

城市轨道交通建设工程施工安全风险 信息化系统研究*

蒙国往^{1,2} 黄劲松¹ 吴波^{1,4,5} 欧强³

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 530004, 南宁; 2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 530004, 南宁;

3. 湖南大学岩土工程研究所, 410082, 长沙; 4. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 330013, 南昌;

5. 广州城建职业学院建筑工程学院, 510925, 广州//第一作者, 讲师)

摘要 由于城市轨道交通建设工程项目的隐蔽性、复杂性和较难预测等特点, 使工程面临巨大的施工风险。通过对南宁、宁波两地城市轨道交通现有风险管理系统的实地调研, 结合自身团队对风险管理信息化系统的研发, 提出了一套完整的风险管理信息化系统开发方案。通过三大功能模块(静态风险评估、动态风险管理、风险知识管理)和相关理论方法(层次分析法、模糊综合评价、人工神经网络等)阐述了风险管理信息化系统开发的流程, 最终得出一套可行且合理的系统搭建方案。

关键词 城市轨道交通; 施工安全; 风险管理信息化系统

中图分类号 TU714:U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.09.018

Research on Construction Safety Risk Management Information System of Urban Rail Transit Construction Project

MENG Guowang, HUANG Jingsong, WU Bo, OU Qiang

Abstract Due to the covertness, complexity and difficulty in prediction, the urban rail transit construction project faces high construction risks. According to the spot investigation in the existing risk management systems of urban rail transit in Nanning and Ningbo, combined with the research and development of the risk management information system made by the author's team, this paper puts forward a complete development plan for the risk management information system. It discusses the content of the system from three function modules, which are static risk assessment, dynamic risk management and risk knowledge management. The development process is explained by adopting theoretical methods of analytic hierarchy process (AHP), fuzzy comprehensive evaluation and artificial neural network.

Finally, it comes to a feasible and reasonable system development plan.

Key words urban rail transit; safety in construction; risk management information system

First-author's address College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, 530004, Nanning, China

0 引言

城市轨道交通的发展十分迅猛,截至2018年底,中国内地已有35个城市运营城市轨道交通线路,总长为5 766.6 km^[1]。但在城市轨道交通建设过程中,由于建设工程的不可预见性和复杂性,时常会发生风险事故。如2018年佛山地铁盾构区间路面坍塌事件,以及2019年广州地铁路面塌陷事件等。据不完全统计,地铁车站基坑安全事故大部分发生在施工阶段^[2],故为了有效降低施工风险,减少各类安全事故发生,在施工前对施工风险进行准确而全面的识别和科学的评估以及在施工过程中对风险进行实时动态管控是十分有必要的。未来在5G(第5代移动通信技术)网络 and 大数据云、计算技术的引领下,建设风险管理信息化系统是必然的趋势。

文献[3]基于互联网开发了利用多源信息的混合数据融合模型来模仿专家对风险事件进行评估和预警的系统,并成功应用于武汉、沈阳的地铁建设项目中。文献[4]利用自动化监测设备将施工过程中现场监测数据和4D(四维)模型进行对比分析,建立了一个可视化实时查看施工安全状态的模型。文献[5]构建了一个基于案例分析数

* 广西大学科研基金项目(XTZ160590);广西自然科学基金项目(2018GXNSFDA138009);广西科技计划项目(桂科AD18126011)

数据库,能自动生成实时安全指标,用于支持风险决策的安全管理系统。文献[6]利用层次分析法和模糊数学建立隧道施工风险评估的云模型,并成功运用于老虎山隧道 ZK3+208—ZK3+300 区间风险评估。文献[7]应用模糊熵理论,建立了盾构隧道施工安全风险综合指标体系,并利用各种因素之间的耦合度开发了安全风险系统。文献[8]引入 BIM(建筑信息模型)技术,建立基于风险事件库的风险识别系统,可自动识别风险事件,有效提高风险识别效率。上述构建的系统或模型,都是针对单一的实用功能进行系统开发,而一个完整的系统的科学的风险管理信息化系统应包含从风险评估到风险管控再到风险知识管理的全过程。

目前,尚未有一款功能完善的风险管理信息化系统,许多仅是单个功能的实现应用,未能对施工风险进行有效管控。许多大型的施工企业或建设单位等都仍处于信息化系统的探索开发中。如北京安捷工程咨询有限公司或上海同是工程科技有限公司等国内知名工程风险咨询企业所研发的风险管理信息化系统,虽已在国内多地城市轨道交通中应用,但实际使用效果和功能完备程度均难以让人满意。本文基于 GB 50652—2011《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》(以下简称“《规范》”),介绍自身团队开发的风险管理信息化系统(包含静态风险评估、动态风险管控和风险知识管理 3 大板块)。风险管理信息化系统内容如图 1 所示。

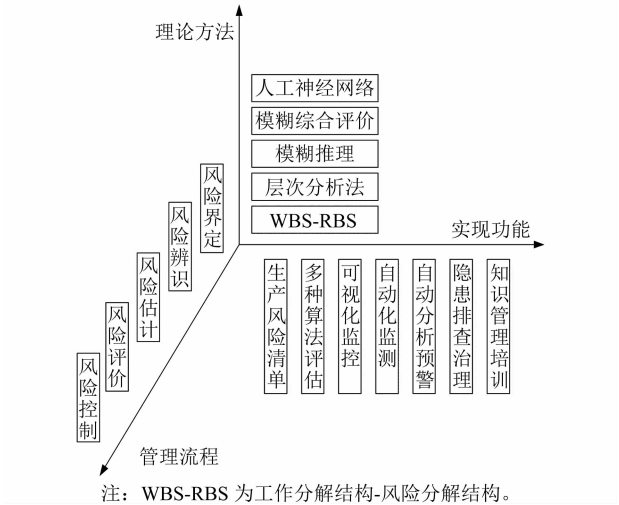


图 1 风险管理信息化系统内容三维图
Fig. 1 3D diagram of risk management information system

示。本文从理论支撑、功能模块和实现流程等三方面进行分析,旨在构建一个功能完整且便于使用的风险管理信息化系统,为从事施工安全风险管理的工作者提供一些新的想法和思路,为城市轨道交通建设施工安全保驾护航。

1 静态风险评估

1.1 风险辨识方法

在进行风险辨识前需先进行风险界定。风险界定最主要的内容是确定建设工程需要划分为多少个分部分项工程,采用 WBS-RBS 法^[9]将两项工作简化成一个流程:首先,建立分部分项工作的分解结构,如图 2 所示;其次,建立风险事件库,即每道施工工序可能存在的所有潜在风险事件,参考大量工程实例与文献,总结出风险事件应分成施工风险、环境风险、自然风险和地质风险共 4 类,如图 3 所示;再次,在选择分部分项工程的同时,系统自动匹配相关的风险事件;最后,形成耦合矩阵,生成风险事件清单。一般在风险辨识中还有专家调查法、核查表法等常用的方法,但在信息化系统中,WBS-RBS 法是最有效、最便捷的实现风险辨识的方法,因此推荐使用 WBS-RBS 法。

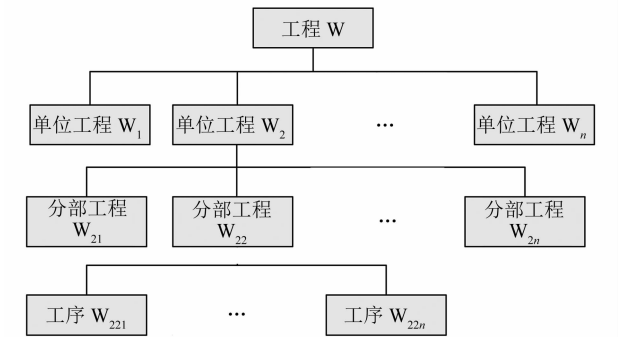


图 2 工作分解结构图
Fig. 2 Work breakdown structure diagram

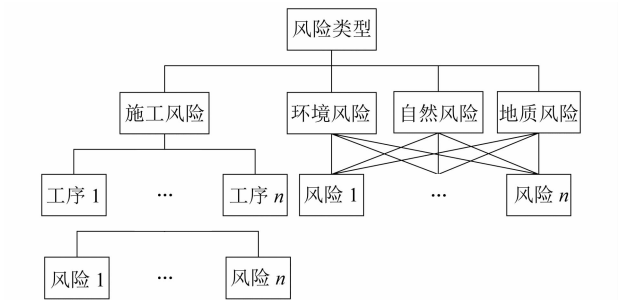


图 3 风险事件库结构示意图
Fig. 3 The risk event database structure diagram

1.2 设置专家权重指标

在风险评估中,最有效且便捷的方法就是应用专家丰富的个人施工经验对施工风险进行定量打分评估。然而,因每位专家各自的现场经验、专业水平不同,对同一风险事件的评估有可能会存在较大偏差,从而影响最终评估结果,因此必须对各位评估专家进行权重分配。在风险管理信息化系统中可设置专家权重指标。本文团队开发的风险管理信息化系统从 5 个指标确定专家权重,具体如表 1 所示。指标内容由专家填写,系统可通过专家填写信息自动归一化计算专家权重,并收集专家信息形成专家数据库。

表 1 专家权重指标表
Tab.1 Expert weighting index

指标名称	指标等级				
从事相关工作年限	0~5 年	>5~10 年	>10~15 年	>15~20 年	>20 年
学历	专科	本科	硕士研究生	博士研究生	博士后
学位	其他	大专	学士	硕士	博士
专业技术职称	其他	初级	中级	副高	正高
所获最高级别奖项	其他	市级	省级	国家级	世界级
等级赋值	1	2	3	4	5

1.3 风险估计算法

在风险估计算法中,首先需明确风险事件(如隧道及地下工程风险 R) 是风险发生概率 P 与风险发生损失严重程度 C 的不利组合^[10],即 $R=PC$ 。算法主要涉及层次分析法和模糊综合评价法,具体步骤如下:① 利用层次分析法确定每个风险事件权重^[11];② 根据《规范》分别建立风险发生概率和风险发生损失严重程度的评语集和对应赋值,如表 2 所示;③ 专家在系统中对每个风险事件进行模糊评价,系统根据模糊评价法的权重进行对应的赋分。

表 2 评语集及赋值表
Tab.2 Rubric set and assignment

指标名称	评语集				
风险发生概率	频繁的	可能发生	偶尔发生	很少发生	不可能发生
风险发生损失	灾难性的	非常严重的	严重的	需考虑的	可忽略的
分值	5	4	3	2	1

1.4 风险等级

根据打分结果,下一步则是判断每个风险事件的风险等级。判定规则采用模糊推理理论^[12]确定,具体流程如图 4 所示。首先,建立 P 、 C 、 R 三者的隶属度函数,本系统采用最常用的三角模糊数函数,因为隶属函数的确立带有主观性,也可以采用梯形模糊数或者其他认为合理的隶属函数;然后,确立模糊规则,本系统模糊规则参照《规范》中的风险耦合矩阵建立共 25 条规则;最后,输入 P 、 C 的打分结果,系统根据模糊推理规则判定风险事件等级。

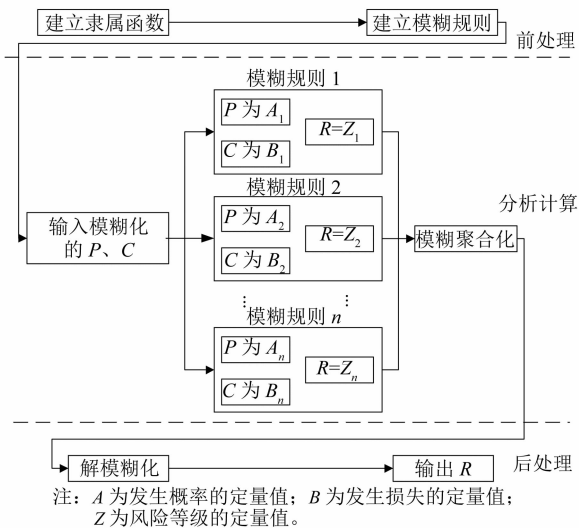


图 4 模糊推理流程图

Fig.4 Fuzzy reasoning flow chart

2 动态风险管控

2.1 BIM 技术应用

BIM(建筑信息模型)技术具备数字化、标准化、规范化施工的优点,但目前我国 BIM 发展最大的障碍是没有统一的规范标准去实现数字模型的统一化,所以目前都还在探索研究 BIM 真正的应用方法和应用范围。在风险动态管控过程中,由于施工进度的推进,风险是处于不断地变化的,此时,要判断施工风险的大小做出风险决策就必须结合现场工况。因此,本系统利用 BIM 实现 2 个功能点:① 利用 BIM 和 3D 激光扫描建模技术进行模型对比融合,在系统上实时展现现场工况,如图 5 所示;② 在 BIM 中嵌入监测点数据,并加入数据接口,实现达到监测数据在模型中呈现的效果,不仅可极大地提高查看监测数据的效率而且能很好地支持风险决策。



图 5 BIM 现场工况图

Fig. 5 BIM site working diagram

2.2 自动化监测

近些年,自动化监测技术在城市轨道交通中开始广泛应用,在天津、杭州等地的地铁建设中都有应用,尤其在盾构隧道工程中也成熟应用,但在地铁深基坑中的功能应用还不完善。主要体现在:① 数据对接接口不统一,厂家不同自动化监测设备的接口标准也不同;② 数据呈现形式不规范,多以单个二维图形呈现为主。因此,本风险管理信息化系统对地铁深基坑工程对监测数据的呈现进行优化处理,以三维图形呈现多个监测点数据,如图(6)、图(7)所示(图中仅展示了桩体水平位移及支撑轴力,其他监测指标如地表沉降、坑底隆起等均可参照得到);并可与自动化监测设备厂家合作,数据接口与系统接口无缝对接,可实时展示监测数据。

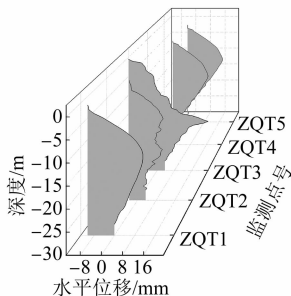


图 6 桩体水平位移三维示意图

Fig. 6 3D diagram of horizontal displacement of pile

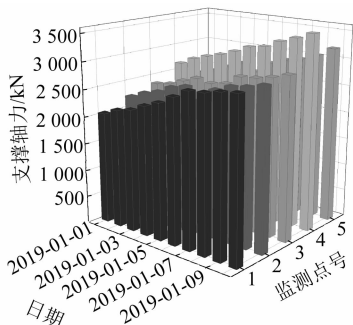


图 7 支撑轴力三维示意图

Fig. 7 3D diagram of axial force

2.3 智能化预警

预警主要指监测数据的预警,它由监测控制值决定的,难点在于控制值大小的设置。由于不同地区的地质条件不同,会导致控制值也不同。而目前自动化监测设备都是基于国家规范设置统一的控制值,并未根据不同地区因地制宜来动态调整监测控制值,导致很多时候预警情况不明确,阻碍风险决策。而在风险管理信息化系统中可参考基于文献[13]对隧道围岩位移预测的方法,采用 ANN(人工神经网络)的方法,建立三层神经元模型,应用 BP(误差反向传播)算法,选取 Sigmoid 函数作为激励函数,以当地同类工程监测预警数据作为样本进行学习预测控制值,以达到动态调整控制值,实现智能化预警的效果。BP 人工神经网络学习流程如图 8 所示。

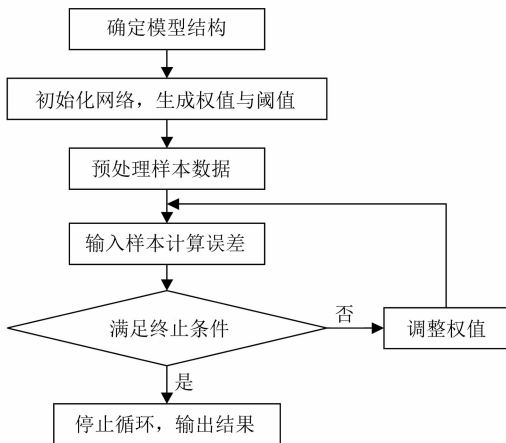


图 8 BP 人工神经网络学习流程图

Fig. 8 BP artificial neural network learning flow chart

2.4 隐患排查治理

早在 2015 年铁路工程就开始推进风险管理信息化系统的建设,到 2016 年国家提出风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制的要求。此后,各地城市轨道交通建设单位才陆续建立隐患排查治理体系。该体系建立需解决两个重点问题:① 隐患分类分级;② 建立责任排查治理。第一个重点问题,可基于 2012 年 7 月中国建筑工业出版社出版的《城市轨道交通工程质量安全检查指南》(以下简称《检查指南》),参考对地铁安全隐患排查机制的研究,将安全隐患分为 22 个大类,质量隐患分为 18 个大类,因各地施工方法、地质条件、周边环境等不同,需根据自身情况进行具体的分类,也可借鉴《检查指南》中的详细分类;而隐患分级则基本都分为 4 个等级(I 级-IV 级)。第二个重点问题,根据响应机制的设计,隐患等级不同,响应的单位不同,响应

2.5 应急管理

[illegible]

在知识缺乏、经验不足的情况。在风险管理过程中需要管理人员根据现场状况、历史经验、知识推理最终做出风险判断与决策,这过程中要求管理人员具备相应的包括管理、技术、经济等学科的综合知识才能做出正确的风险决策。故风险知识管理也是信息化系统中重要的一环,系统中应定期对各参建单位管理人员与施工人员进行培训,并施行考核制度,以提高学习风险知识的积极性和主动性。

3.2 案例推送

系统还应向 APP(应用程序)客户端定期更新推送国内外发生的城市轨道交通建设风险事故,包括事故经过、事故伤亡、事故救援、事故处置、事故原因调查等相关内容,给管理人员起到警示和学习的作用。并可设置专家线上交流讨论区,对于案例有疑惑的或者对正在施工的工程项目有技术难题的都可给专家留言咨询,以充分利用专家资源,更好地帮助管理人员完成风险决策。

4 结语

本文主要结合自身团队开发的信息化系统全面分析了一个完整的城市轨道交通建设安全风险,管理信息化系统应如何实现开发应用,同时梳理风险管理工作内容,具体体现在以下几点:

1) 明确了风险管理信息化系统由三大部分组成,分别为静态风险评估、动态风险管控、风险知识管理。

2) 提供了几种用于实现信息化系统开发的理论方法,如层次分析法、模糊综合评价法、BP 人工神经网络法等。

3) 说明了信息化系统开发所需的技术设备以及如何利用这些技术设备提升信息化系统的应用性和实用性,如 BIM 技术、三维激光扫描技术、自动化监测设备等,可根据各自不同技术特点制定对应实现方案。

参考文献

- [1] 洪开荣. 近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考(2017—2018 年)[J]. 隧道建设(中英文),2019(5):710.
HONG Kairong. Development and thinking of tunnels and underground engineering in China in recent 2 years (from 2017 to 2018)[J]. Tunnel Constr,2019(5):710.
- [2] 熊自明,卢浩,王明洋,等. 我国大型岩土工程施工安全风险研究进展[J]. 岩土力学,2018(10):3703.
XIONG Ziming, LU Hao, WANG Mingyang, et al. Research

progress on safety risk management for large scale geotechnical engineering construction in China [J]. Rock and Soil Mechanics,2018(10):3703.

- [3] DING L, ZHOU C. Development of web-based system for safety risk early warning in urban metro construction [J]. Automation in Construction,2013:45-55.
- [4] ZHOU Y, DING L, CHEN L J, et al. Application of 4D visualization technology for safety management in metro construction[J]. Automation in Construction,2013:25-36.
- [5] AGUILAR G E, HEWAGE K. IT based system for construction safety management and monitoring: C-RTICS2[J]. Automation in Construction,2013:217-228.
- [6] LIN C, ZHANG M, LI L, et al. Risk assessment of tunnel construction based on improved cloud model [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2020,34(3):04020028-1.
- [7] PAN H, GOU J, WAN Z, et al. Research on coupling degree model of safety risk system for tunnel construction in subway shield zone[J]. Mathematical Problems in Engineering,2019:1-19.
- [8] ZHANG L, WU X, DING L, et al. Bim-based risk identification system in tunnel construction[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2016,22(4):529-539.
- [9] 黄文成,帅斌,张光亚. 基于改进的 WBS-RBS 识别铁路危险品运输风险[J]. 中国安全科学学报,2018(8):93.
HUANG Wencheng, SHUAI Bin, ZHANG Guangya. Improved WBS-RBS based identification of risks in railway transportation of dangerous goods [J]. China Safety Science Journal, 2018 (8):93.
- [10] 卞晓琳,何平,施烨辉. 风险管理在隧道及地下工程中的应用研讨[J]. 中国安全科学学报,2009(6):154.
BIAN Xiaolin, HE Ping, SHI Yehui. Discussion on the application of risk management in tunnel and underground works [J]. China Safety Science Journal,2009(6):154.
- [11] 许振浩,李术才,李利平,等. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J]. 岩土力学,2011(6):1757.
XU Zhenhao, LI Sucai, LI Liping, et al. Risk assessment of water or mud inrush of karst tunnels based on analytic hierarchy process[J]. Rock Soil Mech,2011(6):1757.
- [12] 谢涛. 铁路建设工程风险评估与管理研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
XIE Tao. Research on risk assessment and management of railway construction projects [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [13] 李元松,李新平,张成良. 基于 BP 网络的隧道围岩位移预测方法[J]. 岩石力学与工程学报,2006(增刊1):2969.
LI Yuansong, LI Xinping, ZHANG Chengliang. Displacement prediction method of surrounding rock in tunnel based on BP neural network [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006(S1):2969.
- [14] 何山,阮大伟,石雷. 城市交通工程风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制实施指南[M]. 北京:中国建材工业出版社,2019:1.