42	0.30	12.60	64	0.15
	桥头平顺	60	0.15	9.00		
	伸缩缝	59	0.25	14.75		
	排水系统	90	0.10	9.00		
	人行道	100	0.10	10.00		
	护栏	90	0.10	9.00		83
5#跨	主拱圈	72	0.7	50.4	72	0.40
	横向联系	77	0.3	22.1		
下部结构	下部结构	98.8	1.0	1.0	98.8	0.45

### 3.5 采用云重心方法评定南宁大桥技术状态

根据1、2节云重心评定方法,对各定性评定指标由定性评语转化为数值域,依据式(13)生成各评定指标的云模型(由于篇幅所限,仅列出上部主拱结构的指标云模型,其余不予赘述)见表4。如拱肋涂层缺陷指标评定的云模型图如图4所示。

表4 南宁大桥评定指标云模型

构件	评定指标	评定语数值域	云模型
钢拱肋	涂层缺陷	[60 80]	P1(70,3.333,0.556)
	焊缝开裂	[80 95]	P2(87.5,2.5,0.417)
	构件扭曲变形、局部损伤	[70 80]	P3(75,1.667,0.278)
	腐蚀、生锈	[60 80]	P4(70,3.333,0.556)
	主拱圈挠度	[80 95]	P5(87.5,2.5,0.417)
	拱肋位移	[80 95]	P6(87.5,2.5,0.417)
混凝土拱肋	混凝土裂缝	[60 70]	P1(65,1.667,0.278)
	蜂窝麻面	[80 95]	P2(87.5,2.5,0.417)
	空洞	[80 95]	P3(87.5,2.5,0.417)
	混凝土保护层厚度	[80 95]	P4(87.5,2.5,0.417)
	钢筋锈蚀	[80 95]	P5(87.5,2.5,0.417)
	混凝土碳化	[80 95]	P6(87.5,2.5,0.417)
	主拱圈挠度	[80 95]	P7(87.5,2.5,0.417)
	拱肋位移	[80 95]	P8(87.5,2.5,0.417)
肋间平台	混凝土裂缝	[50 60]	P1(55,1.667,0.278)
	蜂窝麻面	[80 95]	P2(87.5,2.5,0.417)
	空洞	[80 95]	P3(87.5,2.5,0.417)
	混凝土保护层厚度	[80 95]	P4(87.5,2.5,0.417)
	钢筋锈蚀	[80 95]	P5(87.5,2.5,0.417)
	混凝土碳化	[80 95]	P6(87.5,2.5,0.417)
横墙	混凝土裂缝	[60 70]	P1(65,1.667,0.278)
	蜂窝麻面	[80 95]	P2(87.5,2.5,0.417)
	空洞	[80 95]	P3(87.5,2.5,0.417)
	混凝土保护层厚度	[80 95]	P4(87.5,2.5,0.417)
	钢筋锈蚀	[80 95]	P5(87.5,2.5,0.417)
	混凝土碳化	[80 95]	P6(87.5,2.5,0.417)
主梁	涂层劣化	[60 80]	P1(70,3.333,0.556)
	锈蚀	[60 80]	P2(70,3.333,0.556)
	焊缝开裂	[80 95]	P3(87.5,2.5,0.417)
	铆钉损失	[60 80]	P4(70,3.333,0.556)
	构件裂缝	[80 90]	P5(85,1.667,0.278)
	跨中挠度	[80 90]	P6(85,1.667,0.278)
	构件变形	[80 90]	P7(85,1.667,0.278)
	结构变位	[80 90]	P8(85,1.667,0.278)
吊杆	渗水	[80 90]	P1(85,1.667,0.278)
	锈蚀	[60 80]	P2(70,3.333,0.556)
	锚头损坏	[70 85]	P3(77.5,2.5,0.417)
	防护套损坏	[80 95]	P4(87.5,2.5,0.417)
	断丝	[80 95]	P5(87.5,2.5,0.417)
系杆	锈蚀	[60 80]	P1(70,3.333,0.556)
	外部涂层脱落	[80 95]	P2(87.5,2.5,0.417)
	系杆连接松动	[80 95]	P3(87.5,2.5,0.417)
	锚头防护套损坏	[80 95]	P4(87.5,2.5,0.417)
	断丝	[80 95]	P5(87.5,2.5,0.417)

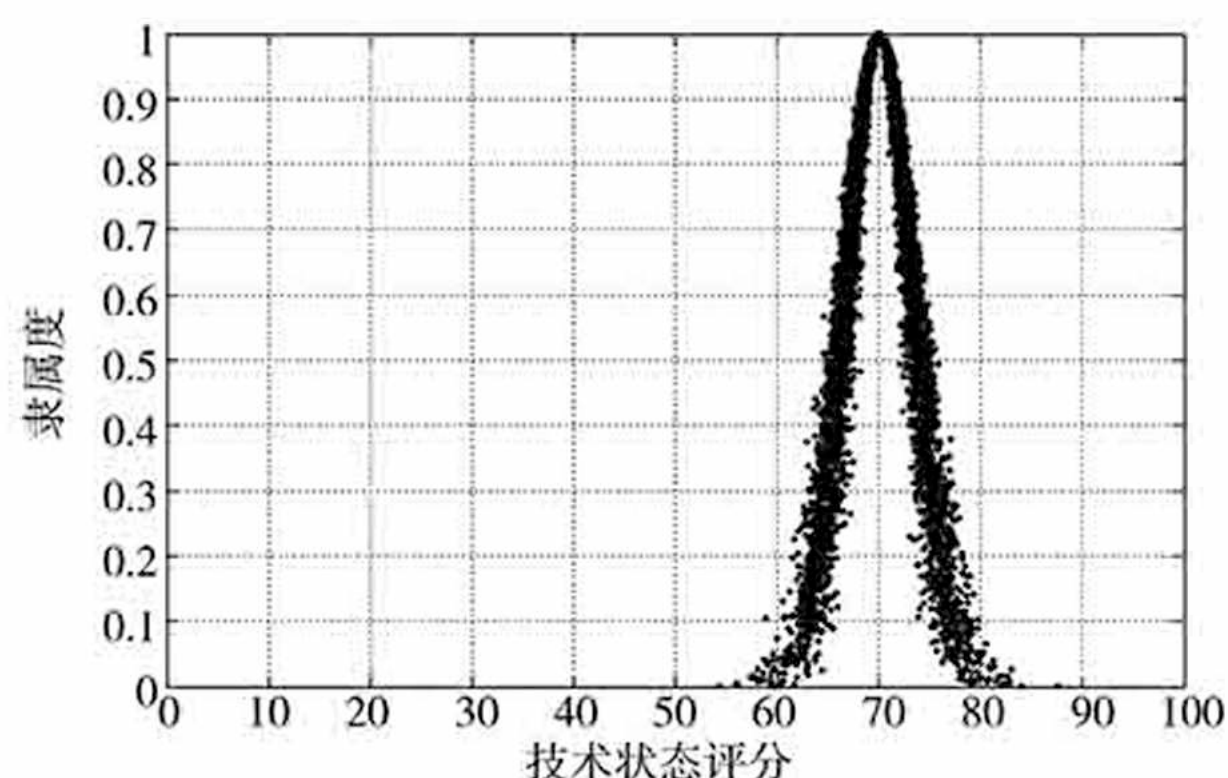


图4 拱肋涂层缺陷指标评定云模型

由各个评定指标云模型，构建成构件技术状态评定的决策矩阵 $U_G$ ，结合各指标的权重值 $W=\{W_1, W_2, \dots, W_m\}$ 表示，得到构件的实际综合云重心向量。以拱肋构件为例，得到的综合云重心向量为：

$$S=\{10.5, 13.125, 15, 14, 13.125, 13.125\}$$

拱肋构件理想状态下云重心向量为：

$$S^0=\{14.625, 14.625, 19.5, 19.5, 14.625, 14.625\}$$

将构件理想状态下云重心向量作为参考，对实际云重心向量 $S$ 进行归一化，得归一化云重心向量：

$$S^T=\{0.282, 0.103, 0.231, 0.282, 0.103, 0.103\}$$

将归一化后的实际云重心向量乘以权重值并相加，得实际构件技术状态与理想状态的加权偏离度：

$$\theta=0.191$$

将钢拱肋的评语集置于连续的评定标尺上，每个评语值都用云模型来实现，构成一个定性评

测云发生器。由加权偏离度，获得钢拱肋构件的评定云 $G_1(78.397, 2.625, 0.382)$ ，将钢拱肋构件的评定云置于评定标尺上，评定得钢拱肋的技术状态等级为3类。采用同样的方法，获得各个构件的技术状态评定云，如图5所示。利用各构件的技术状态评定云，得到部件实际技术状态与理想状态的加权偏离度。

$$\theta_B = \sum_{j=1}^N G_j^T \cdot W_j \quad (24)$$

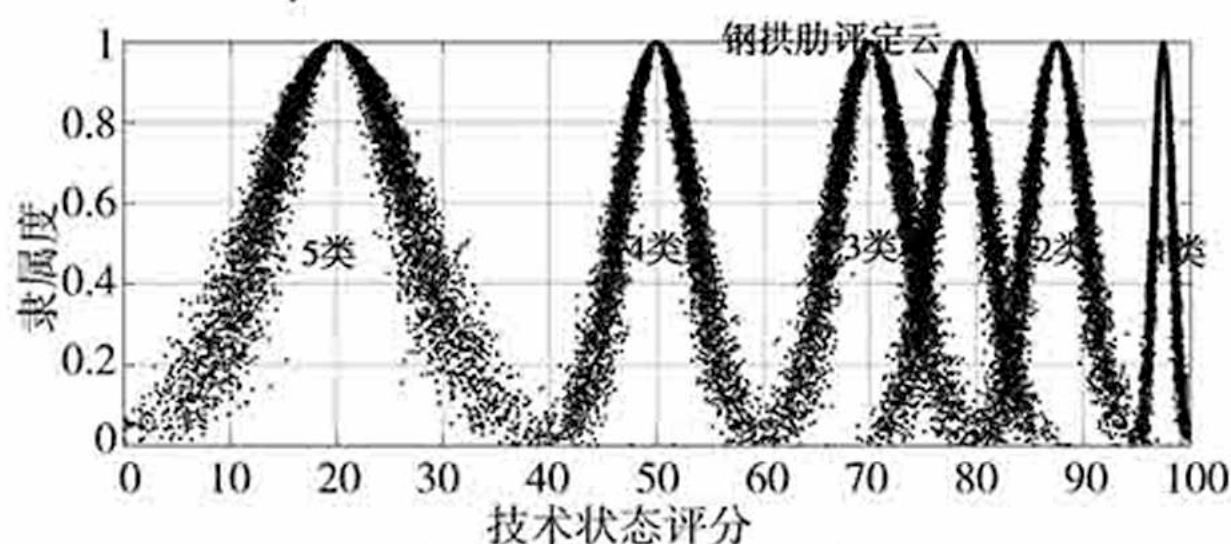


图5 钢拱肋构件评定图

进而得到部件实际技术状态的评定云 $B(E_x, E_n, H_e)$ 。将评定云置于部件评定标尺中，评定部件的实际技术状况，同理，利用桥梁部件的技术状况的云模型 $B(E_x, E_n, H_e)$ 加权运算得到桥梁上部结构、下部结构及桥面系的技术状态的云模型 $J(E_x, E_n, H_e)$ ，进而加权运算得到全桥整体技术状态的云模型 $A(E_x, E_n, H_e)$ 。

将评定云置于全桥评定标尺中，评定全桥的实际技术状态。部件、结构及全桥的评定云见表5。上部结构、下部结构及桥面系技术状态加权后的云模型图如图6所示，全桥的实际技术状态云图如图7所示。

表5 部件、结构及全桥的评定云模型

全桥评定云	结构	结构评定云	部件	部件评定云
$D(85.069, 1.831, 0.305)$	上部结构	$J(78.731, 2.478, 0.413)$	拱肋	$B_1(78.759, 2.535, 0.423)$
			横向联结系	$B_2(74.063, 2.167, 0.361)$
			主梁	$B_3(78.91, 2.458, 0.41)$
			吊杆	$B_4(81.09, 2.5, 0.417)$
			系杆	$B_5(83.654, 2.667, 0.445)$
	下部结构	$J(97.5, 0.833, 0.139)$	基础	$B(97.5, 0.833, 0.139)$
			桥面铺装	$B_1(75.962, 2.167, 0.361)$
	桥面系	$J(74.439, 2.534, 0.423)$	伸缩缝	$B_2(73.141, 2.583, 0.431)$
			人行道	$B_3(78.269, 2.917, 0.487)$
			护栏	$B_4(78.269, 2.917, 0.487)$
			排水	$B_5(78.269, 2.917, 0.487)$
			照明	$B_6(61.603, 2.5, 0.417)$



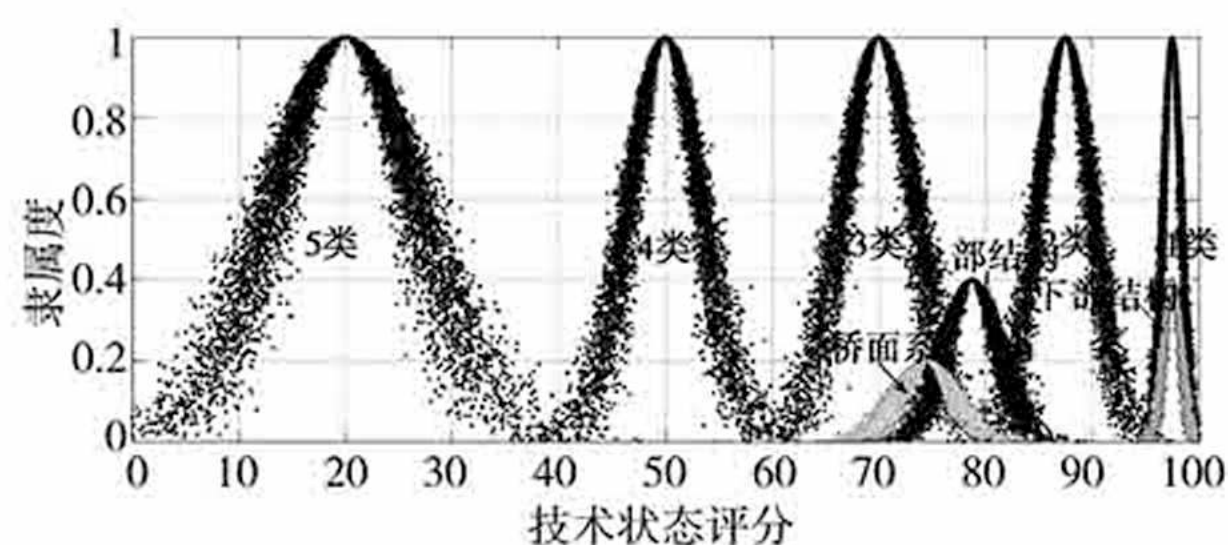


图6 结构技术状态评定云模型图

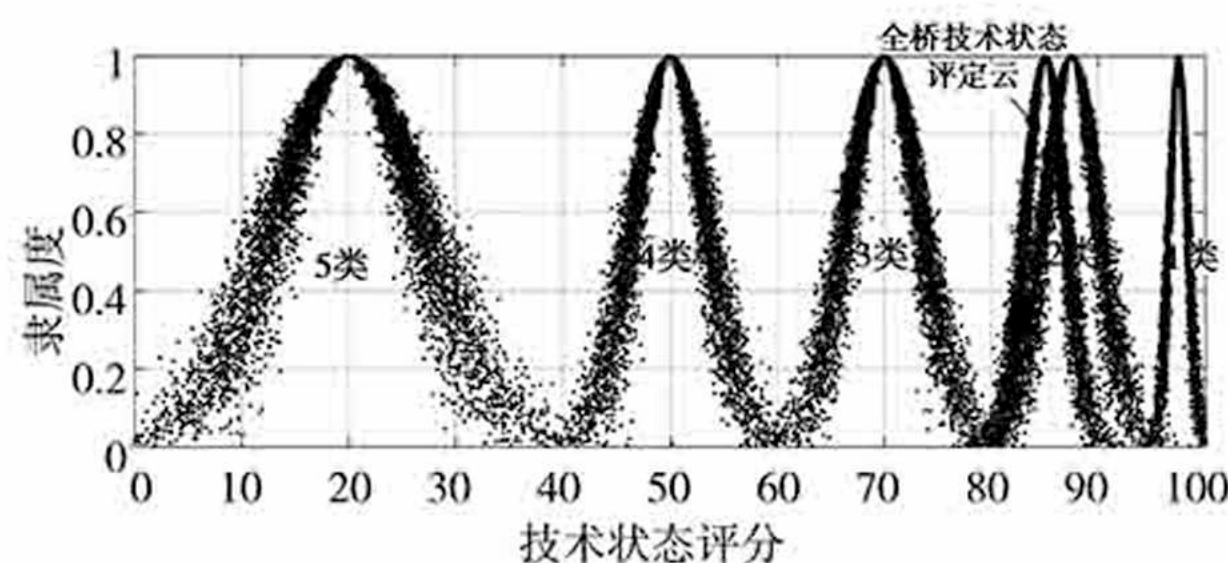


图7 全桥技术状态评定云模型图

由图7所示，全桥的实际技术状态云的期望值为85.059，接近于2类桥云模型。故南宁大桥主桥的技术状态评定为2类。采用云重心理论的全桥技术状态评定结果与采用规范方法评定的83分2类桥的结果基本一致。相对规范方法，采用云重心理论的评定结果更能反映桥梁技术状态信息的模糊性与随机性。为验证本文云重心方法评定桥梁技术状态等级的可靠性，将本文模型的评价结果与按现行规范的评定的结果进行对比分析，对比结果见表6。

表6 桥梁技术状态评分结果对比

评定方法	规范评定方法	云重心评定方法
分值	83	$D(85.069, 1.831, 0.305)$
桥梁技术状态	2类	2类

从表7可见，采用云重心评定方法与采用规范评定方法得出的最终桥梁技术状态等级评定结果均为2类桥。云重心评定方法评定结果云的期望值为85.069，与采用规范方法得出的静态评分83分相近，同时，采用规范评定方法得出的静态评分落在云重心评定结果云的可接受范围内的。两种方法的评定结果对比说明云重心评定方法评定结果是可靠的。

### 3.6 南宁大桥桥梁劣化模型的确定

南宁大桥于2005年修建，设计基准寿命为

100年。至2014年仅进行了本次技术状态评定，因此检测时桥龄和评定结果数据为[9, 85.069]。由于无法求解两个待定参数 $\lambda$ 及 $A$ ，可先采用文献[21]表2.2.2-1直接确定参数 $A$ 的值。由本次检测评分85.069，令桥梁的初始状态评分为90分，计算9年期间的平均劣化率为0.548。由平均劣化率确定参数的值 $A$ 为1.303，并求得参数 $\lambda$ 为0.395，由此确定自然状态下本桥的劣化模型为：

$$D(n) = \begin{cases} D(1) = 90 \\ D(n-1) \times \exp\left[-\left(\frac{0.395n}{100}\right)^{1.303}\right] \end{cases}$$

由此绘制得出前15年的南宁大桥主桥技术状态劣化曲线，如图8所示。可根据技术状态劣化情况，对桥梁进行预防性养护。

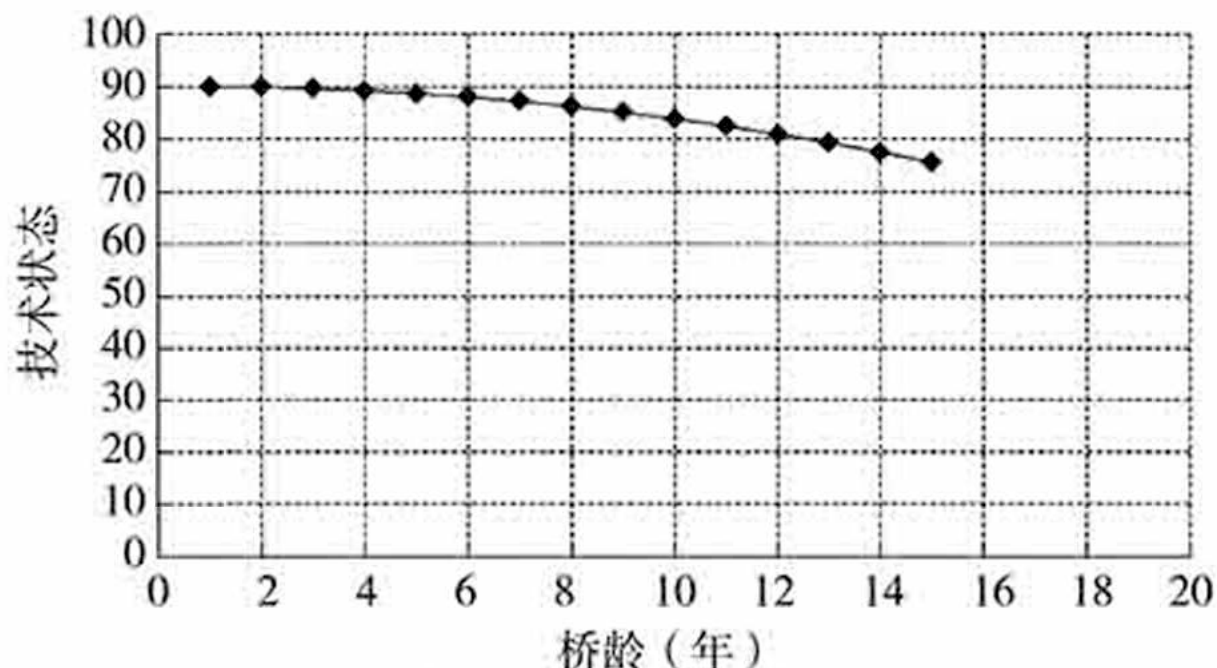


图8 南宁大桥技术状态劣化模型

## 4 结论

本文针对桥梁技术状态信息的随机性和模糊性，对桥梁状态指标体系进行了定性和定量的组合，采用加权偏离度来衡量桥梁的技术状态，构成了定性和定量评定间的相互映射，形成了云重心评定法的桥梁技术状态评定模型。本文的具体结论如下：

(1) 基于云重心理论的桥梁技术状态评定方法可有效处理带有随机性和模糊性的桥梁技术状态信息，准确评定出桥梁的技术状态。

(2) 由实际检测评定结果，可有效确立桥梁的劣化模型，避免了规范的桥梁技术状态评定过程中受主观因素及诸多不确定因素影响与控制，通过南宁大桥实际工程的技术状态评价对比，两者获得的评价等级结果相同，但基于云重心方法的桥梁技术状态评估进一步考虑了随机性和模糊性的桥梁技术状态信息。

(3) 采用改进后自然状态下的桥梁劣化模型, 根据实测评定结果, 提出了确立桥梁劣化模型的方法。通过对南宁大桥技术状态评价进行应用, 获得该桥梁的劣化模型, 根据该劣化模型, 桥梁管理者可以作出有效的维修管理决策。

#### 参考文献

- [1] 张玲玲, 马建勋. 服役结构可靠性的模糊综合评判法及其应用[J]. 土木学报, 2001, 34(5): 20-28(Lingling Zhang, Jianxun Ma. The reliability of existing building by fuzzy integrated evaluation[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 20-28(in Chinese))
- [2] 兰海, 史家钧. 灰色关联分析与变权综合法在桥梁评定中的应用[J]. 同济大学学报, 2001, 29(1): 50-54(Hai Lan, Jiajun Shi. Degree of grey incidence and variable weight synthesizing applied in bridge assessment[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(1): 50-54(in Chinese))
- [3] Ying-Ming Wang, Taha M. S. Elhag. Evidential reasoning approach for bridge condition assessment[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34: 689-699.
- [4] 黄侨, 唐海红, 林阳子. 钢管混凝土拱桥上部结构综合评定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 115-118 (Qiao Huang, Haihong Tang, Yangzi Lin. Comprehensive evaluation method of superstructure of concrete filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(1): 115-118(in Chinese))
- [5] 沈培文, 丁永灿, 周水兴, 陈悦. 钢管混凝土拱桥安全评定方法研究及系统开发[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(1): 22-26(Peiwen Shen, Yongcan Ding, Shuixing Zhou, Yue Chen. Study on safety evaluation method and system development of concrete filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2011, 30(1): 22-26(in Chinese))
- [6] 宗周红, 朱三凡, 夏樟华. 大跨径连续刚构桥安全性评定的综合分析方法[J]. 铁道学报, 2011, 33(7): 110-117 (Zhouhong Zong, Sanfan Zhu, Zhanghua Xia. Comprehensive analysis method for safety assessment of continuous rigid-frame bridge with long span[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(7): 110-117(in Chinese))
- [7] 孙传智, 李爱群, 缪长青, 乔燕. 大跨混凝土刚构桥参数识别和标高控制动态可靠度评定[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(1): 104-108(Chuanzhi Sun, Aiqun Li, Changqing Miao, Yan Qiao. Parameter identification and dynamic reliability evaluation of elevation control for long-span concrete rigid bridge[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2012, 42(1): 104-108(in Chinese))
- [8] Sasmal S, Ramanjaneyulu K., Gopalakrishnan S, et al. Fuzzy logic based condition rating of existing reinforced concrete bridges. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2006, 120(3), 261-273.
- [9] Sasmal s, Ramanjaneyulu K. Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35: 1430-1443.
- [10] Singhal SK, Srivastava AK, Mathur RB. Growth of boron nitride nanotubes having large surface area using mechanochemical process[J]. World Journal of Nano Science and Engineering, 2011(1): 119-128.
- [11] 李健, 汪明武, 徐鹏等. 基于云模型的围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 83-87(Jian Li, Mingwu Wang, Peng Xu, et al. Classification of stability of surrounding rock using cloud model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 83-87(in Chinese))
- [12] 齐伟伟, 夏良华, 李敏, 郝晋峰. 基于云重心评定法的装备健康状态评定[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(4): 79. Weiwei Qi, Lianghua Xia, Min Li, Jinfeng Hao. Health assessment of equipment based on cloud gravity center assessment method[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(4): 79-82(in Chinese))
- [13] Limao Zhang, Xianguo Wu, Lieyun Ding, Mirosław J. Skibniewski. A novel model for risk assessment of adjacent buildings in tunneling environments[J]. Building and Environment, 2013, 65: 185-194.
- [14] Meguid MA. Mattar J. Investigation of tunnel-soil-pile interaction in cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2009, 135: 973-981.
- [15] Bilotta E, Russo G. Use of a line of piles to prevent damages induced by tunnel excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 137: 254-259.
- [16] Deyi L, Changyu L. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Engineering Science, 2004, 6: 28-34.
- [17] Nie F, Gao C, Guo Y, Gan M. Two-dimensional minimum local cross-entropy thresholding based on co-occurrence matrix[J]. Comput Elec Eng, 2011, 37(5): 757-767.
- [18] Zou Y, Liu H, Song E, Huang Z. Image bilevel thresholding based on multiscale gradient multiplication[J]. Comput Electr Eng, 2012, 38(4): 853-861.
- [19] Liu, H. W., & Wang, G. J. Multi-criteria decision-making methods based on intuitionistic fuzzy sets[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 179: 220. 233.
- [20] 王佳葵. 烟台市混凝土桥梁技术状态评估方法之应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010(Jiakui Wang. Study on application of assessment approach of beton bridge technical condition in Yantai[D]. Dalian Maritime University, 2010(in Chinese))
- [21] 郝天之. 基于劣化模型及云理论的桥梁技术状态评定方法研究[D]. 南宁: 广西大学博士论文, 2015(HaoTianzhi. Evaluation of Bridge Technology Condition Based on The Deterioration Model and Cloud Theory[D]. Nanning: Doctoral Dissertation. 2015(in Chinese))
- [22] 宋彦君, 刘寒冰, 谭金国等. 基于应变计的梁式桥位移响应测试方法[J]. 吉林大学学报(工学版)2012, 42(9): 198-201(Song Yanjun, Liu Hanbing, Tan Jinguo, et al. Displacement response testing method of beam bridges based on strain gauge[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2012, 42(9): 198-201(in Chinese))