

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221593

# 基于物元理论的综合管廊下穿河流盾构施工风险评价

何 锋<sup>1</sup>, 胡少华<sup>1</sup>, 章 光<sup>1</sup>, 周鑫隆<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070; 2. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 为准确评价综合管廊下穿河流盾构施工安全性,降低施工过程中的安全事故发生率,基于风险分解结构法(RBS)构建了包括工程地质风险、综合管廊自身风险、周边环境风险、施工管理风险4个一级指标的风险评价指标体系;基于区间数层次分析法与指标相关性法(CRITIC)线性组合赋权确定综合权重,并基于物元理论计算出加权平均联系度进而确定最终评价结果,将该方法用于岳阳大道污水处理综合管廊工程下穿王家河段,采用蒙特卡罗法在物元理论的基础上对15个基础指标进行敏感性分析。研究表明,岳阳大道污水处理综合管廊工程下穿王家河段施工工程为中风险,与实际情况相吻合;由敏感度分析得出围岩强度、管廊埋深两个因素较为敏感,研究结果可为工程的安全控制决策与措施制定提供依据。

**关键词:** 综合管廊; 风险评价; 组合赋权; 物元理论; 蒙特卡罗法

**中图分类号:** TV554

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)07-0154-04

## 1 引言

开展综合管廊下穿河流盾构施工风险评价,对于保障盾构施工过程中的安全性和稳定性具有重要意义。目前,关于水下盾构施工过程中引起的风险的研究成果较丰富,但针对综合管廊下穿河流盾构施工过程尚未形成一套科学完整的评价体系。此外,各指标权重多采用单一方法确定,受主观影响显著。本文在综合考虑综合管廊下穿河流盾构施工全过程并结合相关标准规范的基础上,基于RBS法<sup>[1]</sup>构建综合管廊下穿河流盾构施工风险评价指标体系,采用区间数层次分析法<sup>[2]</sup>与CRITIC法<sup>[3]</sup>分别确定主客观权重并进行组合赋权以克服单一方法造成的不足,基于物元理论得到各评价对象的加权平均联系度进而确定评估对象的风险等级,最后在物元理论的基础上结合蒙特卡罗模拟分析基础指标的敏感性<sup>[4]</sup>,找出敏感因素,以期为后续综合管廊下穿河流盾构施工过程中的防护工作提供理论依据。

## 2 综合管廊下穿河流盾构施工评价指标体系及标准

### 2.1 基于RBS法的综合管廊下穿河流盾构施工风险评价指标体系构建

风险分解结构(RBS)是指将可能发生的较大的风险源逐步分级成各种更为精确的小风险因素,直到风险太小可忽略即停止分解的一种方法。在综合考虑综合管廊下穿河流盾构施工全过程并结合相关标准规范基础上,基于RBS法将综合管廊下穿河流盾构施工风险源分解为工程地质风险、综合管廊自身风险、周边环境风险、施工管理风险4类风险,再结合实际工程,从此4类风险出发再进行风险结构分解逐步确定下穿河流盾构施工过程风险影响因素,从而构建综合管廊下穿河流盾构施工风险指标体系,见图1。

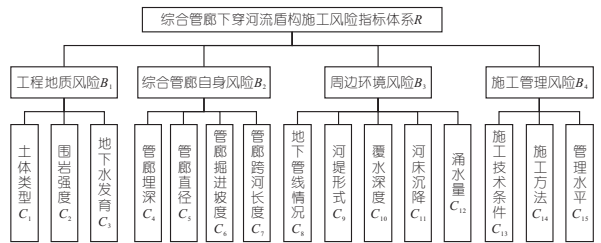


图1 综合管廊下穿河流盾构施工风险指标体系

Fig. 1 Construction risk index system of shield tunneling under integrated pipe gallery

收稿日期: 2022-08-02, 修回日期: 2022-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108315);湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目(Q20211404);湖北省自然科学基金项目(2021CFB286)

作者简介: 何锋(1998-),男,硕士研究生,研究方向为工程安全与应急管理,E-mail:907048143@qq.com

通讯作者: 胡少华(1986-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为工程安全与应急管理,E-mail:sh\_kxin@whu.edu.cn

## 2.2 综合管廊下穿河流盾构施工风险评价等级标准划分

参考《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》(GB 50652-2011)<sup>[5]</sup>并考虑评价要求,将综合管廊下穿河流盾构施工风险等级划分为 5 级。各指标标准值的确定参考《铁路隧道设计规范》(TB10003-2016)<sup>[6]</sup>、《城市轨道交通工程安全控制技术规范》(GB/T 50839-2013)<sup>[7]</sup>等规范并结合现场调研及专家经验确定,其中定量指标实测值来源于工程实际工况与工程实际测量,定性指

标数值由专家打分,最终确定出综合管廊下穿河流盾构施工风险评价指标安全等级划分标准及其量值范围,见表 1。

## 3 基于物元理论的综合管廊下穿河流盾构施工风险评价模型

### 3.1 组合权重的确定

(1)主观权重确定。为降低判断产生的不确定性影响,引入区间数决策理论,将其与层次分析

表 1 指标等级划分

Tab. 1 Index grade division

1 级评价 指标	2 级评价 指标	评价指标等级区间划分				
		I (极低风险)	II (低风险)	III (中等风险)	IV (高风险)	V (极高风险)
工程地质风险 $B_1$	土体类型 $C_1$	(80~100)	(60~80)	(40~60)	(20~40)	(0~20)
	围岩强度 $C_2$	(80~100)	(60~80)	(40~60)	(20~40)	(0~20)
	地下水发育 $C_3$	(80~100)	(60~80)	(40~60)	(20~40)	(0~20)
综合管廊自身风险 $B_2$	管廊埋深 $C_4/m$	28~40	18~28	12~18	6~12	0~6
	管廊直径 $C_5/m$	0~5	5~8	8~12	12~16	16~20
	管廊掘进坡度 $C_6/\%$	0~10	10~20	20~30	30~40	40~60
	管廊跨河长度 $C_7/m$	0~50	50~100	100~200	200~400	400~600
周边环境风险 $B_3$	地下管线情况 $C_8$	(80~100)	(60~80)	(40~60)	(20~40)	(0~20)
	河堤形式 $C_9$	(80~100)	(60~80)	(40~60)	(20~40)	(0~20)
	覆水深度 $C_{10}/m$	0~2	2~5	5~8	8~12	12~15
	河床沉降 $C_{11}/mm$	0~5	5~10	10~20	20~25	25~30
	涌水量 $C_{12}/(L \cdot s^{-1})$	0~10	10~50	50~70	70~100	100~120
施工管理风险 $B_4$	施工技术条件 $C_{13}$	(80~100)	(60~80)	(40~60)	(20~40)	(0~20)
	施工方法 $C_{14}$	(80~100)	(60~80)	(40~60)	(20~40)	(0~20)
	管理水平 $C_{15}$	(80~100)	(60~80)	(40~60)	(20~40)	(0~20)

法相结合。具体步骤参考文献[2]。

(2)客观权重确定。CRITIC 法是一种客观赋权法,该方法既可考虑指标的对比强度,又可考虑指标间的冲突性,其中指标的对比强度通过指标的标准差来衡量,指标间的冲突性通过指标间的相关性来体现。因此,本文将 CRITIC 法运用到盾构施工风险评价问题中,以此来确定指标的客观权重  $\bar{w}$ ,其计算公式为:

$$\bar{w} = c_j / \sum_{j=1}^m c_j \quad (1)$$

其中  $c_j = \sigma_j \sum_{k=1}^m (1 - p_{jk})$

式中,  $m$  为指标的个数;  $\sigma_j$  为第  $j$  个指标样本数据的标准差;  $p_{jk}$  为第  $j, k$  个指标样本数据间的皮尔逊相关系数。

(3)组合权重确定。为弥补单一赋权方法存在的弊端,使最终权重结果更加科学合理,采用线性组合赋权方法,将区间层次分析法确定的主观权重与 CRITIC 法确定的客观权重进行线性耦合,从而得到各项风险指标的综合权重值  $\omega_j$  为:

$$\omega_j = \alpha\omega_j^1 + \beta\omega_j^2 \quad (2)$$

式中,  $\omega_j^1, \omega_j^2$  分别为区间层次分析法和 CRITIC 法确定的权重;  $\alpha, \beta$  分别为比例系数,一般均取 0.5。

### 3.2 物元理论确定风险等级

综合管廊下穿河流盾构施工风险评价是一个复杂问题,其影响因素来源众多,既独立作用,又互相约束,且具有较强的不确定性,而物元理论可将矛盾问题转化为相容问题,能更好地解决多属性、相排斥、定性与定量的综合评价问题<sup>[8]</sup>,故本文基于物元理论评价综合管廊下穿河流盾构施工过程风险。具体过程如下。

(1)确定经典域、节域、待评物元。由表 1 的评价指标风险等级划分标准可知,风险评价指标用  $B = (B_1, B_2, \dots, B_n) (n = 1, 2, \dots, k)$  表示,其中  $B_n$  又可以继续划分为  $B_n = (C_1, C_2, \dots, C_\beta) (\beta = 1, 2, \dots, m)$ , 则经典域物元  $R_{0j}$  为:

$$R_{0j} = (N_{0j}, C_\beta, V_{0j\beta}) \quad j = 1, 2, \dots, t \quad (3)$$

式中,  $N_{0j}$  为盾构施工风险共划分为  $j$  个评价等级;  $V_{0j\beta}$  为  $N_{0j}$  关于指标  $C_\beta$  的量值范围。

节域  $R_{0p}$  为:

$$R_{0p} = (N_{0p}, C_\beta, V_{0p\beta}) \quad (4)$$

式中,  $N_{0p}$  为评价等级的全体;  $V_{0p\beta}$  为  $N_{0p}$  关于指

标  $C_\beta$  的量值范围。

待评物元  $R_0$  为：

$$R_0 = (N_0, C_i, V_{0i}) = \begin{pmatrix} N_0 & C_1 & V_{01} \\ & C_2 & V_{02} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_m & V_{0m} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中,  $N_0$  为待评价对象;  $V_{0i}$  为  $N_0$  对应指标  $C_i$  的量值。

(2) 计算关联函数。为定量描述物元特征, 引入距的概念以确定各项风险指标关于各风险等级的关联度, 则 2 级指标  $C_\beta$  关于第  $j$  个评价等级的关联度  $K_j(v_{n\beta})$  可表示为:

$$K_j(v_{n\beta}) = \frac{p(v_{n\beta}, v_{nj\beta})}{p(v_{n\beta}, v_{np\beta}) - p(v_{n\beta}, v_{nj\beta})} \quad (6)$$

其中  $p(v_{n\beta}, v_{nj\beta}) = |v_{n\beta} - (a_{nj\beta} + b_{nj\beta})/2| - (b_{nj\beta} - a_{nj\beta})/2$ ;  $p(v_{n\beta}, v_{np\beta}) = |v_{n\beta} - (a_{np\beta} + b_{np\beta})/2| - (b_{np\beta} - a_{np\beta})/2$

式中,  $v_{n\beta}$ 、 $v_{nj\beta}$  分别为指标具体量值、指标整个量值范围;  $a_{nj\beta}$ 、 $b_{nj\beta}$  分别为指标关于第  $j$  个评价等级量值范围上下限;  $a_{np\beta}$ 、 $b_{np\beta}$  分别为指标整个量值范围上下限。

其次计算 2 级指标  $B_0$  关于风险评价等级  $j$  的关联度  $K_{nj}(B_0)$  为:

$$K_{nj}(B_0) = \sum_{\beta=1}^m Q_{n\beta} K_j(v_{n\beta}) \quad (7)$$

式(7)中  $\sum_{\beta=1}^m Q_{n\beta} = 1$  表示风险指标  $C_\beta$  的权重值。

(3) 综合风险评估。计算总指标关于不同风险等级的综合关联度  $K_j(N)$ :

$$K_j(N) = \sum_{n=1}^k Q_n K_{nj}(B_n) \quad (8)$$

式(8)中  $\sum_{n=1}^k Q_n = 1$  表示风险指标  $B_n$  的权重值。若  $K_{j_0} = \max\{K_j(N)\}$ , 则代表其盾构施工风险属于等级  $j_0$ 。

### 3.3 蒙特卡罗模拟确定敏感因素

蒙特卡罗敏感性分析方法能够反映总指标对各 2 级指标微小变化的敏感程度, 从而确定对总指标贡献度较大的关键风险因素, 在物元理论的基础上采用蒙特卡罗模拟分析各风险等级敏感性, 找出各风险等级下对总指标影响程度较大的基础指标, 蒙特卡罗方法基本步骤为归一化处理、建立蒙特卡罗分析模型、概率分布图和各指标的敏感性分析。

## 4 实例分析

### 4.1 工程概况

岳阳大道综合管廊工程沿岳阳大道从中心向东至王家河大桥西侧, 全长约 4.56 km。其中王家河段隧道拱顶埋深 10.5~18.0 m。区间地层由上往下依次为杂填土、粉质粘土、强风化板岩、中风化板岩、微风化板岩。线路以 +5%、+12%、+20%、-7%、-24%、-27%、-30% 等主要坡度穿过王家河, 途中下穿王家河施工段风险高, 作业难度大, 风险级别为 III 级属于中风险, 是岳阳大道污水处理综合管廊工程施工的重点和重大风险段。故评估其施工过程风险对保障工程安全有重要意义。

### 4.2 权重计算及风险定级

根据已建立的风险评价指标体系, 基于区间数层次分析法计算出主观权重, 基于 CRITIC 法计算出客观权重, 并采用线性组合赋权方法得到盾构施工风险指标的综合权重, 相关方法的权重计算结果及各评价对象的指标数据值见表 2。

表 2 评价指标权重计算结果

1 级评价指标	2 级评价指标	评价指标数据值	主观权重	客观权重	综合权重
工程地质风险 $B_1$	土体类型 $C_1$	45	0.057	0.033	0.045
	围岩强度 $C_2$	70	0.114	0.079	0.097
	地下水发育 $C_3$	65	0.029	0.088	0.058
综合管廊自身风险 $B_2$	管廊埋深 $C_4/m$	14.5	0.106	0.145	0.125
	管廊直径 $C_5/m$	11	0.056	0.054	0.055
	管廊掘进坡度 $C_6/\%$	31	0.033	0.046	0.039
周边环境风险 $B_3$	管廊跨河长度 $C_7/m$	175	0.106	0.055	0.080
	地下管线情况 $C_8$	57	0.113	0.088	0.101
	河堤形式 $C_9$	55	0.060	0.034	0.047
施工管理风险 $B_4$	覆水深度 $C_{10}/m$	6	0.037	0.048	0.042
	河床沉降 $C_{11}/mm$	14	0.065	0.048	0.057
	涌水量 $C_{12}/(L \cdot s^{-1})$	60	0.024	0.082	0.053
管理风险 $B_4$	施工技术条件 $C_{13}$	58	0.044	0.043	0.044
	施工方法 $C_{14}$	69	0.133	0.098	0.116
	管理水平 $C_{15}$	75	0.023	0.059	0.041

根据表 1 的各评价等级划分标准和式(7)可得到各评价指标关于各风险评价等级的关联度见表 3, 后根据表 2、3 及式(7)、(8)得盾构施工风险多级评估结果, 见表 4。

由表 4 可知, 盾构施工总风险中  $K_3(N)$  最大, 故岳阳大道综合管廊下穿河流盾构施工总体风险等级为“三级”, 属于中风险, 与工程实际施工风险情况相吻合。1 级指标中工程地质风险、施工管理风险为低风险, 说明本工程的地质情况和施工管理水平较好。综合管廊自身风险、周边环境风险为中风险, 出现这种情况的主要原因是管廊埋深较浅、管廊掘进坡度较大, 因为管廊埋深较浅易导致塌方和涌水等风险事件发生, 掘进坡度

表 3 各评价指标关联度

Tab. 3 Correlation degree of each evaluation index

1 级评价指标	2 级评价指标	评价等级				
		极低风险	低风险	中等风险	高风险	极高风险
工程地质风险 $B_1$	土体类型 $C_1$	-0.438	-0.250	0.125	-0.100	-0.357
	围岩强度 $C_2$	-0.250	0.500	-0.250	-0.500	-0.625
	地下水发育 $C_3$	-0.300	0.167	-0.125	-0.417	-0.563
综合管廊自身风险 $B_2$	管廊埋深 $C_4/m$	-0.482	-0.194	0.208	-0.147	-0.370
	管廊直径 $C_5/m$	-0.400	-0.250	0.125	-0.100	-0.357
	管廊掘进坡度 $C_6/‰$	-0.420	-0.275	-0.033	0.036	-0.237
	管廊跨河长度 $C_7/m$	-0.417	-0.300	0.167	-0.125	-0.563
周边环境风险 $B_3$	地下管线情况 $C_8$	-0.400	-0.250	0.500	-0.250	-0.400
	河堤形式 $C_9$	-0.368	-0.143	0.200	-0.400	-0.520
	覆水深度 $C_{10}/m$	-0.538	-0.400	0.200	-0.417	-0.333
	河床沉降 $C_{11}/mm$	-0.391	-0.222	0.400	-0.300	-0.440
	涌水量 $C_{12}/(L \cdot s^{-1})$	-0.455	-0.143	0.200	-0.143	-0.400
施工管理风险 $B_4$	施工技术条件 $C_{13}$	-0.344	-0.045	0.050	-0.300	-0.475
	施工方法 $C_{14}$	-0.262	0.409	-0.225	-0.483	-0.613
	管理水平 $C_{15}$	-0.167	0.250	-0.375	-0.583	-0.688

表 4 下穿河流盾构施工风险多级评估结果

Tab. 4 Multistage assessment results of river crossing risk under shield construction

1 级评价指标	$K_1(N)$	$K_2(N)$	$K_3(N)$	$K_4(N)$	$K_5(N)$	$J^0$
工程地质风险 $B_1$	-0.307	0.234	-0.129	-0.386	-0.546	2
综合管廊自身风险 $B_2$	-0.441	-0.243	0.150	-0.109	-0.401	3
周边环境风险 $B_3$	-0.423	-0.230	0.338	-0.288	-0.417	3
综合管廊自身风险 $B_4$	-0.260	0.277	-0.195	-0.464	-0.598	2
盾构施工总风险 $B$	-0.373	-0.040	0.082	-0.289	-0.474	3

较大,会导致溜车和盾构线路偏离等风险事件,此外覆水深度较深、涌水量较大等因素,也造成了此工程的风险值增大。

### 4.3 蒙特卡罗敏感分析结果

采用蒙特卡罗模拟进行敏感性分析,可以找出关键致险因素,辅助进行安全决策,故本文对综合管廊盾构施工各风险等级进行模拟分析,将 15 个 2 级评价指标设定为分析参数,设定其服从正态分布,为保证分析结果的客观性,定义模拟次数为 1 000 次,根据物元理论计算规则计算 15 个风险因素分别对低、中、高风险时相对应的敏感度。为更好地分析,求出其均值,具体结果见图 2。

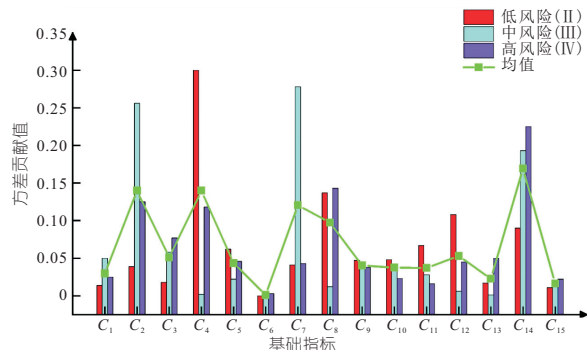


图 2 15 个基础指标的敏感度

Fig. 2 Sensitivity of 15 basic indicators

由图 2 可知,当风险等级为低风险(II)时,管廊埋深( $C_4$ )和地下管线情况( $C_8$ )的敏感性明显

高于其他因素;当风险等级为中风险(III)和高风险(IV)时,管廊跨河长度( $C_7$ )、施工方法( $C_{14}$ )、地下管线情况( $C_8$ )、围岩强度( $C_2$ )等因素敏感性较高,综合来看管廊埋深( $C_4$ )、施工方法( $C_{14}$ )、围岩强度( $C_2$ )三个因素均排在前列,因为综合管廊下穿河流施工时如果埋深深度不够或围岩强度不够易导致塌方和涌水等风险事件发生,不合适的施工方法也会导致风险事件多发,因此对于综合管廊下穿河流盾构施工项目,做好前期的施工方法规划和地质情况调查研究十分重要。

## 5 结论

基于 RBS 法构建了包括 4 个 1 级指标和 15 个 2 级指标的综合管廊下穿河流盾构施工风险评价指标体系。通过对岳阳大道污水处理综合管廊工程下穿王家河段进行实例分析,验证了评价指标体系和风险评价模型的适用性。在物元理论的基础上进行蒙特卡罗敏感性分析,确定了较高的敏感因素,为施工前期的风险管控措施提供了依据。

### 参考文献:

- [1] 宋战平,郭德赛,徐甜,等. 基于非线性模糊层次分析法的 TBM 施工风险评价模型研究[J]. 岩土力学, 2021,42(5):1424-1433.
- [2] 程鑫,朱光华,王世杰,等. 基于区间数决策矩阵的堤防安全综合评价方法及应用[J]. 水电能源科学, 2021,39(4):141-145.
- [3] 王加闯,黄明健,过江. 基于 CRITIC-有限区间云模型的边坡稳定性评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019,15(6):113-119.
- [4] 有维宝,王建波,刘芳梦,等. 基于多级物元分析的地铁站深基坑施工风险评价[J]. 数学的实践与认识, 2021,51(16):111-120.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范:GB50652-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [6] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范:TB10003-2016 [S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程安全控制技术规范:GB/T50839-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [8] JOHNSON EVAN, TARI İKER, BAKER DE-REK. A Monte Carlo method to solve for radiative effective thermal conductivity for particle beds of various solid fractions and emissivities[J]. Journal of quantitative spectroscopy & radiative transfer, 2020,250:107014.

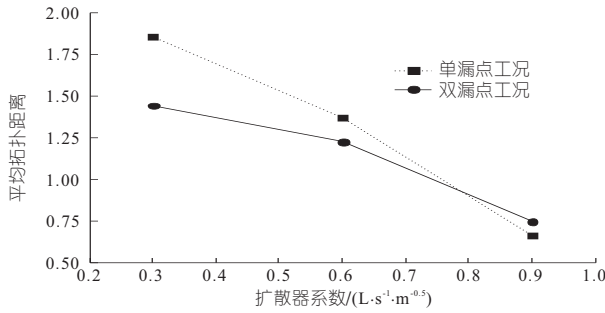


图 3 不同扩散器系数下模型定位偏差对比

Fig. 3 Comparison of model positioning deviation under different diffuser coefficients

模型定位准确度分别提升了 51.5%、64.1%。双漏点工况下,  $k = 0.9 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^{0.5})$  时相比  $k = 0.6, 0.3 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^{0.5})$  的模型定位准确度分别提升了 48.1%、61.6%。

## 5 结论

a. 针对传统单目标漏损定位模型, 提出一种基于 NSGA-II 的供水管网漏损定位多目标优化

模型, 并结合实际管网水力模型验证了该模型的可行性和稳定性, 为漏损定位研究提供了一种参考方法。

b. 比较了不同扩散器系数对模型定位效果的影响, 结果显示, 随着扩散系数增大, 管网流量压力水平的变化更为显著, 模型定位效果得到有效提升。

### 参考文献:

[1] 孟勤超, 杨翠丽, 乔俊飞. 基于改进 SPEA2 算法的给水管网多目标优化设计[J]. 智能系统学报, 2018, 13(1):118-124.  
 [2] 詹书俊, 陶涛. 基于 NSGA-II 的供水管网模型校核[J]. 给水排水, 2013, 39(3):158-160.  
 [3] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE trans. evolutionary computation, 2002, 6(2):182-197.  
 [4] 赵桓, 吕谋, 岳宏宇, 等. 基于群体智能优化算法的供水管网漏损定位研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7):128-130, 75.

## Multi-objective Optimization Model for Leakage Location of Water Supply Network Based on NSGA-II

SU Yan-bo, LV Mou, CHU Yang-yang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** Aiming at the leakage problem of urban water supply network, the traditional leakage location model is solved by single objective optimization method. Its objective function is composed of the weighted sum of optimization objectives. Improper value of weight factor will degrade the model positioning result. This paper proposed a multi-objective optimization model for leakage location of water supply network based on NSGA-II. In this model, the number of leakage point and diffuser coefficient were taken as decision variables, and the minimum error between the actual monitoring value and the simulation value of pressure and flow monitoring point was taken as the optimization objective, and NSGA-II algorithm was used to find the optimal solution. In order to verify the effectiveness of the model, it was applied to the actual water supply network in a residential area. Considering the common fault conditions in the actual operation of the pipe network, the leakage accidents of single node and two nodes were respectively simulated and located. Compared with the two widely used leak location models, the results show that the multi-objective optimization model based on NSGA-II can accurately and stably locate the nearby area where the actual leak occurs.

**Key words:** water supply network; leakage location model; multi-objective optimization; NSGA-II

\*\*\*\*\*  
 (上接第 157 页)

## Construction Risk Evaluation of Shield Tunneling Under Integrated Pipe Gallery Based on Matter-Element Theory

HE Feng<sup>1</sup>, HU Shao-hua<sup>1</sup>, ZHANG Guang<sup>1</sup>, ZHOU Xin-long<sup>2</sup>

(1. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** To accurately evaluate the comprehensive utility tunnel under river shield tunnel construction safety, reduce the safety accidents in the construction process, based on the method of risk breakdown structure (RBS), risk evaluation index system of four first-level indicators was constructed including engineering geological risk and comprehensive utility tunnel itself risk, environment risk, construction risk management. Based on the linear combination of interval number analytic hierarchy process (AHP) and indicator correlation method (CRITIC), the comprehensive weight was determined. Based on matter element theory, the weighted average relation degree was calculated to determine the final evaluation result. This method was applied to the comprehensive pipe corridor project of Yueyang Avenue sewage treatment at the Wangjia River section. Monte Carlo method was used to analyze the sensitivity of 15 basic indexes based on matter-element theory. The research results show that the construction project of Yueyang Avenue sewage treatment comprehensive pipe corridor at Wangjia River section is medium-risk, which is consistent with the actual situation. The sensitivity analysis shows that the surrounding rock strength and the buried depth of tunnel are more sensitive. The research results can provide a basis for the safety control decision and measure making of the project.

**Key words:** comprehensive utility tunnel; risk assessment; combined weighting; matter element theory; Monte Carlo