

# 基于信息熵组合赋权-可拓模型的综合管廊项目运维风险评价

陆婷<sup>1</sup>, 姜安民<sup>1,2</sup>, 董彦辰<sup>1,2</sup>, 熊奇伟<sup>3</sup>, 刘霁<sup>1,4</sup>

(1. 湖南城建职业技术学院, 湖南 湘潭 411100;

2. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004;

3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

4. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 建立地下综合管廊项目运行维护风险评价指标体系, 包括3个一级评价指标, 14个二级评价指标; 采用信息熵权重对主观权重进行修正, 对各评价指标相对重要性量化处理; 基于信息熵组合赋权与可拓理论, 构建地下综合管廊项目运行维护风险评价模型; 运用该模型对A市地下综合管廊项目运行维护风险进行评价, 得出该项目管理风险 $X_1$ 、管廊本体及设备设施风险 $X_2$ 、环境因素风险 $X_3$ 分别隶属于 $u_4$ 级、 $u_4$ 级、 $u_5$ 级, 即: 风险分别为较高、较高、高, 项目总体运行维护风险为 $u_4$ 级, 即: 风险较高的结论。

**关键词:** 信息熵; 组合赋权; 可拓模型; 综合管廊; 运行维护风险评价

中图分类号: TU990.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)02-0052-07

## Risk Assessment of Integrated Pipeline Project Operation and Maintenance Based on Information Entropy Combination Weighting – Extension Model

LU Ting<sup>1</sup>, JIANG Anmin<sup>1,2</sup>, DONG Yanchen<sup>1,2</sup>, XIONG Qiwei<sup>3</sup>, LIU Ji<sup>1,4</sup>

(1. Hunan Urban Construction College, Xiangtan, Hunan 411100, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;

3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

4. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract:** In this paper, the evaluation index system of operation and maintenance risk of underground comprehensive pipeline corridor project is established, including 3 first-level evaluation indexes and 14 second-level evaluation indexes. Based on the combination weighting and extension theory of information entropy, a risk assessment model of underground comprehensive pipeline project operation and maintenance is constructed. This model is then used to evaluate the operation and maintenance risk of the underground comprehensive pipeline project in A city. It is concluded that the project management risk ( $X_1$ ), the risk of the pipeline itself, the risk of equipment and facilities ( $X_2$ ), and the risk of environmental factors ( $X_3$ ) belong to grade  $u_4$ , grade  $u_4$  and grade  $u_5$  respectively, the risk is higher, higher and high. And the overall operation and maintenance risk of the project is grade  $u_4$ , the conclusion is higher risk.

**Keywords:** information entropy; portfolio empowerment; extension model; integrated pipe gallery; operation and maintenance risk assessment

地下综合管廊又名“共同沟”,即可以将给排水、电力、燃气、通信等管网收纳在一个共同空间<sup>[1-3]</sup>,具体示意图见图 1<sup>[4]</sup>。地下综合管廊便于统一管理、发现问题易于维修,同时节约土地资源,优势明显<sup>[5-6]</sup>。目前,我国已有多个城市的地下综合管廊在建或投入运营。安全问题在综合管廊运行维护过程中至关重要,学者们对此做出了一些相关研究。如:李芊等<sup>[7]</sup>基于 DEMATEL 法对综合管廊运行维护管理风险因素进行研究,对识别出的 22 个风险因素的重要程度进行排序,找出了综合管廊运行维护过程中的关键风险因素;陈丽<sup>[8]</sup>对综合管廊运营阶段风险进行识别,并运用层次分析法对各风险指标相对重要性进行量化评估;和晓丹<sup>[9]</sup>建立城市综合管廊 PPP 项目运营管理评价指标体系,运用层次分析法对各要素重要程度进行排序,并对综合管廊 PPP 项目运营收费模式及信息化智能运行维护管理技术做了深入探讨;陈雍君等<sup>[10]</sup>基于贝叶斯网络构建了综合管廊灾害风险评估模型,对灾害风险进行评级;刘玉梅等<sup>[11]</sup>基于灰色聚类法构建评价模型,对地下综合管廊项目运营风险进行评价。同时,文献[12-14]也从不同角度对地下综合管廊运行维护做出相关研究,涉及到了综合管廊可视化运营与管理信息平台的建设、不同地区综合管廊运行维护对比、及综合管廊运行维护灾害等一系列问题。

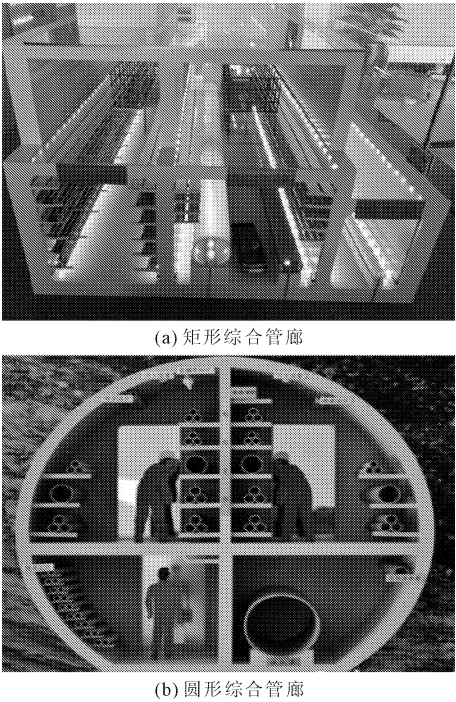


图 1 综合管廊断面形式

对前人研究进行总结、梳理。借鉴前人研究的宝贵成果,分析研究中存在的一些不足。如:对综合管廊融资、设计及施工方面的研究相对较多,着重针对综合管廊运行维护风险的研究相对较少;针对综合管廊运行维护风险的研究过程中,偏于定性分析,缺少可靠的运行维护风险综合评价方法;对风险重要性进行排序的过程中,多采用层次分析法等主观赋权方法,难以充分考虑风险评价指标所包含信息,具有一定局限性。本文对前人研究成果进行梳理,建立地下综合管廊项目运行维护风险评价指标体系;在评价指标重要性判断过程中,采用信息熵权重对主观权重进行修正,弥补了单一赋权的缺陷;基于该权重与可拓理论构建地下综合管廊项目运行维护风险评价模型,并对某市地下综合管廊项目进行多级综合评价,对运行维护风险进行评级。通过实例验证了该方法的可靠性及应用价值。

### 1 地下综合管廊项目运行维护风险评价指标体系

地下综合管廊项目运行维护风险较多,较为复杂,采用不同的风险划分方式所建立的风险评价指标体系也存在一定差异。本研究通过专家调查,并参考相关文献[7,9-11],结合评价需要,建立地下综合管廊项目运行维护风险评价指标体系。本评价指标体系将指标划分为管理、管廊本体及设备设施、环境因素等 3 大方面,择优选取了 14 项二级评价指标,详见表 1。

表 1 地下综合管廊项目运行维护风险评价指标体系

| 目标层                | 一级指标              | 二级指标                 |
|--------------------|-------------------|----------------------|
| 地下综合管廊项目运行维护风险 $X$ | 管理风险 $X_1$        | 规章制度风险 $X_{11}$      |
|                    |                   | 教育培训风险 $X_{12}$      |
|                    |                   | 人员安全意识风险 $X_{13}$    |
|                    |                   | 组织协调及应急能力风险 $X_{14}$ |
|                    | 管廊本体及设备设施风险 $X_2$ | 管廊本体风险 $X_{21}$      |
|                    |                   | 管线系统风险 $X_{22}$      |
|                    |                   | 供电系统风险 $X_{23}$      |
|                    |                   | 机电系统风险 $X_{24}$      |
|                    |                   | 通信系统风险 $X_{25}$      |
|                    |                   | 监控系统风险 $X_{26}$      |
|                    |                   | 消防系统风险 $X_{27}$      |
|                    | 环境因素风险 $X_3$      | 自然灾害风险 $X_{31}$      |
|                    |                   | 地上及地下改造施工风险 $X_{32}$ |
|                    |                   | 管廊内部环境风险 $X_{33}$    |

2 基于信息熵组合赋权与可拓理论的地  
下综合管廊运行维护风险评价模型

2.1 信息熵组合赋权

(1) 层次分析法。层次分析法<sup>[15]</sup>简称 AHP (Analytic Hierarchy Process, AHP), 是 20 世纪 70 年代由美国学者 T. L. Saaty 提出的一种多目标综合评价方法。运用层次分析法求解权重应用较为广泛, 是一种可靠性较高的主观赋权方法, 具体操作流程如下:

① 建立层次结构模型。基于表 1 评价指标体系, 本文建立结构模型包括三个层次(目标层、一级评价指标、二级评价指标)。

② 构造判断矩阵。将各指标进行比较, 比较后量化值选取 1~9 及其倒数, 建立判断矩阵  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

③ 计算指标权重。本文选取特征向量法计算指标权重, 具体操作如下:

$$A\omega = \lambda_{\max}\omega \quad (2)$$

式中: $A$  的最大特征根为  $\lambda_{\max}$ , 其对应的特征向量(归一化处理后)即为权重向量  $\omega$ 。

④ 进行一致性检验。首先, 计算  $CI$  一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

其次, 查找随机一致性指标  $RI$ , 见表 2。

| 表 2 平均随机一致性指标 |   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $n$           | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
| $RI$          | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 | 1.51 |

最后, 计算一致性比率  $CR$ :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

当比值小于 0.1 时, 一致性检验通过, 否则进行修正。

(2) 熵权法。熵权法<sup>[16]</sup>是应用较为广泛的客观赋权方法, 通过建立原始数据评价矩阵计算出各指标权重。与主观赋权法相比较, 熵权法客观性强, 精度较高, 熵权法计算权重的具体流程如下:

① 建立原始数据评价矩阵  $K$ 。矩阵  $K$  表达式为:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & \cdots & k_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $k_{ij}$  表示指标初始评价值。

② 归一化评价矩阵得到标准矩阵  $P$ 。标准矩阵  $P$  的表达式为:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $p_{ij} = \frac{k_{ij}}{\sum_{i=1}^n k_{ij}}$ 。

③ 计算信息熵  $e_j$ 。信息熵  $e_j$  表达式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, n; j = 1, 2,$$

$$3, \cdots, m) \quad (7)$$

式中: $e_j$  表示第  $j$  项指标的熵值;  $\frac{1}{\ln n}$  表示信息熵系数。

④ 计算熵权  $\beta_j$ 。熵权  $\beta_j$  表达式为:

$$\beta_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (8)$$

式中: $\beta_j$  表示第  $j$  项指标的熵权。

(3) 信息熵组合赋权。为反映主客观权重优势, 采用熵权对主观权重进行修正, 获得组合权重, 本文采用最小熵原理对主客观权重进行组合, 具体操作如下<sup>[17]</sup>:

$$\min f = \sum_{i=1}^n z_i (\ln z_i - \ln \omega_i) + \sum_{i=1}^n z_i (\ln z_i - \ln \beta_i) \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, n) \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \omega_i > 0$$

式中: $\omega_i$  为评价指标主观权重;  $\beta_i$  为评价指标客观权重;  $z_i$  为评价指标组合权重;  $n$  为系统指标个数。

运用拉格朗日乘子方法求解组合权重, 求得  $z_i$  如下:

$$z_i = \frac{\sqrt{\omega_i \times \beta_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\omega_i \times \beta_i}} \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, n) \quad (10)$$

## 2.2 基于信息熵组合赋权与可拓理论的风险评价模型

基于信息熵组合赋权与可拓理论,构建地下综合管廊项目运行维护风险评价模型,见图2。

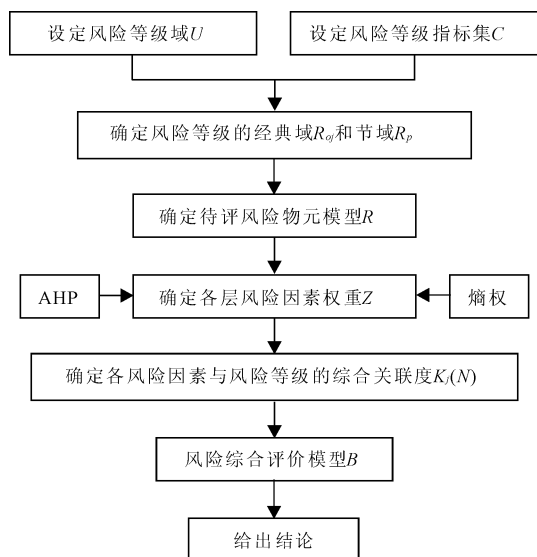


图2 地下综合管廊项目运行维护风险评价模型

(1) 设定风险等级域  $U$  和风险特征指标集  $C$  表达式为:

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n), C = (c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (11)$$

(2) 确定风险各等级的经典域  $R_{oj}$  和节域  $R_p$  表达式为:

$$R_{oj} = (N_{oj}, C, x_{oji}) = \begin{bmatrix} N_{oj}, & c_1, & \langle a_{oj1}, b_{oj1} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{oj2}, b_{oj2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & \langle a_{ojn}, b_{ojn} \rangle \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $N_{oj}$  为划分的  $j$  个风险等级;  $c_i$  为风险等级  $u_j$  的特征;  $x_{oji}$  为  $u_j$  关于特征  $c_i$  所规定取值范围。

$$R_p = (N_p, C, x_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p, & c_1, & x_{p1} \\ & c_2, & x_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & x_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p, & c_1, & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (13)$$

(3) 确定待评风险物元模型  $R$  表达式为:

$$R = (N, c_i, x_i) = \begin{bmatrix} N & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

(4) 确定评价指标权重  $Z$ 。运用层次分析法计算评价指标主观权重  $\omega_i$ , 熵权法计算客观权重  $\beta_i$ , 基于式(9)、式(10) 计算组合权重  $z_i$ 。

(5) 确定各评价指标与各风险等级的关联度  $K_j(x_i)$  表达式为:

$$k_j(x_i) = \begin{cases} -\frac{\rho(x_i, x_{oji})}{|x_{oji}|}, & x_i \in x_{oji} \\ \frac{\rho(x_i, x_{oji})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{oji})}, & x_i \notin x_{oji} \end{cases} \quad (15)$$

$$\rho(x_i, x_{oji}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{oji} + b_{oji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{oji} - a_{oji}) \quad (16)$$

$$\rho(x_i, x_{pi}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \quad (17)$$

$$|x_{oji}| = |a_{oji} - b_{oji}| \quad (18)$$

式中:  $k_j(x_i)$  为第  $i$  个评价指标属于第  $j$  个评价等级的关联度;  $\rho(x_i, x_{oji})$  为点  $x_i$  与区间  $x_{oji}$  的距;  $\rho(x_i, x_{pi})$  为点  $x_i$  与区间  $x_{pi}$  的距。

(6) 风险综合评价。首先计算综合关联度  $K_j(N)$ :

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^n \alpha_i k_j(x_i) \quad (19)$$

式中:  $\alpha_i$  为第  $i$  个评价指标  $X_i$  的权重系数。

其次,进行综合评价:

$$B = Z \cdot K \quad (20)$$

式中:  $B$  为  $U$  的关联度集;  $Z$  为各级指标权重值;  $K$  为关联值矩阵。

## 3 工程算例

A 市地下综合管廊项目,位于解放大路(朝阳街至和平路段),全程长 2.35 km,两舱。包括给水、电力、通讯、燃气等,除污水雨水管外均已入廊。对该项目运行维护风险进行评价研究,结合评价结果采取相应措施,具体评价过程如下:

(1) 设定风险等级域  $U$  和风险特征指标集  $C$  表示为:

$$U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5) = (\text{低}, \text{较低}, \text{中等}, \text{较高}, \text{高})$$

$$C = (c_1, c_2) = (\text{发生概率}, \text{损失程度})$$

参考相关文献,对  $c_1$ 、 $c_2$  进行赋值,详见表 3。

(2) 确定风险各等级的经典域  $R_{oj}$  和节域  $R_p$ 。根据表 2,确定各级经典域、节域如下:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} \text{风险低}, & c_1, & (0, 2] \\ & c_2, & (0, 2] \end{bmatrix}$$

表 3 风险发生概率及损失程度赋值情况表<sup>[18]</sup>

| <i>C</i>              | 概率低<br>(损失小) | 概率较低<br>(损失较小) | 概率中等<br>(损失中等) | 概率较高<br>(损失较大) | 概率高<br>(损失大) |
|-----------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| <i>c</i> <sub>1</sub> | (0,2]        | (2,4]          | (4,6]          | (6,8]          | (8,10)       |
| <i>c</i> <sub>2</sub> | (0,2]        | (2,4]          | (4,6]          | (6,8]          | (8,10)       |

$$R_{02} = \begin{bmatrix} \text{风险较低,} & c_1, & (2,4] \\ & c_2, & (2,4] \end{bmatrix}$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} \text{风险中等,} & c_1, & (4,6] \\ & c_2, & (4,6] \end{bmatrix}$$

$$R_{04} = \begin{bmatrix} \text{风险较高,} & c_1, & (6,8] \\ & c_2, & (6,8] \end{bmatrix}$$

$$R_{05} = \begin{bmatrix} \text{风险高,} & c_1, & (8,10] \\ & c_2, & (8,10] \end{bmatrix}$$

$$R_p = \begin{bmatrix} \text{风险,} & c_1, & (0,10] \\ & c_2, & (0,10] \end{bmatrix}$$

各等级的经典域物元如下:

$$R_0 = \begin{bmatrix} N_{01} & N_{02} & N_{03} & N_{04} & N_{05} \\ c_1 & (0,2] & (2,4] & (4,6] & (6,8] & (8,10) \\ c_2 & (0,2] & (2,4] & (4,6] & (6,8] & (8,10) \end{bmatrix}$$

(3) 确定待评风险物元模型 *R*。邀请对本项目较为熟悉的工程技术人员、行业专家 10 人,对各二级风险的发生概率 *c*<sub>1</sub> 及损失程度 *c*<sub>2</sub> 进行打分(打分取 0 ~ 10),具体见表 4。

表 4 风险发生概率及损失程度打分表

| <i>c<sub>i</sub></i>  | <i>X<sub>ij</sub></i>  |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                       | <i>X</i> <sub>11</sub> | <i>X</i> <sub>12</sub> | <i>X</i> <sub>13</sub> | <i>X</i> <sub>14</sub> | <i>X</i> <sub>21</sub> | <i>X</i> <sub>22</sub> | <i>X</i> <sub>23</sub> | <i>X</i> <sub>24</sub> | <i>X</i> <sub>25</sub> | <i>X</i> <sub>26</sub> | <i>X</i> <sub>27</sub> | <i>X</i> <sub>31</sub> | <i>X</i> <sub>32</sub> | <i>X</i> <sub>33</sub> |
| <i>c</i> <sub>1</sub> | 2.5                    | 4.5                    | 4.5                    | 2.5                    | 2.5                    | 2.5                    | 3.0                    | 3.0                    | 3.0                    | 3.0                    | 3.0                    | 2.5                    | 2.5                    | 3.5                    |
| <i>c</i> <sub>2</sub> | 7.5                    | 6.5                    | 6.5                    | 9.5                    | 8.5                    | 8.5                    | 7.5                    | 7.5                    | 8.0                    | 7.5                    | 7.5                    | 8.5                    | 8.0                    | 8.0                    |

基于表 3,整理待评物元如下:

$$R_{11} = \begin{bmatrix} X_{11}, & c_1, & 2.5 \\ & c_2, & 7.5 \end{bmatrix} \quad R_{12} = \begin{bmatrix} X_{12}, & c_1, & 4.5 \\ & c_2, & 6.5 \end{bmatrix}$$

$$R_{13} = \begin{bmatrix} X_{13}, & c_1, & 4.5 \\ & c_2, & 6.5 \end{bmatrix} \quad R_{14} = \begin{bmatrix} X_{14}, & c_1, & 2.5 \\ & c_2, & 9.5 \end{bmatrix}$$

$$R_{21} = \begin{bmatrix} X_{21}, & c_1, & 2.5 \\ & c_2, & 8.5 \end{bmatrix} \quad R_{22} = \begin{bmatrix} X_{22}, & c_1, & 2.5 \\ & c_2, & 8.5 \end{bmatrix}$$

$$R_{23} = \begin{bmatrix} X_{23}, & c_1, & 3.0 \\ & c_2, & 7.5 \end{bmatrix} \quad R_{24} = \begin{bmatrix} X_{24}, & c_1, & 3.0 \\ & c_2, & 7.5 \end{bmatrix}$$

$$R_{25} = \begin{bmatrix} X_{25}, & c_1, & 3.0 \\ & c_2, & 8.0 \end{bmatrix} \quad R_{26} = \begin{bmatrix} X_{26}, & c_1, & 3.0 \\ & c_2, & 7.5 \end{bmatrix}$$

$$R_{27} = \begin{bmatrix} X_{27}, & c_1, & 3.0 \\ & c_2, & 7.5 \end{bmatrix} \quad R_{31} = \begin{bmatrix} X_{31}, & c_1, & 2.5 \\ & c_2, & 8.5 \end{bmatrix}$$

$$R_{32} = \begin{bmatrix} X_{32}, & c_1, & 2.5 \\ & c_2, & 8.0 \end{bmatrix} \quad R_{33} = \begin{bmatrix} X_{33}, & c_1, & 3.5 \\ & c_2, & 8.0 \end{bmatrix}$$

(4) 确定评价指标权重 *Z*。征求上述 10 位专家意见(结合专家意见,第一轮确定评价指标相对重要性,第二轮确定评价指标相对重要程度,如出现不一致现象则及时进行调整),根据各评价指标相对重要程度,建立成对比较矩阵,见表 5—表 8。

运用前式,计算主观权重 *ω<sub>i</sub>*、客观权重 *β<sub>i</sub>* 及组合权重 *z<sub>i</sub>*,见表 9。

(5) 计算各评价指标与风险等级关联度。评价指标与风险等级关联度可表示为:

表 5 *X*—*X<sub>i</sub>* 判断矩阵

| <i>X</i>              | <i>X</i> <sub>1</sub>         | <i>X</i> <sub>2</sub> | <i>X</i> <sub>3</sub> |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>X</i> <sub>1</sub> | 1.0000                        | 1.5000                | 1.8000                |
| <i>X</i> <sub>2</sub> | 0.6667                        | 1.0000                | 1.2000                |
| <i>X</i> <sub>3</sub> | 0.5556                        | 0.8333                | 1.0000                |
| 备注                    | 一致性比率 <i>CR</i> = 0.0000,检验通过 |                       |                       |

表 6 *X*<sub>1</sub>—*X<sub>1i</sub>* 判断矩阵

| <i>X</i> <sub>1</sub>  | <i>X</i> <sub>11</sub>        | <i>X</i> <sub>12</sub> | <i>X</i> <sub>13</sub> | <i>X</i> <sub>14</sub> |
|------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <i>X</i> <sub>11</sub> | 1.0000                        | 1.2000                 | 1.2000                 | 0.5556                 |
| <i>X</i> <sub>12</sub> | 0.8333                        | 1.0000                 | 1.0000                 | 0.5000                 |
| <i>X</i> <sub>13</sub> | 0.8333                        | 1.0000                 | 1.0000                 | 0.5000                 |
| <i>X</i> <sub>14</sub> | 1.8000                        | 2.0000                 | 2.0000                 | 1.0000                 |
| 备注                     | 一致性比率 <i>CR</i> = 0.0003,检验通过 |                        |                        |                        |

表 7 *X*<sub>2</sub>—*X<sub>2i</sub>* 判断矩阵

| <i>X</i> <sub>2</sub>  | <i>X</i> <sub>21</sub>        | <i>X</i> <sub>22</sub> | <i>X</i> <sub>23</sub> | <i>X</i> <sub>24</sub> | <i>X</i> <sub>25</sub> | <i>X</i> <sub>26</sub> | <i>X</i> <sub>27</sub> |
|------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <i>X</i> <sub>21</sub> | 1.0000                        | 0.5000                 | 1.2000                 | 0.6667                 | 0.5000                 | 0.6667                 | 0.6667                 |
| <i>X</i> <sub>22</sub> | 2.0000                        | 1.0000                 | 2.0000                 | 1.2000                 | 0.9000                 | 1.2000                 | 1.2000                 |
| <i>X</i> <sub>23</sub> | 0.8333                        | 0.5000                 | 1.0000                 | 0.5000                 | 0.3333                 | 0.5000                 | 0.5000                 |
| <i>X</i> <sub>24</sub> | 1.5000                        | 0.8333                 | 2.0000                 | 1.0000                 | 0.8000                 | 1.0000                 | 0.9000                 |
| <i>X</i> <sub>25</sub> | 2.0000                        | 1.1111                 | 3.0000                 | 1.2500                 | 1.0000                 | 1.2000                 | 1.2000                 |
| <i>X</i> <sub>26</sub> | 1.5000                        | 0.8333                 | 2.0000                 | 1.0000                 | 0.8333                 | 1.0000                 | 0.9000                 |
| <i>X</i> <sub>27</sub> | 1.5000                        | 0.8333                 | 2.0000                 | 1.1111                 | 0.8333                 | 1.1111                 | 1.0000                 |
| 备注                     | 一致性比率 <i>CR</i> = 0.0016,检验通过 |                        |                        |                        |                        |                        |                        |

① 确定风险因素特征权重值。听取专家意见,

取风险特征权重  $\alpha_{c_1} = 0.4, \alpha_{c_2} = 0.6$ 。

② 综合关联度计算。基于式(15)—式(19),计算各二级评价指标风险综合关联度,见表 10。

表 8  $X_3$ — $X_{3i}$  判断矩阵

| $X_3$    | $X_{31}$                  | $X_{32}$ | $X_{33}$ |
|----------|---------------------------|----------|----------|
| $X_{31}$ | 1. 0000                   | 1. 2000  | 1. 0000  |
| $X_{32}$ | 0. 8333                   | 1. 0000  | 0. 9000  |
| $X_{33}$ | 1. 0000                   | 1. 1111  | 1. 0000  |
| 备注       | 一致性比率 $CR = 0.0006$ ,检验通过 |          |          |

表 9 主、客观权重及组合权重表

| 一级指标  | $\omega_i$ | $\beta_i$ | $z_i$   | 二级指标     | $\omega_i$ | $\beta_i$ | $z_i$   |
|-------|------------|-----------|---------|----------|------------|-----------|---------|
| $X_1$ | 0. 4500    | 0. 3333   | 0. 3903 | $X_{11}$ | 0. 2257    | 0. 2922   | 0. 2601 |
|       |            |           |         | $X_{12}$ | 0. 1917    | 0. 2314   | 0. 2133 |
|       |            |           |         | $X_{13}$ | 0. 1917    | 0. 2314   | 0. 2133 |
|       |            |           |         | $X_{14}$ | 0. 3909    | 0. 2449   | 0. 3133 |
| $X_2$ | 0. 3000    | 0. 3334   | 0. 3187 | $X_{21}$ | 0. 0966    | 0. 1389   | 0. 1178 |
|       |            |           |         | $X_{22}$ | 0. 1775    | 0. 1271   | 0. 1527 |
|       |            |           |         | $X_{23}$ | 0. 0767    | 0. 1775   | 0. 1186 |
|       |            |           |         | $X_{24}$ | 0. 1484    | 0. 1342   | 0. 1435 |
|       |            |           |         | $X_{25}$ | 0. 1951    | 0. 1677   | 0. 1839 |
|       |            |           |         | $X_{26}$ | 0. 1493    | 0. 1289   | 0. 1410 |
|       |            |           |         | $X_{27}$ | 0. 1563    | 0. 1258   | 0. 1426 |
| $X_3$ | 0. 2500    | 0. 3333   | 0. 2909 | $X_{31}$ | 0. 3534    | 0. 4689   | 0. 4163 |
|       |            |           |         | $X_{32}$ | 0. 3022    | 0. 3674   | 0. 3408 |
|       |            |           |         | $X_{33}$ | 0. 3444    | 0. 1637   | 0. 2429 |

表 10 评价指标风险综合关联度

| 关联度              | $u_1$               | $u_2$     | $u_3$     | $u_4$     | $u_5$     | 等级<br>评定 |
|------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| $K_{ui}(X_{11})$ | - 0. 4792           | - 0. 2500 | - 0. 3750 | - 0. 0833 | - 0. 3750 | $u_4$    |
| $K_{ui}(X_{12})$ | - 0. 4803           | - 0. 2900 | 0. 0250   | 0. 0500   | - 0. 3550 | $u_4$    |
| $K_{ui}(X_{13})$ | - 0. 4803           | - 0. 2900 | 0. 0250   | 0. 0500   | - 0. 3550 | $u_4$    |
| $K_{ui}(X_{14})$ | - 0. 6292           | - 0. 4500 | - 0. 6750 | - 0. 6833 | - 0. 1250 | $u_5$    |
| $K_{ui}(X_{21})$ | - 0. 5542           | - 0. 3500 | - 0. 5250 | - 0. 3833 | - 0. 1250 | $u_5$    |
| $K_{ui}(X_{22})$ | - 0. 5542           | - 0. 3500 | - 0. 5250 | - 0. 3833 | - 0. 1250 | $u_5$    |
| $K_{ui}(X_{23})$ | - 0. 5125           | - 0. 1500 | - 0. 3250 | - 0. 0500 | - 0. 3500 | $u_4$    |
| $K_{ui}(X_{24})$ | - 0. 5125           | - 0. 1500 | - 0. 3250 | - 0. 0500 | - 0. 3500 | $u_4$    |
| $K_{ui}(X_{25})$ | - 0. 5500           | - 0. 2001 | - 0. 4000 | - 0. 2000 | - 0. 2500 | $u_4$    |
| $K_{ui}(X_{26})$ | - 0. 5125           | - 0. 1500 | - 0. 3250 | - 0. 0500 | - 0. 3500 | $u_4$    |
| $K_{ui}(X_{27})$ | - 0. 5125           | - 0. 1500 | - 0. 3250 | - 0. 0500 | - 0. 3500 | $u_4$    |
| $K_{ui}(X_{31})$ | - 0. 5542           | - 0. 3500 | - 0. 5250 | - 0. 3833 | - 0. 1250 | $u_5$    |
| $K_{ui}(X_{32})$ | - 0. 5167           | - 0. 3000 | - 0. 4500 | - 0. 2333 | - 0. 2750 | $u_4$    |
| $K_{ui}(X_{33})$ | - 0. 5300           | - 0. 3000 | - 0. 3500 | - 0. 1667 | - 0. 2250 | $u_4$    |
| 备注               | $i = 1, 2, 3, 4, 5$ |           |           |           |           |          |

(6) 多级可拓综合评价。多级可拓综合评价为:

① 一级可拓综合评价。基于式(20),表 9、表 10 内容进行一级可拓综合评价,具体如下:

$B_1 = Z_1 \cdot K_1 = (- 0. 5267, - 0. 3297, - 0. 2984, - 0. 2144, - 0. 2881)$

$B_2 = Z_2 \cdot K_2 = (- 0. 5307, - 0. 2133, - 0. 3929, - 0. 1677, - 0. 2708)$

$B_3 = Z_3 \cdot K_3 = (- 0. 5355, - 0. 3208, - 0. 4569, - 0. 2796, - 0. 2004)$

② 二级可拓综合评价。基一级可拓综合评价结果,进行二级可拓综合评价,具体如下:

$B = Z \cdot K = (- 0. 5305, - 0. 2900, - 0. 3746, - 0. 2185, - 0. 2570)$

(7) 结果分析。根据最大隶属度原则可知,一级评价指标管理风险  $X_1$ 、管廊本体及设备设施风险  $X_2$ 、环境因素风险  $X_3$  分别隶属于  $u_4$  级、 $u_4$  级、 $u_5$  级,即:风险分别为较高、较高、高;项目总体运营风险为  $u_4$  级,即:风险较高。

4 结论与建议

(1) 地下综合管廊项目运行维护过程中存在的风险因素较多、较为复杂,除考虑管廊本体及入廊设备设施风险外,还要考虑环境及管理等方面的潜在风险。对主要风险进行识别,构建数学模型对风险进行准确的评价,根据风险所处安全等级有针对性的采取应对措施,可以大大降低风险发生概率,减少风险带来的损失。

(2) 本文运用层次分析法对各风险评价指标相对重要性做初始判断,进行量化处理,获得指标主观权重值。运用信息熵权重对主观权重值进行修正,获得最终权重。基于信息熵的组合赋权兼顾了主、客观赋权的优势,充分考虑了专家经验及评价指标所包含信息,提高了评价结果的准确性。

(3) 基于信息熵组合赋权与可拓理论构建地下综合管廊项目运行维护风险评价模型,运用该模型对 A 市地下综合管廊项目运行维护风险进行实例研究,得出一级评价指标管理风险、管廊本体及设备设施风险、环境因素风险状态分别为较高、较高、高,项目总体运营风险较高的结论。该项目运行维护风险较高,建议建立完善的管廊管理规章制度,加强管理人员组织协调及应急能力,对管廊本体、设备设施及环境中存在的风险制定相应措施加以应对。

## 参考文献:

- [1] 朱邦范,陈立飞,杜晓庆,等.盾构法在哈尔滨化工路综合管廊中的应用研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(3):459-464.
- [2] 刘志军,朱明星,王胜年,等.软土地区某地下综合管廊工程基坑设计优化分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):172-175,180.
- [3] 张景威,周晶.地下综合管廊结构的易损性分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(3):48-53.
- [4] 蒋雅丽.基于 BIM4D 的综合管廊工程施工进度管理[D].西安:西安理工大学,2018.
- [5] 孙书伟,朱本珍,马宁.城市地下综合管廊开挖方法及设计参数分析[J].铁道工程学报,2019,36(3):61-66.
- [6] 有维宝,王建波,张樵民,等.基于 TOPSIS - UI 的城市地下综合管廊 PPP 项目风险分担[J].土木工程与管理学报,2019,36(2):186-194.
- [7] 李芊,段雯,许高强.基于 DEMATEL 的综合管廊运维管理风险因素研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(1):31-39.
- [8] 陈丽.城市地下综合管廊运营阶段风险管理研究[J].现代建筑电气,2019,10(1):48-52.
- [9] 和晓丹.我国城市综合管廊 PPP 项目运维管理研究[J].徐州:中国矿业大学,2017.
- [10] 陈雍君,李宏远,汪雯娟,等.基于贝叶斯网络的综合管廊运维灾害风险分析[J].安全与环境学报,2018,18(6):2109-2114.
- [11] 刘玉梅,郭海滨,张程城,等.基于灰色聚类的地下综合管廊项目运营风险评价研究[J].价值工程,2018(26):121-125.
- [12] 袁欣然,许淑惠,李磊,等.我国台湾地区和大陆地区综合管廊运维管理对比分析[J].市政技术,2019,37(1):172-174.
- [13] 郭佳奇,钱源,王珍珍,等.城市地下综合管廊常见运维灾害及对策研究[J].灾害学,2019,34(1):27-33.
- [14] 翁玉峰,张立新.关于综合管廊可视化运营与管理信息平台的建设实践与剖析[J].公路,2018,63(12):202-205.
- [15] 龚剑,胡乃联,崔翔,等.基于 AHP - TOPSIS 评判模型的岩爆倾向性预测[J].岩石力学与工程学报,2014,33(7):1442-1448.
- [16] 姜安民,董彦辰,吴洋,等.三标度 AHP - 熵优化组合赋权法在 PPP 项目风险评价中的应用[J].工程管理学报,2017,31(5):62-67.
- [17] 曹未,蒲光杰.基于 AHP - 熵权的模糊物元模型在 DSM 效果综合评价中的运用[J].电力与能源,2015,36(5):617-623.
- [18] 陈蓉芳,姜安民,董彦辰,等.基于熵权可拓模型的深大基坑施工风险评估[J].数学的实践与认识,2019,49(2):311-319.

(上接第 45 页)

- [15] 袁亮.三维重建过程中的点云数据配准算法的研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
- [16] 刘尚蔚,朱小超,张永光,等.多片点云数据拼接处理技术的研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):121-124.
- [17] Oppikofer T, Jaboyedoff M, Blikra L, et al. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2009,9(3):1003-1019.
- [18] 朱永全.隧道稳定性位移判别准则[J].中国铁道科学,2001(6):81-84.
- [19] 王启耀.陡倾角层状岩体中大型地下洞室群围岩变形的预报与控制[D].上海:同济大学,2003.
- [20] 刘文斐.地下开挖空间岩体工程质量评价及支护方案优化技术研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [21] 陈改霞.成功岭隧道洞口段施工方法与支护参数的研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [22] Read R S. 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004,41(8):1251-1275.
- [23] Martin C D, Christiansson R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009,46(2):219-228.
- [24] 王奖臻,黄润秋,许模.金沙江下游白鹤滩水电站岩体结构的建造特征[J].地球科学进展,2004(S1):66-69.