

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2014.06.006

基于三角模糊数的悬索桥梁状态评估研究

王展亮

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 基于三角模糊数判断矩阵的模糊层次分析法,提出利用模糊数比较大小原理,获得确定元素的权重值,较好解决了三角模糊数无法获得确定元素权重值的问题。并以福州市鼓山大桥悬索桥为工程背景,利用三角模糊数模糊层次分析法建立该桥状态评估指标体系模型,确定评估指标的权重及最终的状态评估值。该评估方法简单易行,精度较高,可以为大跨度悬索桥的养护管理及健康状态预警提供科学依据。

关键词: 悬索桥; 状态评估; 模糊层次分析; 三角模糊数

中图分类号: U447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2014)06-0536-05

Research of suspension bridge condition assessment based on triangular fuzzy analytic hierarchy process

Wang Zhanliang

(College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To determine elements weight value of triangular fuzzy numbers, fuzzy number size comparison principle was employed to obtain the weight of triangular fuzzy number via fuzzy analytic hierarchy process based on the judgment matrix. Exemplified by the construction condition of Fuzhou Gushan mountain suspension bridge, the fuzzy hierarchy process was employed to establish the bridge state evaluation index system model to determine the weights of evaluation indexes and the final state evaluation value. The results show that the evaluation method is simple with high precision and can contribute to large-span suspension bridge maintenance management and health warning.

Keywords: suspension bridge; condition assessment; fuzzy hierarchy analysis; triangular fuzzy number

我国是桥梁大国,各式桥梁在大江湖海上得到充分利用,其中悬索桥梁在大跨度桥梁中占有重要地位,为保证桥梁结构安全,评估悬索桥梁状态显得尤为重要。目前常用传统层次分析法来评估桥梁状态^[1],但这种方法存在指标间两两判断标度不确定性的问题,针对这一问题,有学者引入模糊集理论来解决^[2],其中荷兰学者 Van Laarhoven^[3]等提出用三角模糊数表示模糊判断的方法;冉静学^[4]运用三角模糊数运算,求得指标的排序,但未获得确定元素的权重值,导致三角模糊数在桥梁健康评估过程中效果有限。本文在用三角模糊数求得指标排序的基础上,利用模糊数比较大小原理,获得确定元素的权重值;并以福州市鼓山大桥为工程背景,利用基于三角模糊数的模糊层次分析法建立该桥状态评估指标体系模型,确定出评估指标的权重并通过计算得到该桥最终的状态评估值。

收稿日期: 2014-10-12
作者简介: 王展亮(1986-),男(汉),福建龙岩人,助教,硕士,研究方向:桥梁与隧道。

1 模糊层次分析法

1.1 传统层次分析法

AHP法可以将多因素的桥梁状态评估问题简单化、层次化,这种方法的关键是要构造比较全面的判断矩阵,且这种判断因没有考虑到判断矩阵中各个因素间的模糊性。因此人们在实际处理复杂的决策问题时,经常不自觉地用模糊判断来选择和判断因素,即将AHP扩展到模糊环境中,得到模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process)。运用模糊理论对无法精确打分的评估指标进行模糊化处理,对计算权重的方法进行改进。

1.2 基于三角模糊数的模糊层次分析法

本文利用模糊数比较大小的原理,比较三角模糊数可能性程度大小,从而确定桥梁健康状态评估中各元素的排序,并通过归一化处理获得权重值。

模糊数比较大小的数学原理:设有因素 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 在因素间的两两比较判断时,利用三角模糊数来定量地表示。例如因素 x_i 比因素 x_j 明显重要时,可以用模糊数 $a_{ij} = (L, 3, P)$ 表示,其中 L, P 表示判断的模糊程度,其值由 $P-L$ 的大小程度反映。当给出 $\frac{n(n-1)}{2}$ 个模糊判断后可得到模糊判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

一般的,模糊判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 是一个广义模糊矩阵,因为其中的元素 $a_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, p_{ij})$ 是 R 上的凸模糊数,且满足:

$$l_{ij} = \frac{1}{l_{ji}}, m_{ij} = \frac{1}{m_{ji}}, p_{ij} = \frac{1}{p_{ji}} \quad (1)$$

为了由模糊判断矩阵求出各因素的权重向量,经过三角模糊数广义运算及其可能性程度比较大小,确定因素集 X 中各因素的权重向量,经归一化处理后,则得 X 上的权重模糊集。

运算一:设有2个三角模糊数

$$a_{ij} = (l_{ij} \cdot m_{ij} \cdot p_{ij}), a_{kj} = (l_{kj} \cdot m_{kj} \cdot p_{kj}) \quad (2)$$

广义加法 \oplus :

$$a_{ij} \oplus a_{kj} = (l_{ij} + l_{kj}, m_{ij} + m_{kj}, p_{ij} + p_{kj}) \quad (3)$$

广义乘法 \otimes :

$$a_{ij} \otimes a_{kj} = (l_{ij} \times l_{kj}, m_{ij} \times m_{kj}, p_{ij} \times p_{kj}) \quad (4)$$

倒数运算:

$$a_{ij}^{-1} = (l_{ij}, m_{ij}, p_{ij}) = \left(\frac{1}{p_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}}\right) \quad (5)$$

$a_{ij} \geq a_{kj}$ 的可能性程度 $K(a_{ij} \geq a_{kj})$:

$$K(a_{ij} \geq a_{kj}) = \text{hgt}(a_{ij} \cap a_{kj}) = \left[\frac{l_{kj} - p_{ij}}{(m_{ij} - p_{ij}) - (m_{kj} - l_{ij})} \wedge 1 \right] \quad (6)$$

运算二:三角模糊数 a_{ij} 大于 m 个三角模糊数 $a_{kj} (k \neq i, k = 1, 2, \dots, m)$ 的可能性程度为:

$$K(a_{ij} \geq a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj}) = \min_{\substack{k=1,2,\dots,m \\ (k \neq i)}} K(a_{ij} \geq a_{kj}) \quad (7)$$

由上面的定义看到,三角模糊数的广义加法、广义乘法、倒数运算结果仍然为三角模糊数,而可能性程度 K 却是一个数。

设因素集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 三角模糊数 a_{ij} 表示经过两两比较判断所得的因素 x_i 比因素 x_j 重要的模糊判断程度 $(i, j = 1, 2, \dots, n)$, 即得模糊判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

运算三:因素 x_i 比其他因素的“模糊判断程度”定义为:

$$m(x_i) = a_{i1} \oplus a_{i2} \oplus \dots \oplus a_{in} = \sum_{j=1}^n \oplus a_{ij} = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

全部因素的“总模糊判断程度”定义为:

$$m(X) = m(x_1) \oplus m(x_2) \oplus \dots \oplus m(x_n) = \sum_{i=1}^n \oplus m(x_i) = \sum_{i=1}^n \oplus \sum_{j=1}^n \oplus a_{ij} \quad (9)$$

显然 $m(x_i)$ 与 $m(X)$ 都是三角模糊数,而称 x_i 对其他因素的“模糊综合程度”为:

$$S_i = m(x_i) \otimes m(X)^{-1} = \left(\sum_{j=1}^n \oplus a_{ij} \right) \otimes \left(\sum_{i=1}^n \oplus \sum_{j=1}^n \oplus a_{ij} \right)^{-1} \quad (10)$$

则 x_i 与其他因素相比较的“综合重要程度” $d(x_i)$ 定义为 $S_k (k = 1, 2, \dots, n, j \neq k)$ 的可能性程度,即:

$$d(x_i) = K(S_i \geq S_1, S_2, \dots, S_n) = \min_{\substack{k=1,2,\dots,n \\ (k \neq i)}} K(S_i \geq S_k) \quad (11)$$

可得因素集 X 中各因素的权重向量 $W = (d(x_1), d(x_2), \dots, d(x_n))$ 经归一化处理后,得 X 上权重模糊集: $W' = (d'(x_1), d'(x_2), \dots, d'(x_n))$ 。

2 建立评估层次模型

桥梁健康状态评估,其指标体系如何科学合理建立是关键,根据悬索桥梁结构特点、受力特性分析以及检测数据类型的基础上进行评估层次划

分,建立状态评估模型。

悬索桥梁结构较为特殊,其主要结构有:下部结构、桥塔、主缆、箱梁(主梁)、吊杆、附属设施等,这些系统直接影响悬索桥梁的寿命和使用功能。在建立层次模型时,每个主要系统结构又可再划分为若干项子结构,每个子结构有各自的属性或检测点:

下部结构:锚碇,桩基础。其中主缆的锚固在自锚式悬索桥中尤其重要,主要考虑主缆应力、锚固周边混凝土质量、温度、湿度 4 个指标。

主塔系统:对主塔系统主要考虑混凝土质量、桥塔线形、塔顶偏移 3 个指标。

主缆系统:主缆系统主要考虑主缆振动,主缆索力,保护件、锚固系统 4 个指标。

箱梁系统:箱梁系统主要考虑箱梁线形、箱梁振动、箱梁应力、钢材锈蚀、连接质量、混凝土质量 6 个指标。

吊杆系统:吊杆系统主要考虑保护件、吊索索力、锚固系统 3 个指标。

附属设施:主要考虑的附属设施有:伸缩缝、支座、排水、照明等 4 个指标。

综合上述分析,根据层次分析法的基本思想,建立评估层次模型,见图 1 所示。

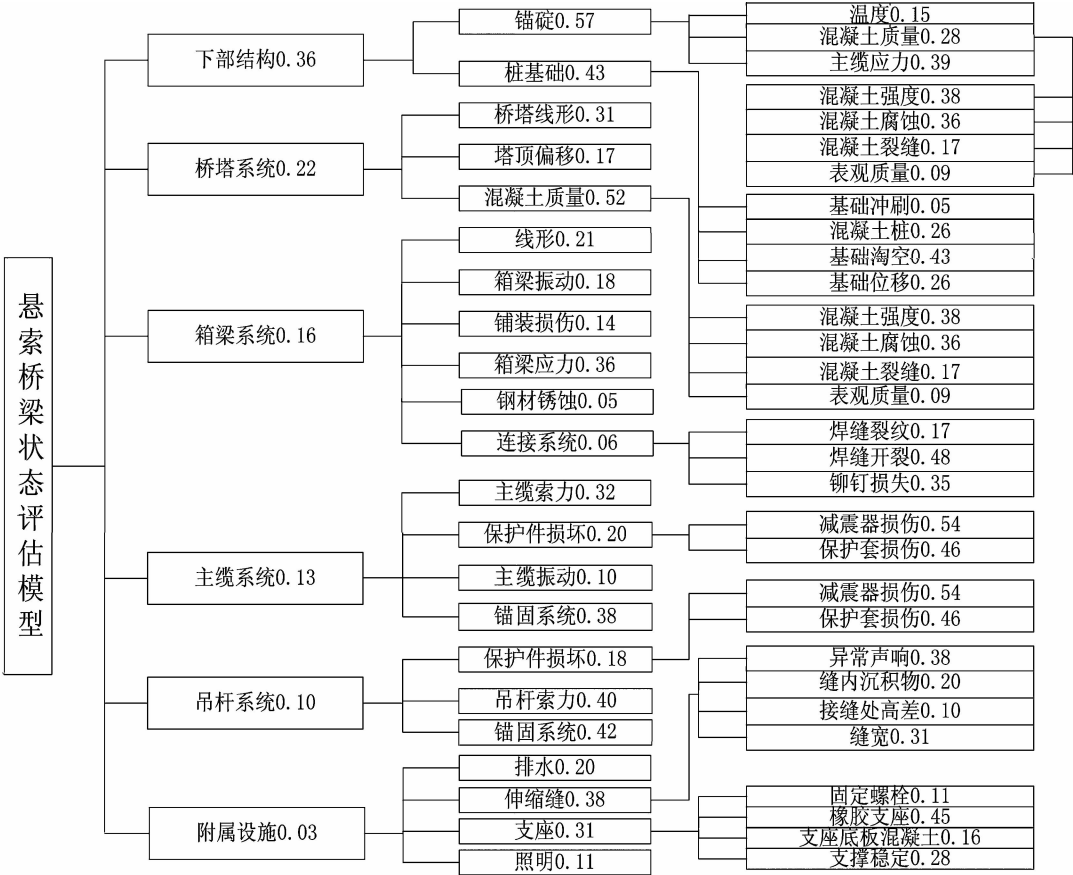


图 1 评估模型及权重

Fig. 1 Suspension bridge state evaluation model and elements weight

3 算例

3.1 建立鼓山大桥状态评估模型

鼓山大桥为独塔自锚式悬索桥,全长 1 520 m,由南引桥、鼓山大桥主桥及北引桥 3 部分组成,通航部分跨度为 50 m + 150 m + 235 m +

35 m。鼓山大桥位于福州市二环、三环的连接线上,属于城市快速路,桥上交通量大,过境重载车辆多。

下部结构:鼓山大桥将主缆锚固于加劲梁上,这与地锚式悬索桥不同,无需考虑孔隙水压力和水位等指标影响,考虑到锚碇的性质与基础结构

相似,本文将它归于下部结构。

主塔系统:鼓山大桥塔柱按普通钢筋混凝土构件设计,分为上、中、下塔柱;主塔横梁有上、下横梁,按全预应力混凝土构件设计组成。

主缆系统:全桥由两根主缆呈倾斜状布置,缆索面布置与常规的门式塔悬索桥之竖直索面形式不同,结合垂直塔柱和宽梁特点布置为倾斜索面,锚头采用热铸锚,主缆在塔顶处固定于主鞍的鞍槽内,通过主缆和鞍槽之间的摩擦力来抵抗主缆在运营阶段的不平衡力。

箱梁系统:钢箱梁顺桥向共划分为 53 个节段,每个节段间通过两道内腹板采用栓接,其余均采用焊接的现场连接方式;钢箱梁顶、底板均采用正交异性板:桥面钢板下设置纵向 U 形加劲肋,箱梁底板与斜腹板纵向也分别设置 U 形和扁钢加劲肋。

吊杆系统:鼓山大桥吊索采用与主缆索股相同的截面,顺桥向每隔 7 m 布置,并外包 P E 护套,吊索锚头采用冷铸锚,吊索上端与索央连接采用铰销接头。

附属设施:伸缩缝、支座、排水、照明等。

根据鼓山大桥结构特点,结合第 2 节建立鼓山大桥悬索桥状态评估模型,见图 1。

3.2 底层指标评语的确定

对于所有底层评价指标,按检测数据类型可划分为 3 类^[5]:1) 仅有对桥梁构件的状态描述或简单的等级划分,而没有数值结果(如钢构件锈蚀等);2) 检测结果为一个数值(如混凝土强度等);3) 检测结果为一数据序列(如箱梁应力、主缆索力等)。对第 1 类指标,根据等级确定其评价价值范围,中间结果由检测人员根据实际情况确定;对于第 2 类指标,可采用线性或非线性无量纲化模型进行处理;本文采用文献[6]中评估指标的分级标准和等级隶属函数对 2011 年 4 月鼓山大桥的检测数据进行评分,见图 1。

根据桥梁规范的评估,将桥梁结构的技术状态分为 5 级:良好、较好、较差、坏的、危险,可以建立桥梁健康状态评估等级标准,见表 1。

表 1 桥梁健康评估等级标准

Tab.1 Rating criteria for bridge health assessment

桥梁状态	良好	较好	较差	坏的	危险
评分	85 ~ 100	65 ~ 85	45 ~ 65	25 ~ 45	0 ~ 25

3.3 构造三角模糊数判断矩阵

在建立阶梯层次结构以后,上下层次之间元素的隶属关系就被确定了。按其优良程度或重要程度划分成若干等级,赋以量化值,考虑三角模糊数关系及减少大数吃小数的误差,本文采用 1,2,3,4,5 及其倒数表示一个因素对另一个因素的重要程度,数字越大表明越重要(1 表示两个因素同等重要),为了提高精度采用 1.5,2.5,3.5,4.5 四个数值进行内插,成为 9 级定量法,如表 2 所示。

表 2 “1-5”标度尺

Tab.2 Section to the feet

V_{ij}	定义
1	V_i 与 V_j 相比,同样重要
2	V_i 与 V_j 相比,稍微重要
3	V_i 与 V_j 相比,明显重要
4	V_i 与 V_j 相比,强烈重要
5	V_i 与 V_j 相比,极端重要
1.5,2.5,3.5,4.5	V_i 与 V_j 相比,重要性程度处于上述相应两个数之间
倒数	V_i 与 V_j 相比得判断矩阵 V_{ij} , 则 V_j 与 V_i 相比较得判断矩阵 $V_{ji} = 1/V_{ij}$

3.4 权重计算

本文只做悬索桥状态评估的一级指标(下部结构、桥塔系统、箱梁系统、主缆系统、吊杆系统及附属设施)6 个因素的权重计算,其余权重计算过程略,直接列于图 1 中。

首先构造三角模糊数判断矩阵:根据本文中 3.3 节确定的标度尺对一级指标的 6 个因素进行专家判断并给出两两因素比较后的三角模糊数,由所有的判断结果组成三角模糊数判断矩阵,见表 3。

接着对确定的指标因素三角模糊数判断矩阵,运用 Matlab 进行计算并取小数点后两位,运算结果见表 4、表 5,其中模糊程度及模糊综合程度见表 4,综合重要程度见表 5。

最后根据定义 3 可得各因素的权重矢量 $w = (1.00,0.62,0.50,0.40,0.30,0.09)$,经归一化处理后得一级指标 6 个因素的权重为 $w = (0.36,0.22,0.16,0.13,0.10,0.03)$ 。比较现场专家给出的权重值 $w = (0.34,0.26,0.15,0.14,0.09,$

0.02),可得采用三角模糊数获得的权重结果与现场专家给出的权重值很接近。

表 3 三角模糊判断矩阵

Tab.3 Judgment matrix of triangular fuzzy number

因素	下部结构	桥塔系统	主缆系统	主梁系统	吊杆系统	附属设施
下部结构	1.00,1.00,1.00	1.20,3.00,3.50	1.40,3.50,4.00	1.50,3.50,4.50	2.00,4.00,4.50	2.40,4.00,5.00
桥塔系统	0.28,0.33,0.83	1.00,1.00,1.00	1.00,1.00,1.00	1.10,2.00,2.50	1.40,2.50,3.00	2.10,3.00,4.00
主缆系统	0.25,0.28,0.71	0.50,0.67,0.83	1.00,1.00,1.00	0.60,1.50,2.00	1.30,1.50,2.00	1.80,3.00,3.50
主梁系统	0.21,0.28,0.67	0.40,0.50,0.91	0.50,0.67,1.67	1.00,1.00,1.00	0.50,1.00,2.00	1.20,2.50,3.00
吊杆系统	0.22,0.25,0.50	0.33,0.40,0.71	0.50,0.67,0.77	0.50,1.00,2.00	1.00,1.00,1.00	0.50,1.50,3.00
附属设施	0.20,0.25,0.42	0.25,0.33,0.48	0.28,0.33,0.56	0.33,0.40,0.83	0.33,0.67,2.00	1.00,1.00,1.00

表 4 模糊判断程度及模糊综合程度

Tab.4 Fuzzy judgement and fuzzy comprehensive degree

$m(x^i)$	$m(x^1)$	$m(x^2)$	$m(x^3)$	$m(x^4)$	$m(x^5)$	$m(x^6)$
数值	9.50,19.00,22.50	7.08,10.33,13.33	5.45,7.95,10.04	3.81,5.95,9.25	3.05,4.82,7.98	2.39,2.98,5.29
S_i	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
数值	0.14,0.37,0.73	0.10,0.20,0.42	0.08,0.16,0.32	0.05,0.12,0.29	0.04,0.09,0.26	0.03,0.06,0.17

表 5 综合重要程度

Tab.5 Comprehensive degree of importance

V_1	$S_1 > S_2$	$S_1 > S_3$	$S_1 > S_4$	$S_1 > S_5$	$S_1 > S_6$
	1	1	1	1	1
V_2	$S_2 > S_1$	$S_2 > S_3$	$S_2 > S_4$	$S_2 > S_5$	$S_2 > S_6$
	0.62	1	1	1	1
V_3	$S_3 > S_1$	$S_3 > S_2$	$S_3 > S_4$	$S_3 > S_5$	$S_3 > S_6$
	0.50	0.85	1	1	1
V_4	$S_4 > S_1$	$S_4 > S_2$	$S_4 > S_3$	$S_4 > S_5$	$S_4 > S_6$
	0.40	0.70	0.84	1	1
V_5	$S_5 > S_1$	$S_5 > S_2$	$S_5 > S_3$	$S_5 > S_4$	$S_5 > S_6$
	0.30	0.59	0.72	0.88	1
V_6	$S_6 > S_1$	$S_6 > S_2$	$S_6 > S_3$	$S_6 > S_4$	$S_6 > S_5$
	0.09	0.33	0.47	0.67	0.81

4 结语

本文基于三角模糊数层次分析法建立桥梁态评估指标体系模型,利用模糊数比较大小原理,经过归一化处理得出确定元素的权重值。将这一方法运用于福州市鼓山大桥悬索桥,最终计算结果得出:采用三角模糊数获得的权重结果与现场专家给出的权重值很接近,说明运用该方法可较好获得权重值。但该方法在确定三角模糊数判断矩阵时过于依赖专家评分值,这部分可作为今后的研究方向。

参考文献:

[1] 张永清,冯忠居.用层次分析法评价桥梁的安全性[J].西安公路交通大学学报,2001,21(3):52-56.
[2] 李海涛.基于模糊层次分析的连续梁桥健康状态的评估[J].公路工程,2012,37(2):26-28
[3] Van Laarhoven P J M, Pedrycz W. A fuzzy extension of saaty's priority theory[J]. Fuzzy Sets and Systems,1983,11(3): 229-241.
[4] 冉静学.三角模糊数排序方法的研究[J].中央民族大学学报:自然科学版,2011,20(4):37-42.
[5] 宋钢.桥梁安全性和耐久性评估方法研究及其应用[J].公路工程与运输,2007(12):54-56.
[6] 李蓉.基于层次分析法的桥梁健康状态模糊综合评估方法的研究及其应用[D].长沙:湖南大学,2007.