

地下综合管廊全寿命周期风险评估与分析

张 勇, 张然然

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 参考相关文献和法规, 结合地下综合管廊自身特点, 建立全寿命周期风险评估指标体系; 采用模糊层次分析法(IFAHP)进行风险评估, 得到风险因素总排序, 并利用决策实验和评价实验室法(DEMATEL), 从风险因素内部影响关系入手, 分析关键风险, 找出原因因素和结果因素。结果表明, 原因因素为: 施工方缺乏管廊施工经验, 不可抗力风险, 缺乏相关政策、法规支持, 材料进场检验及保管不到位, 设备进场检验、施工操作及保养不到位, 地下空间和土地的使用权获取难度大; 结果因素为: 安全施工风险; 项目融资难度大, 收费方式选择不合理或未进行及时调整, 运营责任不明确。有利于针对性的风险控制, 降低事故发生率, 为地下综合管廊全寿命周期风险管理提供重要参考。

关键词: 地下综合管廊; 风险评估; 风险分析; 模糊层次分析法(IFAHP); 决策实验和评价实验室法(DEMATEL)

中图分类号: TU714, X947

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0294-07

Life-cycle risk assessment and analysis of underground comprehensive utility tunnel

ZHANG Yong, ZHANG Ranran

(Management School, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: With reference to relevant literature and regulations, combined with the characteristics of the underground comprehensive utility tunnel, the life-cycle risk assessment index system is established. By using IFAHP for risk assessment, a total ranking of risk factors is obtained. DEMATEL method is adopted to analyze the key risks, and both the cause and effect factors are found. Results show that the reasons are: the construction units lack the experience of underground comprehensive utility tunnel. They also lack the ability to resist major risk. Further more without relevant policies and regulations, and with insufficient material inspection and storage, equipment entry inspection, construction operation and maintenance the access to underground space and land are difficult to obtain. The result factors include safety construction risk; unreasonable change of method or untimely adjustment difficult project financing the charging method is unreasonable or not adjusted in time, the operational responsibility is not clear. It is conducive to target risk control, reduce the incidence of accidents, and provide an important reference for the life-cycle risk management of underground comprehensive utility tunnel.

Key words: the underground comprehensive utility tunnel; risk assessment; risk analysis; IFAHP; DEMATEL

近年来,“马路拉链”“空中蜘蛛网”等现象频发,地下综合管廊可将各类市政管线收纳入廊,统筹规划,统一管理,有效解决此种现状,提升城市形象,因此,我国积极设立试点城市,以探索地下综合管廊建设。同时,《国务院办公厅关于推进城市地下综合管廊建设的指导意见》(国办发[2015]61号)中要求全面推动地下综合管廊建设。地下综合管廊具有建设周期长、资金投入量大、投资回收期长的特点,且我国地下综合管廊建设尚处于探索阶段,技术与管理难点众多,因此,其全寿命周期内存在大量风险因素,极易导致项

目失败,影响经济与社会效益。研究地下综合管廊全寿命周期潜在风险,做好应急预案,有利于项目的安全建设和推广。

目前,国内外学者对地下综合管廊风险的研究涉及规划、设计、施工、运维各个阶段,但缺乏全寿命周期风险的系统研究。Canto . Perello J 等^[1]识别了地下综合管廊中的人为风险因素,提出有利于员工适应隧道工作环境的规划建议;杨秋侠等^[2]构建地下综合管廊中心线定位优化模型,为降低规划风险提供新思路;邵帅等^[3]以大连市某地下综合管廊穿越既有铁路为例,介绍穿越既有铁

收稿日期: 2018-09-12

修改稿日期: 2019-03-28

基金项目: 陕西省重点研发计划—重点项目(2018ZDXM-SF-096)

第一作者: 张 勇(1965—),男,博士,教授级高工,主要从事项目管理、地下综合管廊等方面的研究。Email: xadayong@126.com

通讯作者: 张然然(1993—),女,硕士,主要从事工程经济与管理等方面的研究。E-mail: 1612350054@qq.com

路路段的加固设计和施工要点, 具有理论和实践意义; 桂小琴等^[4]通过“囚徒困境”模型和激励理论对地下综合管廊建设资金分摊问题及激励机制进行了研究, 有利于降低运维风险; 刘慧慧等^[5]采用 VFM 评价 PPP 模式下的地下综合管廊全寿命周期成本风险; 李芊等^[6]归类、说明了地下综合管廊全寿命周期各个阶段风险因素, 并提出风险策略建议; 韦海民等^[7]识别并过滤分析地下综合管廊施工阶段的风险因素。

现有的地下综合管廊风险研究均将风险因素看成独立个体, 且主要集中在因素识别和风险应对方面, 缺乏因素内部影响关系及风险分析的相关研究。地下综合管廊全寿命周期风险因素众多, 其内部影响会随着项目的进展不断加深, 极易引发

工程事故, 造成经济损失和人员伤亡。对地下综合管廊全寿命周期风险因素进行准确的评估与分析, 找出关键风险因素, 分析其内部关联关系, 有利于针对性地进行风险控制, 降低项目事故发生率。

1 风险识别及数据收集

1.1 风险识别

风险识别是风险评估、分析的前提和基础, 全面、客观、准确的风险识别, 有利于提高评估和分析结果的准确性。参考《城市综合管廊工程技术规范》(GB50838—2015) 和相关文献, 结合地下综合管廊工程特点, 从全寿命周期角度入手, 归纳整理风险因素, 确定 4 个一级指标和 32 个二级指标, 最终得出风险指标体系^[2-8], 如表 1 所示。

表 1 地下综合管廊全寿命周期风险指标体系及调查问卷原始数据汇总表

Tab. 1 Life-cycle risk indicator system of underground comprehensive utility tunnel and original data summary of questionnaires

一级指标 B		二级指标 C	$P_{i,1}$	$P_{i,2}$	$P_{i,3}$	$P_{i,4}$	$P_{i,5}$	均值
地下综合管廊全寿命周期风险 A	策划阶段 风险 B ₁	项目融资难度大 C ₁	0	9	19	18	52	4.15
		地下空间和土地的使用权获取难度大 C ₂	1	5	12	10	70	4.46
		缺乏相关政策、法规支持 C ₃	3	3	13	20	59	4.32
	规划设计 阶段风险 B ₂		0	1	15	19	63	4.47
			2	7	48	25	16	3.47
		总体规划方案不合理 C ₄	1	1	11	38	47	4.32
		入廊管线选取不合理 C ₅	8	10	17	20	43	3.82
		管廊设计规模不合理 C ₆	7	5	13	16	57	4.13
		参与方沟通不到位 C ₇	0	3	19	21	55	4.31
		设计方缺乏管廊设计经验 C ₈	4	5	16	23	50	4.12
		计方案质量问题 C ₉	10	10	15	18	45	3.80
		设计方案施工可行性差 C ₁₀	10	15	20	10	43	3.62
		管廊设计技术规范缺乏 C ₁₁	7	18	25	13	35	3.52
	施工阶段 风险 B ₃		0	7	14	16	61	4.34
		施工条件差 C ₁₂	0	3	7	20	68	4.56
		技术人员和管理人员水平低 C ₁₃	5	10	12	27	44	3.97
		建设方缺乏管廊管理经验 C ₁₄	1	17	16	35	29	3.76
		施工方缺乏管廊施工经验 C ₁₅	2	4	17	23	52	4.21
		监理方缺乏管廊监理经验 C ₁₆	3	16	19	25	35	3.74
		施工方案不合理或未得到有效执行 C ₁₇	0	1	14	29	54	4.39
		施工组织设计不合理或未得到有效执行 C ₁₈	1	2	13	38	44	4.24
		材料/设备进场不及时 C ₁₉	8	12	5	34	39	3.86
		材料进场检验及保管不到位 C ₂₀	3	5	13	27	50	4.18
		设备进场检验、施工操作及保养不到位 C ₂₁	1	5	10	29	53	4.31
		管廊验收规范缺乏 C ₂₂	10	14	13	26	35	3.63
		安全施工风险 C ₂₃	4	2	12	33	47	4.19
		施工质量问题 C ₂₄	11	12	18	27	30	3.54
		项目未按期完工 C ₂₅	16	5	12	33	32	3.61
		施工成本超出预期 C ₂₆	9	10	9	16	54	3.98
		工程变更风险 C ₂₇	4	10	8	20	56	4.16
		不可抗力风险 C ₂₈	0	4	15	29	50	4.28
	移交运营 阶段风险 B ₄		5	8	24	44	17	3.61
		管线单位入廊意愿低 C ₂₉	20	8	14	23	33	3.42
		收费方式选择不合理或未进行及时调整 C ₃₀	0	4	15	19	60	4.38
		管廊设备维护不到位 C ₃₁	2	10	12	21	53	4.15
		运营责任不明确 C ₃₂	2	3	18	20	55	4.26

注: $P_{i,j}$ 表示在所有有效问卷中, 对第 i 个风险因素的评价值为 j 的数量

1.2 问卷设计及数据收集

本文主要研究地下综合管廊建设过程中的风险因素及其重要程度,计算相关权重,实现风险分析.为保证研究结果的有效性,采用问卷调查法对相关人员进行调研,获取可靠资料.问卷包括四个部分:引言、被调查者基本信息、风险因素重要性打分、开放性问题的.其中,第三部分为问卷的核心部分,分值设计和打分标准为:非常不重要计1分,比较不重要计2分,一般重要计3分,比较重要计4分,非常重要计5分,且该部分对风险因素进行了解释说明,保证被调查者对风险因素的理解和认知保持一致;开放性问题的主要针对问卷存在的不足提出意见或建议.

采用现场发放方式,共计发放问卷120份,回收107份,删除有明显规律和严重缺项的问卷9份,得有效问卷98份,有效回收率81.67%.从被调查者基本资料来看(如表2),被调查者受教育程度相对较高,对地下综合管廊风险因素理解无障碍,数据来源相对合理.

在问卷数据使用前,为保证其有效性,需进行可靠性检验. Cronbach's Alpha系数,即 α 系数是目前最常见的检验数据可靠性的方法,本文沿用此方法. α 系数的取值范围为0~1,取值越大,则问卷数据内部一致性越大,可靠性越高.一般认为,当 $0.7 < \alpha < 0.9$ 时,问卷数据高度可信.采用SPSS 20.0计算 α 系数,经计算,地下综合管廊

全寿命周期4个阶段的 α 系数分别为0.795、0.801、0.833、0.786,均大于0.75,故可靠性较高,可用于下一步的风险评估与分析.对问卷原始数据进行汇总,汇总结果如表1所示.

2 基于IFAHF的地下综合管廊全寿命周期风险评估

2.1 层次结构体系构建

地下综合管廊全寿命周期风险的层次结构体系可划分为A、B、C三个层次,其中,A为目标层,代表地下综合管廊全寿命周期风险;B为一级指标层,即为地下综合管廊全寿命周期4个阶段的风险;C为二级指标层,共包含32个风险因素;层次结构体系图如表1所示.

2.2 确定三种判断矩阵

由表1可得地下综合管廊全寿命周期风险指标的评价得分均值情况,用于构建优先判断矩阵 $M = (m_{ij})_{n \times n}$. 优先判断矩阵的确定采用三标度法,即0代表A比B差,0.5代表A与B相等,1代表A比B优.构建模糊一致性判断矩阵 $L = (l_{ij})_{n \times n}$,求行和 $l_i = \sum_{j=1}^n m_{ij}$,利用转换公式 $l_{ij} = (l_i - l_j) / 2n + 0.5$,将优先判断矩阵转换为模糊一致性判断矩阵.构建互反型判断矩阵 $E = (e_{ij})_{n \times n}$,利用转换公式 $e_{ij} = l_{ij} / l_{ji}$,即可将模糊一致性判断矩阵转换成互反型矩阵.

表2 被调查者资料统计

Tab. 2 Statistics of questionnaires

背景资料内容	分类标准及所占比例					
学历水平	专科	本科	硕士	博士	其他	
	23.47%	44.90%	20.41%	8.16%	3.06%	
工作年限	<5 a	5~10 a	10~15 a	15~20 a	>20 a	
	29.59%	50%	9.19%	8.16%	3.06%	
从事地下综合管廊行业年限	1 a	2 a	3 a	4 a	5 a	>5 a
	15.31%	28.57%	34.69%	15.31%	4.08%	2.04%
参与地下综合管廊项目数量	1个	2个	3个	4个	5个	>5个
	42.86%	20.41%	13.27%	12.24%	6.12%	5.10%

2.3 确定指标权重

采用行和归一化法,即可得出精度较低的排序向量权重,在此基础上,采用乘幂法计算精度较高的排序向量权重.利用叠代法求解方程 $E_{n \times n} V = \lambda_{\max} V_{n \times 1}$,其中 $E_{n \times n}$ 为互反型判断矩阵, λ_{\max} 为矩阵E的最大特征值, $V_{n \times 1}$ 为 λ_{\max} 对应的特征向量;取精度较低的排序向量权重 $W^{(0)}$ 为叠代初值 V_0 ,将其与数值分析中的无穷范数运算相结合,

进一步求出精度较高的排序向量权重 $W^{(K)}$,计算步骤具体如下:

(1)确定绝对误差 $\epsilon = 1/1\ 000$,最大叠代次数 $N = 10$;

(2)确定特征向量的叠代初值 $V_0 = (v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0n})$,则 V_0 的无穷范数 $\|V_0\|^\infty = \max\{v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0n}\}$;

(3)采用叠代公式 $\begin{cases} y_k=v_k/\|v_k\|^\infty \\ y_{k+1}=Ey_k \end{cases}$, 求出特征

向量 v_{k+1} , 进而求出其无穷范数 $\|V_{k+1}\|^\infty$;

(4)若 $\|V_{k+1}\|^\infty - \|V_k\|^\infty < \epsilon$, 则 $\|V_{k+1}\|^\infty$ 为最大特征值 λ_{\max} , 将 V_{k+1} 归一化处理, 叠代结束, 向量 $W^{(K)} = V_{k+1}$ 即为排序向量权重; 否则, $V_K = (V_{K+1,1}/\|V_{K+1}\|^\infty, V_{K+1,2}/\|V_{K+1}\|^\infty, \dots, V_{K+1,N}/\|V_{K+1}\|^\infty)$ 作为新初值, 进行再次叠代。

经过四次叠代, 将精度较低的排序向量转化为精度较高的排序向量:

$W_0^{(4)} = (0.267, 0.084, 0.495, 0.154)^T$, $\lambda_{\max} = \|V_4\|^\infty = 4.015$;

$W_1^{(4)} = (0.276, 0.128, 0.595)^T$, $\lambda_{\max} = \|V_4\|^\infty = 3.005$;

$W_2^{(4)} = (0.302, 0.086, 0.150, 0.204, 0.113, 0.065, 0.048, 0.033)^T$, $\lambda_{\max} = \|V_4\|^\infty = 8.067$;

$W_3^{(4)} = (0.167, 0.031, 0.027, 0.068, 0.036, 0.128, 0.078, 0.031, 0.060, 0.106, 0.020, 0.060, 0.014, 0.017, 0.041, 0.046, 0.068)^T$, $\lambda_{\max} = \|V_4\|^\infty = 17.207$;

$W_4^{(4)} = (0.084, 0.495, 0.154, 0.267)^T$, $\lambda_{\max} =$

$\|V_4\|^\infty = 4.015$.

2.4 总排序

由以上计算结果可知精度较高的排序向量权重值, 从而可得地下综合管廊全寿命周期风险因素重要程度总排序, 见表 3。由表 3 可知, 策划阶段和施工阶段风险因素在地下综合管廊全寿命周期风险中占据重要地位, 二者权重之和占一级指标总权重的 76.2%。在策划阶段风险中, C_3 (缺乏相关政策、法规支持) 为最突出风险因素, 在二级指标排序和总排序中均排在第 1 位, 则政策和法规支持在地下综合管廊建设中起至关重要的作用, 国家及相关部门应出台相应政策, 大力支持地下综合管廊建设。在施工阶段风险中, C_{12} (施工条件差) 为最突出风险因素, 在总排序中排在第 2 位, C_{17} (施工方案不合理或未得到有效执行)、 C_{21} (设备进场检验、施工操作及保养不到位) 也较为重要, 在总排序中排第 5 和第 6 位。由此, 在地下综合管廊施工过程中, 必须确定科学、合理、有效、可实施性强的施工方案且严格执行, 设备进场时须遵照检验标准进行检验, 并规范施工操作及设备保养。

表 3 地下综合管廊全寿命周期风险因素重要程度总排序

Tab. 3 Total ranking of underground utility tunnel life-cycle risk factors according to importance

一级指标及权重	一级排序	二级指标	二级权重	二级排序	综合权重	总排序
策划阶段风险 B_1 0.267	2	C_1	0.276	2	0.074	4
		C_2	0.128	3	0.034	9
		C_3	0.595	1	0.159	1
规划设计阶段风险 B_2 0.084	4	C_4	0.302	1	0.025	14
		C_5	0.086	5	0.007	28
		C_6	0.150	3	0.013	22
		C_7	0.204	2	0.017	19
		C_8	0.113	4	0.009	26
		C_9	0.065	6	0.005	30
		C_{10}	0.048	7	0.004	31
		C_{11}	0.033	8	0.003	32
移交运营阶段风险 B_4 0.154	3	C_{29}	0.084	4	0.013	22
		C_{30}	0.495	1	0.076	3
		C_{31}	0.154	3	0.024	15
		C_{32}	0.267	2	0.041	7
		C_{12}	0.167	1	0.083	2
		C_{13}	0.031	12	0.015	20
		C_{14}	0.027	14	0.013	22
		C_{15}	0.068	5	0.034	9
		C_{16}	0.036	11	0.018	18
		C_{17}	0.128	2	0.063	5
		C_{18}	0.078	4	0.039	8
		C_{19}	0.031	12	0.015	20
施工阶段风险 B_3 0.495	1	C_{20}	0.060	7	0.030	12
		C_{21}	0.106	3	0.052	6
		C_{22}	0.020	15	0.010	25
		C_{23}	0.060	7	0.030	12
		C_{24}	0.014	17	0.007	28
		C_{25}	0.017	16	0.008	27
		C_{26}	0.041	10	0.020	17
		C_{27}	0.046	9	0.023	16
		C_{28}	0.068	5	0.034	9

3 基于 DEMATEL 的地下综合管廊全寿命周期关键风险分析

3.1 确定影响因素集

本文在参考相关文献和法规的基础上,结合我国地下综合管廊建设现状,选取综合指标权重大于 3.0% 的风险因素作为关键风险因素,则关键风险因素为: C_1 (项目融资难度大)、 C_2 (地下空间和土地的使用权获取难度大)、 C_3 (缺乏相关政策、法规支持)、 C_{12} (施工条件差)、 C_{15} (施工方缺乏管廊施工经验)、 C_{17} (施工方案不合理或未得到有效执行)、 C_{18} (施工组织设计不合理或未得到有效执行)、 C_{20} (材料进场检验及保管不到位)、 C_{21} (设备进场检验、施工操作及保养不到位)、 C_{23} (安全施工风险)、 C_{28} (不可抗力风险)、 C_{30} (收费方式选择

不合理或未进行及时调整)、 C_{32} (运营责任不明确)。构建关键风险因素集 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$, 并对因素间的相互影响关系进行 DEMATEL 建模分析。

3.2 构建综合影响矩阵

通过专家咨询法确定各关键风险因素间直接影响关系的有无,从而构造直接影响关系矩阵 $Z = (Z_{ij})_{n \times n}$ 。若 F_i 对 F_j 有直接影响,则 $Z_{ij} = 1$, 否则, $Z_{ij} = 0$; 当 $i = j$ 时, $Z_{ij} = 0$ 。利用标准化公式 $X = Z / (\sum_{j=1}^n \max_{1 \leq i \leq n} Z_{ij}) = (x_{ij})_{n \times n}$, 对直接影响矩阵进行标准化处理即可得标准化影响矩阵,基于此,利用公式 $T = X(E - X)^{-1}$, 最终得综合影响矩阵 T 。其中, E 为单位矩阵, X 为标准化影响矩阵。地下综合管廊全寿命周期关键风险因素综合影响矩阵如表 4 所示。

表 4 地下综合管廊全寿命周期关键风险因素综合影响矩阵

Tab. 4 Comprehensive influence matrix of key risk factors for the life cycle of underground comprehensive utility tunnel

	C_1	C_2	C_3	C_{12}	C_{15}	C_{17}	C_{18}	C_{20}	C_{21}	C_{23}	C_{28}	C_{30}	C_{32}
C_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1/9	0
C_2	0	0	0	1/9	0	0	0	0	0	0	0	1/9	1/9
C_3	1/9	1/9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1/9	0	0	0
C_{15}	0	0	0	0	0	1/9	1/9	0	0	5/27	0	0	0
C_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1/9	0	0	0
C_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1/9	0	0	0
C_{20}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1/9	0	0	0
C_{21}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1/9	0	0	0
C_{23}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_{28}	4/27	4/27	1/9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_{30}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_{32}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.3 绘制因果关系图

为进一步分析各关键风险因素间的影响关系,对各因素的被影响度 R 、影响度 D 、原因度 U 及中心度 M 进行计算。其中,影响度 $D_i = \sum_{j=1}^n T_{ij}$, 被影响度 $R_j = \sum_{i=1}^n T_{ij}$, 原因度 $U = D - R$, 表示该因素对其他因素的影响程度,若原因度大于 0, 则为原因因素,反之,则为结果因素;中心度 $M = D + R$, 表示该因素在所有风险因素中的位置及作用大小,中心度越大,则位置越关键,作用越大。地下综合管廊全寿命周期关键风险因素综合影响关系如表 5 所示,因果关系图如图 1 所示。

地下综合管廊全寿命周期关键风险因素中的

原因因素(原因度大于 0 的因素),按原因度排序为: C_{15} (施工方缺乏管廊施工经验)、 C_{28} (不可抗力风险)、 C_3 (缺乏相关政策、法规支持)、 C_{20} (材料进场检验及保管不到位)、 C_{21} (设备进场检验、施工操作及保养不到位)、 C_2 (地下空间和土地的使用权获取难度大),这 6 项因素具有主动性,能影响其他风险因素且影响程度较大,对项目成败起决定性作用,属地下综合管廊全寿命周期基本风险因素; C_{12} (施工条件差)、 C_{17} (施工方案不合理或未得到有效执行)、 C_{18} (施工组织设计不合理或未得到有效执行)的原因度为 0,表明这 3 项因素受其他因素的影响程度与影响其他因素的程度相当;结果因素(原因度小于 0 的因素)排序为:

C_{23} (安全施工风险)、 C_1 (项目融资难度大)、 C_{30} (收费方式选择不合理或未进行及时调整)、 C_{32} (运营责任不明确), 这 4 项因素受其他因素影响较大, 对地下综合管廊项目的成败及效益有重大影响, 应予以重视。

表 5 地下综合管廊全寿命周期关键风险因素综合影响关系

	影响度	被影响度	原因度	中心度
	D	R	$U=D-R$	$M=D+R$
C_1	1/9	7/27	-4/27	10/27
C_2	1/3	7/27	2/27	16/27
C_3	2/9	1/9	1/9	1/3
C_{12}	1/9	1/9	0	2/9
C_{15}	11/27	0	11/27	11/27
C_{17}	1/9	1/9	0	2/9
C_{18}	1/9	1/9	0	2/9
C_{20}	1/9	0	1/9	1/9
C_{21}	1/9	0	1/9	1/9
C_{23}	0	20/27	-20/27	20/27
C_{28}	11/27	0	11/27	11/27
C_{30}	0	2/9	-2/9	2/9
C_{32}	0	1/9	-1/9	1/9

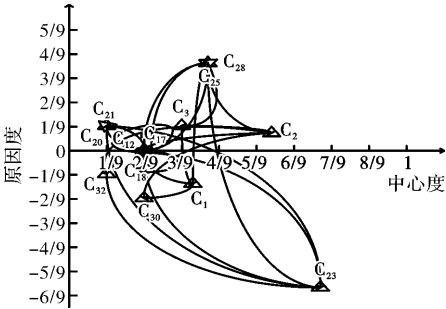


图 1 地下综合管廊全寿命周期关键风险因素因果关系图
Fig. 1 The causality diagram of life-cycle key risk factors of underground comprehensive utility tunnel

4 结论

本研究利用 IFAHP-DEMATE 方法对地下综合管廊全寿命周期风险因素进行了评估和关键风险因素分析, 结论如下:

(1)通过 IFAHP 对地下综合管廊全寿命周期风险因素进行评估, 得重要程度总排序, 并选取综合指标权重大于 3.0% 的风险因素作为关键风险因素: C_1 (项目融资难度大)、 C_2 (地下空间和土地

的使用权获取难度大)、 C_3 (缺乏相关政策、法规支持)、 C_{12} (施工条件差)、 C_{15} (施工方缺乏管廊施工经验)、 C_{17} (施工方案不合理或未得到有效执行)、 C_{18} (施工组织设计不合理或未得到有效执行)、 C_{20} (材料进场检验及保管不到位)、 C_{21} (设备进场检验、施工操作及保养不到位)、 C_{23} (安全施工风险)、 C_{28} (不可抗力风险)、 C_{30} (收费方式选择不合理或未进行及时调整)、 C_{32} (运营责任不明确)。

(2)利用 DEMATEL 方法, 分析地下综合管廊关键风险因素间的逻辑关系, 得出原因因素为: C_{15} (施工方缺乏管廊施工经验)、 C_{28} (不可抗力风险)、 C_3 (缺乏相关政策、法规支持)、 C_{20} (材料进场检验及保管不到位)、 C_{21} (设备进场检验、施工操作及保养不到位)、 C_2 (地下空间和土地的使用权获取难度大); 结果因素为: C_{23} (安全施工风险)、 C_1 (项目融资难度大)、 C_{30} (收费方式选择不合理或未进行及时调整)、 C_{32} (运营责任不明确)。该分析方法考虑了风险因素的内部关联关系, 有利于针对性的风险控制, 提高项目成功率及项目效益。

参考文献 References

[1] Canto Perello J, Curiel-Esparza. Human factors engineering in utility tunnel design[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 211-215.

[2] 杨秋侠, 仵宁, 柴攀. 城市综合管廊线性定位优化[J]. 土木工程学报, 2017(5): 123-128.

YANG Qiuxia, WU Ning, CHAI Pan. Linear location optimization of underground comprehensive utility tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017(5): 123-128.

[3] 邵帅, 胡晓欢, 代婧瑜, 等. 综合管廊穿越既有铁路段铁路加固方案[C]//第九届建筑物改造与病害处理学术研讨会论文集. 济南: 施工技术, 2011: 230-232.

SHAO Shuai, HU Xiaohuan, DAI Jingyu et al. Reinforcement of underground comprehensive utility tunnel through existing railway sections [C]//Proceedings of the 9th symposium on building reconstruction and disease treatment. Jinan: Construction Technology, 2011: 230-232.

[4] 桂小琴, 王望珍, 章帅龙. 地下综合管廊建设融资的激励机制设计[J]. 地下空间与工程学报, 2011(4): 633-636.

GUI Xiaoqin, WANG Wangzhen, ZHANG Shuailong. Incentive mechanism design for underground comprehensive utility tunnel construction financing[J]. Chinese

- nese Journal of Underground Space and Engineering, 2011(4):633-636.
- [5] 刘慧慧,孙剑,李飞飞. 城市地下综合管廊应用 PPP 模式的 VFM 评价[J]. 土木工程与管理学报, 2016(4): 122-126.
- LIU Huihui, SUN Jian, LI Feifei. VFM evaluation of underground comprehensive utility tunnel application PPP model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016(4):122-126.
- [6] 李芊,赵雪婷. 综合管廊全寿命周期风险分析[J]. 价值工程, 2017(10):240-242.
- LI Qian, ZHAO Xueting. Life cycle risk analysis of underground comprehensive utility tunnel[J]. Value Engineering, 2017(10): 240-242.
- [7] 韦海民,刘武岩. 城市综合管廊施工过程中的风险识别过滤研究[J]. 建筑技术, 2017(9):927-930.
- WEI Haimin, LIU Wuyan. Study on risk identification and filtering in construction of underground comprehensive utility tunnel [J]. Architecture Technology, 2017(9):927-930.
- [8] 王曦,祝付玲. 基于博弈分析的城市综合管廊收费对策研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1):197-203.
- WANG Xi, ZHU Fuling. Research on countermeasures of underground comprehensive utility tunnel charge based on game analysis[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1):197-203.

(编辑 沈 波)

(上接第 293 页)

- [11] 葛士建,彭永臻,曹旭,等. 改良 UCT 分段进水工艺处理生活污水性能优化研究[J]. 环境科学, 2011, 32(7):2006-2012.
- GE Shijian, PENG Yongzhen, CAO Xu, et al. Optimization of a modified UCT step feed process treating municipal wastewater[J]. Environmental Science, 2011, 32(7):2006-2012.
- [12] 刘胜军,黄宇,邹仲勋,等. 多级厌氧缺氧好氧活性污泥法新工艺研究[J]. 环境工程, 2013(s1):66-69.
- LIU Shengjun, HUANG Yu, ZOU Zhongxun, et al. Study on the multilevel anaerobic/anoxic/oxic activated sludge process[J]. Environmental Engineering, 2013(s1): 66-69.
- [13] 马智博,李志华,杨成建,等. 低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析[J]. 环境科学, 2017, 38(9):3801-3806.
- MA Zhibo, LI Zhihua, YANG Chengjian, et al. Analysis of respirogram characteristics of filamentous bulking caused by low dissolved oxygen[J]. Environmental Science, 2017, 38(9):3801-3806.
- [14] American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]//
- Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington: American Public Health Association, 1985.
- [15] VAIPOULOU E, AIVASIDIS A. A modified UCT method for biological nutrient removal: configuration and performance. [J]. Chemosphere, 2008, 72(7):1062.
- [16] JOO H S, HIRAI M, SHODA M. Piggery wastewater treatment using *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 with heterotrophic nitrification and aerobic denitrification [J]. Water Research, 2006, 40(16):3029-3036.
- [17] 姜安玺,郑朔方,时双喜,等. 厌氧-好氧活性污泥法除磷机理及动力学探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997(2):64-70.
- JIANG Anxi, ZHENG Shuofang, SHI Shuangxi et al. Mechanism and Kinetics of Phosphorus Removal by Anaerobic-Aerobic Activated Sludge Process[J]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture, 1997(2):64-70.

(编辑 沈 波)