

基于最优传递矩阵的不确定型层次分析法 在桥梁安全评估中的综合应用

陈瑞敏,杨厥葆

(河南理工大学 土木工程学院,河南 焦作 454000)

摘要:在桥梁的安全评估中,采用确定型层次分析法,存在指标的不确定性和模糊性。针对工程实例,采用不确定型层次分析法,建立桥梁递阶层次模型,通过对比 4 种不同指标权重计算方法,最终选用最优传递矩阵法进行桥梁指标权重的计算。结果表明,不确定型层次分析法能够全面考虑影响桥梁安全性的各种因素;最优传递矩阵法计算权重精度高,桥梁安全评估结果更加可靠。

关键词:桥梁;安全评估;不确定型层次分析法;指标权重;最优传递矩阵法

中图分类号:U447 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2018)04-0050-04

近年来,高速交通运输事业快速发展,公路桥梁日益增多,为使桥梁在使用年限内的安全性、耐久性和正常使用功能能够得以保证,需要及时地对桥梁进行安全评估。目前所知晓的桥梁评估案例中,采用的基本都是确定型层次分析法。但在实际工程中存在许多不确定性和模糊性,采用此方法,桥梁的真实状态无法准确表达。本文采用不确定型层次分析法对桥梁进行安全评估,能够在很大程度上反映事物的不确定性和模糊性,使评估结果更加可靠。将该方法运用到工程实例中证明了该方法的可行性与科学性。

1 不确定型层次分析法理论研究

20 世纪 70 年代美国运筹学家、匹茨堡大学教授 Saaty 提出了一种层次权重决策分析方法,即层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP)。AHP 可以用来解决具有复杂层次结构的多指标决策问题,它可以通过建立递阶层次模型,把一个复杂问题进行逐层划分,从而达到解决问题的目的^[1]。

传统的确定型层次分析法能够将桥梁的工作状态进行条理化和层次化,从而简化桥梁的分析评估,因此该方法在桥梁安全评估中应用广

泛^[2]。但是,在对桥梁进行评估时,由于对事物认识的不确定性和模糊性,使专家对指标的判断不精确。不确定型层次分析法采用区间数代替确切数反映对事物认识的程度,通过构造的区间判断矩阵可以充分了解不同指标的相对重要程度,能够使事物的不确定性和模糊性得到充分反映,以便专家对桥梁安全状态进行准确判断^[3-4]。

1.1 桥梁安全评估的具体步骤

采用 AHP 对桥梁安全进行评估,主要有以下步骤:

1.1.1 建立桥梁评估的递阶层次模型^[1]

将对桥梁状态影响程度相近或联系比较紧密的评估指标放在同一层,建立多层次关系评估模型,确定指标体系(每层评估指标不能超过 9 个)。

1.1.2 构造区间判断矩阵^[5]

将同一层的指标进行两两比较,如表 1 进行各指标赋值,构成了判断矩阵 A : $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。判断矩阵 A 形式如表 2 所示,表格中下三角元素为上三角元素的倒数,只需填写上三角元素即可。

1.1.3 进行权重计算

由各层指标形成的区间判断矩阵计算出各层各指标在该层的权重,最终得到权重为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n)$,其中 w_i 为第 i 个因素 U_i 所对应的权重。

表1 1~9 标度尺
Table 1 1~9 scale

a_{ij} 取值	定义
1	a_i 与 a_j 相比,同样重要
3	a_i 与 a_j 相比,稍微重要
5	a_i 与 a_j 相比,明显重要
7	a_i 与 a_j 相比,强烈重要
9	a_i 与 a_j 相比,极端重要
其他1~9之间的数值	a_i 与 a_j 相比,重要程度处于相应两个数之间
倒数	a_i 与 a_j 相比得判断 a_{ij} , a_j 与 a_i 相比得判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$

表2 区间判断矩阵A
Table 2 Interval judgment matrix A

A	a_1	a_2	...	a_n
a_1	$[1,1]$	$[a_{12}^-,a_{12}^+]$	...	$[a_{1n}^-,a_{1n}^+]$
a_2		$[1,1]$	...	$[a_{2n}^-,a_{2n}^+]$
...	...	...	...	...
a_n			...	$[1,1]$

1.1.4 确定评估等级标准^[4]

根据规范分级鉴定的标准,建立评语集 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$, 分别对应状态良好、较好、较差、坏、危险 5 个等级。

1.1.5 建立指标的隶属度函数

层次模型确立后,为建立评语模糊矩阵,需确立合适的模糊隶属度函数,根据文献[6],建立了本文桥梁评估等级隶属度函数,如图1所示。

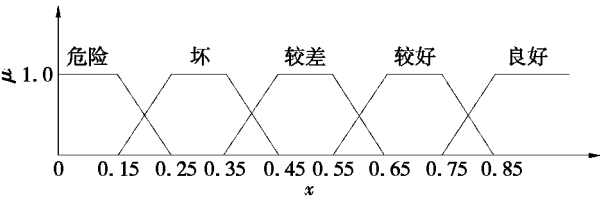


图1 等级隶属度函数
Fig.1 Rank membership function

表3 4种指标权重计算方法的对比

Table 3 Comparison of four index weight calculation methods

计算方法	特点
判断区间抽样法 ^[8]	抽样工作量太大,不能保全判断矩阵的全部信息,使决策结果无法充分反映决策依据
最优传递矩阵法 ^[9]	计算简单,能够充分利用判断矩阵的全部信息,计算精度比较高,对专家构造的判断矩阵的一致性依赖相对较小
区间的相离度法 ^[4]	物理意义明确,但计算繁琐,而且含有不确定系数
一致性逼近与排序方法 ^[10]	能充分利用专家全部判断信息构造一致性数字判断矩阵,应用误差传递公式计算权重,但在判断矩阵一致性较差时,会导致结果失真,甚至出现负值

1.1.6 模糊综合评估

将底层评语进行无量纲化处理^[7],获得无量纲得分后,进行模糊化处理,最终形成模糊矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times 5}$, 其中 r_{ij} 为第 i 个指标在评语集里对应第 j 个等级的比重,可以反映该指标所属的状态等级。将每层各指标模糊矩阵与本层指标权重相乘得到上层指标评估结果,最终得到桥梁评估结果。模糊综合评估的公式如下:

$$V = W \times R =$$
$$(w_1, w_2, \cdots, w_n) \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} & r_{n5} \end{bmatrix} =$$
$$(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) \tag{1}$$

1.2 几种不确定型 AHP 判断矩阵指标权重计算方法的分析及选用

1.2.1 4种方法的比较及选用

在桥梁安全评估中,为得到桥梁底的不确定型判断矩阵,需要进行权重的计算,但权重的计算方法较多,为使评估结果准确,应选择合理的计算方法。表3列举了4种常用计算方法,通过对比分析,最终本文采用最优传递矩阵法对桥梁进行安全评估。

1.2.2 不确定型 AHP 最优传递矩阵法

不确定型 AHP 最优传递矩阵法,是将专家构造的判断矩阵拆分成两个独立矩阵,然后将两个矩阵化为反对称矩阵 B ,再将反对称矩阵化为最优矩阵 C ,最后化为一致性矩阵 A^* 来计算指标权重,得到指标权重区间 $[w_i^-, w_i^+]$, 取其平均值作为各指标权重,具体的计算过程如下:

(1)由专家根据各层评估指标进行两两重要性的比较来构造区间数判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, $a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$;

(2) 将区间数判断矩阵 A 拆分成两个矩阵 $(a_{ij}^-)_{n \times n}$ 和 $(a_{ij}^+)_{n \times n}$, 两组矩阵均由矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 表示;

(3) 令 $B = \ln A = (\ln a_{ij})_{n \times n}$ 化为反对称矩阵, 则 B 为 A 的反对称区间矩阵;

(4) 将 B 化为最优传递矩阵

$$C = (c_{ij})_{n \times n},$$
$$c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} - b_{jk});$$

(5) 将 C 化为一致性矩阵 A^* , 则 $A^* = \exp(C) = (e^{c_{ij}})_{n \times n}$;

(6) 将 A^* 归一化, 采用下式计算指标权重:

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^*}, i, j = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (2)$$

2 工程评估实例

以某高速公路上的一座预应力混凝土连续箱梁桥为例, 采用上述方法对其安全性进行评估, 桥梁的递阶层次模型如图 2 所示。以专家构造的一级指标判断矩阵为例(如表 4 所示)。

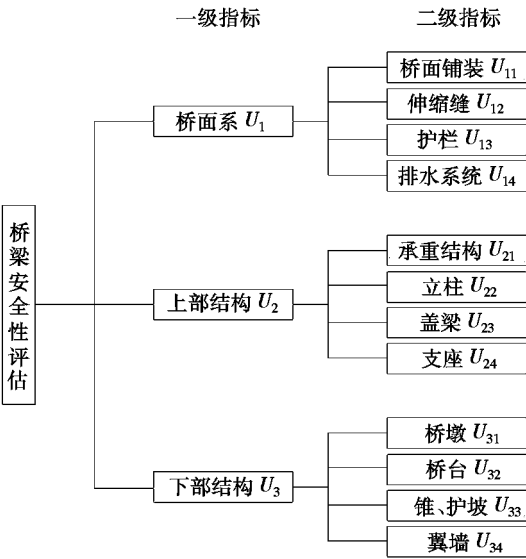


图 2 桥梁递阶层次模型
Fig.2 Hierarchical model of bridge

由 1.2 计算得, 一级指标权重区间 $U_1 = [0.051, 0.064]$, $U_2 = [0.228, 0.255]$, $U_3 = [0.721, 0.701]$,

表 4 专家建立的一级指标判断矩阵
Table 4 One level index judgment matrix established by experts

	桥面系	上部结构	下部结构
桥面系	[1,1]	[1/7,1/6]	[1/9,1/7]
上部结构	[6,7]	[1,1]	[1/5,1/4]
下部结构	[7,9]	[4,5]	[1,1]

由表 4 建立不确定型判断矩阵如下:

$$U = A = \begin{bmatrix} [1,1] & [1/7,1/6] & [1/9,1/7] \\ [6,7] & [1,1] & [1/5,1/4] \\ [7,9] & [4,5] & [1,1] \end{bmatrix}$$

则一级指标权重向量 $U = [0.058, 0.241, 0.701]$ 。同理可得二级指标权重向量分别为: $U_1 = [0.491, 0.317, 0.148, 0.044]$; $U_2 = [0.651, 0.222, 0.080, 0.047]$; $U_3 = [0.519, 0.324, 0.118, 0.039]$ 。获得各指标权重后, 利用图 1 等级隶属度函数进行向量模糊化, 然后形成相应的评估矩阵, 最后采用公式(1)计算出桥梁的模糊评估结果 V , 计算过程见表 5、表 6。

最后得到整个桥梁评估结果: 根据最大隶属度邻近判别法(0.815), 桥梁整体状态良好。该评估结果基本与专家的评估一致, 证明采用此方法对桥梁进行安全评估的可行性。

3 结论

(1) 采用不确定型层次分析法对桥梁的安全状态进行评估, 能够将影响桥梁安全的各方面因素都考虑在内。为准确地对桥梁进行安全评估, 建立了合理和完整的桥梁评估系统, 可以及时地发现桥梁存在的问题, 从而可以为日常的桥梁养护工作提供理论依据, 有利于保证桥梁的安全性、耐久性, 充分发挥桥梁的使用功能。

(2) 在实际工程中运用不确定型层次分析法进行安全评估, 采用最优传递矩阵法计算桥梁权重指标, 将得到的评估指标利用等级隶属度函数进行模糊化处理, 最后将得到的结果采用最大隶属度邻近判别法进行桥梁最终评估等级的确定。通过与专家的评估结果进行对比, 证明了此方法在桥梁评估中的科学性与可行性。

表 5 二级模糊评估过程
Table 5 Two level fuzzy evaluation process

编号	二级指标	权重 ω	模糊化向量 R	二级模糊运算结果 V
U_1	桥面铺装 U_{11}	0.491	(1,0,0,0,0)	(0.951,0.049,0,0,0)
	伸缩缝 U_{12}	0.317	(1,0,0,0,0)	
	护栏 U_{13}	0.148	(0.7,0.3,0,0,0)	
	排水系统 U_{14}	0.044	(0.9,0.1,0,0,0)	
U_2	承重结构 U_{21}	0.651	(1,0,0,0,0)	(0.903,0.097,0,0,0)
	立柱 U_{22}	0.222	(0.8,0.2,0,0,0)	
	盖梁 U_{23}	0.080	(0.64,0.36,0,0,0)	
	支座 U_{24}	0.047	(0.5,0.5,0,0,0)	
U_3	桥墩 U_{31}	0.519	(0.85,0.15,0,0,0)	(0.773,0.227,0,0,0)
	桥台 U_{32}	0.324	(0.73,0.27,0,0,0)	
	锥、护坡 U_{33}	0.118	(0.56,0.44,0,0,0)	
	翼墙 U_{34}	0.039	(0.76,0.24,0,0,0)	

表 6 一级模糊评估过程
Table 6 First level fuzzy evaluation process

编号	一级指标	权重 ω	模糊化向量 R	一级模糊运算结果 V
U	桥面系 U_1	0.058	(0.951,0.049,0,0,0)	(0.815,0.185,0,0,0)
	上部结构 U_2	0.241	(0.903,0.097,0,0,0)	
	下部结构 U_3	0.701	(0.773,0.227,0,0,0)	

参考文献:

[1] 黄侨,任远,林阳子. 大跨径桥梁综合评估中的不确定型层次分析法[J]. 公路交通科技,2008,25(3):79-83.
[2] 肖祥,魏拓. 基于不确定型层次分析法的中小跨径桥梁耐久性评估技术[J]. 北方交通,2012(11):70-73.
[3] 范剑锋,袁海庆,刘文龙. 基于不确定型层次分析法的桥梁模糊综合评估[J]. 武汉理工大学学报,2005,27(4):54-57.
[4] 袁海庆,刘文龙,殷银章. 不确定型层次分析法在桥梁综合评估中的应用研究[J]. 铁道运输与经济,2006,28(2):82-85.
[5] 赵璐,程龙. 不确定型层次分析法在桥梁安全评估中的应用[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),2017,27(2):20-23.
[6] 王永平,张宝银,张树仁. 桥梁使用性能模糊评估专家系统[J]. 中国公路学报,1996,9(2):62-67.
[7] 朱孔来. 评价指标的非线性无量纲模糊处理方法[J]. 系统工程,1996,14(6):58-62.
[8] 范剑锋,袁海庆,钟路. 不确定层次分析下的桥梁评估最优指标权重确定[J]. 公路交通科技,2007,24(9):65-68.
[9] 杜红珊,李洪杰,郑庆玉. 不确定型 AHP 的最优传递矩阵法[J]. 曲阜师范大学学报,1997,23(4):37-40.
[10] 许先云,杨永清. 不确定 AHP 判断矩阵的一致性逼近与排序方法[J]. 系统工程理论与实践,1998(2):19-22.

Comprehensive Application of Uncertain AHP Based on Optimal Transfer Matrix in Bridge Safety Assessment

CHEN Ruimin, YANG Aobao

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China)

Abstract: In the safety assessment of bridges, deterministic analytic hierarchy process (AHP) is adopted, and there are uncertainties and fuzziness in the indicators. Aiming at the engineering example, the uncertain analytic hierarchy process (AHP) is adopted to establish the hierarchical model of bridge. By comparing four different calculation methods of index weight, the optimal transfer matrix method is finally used to calculate the index weight of bridge. The results show that the uncertain analytic hierarchy process can comprehensively consider all factors affecting bridge safety. The optimal transfer matrix method has high accuracy in calculating weight, and the results of bridge safety assessment are more reliable.

Keywords: Bridge; Safety assessment; Uncertainty AHP; Index weight; Optimal transfer matrix method

(责任编辑:张英健)