

DOI: 10.7672/sgjs2026130093

基于 ARIMA 模型的地铁深基坑地下水 动态预测与实时可视化*

刘志明¹, 罗文瑞², 刘 星², 杨 浪¹, 史 博²

(1. 绍兴市轨道交通集团有限公司, 浙江 绍兴 312099; 2. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 地铁深基坑施工中, 地下水位动态变化直接影响工程安全, 而传统监测方法存在预测精度不足和可视化交互性差的问题。为此, 提出一种结合时间序列分析与动态可视化的智能监测方法。基于绍兴地铁 2 号线称山南路站的自动化监测数据, 采用 ARIMA 进行水位预测, 并利用 Vue 和 ECharts 构建实时交互可视化平台。结果表明, ARIMA 模型一步预测误差小于 2cm; 可视化系统能实时展示水位变化, 支持数据交互查询, 显著提升监测效率, 解决了传统水位监测的滞后性问题。

[关键词] 地铁; 深基坑; 水位; 监测; ARIMA 模型; 可视化

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0093-05

ARIMA Model-based Dynamics Prediction and Real-time Visualization of Groundwater in Deep Foundation Excavation for Metro Construction

LIU Zhiming¹, LUO Wenrui², LIU Xing², YANG Lang¹, SHI Bo²

(1. Shaoxing Rail Transit Group Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang 312099, China;

2. China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In deep foundation excavation construction for subway projects, dynamic changes in the groundwater level directly impact engineering safety, while traditional monitoring methods suffer from insufficient predictive accuracy and poor visualization interactivity. To address this, this paper proposes an intelligent monitoring method that combines time series analysis with dynamic visualization. Based on automated monitoring data from the South Chengshan Road Station on the Shaoxing Metro Line 2, ARIMA was employed for water level forecasting and utilized Vue and ECharts to build a real-time interactive visualization platform. The results indicate that the one-step prediction error of the ARIMA model is less than 2cm. The visualization system can display water level changes in real time and supports interactive data queries, significantly improving monitoring efficiency and resolving the lag problems associated with traditional water level monitoring.

Keywords: subways; deep foundation excavation; water levels; monitoring; ARIMA model; visualization

0 引言

地铁作为现代城市公共交通的重要组成部分, 对缓解交通拥堵、促进区域经济发展和改善居民出行体验具有不可替代的作用。在地铁建设过程中, 车站基坑工程是确保地铁系统安全稳定运行的关

键环节, 其施工质量直接关系整个项目的成败。而基坑工程中的地下水位监测尤为重要^[1-2], 通过实时掌握水位变化数据, 可以有效预防渗漏、管涌等安全隐患, 保障基坑围护结构的稳定性, 为后续施工提供可靠的环境支撑。

传统地铁基坑地下水监测主要采用接触式水位计, 其工作原理是通过探头接触液面触发电路闭合, 利用音响提示确定测量点, 再结合钢尺电缆的刻度标记获取水位深度。然而, 该方法存在实时性

* 中铁一局集团城市轨道交通工程有限公司科研立项: 地铁深基坑自动化变形监测与预测关键技术研究

[作者简介] 刘志明, 高级工程师, E-mail: 78248114@qq.com

[收稿日期] 2026-01-10

差、测量效率低等显著缺陷^[3-4]。为提升监测效率,研究人员开发了基于压力式水位计的自动化监测系统,通过 RS485 通信接口实现数据远程传输,但仍受限于电缆长度和通信距离的制约^[5]。近年来,随着物联网技术的发展,集成 4G 通信模块和锂电池供电系统的一体化智能水位计应运而生,这种新型监测设备突破了传统布设限制,为地铁基坑地下水监测提供了更灵活、高效的解决方案^[6-7]。

尽管一体化智能水位监测系统实现了高频数据采集,但受降雨、抽水和土层渗透性差异等因素影响,地下水位常呈现剧烈波动特征,有必要进行水位预测。当前基于机器学习的水位预测方法虽具潜力,却面临样本需求量大、参数复杂等局限,难以满足实时预警的工程需求^[8-10]。

因此,考虑实时性与计算复杂度,本文基于自回归积分滑动平均模型(auto regressive integrated moving average, ARIMA)进行地铁基坑地下水动态预测研究,采用绍兴地铁 2 号线称山南路站的基坑自动化水位监测数据进行验证。同时,考虑传统静态报表或手动更新的可视化方式存在滞后性且交互能力弱的问题^[11],本文基于 Vue+Echart 组合进行动态水位数据实时渲染、交互式图表联动和自动化更新。

1 自动水位计及数据采集

自动水位计的工作原理是基于静压测量,其核心采用扩散硅压阻式敏感元件,通过感知液体静压与液位高度的线性关系实现水位监测。本研究以绍兴地铁 2 号线称山南路站基坑工程为背景,采用高精度自动化水位监测系统进行地下水位实时监测。系统配置的水位计具有 20m 量程,测量精度达到 0.1% 量程(full scale, FS)。该设备通过 4G 无线通信模块实现监测数据的远程传输,系统设定采样间隔约为 60min,满足工程监测需求。

以 2025 年 3 月 10 日—3 月 16 日连续 7 d 的 SW1 点监测数据为例,自动水位计采集的水位变化过程如图 1 所示,其中每个数据点代表 1 次独立采样结果。监测数据显示,该时段内地下水位呈现明显的波动特征:最高水位达到 22.050m,最低水位为 21.480m,极差达 0.57m。值得注意的是,3 月 13 日水位出现剧烈波动,单日变幅超过 0.4m,经分析这与当日持续的中雨天气过程存在显著相关性,降水入渗对地下水位产生了明显的补给作用。从时序特征来看,该水位序列表现出显著的非平稳性,具体体现为趋势性变化和方差非齐性,后续分析需通过适当的差分处理将其转化为平稳时间序列。

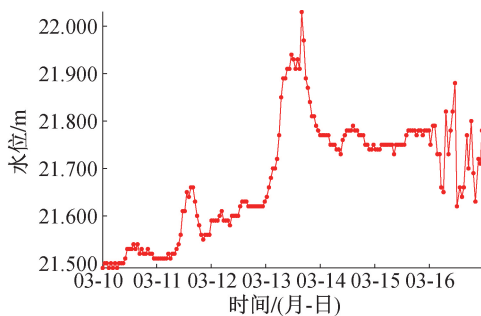


图 1 自动化水位监测序列

Fig. 1 Automatic water level monitoring sequence

2 基于 ARIMA 模型的水位动态预测

ARIMA 是一种经典的时间序列预测方法,通过结合自回归(auto regression, AR)、差分(differencing)和移动平均(moving average, MA)来捕捉数据的趋势,适用于平稳的时间序列^[12],可表达为:

$$\begin{cases} \Phi(A) \nabla^d x_t = \Theta(A) \varepsilon_t \\ E(\varepsilon_t) = 0, \text{Var}(\varepsilon_t) = \sigma_\varepsilon^2, E(\varepsilon_t \varepsilon_s) = 0, s \neq t \\ E(x_s \varepsilon_t) = 0, \forall s < t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Phi(A) = 1 - \phi_1 A - \phi_2 A^2 - \dots - \phi_p A^p$, 为自回归多项式; $\Theta(A) = 1 - \theta_1 A - \theta_2 A^2 - \dots - \theta_q A^q$, 为移动平均多项式; A 为延迟算子, $\nabla^d = (1 - A)^d$ 代表 d 阶差分; x_t 代表时间序列; ε_t 为白噪声序列, 期望为 $E(\varepsilon_t) = 0$, 方差为 $\text{Var}(\varepsilon_t) = \sigma_\varepsilon^2$, 并且序列中任意两个不同时间点的协方差为 $E(\varepsilon_t \varepsilon_s) = 0$; $E(x_s \varepsilon_t) = 0$ 则表明白噪声与待分析的时间序列之间不存在任何相关性。因此,该模型主要适用于满足平稳性条件的时间序列分析。通过差分运算将非平稳序列转化为平稳序列后,ARIMA 模型才能有效地捕捉序列的自相关和移动平均特征。进行 d 阶差分的表达为:

$$\nabla^d x_t = \sum_{i=0}^d (-1)^i C_d^i x_{t-i} \quad (2)$$

式中: $C_d^i = d! / [i! (d-i)!]$, 表明差分后的序列可以表示为原始序列中若干数值的加权线性组合。差分后,可通过 ADF (augmented dickey-fuller) 检验判断序列是否平稳^[13]。对 SW1 的自动化水位监测数据进行一阶差分,如图 2 所示。可以看出,差分后的序列值在 0 附近均匀波动,无明显趋势或周期性,初步判断已达到平稳性要求。进一步通过 ADF 检验进行统计验证,结果显示检验统计量在 $\alpha = 0.01$ 显著性水平下显著($p = 0.001$),这为序列的平稳性提供了严格的统计依据。

经过差分处理后,水位观测序列已达到平稳。

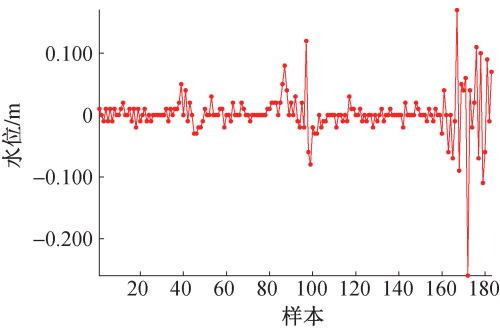


图 2 差分后的自动化水位监测序列

Fig. 2 Differenced time series of automatic water level monitoring

为进一步检验该序列是否具有纯随机特性(即是否为白噪声),现采用 Ljung-Box 检验进行分析,其检验统计量构建如下:

$$Q = n(n + 2) \sum_{k=1}^h \frac{\hat{\rho}_k^2}{n - k} \tag{3}$$

式中: n 为水位观测序列长度; h 为设定的滞后阶数; $\hat{\rho}_k$ 为水位观测序列在滞后 k 阶的自相关系数。按照半天 $h = 12$ 的滞后阶数设置,计算的 $Q = 27.344\ 2$,大于临界值 $21.026\ 1$,因此拒绝原假设,表明序列是非随机的,因此可以利用 ARIMA 模型进行预测。

在基坑地下水位监测数据满足平稳非随机性质后,为确定 ARIMA 模型的自回归阶数 p 和移动平均阶数 q ,绘制自相关函数(autocorrelation function, ACF)和偏自相关函数(partial autocorrelation function, PACF),如图 3 所示。可以看出,ACF 和 PACF 都在滞后 1 阶后截尾,因此可采用 ARIMA(1, 1, 1)模型进行水位预测,其具体数学表达为:

$$x_t = (1 + \phi_1)x_{t-1} - \phi_1x_{t-2} + \varepsilon_t - \theta_1\varepsilon_{t-1} \tag{4}$$

考虑到地铁基坑工程的实际监测需求,本研究采用滑动窗口法构建 ARIMA 模型进行水位预测。具体而言,以 12h 的历史水位观测数据为基础,预测下一小时的水位变化。当新的实测数据更新后,模型窗口随之滑动更新,始终保持最新的 12h 数据用于建模预测。该 ARIMA 模型的预测水位与实际测量水位的对比结果如图 4 所示。可以看出,1h 的水位预测值与水位实际测量值吻合度较好,可以反映水位的动态变化。统计预测水位的均方根误差(root mean square error, RMSE)为 0.017m,水位预测精度优于 2cm,表明 ARIMA 模型可实现地铁深基坑地下水位的精准预测。

在此基础上,基于自回归积分滑动平均模型 ARIMA(1, 1, 1)开展多步水位预测试验,分别获取

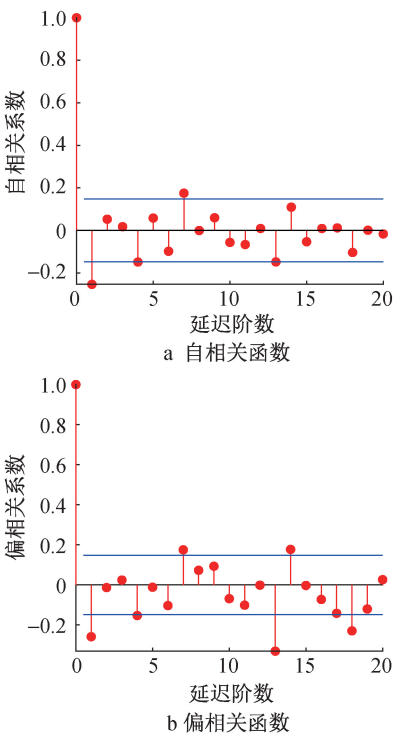


图 3 差分后自动化水位监测序列的 ACF 和 PACF
Fig. 3 ACF and PACF of the automatic water level monitoring series after differencing

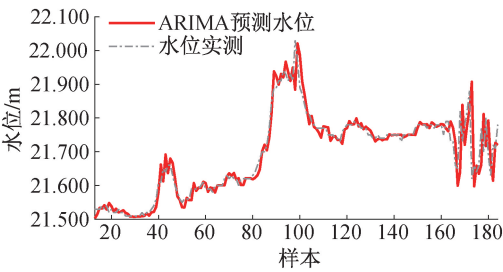


图 4 基于 ARIMA 模型的水位预测效果(1h)
Fig. 4 One-hour water level prediction performance based on the ARIMA model

2h 与 3h 的水位预测结果,如图 5,6 所示。可以看出,随着预测步长的增加,预测水位与实测水位的偏差逐渐增大;尤其在水位波动剧烈的时段(如序列点 80~100 与 160~180),这种偏差表现得更为显著。统计结果显示,2h 和 3h 的水位预测 RMSE 分别为 0.05cm 和 0.07cm,仍满足高精度预测要求。

3 基于 Vue+Echart 的自动化水位实时可视化

在完成自动化水位数据采集及预测后,为实现高效直观的基坑地下水位监测,本研究采用基于 Vue+ECharts 的实时可视化方案。该方案充分发挥 Vue 的响应式特性和 ECharts 强大的可视化能力^[14-15],不仅能够实现水位数据的低延迟动态渲染,还支持跨平台部署和多维度数据展示。整个水位实时可视化系统的架构如图 7 所示。可以看出,

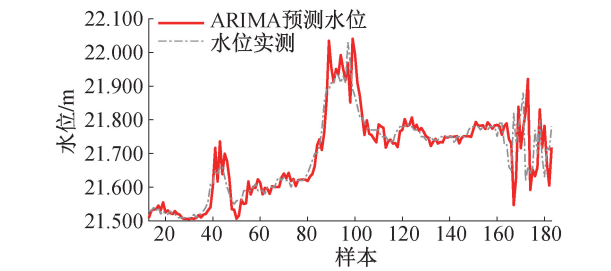


图 5 基于 ARIMA 模型的水位预测效果(2h)

Fig. 5 Two-hour water level prediction performance based on the ARIMA model

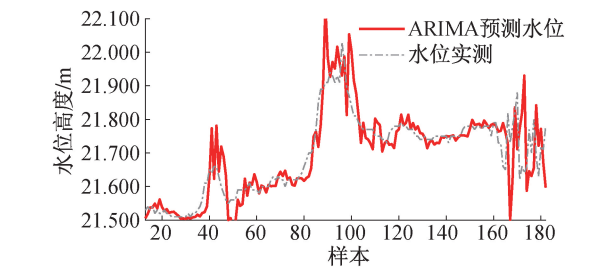


图 6 基于 ARIMA 模型的水位预测效果(3h)

Fig. 6 Three-hour water level prediction performance based on the ARIMA model

该系统通过前端 Vue 的响应式特性与 ECharts 的动态渲染能力,结合后端 Redis 和 InfluxDB 的数据处理优势,既满足了基坑水位实时监控的即时性需求,又为趋势分析预警提供了可靠的数据支撑,形成了从数据采集到可视化呈现的完整闭环。

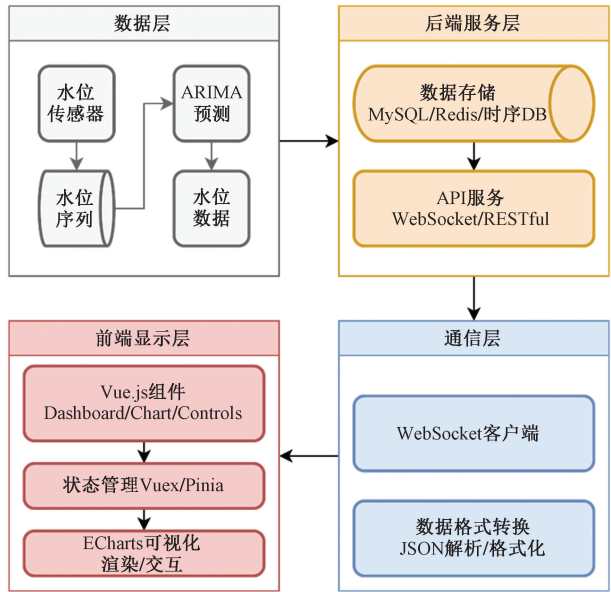


图 7 水位实时可视化系统架构

Fig. 7 Architecture of real-time water level visualization system

具体操作上,研究首先搭建 Vue 项目并集成 ECharts 库。通过 npm 安装 vue-echarts 组件库,在组

件中引入并初始化 1 个折线图或柱状图图表容器,设置好图表的基本配置项(如 x/y 轴、标题、图例等)。建立 WebSocket 连接 API 接口,从后端服务获取实时水位数据,将数据格式化为 ECharts 需要的数组格式,包含时间戳和水位值 2 个维度。

数据获取以及处理完成后,通过 ECharts 的 setOption 方法动态更新图表数据,并利用 Vue 的响应式特性实现视图自动渲染,且添加数据标签提示的交互功能,然后通过配置 resize 事件监听实现图表自适应。最后使用 setInterval 定时器控制数据刷新频率,同时注意在组件销毁时清除定时器和 WebSocket 连接以避免内存泄漏。

绍兴地铁 2 号线称山南路站基坑工程的监测点平面布置及实时水位动态监测数据可视化界面分别如图 8,9 所示。其中,图 8 详细标注了各监测点的空间分布情况,图 9 则通过交互式界面实现了水位数据的实时可视化展示。可以看出,该可视化方案在前端显示上比较直观地给出当前时段的水位动态变化,同时支持用户通过时间轴滑动查看历史数据趋势,并能够点击特定监测点获取详细水位信息(如 SW1 在 2025—07—12 03:00 的水位为 21.640m),这种设计既满足了实时监控的需求,又为数据分析提供了灵活的操作方式。

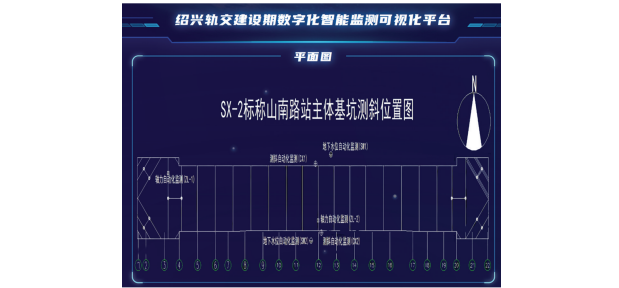


图 8 监测可视化平台

Fig. 8 Monitoring visualization platform

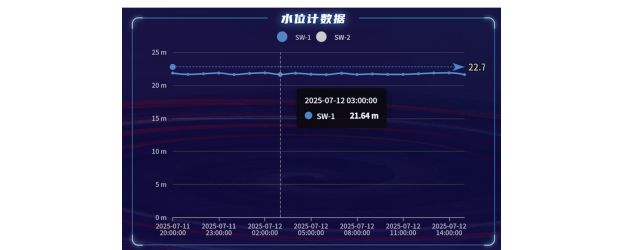


图 9 自动化水位实时可视化

Fig. 9 Real-time visualization of automatic water level monitoring

4 结语

基于绍兴地铁 2 号线称山南路站基坑工程的自

动化水位监测数据,利用 ARIMA 模型进行水位预测,并利用 Vue+Echart 实时水位实时可视化,结果如下。

1) 地铁深基坑地下水位呈现明显的波动性,特别是降水入渗会对地下水位产生明显的补给作用,应当采用差分的方式转换为平稳时间序列。

2) 经过自相关 ACF 和偏相关 PACF 确定 ARIMA(1,1,1) 模型,利用该模型进行滑窗水位预测,一步预测的精度优于 2cm,三步预测的精度优于 7cm,表明 ARIMA 模型可实现地铁深基坑地下水位的精准预测。

3) 基于 Vue+Echart 的自动化水位实时可视化可直观地给出水位动态变化,同时支持通过时间轴滑动查看历史数据趋势,并能够点击特定监测点获取详细水位信息,为实现高效直观的基坑地下水位可视化监测提供了新思路。

参考文献:

[1] 李兆,骆祖江,陆建生,等. 水平封底式降水对基坑周围环境影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21 (3): 1076-1084.

LI Z, LUO Z J, LU J S, et al. Study on the impact of horizontal bottom sealing dewatering on the foundation excavation surrounding environment [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2025, 21 (3): 1076-1084.

[2] 张裕,王俊鹏,钟伟慈,等. 富水砂层深基坑降水开挖对邻近综合管廊的影响 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53 (9): 73-78.

ZHANG Y, WANG J P, ZHONG W C, et al. Influence of dewatering excavation of deep foundation excavation in water-rich sand layer on adjacent comprehensive pipe gallery [J]. Construction technology, 2024, 53 (9): 73-78.

[3] 牛睿平,张健,王美玲,等. 一种新型国产雷达水位计的设计 [J]. 水利信息化, 2015 (5): 34-38.

NIU R P, ZHANG J, WANG M L, et al. Design of a new type of domestic radar water level gauge [J]. Water resources informatization, 2015 (5): 34-38.

[4] 牟春霖. 一体式水位自动化传感器在轨道交通基坑监测中的应用 [J]. 铁道勘察, 2024, 50 (5): 101-107.

MOU C L. Application of integrated water level automation sensor in monitoring of rail transit foundation excavation [J]. Railway investigation and surveying, 2024, 50 (5): 101-107.

[5] 陈倩,周少鹏,黄隆贵,等. 基于 STM32F 的地下水位监测系统的设计 [J]. 科技创新与应用, 2016, 6 (22): 88.

CHEN Q, ZHOU S P, HUANG L G, et al. Design of groundwater level monitoring system based on STM32F [J]. Technology innovation and application, 2016, 6 (22): 88.

[6] 陈建平,王冬,刘云艳. 基于物联网的地下水监测系统开发与

应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023 (5): 114-118.

CHEN J P, WANG D, LIU Y Y. Development and application of groundwater monitoring system based on Internet of Things [J]. Automation & instrumentation, 2023 (5): 114-118.

[7] 魏国晋,张亚,胡春杰. NB-IoT 技术及其在水文中的应用 [J]. 电子设计工程, 2021, 29 (17): 185-188, 193.

WEI G J, ZHANG Y, HU C J. NB-IoT technology and its application in hydrology [J]. Electronic design engineering, 2021, 29 (17): 185-188, 193.

[8] 李梅芬,鲁秉晓,张正海. 基于自注意力机制 CNN-LSTM 的水位流量预测方法 [J]. 地下水, 2025, 47 (3): 194-196.

LI M F, LU B X, ZHANG Z H. Prediction method of water level and discharge based on self-attention mechanism CNN-LSTM [J]. Ground water, 2025, 47 (3): 194-196.

[9] 程帅,张娟,杨默远,等. 基于 PatchTST 的地下水位预测模型 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2025, 56 (11): 83-97.

CHENG S, ZHANG J, YANG M Y, et al. A multi-variable groundwater level prediction model based on PatchTST [J]. Water resources and hydropower engineering, 2025, 56 (11): 83-97.

[10] 王佳佳,盛政,胡文军. 基于 LSTM 的雨水管网水位预测 [J]. 智能计算机与应用, 2025, 15 (5): 156-162.

WANG J J, SHENG Z, HU W J. Water level prediction in rainwater pipe network based on LSTM [J]. Intelligent computer and applications, 2025, 15 (5): 156-162.

[11] 杜政隆,谢丽明,王飞飞. 基于 Arduino 的水位监测系统设计与实现 [J]. 物联网技术, 2023, 13 (3): 6-8.

DU Z L, XIE L M, WANG F F. Design and implementation of water level monitoring system based on arduino [J]. Internet of Things technologies, 2023, 13 (3): 6-8.

[12] 冯杭华. 基于 ARIMA-TGM 组合模型的边坡变形预测 [J]. 地理空间信息, 2022, 20 (10): 98-102.

FENG H H. Slope deformation prediction based on ARIMA-TGM combined model [J]. Geospatial information, 2022, 20 (10): 98-102.

[13] 陈昭. 时序非平稳性 ADF 检验法的理论与应用 [J]. 广州大学学报 (自然科学版), 2008, 7 (5): 5-10.

CHEN Z. ADF test for non-stationary time series: theory and application [J]. Journal of Guangzhou University (natural science edition), 2008, 7 (5): 5-10.

[14] 朱永萍. 基于 Vue 的可视化编辑器的研究与实现 [J]. 工业控制计算机, 2025, 38 (4): 90-92.

ZHU Y P. Research and implementation of visualization editor based on vue [J]. Industrial control computer, 2025, 38 (4): 90-92.

[15] 宋文凯,王利萍,荆巍巍. 基于 Vue 框架的多源 WEB 前端页面数据可视化方法 [J]. 电子设计工程, 2025, 33 (6): 63-66, 71.

SONG W K, WANG L P, JING W W. Visualization method for multi-source WEB front-end page data based on Vue framework [J]. Electronic design engineering, 2025, 33 (6): 63-66, 71.