

基于改进证据理论与 IFAHP 的预应力 砼梁桥状态评估^{*}

张征昀¹, 彭步新², 王子健¹, 阳逸鸣¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.安福县房产管理局, 江西 安福 343206)

摘要: 针对现有公路桥梁评定标准在桥梁服役状态评价中的局限性与评价体系中指标的模糊性和不确定性, 基于实桥检测数据和现行规范, 将改进模糊层次分析法(IFAHP)和证据理论相结合, 构建预应力砼梁桥状态评估方法。通过改进 D-S 多源信息融合方法, 增加评估结果的准确率, 同时解决高冲突证据在融合过程中产生相悖结论的问题; 利用 IFAHP 法, 避免层次分析法对判断矩阵进行一致性检验的复杂过程, 并提高权重向量的精确程度。实桥状态评估结果表明, 该评估方法综合考虑了影响桥梁结构耐久性和安全性的主要因素, 同时能较好地考虑不确定信息的影响, 可为预应力砼公路桥梁制订维修与加固方案提供依据。

关键词: 桥梁; 预应力砼梁桥; 状态评估; 改进证据理论; 改进模糊层次分析法(IFAHP)

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0135-05

桥梁技术状况现行主要评定标准为《公路桥梁技术状况评定标准》。在运用该评定标准进行桥梁结构服役状态评定时, 需记录桥梁结构已有病害和各构件的缺陷位置与具体情况, 然后按规范中的计算公式和评分标准进行评定。学者们也对桥梁性能评价体系及计算方法进行了研究, 如黄侨等基于不确定层次分析法对斜拉桥进行综合服役状态评估, 得出影响桥梁安全性和耐久性的主要因素; 刘芳平等运用模糊可拓层次分析法对在役桥梁进行评价, 所得结果相较于传统层次分析法的评价结果更可靠; 熊仲明等以大跨度钢结构为背景建立模糊综合评价模型, 提出了大跨钢结构各指标权重向量判断矩阵和钢结构构件鉴定各子指标向量判断矩阵, 为大跨钢结构评估结果的准确性提供保障。上述方法虽然具有各自的优势, 但难以处理多源信息间的不确定性因素。D-S 证据理论是处理不确定性因素行之有效的工具, 但针对高冲突证据进行融合所得结果可能与实际情况相反。为此, 将改进模糊层次分析法(IFAHP)与改进 D-S 证据理论相结合, 对预应力砼梁桥的技术状况进行评价。

1 IFAHP 模糊判断矩阵的权重确定

IFAHP 法不仅符合专家的逻辑思维, 而且构造

形式简单, 相较于传统层次分析法更适合对多目标决策问题进行分析。该方法可将初始判断矩阵转换为模糊判断矩阵, 减少迭代次数; 还能避免传统层次分析法繁琐的一致性检验过程, 提高权重计算精度。IFAHP 法权重计算步骤如下:

(1) 依据评价对象的层次结构建立优先判断矩阵 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$, 用于描述各因素间相对重要程度。其中 A 为模糊互补矩阵, a_{ij} 为矩阵中两两因素比较的重要性标度, 其值为 0.1~0.9, 其意义见表 1。

表 1 模糊判断矩阵标度尺

标度 a_{ij}	定义(因素两两相比较)
0.5	两因素同等重要
0.6	相比另一个因素稍微重要
0.7	相比另一个因素明显重要
0.8	相比另一个因素重要得多
0.9	相比另一个因素极端重要
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	两个因素间进行的反比较($a_{ji} = 1 - a_{ij}$)

(2) 对模糊判断矩阵 A 按列求和, 得到 r_i 与 r_j ($i, j = 1, 2, \dots, n$), 然后按 $r_{ij} = 0.5(r_i - r_j + 1)$ 将初始矩阵 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 转换为一致性模糊判断矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 。

(3) 按 $e_{ij} = r_{ij} / r_{ji}$ 将一致性模糊判断矩阵 $R =$

^{*} 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)[2015CB057706]; 国家自然科学基金面上项目[51778068]; 湖南省自然科学基金面上项目[2018JJ2438]; 湖南省教育厅重点项目[18A136]

$(r_{ij})_{n \times n}$ 转换为互反型判断矩阵 $E = [e_{ij}]_{n \times n}$ 。

(4) 为使权重向量具有较高的精度并确保证据融合的计算结果合理,采用方根法按下式计算初始排序向量:

$$\omega_0' = [\omega_{0,1}', \dots, \omega_{0,n}']^T = \left[\frac{\sqrt{\prod_{j=1}^n e_{1j}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\prod_{j=1}^n e_{ij}}}, \dots, \frac{\sqrt{\prod_{j=1}^n e_{nj}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\prod_{j=1}^n e_{ij}}} \right]^T \quad (1)$$

式中: $\omega_{0,1}', \omega_{0,2}', \dots, \omega_{0,n}'$ 为排序权重。

(5) 按 $\omega_1' = E \cdot \omega_0'$ 计算迭代初始向量 ω_1' 。将初始迭代向量带入式(2)进行迭代,直至满足判断条件[见式3]为止。通过迭代计算得到的权重向量见式(4):

$$\omega_k' = \frac{E\omega_{k-1}'}{\|\omega_{k-1}'\|_\infty} \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (2)$$

式中: $\|\omega_{k-1}'\|_\infty$ 为向量的无穷范数。

$$\|\|\omega_k'\|_\infty - \|\omega_k'E^{-1}\|_\infty\| \leq \eta \quad (3)$$

式中: η 为预定迭代精度。

$$\omega_{k+1}' = \left[\frac{\omega_{k+1,1}'}{\sum_{i=1}^n \omega_{k+1,i}'}, \dots, \frac{\omega_{k+1,n}'}{\sum_{i=1}^n \omega_{k+1,i}'} \right]^T \quad (4)$$

2 改进的证据理论

D-S 证据理论中,定义识别框架 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ (n 为命题个数),各证据的基本概率赋值函数(BPAF)为 $m_i(A_j)$,表示证据 m_i 对命题 A_i 的信任度,合成公式为:

$$\begin{cases} m_{\oplus}(A) = \frac{1}{1-K} \sum_{\cap A_j = A} \prod_{1 \leq j \leq n} m_i(A_j), \\ A \subseteq \Theta, A \neq \Phi \\ m_{\oplus}(\Phi) = 0, \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$K = \sum_{\cap A_j = \Phi} \prod_{1 \leq j \leq n} m_i(A_j) \quad (6)$$

式中: K 为冲突权值,反映证据之间的冲突程度。

K 的取值区间为 $[0,1]$,其值越大,证据冲突越大。D-S 证据理论在 $K=1$ 时不再适用,此时证据间完全冲突。为减小冲突证据对评价结果的影响,对引起冲突的证据进行修正。

辨识框架中 R^n 维空间的坐标使用每个证据的基本概率函数赋值,可将每个证据转化为该空间内的一组向量 $m_i = (m_i(A_1), m_i(A_2), \dots, m_i(A_n))^T$ 。

由于证据源中各证据之间的赋值大小顺序可能产生自冲突性质,基于余弦相似度,采用文献[9]中方法对证据相似度进行重新定义:

$$\text{Sim}_{ij} = \alpha \cos(m_i, m_j) + \beta \text{Sim}_{\text{seq}}(m_i, m_j) \quad (7)$$

式中: $\cos(m_i, m_j)$ 为证据向量 m_i, m_j 之间的余弦相似度; $\cos(m_i, m_j) = m_i^T m_j / \sqrt{(m_i^T m_i)(m_j^T m_j)}$; $\text{Sim}_{ij}^{\text{seq}} = 1 - \delta_{ij} \sum_{p=1}^{k_i k_j} |R_i^p - R_j^p|^2 / [k_i k_j \sum_{l=1}^n (n+1-2l)^2]$ 。

对证据向量 m_i 和 m_j 中元素从小到大排序,且分别检索排序后向量中元素所在原向量中的位置序号。分别有 k_i 和 k_j 种可能,对应排序 $k_i k_j$ 种可能中第 p 个排序后序号向量记为 R_i^p 和 R_j^p 。其中 $\alpha = \beta = 0.5$,并且当 $i=j$ 时 $\delta_{ij}=0$, $i \neq j$ 时 $\delta_{ij}=1$ 。在识别框架 Θ 下,针对 N 个证据向量中第 i 个证据向量 m_i 的平均相似度为:

$$\text{Sim}_i = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, i \neq j}^N \text{Sim}_{ij} \quad (8)$$

冲突证据判别因子(运用 K 近邻法)为:

$$\text{Conf}_i = \frac{\max_{1 \leq i \leq N} \text{Sim}_i - \text{Sim}_i}{(\max_{1 \leq i \leq N} \text{Sim}_i - \min_{1 \leq i \leq N} \text{Sim}_i)} \quad (9)$$

该冲突因子的取值区间为 $[0,1]$ 。 $\text{Conf}_i=0$,表示证据 m_i 与其他证据不存在冲突; $\text{Conf}_i=1$,表示证据 m_i 与其余证据高度冲突。利用 Conf_i 可判断证据间的冲突性,若 $\text{Conf}_i > \tau$ (τ 为判别阈值),则判定 m_i 为冲突证据。

根据式(8)可得出证据 m_i 的信任度为:

$$C_{rdi} = \frac{\text{Sim}_i}{\sum_{i=1}^N \text{Sim}_i} \quad (10)$$

根据式(10)可确定证据 m_i 的相似度,对判别出的冲突证据进行修正后,得到基本概率赋值:

$$m_i'(A_j) = \begin{cases} C_{rdi} \cdot m_i(A_j), & A_j \neq \Theta \\ C_{rdi} \cdot m_i(\Theta) + 1 - C_{rdi}, & A_j = \Theta \end{cases} \quad (11)$$

在修正后的冲突证据中,不确定性命题 Θ 提供的不确定性信息将增加,信任度小的命题 A_k 提供的确定性信息将减少,从而降低信任度较小证据带来的影响。

对证据向量 m_i 中原始证据 $m_i(A_j)$ 按式(12)进行修正。

$$\tilde{m}_i(A_j) = \begin{cases} m_i(A_j), & \text{Conf}_i \leq \tau \\ m_i'(A_j), & \text{Conf}_i > \tau \end{cases} \quad (12)$$

3 预应力砼梁桥状态评价

3.1 评价模型及评定标准

如图 1 所示,评价模型的目标层为预应力

砼桥梁服役状态,准则层包括主梁、墩台及基础、支座及其他、桥面,指标层包括抗弯可靠度、墩台及基础变位、普通钢筋锈蚀等 13 项。

根据《公路桥涵养护规范》,将桥梁技术状况评

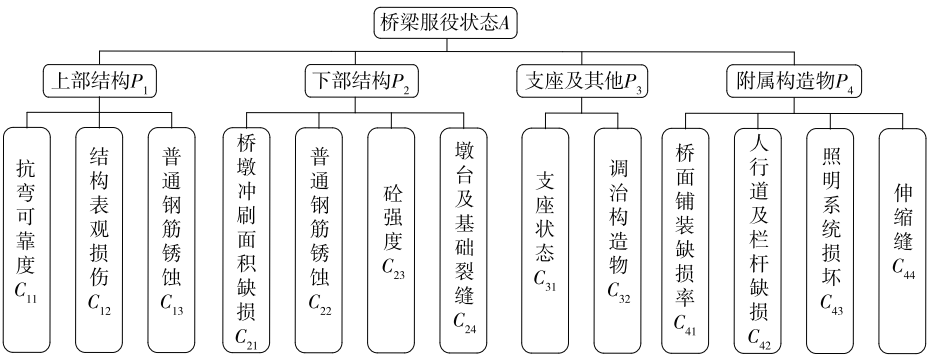


图 1 预应力砼桥梁评价模型

定等级分为 I、II、III、IV、V 5 类,得评语等级模糊集 $H=\{I, II, III, IV, V\}$,分别表示良好、较好、较差、很差、危险,评价体系中的定性指标依此进

行评价。依据相关规范及评定标准,对其中分级指标依照模糊划分原则进行处理,得定量指标评定标准区间值见表 2。

表 2 桥梁定量指标评定标准区间值

评价指标	各等级的区间值				
	I	II	III	IV	V
C_{11}	(4.7,∞)	(4.1,4.5)	(3.5,3.9)	(2.9,3.3)	(0,2.7)
$C_{12}/\%$	(0,5)	(8,14)	(17,23)	(26,32)	(35,100)
C_{13}/mV	(0,-200)	(-242.86,-285.72)	(-328.58,-371.44)	(-414.3,-457.16)	(-500,∞)
$C_{21}/\%$	0	(2.5,5)	(7.5,10)	(12.5,17.5)	(20,100)
C_{22}/mV	(0,-200)	(-242.86,-285.72)	(-328.58,-371.44)	(-414.3,-457.16)	(-500,∞)
C_{23}	(1,∞)	(0.95,0.98)	(0.9,0.93)	(0.85,0.88)	(0,0.83)
C_{24}/mm	(0,0.15)	(0.2,0.25)	(0.3,0.35)	(0.4,0.45)	(0.5,∞)
$C_{31}/\%$	0	(4.29,8.58)	(12.87,17.16)	(21.45,25.74)	(30,100)
$C_{41}/\%$	0	(4.29,8.58)	(12.87,17.16)	(21.45,25.74)	(30,100)
$C_{42}/\%$	0	(2.5,5)	(7.5,10)	(12.5,17.5)	(20,100)
$C_{43}/\%$	0	(2.14,4.28)	(6.42,8.56)	(10.7,12.84)	(15,100)

3.2 实测数据

以某高速公路连续梁桥为例,对其进行服役状态评价。该桥于 2001 年建成通车,为 65 m+120 m +65 m 三跨预应力砼连续刚构箱梁桥,采用悬臂拼

装法施工。由于施工中出现了施工质量等问题,造成桥梁主梁表观出现大量裂缝,且墩台基础和桥面出现不同程度病害,遂于 2017 年秋对全桥进行检测。检测结果和桥梁可靠指标计算结果见表 3。

表 3 预应力砼桥梁检测数据和可靠指标

准则层	指标层	实测或计算数据	准则层	指标层	实测或计算数据
主梁	抗弯可靠度	4.07	支座及其他	支座状态/%	11
	结构表观损伤/%	16		调治构造物	良好
	普通钢筋锈蚀/mV	-297.84	桥面	桥面铺装/%	19.3
墩台及基础	桥墩冲刷/%	6		人行道栏杆/%	0.8
	普通钢筋锈蚀/mV	-304.41		照明系统/%	1
	砼强度	0.947		伸缩缝	良好
	墩台基础裂缝/mm	0.16			

3.3 评估过程

3.3.1 构造模型的隶属度函数

为计算简便且尽可能反映各指标的模糊程度,采取梯形建立评估模型的隶属度函数。对于越大越优的评价指标,隶属于Ⅰ级的隶属度函数为:

$$I_1 = \begin{cases} 0, x < \max(H_2) \\ \frac{x - \max(H_2)}{\min(H_1) - \max(H_2)}, \max(H_2) \leq x < \min(H_1) \\ 1, x \geq \min(H_1) \end{cases} \quad (13)$$

隶属于Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ的隶属度函数为:

$$I_k = \begin{cases} 0, x < \max(H_{k+1}) \\ \frac{x - \max(H_{k+1})}{\min(H_k) - \max(H_{k+1})}, \max(H_{k+1}) \leq x < \min(H_k) \\ \frac{\min(H_{k-1}) - x}{\min(H_{k-1}) - \max(H_k)}, \max(H_k) \leq x < \min(H_{k-1}) \\ 0, x \geq \min(H_{k-1}) \end{cases} \quad (14)$$

隶属于Ⅴ级的隶属度函数为:

$$I_5 = \begin{cases} 1, x < \max(H_5) \\ \frac{\min(H_4) - x}{\min(H_4) - \max(H_5)}, \max(H_5) \leq x < \min(H_4) \\ 0, x \geq \min(H_4) \end{cases} \quad (15)$$

式中: H_k ($k=1, 2, 3, 4, 5$) 表示相应评估等级的区间值。

对于越小越优的指标,则将上述隶属函数中 \max 与 \min 、 $<$ (\leq) 和 $>$ (\geq) 进行两两互换。

3.3.2 建立模糊优先判断矩阵

结合评价模型和表1对评价指标进行相对重要性比较,得到桥梁服役状态评价体系中各层模糊判断矩阵。 $A-P$ 模糊判断矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.8 & 0.9 \\ 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.6 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0.7 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$$

P_1-C 模糊判断矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.8 \\ 0.3 & 0.5 & 0.7 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$$

P_2-C 模糊判断矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.4 & 0.3 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.8 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.8 \\ 0.7 & 0.2 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$$

P_3-C 模糊判断矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.8 & 0.4 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.3 \\ 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.2 \\ 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.5 \end{bmatrix}$$

P_4-C 模糊判断矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.4 & 0.3 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.8 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.8 \\ 0.7 & 0.2 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$$

依据 IFAHP 法计算得到各指标权重,并通过建立的隶属度函数确定评价等级分布(见表4和表5)。然后将隶属度值与指标权重相乘,得到证据理论中基本概率赋值函数(见表6)。

表4 各指标权重值计算结果

准则层	权重	指标层	权重
P_1	0.403	C_{11}	0.444
		C_{12}	0.210
		C_{13}	0.346
		C_{21}	0.219
P_2	0.248	C_{22}	0.276
		C_{23}	0.310
		C_{24}	0.195
		C_{31}	0.633
P_3	0.196	C_{32}	0.367
		C_{41}	0.219
P_4	0.153	C_{42}	0.276
		C_{43}	0.310
		C_{44}	0.195

表5 评价指标隶属度分布

评价 指标	各等级的隶属度				
	I	II	III	IV	V
C_{11}	0.0	0.850	0.150	0.000	0
C_{12}	0.0	0.333	0.667	0.000	0
C_{13}	0.0	0.717	0.283	0.000	0
C_{21}	0.0	0.600	0.400	0.000	0
C_{22}	0.0	0.564	0.436	0.000	0
C_{23}	0.0	0.850	0.150	0.000	0
C_{24}	0.2	0.800	0.000	0.000	0

续表 5

评价 指标	各等级的隶属度				
	I	II	III	IV	V
C_{31}	0.0	0.436	0.564	0.000	0
C_{32}	1.0	0.000	0.000	0.000	0
C_{41}	0.0	0.000	0.501	0.499	0
C_{42}	0.0	0.000	0.920	0.080	0
C_{43}	0.0	0.444	0.556	0.000	0
C_{44}	1.0	0.000	0.000	0.000	0

表 6 基本概率赋值函数

证据	$m(\Theta)$	$m(A)$				
		I	II	III	IV	V
P_1	0.815	0.000	0.129	0.056	0.000	0
P_2	0.000	0.039	0.706	0.255	0.000	0
P_3	0.000	0.367	0.276	0.357	0.000	0
P_4	0.000	0.195	0.138	0.536	0.131	0

3.3.3 结果分析

基于同样的基本概率赋值函数,将改进证据理论所得计算结果与模糊综合评判法和未改进的证据理论的结果进行比较,结果见表 7。

依照最大隶属度评价准则,模糊综合评判法和未改进的证据理论所得评估结果均指向 II 类桥,而改进 D-S 证据理论的评价结果指向 III 类桥,为较差的服役状态,需进行加固。

表 7 改进证据理论与其他评价方法计算结果比较

评价 方法	$m(\Theta)$	评价结果				
		I	II	III	IV	V
改进证据理论	0	0.032	0.362	0.606	0.000	0
模糊综合评判法	0	0.112	0.530	0.338	0.020	0
未改进的证据理论	0	0.000	0.557	0.443	0.000	0

4 结语

采用改进 D-S 证据理论能充分考虑证据间的冲突特性,对高冲突证据进行修正,相较于 D-S 证据理论,能更有效减少异常证据对评价结果的影响,

提升评价结果的可信性。该改进算法能对大跨预应力砼桥梁的服役状态评估提供较合理的解决方法,在桥梁检测评定中有着较广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁技术状况评定标准:JTG/T H21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 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.
- [3] 刘芳平,周建庭.基于模糊可拓层次分析法的大跨径桥梁综合评估[J].中外公路,2015,35(3):93—98.
- [4] 熊仲明,冯成帅.大跨钢结构安全性模糊综合评估方法的应用研究[J].工程力学,2011,28(4):128—133.
- [5] 李永,胡向红,乔箭.改进的模糊层次分析法[J].西北大学学报(自然科学版),2005,35(1):11—12.
- [6] 田林钢,靳聪聪,巴超.改进的模糊层次分析法在海堤工程安全评价中的应用[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(3):317—320.
- [7] 刘从法,罗日成,雷春燕,等.基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估[J].电力自动化设备,2013,33(6):104—107+133.
- [8] 陈果,陈立波,宋兰琪.一种磨损故障融合诊断新方法及其应用[J].机械科学与技术,2009,28(9):1157—1161.
- [9] 李新德,王丰羽.一种基于 ISODATA 聚类和改进相似度的证据推理方法[J].自动化学报,2015,41(3):575—590.
- [10] 陕西省公路局.公路桥涵养护规范:JTG H11—2004[S].北京:中华人民共和国交通部,2004.
- [11] SASMAL Saptarshi, RAMANJANEYULU K. Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(3): 1430—1443.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程结构可靠性设计统一标准:GB 50153—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

收稿日期:2019—12—12

(上接第 134 页)

析[J].中外公路,2012,32(3):192—195.

- [9] 赵晓春,李玉华.预应力混凝土简支梁施工侧弯理论分析[J].公路交通技术,2008(5):54—56+65.

- [10] 吴银利,李强.预应力混凝土梁侧弯的控制措施[J].铁道标准设计,2005(2):60—61.

收稿日期:2020—03—03