

# 地铁建设安全风险识别与评估研究综述

黄骞,陈群,张铮燕,陈哲

(福建工程学院 管理学院,福建 福州 350118)

**摘要:**为促进地铁施工风险管理的进一步研究和实践,以我国国情为基准,从风险人工识别和自动识别两个方面分析目前地铁建设风险识别现状,从评估方法和评估成果两个方面分析地铁风险评估现状,探讨目前地铁建设安全管理存在的问题和挑战。结果表明,地铁建设安全管理研究具有重大理论和实践价值,但目前存在风险管理不完备的问题,在数据获取、综合模型建立、风险因素融合和管理方式转变等方面需要开展深入研究。

**关键词:**地铁建设;风险识别;风险评估

**中图分类号:** TU714

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2018)05-0484-06

## Research review of risk identification and assessment in subway construction

HUANG Qian, CHEN Qun, ZHANG Zhengyan, CHEN Zhe

(School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** In order to promote the further research and practice of subway construction risk management, researches were conducted on the basis of national conditions. The current situations of risk identification for subway constructions were analyzed from two aspects: artificial identification and automatic identification; the current situations of risk evaluation for subway constructions were also analyzed from two aspects: evaluation methods and evaluation results. Finally, the problems and challenges in the safety management of subway construction were discussed. Results indicate that researches on the safety management of subway constructions have significant theoretical and practical values. However, the current risk management has its limitations in data acquisition, comprehensive modeling, risk factor integration and management mode transformation, which still need deeper investigations.

**Keywords:** subway construction; risk identification; risk assessment

随着大城市交通拥堵状况持续上升,优先发展公共交通已成为缓解运输压力的首选模式。据《中国城市轨道交通年报》统计,截止到2016年12月31日,我国内地地铁运营里程总数超过3 558 km,未建成的里程总数为6 557.93 km,我国已成为全世界最大的地铁建设市场。<sup>[1]</sup>地铁工程基本处于地下作业且工艺复杂,存在的安全风

险较多。研究表明,随着地铁项目的增多,地铁建设过程发生的安全事故总数呈上升趋势。<sup>[2]</sup>因此必须对地铁建设潜在的安全风险进行识别和评估,保证人员和财产安全。

本文从理论方法和研究成果两个角度对风险识别和风险评估两部分内容进行分析,并结合目前地铁建设现状,阐述地铁风险评估存在的问题

收稿日期: 2018-07-08

基金项目: 福建省产学研合作重大项目(2014H6004);福建省科技重大专项(2013HZ0004-3);2017年省科协学科发展报告立项项目(FJKX-XK1727)

第一作者简介: 黄骞(1993-),男,湖南益阳人,硕士研究生,研究方向:工程项目管理、交通运输规划与管理。

通信作者: 陈群(1968-),女,福建福州人,教授,硕士,研究方向:项目管理。

和挑战,继而根据研究现状和现实难点进行讨论和展望。

## 一、风险识别

细致全面的风险识别是进行有效风险控制的重要前提,反之风险因素识别不当是造成安全事故的重要原因之一。根据《地铁及地下工程建设风险管理指南》和国家标准《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范(GB 50652—2011)》规定,可将风险识别定义为如图1所示的过程。<sup>[3-4]</sup>



图1 风险识别过程

Fig.1 Risk identification process

从识别过程来看,风险识别首先提取带风险的参数,然后分析致险因素并建立技术参数和致险因素间的关系,最后识别可能发生的风险事件。为突破施工技术参数和致险因素间联系不清晰问题,逐渐由风险人工识别发展出风险自动识别。

### (一) 人工识别

风险人工识别方法主要由经验丰富的工程师或专家,通过查阅工程规范、审查图纸及数据资料和勘察实地状况等直接判断可能的风险事故。依据是否进行风险跟踪,风险人工识别分为静态风险识别和动态风险识别。<sup>[5-7]</sup>

#### 1. 静态识别

静态风险识别通过总结相似资料经验,或通过专家访谈和问卷调查形式预测当前地铁建设可能存在的风险。主要识别方法包括流程图法、故障树法、检查表法、情景分析法、模糊层次分析法、分解分析法等,见表1。但这些传统方法列出的风险源粒度偏大,缺乏致险因素与风险间的关联性分析。<sup>[8]</sup>

#### 2. 动态识别

动态风险识别在静态识别的基础上,综合考虑地铁建设过程的地质状况、水文条件、施工技术、施工流程及施工重难点等因素,利用信息技术实时监测和采集机器、人、环境与管理状况信息,将风险因素与施工过程联系起来,识别的风险结构更加完整。<sup>[9]</sup>

表1 静态风险识别方法在地铁建设中的研究成果

Tab.1 Research results of static risk identification method in subway construction

序号	风险识别方法	风险分析中的研究成果
1	流程图法	单独应用较少,多与其他方法结合使用,流程图法主要对风险进行定性分析,但研究结果粗糙
2	故障树法	与WBS-RBS结合,多用于地铁基坑风险定量分析,识别风险数量少,对于风险事件和风险因素之间的关联性研究不足
3	检查表法	主要对现场安全状况进行检查,但面对不同安全事件,危险等级的划分困难
4	情景分析法	以案例为基础,对非常规重大地铁事故进行机理分析,但应用的算法比较繁琐
5	模糊层次分析法	以基坑风险分析为主,重点对风险源的定性描述研究,关于定量分析较少,且建立的指标权重集中指标数量不全面
6	分解分析法	与故障树法结合研究,进行敏感性分析,但对于风险源的分析过于粗略

一般以动态风险分析为主结合静态风险分析,能有效识别地铁建设风险。但人工风险识别方法缺少风险因素分析和定量研究,且未进行技术参数和致险因素间关联性的显性化描述,无法共享和重用所识别的风险信息<sup>[10]</sup>,因此无法满足难点工程和复杂工程的风险识别。可见人工风险识别方法具有较大的局限性。

### (二) 自动识别

面对人工识别的局限性,有学者基于工程图纸自动识别风险<sup>[8]</sup>,着重研究致险工程参数与风险事件间的关联性,结合传统的风险识别方法和计算机语言,识别地铁建设过程存在的风险,建立风险系统和数据库,见图2。

如图2所示,基于工程图纸的风险自动识别首先通过工程经验分析法、风险定义语义分析法、规范条文分析法和可靠度分析法等静态风险分析方法,建立风险识别规则并构建风险识别知识库,再定义需识别的工程图纸类别及计算机按序识图

策略,最后对计算机识别的基本图元进行面向安全风险的语义解析和计算分析,实现利用计算机存储的显性安全知识从工程图纸中自动识别风险。



图 2 从地铁图纸中自动识别风险过程

Fig.2 Process of automatic identification of risks from subway drawings

目前风险自动识别存在两大难点,其一是如何建立图元信息和工程技术参数间的关系,并分析风险与致险参数的关联性;其二是如何将复杂的关联结构化,并让计算机读取和运用建立的历史信息。国内外学者对相关理论和实现路径的研究还比较匮乏,尽管华中科技大学研究团队突破局限研发出《基于工程图纸的地铁施工安全风险自动识别系统》,但依旧无法涵盖所有类型的致险因素和风险事件。

## 二、风险评估

地铁建设风险评估是在风险识别的基础上建立指标体系,对事故发生的概率和发生事故带来的损失进行分析,再依据公式(1)的基本计算方法或其变式综合评估得出风险等级。

$$R = F(p, c) = p \times c \quad (1)$$

其中  $R$  表示风险度,  $p$  表示风险发生概率,  $c$  表示事故后果。

评估中研究者选择的指标权重和风险等级的确定方法不同,导致研究结果存在差异,下文将对地铁建设风险评估的研究方法和研究结果进行分析。

### (一)方法研究

为了针对潜在风险事故进行有效管理,研究人员采用了各种具有适用性、针对性和可操作性的评估方法进行风险评估,见表 2。

据表 2 内容分析,在风险评估中模糊理论应用最为普遍,目的是通过假设得到线性分布的隶属函数建立综合评估模型,或通过引入一种非线性模糊算子建立修正模型。<sup>[11]</sup>模糊理论常与层次分析法结合应用,利用层次分析法确定各层指标

表 2 地铁建设风险评估应用方法分类

Tab.2 Classification of applied methods for risk assessment of subway construction

序号	风险评估理论/方法	研究对象
1	模糊理论	(1) 深基坑
		(2) 邻近管线
		(3) 邻近建筑
		(4) 地下水
2	层次分析法	(1) 深基坑
		(2) 关键节点
3	数值计算或仿真	(1) 下穿桥梁
		(2) 邻近建筑
		(3) 下穿车站
		(4) 邻近工程
4	可拓理论	(1) 软土盾构
		(2) 火灾
5	指数法	(1) 盾构刀具磨损
		(2) 水下盾构施工
6	贝叶斯网络	(1) 邻近桥梁
		(2) 周边环境
7	专家评价法	(1) 地下水
		(2) 深基坑
		(3) 关键节点
8	粗糙集理论	(1) 邻近桥梁
		(2) 综合评估
9	CIM 模型	综合评估
10	神经网络	综合评估
11	质量功能展开法	钻眼爆破开挖
12	风险度 $R = F(C, P)$ 的评价模型	裂缝灾害
13	刚度修正法与国外案例分析	下穿既有线路
14	广义函数法	隧道管片错台

的权重或概率,为隶属函数的建立奠定基础。<sup>[12-13]</sup>

施工扰动造成的土体沉降为主要风险来源,促使数值计算或仿真和贝叶斯网络在地铁安全评估中的大量应用,即先对影响沉降的参数和数值进行严格计算和仿真<sup>[14-18]</sup>,再依据贝叶斯网络进行风险概率评估<sup>[19-20]</sup>。

可拓理论和指数法主要用于评估盾构法中存

在的风险,包括软土盾构、刀具磨损<sup>[21]</sup>、水下盾构<sup>[22]</sup>等,也有学者将可拓理论用于地铁施工过程的火灾风险评估<sup>[23]</sup>。

地铁建设过程中存在的风险因素繁杂,一些学者通过利用粗糙集理论简化数据,或在此基础上结合神经网络进行风险评估,提高网络的学习速率和判断准确率。

此外,少量学者分别利用质量功能展开法、风险度  $R = F(p, c)$  的评价模型、刚度修正法、国外案例分析法和广义函数法等方法对不同类型的地铁建设风险进行评估,取得了一定成果。

## (二) 研究成果

通过对表2中研究对象归类,根据研究内容的丰富程度将风险评估研究成果分为深基坑风险评估、周边环境风险评估、盾构法风险评估和其他风险评估。

### 1. 深基坑风险评估

深基坑工程风险来源最广,相关研究内容也最多。研究人员通常结合模糊理论、层次分析法和专家评价法量化风险,通过数学处理减少主观判断差异。但指标的选取却不尽相同,有研究者从围护结构和开挖及支撑两方面选取风险指标,有些则从基坑本体和周边环境两方面选取指标,以上方法选取指标数量偏少且粗糙。针对不足有研究者将风险指标分为三级,通过三级模糊计算评估,结论更客观可靠。

### 2. 建筑环境风险评估

周边环境的风险评估对象主要包括对邻近车站、管线、隧道、桥梁、房屋建筑和在建工程等,评估内容主要包括不均匀沉降、变形、开裂和坍塌等,评估方法包括模糊理论、数值计算或仿真、贝叶斯网络、粗糙集理论及刚度修正法和国外案例分析等。有学者对周边环境进行风险评估时将风险划分成五个等级,但由于分析的影响因素和选用的权重系数不同,导致划分的标准和结果存在差异。历史研究基本从水文地质、施工工艺、既有建筑自身条件和既有建筑与地铁工程的间距等四个方面来筛选风险因素,有学者将管理因素纳入研究后,提高了评估的可靠度。

对周边环境的风险评估主要是对沉降值进行监测、计算和模拟,但对变形、开裂和坍塌的研究较少,尤其规律性的探索不足。目前的评估研究缺少对施工动态影响、施工复杂工序转换及

地下水抽排等因素的考虑,尽管有研究者进行了工前检测、工前安全评估、工中动态控制以及工后评估四方面的风险评估,但仅限于对邻近桥梁的研究。

### 3. 盾构风险评估

随着盾构技术的推广,相比于其他几种地铁施工方法,风险发生的频次也随之增多。有学者专门通过改进后的肯特指数法对地铁施工风险进行分析,将评估模型应用于盾构刀具磨损,具有一定的使用价值。但模型建立过程中某些风险的发生机理并不完全清晰,依旧需要靠数据和经验整理所得。

土质条件对盾构法施工的影响很大,有学者将可拓理论应用于软土地层地铁盾构施工风险评估,主要评估施工复杂性和不确定性,解决主观风险指标量化的问题,但整个评估过程未考虑单因素的具体影响机理。

有别于普通施工,水下隧道施工风险更大,有学者通过应用指数法,拓展上述基本公式(1)中  $p$  和  $c$  得到公式(2)(3)(4)的计算形式,拓展后分值变化范围更大,更符合实际工况,但对于风险接受准则的研究和探讨却不足。

$$R = p \times c \quad (2)$$

$$p = f_1(B, D, C) = B \times D \times C \quad (3)$$

$$c = f_2(\text{后果指数}) \quad (4)$$

其中  $R$  为风险值;  $p$  为事故发生概率;  $c$  为事故后果;  $B$  为基本指数;  $D$  为设计指数;  $C$  为施工指数。

### 4. 其他风险评估

上文所述三种风险评估的研究已较丰富,通过文献研究还总结出其他风险评估,包括关键点、地下水、火灾、隧道管片错台、裂缝灾害和钻眼爆破开挖等,但研究成果较少。

(1) 关键节点风险。学者<sup>[24]</sup>依据工可阶段的资料评估并提出建议,缺少对风险的动态跟踪,未实现动态风险管理。

(2) 地下水风险。学者<sup>[20]</sup>分析信息不完备的地下水风险,强调评估中勘测的薄弱性和重要性,提出加强水文地质监测的建议,但未说明具体如何选取水文地质参数。

(3) 火灾风险。学者<sup>[25]</sup>通过多级可拓评估流程确定地铁火灾风险的薄弱环节及管理重点,并验证可拓理论在地铁火灾风险评估中的可行性。

(4)隧道管片错台风险。学者<sup>[26]</sup>通过广义函数思想建立管片错台的六指标风险评估体系,使评价指标间具有可比性,但风险因素的选取不全面,仍需完善。

(5)裂缝风险。学者<sup>[27]</sup>用风险度 $R = F(p, c)$ 的评价模型,提出了减小风险度的方法。

(6)钻眼爆破开挖风险。学者<sup>[28]</sup>先将事故类型作为输入向量,再从宏观上量化事故类型和作业活动的风险权重,进一步以风险因素作为输入向量进行研究。

此外,有学者希望通过粗糙集、神经网络及CIM模型等理论和方法,对整条地铁线路进行全面综合的风险评估,但还处于初步探讨阶段,整体风险等级仍缺乏统一量界定,可见地铁工程风险评估还存在较大的研究空间。

### 三、问题与挑战

#### (一) 风险因素完全识别困难

尽管目前风险识别已发展出自动识别技术,但风险与致险参数的关联性及复杂关联的结构化研究还欠完善,尚未建立包含所有风险的关联规则数据库。地铁施工过程本身十分复杂,加之我国疆土面积广,地质水文差异大,建设过程需要不断改变施工参数或施工工艺,造成整个系统内、外部环境的不断变化,增加了风险识别的难度;监测系统仅在检修非服役阶段产生的离线数据信息,缺乏系统性保存、分类和分析,千差万别的采集周期、精度要求、单位量纲、数据格式等导致信息数据无法调用,造成风险分析识别时信息数据不完备。

#### (二) 综合性风险评估困难

上文研究表明,目前关于风险评估的方法及

成果较多且分散,但若将整条地铁建设线路看成一个系统,子系统之间会相互联系,则综合性的风险评估才更有价值。传统的风险评估方法达不到对整条地铁线路系统性综合风险评估要求,受限于技术和管理水平,鲜有学者针对整条地铁建设线路进行综合性风险评估研究。

#### (三) 智慧化程度低

中国工程院院士钱七虎强调,国内地铁建设安全预警及信息化应用程度的智慧化水平不足,更趋向于“数字”阶段,即处于隧道工程信息化的初始阶段。目前预警系统所依托的“虚拟隧道”与物理实体处于分离状态,因此需要通过信息技术的融合,打破隔阂,实现对预警信息的发布、应急防治方案的实施等作出智能化响应和决策支持的指令。

### 四、结论

全面综述和分析地铁建设风险识别及评估现状,探讨其不足,得出以下结论。

第一,逐步建立完整的风险识别数据库,将风险与致险参数一一对应并进行结构化保存,便于计算机读取数据信息,益于重复利用。

第二,利用系统论的方法建立综合性风险评估模型,结合传统的风险评估方法,以整条地铁线路为单位进行风险分析,增加风险评估的可靠性。

第三,向“智慧隧道”方向发展,即利用大数据、物联网和BIM等技术与“数字隧道”融合,实现透彻感知、全面互联、深度整合和智能服务,钱七虎更强调这是今后一个时期的发展方向。<sup>[29]</sup>

### 参考文献:

- [1] 庞瑾, 顾保南. 2016年中国城市轨道交通运营线路统计和分析: 中国城市轨道交通“年报快递”之四[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(1): 1-5.
- [2] 李皓燃, 李启明, 陆莹. 2002—2016年我国地铁施工安全事故规律性的统计分析[J]. 都市快轨交通, 2017(1): 12-19.
- [3] 中国土木工程学会. 地铁及地下工程建设风险管理指南[M]. 北京: 北京中国建筑工业出版社, 2007.
- [4] 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: GB 50652—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [5] 李解, 王建平, 许娜, 等. 基于文本挖掘的地铁施工安全风险事故致险因素分析[J]. 隧道建设, 2017(2): 160-166.
- [6] 余宏亮, 丁烈云, 余明晖. 地铁工程施工安全风险识别规则[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(2): 77-81.
- [7] 丁烈云, 周诚. 复杂环境下地铁施工安全风险自动识别与预警研究[J]. 中国工程科学, 2012, 14(12): 85-93.

- [8] 余宏亮. 基于工程图纸的地铁车站施工安全风险自动识别研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [9] 陈伟珂, 龙昭琴, 李金玲. 地铁施工实时动态监控研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 344-351, 372.
- [10] 吴贤国, 张立茂, 余宏亮, 等. 基于知识集成的地铁施工安全风险识别专家系统研究[J]. 施工技术, 2012(13): 104-108.
- [11] 应国柱, 汪鹏程, 朱大勇, 等. 基于模糊综合评价模型的地铁施工风险评估[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 539-545.
- [12] 郑余朝, 李辉. ANP-FE 与数值模拟结合在地铁隧道近接施工风险评估与管理中的应用[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(3): 24-31, 39.
- [13] 胡长明, 陆征宇, 梅源, 等. 软土地层地铁盾构施工风险可拓评估方法研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 21-26.
- [14] 刘俊伟, 尚文昌, 于秀霞, 等. 基于模糊评判理论的深基坑施工风险评价[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 825-830.
- [15] 高丙丽, 任建喜. 地铁施工邻近管线安全风险识别研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 118-123.
- [16] 任建喜, 杨锋, 朱元伟. 邻近建筑物条件下西安地铁盾构施工风险评估[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(7): 88-93.
- [17] 邓祥辉, 徐甜, 龚珍, 等. 基于模糊层次分析法的地铁深基坑施工风险评估[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(13): 136-142.
- [18] 苏洁, 张顶立, 周正宇, 等. 地铁隧道穿越既有桥梁安全风险识别及控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3188-3195.
- [19] 吴贤国, 李铁军, 林净怡, 等. 基于粗糙集和贝叶斯网络的地铁盾构施工诱发邻近桥梁安全风险评价[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(3): 9-15, 29.
- [20] 周念清, 魏诚寅, 娄荣祥, 等. 基于模糊数学理论探讨评判地铁工程中地下水风险[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 1629-1633.
- [21] 赵蕾, 卢浩, 王明洋, 等. 改进肯特指数法在地铁施工风险评估中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12): 97-102.
- [22] 卢浩, 施焯辉, 戎晓力. 水下隧道盾构法施工安全风险识别探讨[J]. 中国工程科学, 2013, 15(10): 91-96.
- [23] 安永林, 彭立敏. 地铁火灾风险性的多级可拓综合评估[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(5): 566-571.
- [24] 黄宏伟, 朱琳, 谢雄耀. 上海地铁 11 号线关键节点工可阶段工程风险评估[J]. 岩土工程学报, 2007(7): 1103-1107.
- [25] 安永林, 彭立敏. 地铁火灾风险性的多级可拓综合评估[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(5): 566-571.
- [26] 冯天炜, 周佳媚, 张君, 等. 地铁隧道管片错台风险评估体系的研究和探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 1066-1072.
- [27] 王启耀, 滕宏泉. 西安市地铁二号线地裂缝灾害风险评估[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 954-958.
- [28] 张明媛, 刘超, 袁永博. 一种基于 QFD 的地铁施工风险评估方法[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 1027-1032.
- [29] 钱七虎. 隧道工程建设地质预报及信息化技术的主要进展及发展方向[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 251-263.

(责任编辑: 王圆圆)