

文章编号:1672-9331(2021)01-0007-09

基于 HHM-RFRM 的地铁隧道施工安全风险情景识别

陈 赟,陈玉斌

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要: 现有的地铁隧道施工安全风险识别方法缺乏一定的系统性,在风险识别过程中缺少对多维风险情景的识别,因而具有一定的局限性。引入层次全息建模(hierarchical holographic modeling,HHM)方法和风险过滤、排序及管理(risk filtering,ranking and management,RFRM)框架,结合情景分析理论,构建地铁隧道施工安全风险情景识别的 HHM 方法,从多视角识别风险情景,应用 RFRM 框架对风险情景进行 4 次过滤并排序,筛选关键风险情景。对 C 市某地铁隧道项目进行案例分析,结果显示:该方法可以系统、完善地识别地铁隧道施工安全风险情景及关键风险因素,进而可为风险管理工作奠定一定的基础。

关键词: 地铁隧道;施工安全;风险情景识别;HHM;RFRM

中图分类号: U455.1

文献标志码: A

Safety risk scenario identification of subway tunnel construction based on HHM-RFRM

CHEN Yun,CHEN Yu-bin

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The existing safety risk identification methods of subway tunnel construction lack certain systematicness, and lack multi-dimensional risk scenario identification in the risk identification process, so they have certain limitation. Based on the hierarchical holographic modeling(HHM) method, risk filtering, ranking and management(RFRM) framework and scenario analysis theory, a HHM method for identifying risk scenarios in subway tunnel construction was constructed. The risk scenarios were identified from multiple perspectives, and were filtered and sorted by the RFRM framework four times to screen the key risk scenarios. The case study of a subway tunnel project in C City shows that the method can systematically and perfectly identify the safety risk scenarios and key risk factors of subway tunnel construction, and further lays certain foundation for risk management.

Key words: subway tunnel; construction safety; risk scenario identification; HHM; RFRM

收稿日期:2020-09-08

基金项目:2018 年湖南省应急管理厅安全生产科技研究及推广项目“交通隧道工程施工安全风险预警及管控体系研究”;湖南交通科技进步与创新项目(201330)

通讯作者:陈 赟(1963—),男,教授,主要从事工程项目管理方面的研究。E-mail:cheny@csust.edu.cn

随着城市化进程的加快,地下工程建设项目数量持续增长。截至2019年底,我国城市轨道交通在建线路总长6 902.5 km,其中地铁在建线路长度达到5 942.7 km^[1]。伴随着地铁隧道修建规模日趋增大,里程日趋增长,地铁隧道施工安全事故频发。基于文献[2]和应急管理部等有关部门公布的地铁隧道施工事故调查报告进行统计,结果显示2002—2019年间我国发生的251起地铁隧道施工事故造成289人死亡和大量财产损失,危害巨大。因此,亟需加强地铁隧道施工安全风险识别。风险识别是风险管理的基础环节,充分识别安全风险并采取相应管控措施,可以有效降低事故发生的可能性。现有地铁隧道施工安全风险识别方法主要包括系统分解法、头脑风暴法、流程图法、德尔菲法、现场调查法等^[3-5]。这些方法可以有效识别常见的主要风险,但仍存在两个问题:一是识别过程缺乏一定的系统性。由于在地铁隧道施工过程中涉及的风险管控对象多且地下空间存在很大的不确定性,从而导致风险识别可能有缺漏。二是缺乏从多维角度识别关键风险。风险事件的发生并非是由单一因素单独作用造成的,这些方法在风险识别过程中对风险因素间的影响缺乏深入分析。

本研究结合情景分析理论,引入层次全息建模(hierarchical holographic modeling, HHM)方法和风险过滤、排序及管理(risk filtering, ranking and management, RFRM)方法对地铁隧道施工安全风险情景识别展开研究。情景是事物状态和趋势的信息集^[6],可以从多维角度展现事物信息,情景分析理论就是从多个因素出发对事物展开描述和分析。而风险事件乃至事故的发生一般为多因素的共同作用,因此本研究将存在影响关系的两个及以上风险因素组合定义为风险情景。HHM方法是一种系统的分析方法,可以从多维角度挖掘事物本质和关联^[7],适用于从多视角、多维度、多层次分析一个复杂系统的各类属性特征和内在联系,因此对于大型复杂工程项目的风险识别和辨析是一种有效的工具。HHM方法已成功应用于大型水电项目^[8]、跨国供应链^[9]、水资源系统^[10]等诸多不同类型事件或项目的风险识别研究,但应用于地铁隧道施工安全风险识别的研究较少。RFRM方法一般结合HHM方法对识别的

风险进行过滤筛选,甄别关键风险。基于情景分析的HHM-RFRM方法可以从多维角度构建风险情景框架,系统地识别风险情景并分析其重要程度,从而全面地对风险管控重点和风险间的影响关系进行研判,为地铁隧道施工安全风险识别提供新思路。因此,本研究首先应用HHM方法从施工系统性角度和建设全寿命周期识别地铁隧道施工安全风险,系统地分析地铁隧道施工安全风险识别对象,构建风险全息视图识别风险情景,再结合RFRM方法对辨识的风险情景进行多次过滤,筛选出关键风险情景及关联的风险因素,以期为进一步的风险管理工作奠定基础。

1 基于HHM的风险情景识别

1.1 风险因素分析

本研究聚焦地铁隧道施工安全风险,涉及的风险管理对象包括地铁隧道构造物、作业人员、管理人员、施工机械设备、施工材料、自然环境、管理组织和施工工艺等。借鉴4M1E理论和事故致因4M理论以及文献[11],将风险因素划分为人员因素、机械设备因素、施工材料因素、外部环境因素、组织管理因素和技术因素,探讨了地铁隧道施工安全风险这一复杂系统。选取《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南(试行)》的总体风险评估和专项风险评估风险因素,结合31个地铁隧道施工期事故调查报告的致因统计,并通过分析文献[12],对风险因素加以归并、补充和筛选,确定了如表1所示的28个初始风险因素。

表1 初始风险因素
Table 1 Initial risk factors

类别	名称
人员因素	从业人员资质、施工经验、安全施工意识
机械设备因素	设备安全防护措施、设备完好率、设备性能
施工材料因素	材料适用性、材料质量
外部环境因素	围岩等级、渗水情况、断层破碎情况、瓦斯含量、岩溶发育情况、年均降水量、既有线路下穿、地下管网、周边房屋建筑
组织管理因素	管理规章制度、应急预案、管理组织结构、安全管理人员配备、安全教育培训、监控量测
技术因素	施工方法、施工工艺、技术交底、勘察准确性、设计合理性

1.2 风险情景识别的 HHM 框架

通过分析地铁隧道施工涉及的 28 个安全风险因素,构建以人员、机械设备、施工材料、外部环境、组织管理、技术 6 个维度的 HHM 框架,如图 1 所示。该 HHM 框架考察了地铁隧道施工过程中

的各类基本安全风险因素。由该 HHM 框架对评估项目信息进行梳理以确定风险情景。当无法由该框架明确时,可以在其基础上提出新的视角对框架进行扩展,最终明确所有风险情景。

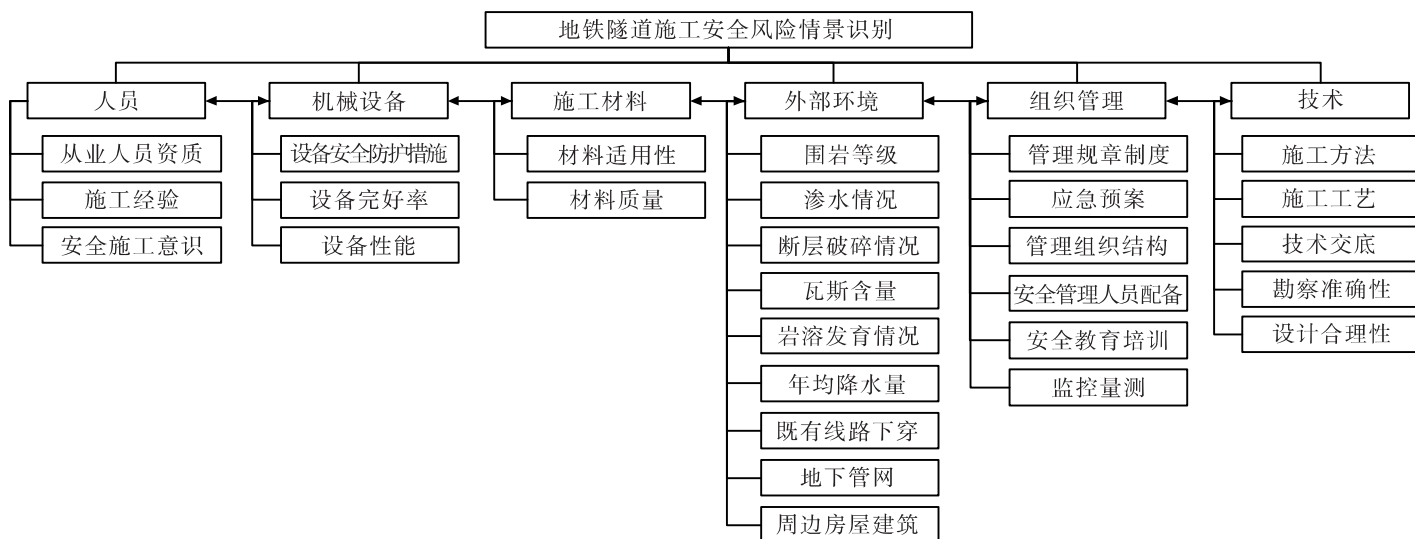


图 1 地铁隧道施工安全风险情景识别 HHM 框架

Fig. 1 HHM framework for safety risk scenario identification in subway tunnel construction

1.3 风险情景识别

基于地铁隧道施工安全风险情景识别 HHM 框架,根据美国 Sloan 管理学院提出的安东尼管理信息系统(management information system, MIS)理论,从决策层、监督保障层和作业层 3 个层级进一步构建地铁隧道施工安全风险 HHM 三层层级结构,如图 2 所示。其中决策层是指地铁隧道项目的决策管理层,对项目的实施可行性、实施计划

以及实施内容进行论证或决策,故其风险管控对象包括人员、组织管理和技术;监督保障层是在项目实施过程中对所有参与对象进行监督的管理层,保障项目的顺利实施,故其风险管控对象包括人员和组织管理;作业层是在项目中完成施工任务的实施层,受施工系统所有内外部因素的影响,故其风险管控对象为人员、机械设备、施工材料、外部环境、组织管理和技术。

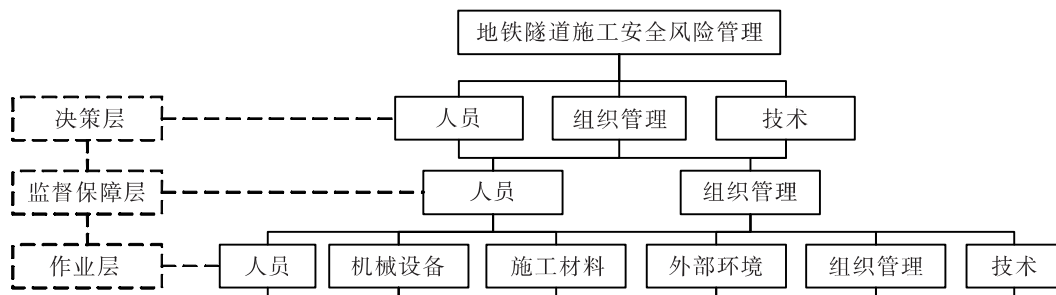


图 2 地铁隧道施工安全风险 HHM 三层层级结构

Fig. 2 HHM three-layer hierarchical structure of safety risk in subway tunnel construction

该层级结构展现了因素间的影响作用,形成了因素影响的链式结构,在此基础上可以抽取多条多维因素关联子链,如“技术—组织管理—外部环境”三维子链、“人员—组织管理”二维子链。各子链还可以形成两个影响作用相反的 HHM 风险

情景子模型,如“人员—组织管理”子链可以形成“人员(基础视角)—组织管理(上层视角)”风险情景和“组织管理(基础视角)—人员(上层视角)”风险情景。其中,上层视角风险因素对基础视角风险因素存在影响,故该层级结构理论上有 36 类二

维风险情景和 72 类三维风险情景。囿于篇幅,本研究仅考虑二维风险情景。结合文献[13-14],剔除因素间无显著影响关系的风险情景和重复风险情景。考虑到机械设备与施工材料均属于物的因素且初始因素较少,故将二者综合考虑。由此概括出 16 个主要的二维 HHM 风险情景子模型,如表 2 所示。

表 2 二维 HHM 风险情景子模型

Table 2 2D HHM risk scenario submodel

序号	基础视角	上层视角
1	人员	技术
2	人员	外部环境
3	人员	组织管理
4	组织管理	技术
5	组织管理	人员
6	组织管理	外部环境
7	机械设备/施工材料	技术
8	机械设备/施工材料	人员
9	机械设备/施工材料	组织管理
10	外部环境	技术
11	外部环境	人员
12	外部环境	组织管理
13	技术	外部环境
14	技术	人员
15	技术	机械设备/施工材料
16	技术	组织管理

通过 HHM 子模型风险情景,可以从不同视角对地铁隧道施工安全风险情景进行识别。以“人员—组织管理”风险情景为例,构建“人员—组织管理”风险情景结构,如图 3 所示。

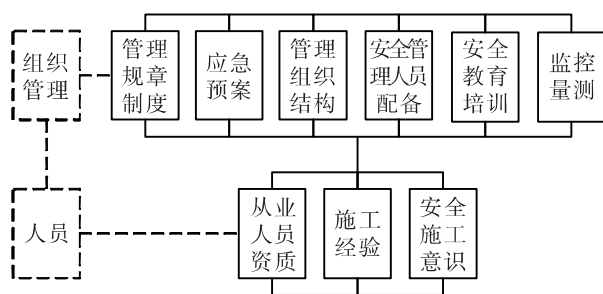


图 3 “人员—组织管理”风险情景结构

Fig. 3 Risk scenario structure of "personnel-organization management"

将人员作为基础视角,人员有 3 个风险因素,组织管理有 6 个风险因素。理论上“人员(基础视

角)—组织管理(上层视角)”有 18 个风险情景,如管理制度不完善导致从业人员无相关作业资质、安全教育培训不足导致施工人员安全施工意识不足等。然后进一步完成该风险情景结构下所有风险情景的初步识别。

2 基于 RFRM 的风险情景过滤和排序

RFRM 方法是一种对风险进行过滤、排序和管理的方法,由情景识别、情景过滤、双重标准过滤与排序、多标准评估、量化排序、风险管理、针对缺失的关键项进行保护和运作反馈等 8 个阶段组成^[15]。本研究主要关注风险情景的识别、过滤和排序,RFRM 方法后 3 个阶段属于风险控制范畴,本研究对其不做过多论述。风险过滤是对初步识别的风险情景的进一步筛选,过滤的本质就是剔除不应被重点关注的风险情景,找到关键风险情景,揭示风险因素间的相互影响关系,并通过排序寻求风险管控的侧重点,为风险管理的资源分配提供参考。结合地铁隧道施工安全风险管理的要求和 RFRM 方法实现的一般流程,基于 RFRM 方法的地铁隧道施工安全风险情景识别、过滤和排序的步骤为:

步骤一:充分分析评价项目资料,选取可能涉及的主要风险因素构建项目 HHM 风险情景识别框架,通过 HHM 框架识别 HHM 风险情景子模型,无差别地找出影响地铁隧道施工安全的所有风险情景。由于历史数据的时效性差或客观条件的改变,可能会导致存在许多错漏或无关风险情景。

步骤二:根据专家经验、文献资料和有关设计规范标准等对所识别的所有风险情景进行第一次过滤,舍去陈旧、不符合实际情况或几乎对施工安全不产生影响的风险情景,筛选出初次过滤后的风险情景。

步骤三:设定定性评判标准,考虑风险情景发生概率 p 和风险情景损失程度 q ,建立双重标准风险矩阵对初次过滤后的风险情景进行二次过滤,从而进一步实现定性过滤。本研究结合《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南(试行)》,采用较为普遍的风险度量形式,得到如表 3 和表 4 所示的定性评判标准。

根据定性评判标准可以得到如表 5 所示的风险情景双重标准判断矩阵。综合考虑 p 和 q 的定性级别将风险情景按不同颜色区域划分为重大风险(Ⅰ级)、较大风险(Ⅱ级)、一般风险(Ⅲ级)、较小风险(Ⅳ级)4 个级别。根据《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南(试行)》定义的风险评估接受准则,过滤掉所有的较小风险(Ⅳ级)。

表 3 风险情景发生概率 p 的定性评判标准

Table 3 Qualitative evaluation criteria for occurrence probability p of risk scenarios

等级	定性评判标准	符号
很可能	风险很可能发生	I
可能	风险可能发生	II
偶然	风险发生可能性较小	III
可能性很小	风险发生可能性很小	IV
几乎不可能	风险几乎不可能发生	V

步骤四:对上一步留存的风险情景进行多标准评估,主要考察其复原性、强健性和冗余性^[16]。借鉴焦亮^[17]提出的 11 个评价标准,确定如表 6 所示的地铁隧道施工安全风险多标准评估表。各评价标准均可划分为高、中、低 3 个级别,分别按照-1、0、1 进行赋分并计算各风险情景多标准评估的总评分,舍弃评分为负的风险情景。

表 4 风险情景损失程度 q 的定性评判标准

Table 4 Qualitative evaluation criteria for loss degree q in risk scenarios

等级	定性评判标准	符号
特大	导致特大财产损失或大量人员伤亡	I
重大	导致重大财产损失或重大人员伤亡	II
较大	导致较大财产损失或较多人员伤亡	III
一般	导致少量财产损失或少量人员伤亡	IV
小	几乎不导致财产损失或人员伤亡	V

表 5 地铁隧道施工安全风险情景双重标准判断矩阵

Table 5 Double standard judgment matrix of safety risk scenario of subway tunnel construction

发生概率 p	损失程度 q				
	小(V)	一般(Ⅳ)	较大(Ⅲ)	重大(Ⅱ)	特大(Ⅰ)
很可能(Ⅰ)	较大风险(Ⅱ)	较大风险(Ⅱ)	重大风险(Ⅰ)	重大风险(Ⅰ)	重大风险(Ⅰ)
可能(Ⅱ)	一般风险(Ⅲ)	较大风险(Ⅱ)	较大风险(Ⅱ)	重大风险(Ⅰ)	重大风险(Ⅰ)
偶然(Ⅲ)	一般风险(Ⅲ)	一般风险(Ⅲ)	较大风险(Ⅱ)	较大风险(Ⅱ)	重大风险(Ⅰ)
可能性很小(Ⅳ)	较小风险(Ⅳ)	一般风险(Ⅲ)	一般风险(Ⅲ)	较大风险(Ⅱ)	较大风险(Ⅱ)
几乎不可能(V)	较小风险(Ⅳ)	较小风险(Ⅳ)	一般风险(Ⅲ)	一般风险(Ⅲ)	较大风险(Ⅱ)

表 6 地铁隧道施工安全风险多标准评估表

Table 6 Multi criteria assessment table of safety risk in subway tunnel construction

评价标准	标准说明	标准评级		
		高	中	低
不可察觉性	风险事件发生前的不可预见性	不可察觉	察觉有限	可察觉
不可控性	现阶段无有效应对或回避风险的能力	一旦发生不可控	部分可控	完全可控
发生形式多	风险事件有多种发生形式导致不利影响	很多	较少	单一
不可恢复性	风险事件发生后导致的不利影响无法消除,系统无法恢复	不可恢复	部分可恢复	可以完全恢复
影响持续时间长	风险事件的不利影响持续时间长	很长	较短	很短
连带影响	风险对情景系统以外的场景存在不利影响	强烈	较弱	微弱或无
外部环境	由于外部环境风险源产生的不利影响	对外部环境变化敏感性高	对外部环境变化敏感性一般	对外部环境变化敏感性微弱或无
损失	由于风险的不利影响引起的系统损失	大	部分	微小或无
系统内交互	由于系统内交互导致风险不利影响程度加深	敏感性高	敏感性一般	敏感性微弱或无
复杂或紧急性行为	系统对风险影响规律的认知仍不足以预见其不利影响	高度复杂或紧急	复杂或紧急	低复杂和紧急性
设计不成熟度	系统应对风险的不利影响的设计不完善	高度不成熟	不成熟	成熟

步骤五:对上一步筛选后的风险情景进行量化、过滤与排序。首先根据贝叶斯公式计算风险情景发生概率 p 。贝叶斯公式根据先验概率考察事件的后验概率,目前已被广泛应用于各类研究领域,其基本公式如下:

$$P(B_i|A)=\frac{P(B_i)P(A|B_i)}{\sum_{j=1}^n P(B_j)P(A|B_j)} \tag{1}$$

对于二维风险情景 B - A (其中 B 为基础视角因素, A 为上层视角因素),在计算风险情景的后验概率时,假设 A 发生的概率为 $P(A)$, A 发生情况下 B 发生的概率为 $P(B|A)$, A 不发生的概率为 $P(\bar{A})$, A 不发生情况下 B 发生的概率为 $P(B|\bar{A})$,根据贝叶斯公式求得二维风险情景 B - A 发生的概率为:

$$P(A|B)=\frac{P(A)P(B|A)}{P(A)P(B|A)+P(\bar{A})P(B|\bar{A})} \tag{2}$$

对量化后的风险情景发生概率 p ,根据表 7 的风险情景发生概率定量评判标准确定等级;对风险情景损失程度 q 应结合死亡人数、重伤人数、直接经济损失、社会影响、环境影响和工期延误等指标进行确定。本研究选取死亡人数、重伤人数、直接经济损失作为评判依据,根据表 8 的风险情景损失程度定量评判标准确定等级。同样,根据表 5 的风险情景双重标准判断矩阵划分风险情景级别,过滤掉所有较小风险(Ⅳ级),再根据风险级别对风险情景进行排序,进而实现地铁隧道施工安全风险情景的多次过滤与排序。

表 7 风险情景发生概率 p 的定量评判标准

Table 7 Quantitative evaluation criteria for occurrence probability p of risk scenarios

等级	定量评判标准	符号
很可能	$p \geq 0.3$	I
可能	$0.03 \leq p < 0.3$	II
偶然	$0.003 \leq p < 0.03$	III
可能性很小	$0.0003 \leq p < 0.003$	IV
几乎不可能	$p < 0.0003$	V

表 8 风险情景损失程度 q 的定量评判标准

Table 8 Quantitative evaluation standard of loss degree q in risk scenarios

等级	定量评判标准	符号
特大	$D \geq 30$ 或 $H \geq 100, Z \geq 10\,000, p_r \geq 10\%$	I
重大	$10 \leq D < 30$ 或 $50 \leq H < 100,$ $5\,000 \leq Z < 10\,000, 5\% \leq p_r < 10\%$	II
较大	$3 \leq D < 10$ 或 $10 \leq H < 50,$ $1\,000 \leq Z < 5\,000, 2\% \leq p_r < 5\%$	III
一般	$1 \leq D < 3$ 或 $5 \leq H < 10,$ $100 \leq Z < 1\,000, 1\% \leq p_r < 2\%$	IV
小	$1 \leq H < 5, Z < 100, p_r < 1\%$	V

注: D 为死亡人数; H 为重伤人数; Z 为直接经济损失,万元;
 p_r 为经济损失占项目建安费的比例。

3 案例分析

3.1 项目背景

C 市轨道交通三号线为 C 市轨道交通线网中的径向骨干线路,其一期工程采用盾构法施工。C 市属亚热带季风气候,气候温和,降水充沛。工程全线多处穿越河道与湖泊、下穿多个高富水区域,百余次穿越房屋,5 次下穿市政桥梁与地下隧道,多处穿越铁路干线,下穿中石油西气东输高压燃气管,长距离下穿既有线路且地质条件极为复杂。由于该项目复杂的施工条件增加了施工难度,需要全面、客观地识别风险,为后续的风险管理工作奠定基础。

3.2 风险情景识别、过滤和排序

在充分分析项目勘察设计资料、水文气象资料、行业标准或规范以及项目参与各方的企业背景资料,初步筛选出如表 9 所示的 17 个风险因素,并构建对应的风险情景识别 HHM 框架。定义基础视角风险因素为 M_i ,上层视角风险因素为 N_j ,则风险情景可表示为 $M_i(N_j)$ 。基于该 HHM 框架对所有风险情景进行识别,得到 289 个初始二维风险情景。

结合 HHM 风险情景子模型并考虑专家评议意见对所有二维风险情景进行初次过滤,舍去关联程度弱、影响程度小的风险情景,对保留的 62 个风险情景结合 5 位专家的打分意见对风险情景的发生概率 p 和损失程度 q 进行定性评判,并根

据表 5 所示的风险情景双重标准判断矩阵进行风险情景的评级,得到如表 10 所示的定性评价风险情景评级表,舍去所有较小风险,保留 37 个风险情景。

对保留的风险情景进行多标准评估并计算总评分,评分结果如表 11 所示(部分)。舍弃所有评分为负的风险情景,保留 29 个风险情景。对保留的 29 个风险情景进行量化评级,根据 5 位专家的打分意见对风险情景的发生概率 p 和损失程度 q 进行定量评判,得到表 12 所示的定量评价风险情景评级表,舍去所有较小风险情景,保留 22 个风险情景,并由表 12 明确风险情景的排序。

表 9 C 市轨道交通三号线初始风险因素
Table 9 Initial risk factors of Rail Transit Line 3 in C City

风险因素类别	风险因素名称
人员(A)	从业人员资质(A ₁)、安全施工意识(A ₂)
机械设备(B)	设备安全防护措施(B ₁)、设备完好率(B ₂)
施工材料(C)	材料适用性(C ₁)
外部环境(D)	渗水情况(D ₁)、年均降水量(D ₂)、既有线路下穿(D ₃)、地下管网(D ₄)、周边房屋建筑(D ₅)
组织管理(E)	安全教育培训(E ₁)、 安全管理人员配备(E ₂)
技术(F)	施工方法(F ₁)、施工工艺(F ₂)、技术交底(F ₃)、勘察准确性(F ₄)、设计合理性(F ₅)

表 10 定性评价风险情景评级表
Table 10 Risk scenario rating table for qualitative evaluation

发生概率 p	损失程度 q				
	小(V)	一般(IV)	较大(III)	重大(II)	特大(I)
很可能(I)					
可能(II)	$A_2(E_1)$ 、 $D_5(B_2)$ 、 $C_1(D_4)$ 、 $F_2(D_5)$ 、 $A_1(E_1)$	$F_2(D_2)$ 、 $C_1(D_3)$ $F_2(D_4)$	$F_2(A_2)$ 、 $F_2(D_3)$ 、 $D_1(F_4)$	$F_2(D_1)$ $D_1(F_3)$	
偶然(III)					
可能性很小(IV)	$F_2(A_1)$ 、 $B_2(A_2)$ 、 $F_3(A_2)$ 、 $B_2(E_1)$ 、 $A_1(E_2)$ 、 $C_1(F_2)$ 、 $C_1(F_4)$ 、 $D_1(F_5)$ 、 $D_5(F_5)$	$D_4(B_2)$ 、 $B_1(E_1)$ 、 $A_2(E_2)$ 、 $B_2(E_2)$ 、 $D_5(F_2)$ 、 $D_5(F_4)$	$F_3(A_2)$ 、 $F_2(C_1)$ 、 $F_4(D_4)$ 、 $F_2(E_1)$ 、 $D_4(F_2)$ 、 $D_4(F_5)$	$F_4(D_3)$ 、 $F_3(E_1)$ 、 $D_3(F_2)$ 、 $D_4(F_4)$	$D_3(F_3)$
几乎不可能(V)	$C_1(D_5)$ 、 $D_1(D_5)$ 、 $B_1(E_2)$ 、 $D_5(F_1)$ 、 $D_1(F_2)$ 、 $C_1(F_5)$ 、 $D_2(F_4)$	$D_4(B_1)$ 、 $D_5(B_1)$ 、 $D_1(D_3)$ 、 $D_1(D_4)$ 、 $F_4(D_5)$ 、 $D_1(F_1)$ 、 $D_4(F_1)$ 、 $D_2(F_3)$ 、 $D_2(F_5)$	$F_3(C_1)$ 、 $F_3(E_2)$ 、 $D_3(F_1)$	$D_4(F_3)$ 、 $D_5(F_3)$ 、 $D_3(F_5)$	$D_3(F_4)$

表 11 风险情景多标准评估表(部分)
Table 11 Multi criteria assessment table of risk scenarios (part)

评估指标	$A_2(E_1)$	$C_1(D_4)$	$F_2(D_5)$	$A_1(E_1)$	$F_2(D_2)$	$C_1(D_3)$	$F_2(D_4)$
不可察觉性	-1	0	-1	0	-1	-1	0
不可控性	0	1	1	0	1	-1	-1
发生形式多	-1	1	1	-1	-1	1	-1
不可恢复性	-1	1	-1	-1	-1	0	-1
影响持续时间长	1	-1	-1	0	-1	1	-1
连带影响	1	1	0	0	1	1	-1
外部环境	-1	1	-1	-1	1	1	1
损失	0	1	-1	0	1	-1	0
系统内交互	0	-1	-1	1	1	-1	-1
复杂或紧急性行为	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
设计不成熟度	-1	-1	0	0	-1	0	-1
总分	-4	4	-5	-3	-1	1	-7

表 12 定量评价风险情景评级表

Table 12 Risk scenario rating table of quantitative evaluation

发生概率 p	损失程度 q				
	小(V)	一般(IV)	较大(III)	重大(II)	特大(I)
很可能(I)					
可能(II)		$C_1(D_3)$		$F_2(D_1)$	
偶然(III)	$C_1(D_4)$		$F_2(A_2), F_2(D_3), D_1(F_4)$	$D_1(F_3)$	$D_3(F_3)$
可能性很小(IV)	$D_3(B_2), B_2(E_2)$	$B_1(E_1), A_2(E_2),$	$F_3(A_2), F_2(E_1), D_3(F_2)$	$F_4(D_3), F_3(E_1), D_4(F_4)$	
几乎不可能(V)	$D_5(F_2), D_5(F_4)$	$D_4(B_2), F_4(D_4), F_2(C_1)$	$F_5(C_1), F_3(E_2), D_3(F_1)$	$D_4(F_3), D_5(F_3)$	$D_5(F_4)$

3.3 结果分析

根据表 12 的定量评价和排序结果可知:在该项目二维风险情景中,重大风险情景包括 $F_2(D_1)$ 和 $D_3(F_3)$;较大风险情景包括 $C_1(D_3)$ 、 $F_2(A_2)$ 、 $F_2(D_3)$ 、 $D_1(F_4)$ 、 $D_1(F_3)$ 、 $F_4(D_3)$ 、 $F_3(E_1)$ 、 $D_4(F_4)$ 和 $D_3(F_4)$;一般风险情景包括 $C_1(D_4)$ 、 $B_1(E_1)$ 、 $A_2(E_2)$ 、 $F_3(A_2)$ 、 $F_2(E_1)$ 、 $D_3(F_2)$ 、 $F_5(C_1)$ 、 $F_3(E_2)$ 、 $D_3(F_1)$ 、 $D_4(F_3)$ 和 $D_5(F_3)$ 。对于重大风险情景必须采取措施将风险降低至可被接受的范围内,并加大安全管理投入;对于较大风险情景需要采取优化措施降低风险发生的可能性;对于一般风险情景,则需加强现场巡视和现场安全管理。因此,该项目需要重点关注由于技术交底不足引起的既有线路下穿的干扰风险和高渗水引起的施工工艺水平不足的风险;此外,也要对项目的渗水情况、既有线路下穿、地下管网、周边房屋建筑等外部环境风险与技术交底不足、勘察不准确、设计不合理等技术风险的关联风险情景加以分析和管控。该结论与项目的实际风险评估报告在结论和侧重点上大体一致。此外,在因素间的影响下,单一风险因素的重要程度也会不同,如 $F_2(D_1)$ 和 $F_2(A_2)$ 均属于施工工艺因素,但由于其上层视角因素不同导致风险情景评级不同,这也说明了在不同风险因素影响下的同一风险因素的重要程度亦存在差异,在项目实际风险识别过程中,需进一步把握关键风险。

4 结论

1) 本研究提出了一种基于层次全息建模的地铁隧道施工安全风险情景识别方法,结合风险过滤、排序、管理方法对识别的风险情景进行多次过滤,旨在寻求关键风险情景并加以管控,完善现有的风险识别方法。

2) 通过 HHM 方法构建的地铁隧道施工安全风险情景识别框架主要包括人员、机械设备、施工材料、外部环境、组织管理和技术 6 类共 28 项安全风险因素,在 HHM 框架下从决策层、监督保障层和作业层 3 个层级进一步构建 HHM 三层层级结构概括出 16 个主要的二维 HHM 风险情景子模型,进而实现多维度、多视角、多层次的风险情景识别。

3) 通过 RFRM 方法对所有识别的风险情景进行初次过滤、定性评判过滤、多标准评估过滤以及定量评判过滤和排序,同时对风险发生概率和风险损失程度进行量化,这对于重要风险情景的识别和筛选有积极的作用。

4) 通过 HHM-RFRM 方法既可以系统地识别风险因素和风险情景,还可以从多维视角把握风险情景的重要程度,为风险识别提供新的视角,也为决策者把握风险管控侧重点提供新的思路。

囿于篇幅,本研究对识别三维风险情景的探讨有限,且多因素间的耦合作用仍有待进一步展开研究。

〔参考文献〕

- [1] 城市轨道交通 2019 年度统计和分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2020:31-32.
Statistics and analysis report of urban rail transit in 2019[R]. Beijing:China Urban Rail Transit Association,2020:31-32.
- [2] 于海莹,彭玉林,张立艳,等.城市地铁施工期事故统计分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(S2):852-860.
YU Hai-ying, PENG Yu-lin, ZHANG Li-yan, et al. Statistical analysis of urban subway construction accidents[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2):852-860.
- [3] 贾剑青,闫博,肖春春,等.下穿黄河隧道盾构施工风

- 险分析与评估[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5):1 582-1 590.
- JIA Jian-qing, YAN Bo, XIAO Chun-chun, et al. Risk analysis and assessment of shield tunneling under the Yellow River[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5):1 582-1 590.
- [4] Liu P, Li Q M, Bian J, et al. Using interpretative structural modeling to identify critical success factors for safety management in subway construction: a China study[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(7):1 359.
- [5] 张皎, 贾敏才, 张建. 地铁隧道盾构法施工全过程风险分析[J]. 公路工程, 2013, 38(3):38-41, 56.
- ZHANG Jiao, JIA Min-cai, ZHANG Jian. Whole process risk analysis of metro tunnel shield construction[J]. Highway Engineering, 2013, 38(3):38-41, 56.
- [6] 贾文峥, 宋晓敏, 廖理明, 等. 基于情景分析的城市轨道交通应急指挥系统功能需求研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(2):46-51.
- JIA Wen-zheng, SONG Xiao-min, LIAO Li-ming, et al. Functional requirements of urban rail transit emergency command system based on scenario analysis[J]. Transportation System Engineering and Information, 2019, 19(2):46-51.
- [7] Kaplan S, Haimes Y Y, Garrick B J. Fitting hierarchical holographic modeling into the theory of scenario structuring and a resulting refinement to the quantitative definition of risk[J]. Risk Analysis, 2001, 21(5):807-819.
- [8] 王宏兵, 郑雪筠, 李海峰. 基于距离熵优化 HHM-ISM 的大型水电项目建设期风险评价模型研究[J]. 水力发电, 2017, 43(10):87-93, 98.
- WANG Hong-bing, ZHENG Xue-yun, LI Hai-feng. Study on risk assessment model of large hydropower project construction period based on distance entropy optimization HHM-ISM[J]. Hydropower, 2017, 43(10):87-93, 98.
- [9] 程慧锦, 马有才. 基于 HHM 研究的跨国企业供应链风险识别[J]. 山东科技大学学报: 社会科学版, 2017, 19(3):84-90.
- CHENG Hui-jin, MA You-cai. Risk identification of multinational enterprise supply chain based on HHM research[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Social Science Edition, 2017, 19(3):84-90.
- [10] Jiang Q X, Wang T, Wang Z L, et al. HHM- and RFRM-based water resource system risk identification[J]. Water Resources Management, 2018, 32(12):4 045-4 061.
- [11] 胡庆国, 蔡孟龙, 何忠明. 基于组合赋权法与集对分析的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2019, 16(4):16-26.
- HU Qing-guo, CAI Meng-long, HE Zhong-ming. Safety risk assessment of prefabricated building construction based on combination weighting method and set pair analysis[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2019, 16(4):16-26.
- [12] 江新, 胡文佳, 袁轩, 等. 地铁隧道施工安全风险演化的 BP-SD 模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(12):67-72.
- JIANG Xin, HU Wen-jia, YUAN Xuan, et al. Study on BP-SD model of safety risk evolution in subway tunnel construction[J]. China Safety Production Science and Technology, 2017, 13(12):67-72.
- [13] 李晓娟, 丰繁, 徐乐. 基于 ACO 算法的地铁工程施工安全风险评价[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2019, 35(4):482-488.
- LI Xiao-juan, FENG Fan, XU Le. Risk assessment of subway construction safety based on ACO algorithm[J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Science Edition, 2019, 35(4):482-488.
- [14] Li M, Yu H L, Jin H Y, et al. Methodologies of safety risk control for China's metro construction based on BIM[J]. Safety Science, 2018, 110:418-426.
- [15] 张友棠, 肖辉. 基于 HHM 和 RFRM 的矿业企业跨国投资风险区域分析[J]. 财会月刊, 2011, 7:55-58.
- ZHANG You-tang, XIAO Hui. Regional analysis of transnational investment risk of mining enterprises based on HHM and RFRM[J]. Journal of Finance and Accounting, 2011, 7:55-58.
- [16] 刘家国, 崔进, 周欢, 等. 基于 HHM-RFRM 的船舶航行风险评估方法研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(5):174-183.
- LIU Jia-guo, CUI Jin, ZHOU Huan, et al. Research on risk assessment method of ship navigation based on HHM-RFRM[J]. China Management Science, 2019, 27(5):174-183.
- [17] 焦亮. 基于风险分析的部队车辆安全管理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010:50-51.
- JIAO Liang. Research on military vehicle safety management based on risk analysis[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2010:50-51.