

DOI: 10.7672/sgjs2025070051

基于 WBS-RBS 和 TOPSIS 法的城市轨道交通 建设风险评估*

李强华

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 地铁建设期间发生的工程风险评估及控制十分重要。工作分解结构-风险分解结构(WBS-RBS)法已成为开展风险辨识工作的重要方法。以南昌轨道交通4号线某盾构区间为例,建立了基于WBS-RBS法的风险评估模型,并引入改进逼近理想解排序法(TOPSIS)剔除重要度较小的风险因素。模型共包括2个一级风险指标,7个二级风险指标,分别是周边建筑物、周边管线、盾构施工准备、始发、开挖掘进、到达以及联络通道。其中,对盾构施工准备中的盾构选型、周边管线及周边建筑物进行了风险辨识、风险指数计算。风险指数由大到小的排序依次为周边管线>周边建筑物>盾构选型。研究表明,通过对地铁工程建设期间发生的风险采取调整施工参数、加强监测及加强养护等管控措施能够有效提高地铁施工的安全性。经过对比,预控后的风险事件可降低一个风险等级。

[关键词] 轨道交通;地铁;风险;评估

[中图分类号] TU990

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0051-06

Risk Assessment of Urban Rail Transit Construction Based on WBS-RBS and TOPSIS Method

LI Qianghua

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: It is significant to evaluate and control the engineering risk during the construction of subway. Work breakdown structure-risk breakdown structure (WBS-RBS) has become a critical method for risk identification. Taking a shield section of Nanchang Rail Transit Line 4 as an example, a risk assessment model based on the WBS-RBS method was established, and the improved TOPSIS method was introduced to eliminate the risk factors with less importance. The model included two first-level risk indicators and seven second-level risk indicators, namely, surrounding buildings, surrounding pipelines, shield construction preparation, launching, excavation, arrival, and contact channels. Among them, the risk identification and risk index calculation of shield selection, surrounding pipelines, and surrounding buildings in shield construction preparation were carried out. The order of risk indices, ranking from big to small, is surrounding pipelines > surrounding buildings > shield selection. The research indicates that the safety of subway construction can be effectively improved by adjusting construction parameters, strengthening monitoring, and strengthening maintenance and other control measures for the risks occurring during the construction of subway projects. After comparison, the risk events after pre-control can be reduced by a risk level.

Keywords: rail transit; subways; risk; assessment

0 引言

轨道交通以其独特的优势成为目前缓解交通压力、解决交通拥堵的主要途径^[1-3]。随着我国城市轨道交通的快速发展,地铁已成为我国最常见的轨道交通形式。在现有地铁隧道施工中,盾构法已

* 中国铁建股份有限公司 2022 年度科技研究开发计划 (2022-C1);
中铁十八局集团有限公司 2022 年度科研创新项目 (C2022-051)

[作者简介] 李强华,助理工程师,E-mail: proteus33@163.com

[收稿日期] 2025-03-03

成为最主要的施工方法^[4-5]。城市地铁多修建在地下,其上部有很多建筑物、管线、道路等已有结构,地铁施工势必会对这些结构造成影响,轻则影响正常使用,重则造成工程事故^[6],这些都对地铁建设阶段的风险评估及风险管控提出了更高的要求。因此,开展城市轨道交通建设风险评估研究,明确风险等级及风险预控措施,对保障城市轨道交通的施工安全具有重要的实践意义。

目前,针对城市轨道交通的风险评估及风险管控开展的研究较为丰富。郭新伟等^[7]对地铁工程物资管理风险进行了研究,采用层次分析法对物资管理进行了风险评价。彭涛等^[8]提出建立以风险源-风险-风险因素结构为基础的建筑工程施工项目安全风险管理体系,有效控制施工项目的风险。黄晓东等^[9]采用 WBS-RBS 对地铁盾构施工的工作风险和事件进行了合理划分,采用改进的蒙特卡罗法对邻近建筑物的风险因素及风险等级进行分析,并验证了两种方法的合理性。吴城等^[10]采用模糊层次分析法和灰色关联度分析法对地铁隧道进行了多层次、多维度、多因素的风险划分及风险评估,并与实际监测结果进行对比,验证该组合方法的有效性。陈仁朋等^[11]提出了模糊层次分析法 (FAHP) 和逼近理想解排序法 (TOPSIS) 相结合的风险评估方法,将其运用在盾构隧道下穿建筑物的风险评估中,取得了较好效果。阮永芬等^[12]将风险评估的标准划分为后果严重标准、系统脆弱标准与系统威胁标准,并建立基于 C-V-T 模型的风险评估流程。

综上所述,现有研究对地铁隧道盾构施工中周围建筑物的危险因素研究较多,其中多数是从管理、技术、组织等方面进行分析,很少涉及周围道路、管线及盾构施工等角度遭受破坏的风险因素。本文从周边建筑物、周边管线及盾构施工多角度出发,运用 WBS-RBS 法和 TOPSIS 法建立全面的风险评估体系,为地铁施工建设的风险管理控制提供借鉴与参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

南昌轨道交通 4 号线途径 29 个站点,以南昌东湖区人民公园站—七里站的部分盾构区间为对象,本次评估范围为上沙沟站—起风路站区间,区间地理位置如图 1 所示,线路自出上沙沟站后,以半径 $R=450\text{m}$ 曲线绕避 1 栋 16 层江西油脂化工厂危房改造建筑,同时下穿油脂化工厂职工宿舍区及大量低矮房屋后进入青山南路,以半径 $R=1\,000\text{m}$ 曲线沿青山南路敷设至起风路路口后接入起风路站。

区间上下行线为两条分修的单线隧道,采用盾构法施工,管片形式采用“3+2+1”(3 块标准块、2 块邻接块和 1 块封顶块)形式,错缝拼装,弯曲螺栓连接,管片背后注浆填充,隧道横断面如图 2 所示。



图 1 区间地理位置

Fig. 1 Geographical location

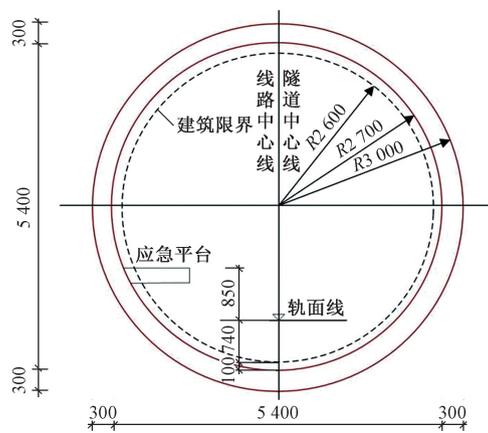


图 2 隧道横断面

Fig. 2 Tunnel cross-section

1.2 地质条件

地势开阔较平坦,场地基本平整,根据勘察揭露,勘探深度内场地地层自上而下分别为:①人工填土、②淤泥质土、③₁粉质黏土、③_{1,1}淤泥质土、③₂细砂、③₃中砂、③₄粗砂、③₅砾砂、③₆圆砾、⑤_{1,2}强风化泥质粉砂岩、⑤_{1,3}中风化泥质粉砂岩、⑤_{4,2}中风化钙质泥岩。拟建区间隧道结构底板主要位于③₅砾砂、⑤_{1,2}强风化泥质粉砂岩层,局部位于⑤_{1,3}中风化泥质粉砂岩层,区间地质纵断面如图 3 所示。

1.3 周边环境

上沙沟站—起风路站区间线路出上沙沟站后,下穿油脂化工厂职工宿舍区后进入青山南路,行至起风路路口后接入起风路站。沿线为市政道路、居民楼等,既有市政道路上人流车流量大,道路两边房屋密集,地下各种管线错综复杂。在青山南路

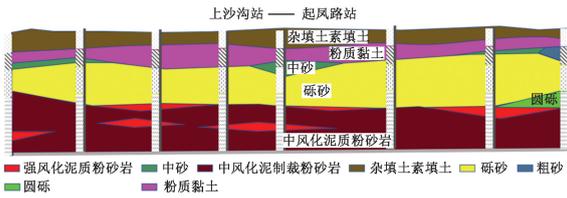


图3 区间地质纵断面

Fig. 3 Sectional geological profile

上,存在 DN800, DN400, DN200 等供水管, 2 400mm×2 000mm 箱涵、DN1 000 排水主管, DN400, DN200 燃气管,道路中心上方存在 110kV 电力方沟及 10kV 电力管线等。

根据地质情况确定地表沉降槽宽度的影响范围,对施工影响范围内的地面建筑物进行调查,调查重点是盾构下穿构造物,旁穿在 10m 以内的房屋工程。盾构正穿建筑物有南昌市青山路人行天桥,盾构旁穿建筑物有鑫诚宾馆等。

2 基于 WBS-RBS 和 TOPSIS 法的地铁隧道盾构施工风险识别

对于盾构隧道工程,受影响范围(横截面)内 $1.5H$ (H 为盾构隧道底板埋深) 的建(构)筑物、管线、桥梁等各单体,均应作为风险工程进行评估,综合考虑盾构掘进、降水等工程对其影响。

2.1 WBS-RBS 风险评估方法

本文采用 WBS-RBS 风险识别技术进行风险辨识。该方法通过将工程项目按工程分部进行分解,然后将评估范围内的工程风险进行结构分解。结合工程结构和风险结构分解,对应 RBS 中的具体风险与 WBS 中的工程部位,识别出风险发生的工程部位和范围。随后进行因果分析和描述,以达到识别风险的目的。

1) 制定 WBS

制定项目的 WBS,将项目工作分解为可管理和可追踪的小任务。WBS 有助于识别项目的不同方面和阶段,为后续的风险评估提供基础。

2) 制定 RBS

制定与 WBS 相对应的 RBS。RBS 用于将项目风险分解为不同的风险类别或类型。这样分解可以更好地理解项目可能面临的风险,并有助于对风险进行有组织的管理。

3) 识别风险

针对 WBS 和 RBS 的结构,团队可以开始识别与每个 WBS 元素和 RBS 类别相关的风险,包括项目的技术、进度、成本、资源等各方面的风险。

风险优先级 R 可以帮助计算哪些风险是最紧

急需要处理的。

$$R = PI \quad (1)$$

式中: P (probability) 表示风险发生的概率; I (impact) 表示风险发生时的影响。

2.2 TOPSIS 法

本文采用 TOPSIS 方法将风险程度较小的因素剔除,以精简风险评估系统。TOPSIS 通常将问题转化为 1 个决策矩阵,其中每行表示 1 个备选方案,每列表示 1 个评价指标。对项目风险评估的模型共有 20 列,每行可为多个代建项目对应评价指标综合得分集合,也可为某一固定项目不同专家对应评价指标评价的综合得分集合。假设有 n 个要评价的对象,20 个评价指标(已经正向化)构成的正向化矩阵如下:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1,20} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2,20} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{n20} \end{bmatrix} \quad (1)$$

数据标准化处理即正向化矩阵标准化处理的目的是消除不同指标量纲的影响,使得各个指标在计算过程中具有可比性。对其标准化的矩阵记为

$$Z, Z \text{ 中的每一个元素: } z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=0}^n x_{ij}^2}} (j = 1, 2, 3, \dots,$$

20), 正向化矩阵即可标准化为:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1,20} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2,20} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_{n1} & z_{n2} & z_{n3} & z_{n20} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将 WBS-RBS 法和 TOPSIS 法相结合的综合分析方法来进行风险评估。通过专家模型中底层风险因素的可能发生性以及发生后果的评分,结合各层次风险权重的计算,得出各层次风险系数。这个系数成为衡量风险因素风险水平的指标,用于判断各风险因素的风险等级。这种综合方法结合了定性和定量分析,有助于全面评估风险。

基于南昌轨道交通 4 号线的实际施工情况,利用 WBS-RBS 和 TOPSIS 法组合划分的风险评估模型如图 4 所示。

2.3 风险评估标准

地铁及地下工程建设期间出现的工程风险对于采取不同的风险控制对策和处置措施具有决定性影响。因此,在风险评估中,需要在先验条件下明确定义可接受的风险水平及其程度。根据《地铁

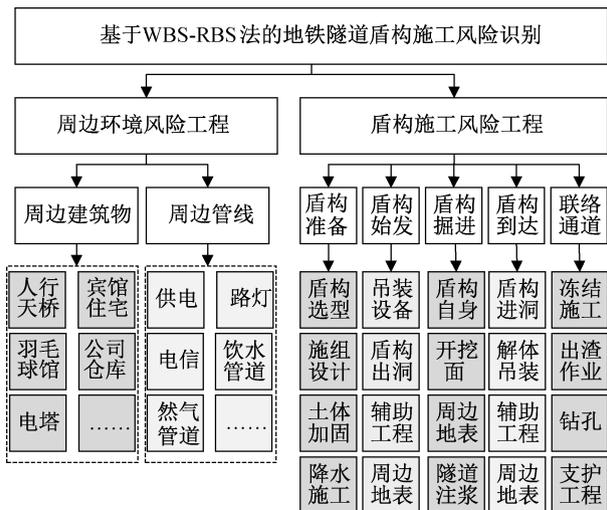


图4 风险评估模型

Fig. 4 Risk assessment model

及地下工程建设风险管理指南》和国际隧协提供的风险评价方法,风险分级标准包括风险事故发生概率的等级标准(即风险概率等级)和事故发生后的损失等级标准(即风险损失等级)。

根据城市轨道交通地下工程建设风险发生的概率和损失等级,将工程风险等级分为四级(见表1,2),建立风险分级矩阵。

表1 风险等级标准

Table 1 Standard of risk levels

| 可能等级 | 概率等级 | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| | A | B | C | D | E |
| | 非常灾难 | 非常严重 | 一般严重 | 需要考虑 | 可以忽略 |
| 1 | 频繁 | I级 | I级 | II级 | III级 |
| 2 | 可能 | I级 | I级 | II级 | III级 |
| 3 | 偶尔 | I级 | II级 | III级 | III级 |
| 4 | 罕见 | II级 | III级 | III级 | IV级 |
| 5 | 绝非 | III级 | III级 | IV级 | IV级 |

表2 风险等级打分

Table 2 Scoring of risk levels

| 等级 | 估值 | 说明 |
|-----|---------------------|-----------------------|
| I | $15 \leq R \leq 25$ | 付出较高代价完成风险预防,措施必须实施 |
| II | $9 < R < 15$ | 确定并实施预防措施,以降低风险 |
| III | $4 \leq R \leq 9$ | 风险处于可接受的范围,可能需要采取预防措施 |
| IV | $0 < R \leq 4$ | 风险可接受,无需额外采取措施 |

对于得分同属4分时,需对照表2进行风险等级归属的判别,若损失等级为2分,可能性等级为2分时归类为IV级,其余情况均属III级。

对于I级工程风险需严肃对待,必须采取规避

措施或将风险降至可接受水平。针对II级风险,应增强监测并采取处理措施,以降低风险等级,且需要有效控制成本,低于风险发生后产生的损失。对于III级风险,暂时无需采取具体措施,但需要及时加强监测,以防止风险升级。IV级风险无需处理,只需进行普通的监测。

3 风险辨识评估结果及预控措施

3.1 风险辨识结果

依据工程概况及区间风险专项设计,同时采用WBS-RBS和TOPSIS风险辨识方法,可得上沙沟站一起风站区间风险工程的风险单元、安全风险事件、风险因素辨识结果。以青山路人行天桥、鑫诚宾馆、供电管线、盾构施工风险为例,风险辨识结果如表3所示。

表3 风险辨识结果

Table 3 Risk identification result

| 风险工程 | 二级风险 | 风险单元 | 风险事件 | P | I | R |
|----------|--------|------|---------|---|----|----|
| 周边环境风险工程 | 周边建筑物 | 人行天桥 | 沉降 | 5 | 2 | 10 |
| | | | 开裂 | 4 | 3 | 12 |
| | 鑫诚宾馆 | 倒塌 | 2 | 4 | 8 | |
| | | 沉降 | 5 | 2 | 10 | |
| 周边管线 | 供电 | 鑫诚宾馆 | 开裂 | 4 | 3 | 12 |
| | | 倒塌 | 2 | 5 | 10 | |
| 盾构施工风险工程 | 盾构施工准备 | 盾构选型 | 管线断裂、破坏 | 3 | 4 | 12 |
| | | | 盾构选型风险 | 3 | 3 | 9 |
| | | | 刀具异常磨损 | 2 | 3 | 6 |
| | | | 盾体密封失效 | 1 | 4 | 4 |

3.2 风险指数计算

通过引入WBS-RBS法,深入研究了地铁及地下工程建设期间的工程风险评估与控制方法。为进一步提升评估模型的准确性与可操作性,引入了TOPSIS方法,通过剔除重要度较小的风险因素,优化了评估结果的可解释性。通过这一案例研究,将深化对地铁及地下工程建设期间风险管理的认识。

1) 青山路人行天桥风险判断矩阵(见表4)

表4 人行天桥风险判断矩阵

Table 4 Pedestrian bridge judgment matrix

| 主要风险 | 风险事件 | ZBJZ1-1 | ZBJZ1-2 | ZBJZ1-3 |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 沉降 | ZBJZ1-1 | 1 | 1/2 | 1/4 |
| 开裂 | ZBJZ1-2 | 2 | 1 | 1/2 |
| 倒塌 | ZBJZ1-3 | 4 | 2 | 1 |

特征向量(相对权重): $W_1^T = [0.14, 0.29, 0.57]$; 风险指数向量(即:P, I值乘积向量): $F_1^T =$

[10, 12, 8]; 则此风险单元的风险指数为: $R_1 = W_1^T \times F_1^T = 9.44$ 。

2) 鑫诚宾馆风险判断矩阵(见表 5)

表 5 鑫诚宾馆风险判断矩阵

Table 5 Hotel judgment matrix

| 主要风险 | 风险事件 | ZBZJ1-1 | ZBZJ1-2 | ZBZJ1-3 |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 沉降 | ZBZJ1-1 | 1 | 1/2 | 1/4 |
| 开裂 | ZBZJ1-2 | 2 | 1 | 1/2 |
| 倒塌 | ZBZJ1-3 | 4 | 2 | 1 |

特征向量(相对权重): $W_8^T = [0.14, 0.29, 0.57]$; 风险指数向量(即: P, I 值乘积向量): $F_8^T = [10, 12, 10]$; 则此风险单元的风险指数为: $R_8 = W_8^T \times F_8^T = 10.58$ 。

3) 供电管线风险指数

特征向量(相对权重): $W_{16}^T = 1$; 风险指数向量: $F_{16}^T = 12$; 则此风险单元的风险指数为: $R_{16} = W_{16}^T \times F_{16}^T = 12$ 。

4) 盾构选型风险判断矩阵(见表 6)

表 6 盾构选型风险判断矩阵

Table 6 Shield type judgment matrix

| 主要风险 | 风险事件 | DGZB1-1 | DGZB1-2 | DGZB1-3 |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 盾体密封失效 | DGZB1-1 | 1 | 1/2 | 1/3 |
| 刀具异常磨损 | DGZB1-2 | 2 | 1 | 1/2 |
| 盾构选型风险 | DGZB1-3 | 3 | 2 | 1 |

特征向量(相对权重): $W_{24}^T = [0.16, 0.34, 0.50]$; 风险指数向量(即: P, I 值乘积向量): $F_{24}^T = [4, 6, 9]$; 则此风险单元的风险指数为: $R_{24} = W_{24}^T \times F_{24}^T = 7.18$ 。

3.3 风险评估结果

根据以上辨识计算结果,可得各安全风险事件的评分结果,如表 7 所示。

表 7 风险事件评分结果

Table 7 Risk event score results

| 风险事件 | 周边建筑物 | 周边管线 | 盾构施工 |
|------|------------|------|------|
| 风险单元 | 人行天桥 鑫诚宾馆 | 供电管线 | 盾构选型 |
| 风险指数 | 9.44 10.58 | 12 | 7.18 |
| 风险等级 | II II | II | III |

从以上风险评分结果中可以发现,风险指数由大到小的排序依次为周边管线>周边建筑物>盾构选型。周边建筑物的风险等级均达到 II 级,说明对于周边建筑物,应增强监测并采取处理措施,以降低风险等级,且需要有效控制成本,低于风险发生后产生的损失。盾构选型的风险等级为 III 级,说明暂时无需采取具体措施,但需要及时监测,以防止

风险升级。

3.4 风险预控措施

根据风险评估结果并结合盾构施工风险管控,盾构风险可从盾构选型、始发、掘进、接收、联络通道、周边环境等进行风险源预控。

1) 对于周边建筑物的沉降、开裂和倒塌风险,通过合理选取施工参数、及时对刀盘前方土体进行改良,可以有效减少对土体的扰动,避免超挖和欠挖的发生。在注浆过程中,控制好注浆量和压力,采用钻孔灌注桩隔离保护,以及增设注浆孔管片和进行二次注浆。

2) 对于供电管线的风险,通过与相关单位进行充分对接,进行技术交底等,明确管线的准确位置,避免管线断裂和破坏的风险。选取合理的施工参数,及时进行土体改良,提高同步注浆量和控制注浆压力,以及强化监测系统。

3) 对于盾构选型风险,主要风险因素是盾构选型风险、刀盘异常磨损、刀具损坏、盾体密封失效等,预控措施可从表 8 所示方面进行风险预控。

表 8 风险预控措施

Table 8 Risk precontrol measures

| 风险因素 | 预控措施 |
|-------------|--|
| 盾构选型风险 | 1) 根据设计图纸,充分了解地层性质及地下水情况; 2) 听取多方专家意见,综合考虑选型; 3) 选用质量较好的配件 |
| 刀盘异常磨损、刀具损坏 | 1) 加强刀盘耐磨设计; 2) 对刀盘前方土体进行改良; 3) 控制推进速度,减少贯入量 |
| 盾体密封失效 | 1) 根据设计思路,优化盾体连接密封; 2) 控制盾构姿态,减少密封磨损; 3) 加强维护保养,检查应急密封状态 |

在实施风险预控措施之后,重新对周边建筑物(人行天桥、鑫诚宾馆)、周边管线以及盾构施工进行风险辨识,结果如表 9 所示,风险事件评分的前后对比如表 10 所示。在实施风险预控措施后,周边建筑物(人行天桥和鑫诚宾馆)、周边管线(供电管线)和盾构施工(盾构选型)等风险事件的风险指数均显著降低。人行天桥和鑫诚宾馆的风险指数分别从 9.44 和 10.58 降至 6.01 和 6.58,风险等级由 II 级降至 III 级。供电管线的风险指数从 12 降至 8,风险等级由 II 级降至 III 级。而盾构选型的风险指数从 7.18 降至 3.98,风险等级由 III 级降至 IV 级,表明风险已降低到可接受范围。

表9 实施预控措施后的风险辨识结果

Table 9 Risk identification results after implementation of precontrol measures

| 风险工程 | 二级风险 | 风险单元 | 风险事件 | P | I | R |
|----------|-------|------|---------|---|---|---|
| 周边环境风险工程 | 周边建筑物 | 人行天桥 | 沉降 | 4 | 2 | 8 |
| | | | 开裂 | 3 | 3 | 9 |
| | | | 倒塌 | 1 | 4 | 4 |
| | 周边管线 | 鑫诚宾馆 | 沉降 | 4 | 2 | 8 |
| | | | 开裂 | 3 | 3 | 9 |
| | | | 倒塌 | 1 | 5 | 5 |
| 盾构施工风险工程 | 周边管线 | 供电 | 管线断裂、破坏 | 2 | 4 | 8 |
| | | | 盾构选型风险 | 2 | 3 | 6 |
| | | | 盾构施工准备 | 1 | 3 | 3 |
| | | | 刀具异常磨损 | 1 | 3 | 3 |
| | | | 盾体密封失效 | 1 | 4 | 4 |

表10 预控前后风险事件评分对比

Table 10 Comparison of risk event scores before and after precontrol

| 风险事件 | 周边建筑物 | | 周边管线 | 盾构施工 |
|---------|-------|-------|------|------|
| | 人行天桥 | 鑫诚宾馆 | 供电管线 | 盾构选型 |
| 预控前风险指数 | 9.44 | 10.58 | 12 | 7.18 |
| 预控前风险等级 | II | II | II | III |
| 预控后风险指数 | 6.01 | 6.58 | 8 | 3.98 |
| 预控后风险等级 | III | III | III | IV |

4 结语

1) 本文结合 WBS-RBS 和 TOPSIS 方法, 不仅能够用于风险评估, 同时还为决策提供了支持。通过清晰的层次结构和排名结果, 决策者可以更加明确地了解各项风险因素的相对重要性, 有助于制定更为有效的风险管理策略。

2) 本文从周边环境风险工程和盾构施工风险工程出发, 划分了周边建筑物、周边管线、盾构施工准备、盾构始发、盾构掘进、盾构到达、联络通道等 7 个方面的二级风险, 识别了部分风险单元对应的风险事件。对具体的风险单元进行风险评估。以周边建筑物、周边管线、盾构选型风险为例, 进行了风险辨识、风险指数计算。风险指数由大到小的排序依次为: 周边管线>周边建筑物>盾构选型。

3) 对风险评估结果确定预控措施。对于周边建筑物, 可以采取调整施工参数及增设注浆孔管片等措施预控风险。对于周边管线, 可以采取对接技

术交底及加强监测等措施预控风险。对于盾构选型, 可以从设计及保养等方面进行预控。并且, 经过对比, 预控后的风险事件可降低一个风险等级。

参考文献:

- [1] 吕培印, 王亚利, 马啸, 等. 地铁工程事故案例库建立与风险评估研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(3): 1-9.
LÜ P Y, WANG Y L, MA X, et al. Research on the establishment of subway engineering accident case database and risk assessment[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(3): 1-9.
- [2] 兰富安, 李锦航, 许晓静, 等. 基于 BIM 技术的隧道数字化风险管理平台构建和工程应用[J]. 市政技术, 2023, 41(7): 250-256.
LAN F A, LI J H, XU X J, et al. Construction and engineering application of tunnel digital risk management platform based on BIM technology[J]. Journal of municipal technology, 2023, 41(7): 250-256.
- [3] 曾若辰. 城市轨道交通 RAMS 技术与展望[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(19): 1-9, 16.
ZENG R C. Development and prospect of rams in urban rail transit[J]. Construction technology, 2023, 52(19): 1-9, 16.
- [4] 王俊英, 陈馈, 张兵. 盾构智能建造新技术与展望[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(17): 1-6.
WANG J Y, CHEN K, ZHANG B. New technologies and prospects for shield intelligent construction[J]. Construction technology, 2023, 52(17): 1-6.
- [5] 张恒. 复杂地质条件下地铁盾构施工要点分析[J]. 工程建设与设计, 2023(16): 179-181.
ZHANG H. Analysis of key points of subway shield construction under complex geological conditions[J]. Construction & design for engineering, 2023(16): 179-181.
- [6] 范文昊, 谢盛昊, 周飞聪, 等. 新建双线盾构隧道下穿既有隧道近接影响分区及控制措施案例研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4): 43-57.
FAN W H, XIE S H, ZHOU F C, et al. Case study on proximity impact zoning and control measures of a new double-track shield tunnel under an existing tunnel[J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60(4): 43-57.
- [7] 郭新伟, 杨丽华, 韩大鹏, 等. 基于 WBS-RBS 与 AHP 的地铁工程物资管理风险研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(2): 61-66, 75.
GUO X W, YANG L H, HAN D P, et al. Research on risk management of subway engineering materials based on WBS-RBS and AHP[J]. Construction technology, 2023, 52(2): 61-66, 75.
- [8] 彭涛, 彭青顺, 邓帮, 等. 临近地铁线路的深基坑施工风险调查与评估[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(6): 113-117.
PENG T, PENG Q S, DENG B, et al. Risk investigation and assessment of deep foundation pit construction near subway lines[J]. Journal of civil engineering and management, 2020, 37(6): 113-117.

(下转第 63 页)

4 结语

本研究基于人工神经网络(ANN)构建了地铁施工项目的成本和工期预测模型,采用反向传播算法(ANN-BP)优化网络结构与激活函数。通过对济南地铁工程数据的验证,研究结果表明,双曲正切函数(tanh)结合5个神经元隐藏层的模型在成本和工期预测中均表现出优异的性能。具体而言,成本预测的测试集决定系数 R^2 为0.899,均方根误差(RMSE)为0.028;而工期预测的测试集 R^2 达0.971, RMSE为0.024,较Sigmoid函数误差显著降低了94.3%。该模型能够有效捕捉岩土力学参数与盾构动态工况数据之间的非线性关系,且误差集中于 $\pm 5\%$ 区间内,表现出较强的预测精度和工程适用性。

本研究不仅为隧道工程成本控制与进度管理提供了高精度工具,也证明了ANN在复杂地质环境下的广泛适用性。未来的研究可以在此基础上,进一步优化模型结构,结合更多的实时数据进行动态调整,以实现地铁施工项目更精确的预测和管理。

参考文献:

- [1] 刘正涛. 建筑工程项目成本控制要点综述[J/OL]. 城市建设理论研究(电子版),2018(35):63.
LIU Z T. Summary of key points of cost control of construction process items [J/OL]. Research on urban construction theory (electronic edition), 2018(35):63.
- [2] 芦峰,何体才,金磊. 国内外建筑施工项目成本控制比较研究[J]. 沿海企业与科技,2008(6):132-134,131.
LU F, HE T C, JIN L. Comparative study on cost control of construction projects at home and abroad [J]. Coastal enterprises and science & technology, 2008(6):132-134,131.

- [3] 刘昆珏. 基于贝叶斯网络的施工项目成本动态预测方法研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2014.
LIU K J. Research on construction project cost dynamic prediction method based on Bayesian network [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [4] KONG X P. Research on the cost prediction model of construction projects based on the support vector regression machine[J]. Basic & clinical pharmacology & toxicology, 2020; 126.
- [5] 王建茹. 基于BP神经网络的建设工程造价预测方法[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2014,16(1):42-45.
WANG J R. Construction cost prediction method based on BP neural network [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (social science edition), 2014, 16(1):42-45.
- [6] 刘倩. 基于Adam-BP神经网络的装配式建筑施工成本预测研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2021.
LIU Q. Research on construction cost prediction of prefabricated buildings based on Adam-BP neural network [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.
- [7] 高俊涛,张莉. 基于过程建模的项目进度计划方法[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(9):1099-1102.
GAO J T, ZHANG L. Project schedule planning method based on process modeling [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(9):1099-1102.
- [8] NGUYEN H, BUI X N, BUI H B, et al. A comparative study of artificial neural networks in predicting blast-induced air-blast overpressure at Deo Nai open-pit coal mine, Vietnam [J]. Neural computing and applications, 2020, 32(8):3939-3955.
- [9] YOON H, JUN S C, HYUN Y, et al. A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer [J]. Journal of hydrology, 2011, 396:128-138.
- [10] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning [J]. Nature, 2015, 521:436-444.

(上接第56页)

- [9] 黄晓东,李宝地,王旭,等. 地铁隧道盾构施工对邻近建(构)筑物的风险评估[J]. 公路,2023,68(10):350-357.
HUANG X D, LI B D, WANG X, et al. Risk assessment of subway tunnel shield construction on adjacent buildings (structures) [J]. Highway, 2023, 68(10):350-357.
- [10] 吴城,张波,雷沙沙,等. 基于FAHP-GRA法的盾构隧道穿越桥梁桩基群施工风险评估[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(S2):186-196.
WU C, ZHANG B, LEI S S, et al. Risk assessment of shield tunnel construction through bridge pile foundation group based on FAHP-GRA method [J]. Tunnel construction, 2023, 43(S2):186-196.

- [11] 陈仁朋,王志腾,吴怀娜,等. 基于FAHP法和区间数改进TOPSIS法的盾构隧道下穿建筑物风险评估[J]. 上海交通大学学报,2022,56(12):1710-1719.
CHEN R P, WANG Z T, WU H N, et al. Risk assessment of shield tunnels passing through buildings based on FAHP method and improved TOPSIS method with interval numbers [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(12):1710-1719.
- [12] 阮永芬,张虔,乔文件,等. 基于C-V-T模型的盾构穿越既有桥梁施工风险评估[J]. 岩土力学,2023,44(2):552-562.
RUAN Y F, ZHANG Q, QIAO W J, et al. Risk assessment of shield tunneling through existing bridges based on C-V-T model [J]. Rock and soil mechanics, 2023, 44(2):552-562.