

文章编号:1671-6833(2011)03-0043-05

## 基于 AHP-FUZZY 算法的独塔斜拉桥安全性评价

张俊光<sup>1</sup>, 程 高<sup>1</sup>, 柯亮亮<sup>2</sup>, 王宝林<sup>3</sup>

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 西安公路研究院, 陕西 西安 710064;  
3. 天津市政工程研究院, 天津 300074)

**摘 要:** 根据独塔斜拉桥的结构特点, 结合系统工程中常用的层次分析法和模糊综合评判法对在役独塔斜拉桥的安全性进行了评价。建立了桥梁安全性评价模型, 在现场实测试验数据和专家咨询的基础上, 采用多级模糊综合评判方法, 分析确定了影响桥梁安全性的各因素的权重及隶属度, 并得到桥梁安全性的模糊评判结果, 按照最大贴近度原则, 最终确定桥梁的安全性等级, 为在役桥梁的后期养护管理提供了科学依据。

**关键词:** 独塔斜拉桥; 安全性评价; 层次分析法; 模糊综合评判; 承载力

**中图分类号:** U448.27 **文献标志码:** A

### 0 引言

桥梁是确保道路畅通的关键与控制部位, 受到设计标准、使用年限、施工质量、偶然事故以及道路等级提高等因素的影响, 导致其功能下降甚至结构损坏。为了保证桥梁正常运营, 必须对桥梁的安全性进行正确的评价<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代中期以来, 国内外学者针对桥梁结构的安全性评价进行了广泛深入研究, 提出了层次分析、灰色关联分析与变权综合等多种方法<sup>[2-4]</sup>。但现有的评价方法存在评价模型简单、指标体系不完整以及评价结果较为粗糙等缺点, 缺乏对桥梁整体安全性的综合评价<sup>[5]</sup>。模糊综合评判法可以将不确定信息用定量的方法表示出来, 再借助于模糊运算得到结构的综合评判矩阵, 得出评判对象的评判等级以及其隶属于各个等级的程度。笔者依据《公路养护技术规范》<sup>[6]</sup>, 利用层次分析法构造了独塔斜拉桥桥梁安全性评价的层次结构模型, 在专家咨询和实测数据分析的基础上, 引入系统工程中的模糊综合评判法评价独塔斜拉桥的安全性。

### 1 模糊综合评判的基本思想

模糊综合评判法是模糊数学的一种具体的应用方法, 它可以将不确定的各种信息用定量的方法表示出来, 再借助于模糊运算得到结构的评判

结果矩阵, 通过评判结果矩阵, 不但可以得出评判对象的评判等级, 而且可以得到其隶属于各个等级的具体情况等有用信息, 目前在多个领域得到广泛应用<sup>[7-8]</sup>。

#### 1.1 建立模糊评判模型

为了科学、全面地对独塔斜拉桥的安全性作出合理评价, 利用系统工程中的层次分析法(AHP), 从结构外观损伤状况、主要结构承载力及承重结构缺损状况 3 个方面来进行分析, 建立如图 1 所示的安全性评价模型。

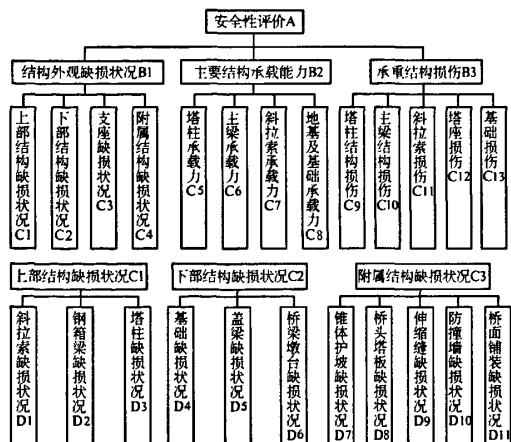


图 1 安全评价模型

Fig.1 Safety evaluation model

收稿日期:2010-12-14;修订日期:2011-02-25

作者简介:张俊光(1982-),男,山东潍坊人,长安大学博士研究生,主要从事钢桥及组合结构桥梁研究, E-mail: zjg829@163.com.

## 1.2 模糊评判的主要步骤及指标

第一步,确定因素集和评语集.因素集即评价项目的集合.对桥梁的安全性进行模糊综合评判,首先要确定安全性的因素集.安全性的因素集就是刻画桥梁安全性的指标,不同评估层次、不同项目对应不同的因素集<sup>[9]</sup>.如目标层“安全性评价”的因素集  $F = \{f_1, f_2, f_3\}$ , 其中  $f_1$  为结构外观缺损状况,  $f_2$  为主要结构承载力,  $f_3$  为承重结构损伤.不同因素又包括不同的子因素个数,如指标层  $f_1$  为{上部结构缺损状况、下部结构缺损状况、支座缺损状况、附属结构缺损状况}.

评语集即评价等级的集合.工程实践表明,将结构(构件)的安全性划分为合适的等级是一种简洁明了、行之有效的手段<sup>[5]</sup>.根据《公路养护技术规范》<sup>[6]</sup>,将评价等级分为 A, B, C, D, E 5 级,即完好、较好、较差、坏、危险,建立评语集  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$  其中  $V_1 \sim V_5$  分别代表完好,较好,较差,坏,危险 5 个等级.

第二步,确定单因素评价隶属度矩阵  $R$ .在因素集和评语集的基础上就可以构造指标的评判矩阵  $R = (R_1, R_2, \dots, R_5)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ ,  $R$  为  $F$  到  $V$  上的一个模糊隶属关系矩阵.其中隶属度向量  $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{im})$ ,  $(i = 1, 2, \dots, n)$ ,  $\sum_{j=1}^m r_{ij} = 1 (m = 1, 2, \dots, n)$ .确定隶属度的方法有:Delphi 法、模糊统计法、增量法和因素加权综合法.笔者选用 Delphi 法和模糊统计法来确定评价指标的隶属度.

第三步,确定权重向量  $W_E$  和  $W_F$ .  $W_E$  为评定集的数值化结果(标准满意度向量),  $W_F$  为评价项目或指标的权重或权重系数向量.常用的方法有层次分析法(AHP)、德尔斐法和专家调查法.由于 AHP 具有系统、灵活、简洁的优点,笔者采用 AHP 确定权重<sup>[7]</sup>.AHP 方法可以把复杂问题分解为各个因素,将因素按支配关系分组形成层次结构.通过两两比较的方式确定层次中诸因素的相对重要性.具体步骤如下:

1) 分析评价系统中各基本要素之间的关系,建立系统的递阶层次结构;

2) 对同一层次各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较,构造两两比较判断矩阵,并进行一致性检验.

(1) 判断矩阵的性质

$0 < a_{ij} \leq 9$ ,  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ ,  $A$  为正互反判断矩阵;

选 1 ~ 9 之间的整数及其倒数作为  $a_{ij}$  取值的

主要原因,它符合人们进行比较判断的心理习惯.

(2) 两两比较判断的次数.两两比较判断的次数为:  $n \times (n-1)/2$ , 可避免判断误差的传递和扩散.

(3) 一致性检验方法

① 计算一致性指标  $C.I.$

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} W_j)}{W_i} \quad (2)$$

式中:  $(AW)_i$  表示向量  $AW$  的第  $i$  个分量.

② 查找相应的平均随机一致性指标  $R.I.$ .  $R.I.$  是同阶随机判断矩阵的一致性指标的平均值,其引入可在一定程度上克服一致性判断指标随  $n$  增大而明显增大的弊端.

③ 计算一致性比例  $C.R.$

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} < 0.1 \quad (3)$$

3) 采用算术平均法计算要素相对权重或重要向量  $W$ .

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n) \quad (4)$$

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

第四步确定桥梁的安全等级

计算综合评定向量  $S$  及综合评定值  $\mu$ . 其中  $S = W_F R$ ,  $\mu = W_E S$ . 根据最大贴近度原则,确定桥梁的安全性所处的等级.设  $S_1, S_2, \dots, S_n$  是向量上的  $n$  个元素.  $S_i = \max(S_1, S_2, \dots, S_n)$ , 则综合评定结果趋于  $S_i$ .

## 2 应用及算例分析

某独塔斜拉桥建于 2006 年,主桥长度 125 m,为双跨独塔双索面钢斜拉桥,跨径组合  $2 \times 62.5$  m. 双跨独塔双索面钢斜拉桥,塔梁采用铰接.加劲梁为正交异性板钢箱梁,断面呈弧形,梁高 2 m,箱梁宽度 33.5 m,平面设置图如图 2 所示.

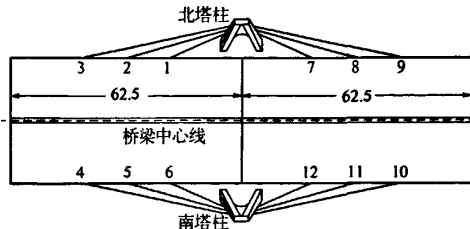


图 2 大桥平面布置图

Fig. 2 Bridge floor plan

2008 年对该桥进行了定期检测,检测发现主桥北塔根部局部有横、纵向裂缝,最大裂缝宽度为 0.10 mm,拱结构除有一处混凝土剥落(面积为 0.04 m<sup>2</sup>)外,基本完好,南塔拱结构根部有横向、纵向裂缝分别为 3 条、2 条。钢箱梁总体较好,局部油漆起皮,斜拉索外观情况基本完好。斜拉索外观情况基本完好。防撞墙及栏杆基本完好,部分泄水孔篦子破损,部分泄水管附近混凝土周围有水迹。主桥桥面上行方向有两条贯通主桥的纵向裂缝,下行方向 3 车道车辙较严重,局部位置车辙深达 10 cm。支座状况基本完好。在桥梁检测和实测相关数据的基础上,笔者运用层次分析法和模糊综合评判的原理对该桥进行安全性评价。

## 2.1 结构外观状况模糊综合评价

结构外观检测就是对混凝土破损、锈蚀、保护层脱落、渗漏水、腐蚀风化、裂缝及构件间的连接情况、墩台变形沉降、桥面系及附属设施的破损等进行检查,并分析产生缺陷、损伤的原因。

根据安全性评价模型,分别对 D 层元素对 C 层元素的相对重要性进行专家评分,得到 D-C 判断矩阵,如表 1~3 所示。对 C 层元素对 B1 元素的相对重要性进行专家评分,得到 C-B1 判断矩阵,如表 4 所示。然后根据对桥梁外观的试验检测结果,得到结构外观缺损状况的评判结果如表 5 所示。由表 5 一级评价结果可以看出,结构外观缺损状况最终评价结果为较好,从二级评价的结果也可以知道该桥的各分项的缺损状况,如上部结构为较好,下部结构为完好,附属结构为较好等。

## 2.2 主要结构承载力状况模糊评价

对塔柱在最不利荷载作用工况下,取塔柱根部截面的应力试验数据;主梁跨中断面箱梁最大应力的试验数据,最短斜拉索的索力、地基及基础情况。根据安全性评价模型,对 C 层元素对相邻 B2 层元素的相对重要性进行专家评分,得到 C-

B2 判断矩阵,如表 6 所示。然后根据对主要结构承重力构件的试验检测结果,得到主要结构承重状况的评判结果如表 7 所示。

表 1 D-C1 的评判矩阵

Tab.1 D layer on index faces (C1) judgment matrix

上部结构	D3	D2	D1	权重
D3	1	1	5	0.480 6
D2	1	1	3	0.405 4
D1	1/5	1/3	1	0.114 0

注: $\lambda_{\max}=3.0$ ,  $C.I.=0.01$ ,  $R.I.=0.58$ ,

$C.R.=0.02<0.1$ ,该矩阵可通过一致性检验。

表 2 D-C2 的评判矩阵

Tab.2 D layer on index faces (C2) judgment matrix

下部结构	D3	D2	D1	权重
D6	1	3	1/3	0.258 3
D5	1/3	1	1/5	0.104 7
D4	3	5	1	0.637 0

注: $\lambda_{\max}=3.0$ ,  $C.I.=0.02$ ,  $R.I.=0.58$

$C.R.=0.03<0.1$ ,该矩阵可以通过一致性检验。

表 3 D-C4 的评判矩阵

Tab.3 D layer on index faces (C4) judgment matrix

附属设施	D11	D10	D9	D8	D7	权重
D11	1	1	3	3	1	0.291 0
D10	1	1	1	1	1/3	0.152 2
D9	1/3	1	1	3	1	0.185 4
D8	1/3	1	1/3	1	1/3	0.092 9
D7	1	3	1	3	1	0.278 6

注: $\lambda_{\max}=3.5$ ,  $C.I.=0.09$ ,  $R.I.=1.12$

$C.R.=0.08<0.1$ ,该矩阵可以通过一致性检验。

表 4 C-B1 的评判矩阵

Tab.4 C layer on index faces (B1) judgment matrix

结构外观	C1	C2	C3	C4	权重
C1	1	1	5	4	0.402 9
C2	1	1	5	4	0.402 9
C3	1/5	1/5	1	3	0.119 5
C4	1/4	1/4	1/3	1	0.074 8

注: $\lambda_{\max}=4.2$ ,  $C.I.=0.07$ ,  $R.I.=0.90$

$C.R.=0.08<0.1$ ,该矩阵可以通过一致性检验。

表 5 结构外观缺损状况

Tab.5 Structure defect status appearance

权重 $W_i$	一级指标	$W_j$	二级指标	检查结果	二级评价结果	一级评价结果
0.402 9	C1	0.480 6	D3	(0,1,0,0,0)	(0.114 0, 0.886 0, 0, 0, 0)	
		0.405 4	D2	(0,1,0,0,0)		
		0.114 0	D1	(1,0,0,0,0)		
		0.258 3	D6	(0,1,0,0,0)		
0.402 9	C2	0.104 7	D5	(0,1,0,0,0)	(0.637 0, 0.363 0, 0, 0, 0)	
		0.637 0	D4	(1,0,0,0,0)		
		0.119 5	C3	(0,1,0,0,0)		
0.119 5	C3	0.291 0	D11	(0,0,1,0,0)	(0,1,0,0,0)	(0.302 6, 0.654 9, 0.042 6, 0, 0)
		0.152 2	D10	(0,1,0,0,0)		
		0.185 4	D9	(0,0,1,0,0)		
0.074 8	C4	0.092 9	D8	(0,0,1,0,0)	(0,0.430 8, 0.569 3, 0, 0)	
		0.278 6	D7	(0,1,0,0,0)		

由表 7 可以看出,主要承重构件的承载力模糊化评价结果为较好,并且偏向于 0.313 3 对应的等级,表明该桥承重能力处于较好偏于完好的状态,承载力满足要求,整桥工作性能良好。

表 6 C-B2 的评判矩阵

Tab.6 C layer on index faces (B2) judgment matrix					
承载力	C5	C6	C7	C8	权重
C5	1	1	4	1/3	0.238 5
C6	1	1	3	1	0.279 8
C7	1/4	1/3	1	1/3	0.088 5
C8	3	1	3	1	0.393 2

注: $\lambda_{\max}=4.2,C.I.=0.07,R.I.=0.90$   
 $C.R.=0.08<0.1$ ,该矩阵可以通过一致性检验。

表 7 承载力模糊评价结果

Tab.7 Fuzzy evaluation results				
权重 $W_i$	承载力影响因素	实测值(均值)	模糊化结果	模糊评价结果
0.238 5	C5	0.685	(0,0.6,0.4,0,0)	
0.279 8	C6	1.0	(0,0.7,0.1,0.2,0)	(0.249 7,0.531 6,
0.088 5	C7	0.79	(0.6,0.4,0,0,0)	0.162 7,0.056 0,0)
0.393 2	C8	较好	(0.5,0.4,0.1,0,0)	

2.3 主要承重结构损伤状况模糊评价

根据安全性评价模型,对 C 层元素对相邻 B3 层元素的相对重要性进行专家评分,得到 C-B3 判断矩阵,如表 8 所示。

对主要承重结构损伤进行评价,考虑构件最大裂缝宽度、主筋锈蚀率和混凝土剥落面积等指标,结合评价指标的自身特点,采用多级模糊专家统计法来确定其隶属度。模糊评价结果如表 9 所示。

由表 9 可以看出,模糊评价的结果表明结构主要承重构件处于较好的状态,同时可以详细的得出每个部件各自的状态,如塔柱处于较好工作状态,基础处于完好状态等。

表 8 C-B3 的评判矩阵

Tab.8 C layer on index faces (B3) judgment matrix						
主要承重结构	C9	C10	C11	C12	C13	权重 $W_i$
C9	1	3	3	3	1/3	0.253 8
C10	1/3	1	1/3	1	1/5	0.071 6
C11	1/3	3	1	3	1/3	0.161 0
C12	1/3	1	1/3	1	1/3	0.082 4
C13	3	5	3	3	1	0.431 2

注: $\lambda_{\max}=5.3,C.I.=0.07,R.I.=1.12$   
 $C.R.=0.06<0.1$ ,该矩阵可以通过一致性检验。

表 9 承重结构损伤模糊评价结果

Tab.9 Bearing structure damage fuzzy evaluation results				
权重 $W_i$	承载力影响因素	实测值(均值)	模糊化结果	模糊评价结果
0.2538	C9	0.1	(0.3,0.7,0,0,0)	
0.071 6	C10	0.02	(0.1,0.9,0,0,0)	(0.388 0,
0.1610	C11	0.01	(0.4,0.6,0,0,0)	0.6120,
0.082 4	C12	0.04	(0.3,0.7,0,0,0)	0,0,0)
0.431 2	C13	0	(0.5,0.5,0,0,0)	

2.4 安全性模糊综合评价

根据安全性评价模型,对 B 层元素对 A 层元素的相对重要性进行专家评分,得到 B-A 判断矩阵,如表 10 所示。综合以上 3 个部分的评价结果,按照模糊综合评判的基本思想,对大桥安全性进行模糊综合评判,评判结果如表 11 所示。

表 10 B-A 的评判矩阵

Tab.10 B layer on index faces (A) judgment matrix				
安全性评价	B1	B2	B3	权重 $W_i$
B1	1	1/4	1/3	0.117 2
B2	4	1	3	0.614 4
B3	3	1/3	1	0.268 4

注: $\lambda_{\max}=3.1,C.I.=0.04,R.I.=0.58$   
 $C.R.=0.063 4<0.1$ ,该矩阵可以通过一致性检验。

表 11 桥梁安全性评价结果

Tab.11 Bridge safety evaluation results			
权重 $W_i$	承载力影响因素	实测值(均值)	模糊化结果模糊评价结果
0.1172	B1	(0.302 6,0.654 9,0.042 6,0,0)	(0.293 0,0.567 6,
0.614 4	B2	(0.249 7,0.531 6,0.162 7,0.056 0,0)	0.105 0,0.034 4,0)
0.268 4	B3	(0.388 0,0.612 0,0,0,0)	

根据《公路养护技术规范》,按照最大贴近度原则,由表 5,7,9 依次可以看出结构外观状况、承载力状况、结构承重状况均处于较好状态。由表 11 可以看出,该桥梁总体处于较好状态,不需要进行加固维修。使用模糊综合评判法得到的评判等级结果可以较为直观的反应整个结构所隶属的工作状态,并且可从模糊综合评判法的综合评判结果矩阵中可了解到各评判单元隶属于各个评判等级的程度。同时模糊综合评判法有固定的计算步骤,其评判是通过模糊数学运算来实现的,用这种定量的方法来处理评判过程中产生的不确定信息是合理的,将其与专家系统结合则更具有可信度。

### 3 结论

(1)根据层次分析法的基本思想,建立了独塔斜拉桥安全性评价模型及其指标体系,提出了独塔斜拉桥安全性模糊评价方法。

(2)结合工程实例,采用系统工程中模糊评判的方法,对结构现役状态进行了模糊综合评判,研究结果表明该桥处于较好工作状态,无需加固。

(3)该模型的建立和评价方法的提出,使得实现对桥梁现有承载能力的快速评定。评价结果可为此类桥梁后期的养护管理提供科学依据。

### 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] 任宝双,钱稼茹,聂建国,等.在用钢筋混凝土简支梁桥结构综合评估方法[J].土木工程学报,2002,35(2):97-102.
- [3] STEWART M G, ROSOWSKY D V. Structural safety and service-ability of concrete bridges subject to corrosion[J]. Journal of infrastructure Systems, 1998, 12, 4 (4):146-155.
- [4] 兰海,史家钧.灰色关联分析与变权综合法在桥梁评估中的应用[J].同济大学学报:自然科学版,2001,29(1):50-54.
- [5] 刘沐宇,袁卫国,任飞.大跨度钢管混凝土拱桥安全性模糊综合评价[J].武汉理工大学学报,2003,25(5):33-36.
- [6] 浙江省公路管理局. JTG H10—2009 公路养护技术规范[S].北京:人民交通出版社,2009.
- [7] 许树柏.实用决策方法—层次分析法原理[M].天津:天津大学出版社,1988.
- [8] 李安贵,张志宏,孟艳,等.模糊数学及其应用[M].北京:冶金工业出版社,2005.
- [9] 王应洛.系统工程[M].北京:机械工业出版社,2007.

## Single Pylon Cable-Stayed Bridge Safety Evaluation Based on AHP-FUZZY Algorithm

ZHANG Jun-guang<sup>1</sup>, CHENG Gao<sup>1</sup>, KE Liang-liang<sup>2</sup>, WANG Bao-lin<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Highway Research Institute, Xi'an 710054, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Institute, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** According to the structure characteristics of a single pylon cable-stayed bridge, the paper evaluated the safety of a single pylon cable-stayed bridge in service with analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method in system engineering. The paper established the safety evaluation model, and determined the weight and membership of the influence factors of safety with multi-grade fuzzy comprehensive evaluation method, which was based on the actual test data and expert advice, and then got the fuzzy evaluation results of bridge safety. Finally, according to the maximum degree of membership, the paper determined the bridge safety level, especially provided scientific basis for the bridge maintenance and management in service later.

**Key words:** the single pylon cable-stayed bridge; safety evaluation; analytic hierarchy process; fuzzy synthetic evaluation; load capacity