

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.01.019

基于变权重和 D-S 证据理论的桥梁安全评估

梁 力, 孙 爽, 李 明, 李 鑫
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 桥梁结构的安全评估受环境侵蚀、材料老化、外部荷载等多源因素的影响,采用单一指标评价桥梁的安全性容易产生误判. 因此,提出一种基于信息融合的多因素桥梁安全评估方法. 该方法首先确定每种因素的变化区间,通过多工况数值计算提取典型的力学指标,利用信息熵和模糊层次分析法确定指标的变权重及单指标的等级划分原则并转化为基本概率指派函数. 采用 Dempster 组合规则确定融合后的安全等级,从而建立桥梁的安全评估先验数据库. 将该方法应用于预应力连续梁桥的安全评估中,结果表明该评估方法客观、合理,具有一定的工程实用性.

关 键 词: 桥梁工程;安全评估;D-S 证据理论;多源影响因素;变权重
中图分类号: U 447; TB 115 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)01-0099-05

Safety Assessment of Bridges Based on Variable Weight and D-S Evidence Theory

LIANG Li, SUN Shuang, LI Ming, LI Xin
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SUN Shuang, E-mail: sophia-sunshuang@163.com)

Abstract: The safety assessment of bridge structures can be affected by multi-source factors such as environmental erosion, material aging and external loads. Using single index to evaluate the safety of bridges is prone to misjudgment. Therefore, a multi-factor bridge safety assessment method based on information fusion was proposed. In this method, the variation region of each influence factor was first determined; then the mechanical indexes were extracted through numerical analysis under various load cases; and then the information entropy and fuzzy analytical hierarchy process were utilized to determine the variable weights of index and the grade criterion of single index so as to acquire the basic probability assignment function. The Dempster combination rules was used to determine the fusion safety level and establish the prior database of bridge safety assessment. The proposed method was applied to the safety assessment of a pre-stressed concrete continuous bridge, and the results showed that the proposed method is objective, reasonable and applicable to engineering practice.

Key words: bridge engineering; safety assessment; D-S evidence theory; multi-source influence factors; variable weight

随着桥梁服役时间的增加,受环境侵蚀、材料老化、外部荷载的长期作用及偶然状况等因素的影响,桥梁的承载能力、使用性能、耐久性等出现不同程度的降低. 因此,对桥梁安全状况进行评估并做出正确的决策对保证桥梁的正常运营起着至关重要的作用.

传统的桥梁安全评估主要依靠常规检测和表

观损伤调查,由专家参与打分对桥梁的安全状态进行评估,其缺点是时效性差,主观性强^[1]. 近年来,国内外重要的大跨度桥梁大多安装了桥梁健康监测系统^[2-4],但现场采集到的数据是单一的,缺少多源数据的融合分析,大部分监测系统注重硬件建设而缺少合理的安全评估系统的研究.

桥梁安全评估是一个复杂的系统,涉及诸多

不确定性因素,为建立一个合理的数学评估模型增加了难度.本文对影响桥梁安全的各因素的力学模型进行了研究,运用信息熵、模糊层次分析和 D-S 证据理论相结合的方法,以某座大跨连续梁桥为工程背景建立了安全评估先验数据库.

1 桥梁的多源影响因素

1.1 混凝土碳化

混凝土碳化是钢筋锈蚀的前提条件.牛荻涛^[5]提出了混凝土碳化系数计算公式:

$$k = K_{mc} k_j k_{co_2} k_p k_s K_e K_f. \quad (1)$$

式中: K_{mc} 为计算模式不定性随机变量,均值 $\mu_{K_{mc}} = 0.996$,标准差 $\sigma_{K_{mc}} = 0.355$; k_j 为角部修正系数,角部混凝土 $k_j = 1.4$,非角部 $k_j = 1.0$; k_{co_2} 为环境 CO_2 影响系数(%); k_p 为浇筑面修正系数,取 1.2; k_s 为工作应力影响系数,混凝土受压时,取 1.0,受拉时取 1.1; K_e 为环境因子随机变量; K_f 为混凝土质量影响系数.

1.2 预应力钢筋锈蚀

混凝土在完全碳化前存在碳化不完全区段,其碳化残量的计算式为^[5]

$$x_0 = 4.86(-RH^2 + 1.5RH - 0.45)(c - 5) \times (\ln f_{cu,k} - 2.30). \quad (2)$$

钢筋开始锈蚀时间为

$$t_0 = ((c - x_0)/k)^2. \quad (3)$$

式中: RH 为环境年平均相对湿度,%; $f_{cu,k}$ 为混凝土抗压强度标准值,MPa; c 为混凝土保护层厚度,mm,当 $c > 50$ mm 时,取 $c = 50$ mm; k 为碳化系数.

一根预应力丝在均匀腐蚀下,在时刻 t 的半径减少量为

$$\Delta r(t) = 0.116 i_{corr}(t - t_0). \quad (4)$$

式中: t_0 为钢筋开始锈蚀时间; i_{corr} 为碳化腐蚀电流密度,均值为 $0.25 \mu A/cm^2$.

腐蚀钢绞线极限强度与锈蚀率的关系为^[6]

$$f_{ptk,\eta}/f_{ptk} = 1 - 8.422\eta^{1.351}, 0 < \eta < 10.4\%. \quad (5)$$

弹性模量与锈蚀率之间的关系为

$$E_{s,\eta}/E_s = 1 - 40.4633\eta^{2.366}, 0 < \eta < 10.4\%. \quad (6)$$

式中: $f_{ptk,\eta}$, f_{ptk} 分别为钢筋锈蚀前后的极限强度; $E_{s,\eta}$, E_s 分别为钢筋锈蚀前后的弹性模量; η 为锈蚀率.

1.3 车辆荷载与温度作用

目前许多承担重载任务的桥梁超载问题较为

严重.现行桥梁规范^[7]将汽车荷载分为密集运行和一般运行两种状态.密集运行状态即公路 - I 级荷载,一般运行状态即公路 - II 级荷载.

服役期内大型桥梁结构在温度荷载作用下极易引起强烈的非线性时变温差效应^[8],导致结构出现比较严重的温致应力集中和温致变形,从而进一步出现性能退化甚至温致损伤,难以满足桥梁长期服役条件下的安全性、适用性和耐久性的要求.

2 基本理论

2.1 熵权法

设有 m 个评价对象, n 个评价指标组成一多维数据集 $A = (a_{ij})_{m \times n}$, 则第 j 个属性的信息熵为^[9]

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}. \quad (7)$$

式中: $f_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij}$; $k = 1/\ln m$, 当 $f_{ij} = 0$ 时,令 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$.

数据集 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 的第 j 个属性的指标权重为

$$w_1(j) = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}. \quad (8)$$

式中, $0 \leq w_1(j) \leq 1$, $\sum_{j=1}^m w_1(j) = 1$.

2.2 模糊层次分析法

模糊层次分析法计算权重的核心是建立模糊一致判断矩阵^[10].

设矩阵 $R = (r_{xy})_{k \times k}$, 满足 $\forall x, y, z$ 使

$$0 \leq r_{xy} \leq 1 \text{ 且 } r_{xy} = r_{xz} - r_{yz} + 0.5, \quad (9)$$

则称 R 是模糊一致矩阵. 式中, r_{xy} 表示元素 x 相对于元素 y 的重要度大小, 当采用 0.1 ~ 0.9 九标度法时, $r_{xy} = 0.5 + 0.1(y - x)$, $r_{xx} = 0.5$.

按行求和归一法计算等级权重:

$$w_x = \sum_{y=1}^k r_{xy} / \sum_{x=1}^k \sum_{y=1}^k r_{xy} = \frac{2}{k^2} \sum_{y=1}^k r_{xy}. \quad (10)$$

式中: $0 \leq w_x \leq 1$, $\sum_{x=1}^p w_x = 1$.

2.3 D-S 证据理论

在辨识框架 U 上, 性质不同的 2 个证据, 其焦元分别为 B 和 C , 其基本概率指派函数(BPA)分别为 m_1 和 m_2 , 按照 Dempster 组合规则将这 2 个 BPA 进行融合, 该规则定义为^[11-12]

$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C)}{1 - k}; & A \neq \emptyset; \\ 0, & A = \emptyset. \end{cases} \quad (11)$$

式中, $k = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) m_2(C)$ 为证据之间的冲突系数.

3 桥梁安全评估先验数据库

3.1 基本步骤

本文以某座大跨预应力连续梁桥为工程背景进行研究,其安全评估系统的基本步骤如下.

1) 根据桥梁结构型式及桥址处的环境季节特点确定所有影响桥梁安全的因素,建立各因素的力学退化模型,确定其变化区间.

2) 将各因素的影响规律施加到数值模型中,计算桥梁在多源因素组合下的多工况力学响应,结合规范规定的阈值确定单指标的安全等级划分标准.

3) 利用信息熵和模糊层次分析法计算不同工况下各指标的变权重,加权生成基本概率指派函数,利用 Dempster 组合规则确定融合后的安全等级.

桥梁安全评估先验数据库的具体流程见图 1.

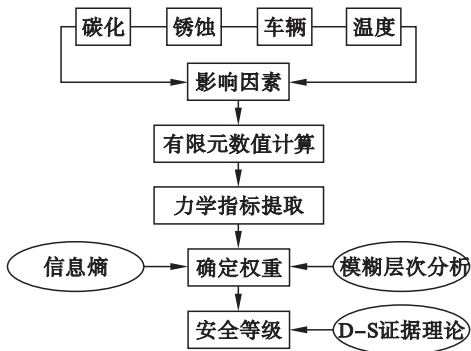


图 1 桥梁安全评估流程图

Fig. 1 Flow chart of bridge safety assessment

3.2 多源影响因素选取

工程背景桥的跨径布置为 52 m + 80 m + 52 m,桥梁分为两幅,单幅桥宽为 12 m,单向 3 车道,为预应力混凝土连续梁桥结构.

根据国家气象局的统计资料^[13],该地平均气温为 8.1 ℃,相对湿度为 68%,最高温度为 38.3 ℃,最低温度为 -30.6 ℃.由式(1)~式(6)计算得到钢筋最早锈蚀时间为服役期第 45 年,此

后,钢筋极限强度和弹性模量开始降低.将钢绞线的腐蚀率限制在 10% 以内,共取 5 个变化区间,分别为 0, 2.5%, 5%, 7.5% 和 10%.假定混凝土强度的最大降低程度为 20%,5 个变化区间分别为 0, 5%, 10%, 15% 和 20%.车辆荷载的范围最低取一般运行状态,即 0.75 倍设计荷载,最高取 2 倍超载,共划分为 4 个区间:75%, 100%, 150% 和 200%.温度荷载取当地最高、最低温度与合拢温度之差,分别为 24 ℃ 和 -38 ℃.

3.3 多工况数值计算与安全等级划分

3.3.1 有限元数值计算

利用 ANSYS 建立全桥有限元模型,单元类型为 BEAM188.预应力的施加采用直接内载法^[14].桥梁有限元模型如图 2 所示.

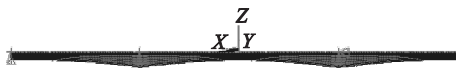


图 2 桥梁有限元模型

Fig. 2 Finite element model of bridge

将以上各影响因素的变化区间施加到数值模型中,共产生 $5 \times 5 \times 4 \times 2 = 200$ 组工况.选取边跨中、中跨跨中、中支点为典型断面,提取每组工况下每个断面的拉应力、压应力、弯矩值及跨中断面的挠度值,共计 11 个指标: A_1 为边跨拉应力 (MPa), A_2 为边跨压应力 (MPa), A_3 为边跨挠度 (cm), A_4 为边跨弯矩值 (kN·m), A_5 为中跨拉应力 (MPa), A_6 为中跨压应力 (MPa), A_7 为中跨挠度 (cm), A_8 为边跨弯矩值 (kN·m), A_9 为中支点拉应力 (MPa), A_{10} 为中支点压应力 (MPa), A_{11} 为中支点弯矩值 (kN·m).因此可以得到本桥梁安全评估的样本数据集为 $A_{m \times n}$, $m = 200$, $n = 11$.

3.3.2 阈值确定及安全等级划分

桥梁的安全等级由低到高划分为 5 个级别,分别为一级、二级、三级、四级和五级.从多工况数值计算中得到每个指标的最小值 min,根据桥梁设计规范确定拉应力、压应力、挠度和承载力的阈值 max,计算每组工况下的阈值与最小值的差 Δ ,以此作为等级划分的标准,如图 3 所示.

危				
一级	二级	三级	四级	五级
min	min+0.25Δ	min+0.5Δ	min+0.75Δ	max

图 3 等级划分标准

Fig. 3 Grade criterion of each index

3.4 权重的确定

本文将权重分解为指标权重与等级权重,从而建立基于变权重的安全评估系统.根据多工况

数值计算得到的各力学指标结果,采用式(7)和式(8)熵权法确定指标权重 $w_1(j)$,结果见表 1. 其中各工况边跨挠度的计算结果均为一级,对评估结果不产生影响,因此 A_3 的权重为 0.

表 1 各力学指标权重 Table 1 Weight of each mechanical index			
指标	权重	指标名称	权重
A_1	0.138 1	A_7	0.046 9
A_2	0.091 1	A_8	0.098 1
A_3	0	A_9	0.099 4
A_4	0.249 5	A_{10}	0.055
A_5	0.037 3	A_{11}	0.113 9
A_6	0.070 6		

表 2 各评价指标的变权重 Table 2 Variable weight of each evaluation index											
工况	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}
1	0.124 7	0.082 3	0	0.225 3	0.033 7	0.127 5	0.042 3	0.088 6	0.089 8	0.082 8	0.102 9
51	0.119 5	0.078 8	0	0.215 9	0.056 5	0.106 9	0.030 4	0.148 6	0.086 1	0.083 3	0.073 9
61	0.133 2	0.070 3	0	0.240 7	0.050 4	0.081 7	0.027 1	0.132 5	0.134 3	0.063 7	0.065 9
191	0.144 6	0.063 6	0	0.206 1	0.045 6	0.073 9	0.032 7	0.119 8	0.121 5	0.057 6	0.079 5
200	0.149 4	0.056 3	0	0.269 8	0.040 3	0.076 4	0.029 0	0.106 1	0.107 6	0.059 5	0.105 6

3.5 应用 D-S 证据理论进行桥梁安全评估

3.5.1 生成基本概率指派函数

选取 5 个元素构成的基本概率指派函数焦元来表示桥梁的 5 个安全等级:一级 $m(a)$,二级 $m(b)$,三级 $m(c)$,四级 $m(d)$,五级 $m(e)$. 由此可以得到每组工况下每个指标所对应的基本概率指派函数焦元. 将各指标的焦元分别乘以对应的变权重,相同焦元相加即生成基本概率指派函数,见表 3.

表 3 加权合成的基本概率指派函数 Table 3 Weighted composite basic probability assignment function					
工况	$m(a)$	$m(b)$	$m(c)$	$m(d)$	$m(e)$
1	0.789 6	0	0.828	0.127 5	0
51	0.104 4	0.500 3	0	0	0.395 3
61	0.093 1	0.070 3	0.373 9	0.145 5	0.317 2
191	0	0.175 8	0	0.537 3	0.286 9
200	0	0.085 3	0	0.105 6	0.809 1

3.5.2 D-S 证据理论融合

该桥梁安全评估系统包含 200 个工况,11 个评价指标,各评价指标的权重根据式(13)计算,采用 Dempster 组合规则对表 3 中的基本概率指派函数加权融合生成最终的决策评价. 当系统有 n 个指标时,需要将基本概率指派函数融合 $n-1$

等级权重是考虑指标对应的不同安全等级对评估结果的影响. 等级越大对应的安全程度越低,对桥梁安全评估结果的影响越大,等级权重越高. 根据式(9)和式(10)计算得到一级~五级的等级权重 w_x 分别为 0.12,0.16,0.2,0.24,0.28.

综合指标权重 $w_1(j)$ 和等级权重 w_x ,根据最小相对熵理论得到每个评价指标在每组工况下的变权重 $w(j)^{[15]}$:

$$w(j) = \frac{[w_1(j)w_x]^{0.5}}{\sum_{j=1}^n [w_1(j)w_x]^{0.5}}.$$

(12)

部分工况下变权重的计算结果见表 2.

次^[16],本桥 11 个评价指标共计融合 10 次.

3.5.3 桥梁安全评估数据库的建立

桥梁最终的安全等级对应的是基本概率指派函数中占明显优势的焦元. 根据证据理论融合后的结果并结合 3.5.1 节中规定的安全等级与基本概率指派函数焦元的对应关系,即可对桥梁安全作出决策,从而建立桥梁安全评估的先验数据库,结果见表 4.

表 4 桥梁安全评估先验数据库 Table 4 Prior database of bridge safety assessment			
工况	主焦元	数值	安全等级
1	$m(a)$	1.000 0	一级
51	$m(b)$	1.000 0	二级
61	$m(c)$	0.859 3	三级
191	$m(d)$	0.999 0	四级
200	$m(e)$	1.000 0	五级

4 结 论

- 1) 本文所提出的桥梁安全评估方法考虑了多源影响因素的融合,从环境侵蚀、材料老化、外部荷载三方面入手建立了各因素的力学模型,体现了工程的时变性、季节性和区域性.
- 2) 本文在确定各力学指标的权重时,引入变

权重的方法,将权重分解为指标权重和等级权重,利用最小相对熵原理组合为变权重,既考虑各指标重要性的不同,又兼顾安全等级的影响,评估结果更加真实可信.

3) 根据桥梁设计规范的限值确定各力学指标的阈值,以此作为单指标安全等级的划分原则.应用 D-S 证据理论对各指标的基本概率指派函数进行融合,最终概率指派函数最大的焦元所对应的安全等级即为桥梁的安全评估结果.

4) 本文利用变权重及 D-S 证据理论建立桥梁的安全评估先验数据库,进一步结合现场传感器的监测数据与人工检测结果即可实现对桥梁服役状况的实时评估.

参考文献：

[1] Stanislav R,David C,Jiri K,et al. Inspection of quality of concrete of load-bearing structure, bridge no. 121 -007 across Vltava River at Zvikov [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 156:466 - 472.

[2] Lin T K, Chang Y S. Development of a real-time scour monitoring system for bridge safety evaluation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 82 (1) : 503 -518.

[3] Suang Y C,Lin T K, Chiu Y T, et al. A bridge safety monitoring system for prestressed composite box-girder bridges with corrugated steel webs based on in-situ loading experiments and a long-term monitoring database [J]. *Engineering Structures*,2016,126(11) :571 -585.

[4] Navik P,Ronnquist A,Stichel S. A wireless railway catenary structural monitoring system; full-scale case study [J]. *Case Studies in Structural Engineering*,2016,6:22 -30.

[5] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测 [M]. 北京: 科学出版社,2003:25 -28.

(Niu Di-tao. Durability and life forecast of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003: 25 -28.)

[6] 罗小勇,李政. 无粘结预应力钢绞线锈蚀后力学性能研究 [J]. 铁道学报,2008,30(2) :108 -112.

(Luo Xiao-yong, Li Zheng. Mechanical performance of corroded unbonded prestressed steel stranded wires [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2008, 30 (2) :

108 -112.)

[7] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范 (JTG D60—2015) [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部,2015.

(Ministry of Transport of the People's Republic of China. General specifications for design of highway bridges and culverts (JTG D60—2015) [S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China,2015.)

[8] Kim S H,Park S J, Wu J X, et al. Temperature variation in steel box girder of cable-stayed bridges during construction [J]. *Journal of Construction Steel Research*, 2015, 112: 80 -92.

[9] Mei Y, Ye J W, Zeng Z G. Entropy-weighted ANP fuzzy comprehensive evaluation of interim product production schemes in one-of-a-kind production [J]. *Computers and Industrial Engineering*,2016,100:144 -152.

[10] Pan N F. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method [J]. *Automation in Construction*, 2008,17:958 -965.

[11] Neshat A, Pradhan B. Risk assessment of groundwater pollution with a new methodological framework: application of Dempster-Shafer theory and GIS [J]. *Natural Hazards*, 2015,78:1565 -1585.

[12] Certa A, Hopps F, Inghilleri R, et al. A Dempster-Shafer theory-based approach to the failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: application to the propulsion system of a fishing vessel [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2017, 159: 69 -79.

[13] 国家气象信息中心. 辽宁省本溪市天气预报 [EB/OL]. [2017 -01 -15]. <http://data.cma.cn/site/index.html>.

(National Meteorological Information Center. Meteorological data resources of Benxi city Liaoning Province [EB/OL]. [2017 -01 -15]. <http://data.cma.cn/site/index.html>.)

[14] 张道明,梁力,尹新生,等. 预应力内荷载的新计算方法——直接内载法 [J]. 工程力学,2007,24(3) :104 -109.

(Zhang Dao-ming, Liang Li, Yin Xin-sheng, et al. New approach to calculate prestressed internal load—direct internal load method [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24 (3) :104 -109.)

[15] Wang H. Minimum entropy control of non-Gaussian dynamic stochastic systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*,2002,47(2) :398 -403.

[16] Deng Y,Su X Y,Jiang W. A fuzzy Dempster Shafer method and its application in plant location selection [J]. *Advanced Materials Research*,2010,102/103/104:831 -835.