

基于云模型改进AHP的桥梁施工风险评估

王连广¹, 姚博¹, 高海洋¹, 仁丽杰²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 为有效预防桥梁施工过程中风险事故的发生, 给予工程安全前瞻性建议, 提出了一种基于云模型改进层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)的桥梁施工风险评估方法. 首先, 利用鱼骨图识别风险因素, 构建桥梁施工风险评估体系. 其次, 考虑赋权过程中专家意见的不确定性, 利用云模型改进AHP, 计算各指标权重. 最后, 从风险发生概率和风险造成的损失2个维度, 构建二维云模型评价各风险因素, 结合指标权重计算二维综合云模型, 通过贴程度定量描述桥梁施工风险等级. 应用上述评估方法对长春某桥梁施工风险进行评估, 结果表明, 该方法具有较高的可行性和有效性, 能够为桥梁施工风险的预防和控制提供借鉴和参考.

关键词: 桥梁施工; 风险评估; 云模型改进AHP; 二维云模型

中国分类号: TU 714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)02-0118-08

Bridge Construction Risk Assessment Based on Cloud Model Improved AHP

WANG Lian-guang¹, YAO Bo¹, GAO Hai-yang¹, REN Li-jie²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China. Corresponding author: YAO Bo, E-mail: 2386157300@qq.com)

Abstract: In order to effectively prevent the occurrence of risk accidents during bridge construction and give prospective suggestions for engineering safety, a bridge construction risk assessment method based on cloud model improved analytic hierarchy process (AHP) was proposed. Firstly, the fishbone diagram was used to identify risk factors and construct a bridge construction risk assessment system. Secondly, considering the uncertainty of expert opinions in the process of assigning weights, the cloud model improved AHP is used to calculate the weights of each index. Finally, the two-dimensional cloud model is constructed to evaluate each risk factor from two dimensions: the probability of risk occurrence and the loss caused by risk. Combined with the index weights, the two-dimensional comprehensive cloud model was calculated to quantitatively describe the bridge construction risk level through the close degree. The above assessment method was applied to evaluate the construction risk of a bridge in Changchun. The result shows that the method has high feasibility and effectiveness, and can provide insights and references for the prevention and control of bridge construction risk.

Key words: bridge construction; risk assessment; cloud model improved AHP; two-dimensional cloud model

风险的本质是风险因素直接或间接导致风险事故的发生, 并产生不可逆的风险损失. 风险因素是引起风险事故发生的所有因素; 风险事故是由风险因素引发并导致损失的偶发事件; 风险

损失是指因风险事件发生而产生的预期外的不利结果或影响. 桥梁施工具有工期长、人员多、环境复杂等特点, 因此桥梁在建设过程中存在一系列风险因素. 桥梁建设过程中一旦发生事故, 不

仅会造成工期延误、财产损失,甚至会导致人员伤亡等严重的风险损失.2007年8月13日,湖南省凤凰县正在建设的堤溪沱江大桥发生重大坍塌事故,造成64人死亡,22人受伤.2014年7月3日,巴西的贝洛奥里藏特市一座施工中的立交桥倒塌,造成至少2人死亡,19人受伤.2016年3月31日,印度加尔各答一座正在建设的立交桥坍塌,造成27人死亡,至少80人受伤.因此,对施工桥梁进行风险评估是十分必要的.首先确定桥梁施工期间的风险因素组成,然后采用合理方法确定风险等级,最后结合风险等级提出相应措施来避免风险事故的发生和减少风险损失.

为了有效预防风险事故的发生,专家学者提出了许多风险评估方法.其中,基于数据驱动的评估方法由于其较高的准确性被学者们广泛应用.Kawamura等^[1]提出了基于多层神经网络的混凝土桥梁评估系统.Wang等^[2]将神经网络和模糊推理相结合,并将其应用于桥梁风险评估.包龙生等^[3]进一步探索了灰色理论与神经网络的组合优势,构建了预测模型并成功应用于悬臂梁桥的施工中.同样,还有基于扩展置信规则库^[4]和蒙特卡罗模拟^[5]的桥梁风险评估方法.但数据驱动的评估方法往往需要大量的历史数据来构建学习样本,当缺乏桥梁施工的代表性数据时,该方法就无法进行准确的桥梁风险评估.

Kuo等^[6]指出,涉及个人知识的主观判断是比概率方法更有效的风险分析和评估工具.因此,许多学者提出了基于专家决策的半定量方法,以获得更可靠的风险评估结果.Andrić等^[7]将层次分析法与模糊逻辑相结合,提出了桥梁风险评估框架并证明该评估模型的可靠性以及适应性.Lu等^[8]提出了一种基于云模型的悬索桥施工风险评估方法,有效地将风险信息的随机性和模糊性结合起来.Peng^[9]将德尔菲迭代引入云模型构建了桥梁施工风险评估体系,在很大程度上消除了专家意见的离散性.李怡辰等^[10]运用二维云模型,从风险发生的概率和风险发生的后果2个维度呈现了桥梁施工风险等级.

然而,上述方法都存在不足之处.大部分已有研究依据环境因素、施工技术条件、结构体系等评估风险,较少考虑管理等因素的影响程度;风险评估过程存在不确定性,但大多数研究往往忽略了模糊性和随机性对评估结果的影响.

因此,针对上述问题,本文结合云模型改进AHP和二维云模型构建了桥梁施工风险评估体

系.首先,根据鱼骨图分析法确定事故致因,构建全面合理的桥梁施工风险指标体系.其次,利用云模型改进AHP对各风险因素进行赋权,将AHP中专家两两对比的不确定性通过云模型充分表达出来.然后,从风险发生概率和风险造成的损失2个维度,运用二维云模型对桥梁施工各风险因素进行全面准确的评价,结合各风险因素权重确定桥梁施工的风险等级.最后,本文以长春某施工大桥为例验证了该方法的有效性与可行性.

1 构建风险指标体系

在实际施工过程中,引起风险事故的因素有很多,原因也较为复杂.为合理识别桥梁施工风险因素,本文引入鱼骨图分析法.该方法运用逻辑推理对各种系统的危险性进行辨识和评价,不仅能分析出事故的直接原因,还能深入地揭示出事故的潜在原因.统计分析桥梁施工安全事故56起,得出造成事故的原因有跨越断层带、施工机械故障,以及违规操作机械等.追根溯源,从事故致因角度出发,构建鱼骨图,如图1所示,进而归类得到风险指标体系,如图2所示.

2 赋权模型

赋权模型是将各风险因素对施工风险的影响通过权重表达出来.不同于以往的研究,本文提出云模型改进AHP对各风险因素赋权,弥补了传统方法中无法对专家评语不确定性准确表达的不足,优化了权重分布.

2.1 云模型

云模型是Li等^[11]提出的1种表达复杂系统模糊性和随机性的理论.其定义可表示为,设 U 为1个定量域, C 是 U 的1个定性概念,假设 x 是 C 的随机实现且 $x \in U$,那么对于 x ,存在1个趋于稳定的随机变量,称为隶属函数 $\mu(x)$,可表示为

$$\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U \rightarrow \mu(x). \quad (1)$$

在云模型中, x 在定量域 U 上的分布由数值特征 (E_x, E_n, H_c) 来刻画,期望值 (E_x) 是定性概念在定量域的中心值,熵 (E_n) 是定性概念不确定范围的度量,由定性概念的模糊性决定,超熵 (H_c) 代表着云滴的分散程度,可以通过变量的值进行调整,在本文中取为0.05.其中,云发生器可以根据具体的评价标准确定云模型的3个数值特征,对于 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 形式的边界,可以用式(2)~(4)

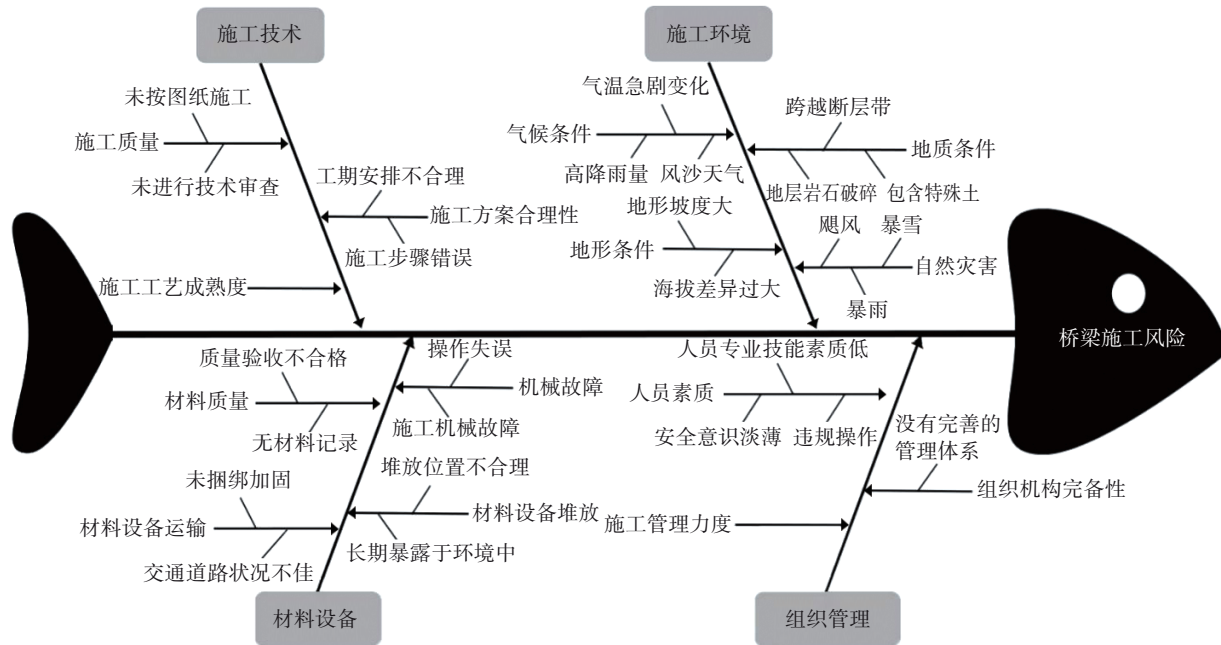


图 1 桥梁施工风险鱼骨图

Fig. 1 Fishbone diagram of bridge construction risks

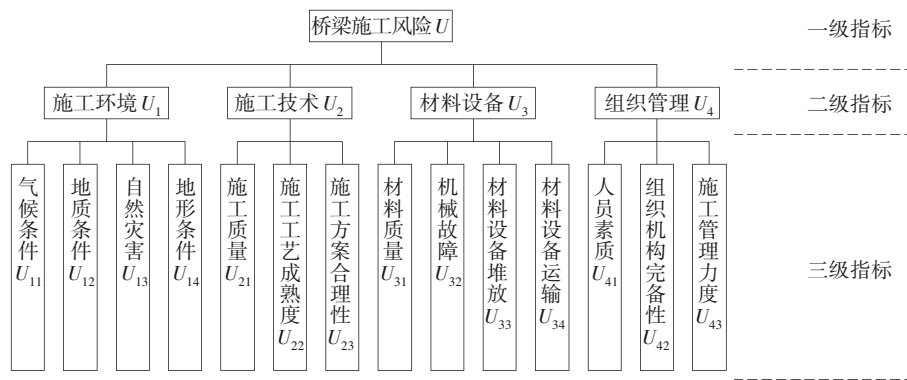


图 2 桥梁施工评价指标体系

Fig. 2 Bridge construction evaluation indicator system

计算数值特征:

$$E_{xi} = \frac{C_{i\max} + C_{i\min}}{2}, \quad (2)$$

$$E_{ni} = \frac{E_{x(i+1)} - E_{xi}}{3}, \quad (3)$$

$$H_{ei} = k, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

2.2 云模型改进 AHP

在指标体系中,指标的权重通过专家意见得到,因此有必要考虑专家意见的不确定性.本文

引入云模型改进 AHP 来量化各指标权重,具体实现步骤如下:

1) 在传统层次分析法基础上构建云模型标度,基于式(2)~(4)和传统层次分析法标度,定义相对重要性量表如表 1 所示,专家通过此表衡量各指标 n 的相对重要性 $C_{n \times n}$,然后构建判断矩阵如式(5)所示:

$$C_{n \times n} = \begin{bmatrix} C_{11}(E_{x11}, E_{n11}, H_{e11}) & C_{12}(E_{x12}, E_{n12}, H_{e12}) & \dots & C_{1n}(E_{x1n}, E_{n1n}, H_{e1n}) \\ C_{21}(E_{x21}, E_{n21}, H_{e21}) & C_{22}(E_{x22}, E_{n22}, H_{e22}) & \dots & C_{2n}(E_{x2n}, E_{n2n}, H_{e2n}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1}(E_{xn1}, E_{nn1}, H_{en1}) & C_{n2}(E_{xn2}, E_{nn2}, H_{en2}) & \dots & C_{nn}(E_{xnn}, E_{n nn}, H_{enn}) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2) 根据传统层次分析法和云模型运算法则,分别计算判断矩阵各行元素乘积^[12],如式(6)~(8)所示:

$$E_{xi} = \prod_{j=1}^n E_{xij}, \quad (6)$$

$$E_{ni} = \prod_{j=1}^n E_{xij} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{E_{nij}}{E_{xij}}\right)^2}, \quad (7)$$

$$H_{ci} = \prod_{j=1}^n E_{xij} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{H_{cij}}{E_{xij}}\right)^2}. \quad (8)$$

3)进行归一化计算,得到指标权重云模型^[13]
 $[w(E_{xi}), w(E_{ni}), w(H_{ci})]$,如式(9)~(11)所示:

$$w(E_{xi}) = \frac{n\sqrt{E_{xi}}}{\sum_{i=1}^n n\sqrt{E_{xi}}}, \quad (9)$$

$$w(E_{ni}) = \frac{n\sqrt{E_{xi}}}{\sum_{i=1}^n n\sqrt{E_{xi}}} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\frac{1}{n}} \cdot (E_{xi})^{\frac{1}{n}-1} \cdot E_{ni}}{n\sqrt{E_{xi}}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{n}} \cdot (E_{xi})^{\frac{1}{n}-1} \cdot E_{ni}}{\sum_{i=1}^n n\sqrt{E_{xi}}}\right)^2}, \quad (10)$$

$$w(H_{ci}) = \frac{n\sqrt{E_{xi}}}{\sum_{i=1}^n n\sqrt{E_{xi}}} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\frac{1}{n}} \cdot (E_{xi})^{\frac{1}{n}-1} \cdot H_{ci}}{n\sqrt{E_{xi}}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{n}} \cdot (E_{xi})^{\frac{1}{n}-1} \cdot H_{ci}}{\sum_{i=1}^n n\sqrt{E_{xi}}}\right)^2}. \quad (11)$$

表 1 云模型相对重要性量表

Table 1 Relative importance scales of cloud model

标度	云模型指标	指标相对关系
1	$C_1(1,0,0)$	指标 <i>i</i> 与 <i>j</i> 一样重要
3	$C_3(3,0.33,0.05)$	指标 <i>i</i> 比 <i>j</i> 稍微重要
5	$C_5(5,0.33,0.05)$	指标 <i>i</i> 比 <i>j</i> 较强重要
7	$C_7(7,0.33,0.05)$	指标 <i>i</i> 比 <i>j</i> 十分重要
9	$C_9(9,0.33,0.05)$	指标 <i>i</i> 比 <i>j</i> 绝对重要
1/3	$C_{1/3}(1/3,0.33/9,0.05/9)$	指标 <i>j</i> 比 <i>i</i> 稍微重要
1/5	$C_{1/5}(1/5,0.33/25,0.05/25)$	指标 <i>j</i> 比 <i>i</i> 较强重要
1/7	$C_{1/7}(1/7,0.33/49,0.05/49)$	指标 <i>j</i> 比 <i>i</i> 十分重要
1/9	$C_{1/9}(1/9,0.33/81,0.05/81)$	指标 <i>j</i> 比 <i>i</i> 绝对重要

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q |x_k - E_x|, \quad (13)$$

$$H_c = \sqrt{|S^2 - E_n^2|}, \quad (14)$$

$$S^2 = \frac{1}{q-1} \sum_{k=1}^q (x_k - E_x)^2. \quad (15)$$

式中: x_k 为第*k*位专家评分值; S^2 为方差; q 为专家数.

二维综合云模型由概率云模型和损失云模型分别与权重云模型聚合得到,聚合公式如式(16)所示:

$$C(E_x, E_n, H_c) = \sum_{i=1}^n [C(w(E_{xi}), w(E_{ni}), w(H_{ci})) \cdot C(E_{xi}, E_{ni}, H_{ci})]. \quad (16)$$

3.2 二维标准云模型

为更好地描述不同层次风险,本文将区间 $[0, 10]$ 平均分为5份,据此将风险发生概率和风险造成损失分别分成5个等级,利用式(2)~(4)和文献[15]得到概率和损失标准云模型,如表2所示.根据风险矩阵法,桥梁施工的风险等级应为风险发生概率和风险造成损失的聚合,以此建立风险等级表,如表3所示.同时将风险等级划分为极低风险、低风险、中风险、高风险、极高风险5个等级.借助MATLAB绘制二维标准云模型,如图3所示.

3.3 贴近度

为使综合云模型和标准云模型的相似性能够准确地表达,本文运用贴近度公式来描述综合云模型与标准云模型的贴近程度,贴近度越大表示综合云模型越靠近该等级标准云,从而确定风险等级.贴近度*D*如式(17)所示:

3 评估模型

3.1 二维综合云模型

为更科学地获得实际桥梁施工各风险因素评分,本文从风险因素导致风险发生概率和风险造成损失2个维度,对风险因素评分值进行全面的表达.邀请桥梁施工方面专家,以满分10分为标准,从风险发生概率和风险造成损失两方面给出指标体系中各风险因素得分,分值越高,风险发生的概率和损失就越大,分值精度为0.1.根据式(12)~(15)和逆向云发生器^[14]将获得的各因素风险评分值转化为概率云模型和损失云模型.

$$E_x = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q x_k, \quad (12)$$

表 2 概率和损失标准云模型

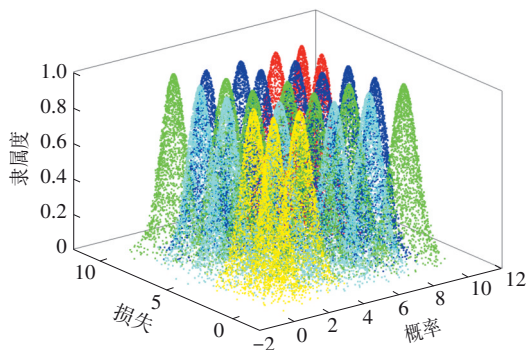
Table 2 Probability and loss standard cloud model

概率等级	概率等级描述	损失等级	损失等级描述	标准云模型
I	极少发生	I	极微	(1.5, 0.50, 0.05)
II	很少发生	II	微小	(3.0, 0.66, 0.05)
III	偶尔发生	III	一般	(5.0, 0.66, 0.05)
IV	经常发生	IV	严重	(7.0, 0.66, 0.05)
V	频繁发生	V	灾难性	(8.5, 0.50, 0.05)

表 3 风险等级

Table 3 Risk level

损失等级	概率等级				
	I	II	III	IV	V
I	极低风险	极低风险	低风险	低风险	中风险
II	极低风险	低风险	中风险	中风险	高风险
III	低风险	中风险	中风险	高风险	高风险
IV	低风险	中风险	高风险	高风险	极高风险
V	中风险	高风险	高风险	极高风险	极高风险



注: ● 极低风险; ● 低风险; ● 中风险; ● 高风险; ● 极高风险.

图 3 二维标准云模型

Fig. 3 Two-dimensional standard cloud model

$$D = \frac{1}{\sqrt{(E_{xp} - E'_{xp})^2 + (E_{xl} - E'_{xl})^2}} \quad (17)$$

式中: E_{xp} 和 E_{xl} 分别代表二维综合云模型中概率云模型和损失云模型的期望值; E'_{xp} 和 E'_{xl} 为二维标准云模型中概率云模型和损失云模型的期望值.

4 工程案例

4.1 工程概况

该施工桥梁位于长春市双阳区境内, 全年气温变化显著, 冬季漫长, 一年中有 5 个月气温平均值在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下. 冬季最冷月 1 月平均气温只有 $-16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最低气温 $-39.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. 此时降水不多, 气候干燥, 常会出现降雪的天气, 造成雪灾.

大桥上部结构为 $23 \times 20\text{ m} + 5 \times 30\text{ m} + 3 \times 20\text{ m}$ 的预应力混凝土连续箱梁, 下部为柱式墩. 大桥主要跨越河沟和河岸阶地, 沟谷两岸岸坡陡峭, 地形起伏变化大, 最大相差 55 m . 经探查, 桥位区覆盖有季节性冻土, 冻结深度约为 2 m . 地层分布主要为粉质黏土、中砂、泥岩和花岗岩.

4.2 计算指标权重

邀请来自施工单位、监理单位和科研院所的 6 位专家, 根据表 1 衡量各指标的相对重要性, 取平均值构建判断矩阵, 利用式 (6)~(11) 计算各三级指标和二级指标因素权重, 结果如表 4 所示.

4.3 确定二维综合云模型

同样邀请 6 位专家分别从风险发生概率和风险造成损失两方面, 对指标体系中各三级指标因

表 4 指标因素权重

Table 4 Indicator factor weights

二级指标	权重云模型	三级指标	权重云模型
U_1	(0.451 5, 0.033 6, 0.005 1)	U_{11}	(0.202 1, 0.017 6, 0.002 7)
		U_{12}	(0.542 8, 0.043 6, 0.006 6)
		U_{13}	(0.202 1, 0.017 6, 0.002 7)
		U_{14}	(0.053 0, 0.004 1, 0.000 6)
U_2	(0.079 0, 0.072 0, 0.001 1)	U_{21}	(0.088 0, 0.007 2, 0.001 1)
		U_{22}	(0.209 9, 0.019 0, 0.002 9)
		U_{23}	(0.702 1, 0.047 4, 0.007 2)
U_3	(0.174 6, 0.015 8, 0.002 4)	U_{31}	(0.177 3, 0.015 9, 0.002 4)
		U_{32}	(0.132 6, 0.011 2, 0.001 7)
		U_{33}	(0.539 3, 0.037 5, 0.005 7)
		U_{34}	(0.150 9, 0.013 4, 0.002 0)
U_4	(0.294 9, 0.024 5, 0.003 7)	U_{41}	(0.266 3, 0.025 8, 0.003 9)
		U_{42}	(0.093 1, 0.007 9, 0.001 2)
		U_{43}	(0.640 5, 0.056 6, 0.008 6)

素进行评分,根据式(12)~(15)计算各指标的概率云模型和损失云模型,结果如表 5 所示.

将表 4~5 计算得到的权重和评价云模型代入式(16),计算各二级指标和一级指标的二维综合云模型,结果如表 6 所示.同时,为初步确定各二级指标和总体施工风险等级,本文利用 MATLAB 生成各二维综合云模型与标准云模型,并进行对

比分析,图 4 为长春某施工桥梁总体风险云模型,图 5 为二级指标施工环境(U_1)的二维综合云模型.

4.4 确定风险等级

为定量反映综合云模型和标准云模型的相似性,本文引入贴进度公式对施工风险等级进行评定,将标准云特征值和综合云特征值代入式

表 5 三级指标二维评价云模型
Table 5 Two-dimensional assessment cloud model with three-level indicators

三级指标	概率云模型	损失云模型
U_{11}	(4.88, 0.220 6, 0.214 4)	(5.12, 0.120 3, 0.119 7)
U_{12}	(3.22, 0.180 5, 0.176 6)	(4.20, 0.150 4, 0.149 1)
U_{13}	(2.40, 0.150 4, 0.148 3)	(6.16, 0.260 7, 0.250 3)
U_{14}	(2.02, 0.180 5, 0.176 6)	(2.12, 0.090 2, 0.089 4)
U_{21}	(2.42, 0.130 3, 0.129 2)	(2.46, 0.190 5, 0.186 7)
U_{22}	(1.82, 0.130 3, 0.129 2)	(2.74, 0.140 4, 0.138 5)
U_{23}	(2.08, 0.130 3, 0.128 5)	(2.12, 0.180 5, 0.177 6)
U_{31}	(2.34, 0.140 4, 0.138 5)	(3.18, 0.180 5, 0.174 2)
U_{32}	(3.12, 0.270 7, 0.259 5)	(2.90, 0.300 8, 0.287 0)
U_{33}	(1.64, 0.130 3, 0.128 3)	(1.72, 0.180 5, 0.178 4)
U_{34}	(4.06, 0.140 4, 0.138 5)	(3.38, 0.230 6, 0.222 1)
U_{41}	(3.06, 0.210 6, 0.207 1)	(3.14, 0.190 5, 0.186 7)
U_{42}	(2.96, 0.210 6, 0.203 8)	(2.86, 0.210 6, 0.206 1)
U_{43}	(4.18, 0.190 5, 0.180 1)	(4.36, 0.260 7, 0.253 0)

表 6 一级和二级指标的二维综合云模型
Table 6 Two-dimensional comprehensive cloud model for first- and second-level indicators

一级指标	概率云模型	损失云模型	二级指标	概率云模型	损失云模型
U	(3.278 7, 0.427 9, 0.191 3)	(3.933 2, 0.504 5, 0.209 4)	U_1	(3.326 2, 0.332 5, 0.183 5)	(4.671 9, 0.424 1, 0.171 4)
			U_2	(2.055 3, 0.199 6, 0.130 7)	(2.280 1, 0.246 1, 0.172 4)
			U_3	(2.883 0, 0.310 5, 0.205 5)	(2.835 2, 0.339 5, 0.244 6)
			U_4	(3.768 1, 0.393 4, 0.196 6)	(3.895 4, 0.423 3, 0.237 0)

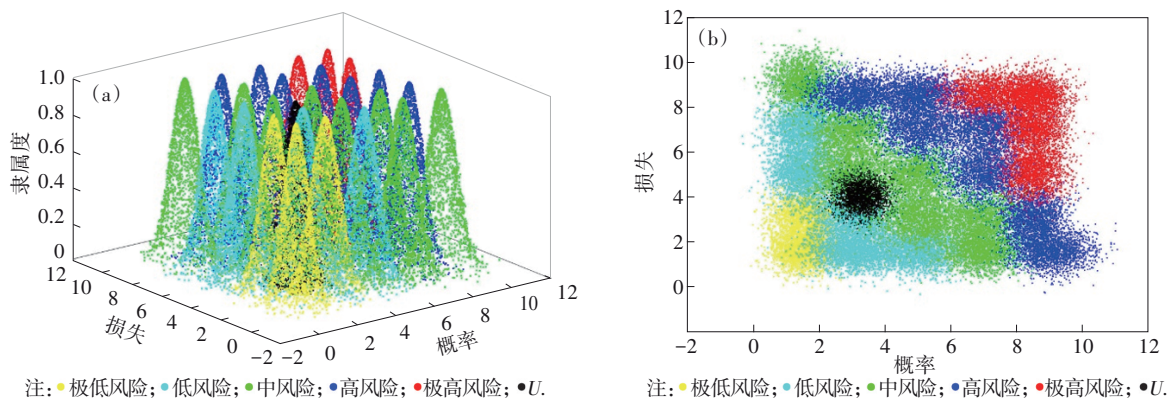
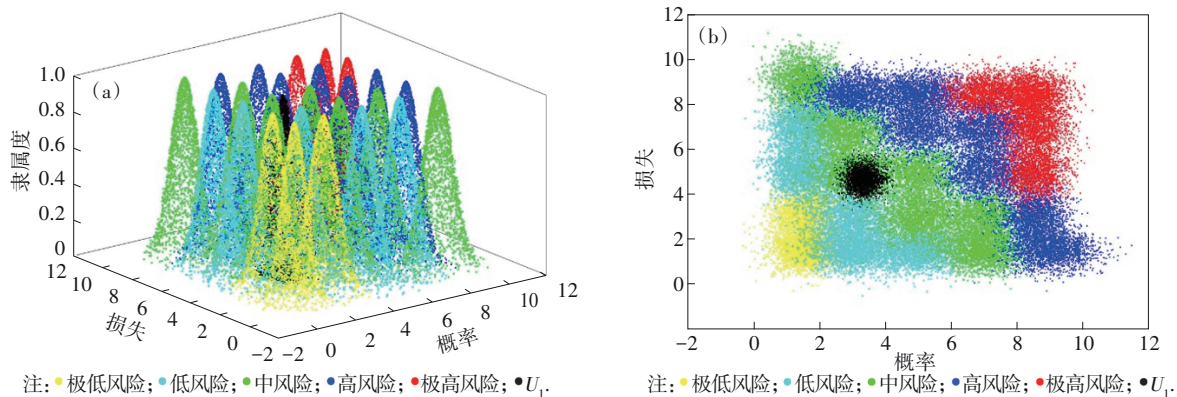


图 4 长春某施工桥梁总体风险云模型

Fig. 4 Overall risk cloud model of a construction bridge in Changchun

(a)—主视图; (b)—俯视图.

图5 二级指标 U_1 综合云模型Fig. 5 Comprehensive cloud model for second-level indicator U_1

(a)—主视图;(b)—俯视图.

(17),得到一级指标综合云模型贴适度,如表7所示.

通过表7可知,长春某施工桥梁总体风险云模型与标准云模型中Ⅱ级概率云模型和Ⅱ级损失云模型的贴适度最大,查询表3可以确定长春某施工桥梁总体风险等级为低风险.同理,各二级指标(施工环境、施工技术、材料设备、组织管理)的风险等级分别为中风险、极低风险、低风险、低风险,这也与施工单位给出的桥梁施工风险等级相一致.

虽然本文评估桥梁总体风险等级为低风险,但二级指标中施工环境风险等级为中风险.这与实际桥梁跨越沟谷,所在地区一年中有5个月的常年气温平均值在 0°C 以下,且存在季节性冻土相对应,能够从侧面反映出评估结果的准确性.并且有必要针对施工环境因素制定相应的风险应对措施,有效降低施工风险.

表7 一级指标综合云模型贴适度

Table 7 The close degree of comprehensive cloud model for first-level indicators

损失等级	概率等级				
	I	II	III	IV	V
I	0.33	0.41	0.34	0.22	0.17
II	0.50	1.03	0.51	0.26	0.19
III	0.48	0.91	0.49	0.26	0.19
IV	0.28	0.32	0.28	0.21	0.17
V	0.20	0.22	0.20	0.17	0.14

5 结 论

1)本文采用鱼骨图分析法对施工风险原因进行分析,最终选取识别出影响桥梁施工安全的

14个风险因素,构建了具有三层结构的桥梁施工风险评价指标体系,并通过逐级计算,保证评价结果的准确性.

2)考虑赋权过程中专家意见的模糊性和随机性,提出基于云模型改进AHP,计算各指标权重,消除了传统赋权模型的缺陷,保证了权重计算的准确性;同时,从风险发生概率和风险造成损失2个方面,运用二维云模型更细化地构建了评估模型,借助MATLAB绘制风险云图直观表现出一级、二级指标风险等级情况,最终通过贴适度定量表示桥梁施工风险等级.

3)构建了一套桥梁施工风险评估体系,并将其应用于长春某大桥的实际工程中,对其施工风险进行评估,所得结论与实际施工风险等级一致,验证了该评估体系的有效性和可行性.

参考文献:

- [1] Kawamura K, Miyamoto A. Condition state evaluation of existing reinforced concrete bridges using neuro-fuzzy hybrid system [J]. *Computers & Structures*, 2003, 81 (18/19): 1931-1940.
- [2] Wang Y M, Elhag T M S. An adaptive neuro-fuzzy inference system for bridge risk assessment [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(4): 3099-3106.
- [3] 包龙生,冯元东,包宇扬,等.GM-BP组合预测模型在桥梁施工监控中的应用[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2022, 38(2): 296-305.
(Bao Long-sheng, Feng Yuan-dong, Bao Yu-yang, et al. Application of GM-BP combination prediction model in bridge construction monitoring [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2022, 38 (2): 296-305.)
- [4] Yang L H, Wang Y M, Chang L L, et al. A disjunctive belief rule-based expert system for bridge risk assessment with dynamic parameter optimization model [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 113: 459-474.
- [5] Cheng M Y, Chiu Y F, Chiu C K, et al. Risk-based maintenance strategy for deteriorating bridges using a hybrid computational intelligence technique: a case study

