浅埋地铁车站基坑防渗墙支护体系稳定性分析*

伦冠栋

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要]针对浅埋地铁车站建设需求,提出采用防渗墙结合明挖法的施工方案,该方案在位移控制要求严格的工程 场景中具有显著优势。以济南地铁4号线浆水泉路站为例,车站净长248.7m,标准段净宽为20.2m,具有浅埋(地 下水位偏高)、软土地层、大跨度结构设计等典型特征。针对特殊地质条件引发的支护体系稳定性与地表变形控制 难题,研究采用有限元法对施工全过程进行数值模拟及地层响应分析。首先通过工法比较选择确定防渗墙-中间 隔墙-结构楼板协同支护体系,继而优化各构件的几何参数(防渗墙嵌入深度、墙厚度、板厚度)。数值模拟结果表 明:开挖过程中地表沉降曲线呈典型凹槽形态,最大沉降值18.2mm出现在防渗墙附近区域,该分布规律与现场监 测数据吻合。

[关键词] 地铁车站;明挖法;防渗墙;支护;数值模拟;沉降;监测 [中图分类号] TU753 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2025)07-0038-07

Stability Analysis of Anti-seepage Wall Support System for Foundation Excavation of Shallow Subway Station

LUN Guandong

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

Abstract: A construction scheme of a anti-seepage wall combined with an open-cut method is proposed, aiming at the construction demand of shallow buried subway stations. This scheme has significant advantages in engineering scenarios with strict displacement control requirements. The Jiangshuiquan Road Station of Jinan Metro Line 4, with a net length of 248. 7meters and a net width of the standard section of 20. 2meters, was taken as an example. It has typical characteristics such as shallow burial (high groundwater level), soft soil layer, and large-span structure design. Aiming at the problem of supporting system stability and surface deformation control caused by special geological conditions, the finite element method was adopted to simulate the whole construction process and analyze the formation response. Firstly, the collaborative support system of anti-seepage wall-intermediate partition wall-structure floor was determined by comparison of construction methods, and then the geometric parameters of each component (embedded depth of anti-seepage wall, wall thickness, and plate thickness) were optimized. The numerical simulation results indicate that the surface settlement curve shows a typical groove shape during the excavation process, and the maximum settlement value of 18. 2mm appears in the area near the wall. The distribution law is consistent with the field monitoring data.

Keywords: subway stations; open-cut method; anti-seepage wall; supports; simulation; settlement; monitoring

0 引言

明挖法基坑支护系统设计决策受多重因素制约,主要包括岩土力学特性、地下水文条件、邻近结构保护要求、地层位移控制指标及施工阶段划分等^[1]。工程实践中常见的支护体系类型包括板桩 墙、排桩墙、咬合桩墙、截水帷幕、土钉墙及重力式

^{*} 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] 伦冠栋,工程师,硕士,E-mail: lunguandong@ 163. com [收稿日期] 2025-03-05

挡墙等。泥浆护壁防渗墙技术常应用于地铁明挖 结构施工^[2],近十年来该技术在地下水位控制与地 层位移控制敏感区域的普及率显著提升,成为深基 坑工程的主流支护形式。

基坑开挖卸荷作用引发的应力场重构过程,将 诱发三维地层位移场扩展至地表层位。研究表明, 城市高密度建成区在此类扰动作用下,邻近建筑物 基础易产生差异沉降,地下管网则可能发生应变累 积超限现象,最终形成结构性损伤,这一过程在复 杂工程环境制约下尤为显著[3]。作为传统施工方 法,顺作法在各类地质条件下的适用性已获广泛验 证:杨翼^[4]以深圳地铁科学馆站为背景进行了分 析;龚胜^[5]提出了一种自上而下分部掘进的有效控 制地面沉降的施工方法;Li 等^[6]以上海西站地铁车 站为背景提出了一种自上而下的创新施工方法,提 高施工效率并控制了开挖变形。另一方面,逆作法 利用永久性混凝土楼板在逐层开挖过程中支撑防 渗墙。与钢支撑和锚杆相比,楼板刚度对开挖引起 的地层位移影响更为显著。应宏伟等[7]分析了一 个采用半逆作法的深基坑支护设计: Tan 等^[8] 通过 监测墙体变形与地表沉降,描述了上海软黏土地区 深基坑逆作法的实际表现。

地表建筑物与基础的损伤评估方法可分为3个 层次:初步评估、二次评估与详细评估^[9-10]。当建筑 物处于初步评估的安全范围之内时,其潜在损伤风 险可以被排除。初步评估主要关注地表沉降观测 值与角变量的监测。二次评估则包括3种方法:深 梁法、相对刚度法和叠层梁法。在当前的评估流程 中,首先计算开挖作用引发的地表无结构沉降,然 后通过土-结构相互作用分析来确定建筑物的响应 行为。当初步和二次评估结果超出允许限值时,需 进一步采用三维数值模型进行详细评估。

本文以济南地铁4号线浆水泉路站的明挖工程 为研究对象,重点分析钢筋混凝土-防渗墙-混凝土 板复合支护体系的性能。通过系统比较顺作法与 逆作法的施工适应性,建立多维度风险评价模型。 研究采用数值模拟技术,结合二维与三维分析方 法,对工程的局部力学特性与整体变形协调性进行 系统评估,深入揭示复合支护体系的协同工作机 制。研究结论可为城市核心区地下工程的开挖工 法选择及风险控制提供理论支持与实践参考。

1 工程概况

1.1 项目总体情况

济南地铁4号线浆水泉路站为地下3层岛式车站,其中公共区为地下2层。车站净长248.7m,标

准段净宽为 20.2m。其中设备区为 3 层双柱三跨结构,公共区为 2 层大跨无柱起拱结构。车站公共区底板埋深约 30m,覆土深度 8~9.8m,站台中心处车站底板埋深约 28.3m,覆土厚约 8m,其中下穿浆水泉路段采用二衬拱盖法施工,暗挖长度 58m,其余为明挖法,如图 1 所示。



图 1 项目总体情况 Fig. 1 Overall situation of the project

1.2 工程地质条件

根据现场勘查结果,浆水泉路站拟建场地钻探 深度范围内地层自上而下分别为:①杂填土、②砂 质粉土、③1 砂质粉土夹粉砂、③2 粉砂、④2 粉质黏 土夹粉土、④21 砂质粉土夹粉质黏土,⑤1 砂质粉土 夹粉砂。浆水泉路站基坑主要涉及至③1 砂质粉土 夹粉砂。

根据区域地质资料分析, 拟建场地内地下水位 受大气降水影响显著, 水位变化幅度较大。通常情 况下, 最高水位出现在 7 月下旬—9 月中旬, 而最低 水位则出现在 5 月中旬—7 月中旬。在勘察期间, 年水位变幅最大可达 20m。

1.3 区间周边建筑信息

浆水泉路站位于经十路与浆水泉路交叉口南 侧,沿经十路呈东西向敷设。车站北侧为经十路辅 路,辅路北侧为浆水泉立交桥;车站南侧,浆水泉路 以西为环山汽车维修有限公司,该公司南侧为山东 省妇幼保健院;浆水泉路以东为卓越时代广场办公 楼。车站东西两端分别连接盾构区间,且两端均为 盾构接收端。

2 浆水泉路站施工设计分析

通过有限元法建立数值模型,系统探究地下车 站工程中的土体-支护结构相互作用机理及结构设 计要素。研究重点涵盖地表沉降预测、地层应力场 分布特征及岩土体变形机制等关键指标。

2.1 施工方案选择

首先,基于 Plaxis 进行初始评估,通过对比地表 沉降量、地层旋转角、结构内力分布及邻近建筑物 损伤风险等参数,对顺作法与逆作法两种开挖工法 进行优化比选。随后,开展支护体系的参数化研 究,重点分析支护墙嵌固深度、墙体厚度及顶板结 构尺寸等关键设计参数对结构体系力学响应的影 响规律。最后,通过多工况计算结果的综合分析, 形成综合考虑施工扰动控制与结构安全平衡的设 计优化准则。研究成果可为城市地下空间开发中 的地表变形控制提供理论依据,并为类似工程的风 险防控提供技术支撑。

在沟槽底部建造防渗墙和隔水土层,允许少量 水进入开挖区域,这些水可以通过排水设备进行防 治。当开挖作业达到地下水位以下深度时,将实施 这一措施,因此采用有限元方法对合适的施工工艺 进行选择和评估。

2.2 数值模型

二维模型如图 2 所示,计算域设定为宽 200m、高 70m。模型底部边界施加全约束边界条件,顶部两侧边界则设定为自由变形边界。结构体系(包括防渗墙、内部桩基、站厅楼板及拱顶结构)采用线弹性本构模型,而土体则选用修正莫尔-库伦本构模型。土壤参数基于现场勘察结果确定,具体数值如表 1 所示。混凝土材料的弹性模量依据工程规范选取:超前支护结构为 18GPa,喷射混凝土为 12GPa, 二次衬砌及混凝土楼板为 25GPa。地表交通荷载采用 24kPa 的等效均布荷载进行模拟。



本文采用分阶段渗流-应力耦合分析方法,分阶 段分析地下水位(距地表 17.5m)对地层沉降及结 构内力的影响。渗流场通过达西定律进行数值表 征,以确定水流方向和渗流量。有限元网格采用 15 节点高阶三角形单元进行离散化处理。建筑物荷 载的施加遵循分级量化原则:首先根据建筑层数、 结构类型及建造年代确定建筑状态分级,然后计算 单体建筑荷载并施加至模型。统计分析结果表明, 建筑单层荷载可按 10kN/m² 进行等效换算。为系 统评估自上而下与自下而上的工程适用性,本文采 用分阶段施工数值模拟技术进行对比分析。

1) 自上而下的实施步骤如下:首先移除浆水泉 路站周边地表荷载,完成 2m 厚表层填土开挖。随 后,在数值模型中依次模拟防渗墙施工、中层碾压 混凝土柱浇筑及首层楼板建造工序。待地面区域 完成结构回筑后,恢复地面道路通行并重新施加交 通荷载。通过"分层开挖-同步筑板"工艺,依次推 进至第 2,3,4 层楼板设计标高。当基坑开挖至地下 水位线时,使用 Plaxis 软件进行渗流-应力耦合 分析。

2) 自下而上的实施步骤如下:首先移除浆水泉 路站周边地表超载,完成 2m 厚表层填土的开挖。 按照"先支后挖"的原则,分步完成防渗墙及中层碾 压混凝土柱的施工。采用分台阶开挖法逐步抵达 第1,2 道水平支撑设置标高。当开挖面触及地下水 位时,使用 Plaxis 渗流分析模块进行计算。完成基 础底板及中层楼板的逆作施工后,按照"先装后拆" 的原则分步解除临时支撑体系,最终实现地面道路 复通。

2.3 模型验证

为了验证浆水泉路站模型可靠性,选择济南地 铁某车站施工期现场监测数据进行对比验证。该 车站的深度、岩土参数和施工方法与浆水泉路站相 同,采用自上而下方法建造。仿真结果与车站实测 沉降结果如图 3 所示。最大沉降出现在防渗墙附 近,导致地面沉降曲线呈现凹形特征。沉降值在距 离车站中心约 120m 处趋于 0。计算结果与实际情 况吻合良好,验证了模型的可靠性,为后续车站施 工工法的优化提供了依据。综合考虑基坑开挖、楼 板浇筑及其他施工工序后,最终预测的沉降值 为 18.2mm。

表 1 土壤参数 Table 1 Soil parameters

R. R										
地巨友砍	深度/m	非饱和密度/	饱和密度/	黏聚力/	内摩擦角/	弾性模量/	泊松比	渗透系数/		
地压石你		$(kN \cdot m^{-3})$	$(kN \cdot m^{-3})$	kPa	(°)	$(kN \cdot m^{-2})$		$(\mathbf{m} \cdot \mathbf{d}^{-1})$		
①杂填土	0~7	20.5	—	13	27	1.5×10^4	0.35	9.43×10 ⁻⁵		
②砂质粉土	7~12.5	21.2		5	32	3.0×10^4	0.27	1.98		
③1 砂质粉土夹粉砂	12.5~25.6	20.9	—	5	32	4. 5×10^4	0.27	1.98		
③ ₂ 粉砂	25.6~28	21.2	22.3	5	32	3. 0×10^4	0.27	1.98		
④2 粉质黏土夹粉土	28~40	20.1	21.2	10	29	1.9×10^4	0.35	9.43×10 ⁻⁵		



2.4 最终施工方案

在施工过程中,各监测参数呈现阶段性极值特征,据此可确定结构体系的临界状态阈值。图4a及4b展示了浆水泉路站右侧建筑和左侧建筑在两种不同施工方法下的最大地面沉降量和角变形。图4c显示了底部和防渗墙在两种工法下的最大位移。图5则给出了防渗墙在自下而上和自上而下方法下的最大轴向力和最大弯矩。结合初始建筑风险评估,综合考虑地表沉降控制与结构安全,自上而下的施工方法在工程适用性方面优于自下而上。综合沉降控制要求与地面交通恢复的时效性,浆水泉路站最终选择了自上而下开挖方案。该工法在深基坑工程中展现出多维度的技术优势。





Fig. 5 Internal forces of anti-seepage wall

自上而下开挖能够更好地控制地表沉降。首 先,通过设置永久性楼板形成连续支撑体系,显著 提升了结构的整体稳定性,有效抑制了地表沉降; 其次,该工法可减少临时支撑结构与脚手架的用 量,从而降低施工成本并缩短工期。在环境控制方 面,采用分层回填技术构建隔离层,以削弱后续开 挖对周边环境的影响,同时配合防渗墙有效阻隔地 下水渗透。施工过程中,覆盖顶板不仅提高了恶劣 天气条件下作业的连续性,还降低了噪声与扬尘污 染水平。此外,该工法支持地面结构与地下工程的 同步实施,通过立体化施工组织显著提升了工程效 率。这种系统化的施工策略充分体现了现代城市 复杂环境下深基坑工程在安全性、经济性与环境友 好性方面的综合要求。

3 结构参数影响分析

本文针对自上而下工法中防渗墙嵌入深度、中间柱配置及结构构件尺寸3个关键参数进行系统性研究,重点评估其对地表沉降、结构内力及周边环境的影响机制。

3.1 防渗墙嵌入深度

基于初始设计方案,防渗墙深度设定为29m,其 中嵌入深度7m。通过构建深度35m(嵌入深度 13m)的对比模型,系统分析两种工况下的地表沉降 绝对值、角变位、基底隆起量、墙体位移、地下水渗 流量及结构内力响应。采用PLAXIS软件的强度折 减法评估稳定性,通过逐步降低土体抗剪强度参数 直至失稳,确定最优嵌入深度。

研究结果如图 6~9 所示。嵌入深度由 7m 增至 13m 时,地表沉降量降低 28%,角变位减少 35%;基 底隆起量与墙后土体水平位移基本保持稳定。根 据图 9 所示,增加墙体的嵌入深度会减少地下水的 流速,因为嵌入深度越大,流线通过的距离就越远。



图 6 小内砍八冰及地砍加牌重



结构响应分析如图 10,11 所示。轴向力随嵌入 深度增加线性增长,但墙体竖向位移减少 55%;水 平位移与弯矩值变化不显著。综合安全系数提升 与经济性评估,最终选择 9m 为最优嵌入深度。









图 9 不同嵌入深度对地下水流速的影响 Fig. 9 Effect of different embedding depths





图 10 防渗墙的最大位移



3.2 墙厚度

本模型采用 100cm 作为防渗墙基准设计厚度。 强厚度为 80,100,120cm 时地表沉降最大值的变化





Fig. 11 Maximum bending moment and maximum axial force for anti-seepage walls

情况如图 12 所示。随着墙体厚度的增加,结构位移 会减少,如图 13 所示,然而,结构内力的数值会增加 (见图 14)。增厚墙体虽能有效约束地层变形,却导 致应力集中现象加剧。经多目标优化分析,建议采 用 100cm 作为防渗墙最优厚度,该取值在控制地表 沉降与限制结构内力之间达到平衡。



Fig. 12 Maximum settlement for different wall thicknesses



图 13 不同墙厚度下最大位移 Fig. 13 Maximum displacement for different wall thicknesses

3.3 板厚度

为了评估不同板厚度, 拟提出以下 5 组进行分析: 第 1 组中间板、基础板和顶板的厚度均设为 80cm; 第 2 组中间板厚度设为 80cm, 基础板和顶板厚 度设为 120cm; 第 3 组中间板厚度设为 80cm, 基础板 和顶板厚度设为 150cm; 第 4 组中间板厚度设为



图 14 不同墙厚度下最大弯矩和轴向力 Fig. 14 Maximum bending moment and axial force for different wall thicknesses

100cm,基础板和顶板厚度设为 150cm;第5组中间 板、基础板和顶板的厚度均设为 150cm。随着板厚度 的增加,结构位移会减少,但内部结构力的数值往往 会增加,如表2所示。因此,选取中间板厚度为 80cm, 基础板和顶板厚度为 120cm 板厚度作为最优值。



项目		第1组	第2组	第3组	第4组	第5组
	防渗墙最大水平位移/mm	32	32	33	32	33
	防渗墙最大垂直位移/mm	54.0	58.5	60.4	63.3	68.8
	防渗墙最大轴向力/kN	-1 550	-1 500	-1 480	-1 490	-1 480
	防渗墙最大弯矩/(kN・m)	1 140	971	897	984	886

4 地铁车站风险损失评估

建筑物沉降风险评估体系主要包括建筑物状 态监测与风险评估。其技术路径可概括为三阶段 递进分析:首先依据自由场地沉降理论参数建立基 准风险评估模型:继而通过土-结构耦合作用数值模 拟精确解析建筑物实际变形响应:最终综合结构动 力响应特征与材料性能临界阈值,构建多参数耦合 的损伤等级判定准则。基于浆水泉路站施工工法 与结构参数优化成果,本节采用 Plaxis 3D 有限元软 件构建精细化三维模型,验证二维模型结论并开展 系统性风险评估。模型计算域设定为长 170m、宽 120m、高70m。边界条件采用竖直边界限制宽度方 向位移,底部全约束边界,岩土参数、地下水位及施 工工序与二维模型一致。基于对称性采用四分之 一建模技术的浆水泉路站整体三维模型如图 15 所 示。数值模拟结果与二维模型及现场监测数据具 有良好一致性。

距防渗墙 36m 范围内为风险影响区,该区域建 筑需进行损伤评估,其余建筑位于安全区。如图 16 和图 17 所示,建筑损伤风险量化需综合评估其所在 沉降剖面的位置特征,应考虑到每栋建筑物位于沉





using the top-down method of 3D modeling

降槽区、反拱区以及水平应变剖面的受压区或受拉 区。因此,分析初始需明确沉降曲线拐点及水平应 变正负值分界点。



图 16 三维模型中浆水泉路站建成后的地表沉降 Fig. 16 Surface settlement at the completed Slurry Springs Road station in the 3D model



图 17 三维模型中浆水泉路站建成后的水平应变 Fig. 17 Horizontal strain at the completed Slurry Springs Road station in the 3D model

基于三维模型与建筑空间坐标,采用 MATLAB 软件对车站各断面沉降曲线进行函数拟合,通过求 解二阶导数确定拐点位置。数学原理表明,二阶导 数为正对应受拉应变区,为负则对应受压区。以某 建筑为例,其沉降曲线拐点距地下连续墙 18.5m,水 平应变正负分界点距墙 14.6m,揭示该建筑处于拉-压应变过渡带。

5 结语

本研究基于济南地铁 4 号线浆水泉路站工程, 提出了一种基于明挖法的大跨度地下空间施工方 案,该方案采用中间钢筋混凝土柱支撑体系。为确 定施工方法及结构构件参数的最优方案,通过建立 二维与三维有限元数值模型,系统评估了历史建筑 群在施工过程中的受损风险。数值模拟结果与现场监测数据具有良好的一致性,主要结论如下。

1) 开挖工序对地表沉降、结构板位移及基底隆 起具有显著影响。相较于其他施工工序,本文推荐 采用自上而下的施工工序,该工法可有效确保新建 交通层具备足够的结构强度,同时将地表沉降控制 在最小范围,兼具经济性优势。

2)防渗墙的嵌固深度与厚度参数研究表明,当 嵌固深度减小时,基底隆起值与墙体水平位移呈现 显著增长趋势。当墙体厚度超过临界值后,其位移 控制效果趋于稳定。通过 Plaxis 软件的分步折减算 法对墙趾稳定性进行系统分析后,最终确定了最优 嵌固深度。

3)参数敏感性分析表明,虽然增大墙体厚度和 嵌固深度可有效减小位移,但会导致混凝土用量剧 增,进而引发施工成本攀升、工期延误及运营资金 压力等问题。综合分析表明,采用100cm厚度的防 渗墙设计方案,既可确保结构可靠性,又能实现经 济效益与沉降控制的最佳平衡。

4) 地表沉降的阶段性发展规律与现场监测数 据具有良好的一致性。在地下水位以下开挖阶段, 距墙 9m 处的累计沉降量达 18.2mm。

参考文献:

 [1] 杨晓杰,刘冬明,张帆,等. 地铁隧道明挖法施工基坑支护稳 定性研究[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(3):516-520.
 YANG X J, LIU D M, ZHANG F, et al. Study on the stability of foundation pit supporting in metro tunnels [J]. Journal of underground space and engineering, 2010,6(3):516-520.

[2] 胡宝源,周岚辉. 混凝土防渗墙施工技术在新城水库除险加固中的应用[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(4): 468-469,471.

HU B Y, ZHOU L H. Application of concrete impermeable wall construction technology in the de-risking and strengthening of New Town Reservoir [J]. Water conservancy science and technology and economy, 2010, 16(4):468-469,471.

- [3] 廖少明,余炎,陈亮.由基坑挡墙位移推算地层位移场及其影响[J].岩土工程学报,2005,27(7):800-803.
 LIAO S M, YU Y, CHEN L. Extrapolation of ground displacement field and its effect from pit retaining wall displacement [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2005, 27(7): 800-803.
- [4] 杨翼. 地铁车站盖挖顺作法施工监控量测与分析[D]. 成都: 西南交通大学,2005.

YANG Y. Construction monitoring and measurement and analysis of cover excavation shunjiu method in subway stations [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.

[5] 龚胜. 中洞法施工技术[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1772-1775.

GONG S. Construction technology of center-hole method [J].

Chinese journal of geotechnical engineering, 2006, 28 (S1): 1772-1775.

- LI M G, CHEN J J, XU A J, et al. Case study of innovative topdown construction method with channel-type excavation [J]. Journal of construction engineering and management, 2014, 140 (5):05014003.
- [7] 应宏伟,王奎华,谢康和,等. 杭州解百商业城半逆作法深基 坑支护设计与监测[J]. 岩土工程学报,2001,23(1):79-83.
 YING H W, WANG K H, XIE K H, et al. Design and monitoring of semi-reverse method deep foundation support in Xiebai Commercial City, Hangzhou[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2001, 23(1):79-83.
- [8] TAN Y,ZHU H H,PENG F L, et al. Characterization of semi-topdown excavation for subway station in Shanghai soft ground [J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 68: 244-261.
- [9] 刘国彬,周志斌,郭健,等.基于案例数据的基坑施工连续破坏风险评估方法研究[J].施工技术(中英文),2023,52 (11):44-50,60.
 LIUGB,ZHOUZB,GUOJ,et al. Research on risk assessment method of continuous destruction of excavation construction based on case statistics[J]. Construction technology, 2023,52(11): 44-50,60.
- [10] 游正军,李彦锦,余群舟,等.某城市地铁近接工程服役结构风险分析与控制[J].施工技术(中英文),2023,52(13):65-71.
 YOU Z J,LI Y J, YU Q Z, et al. Risk analysis and control of service structure of subway proximity projects in a certain city

[J]. Construction technology, 2023,52(13):65-71.

(上接第37页)

- [9] SHI H, YANG H Y, GONG G F, et al. Determination of the cutterhead torque for EPB shield tunneling machine [J]. Automation in construction, 2011, 20(8):1087-1095.
- [10] 张海波,曹科,刘鑫昌,等. 基于多核学习支持向量机算法的 隧道掘进速度预测[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2021, 43(6):75-80.

ZHANG H B, CAO K, LIU X C, et al. Tunnel driving velocity prediction based on multi-core learning support vector machine algorithm [J]. Journal of China Three Gorges University (natural science edition), 2021, 43(6):75-80.

- [11] 王振东.基于贝叶斯优化 RF-BiLSTM 的盾构机掘进速度预测的研究[J].中国建材科技,2023,32(6):142-146.
 WANG Z D. Research on prediction of tunneling velocity of shield machine based on Bayesian optimization RF-BiLSTM [J]. China building materials science and technology,2023,32(6):142-146.
- TZAMOS S, SOFIANOS A I. Extending the Q system's prediction of support in tunnels employing fuzzy logic and extra parameters
 J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2006, 43(6):938-949.
- [13] WANG Y, CHEN Y Y. A comparison of mamdani and sugeno fuzzy inference systems for traffic flow prediction [J]. Journal of computers, 2014,9(1):12-21.