

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.01.033

基于云模型的深水桥梁基础施工风险评估

李怡辰, 冯仲仁, 吕尔燕

(武汉理工大学 土木与建筑工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:深水桥梁基础系统本身较为复杂,施工过程中风险因素繁多且相互交叉、制约,因此为对其进行客观全面的风险评估,须充分考虑其风险指标间固有的模糊性、随机性和相关性问题。鉴于此,该文提出了一种组合网络分析法(ANP)和云模型的综合风险评估方法。首先选取自然风险、人为风险、施工风险和组织管理风险组及18个二级指标构建风险评价指标体系;然后,建立多层次的ANP结构模型,求解出各层次中各指标的全局综合权重;最后,根据评估数据分别计算标准云和评价云数字特征,结合全局权重计算综合云,通过相似度计算得出最终评价结果。运用该风险分析方法对某跨江斜拉桥基础工程施工进行分析,得出基础施工安全风险综合云模型数字特征,确定风险等级为Ⅲ级并对结果进行了验证。结果表明:该方法充分考虑了风险因素之间的相互影响,所得结果更全面、更准确、更直观。

关键词:云模型;网络分析法(ANP);深水桥梁;基础施工;风险评估

中国是一个地大物博的国家,随着交通网络建设的快速发展,越来越多的跨江、跨河桥梁出现,并且还呈现出增多的趋势。然而,在水深5 m以上、水面宽100 m以上的深水环境下进行桥梁基础工程施工难度较大,并且在施工过程中还需考虑地质、洪水、暴雨等风险因素以及这些风险因素间的相互联系与反馈所带来的不确定性影响。一旦某一环节发生问题,极有可能在其相关环节中引发连锁反应,严重影响桥梁的施工安全。因此,为了能够有效地进行风险管理,保证工程的安全进行,对深水桥梁基础施工风险进行评估至

关重要。

目前,国内外学者采用不同的方法对桥梁施工安全风险评估进行了探索与研究。如郑元勋等对近10年发生的桥梁事故进行了统计分析,从固有、人为、自然风险三方面深入剖析总结事故原因,并结合实例提出了针对性预防措施;梁晓飞等基于经典德尔菲法和AHP方法,运用可信性理论构建了多层次模糊综合评判风险评估模型,克服了选取隶属函数带来的模糊性影响;王丹等基于网络分析法建立两个准则控制下的结构模型,结合三角模糊数方法对风险因素进行判断,

- *****
- [11] 王利晨. 非接触性量测在公路隧道监控量测中的探索应用[J]. 矿山测量, 2017(3).
- [12] LUO Yanbin, CHEN Jianxun, XI Weizheng, et al. Analysis of Tunnel Displacement Accuracy with Total Station [J]. Measurement, 2016, 83: 29-37.
- [13] 袁恒, 刘成龙, 卢杰, 等. 全站仪三维自由设站隧道非接触监控量测原理及精度分析[J]. 工程勘察, 2012(8).
- [14] 史晓萍, 朱庆峰. 非接触式自由设站隧道监控量测方法[J]. 测绘地理信息, 2015(6).
- [15] WANG Huiying, JIA Yuanyuan, Cao Lun. Cause Analysis and Prevention of Road Tunnel Collapse in Complex Soft Strata[J]. Energy Procedia, 2012, 16: 259-264.
- [16] 范本, 郑继强, 朱坤莫. 测量机器人隧道施工自动变形监测的实现[J]. 隧道建设, 2014(1).
- [17] 夏才初, 那通兴, 彭国才, 等. 公路隧道施工变形监测精度要求探讨[J]. 隧道建设, 2016(5).
- [18] 罗彦斌, 陈建勋, 翟宇辉. 全站仪 RDM 法与 3D 量测法量测隧道变形精度对比[J]. 交通运输工程学报, 2017(3).
- [19] 奚魏征. 全站仪在公路隧道变形量测中的应用研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011.
- [20] 张斌, 於浩, 方涛, 等. Leica TM50 观测数据预处理程序设计与开发[J]. 人民长江, 2016(S1).
- [21] 夏春林. 误差理论与测量平差[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [22] 王颖, 李仕东. 土木工程测量[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

收稿日期: 2020-11-19(修改稿)

作者简介: 李怡辰, 男, 硕士研究生. E-mail: 135733068@qq.com

识别出深水基础施工风险因素主次排序并联系工程实际分析了原因;杨亚文针对大跨斜拉桥基础施工风险因素繁多且施工技术和施工组织较为复杂的问题,采用影响图法对该系统进行了全面的风险辨识,运用概率影响图理论建立了评价模型并开发出基于Java B/S的计算机程序化风险评价系统;杨伟军等针对桥梁施工安全风险评价中的不确定性和模糊性问题,以云理论为基础生成云标尺,对桥梁施工风险进行评价;Keke Peng综合考虑桥梁施工期间的施工条件、结构方案、施工技术、项目运营管理等因素,确定了各风险层的典型风险源,提出了一种组合德菲尔方法、AHP法和云模型的云综合决策方法;Dawen Peng等基于AHP方法建立了基于BP神经网络的桥梁风险评估模型,并对该模型进行了培训,使其可用于实际桥梁风险评估。

上述研究采用的方法大多侧重于对桥梁工程施工风险进行定性或定量分析,不能同时解决评价过程的不确定性和模糊性问题、定性概念与定量表示之间的模糊转换问题、风险指标之间的相互交叉影响问题。鉴于此,该文将云模型与网络分析法相结合,建立基于云模型的深水桥梁基础施工风险评估模型,并以某跨江斜拉桥基础施工为实例,验证该风险评估模型的可行性,以便得到较为准确、全面、直观的结果。

1 风险评价模型

1.1 桥梁基础施工风险界定

风险识别是风险评估的第一步,也是非常关键的一个环节,即采用合适的方法对关键因素进行识别、总

结和归类。风险因素的选取应多方面参考意见,由于桥梁基础工程施工环境较为恶劣,风险因素众多,因此从人、机、料、法、环5个方面出发,筛选出对施工风险影响力较大的因素。在查阅类似工程施工资料的基础上,结合有关专家的意见,选取4组风险指标:①自然风险方面,水中基础工程施工易受到洪灾、暴雨等导致水面上升的风险影响,除此之外,还会受到不良地质和地下水位等的影响,因此要对施工位置的水位、气候、地质等进行综合分析;②人为因素方面,由于桥梁工程参建人员较多,员工素质良莠不齐,设计单位的设计错误风险、勘测单位的勘测不足、监测单位的监测失误、施工单位的技术缺失和违规操作等风险都会对基础工程的安全施工产生影响;③施工风险方面,深水桥梁基础工程施工难度较大且时间较紧,如何确定合理的施工方案,如何确保施工材料、机具的质量都是进行安全施工所必须关注的重点;④组织管理风险方面,基础工程施工是一个多单位配合的过程,管理层应保证各个组织机构执行其机能,除了有严格的管理制度,还要确保能够进行科学合理的施工组织。综合上述分析,具体风险评价指标体系如图1所示。

1.2 建立施工风险标准云模型

云模型是一种定性定量不确定性转换模型,通过该模型能够构成定性概念与定量之间的映射关系,随着计算机技术和研究的逐步深入,云模型在处理该类关系时较为方便、快捷、直观。构造一个云模型关键是计算出其3种数字特征:期望值 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 。3种数字特征分别表示定性概念的分布、不确定性和熵的不确定性,反映在云图中就是云模型的期望、带宽和方差。

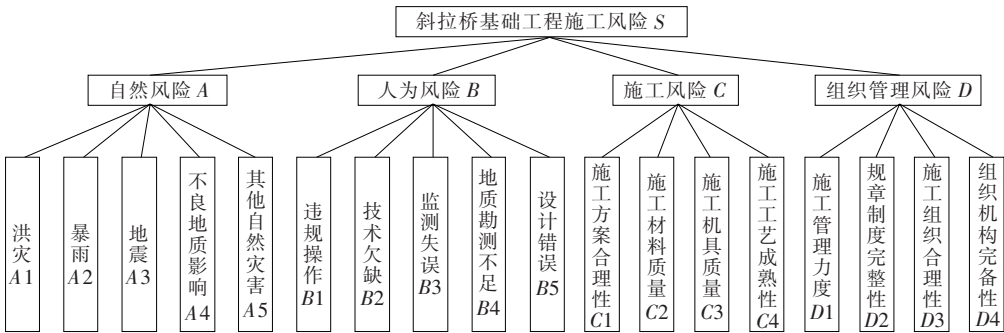


图1 风险评价指标体系图

云发生器有FCG和BCG两种,通过发生器能将云粒的生成在计算机上得以快速实现。其中,FCG算法实现从概念到量化的过程,步骤如下:生成随机数 x

$\sim N(E_x, E_n'^2)$ 和 $E_n' \sim N(E_n, H_e^2)$,计算 x 的隶属度 $\mu(x) = \exp\{-(x - E_x)^2 / 2E_n'^2\}$,经 n 次重复,生成 n 个云粒,FCG生成的 n 个云粒构成整个云图。BCG

算法实现从定量到定性概念的转化,其转化过程可用以下数字特征值表示:

$$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{1}$$

$$E_n = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x| \tag{2}$$

$$H_e = \sqrt{S^2 + E_n^2} \tag{3}$$

式中: x_i 为数据; S 为数据标准差。

参照文献[11]并结合施工现场安全规范和专家意见,将深水桥梁基础施工安全风险等级按照风险发生的可能性大小和严重性大小划分为 4 个等级并用定性语言低、适中、高、极高进行描述,如表 1 所示。

表 1 风险等级划分表

风险等级	风险描述	分值/%
I (低)	① 发生可能性较大,发生后果轻微;② 发生可能性较小,发生后果严重	0~20
II (适中)	发生可能性一般,发生后果一般	20~45
III (高)	① 发生可能性较大,发生后果一般;② 发生可能性一般,发生后果严重	45~80
IV (极高)	发生可能性较大,发生后果严重	80~100

根据风险等级的划分确定标准云模型的数字特征,步骤如下:根据表 1 中的评价分值得到有效论域 $U = [X_{\min}, X_{\max}]$, X_{\min} 和 X_{\max} 分别为等级所属的分值上、下限值,对应的风险等级可用不同数字特征的云模型表示。为减少人为划分等级区间带来的主观影响,取风险等级划分分值的边界值为两种等级的过渡值,且同时隶属于两种等级的程度相同。

$$E_x = (X_{\min} + X_{\max})/2 \tag{4}$$

$$\exp\left\{-\frac{(X_{\min} - E_x)^2}{2E_n'^2}\right\} = \exp\left\{-\frac{(X_{\max} - E_x)^2}{2E_n'^2}\right\} \approx 0.5 \Rightarrow E_n \approx (X_{\max} - X_{\min})/2.355 \tag{5}$$

$$H_e = kE_n \tag{6}$$

式中: k 为系数,根据概念的模糊程度来调整取值,一般取 0.1。

根据风险等级划分表中的评价等级标准,通过式(4)~(6)计算其评价标准云模型的数字特征,用 Matlab 软件绘制评价标准云图,如图 2 所示。

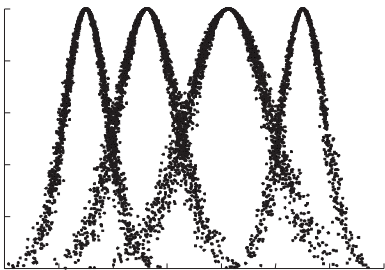


图 2 评价标准云图

由图 2 可知:云的顶端和两侧较窄,腰间较厚;中间较密集,两侧较稀疏。4 朵云图分别表示 4 个风险

等级,绘制于以风险分值和隶属度为轴的同一坐标系下。采用大量云粒反映定性概念所属的定量区间,对于每一个云粒来说其分布具有随机性,可能超出定量区间的范围,但这种随机性只是在一定范围内,不会影响整个云图的分布。因此,局限于某一云粒是无效的,大量云粒的分布才能反映这种转换,这种不确定性转换可以理解为通过大量仿真最终获得共性的过程。

1.3 风险指标权重确定

风险指标权重是各风险因素在整体评价体系中的重要性大小,该文采用的网络分析法(ANP)是在层次分析法(AHP)的基础上提出的一种决策方法,与后者不同的是,它克服了元素之间相互独立、无法联系的缺点,适用于深水基础施工风险因素之间的复杂关系。ANP 方法将系统划分为上下两层:第一层为控制层,包括该次决策的总目标及各项应满足的准则;第二层为网络层,包括受上层控制的各个元素组及其各组 and 组内的相互关系组成。针对深水桥梁基础工程的风险来说,它的结构控制层为施工安全,网络层为较为重要的风险因素,同一类型的风险因素形成因素组。同传统 AHP 方法相似,在某准则下,对各因素进行间接优势度比较,对数据进行归一化处理后形成超矩阵 W :

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \cdots & W_{NN} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中: W_{ij} 为元素组 i 和 j 中各元素在不同的次准则下的评价矩阵,若两元素组没有相互联系,则为零矩阵。为了达到风险指标的全局可比性,对 W 进行归一化处理,即每个元素 W_{ij} 同权重向量相结合得到加权超矩

阵 \bar{W} 。此时加权超矩阵 \bar{W} 中的元素反映了元素之间的一阶优势度,通过不断自乘直至矩阵为素阵即极限超矩阵 W^∞ ,即可得到最终全局权重排序 W^* 。针对前文中界定的风险因素,建立 ANP 模型,如图 3 所示。

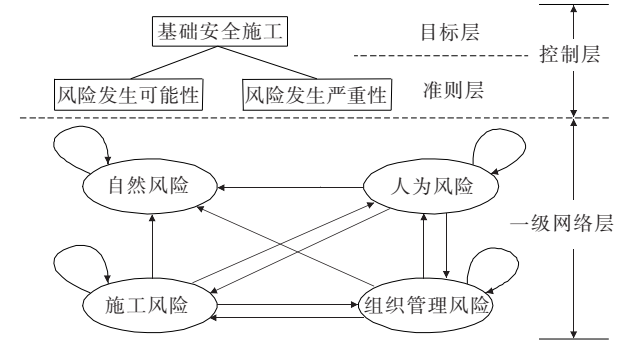


图 3 ANP 结构模型图

1.4 构建综合云模型

1.4.1 确定评价云模型

根据上文中划分的风险等级,专家结合工程实际对每项风险指标进行判断并给出所属定性概念区间内的分值,实现了从定性概念到定量的转化, n 位专家可得到 n 组评语,将评分数据进行归一化处理后运用 BCG 对数据进行运算,建立评价云模型 $C_U(E_{x_U}, E_{n_U}, H_{e_U})$ 。

1.4.2 生成综合云

综合云是由评价云和风险因素权重结合模糊算子生成的云模型,其数字特征计算如下:

$$E_x = \sum_{i=1}^m (E_{x_U} \times W^*) \tag{8}$$

$$E_n = \sqrt{\sum_{i=1}^m (E_{n_U}^2 \times W^*)} \tag{9}$$

$$H_e = \sum_{i=1}^m (H_{e_U} \times W^*) \tag{10}$$

按照文献[14]的方法,计算各标准云与综合云的相似度,运用 Matlab 软件统计综合云云粒代入每个标准云隶属度后的差异性。具体步骤为:以综合云模型数字特征为基础,生成正态随机数,并代入到每个标准云模型的隶属度函数 $\mu(x)$ 中,将代入的所有云粒的隶属度进行求和平均即可得到两云的相似度。

1.5 模型的实现步骤

针对深水桥梁基础施工安全问题,将网络分析法(ANP)与云模型相结合,建立风险评估方法,流程图如图 4 所示。

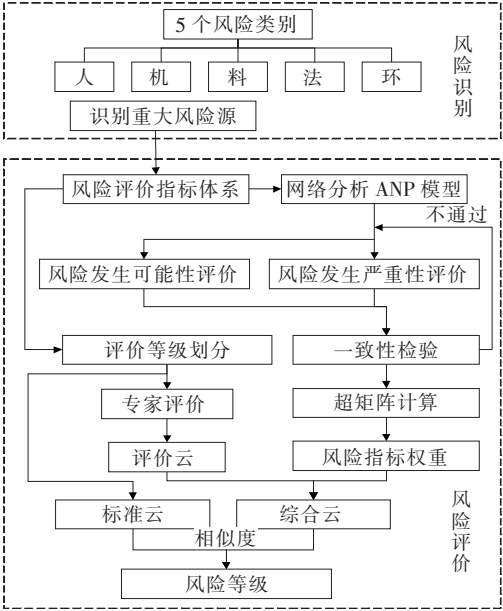


图 4 风险评估流程图

2 实例分析

2.1 工程概况

以湖北省某斜拉桥基础工程为例,对其进行施工安全风险评估。该桥全长 6 451.01 m,跨越汉江,江水面宽 300~400 m,水流较急,岸坡有一定冲刷破坏。经调查勘测,地下水位随季节、降水量变化而变化,施工时地下水埋深 1.0~2.0 m。该桥主墩采用钢板桩围堰辅助施工,围堰平面尺寸为 28.02 m×31.62 m,深度 24 m,主墩承台高 6 m,属低桩承台,承台底部距离河底约 6.7 m。两个辅助墩承台为低桩承台,分别位于浅水区和岸边,采用筑岛平台打设钢板桩围堰施工。深水基础施工期间易受复杂的外部环境影响,且深水基础施工的难度较高。鉴于此,对该桥基础施工安全风险进行评价,并根据结果对其进行针对性施工管理,保障基础施工的安全。

2.2 风险指标权重确定

根据 ANP 方法原理,组织专家以施工安全为总目标,分别以风险发生可能性和严重性为准则,对风险因素进行间接优势度比较,具体步骤如下:先分别以风险发生的可能性为主准则,以网络层控制因素为次准则,对两因素重要性进行比较,经过一致性检验和归一化后的子矩阵填入超矩阵中相应的位置,直到所有因素两两比较完成,即超矩阵中填满有效数据,用同样的方法计算风险发生严重性准则下的超矩阵。此时的超

矩阵未考虑每一个填入的矩阵块之间的相互关系,为使整个超矩阵不同列的元素能够有可比性,将每个子矩阵乘以包含准则和层次相对权重的加权矩阵,最终得到加权超矩阵。利用 Super Decisions 软件进行超矩阵的求解,最终风险排序结果如表 2 所示。

表 2 指标权重表

风险因素及编号	全局权重	组权重	排序
A1 洪灾	0.060 252	0.187 31	8
A2 暴雨	0.092 202	0.286 64	3
A3 地震	0.037 114	0.115 38	11
A4 不良地质影响	0.100 546	0.312 58	2
A5 其他自然灾害	0.031 554	0.098 09	12
B1 违规操作	0.027 619	0.118 53	14
B2 技术欠缺	0.061 002	0.261 79	6
B3 监测失误	0.023 135	0.099 28	17
B4 地质勘测不足	0.091 381	0.392 16	4
B5 设计错误	0.029 884	0.128 25	13
C1 施工方案合理性	0.054 471	0.258 28	9
C2 施工材料质量	0.042 326	0.200 69	10
C3 施工机具质量	0.088 056	0.417 53	5
C4 施工工艺成熟性	0.026 046	0.123 50	16
D1 施工管理力度	0.027 047	0.115 38	15
D2 规章制度完整性	0.060 629	0.258 64	7
D3 施工组织合理性	0.128 657	0.548 85	1
D4 组织机构完备性	0.018 078	0.077 12	18

2.3 评价云及综合云模型

邀请了 10 位包含设计、施工管理以及科研等方面对该工程较为熟悉的专家,结合该工程实际情况和评分等级标准进行评价。收集到 10 组专家评分数据共 180 个,采用逆向云发生器计算,结果如表 3、4 所示。

表 3 评价数据表

专家编号	A1	A2	(A3~D3)	D4
1	54	72	...	9
2	69	66	...	14
3	56	78	...	16
4	53	75	...	13
5	50	65	...	8
6	67	77	...	7
7	58	68	...	8
8	57	67	...	20
9	65	76	...	6
10	58	73	...	10

表 4 评价云数字特征表

风险指标	评价云	风险指标	评价云
A1	(0.587,0.062,0.019)	B5	(0.367,0.176,0.031)
A2	(0.717,0.163,0.045)	C1	(0.565,0.060,0.020)
A3	(0.206,0.306,0.019)	C2	(0.282,0.283,0.036)
A4	(0.840,0.271,0.041)	C3	(0.760,0.193,0.037)
A5	(0.184,0.355,0.026)	C4	(0.126,0.278,0.044)
B1	(0.221,0.359,0.015)	D1	(0.122,0.283,0.045)
B2	(0.289,0.273,0.044)	D2	(0.285,0.179,0.035)
B3	(0.266,0.327,0.021)	D3	(0.588,0.103,0.019)
B4	(0.808,0.177,0.021)	D4	(0.111,0.291,0.048)

以一级层指标组织管理风险 D 为例,在确定二级网络风险指标权重和评价云 D1~D4 后,根据式(8)~(10)生成该层综合云模型为 D(0.419,0.173,0.023),同理可计算出其余各一级指标层的综合云模型为,A(0.620,0.233,0.022),B(0.492,0.248,0.029),C(0.535,0.205,0.030)。同样根据各一级风险数据通过式(8)~(10)求出深水桥梁基础施工安全风险评价综合云参数,S(0.523,0.218,0.026)。

2.4 施工安全风险等级确定

用 Matlab 软件将组织管理风险 D 评价云模型和综合云模型同标准云模型云图一起绘制如图 5、6 所

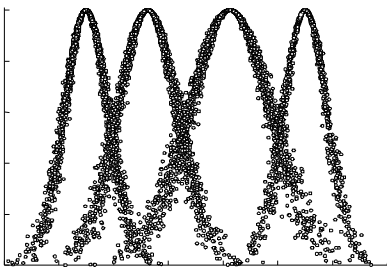


图 5 组织管理风险评价云图

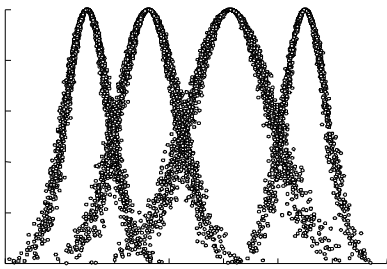


图 6 评价综合云图

示。评价云和综合云模型的熵和超熵值较小,云熵群未出现雾化且表现出很好的凝聚性,表明该次评价结果较为准确可信。从图 5、6 可知:该斜拉桥基础施工安全风险评价等级为“Ⅱ”级和“Ⅲ”级之间。对综合云模型所得结果与标准云进行相似度对比,计算结果如表 5 所示。

表 5 相似度计算结果

风险等级	综合云	评价云			
		自然风险 A	人为风险 B	施工风险 C	组织管理风险 D
I	8.64×10^{-5}	6.04×10^{-7}	7.17×10^{-4}	2.42×10^{-5}	0.001 0
Ⅱ	0.240 6	0.048 8	0.362 1	0.196 1	0.686 1
Ⅲ	0.766 9	0.938 2	0.659 6	0.809 5	0.396 1
Ⅳ	8.64×10^{-5}	6.04×10^{-7}	7.17×10^{-4}	2.42×10^{-5}	0.001 0

由表 5 可得:综合风险等级与Ⅲ级(高)的相似度最大,为 0.766 9,与图 6 结果吻合,因此,该跨江斜拉桥基础施工安全风险等级为“高风险”。建议结合施工作业风险特点和类似项目经验对风险源进行调查,针对重大风险源进行量化评估,做到从源头出发,对风险因素进行有效控制。从表 5 中可知:自然风险 A 风险等级更接近“高风险”,因此在风险管理工作中要重点留意施工时周围环境变化,加强对地质、水位等的监测,及时制定应对风险的措施。

采用传统的模糊综合评价法对计算结果进行验证,根据该文专家数据选取隶属度函数,采用加权平均算子,计算得模糊综合评价结果为 $B=(0.116 \quad 0.267 \quad 0.461 \quad 0.156)$,根据最大隶属度原则判断出风险等级同样为Ⅲ级,评价结果与该文模型所得结果相同。通过对比可得,该文方法结合经验制定风险等级划分标准并给出对应分值区间,运用云发生器直接将评价数据转化为云模型,实现概念与数据的相互转换,并且将模糊性与随机性集中到云模型中,对比传统模糊综合评价法省去了隶属函数,求解结果更准确。同时,模糊了风险等级划分边界的隶属度,避免等级划分时的主观因素影响,使改进后的云模型更加适应该类决策。

3 结论

(1) 针对深水桥梁基础施工风险因素繁多且相互

交叉的问题,运用 ANP 方法对风险指标权重进行求解,考虑了风险因素之间的相关性和交叉性,所求权重更加接近风险的真实比重。

(2) 通过实例分析可看出,该综合评价方法不仅可确定风险评价等级,还能通过综合云数字特征得到评价结果的可靠性和稳定性,评价内容也更丰富。

参考文献:

[1] 翟世鸿,杨炎华,张照霞. 桥梁深水主墩基础的现状与发展趋势探讨[J]. 中外公路,2007(6).

[2] 吴玉刚,郭强,李翠娟. 钢桥火灾风险评估及耐火性增强方法研究[J]. 中外公路,2018(1).

[3] 郑元勋,郭慧吉,谢宁. 基于统计分析的桥梁坍塌事故原因剖析及预防措施研究[J]. 中外公路,2017(6).

[4] 梁晓飞,郑小燕,李忠梅. 基于可信性理论的桥梁基础施工风险评估[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2014(12).

[5] 王丹,赵辉. 基于 ANP 的深水桥梁基础工程施工风险评估[J]. 公路工程,2017(2).

[6] 杨亚文. 大跨径公路斜拉桥基础施工安全风险控制研究[D]:重庆交通大学硕士学位论文,2012.

[7] 杨伟军,王鹏. 基于云标尺和最不利状态的桥梁施工风险评估方法研究[J]. 中外公路,2013(1).

[8] Peng Keke. Risk Evaluation for Bridge Engineering Based on Cloud-Clustering Group Decision Method[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019,33(1).

[9] Peng Dawen,Dai Wenda. Research about the Bridge Risk Assessment[C]. First IEEE International Conference on Information Science & Engineering. IEEE Computer Society,2009.

[10] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学,2004(8).

[11] 交通运输部工程质量监督局. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

[12] Yang Shengmei, Han Xianquan, Cao Bo, et al. Cloud-Model-Based Method for Risk Assessment of Mountain Torrent Disasters[J]. Water,2018,10(7).

[13] 王莲芬. 网络分析法(ANP)的理论与算法[J]. 系统工程理论与实践,2001(3).

[14] 张仕斌,许春香. 基于云模型的信任评估方法研究[J]. 计算机学报,2013(2).

[15] 刘纪坤,刘恩宇,郭红娟,等. 山区高速公路施工过程风险评估评价模型研究[J]. 中外公路,2019(3).