

基于最优权重和模糊理论的钢拱桥安全评估方法

杨钧羽¹, 李明¹, 孙爽², 位东升³

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 浙江理工大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310018;

3. 武汉桥梁科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

摘 要: 在役桥梁的安全状态受多种因素影响且评价指标繁多, 为有效评价其安全状态, 基于最优权重和模糊理论, 提出了一种考虑多因素影响的桥梁安全评估方法. 该方法通过数值分析得到桥梁在多种预设工况下对应监测点的力学响应, 依据数值计算结果和现行规范确定桥梁的安全等级划分标准; 引入隶属度函数, 建立各指标的模糊评价向量; 分别采用模糊层次分析法和熵权法确定各指标的主观权重和客观权重, 并通过偏好系数进行组合赋权得到最优权重; 采用模糊综合评价方法依据最大隶属度原则确定桥梁的安全等级. 以某钢拱桥为例, 计算了24种预设工况下的安全等级; 同时依据该桥一周内的实时监测数据, 得到该时段内桥梁的动态安全等级. 结果表明: 该评估方法能够充分考虑多种主客观因素的影响并依据实时监测数据动态评价桥梁的安全状态.

关键词: 桥梁工程; 安全评估; 模糊综合评价; 多源影响因素; 最优权重

中图分类号: U 447 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)01-0134-11

Safety Assessment Method for Steel Arch Bridge Based on Optimal Weights and Fuzzy Theory

YANG Jun-yu¹, LI Ming¹, SUN Shuang², WEI Dong-sheng³

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Architectural and Civil Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. Whhan Bridge Science Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430034, China. Corresponding author: LI Ming, E-mail: liming@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The safety status of in-service bridges is affected by many factors and there are many evaluation indices. In order to effectively evaluate their safety status, considering the influence of multi-source factors, a bridge safety assessment method based on the optimal weights and fuzzy theory was proposed. This method obtained the mechanical response of the corresponding monitoring points of the bridge under various preset cases through numerical analysis, and the safety level division standard of the bridge was determined according to the numerical calculation results and the current specifications. The membership function was introduced to establish the fuzzy evaluation vector of each index. Fuzzy analytic hierarchy process and entropy weight method were used to determine the subjective weight and objective weight for each index, and the optimal weight was obtained by combining preference coefficients. The safety level of bridge was determined by fuzzy comprehensive evaluation method according to the principle of maximum membership degree. Taking a steel arch bridge as an example, the safety levels under 24 preset cases were calculated. At the same time, according to the real-time monitoring data of the bridge in one week, the dynamic safety levels of the bridge in this period were obtained. The results show that the assessment method can fully consider the influences of various subjective and objective factors and dynamically evaluate the safety status of bridge according to real-time

收稿日期: 2023-08-11

基金项目: 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(BHSL20-03-GF); 浙江省教育厅科研项目(Y202250564); 浙江理工大学基本科研业务费专项资金资助项目(22052306-Y); 浙江理工大学科研启动基金资助项目(19052147-Y).

作者简介: 杨钧羽(1999—), 男, 贵州天柱人, 东北大学硕士研究生; 李明(1980—), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学副教授, 硕士生导师.

monitoring data.

Key words: bridge engineering; safety assessment; fuzzy comprehensive evaluation; multi-source influence factors; optimal weights

桥梁数量的快速增长和老龄化日益严重等因素引起的安全运营问题受到社会和工程界广泛关注^[1].在长期服役过程中,外部荷载、气候变化、地震和车辆超载等作用下,桥梁构件可能会出现老化、疲劳和腐蚀等问题,从而影响桥梁的安全性,因此对其安全状况进行评估十分必要^[2].

桥梁安全状况的评价指标主要来源于病害、挠度和应力等.该类数据可以通过人工检测和结构健康监测获得.人工检测方法直观可靠,但是费时费力,难以实现桥梁的动态监测^[3];而结构健康监测技术可以通过传感器实时获取桥梁的响应信息,实现动态监控,但大规模的监测数据会导致数据处理和解释困难^[3].长期监测过程中产生的海量数据有效发挥其作用是桥梁安全评估的一个方向.近年来,国内外学者依托在环境载荷作用下的监测数据开展了结构性能评估的研究. Manzini 等^[4]提出了基于 GNSS (global navigation satellite system) 监测响应时间序列的桥梁损伤异常检测指标,利用传感器响应与环境效应之间的关系,根据实际观测值和预测值之间的差异来检测结构异常. Zhu 等^[5]考虑钢桁架桥的空间温度分布,利用温度增量与其引起的结构响应增量之间的关系,进行桥梁结构健康状况的评估.

桥梁的安全评估受到多种因素的综合影响,如风荷载、温度作用、车辆荷载、地震荷载等,因此可以采用模糊数学的方法解决多指标的安全评估问题^[6]. Peng 等^[7]基于模糊层次分析法和线性规划技术的多维偏好分析决策算法,建立可持续性标准退化桥梁的养护策略系统优化框架和决策方法. Yang 等^[8]将改进的区间证据理论与模糊层次分析法相结合,提出一种考虑实测数据不确定性和冲突影响的桥梁综合状态评估方法,用于大跨度预应力混凝土连续箱梁桥的状态评估. Andric 等^[9]利用模糊层次分析法、模糊知识表示和模糊逻辑技术建立了桥梁风险评估框架并应用于工程实践. Moufti 等^[10]基于模糊层次证据推理方法提出了含有初始缺陷混凝土桥梁的安全评估模型.

本文提出一种基于最优权重和模糊理论的钢拱桥安全评估方法.根据桥梁设计规范和多源

因素作用下的数值计算结果划分桥梁的指标阈值,建立模糊评价向量;采用模糊层次分析法^[11]和熵权法^[12]分别确定主观权重和客观权重,通过组合赋权得到最优权重,应用模糊综合评价方法确定桥梁的安全等级.以某钢桁架拱桥为例,建立该桥的安全等级评估模型,探讨主客观权重偏好系数对评估结果的影响,并进行基于实际监测数据的动态评估.

1 多源影响因素分析

钢桁架拱桥主桥采用中承式钢桁拱结构,如图 1 所示.桥梁上层主干道为双向 8 车道,下层两侧为 BRT (bus rapid transit) 车道;桥梁跨径布置为: 96+164+436+164+96+60 m,全长 1 016 m,主桥桥面宽为 43.2 m.本文重点分析影响桥梁安全状态的车辆荷载、风荷载和温度等因素.

1.1 车辆荷载

车辆荷载是大桥运营期的主要活荷载,其对桥梁的承载能力、刚度和稳定性都有重要影响,随着交通货运量的快速增长,超载现象十分普遍,时而有桥梁被重车压垮的事故发生,因此车辆荷载是桥梁运营过程中必须考虑的影响因素.

已有的数值计算方法中汽车荷载的施加方式有:①车道荷载加载,车道荷载的均布荷载标准值满布于使结构产生最不利效应的同号影响线上,集中荷载标准值作用于相应影响线中一个影响线峰值处;②车辆荷载加载,通过建立相关车辆模型进行加载等^[13].本文采用 ANSYS 中移动荷载的施加方式来模拟车辆对桥梁的作用力,可以得到车辆荷载作用下的内力最大值和最小值,等效于影响线上的车道荷载施加方式.车辆荷载根据现行桥梁规范^[14]进行计算,如图 2 所示.

车辆荷载的重力标准值为 550 kN,轴距为 12.8 m,设计车速为 60 km/h.由于按照图 2 的车辆模型进行加载,该桥在满布状态下,最多容纳 542 辆车,因此在本文的数值计算中,采用等效车辆数来考虑普通车辆荷载以及超载情况对桥梁受力状态的影响,结合温度及风速变化,共计 24 种工况组合,见表 1.

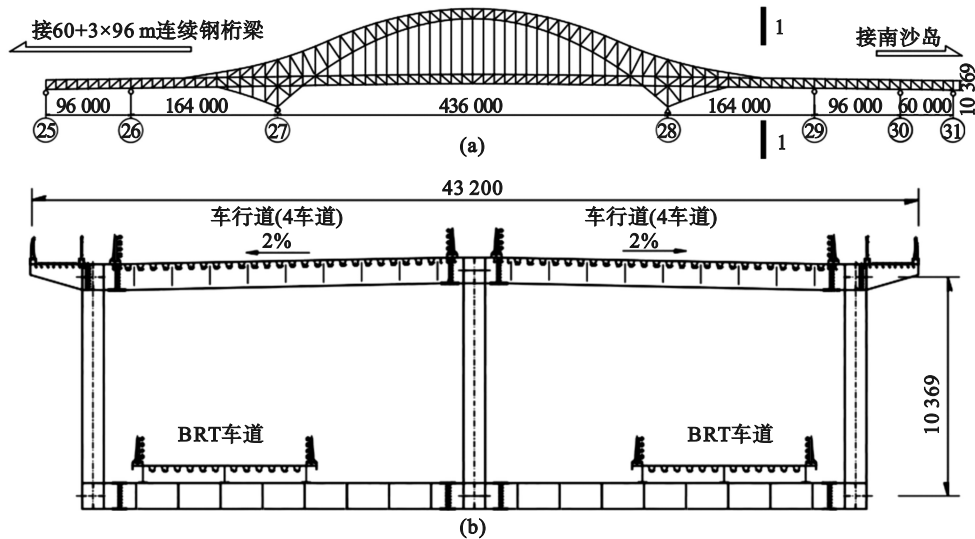


图 1 某钢桁架拱桥(单位:mm)

Fig. 1 A steel truss arch bridge (unit:mm)

(a)—桥梁立面图;(b)—1-1横断面图.

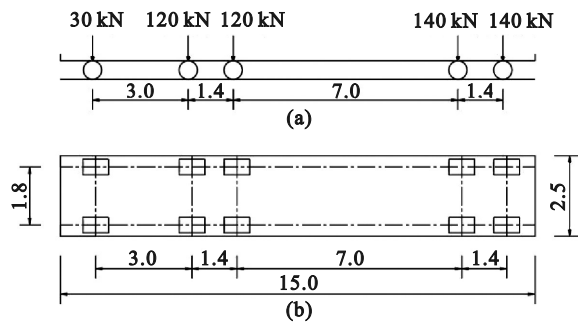


图 2 车辆荷载布置(单位:m)

Fig. 2 Vehicle load arrangement (unit:m)

(a)—荷载立面;(b)—荷载平面.

为了简化计算模型,将车辆通过桥梁的过程

简化为车辆荷载对行驶区域对应节点的作用力.在计算中,采用等效荷载的方式,即当等效车辆数为 n 时,认为车辆荷载均匀分布在作用范围内的所有节点上,有限元模型中节点 t 的等效受力采用式(1)计算.

$$F_{t,n} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k g}{N} \quad (1)$$

式中: $F_{t,n}$ 为等效车辆数为 n 时,节点 t 的等效受力; N 为车辆荷载覆盖范围内的节点总数.当 n 取值 1 180, 1 415 和 2 000 时,分别对应 2.2, 2.6 和 3.7 倍的超载情况.

表 1 工况组合

Table 1 Combination of case conditions

影响因素	工况																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
等效车辆数	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8	48	100	140	1 180	1 415	2 000
风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0	0	37.6	37.6	0	37.6	0	37.6	0	37.6	0	37.6	0	37.6	0	37.6	0	37.6	37.6	0	0	0	0	0
整体升降温/ $^{\circ}\text{C}$	0	20	0	20	-20	-20	0	0	20	20	-20	-20	0	0	20	20	-20	-20	0	0	0	0	0	0

1.2 风荷载

风荷载包括顺风荷载、横风荷载和侧风荷载.在本文计算中仅考虑横风荷载的影响.桥梁位置临海,为强台风区域,设计风速按百年一遇控制设计,即 37.6 m/s.计算中考虑有风和无风两种情况.

横风荷载 F_H 通过式(2)计算加在拱桥横桥方向的杆件上.

$$F_H = \frac{1}{2} \rho v_g^2 C_H H \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度, $\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$; C_H 为主梁的阻力系数, $C_H=1$; H 为主梁特征高度; v_g 为等效静阵风风速, $v_g = G_v v_z$, G_v 为静阵风系数, $G_v=1.21$, v_z 是设计基准风速,桥梁位置临海,地表类别为 A 类,桥梁各构件在基准高度 Z 相对应的设计基准风速 $v_z = (Z/10)^{0.12} v_{10}$, Z 是基准高度,根据相关规范进行确定^[15],主梁高度取主跨桥面距水面的平均高度, $Z_{\text{主}}=40 \text{ m}$;吊杆取吊杆中点距水面的高度, $Z_{\text{吊}}=60 \text{ m}$;拱肋为拱顶距水面的高度, $Z_{\text{拱}}=110 \text{ m}$; v_{10} 是设计风速, $v_{10}=37.6 \text{ m/s}$.

1.3 温度作用

温度是导致应力变化的重要影响因素,在钢桁架拱桥中钢材的强度和刚度受温度影响.当温度升高时,钢材的强度和刚度均会下降.该桥所处位置属于亚热带季风海洋气候,年平均气温 21.9 °C,极端最高气温 38.7 °C,极端最低气温 0 °C.因此在数值计算中,温度荷载工况按照整体升温 20 °C、降温 20 °C 以及无温度变化 3 种情况考虑.当存在温度变化时,材料应力采用式(3)计算.

$$\sigma = a\Delta TD. \quad (3)$$

式中: σ 表示材料的应力; a 表示热胀系数,在本文的计算中取值为 $a=1.2 \times 10^{-5}$; ΔT 为温度变化; D 是材料的刚度矩阵.

2 评估方法

采用模糊综合评价法建立钢桁架拱桥的安全评估模型,模糊综合评价法^[16-18]是一种基于模糊数学的综合评价方法,应用模糊关系综合原理,量化一些边界不清、难以量化的因素,将定性评价转化为定量评价,对受到多因素影响的事物或对象进行综合评价.其评估方法实现框架如图 3 所示:①进行多因素作用下的数值模拟,得到预设指标在不同工况下的力学响应,结合现行规范划分桥梁的安全阈值;②根据安全等级划分规则计算指标模糊评价向量,得到各个指标的安全状态;③通过模糊评价向量构造模糊评价矩阵;④结合主观权重和客观权重计算各指标最优权重;⑤通过权重向量和模糊评价矩阵计算安全等级隶属度,得到桥梁最终的安全等级.

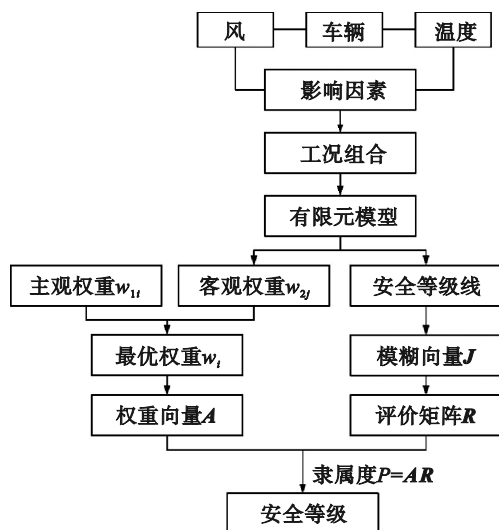


图 3 评估方法实现框架

Fig. 3 Implementation framework of assessment method

2.1 安全等级划分

将桥梁安全等级划分为 I, II, III, IV 和 V 等级,安全等级越高,表明桥梁所处状态越危险,如图 4 所示,图中 $L_I \sim L_V$ 为安全等级线.桥梁安全等级状态见表 2.

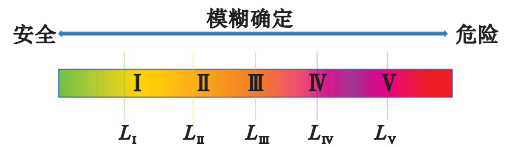


图 4 桥梁安全等级划分

Fig. 4 Classification of bridge safety level

表 2 桥梁安全等级状态

Table 2 Bridge safety level status

安全等级	状态	状况
I	完好	功能完好
II	良好	轻微损伤,对桥梁运营无影响
III	合格	中等损伤,尚能维持正常使用
IV	不合格	较大缺损,不能保证正常使用
V	危险	严重缺损,不能正常使用

将不同工况计算结果的力学指标响应峰值的最小值作为 L_I ,根据桥梁规范确定各指标的最大限值^[14],即 L_V ;其余等级线,按式(4)进行计算.

$$L_i = L_{i-1} + (L_V - L_I)/4. \quad (4)$$

其中: i 取值为 $i=II \sim IV$.

2.2 指标隶属度

当安全等级线确定后,依次建立各指标与安全等级的所属关系.如果采用经典集合表示所属关系,会过于绝对,难以得到合理的评估结果^[19].因此引入模糊数学中的隶属度函数来确定每个指标对应各安全等级的隶属度.在本文的模型中采用柯西分布隶属度形式,安全等级 I 使用偏小型隶属度函数,见式(5);安全等级 II, III, IV 使用中间型隶属度函数,见式(6);安全等级 V 使用偏大型隶属度函数,见式(7)^[20].

$$f(x; x_0, \alpha) = \begin{cases} 1, & x \leq x_0; \\ \frac{1}{1 + \alpha(x - x_0)^2}, & x > x_0; \end{cases} \quad (5)$$

$$f(x; x_0, \alpha) = \frac{1}{1 + \alpha(x - x_0)^2}; \quad (6)$$

$$f(x; x_0, \alpha) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \alpha(x - x_0)^2}, & x \leq x_0; \\ 1, & x > x_0. \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_0 为位置参数,对应于柯西密度函数的峰值处,表示安全等级线; α 为比例参数.

根据数值计算结果,将各工况下的指标数值

代入上述隶属函数,得到各指标所对应的安全等级的隶属度,并用模糊评价向量 J 表示, $J=[j_1, j_2, j_3, j_4, j_5]$, 其中 j_1, j_2, j_3, j_4, j_5 分别对应等级 I, II, III, IV, V 的隶属度。

2.3 指标权重

采用组合赋权方法将主、客观权重进行组合赋权得到最优权重,综合考虑各评价指标对评估结果影响^[21]。该方法既避免了主观权重造成的随意性,也解决了客观权重过于挖掘数据信息的问题,使评价权重更加准确地反映各指标对评估结果的影响。

2.3.1 主观权重的确定

主观赋权采用模糊层次分析法^[20],通过桥梁专家对指标的重要性进行打分建立各指标之间两两比较的模糊互补判断矩阵,用模糊数 0.1~0.9 来描述两指标的相对重要程度,对应的模糊互补判断矩阵 B 可以表示为

$$B = \begin{bmatrix} 0.5 & b_{12} & b_{13} & \cdots & b_{1k} \\ b_{21} & 0.5 & b_{23} & \cdots & b_{2k} \\ b_{31} & b_{32} & 0.5 & \cdots & b_{3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k1} & b_{k2} & b_{k3} & \cdots & 0.5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: b_{ij} 表示指标 i 对指标 j 的重要程度,满足 $0 < b_{ij} \leq 1$, 且 $b_{ij} + b_{ji} = 1$ 。当 $b_{ij} > 0.5$ 时,表示指标 i 比指标 j 重要,且 b_{ij} 越大表示指标 i 比指标 j 重要;当 $b_{ij} = 0.5$ 时表示指标 i 与指标 j 同等重要。根据按行求和归一法得到各指标的主观权重为

$$w_{i1} = \frac{\sum_{k=1}^n b_{ik}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}} = \frac{2}{n^2} \sum_{k=1}^n b_{ik} \quad (9)$$

式中: w_{i1} 为指标 i 的主观权重; n 为评价指标数; $0 \leq w_{i1} \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^n w_{i1} = 1$ 。

2.3.2 客观权重的确定

客观赋权采用衡量决策中数值离散程度的熵权法^[12]计算。数值离散程度越大,表明可以获得的信息越多,相应的指标权重也越大;数据之间的差异越小,反映的信息量越小,相应的指标权重也越小。第 j 个评价指标的信息熵为^[22]

$$H_j = -k \sum_{z=1}^n f_{zj} \ln f_{zj} \quad (10)$$

$$f_{zj} = a_{zj} / \sum_{z=1}^m a_{zj} \quad (11)$$

式中: f_{zj} 为数值计算中第 z 个工况的第 j 个评价指标的数值; $k = 1/\ln m$, m 为数值计算的工况数量; a_{zj} 为数据子集。

第 j 个评价指标的客观权重计算式为

$$w_{2j} = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (12)$$

2.3.3 综合权重

将模糊层次分析法得到的主观权重和熵权法所计算的客观权重根据式(13)进行线性加权耦合并归一化,获得各个指标的最优权重。

$$w_i = \frac{\alpha_s w_{i1} + \alpha_o w_{2j}}{\sum_{i=1}^n (\alpha_s w_{i1} + \alpha_o w_{2j})} \quad (13)$$

式中: w_i 为评价指标 i 的最优权重; α_s, α_o 分别为指标 i 的主、客观权重的偏好系数。

2.4 模糊综合评价

通过力学指标的模糊评价向量 J 构造综合评价矩阵,当含有 n 个评价指标和 h 个安全等级时该矩阵可表示为 $R_{n \times h}$; 以各个指标的权重作为向量 A_n , 通过式(14)^[17]可以得到综合隶属度 P_h ; 依据最大隶属度原则可以确定桥梁安全等级。

$$P_h = A_n^T R_{n \times h} \quad (14)$$

3 钢拱桥安全评估

3.1 有限元数值计算

利用 ANSYS 建立某钢拱桥的有限元模型,如图 5a 所示。模型中考虑了桥面板、主桥桁架及拱肋和吊杆,并分别采用 SHELL 181 单元、BEAM 188 单元和 LINK 10 单元进行有限元网格划分。全桥共包括 10 440 个单元和 13 443 个节点。模型中考虑了 12 种梁单元和杆单元的截面类型,如图 5b~图 5m 所示,其中,弦杆和腹杆截面宽度范围为 998~1 000 mm,高度范围为 600~1 640 mm;平联截面宽度范围为 400~1 200 mm,高度范围为 480~1 700 mm。数值计算中采用弹塑性本构模型模拟钢材,材料参数取值:密度 $\rho = 7 850 \text{ kg/m}^3$;弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$;泊松比 $\mu = 0.3$;热膨胀系数 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$;屈服强度 $R_p = 370 \text{ MPa}$;切线模量 $G = 79.4 \text{ GPa}$ 。

本文采用 ANSYS 和 MIDAS 两种计算软件对该案例桥梁在重力荷载作用下的内力计算结果进行对比,如图 6 所示。跨中竖向挠度最大值分别为 0.27 和 0.24 m;拱肋杆件轴向应力最大值分别为 39 和 34 MPa。由于本模型体系庞大,在 ANSYS 中共划分了 10 440 个单元和 13 443 个节点,在 MIDAS 中共设置了 7 551 个单元和 4 032 个节点,两个软件建模的几何精度、简化程度和细节处理等有所差异,因此计算结果存在一定的

误差.通过对比综合分析,计算结果大致相同,误差在可接受范围,进一步说明了本模型计算的准确性.

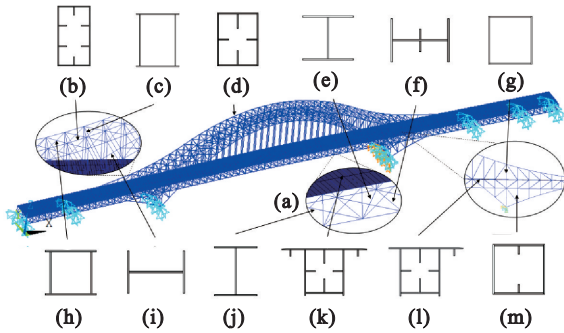


图5 桥梁有限元模型

Fig. 5 Bridge finite element model

全桥设置 33 个挠度测点,布置于主桁架的各跨跨中、次边跨 4 分点、中跨 8 分点和 4 分点以及 27#墩支点断面处,从测点提取的挠度指标分别记作 $A_1 \sim A_{33}$,如图 7 所示.全桥设置 80 个结构应力测点分布在拱肋和主桁架处.拱肋应力测点布置在 27#墩上下拱肋及拱肋 1/4 跨和 1/2 跨断面处;主桁架应力测点布置在 25#~29#墩各跨主桁跨中断面、27#墩墩顶主桁断面以及 29#墩墩顶主桁断面位置,监测点提取的应力指标分别记作 $A_{34} \sim A_{113}$,如图 8 所示.

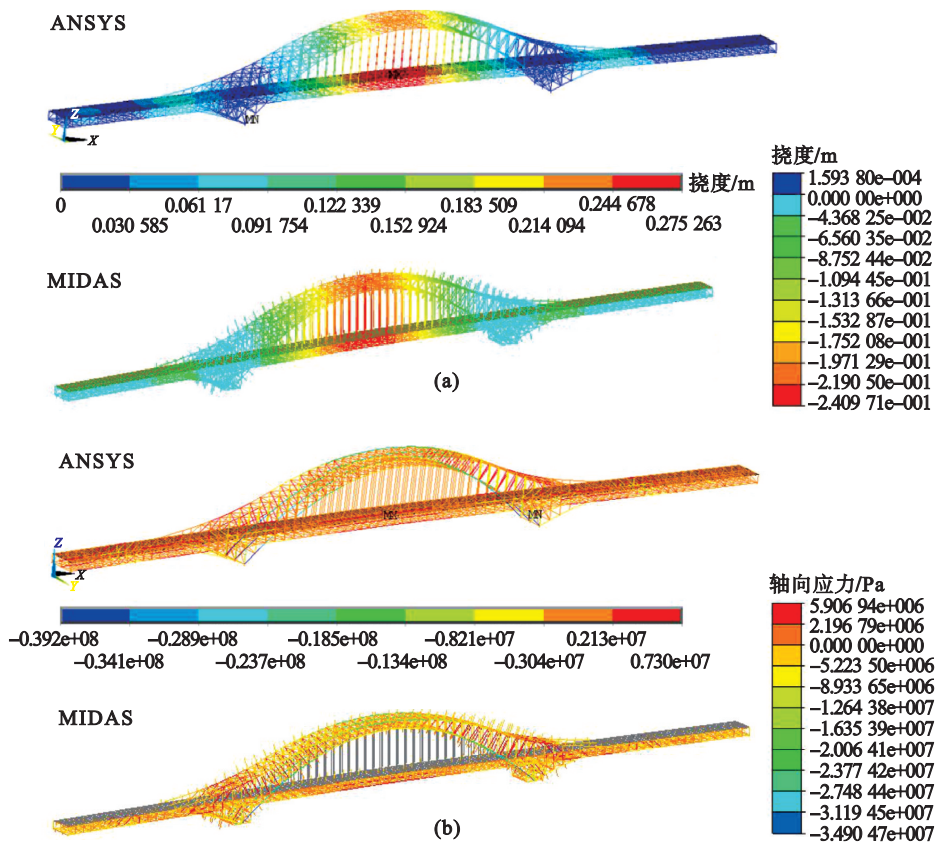


图6 计算结果对比

Fig. 6 Comparison of calculation results

(a)一重力荷载作用下挠度对比;(b)一重力荷载作用下杆件轴向应力对比.

3.2 安全等级划分

钢桁拱桥共有 6 跨,第 1 跨至第 6 跨的挠度指标分别为 $A_1 \sim A_3, A_4 \sim A_9, A_{10} \sim A_{22}, A_{23} \sim A_{27}, A_{28} \sim A_{30}$ 和 $A_{31} \sim A_{33}$.通过有限元数值计算得到各工况中力学指标响应峰值的最小值作为安全等级 I 的等级线 L_1 .以指标 $A_1 \sim A_3$ 和 $A_{64} \sim A_{66}$ 为例,当车辆以设计时速通过桥梁时,各工况的挠度和轴向应力随时间的响应曲线如图 9 所示,计算中选取各工况响应曲线峰值的最小值作为指标 $A_1 \sim A_3$ 和 $A_{64} \sim A_{66}$ 的等级线 L_1 .

根据桥梁规范^[14]可知连续桁架桥梁竖向挠度限值为 $l/500$,因此挠度指标安全等级 V 的等级线为 $L_V = l/500$;通过式(4)计算得到各挠度指标的等级线 L_{II}, L_{III}, L_{IV} .

应力指标 $A_{34} \sim A_{113}$ 取应力响应曲线峰值的最小值 6.10 MPa 作为安全等级 I 的应力等级线 L_1 ;桥梁的主要构件采用 Q370 钢,因此将 Q370 屈服强度 370 MPa 作为安全等级 V 的应力等级线 L_V ,通过式(4)计算得到其余各应力等级线 L_{II}, L_{III}, L_{IV} .安全等级线的计算结果见表 3.

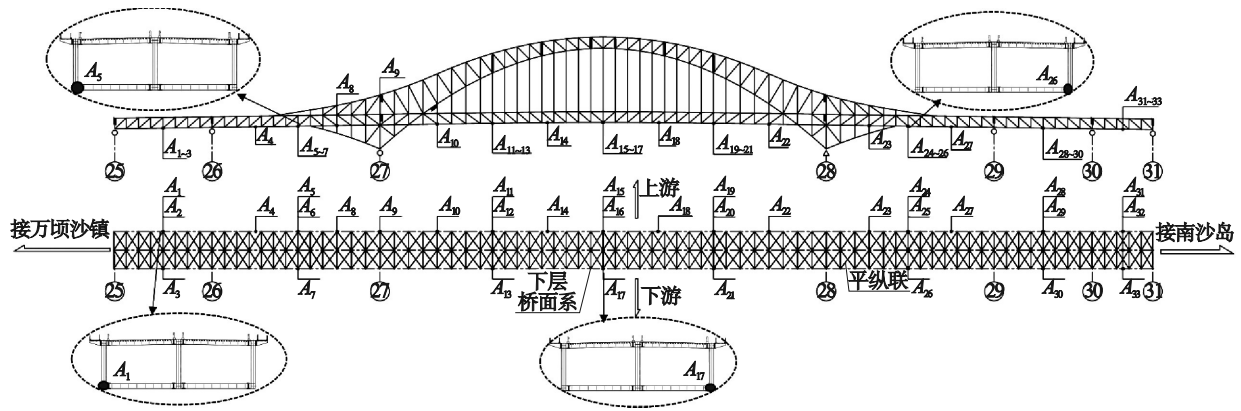


图 7 桥梁挠度指标提取位置

Fig. 7 Extraction positions of bridge deflection index

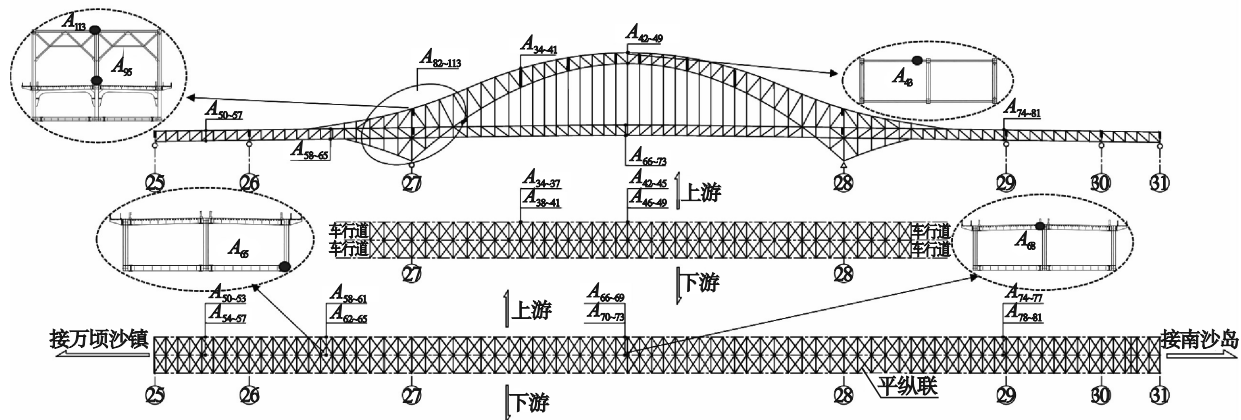


图 8 桥梁应力指标提取位置

Fig. 8 Extraction positions of bridge stress index

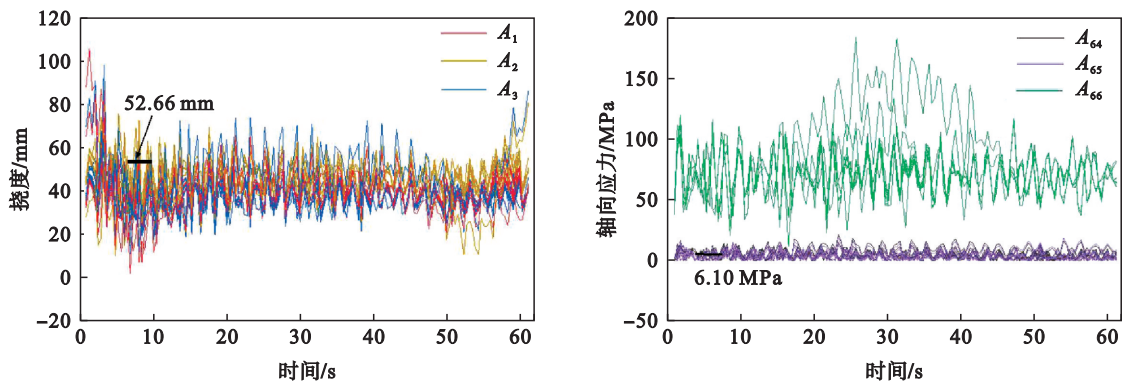


图 9 多荷载作用下的指标响应曲线

Fig. 9 Index response curves under multiple loads

(a) — 挠度响应; (b) — 应力响应.

表 3 安全等级划分

Table 3 Classification of safety level

指标	L_I	L_{II}	L_{III}	L_{IV}	L_V
$A_1 \sim A_3 / \text{mm}$	52.66	87.05	121.43	155.82	190.20
$A_4 \sim A_9 / \text{mm}$	31.52	105.64	179.76	253.88	328.00
$A_{10} \sim A_{22} / \text{mm}$	204.99	371.74	538.49	705.24	872.00
$A_{23} \sim A_{27} / \text{mm}$	29.92	104.44	178.96	253.48	328.00
$A_{28} \sim A_{30} / \text{mm}$	50.52	85.89	121.26	156.63	192.00
$A_{31} \sim A_{33} / \text{mm}$	9.78	36.89	63.99	91.10	118.20
$A_{34} \sim A_{113} / \text{MPa}$	6.10	97.10	188.00	279.00	370.00

3.3 指标隶属度计算

指标对应的挠度或应力值通过各工况的数值模拟结果得到,并用图 10 所示的柯西分布来计算指标与安全等级的所属关系,其中柯西分布的峰值位置与相应指标的等级线对应,根据表 3 并满足两条柯西函数相交处的隶属度为 0.5 的条件,可以得到式(5)~式(7)对应的 α 值,结果如表 4 所示.

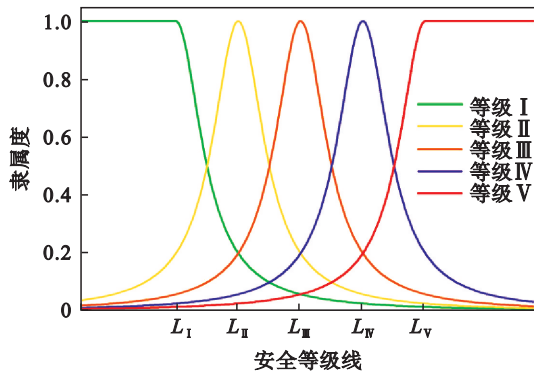


图 10 基于柯西分布的桥梁安全等级

Fig. 10 Bridge safety level based on Cauchy distribution

在计算指标评价向量时,选取隶属度最高的两个安全等级进行归一化^[22].当不考虑风荷载和温度增量时,等效车辆数为 2, 48 和 1 180 时,分别对应工况 1, 工况 19 和工况 22, 此时,以图 7 中挠度指标 A_1, A_5, A_{17} 和图 8 中应力指标 A_{43}, A_{66}, A_{113} 为例,其对应的模糊评价向量如表 5 所示.

以工况 19 为例,其各指标对应的隶属度如图 11 所示.可以看出,处于安全等级 I, II, III, IV 和 V 的指标分别有 36, 57, 16, 4 和 0 个.指标 A_1 在 24 个工况下的隶属度如图 12 所示,当桥梁处于工况 1~工况 18 时,指标 A_1 对应的安全等级为 I 级;当处于工况 19~工况 24 时,指标 A_1 对应的安全等级由 II 级升高至 V 级.

由表 5 的指标模糊评价向量可以得到在不同工况下单一指标的安全等级,但是,在同一工况下存在多个指标所属安全等级不同的情况,无法同时考虑所有指标对桥梁安全等级评估的影响.因此,需要综合考虑各个指标的影响,才能对桥梁整体的安全性能作出有效的评估.

表 4 比例参数 α 取值

Table 4 Values of proportional parameter α

指标	$A_1 \sim A_3$	$A_4 \sim A_9$	$A_{10} \sim A_{22}$	$A_{23} \sim A_{27}$	$A_{28} \sim A_{30}$	$A_{31} \sim A_{33}$	$A_{34} \sim A_{113}$
α	3 382.17	728.10	143.86	720.30	3 197.35	5 442.53	4.83e-16

表 5 指标评价向量

Table 5 Index evaluation vector

指标	工况 1	工况 19	工况 22
A_1	[0.830 0.170 0 0 0]	[0.249 0.751 0 0 0]	[0 0 0 0.815 0.185]
A_5	[0.813 0.187 0 0 0]	[0 0.737 0.263 0 0]	[0 0 0.172 0.828 0]
A_{17}	[0.341 0.659 0 0 0]	[0 0 0.439 0.561 0]	[0 0 0.252 0.748 0]
A_{43}	[0.790 0.210 0 0 0]	[0.743 0.257 0 0 0]	[0 0 0.545 0.455 0]
A_{66}	[0 0.741 0.259 0 0]	[0 0 0.792 0.208 0]	[0 0.172 0.828 0 0]
A_{113}	[0.772 0.228 0 0 0]	[0.405 0.595 0 0 0]	[0 0.688 0.312 0 0]

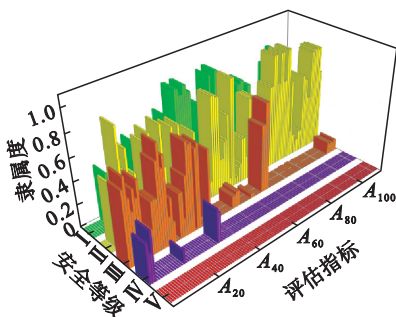


图 11 各指标隶属度分布(工况 19)

Fig. 11 Distribution of membership degree for each index (case 19)

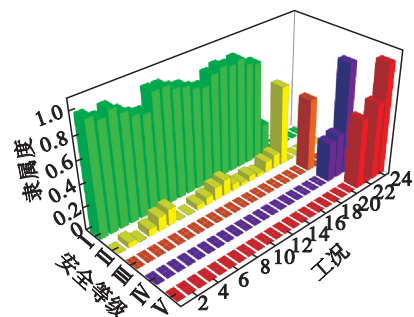


图 12 指标 A_1 各工况下隶属度

Fig. 12 The membership degree of A_1 for each case

3.4 指标权重计算

案例桥梁共包含 113 个评价指标,因此式(8)所示的模糊互补判断矩阵 B 的维度为 113×113 . 在本文的计算中,根据各个指标的重要程度,采用图 13a 所示矩阵 B 进行计算.矩阵中的数值越大表示指标 i 相对于指标 j 重要,例如:第 1 行第

113 列的数值为 0.40,表示指标 A_{113} 比指标 A_1 的重要程度低;第 1 行第 17 列数值为 0.60,表示指标 A_{17} 比指标 A_1 的重要程度高.矩阵 B 中各数值分布情况如图 13b 所示,图中颜色越深表示指标 i 比指标 j 重要程度越高.

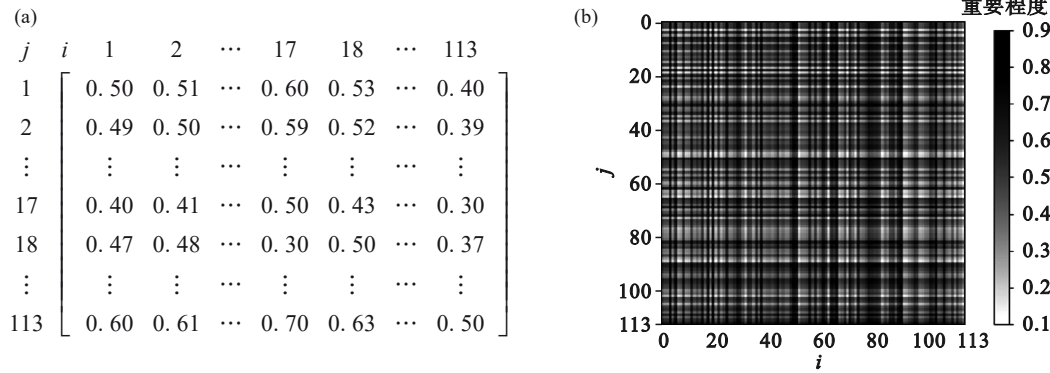


图 13 模糊互补判断矩阵
Fig. 13 Fuzzy complementary judgment matrix
(a)—矩阵 B ; (b)—矩阵数据分布图.

由式(9)计算得到各个指标的主客观权重如图 14 所示.依据数值计算结果,由式(10)~(12)计算得到各指标的客观权重如图 15 所示,其中权重最大的指标为 A_{65} ,其权重为 0.070,该指标为第二跨跨中位置的轴向应力;权重最小的指标为 A_{95} ,权重仅为 0.000 1,该指标为桥墩所在桥面跨中应力,如图 8 所示.

响,共考虑 3 种情况:1)偏重主客观权重, $\alpha_s=0.7, \alpha_o=0.3$;2)偏重客观权重, $\alpha_s=0.3, \alpha_o=0.7$;3)主客观权重相等, $\alpha_s=\alpha_o=0.5$.各组偏好系数下的最优权重如图 16 所示.

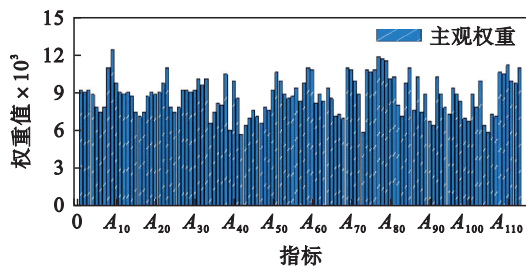


图 14 指标主观权重

Fig. 14 Subjective weights of index

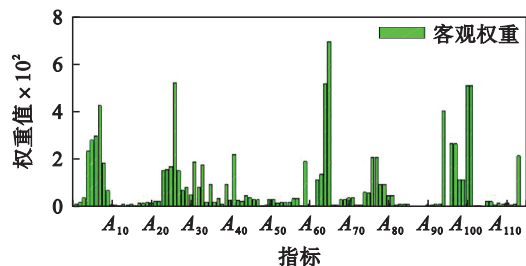


图 15 指标客观权重

Fig. 15 Objective weights of index

主客观权重和客观权重根据式(13)加权耦合,计算中引入各指标的主、客观权重的偏好系数影

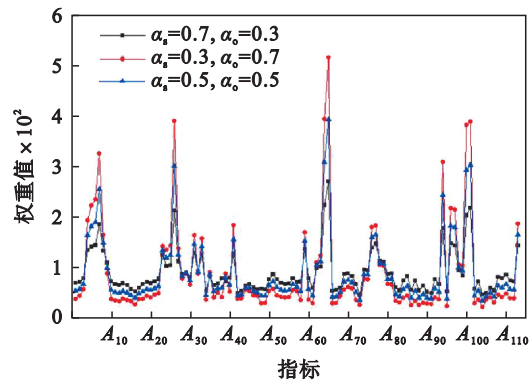


图 16 最优权重

Fig. 16 Optimal weights

3.5 安全评估结果

根据 3 种偏好系数计算的最优权重和式(14)得到的 24 中工况下桥梁的各安全等级隶属度如图 17 所示,由此得到的最终安全等级评估结果如图 18 所示.

工况 1~工况 18 考虑了等效车辆数分别为 2, 4 和 8,风速为 0 和 37.6 m/s,温差为 -20, 0, 和 20 °C 的情况,在 3 种权重偏好情况下,桥梁的安全等级均为 I 级.工况 19~工况 24 仅考虑等效车辆数的改变,当等效车辆数为 48, 100 和 140(工况 19~工况 21)时,在 3 种权重偏好情况下桥梁的

安全等级为 II 级;当等效车辆数为 1 180(工况 22)时,在 3 种权重偏好情况下桥梁的安全等级均为 III 级;当等效车辆数为 1 415(工况 23)时,权重偏好系数为 $\alpha_s=0.7, \alpha_o=0.3$, 桥梁的安全等级为 III 级,当权重偏好系数为 $\alpha_s=0.3, \alpha_o=0.7$ 或 $\alpha_s=\alpha_o=0.5$, 桥梁的安全等级为 IV 级;当等效车辆数为 2 000(工况 24)时,在 3 种权重偏好情况下桥梁的安全等级均为 V 级。

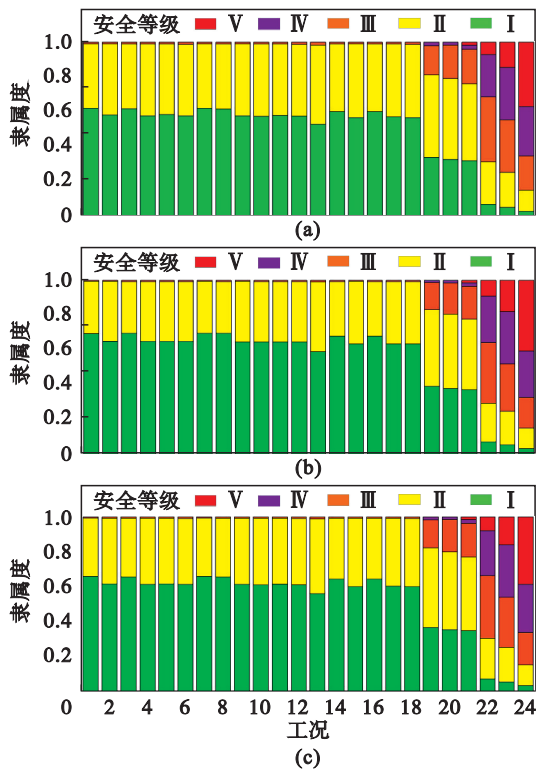


图 17 偏好系数对隶属度分布影响

Fig. 17 Influence of preference coefficient on membership distribution
(a)— $\alpha_s=0.7, \alpha_o=0.3$; (b)— $\alpha_s=0.3, \alpha_o=0.7$;
(c)— $\alpha_s=0.5, \alpha_o=0.5$.

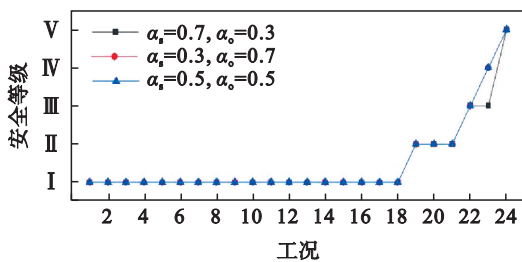


图 18 评估结果对比

Fig. 18 Comparison of assessment results

当安全等级为 I 级时,各指标取值均较小,因此权重偏好系数的选取对评估结果没有影响;当安全等级提高时,桥梁跨中和拱肋受力变化较大,由于熵权法是根据指标的变异性来确定权重,导致部分跨中和拱肋客观权重占比较大,指

标权重分配差异较大,而主观权重是通过专家根据桥梁构件和位置的重要性进行打分赋权,权重分配较为平均,因此选取不同的权重偏好系数将会产生不同的评估结果.在工程中可以结合实际情况调整权重偏好系数,得到更可靠的评估结果。

3.6 钢拱桥实时安全等级评估

读取该桥健康监测系统中 2023 年 7 月 17 日 12 时至 7 月 24 日 00 时一周内 95 个有效传感器的实时数据,其中挠度数据 23 个,应力数据 72 个.以挠度指标 A_5, A_{17}, A_{26} 和应力指标 A_{43}, A_{66}, A_{113} 为例,实时监控数据变化如图 19 所示,各指标值为每小时内的平均值.采用本文的安全评估方法对该桥梁的安全等级进行动态评估,评估时需将计算模型中指标数量调整至实际有效传感器数量.监测评估结果如图 20 所示,可以看出在该时间段内,不同偏好系数组合下的桥梁安全等级 I 的实时隶属度在 0.894~0.993 范围内波动,因此,该桥的实时安全等级均为 I 级。

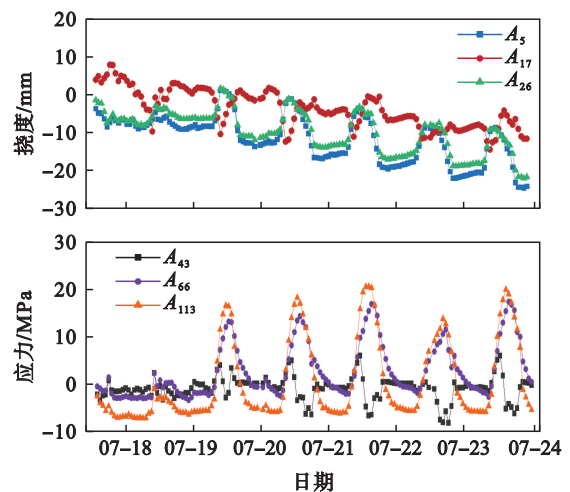


图 19 2023 年 7 月指标监测数据变化

Fig. 19 Changes of indicator monitoring data (July 2023)

(a)—挠度指标变化; (b)—应力指标变化。

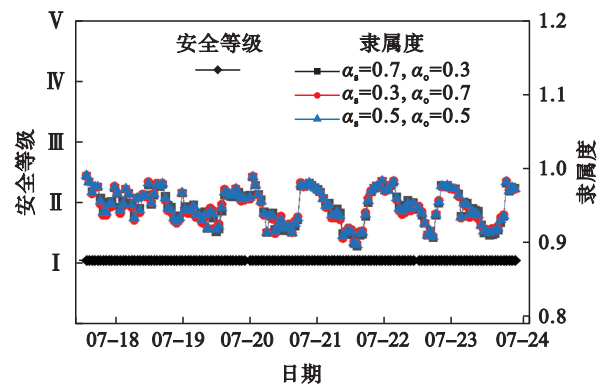


图 20 2023 年 7 月监测评估结果

Fig. 20 Monitoring and evaluation results (July 2023)

4 结 论

1) 本文基于模糊综合评价法建立某钢桁架拱桥的安全评估模型,进行不同车辆荷载、温度作用和风荷载多种工况组合下的安全等级评估.通过多种工况的数值模拟,得到给定指标的力学响应并划分安全阈值;根据安全等级划分原则计算指标模糊评价向量并构造模糊评价矩阵;结合主观权重和客观权重计算各指标最优权重;通过权重向量和模糊评价矩阵得到桥梁的安全等级.为该钢拱桥安全评估及维修管养提供了可用的方法.

2) 本文根据偏好系数综合考虑主、客观权重得到最优权重,分析了3种权重偏好系数对评估结果的影响.当安全等级介于两个等级之间的过渡区域时,不同的权重偏好系数会产生不同的评估结果.可根据实际工程情况调整偏好系数.

3) 依据实际工程一周内的实时监测数据,采用本文提出的评估方法,可得到在选取的时间段内,该桥的实时安全等级为 I 级,表明该桥目前的安全状况非常好,验证了该方法是可行的.

参考文献:

- [1] He Z G, Li W T, Salehi H, et al. Integrated structural health monitoring in bridge engineering [J]. *Automation in Construction*, 2022, 136: 104168.
- [2] Sun L M, Shang Z Q, Xia Y, et al. Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: from condition assessment to damage detection [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146 (5) : 04020073.
- [3] 孙利民, 尚志强, 夏烨. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(11): 1-20. (Sun Li-min, Shang Zhi-qiang, Xia Ye. Development and prospect of bridge structural health monitoring in the context of big data [J] *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(11): 1-20.)
- [4] Manzini N, Orcesi A, Thom C, et al. Machine learning models applied to a GNSS sensor network for automated bridge anomaly detection [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2022, 148(11): 04022171.
- [5] Zhu Q X, Wang H, Spencer B F Jr, et al. Mapping of temperature-induced response increments for monitoring long-span steel truss arch bridges based on machine learning [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2022, 148 (5) : 04022034.
- [6] Sun P, Hou X M, Zheng W Z, et al. Risk assessment for bridge structures against blast hazard via a fuzzy-based framework[J]. *Engineering Structures*, 2021, 232: 111874.
- [7] Peng J X, Yang Y M, Bian H B, et al. Optimisation of maintenance strategy of deteriorating bridges considering sustainability criteria [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022, 18(3): 395-411.
- [8] Yang Y M, Peng J X, Cai C S, et al. Improved interval evidence theory-based fuzzy AHP approach for comprehensive condition assessment of long-span PSC continuous box-girder bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(12): 04019113.
- [9] Andrić J M, Lu D G. Risk assessment of bridges under multiple hazards in operation period [J]. *Safety Science*, 2016, 83: 80-92.
- [10] Moufti S A, Zayed T, Dabous S A. Fuzzy defect based condition assessment of concrete bridges [C]//2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting. Edmonton, 2013: 1489-1494.
- [11] Peng G, Han L, Liu Z Y, et al. An application of fuzzy analytic hierarchy process in risk evaluation model [J]. *Frontiers in Psychology*, 2021, 12: 715003.
- [12] Zhu Y X, Tian D Z, Yan F. Effectiveness of entropy weight method in decision-making [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020(1): 3564835.
- [13] 周勇军, 赵洋, 赵煜, 等. 基于动载试验荷载效率的简支梁桥冲击系数研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(20): 207-216. (Zhou Yong-jun, Zhao Yang, Zhao Yu, et al. A study on dynamic load allowance of a simply supported girder bridge based on load efficiency of a dynamic load test [J] *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(20): 207-216.)
- [14] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 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: China Communications Press, 2015.)
- [15] 中华人民共和国交通部. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.)
- [16] Liu B, Zhang F L, Wan W Y, et al. Multi-objective decision-making for the ecological operation of built reservoirs based on the improved comprehensive fuzzy evaluation method [J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(11): 3949-3964.
- [17] Zhang H, He X Q, Mitri H. Fuzzy comprehensive evaluation of virtual reality mine safety training system [J]. *Safety Science*, 2019, 120: 341-351.
- [18] Zhu L Y. Research and application of AHP-fuzzy comprehensive evaluation model [J]. *Evolutionary Intelligence*, 2022, 15(4): 2403-2409.
- [19] 孙爽. 基于智能分析与监测数据融合的桥梁安全评估研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019. (Sun Shuang. Research on bridge safety assessment based on intelligent analysis and monitoring data fusion [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.)
- [20] Agarwal S, Singh A P. Performance evaluation of textile wastewater treatment techniques using sustainability index: an integrated fuzzy approach of assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 337: 130384.
- [21] Liang L, Sun S, Li M, et al. Data fusion technique for bridge safety assessment [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2019, 47(3): 2080-2100.
- [22] 梁力, 孙爽, 李明, 等. 基于变权重和 D-S 证据理论的桥梁安全评估 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(1): 99-103. (Liang Li, Sun Shuang, Li Ming, et al. Safety assessment of bridges based on variable weight and D-S evidence theory [J] *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(1): 99-103.)