引文格式：周文,胡涛,李江龙. 装配式矩形顶管施工工程不均匀滞后沉降动态预警方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(12):108-111. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.12.024

装配式矩形顶管施工工程不均匀滞后沉降动态预警方法

周　文[1]，胡　涛[1]，李江龙[2]
（1. 黄石精武顶管工程有限公司，湖北 黄石 435000；2. 武汉地铁集团有限公司，湖北 武汉　430070）

摘　要：在装配式矩形顶管工程施工过程中，由于地质条件的不均匀性以及土壤承载力的差异，导致工程出现不均匀滞后沉降问题，从而影响工程的整体安全性。为此，提出装配式矩形顶管施工工程不均匀滞后沉降动态预警方法。采用自回归方法构建滞后效应模型，分析工程沉降监测点位的应力与应变关系，结合滞后时间分析工程沉降的不均匀滞后效应，并在工程的关键位置布设基准点和标点，通过求取各个点位的高程值，以获取工程地基的不均匀参量，进而对工程沉降量进行预测。基于此，计算工程不均匀滞后沉降速率，并以此作为预警指标实现工程沉降动态预警。以武汉市轨道交通2号线一期工程中山公园站及广埠屯站预留出入口工程为研究背景，利用所提方法对其进行沉降动态预警，结果表明，所提方法得到的预警结果的虚警率低于20%，预警准确度较高。

关键词：装配式矩形顶管施工；不均匀滞后；沉降动态预警；沉降速率；预警等级
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）12-0108-04

Dynamic Early Warning Method for Uneven Hysteresis Settlement in Prefabricated Rectangular Pipe Jacking Construction Engineering

ZHOU Wen[1], HU Tao[1], LI Jianglong[2]
(1. Huangshi Jingwu Pipe-jacking Construction Co., Ltd., Huangshi 435000, China;
2. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: During the construction process of prefabricated rectangular pipe jacking engineering, uneven geological conditions and differences in soil bearing capacity lead to uneven and delayed settlement problems, which affect the overall safety of the project. Therefore, we proposed a dynamic early warning method for uneven hysteresis settlement in prefabricated rectangular pipe jacking construction projects. We used autoregressive method to construct a lag effect model, analyzed the stress and strain relationship of engineering settlement monitoring points, combined with lag time to analyze the uneven lag effect of engineering settlement, and set up benchmark points and punctuation points at key positions of the project. By obtaining the elevation values of each point, we obtained the uneven parameters of engineering foundation, and predicted the engineering settlement amount. On the basis of this, we calculated the uneven lag settlement rate of the project, and used it as a warning indicator to achieve dynamic early warning of engineering settlement. Taking the reserved entrances and exits of Zhongshan Park Station and Guangbutun Station in the first phase of Wuhan Metro Line2 as the research background, we used the proposed method for dynamic settlement early warning. The results show that the false alarm rate of early warning results obtained by the proposed method is less than 20%, and the accuracy of early warning is relatively high.

Key words: prefabricated rectangular pipe jacking construction, uneven hysteresis, settlement dynamic early warning, settlement rate, early warning level

装配式矩形顶管建筑工程作为现代城市地下空间开发的重要技术手段，近年来得到了广泛的应用。然而，由于地质条件、施工技术和环境荷载等多种因素，此类工程在施工和运营过程中经常面临不均匀滞后沉降的问题。这不仅威胁到项目本身的结构安全，还可能对周围的建筑物和地下管道造成破坏，导致一系列社会和环境问题。因此，研究装配式矩形顶管施工项目中不均匀滞后沉降的动态预警方法尤为重要。

传统上[1-4]，装配式矩形顶管施工项目的不均匀滞后沉降主要依赖于定期的人工监测和静态评估。这种方法存在响应延迟和数据准确性有限等缺点，难以及时准确地捕捉沉降动态，有效防范潜在风险。因此，本文研究并开发了一种新型的沉降动态预警技术。以期为工程决策提供科学依据，有效控制沉降风险，确保工程安全。

1　不均匀滞后沉降动态预警方法设计

1.1　不均匀滞后效应分析

不均匀滞后效应是指在工程建设中，不同监测点位或不同监测时间点的沉降变化存在不均匀性与滞后性。在装配式矩形顶管施工工程中，由于地质条件、

第一作者简介：周文（1988—），本科，工程师，研究方向为非开挖顶管技术应用，E-mail：zhouwen12345678@126.com。

施工工艺以及装配式结构的特点，使得工程产生不均匀的变形和沉降[5]。因此，为实现工程沉降动态监测与预警，充分考虑不均匀滞后效应，并对此展开分析，明确不均匀滞后效应系数，进而预测未来一段时间内的沉降量，便于沉降动态预警。

在工程的管线部位布设沉降监测点，采用位移传感器进行实时数据采集，并假设工程底层损失在整个施工方向上呈均匀分布[6]，则沉降数据的平均标准差可表示为：

$$s_u=\frac{\sqrt{\alpha_0 N_p}}{\left|\left(x_t-\boldsymbol{\mu}_s\right)^2\right|} \tag{1}$$

式中，α_0 为采集数据集中每个数据的离散系数；N_p 为采集的数据点数量；x_t 为变异系数；$\boldsymbol{\mu}_s$ 为协方差矩阵。

为了深入分析并预测特定数据集的动态变化趋势，将原始数据转化为时间序列数据形式，以揭示数据随时间变化的规律和特征。并采用自回归模型作为滞后模型，将因变量的滞后值作为自变量[7]，目的是确保模型既能够捕捉到数据的主要变化趋势，又能够避免过度拟合的问题。由此得到监测点位的应力–应变关系，即

$$\begin{cases} A_s=\dfrac{s_u}{j_s}\times\dfrac{\kappa_f}{g_c} \\ f_v=\dfrac{A_s}{\exp\left(-\dfrac{\varsigma_j}{h_0/k_e}\right)} \end{cases} \tag{2}$$

式中，j_s 为工程单位长度的地层损失；κ_f 为自回归系数；g_c 为超平面的截距；A_s 为自回归模型；ς_j 为最大曲率半径点的沉降系数；h_0 为监测点位的应变；k_e 为第 e 个土层的加权摩擦角；f_v 为监测点位的应力。

为了更精确地评估和分析不均匀滞后沉降现象，综合考虑了沉降速率的变化、地质条件的影响以及施工活动的具体情况等多种因素，引入了加权评价方法来确定其滞后时间[8]。公式如下：

$$t'=\frac{t_1-t_2}{f_v\times\beta_g} \tag{3}$$

式中，t_1 为沉降实际发生的时间；t_2 为沉降预期发生的时间；β_g 为标准状态累积函数。

进一步构造滞后效应函数，表达式为：

$$F(x)=t'\times\lg\frac{y_s}{d_e\times b_k} \tag{4}$$

式中，y_s 为实际观测到的数据；d_e 为不考虑滞后效应时预期的数据；b_k 为时间变化量。

由此可计算得到不均匀滞后系数，如下式所示：

$$L_0=F(x)\times\gamma_t\times\boldsymbol{u}_s \tag{5}$$

式中，γ_t 为拟合系数；$\boldsymbol{u}_s$ 为正倒数矩阵。

根据式（5）求取工程沉降的不均匀滞后系数，若 $L_0>1$，判定为正滞后效应；若 $L_0<1$，则判定为负滞后效应[9]。以此完成工程不均匀滞后效应分析，为后期沉降量预测提供有利条件。

1.2　沉降量预测

在工程沉降不均匀滞后效应分析的基础上，对工程沉降量进行预测，为后期沉降的动态预警提供数据依据。

首先在工程的观测区域内建立水准点，以此作为高程测量的基准点，同时在始发井结构外边线和构筑物周边安装标点，并统计各基准点和标点的高程值[10]，描述如下：

$$\begin{cases} r_i=\displaystyle\sum_{i=1}^{n_0}\frac{L_0}{\sqrt{D_s\times u_\chi}} \\ r_j=\displaystyle\sum_{j=1}^{n_1}\frac{\varpi_g}{h_l/q_v} \end{cases} \tag{6}$$

式中，n_0 为基准点数量；L_0 为不均匀滞后效应系数；D_s 为土体弹性模量；u_χ 为建筑物荷载作用面的等效弹性模量；r_i 为第 i 个基准点的高程值；n_1 为安装的标点数量；ϖ_g 为根据监测数据统计得到的系数；q_v 为标准正态随机变量的值；r_j 为第 j 个标点的高程值；h_l 为正态分布函数的积分形式。

采用误差函数确定工程地基的不均匀性参量[11]，公式为：

$$y_o=\frac{\sqrt{m_0+\left(r_i^2\times r_j^2\right)}}{2\left\|\xi_p\times c_x\right\|} \tag{7}$$

式中，m_0 为工程表层土层的厚度变化；ξ_p 为待定系数，可通过现场实测资料采用线性回归方法求得；c_x 为误差函数。

对式（7）取极限，即当监测时间趋于无穷大时，得到工程最终沉降量的预测值 H_c[12]，表达式如下：

$$H_c=y_o\times\frac{\eta_g}{\boldsymbol{B}_s} \tag{8}$$

式中，η_g 为高程值测量次数；$\boldsymbol{B}_s$ 为单位计算矩阵。

通过在工程的关键位置布设基准点和标点，并求取各个点位的高程值，以获取工程地基的不均匀参量，进而对工程沉降量进行预测，为进一步的研究工作做准备。

1.3　不均匀滞后沉降预警

根据工程特点和地质条件，采用沉降速率作为预

警指标，并通过沉降速率的变化实现工程不均匀性滞后沉降预警。

在二维优先施工情况下，地表单位下沉的三维表达式[13]为：

$$W_f(x,y,z)=H_c\times R_h \tag{9}$$

式中，H_c 为工程地表沉降量预测值；R_h 为叠加标度函数；(x,y,z) 为施工水平面的空间坐标。

运用叠加原理，对上式进行变元变换，以获取沉降的影响范围[14]，即

$$C_t=\frac{W_f(x,y,z)}{\tau_d\times \boldsymbol{p}_d\times l_f} \tag{10}$$

式中，τ_d 为影响角；$\boldsymbol{p}_d$ 为转移状态矩阵；l_f 为经验常数。

进而可采用下式计算沉降速率，即

$$v_t=\frac{\Delta G_j}{C_t\times T_0} \tag{11}$$

式中，ΔG_j 为时间间隔为 T_0 的沉降差值；v_t 为沉降速率。

将式（11）求得的沉降速率作为控制标准，结合实际工程概况，将沉降变化划分为5个预警等级[15]，具体如表1所示。

表1 工程沉降预警等级划分表

预警等级	沉降速率/（mm/w）	级别描述
Ⅰ	$0.80<v_t\leq0.10$	风险很大
Ⅱ	$0.60<v_t\leq0.80$	风险大
Ⅲ	$0.40<v_t\leq0.60$	风险较大
Ⅳ	$0.20<v_t\leq0.40$	风险较小
Ⅴ	$v_t\leq0.20$	无风险

将式（11）计算得到的沉降速率与表1中的数据相比较，以此确定预警等级[16]，完成工程不均匀滞后沉降的动态预警。

2 实例论证分析

为验证本文设计的装配式矩形顶管施工工程不均匀滞后沉降动态预警方法在实际应用中的效果，将本文方法应用在武汉市轨道交通2号线一期工程中山公园站及广埠屯站预留出入口工程中，并对其进行沉降动态预警分析，根据实验结果分析该方法的预警效果。

2.1 工程概况

中山公园站位于武汉地铁2号线，站后设有一条停车线，采用双柱三跨岛式结构，已正式投入运营。其中，1、2、3号出入口位于解放大道与武展东路南侧，且需穿越解放大道高架桥。工程项目区位示意图如图1所示。

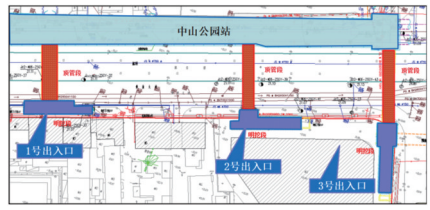


图1 工程项目区位图

车站设计起点设在里程点DK9+119.915，有效站台中心点设在里程点DN9+207.115。车站设计终点位于DK9+658.515里程处，左右线设计长度为538.6 m。在车站线路上方规划物业区，并配备齐全的辅助设施，包括6个出入口、2组风道和一个风亭。

2.2 实验准备

在施工区域的稳定的基础处布设3个基准点，沿管线延伸方向每25 m布置一个监测点位，并采用二级水准测量网进行监测。布设方案如图2所示。

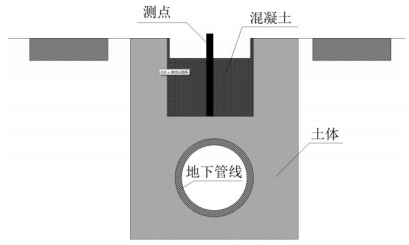


图2 监测点位布设

根据工程沉降监测点位布设方案，对各个测点的沉降进行实时监测，并结合历史沉降数据，对不同滞后效应下的沉降量进行预测，结果如图3所示。

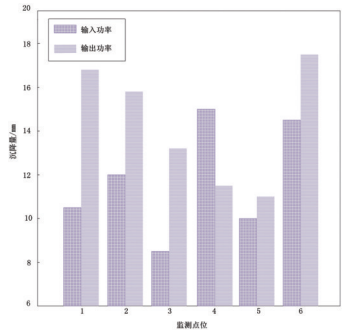


图3 考虑不均匀滞后效应的沉降量预测结果

以图3所示的沉降量预测值为基础研究数据，利用所提方法对该工程项目进行沉降动态预警。

实验平台硬件包括位移传感器和水准仪，以实时采集预制矩形顶管施工过程中的沉降数据。设置顶升速度为10 m/h，以模拟施工期间的实际顶升速度；监测频率为2 h一次，以确保数据的连续性和及时性。根据工程要求和安全标准，设置不均匀沉降的警告阈值，当沉降率超过0.20 mm/w时，将触发该阈值。

实验过程如下。在实验环境中安装位移传感器和水准仪，连接数据采集设备和计算机；使用模拟施工

系统，根据设定的顶管速度和不均匀沉降的警告阈值参数，模拟预制矩形顶管的施工；在模拟施工过程中，收集位移传感器和水准仪的实时数据，并将其传输到数据处理和分析系统；使用数据处理软件对收集到的数据进行处理和分析，计算沉降速率，并根据预警阈值作出预警判断。

通过上述实验准备方案，可以模拟装配式矩形顶管施工工程不均匀滞后沉降动态预警方法，并分析本文方法的实际应用性能。

2.3　工程沉降动态预警结果

为了更加准确地预警装配式矩形顶管施工过程中的地面沉降情况，基于以上实验准备与顶管速度和、监测频率和不均匀沉降的警告阈值的设置，将本文设计的方法应用于图1所示的工程沉降动态预警中，实验结果如图4所示。

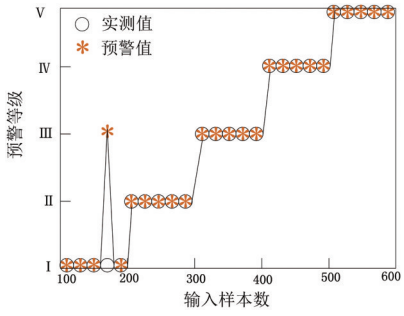


图4　工程沉降动态预警结果

通过图4可以看出，应用本文设计的方法对此工程项目进行沉降动态预警，输出的预警等级与实测结果基本一致，整体预警误差较小，能够满足实际应用中高精度的预警需求。

2.4　对比实验与分析

为进一步验证本文方法的性能可行性，本次实验中引入文献[1]基于InSAR的方法（方法1）、文献[2]基于数据动态模态分解的方法（方法2）作为本文方法的对照组方法。分别采用3种方法对该工程项目进行沉降动态预警，统计不同方法预警结果的虚警率。虚警率越低，表明效应方法的预警准确度越高，预警性能越优异。对比结果如图5所示。

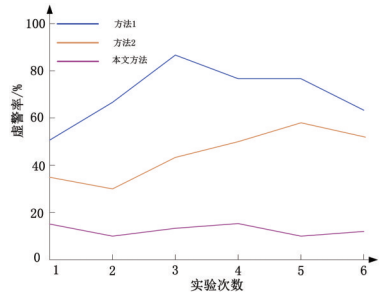


图5　虚警率对比结果

如图5所示，与对照组方法相比，在6次实验中，本文方法对于工程沉降量动态预警的预警虚警率相对较低，均在20%以下，而方法1和方法2的虚警率最大值分别为84.3%和58.6%，整体预警精度偏低。通过对比实验结果可以充分证明本文方法在工程沉降量动态预警中的可靠性。

3　结　语

本研究通过整合实时监测技术和数据分析算法，实现了装配式矩形顶管施工项目中不均匀滞后沉降的动态预警。该方法能准确识别和预警潜在的不均匀滞后沉降风险。这一实施过程不仅展示了技术创新的力量，也为施工安全提供了坚实的保障。本文研究意义深远，不仅促进了预制矩形顶管施工技术的优化升级，而且为城市地下空间的安全开发提供了强有力的支撑，展示了工程技术在城市建设中的重要作用。

参考文献

[1]　李士林，黎浩. 基于InSAR的城市群地表沉降监测与基础设施安全预警研究[J]. 路基工程，2023，46(1):25-30

[2]　高虎军，王涛. 基于数据动态模态分解的基坑沉降稳定性预警预测研究[J]. 工程勘察，2023，51(1):35-41

[3]　Guo Y，Zheng J，Liu H. An Early Warning Method for Tunneling-induced Gound Surface Settlement Considering Accident Precursors and Consequences[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2023，22(10):3 362-3 364

[4]　高炜. 基于北斗/GNSS高精度定位技术进行区域地块地面沉降监测和预警研究[J]. 安徽地质，2023，33(3):265-269

[5]　陈锋，胡士章，王亚，等. 基于影响函数法盐穴储气库地面沉降与预警阈值研究[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(增刊):4 082-4 090

[6]　侯建刚，张浩. 基于多参数融合的盾构法隧道施工安全状态预警方法研究[J]. 现代城市轨道交通，2023，19(8):72-76

[7]　蔡金涛. 地基沉降工况下配电网杆塔应变实时监测及预警技术研究[J]. 电工技术，2023，43(15):97-101

[8]　王社光，杨志强，王立杰，等. 采空区地表沉降智能监测与预警系统研究及应用[J]. 现代矿业，2023，39(4):132-134

[9]　王永. 软土地区拼宽路堤沉降预测及预警系统模型研究[J]. 中国高新科技，2023，29(7):99-101

[10]　林鸿荣，吴家驰. 福州市鼓台晋闽都文化温泉区地面沉降监测预警预报体系建设[J]. 中国高新科技，2024，30(5):88-89

[11]　李斯. 盾构隧道下穿高铁路基沉降监测与预警[J]. 铁道建筑，2023，63(11):127-130

[12]　陈云钢，叶舒，许立. 桩锚复合支护结构深基坑动态预警值

（下转第116页）