基于指数平滑法的建筑深基坑变形预测

索 瑞[1,2]

[1]中冶成都勘察研究总院有限公司 四川成都
[2]中国五冶集团有限公司 四川成都

【摘要】为提高建筑深基坑变形预测精度，基于三次指数平滑法构建时间序列预测模型。并以某深基坑变形监测为例，对不同位置的监测点的水平变形和竖向变形进行预测。研究结果表明：最优平滑系数 α 集中分布于 0.1-0.5 区间，验证了变形监测序列具备良好的平稳性特征；相较于水平变形预测结果，竖向变形预测的相对误差显著降低；变形过程呈现快-慢-稳的三阶段非线性演化特征：初始快速形变阶段、非线性衰减阶段及渐进稳定阶段。所构建模型能够科学表征深基坑变形过程的非线性特征，为工程实践中的变形预测提供了可靠分析方法。

【关键词】深基坑；变形预测；指数平滑法；时间序列
【收稿日期】2026 年 10 月 5 日 【出刊日期】2026 年 11 月 4 日 【DOI】10.12208/j.sdr.20260082

Deformation prediction of deep foundation pits in building construction based on exponential smoothing method

Rui Suo[1,2]

[1]*Chengdu Surveying Geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Chengdu, Sichuan*
[2]*China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu, Sichuan*

【**Abstract**】To improve the prediction accuracy of deformation in deep foundation pits during building construction, a time series prediction model was constructed based on the triple exponential smoothing method. Taking the deformation monitoring of a deep foundation pit as an example, horizontal and vertical deformations at different monitoring points were predicted. The results demonstrate that the optimal smoothing coefficient α is concentrated in the 0.1–0.5 range, verifying the strong stationarity characteristics of the deformation monitoring sequences. Compared with horizontal deformation predictions, the relative error of vertical deformation predictions is significantly reduced. The deformation process exhibits a three-stage nonlinear evolution characteristic of “fast-slow-stable”: an initial rapid deformation phase, a nonlinear attenuation phase, and a gradual stabilization phase. The proposed model effectively characterizes the nonlinear features of deep foundation pit deformation and provides a reliable analytical method for deformation prediction in engineering practice.

【**Keywords**】Deep foundation pit; Deformation prediction; Exponential smoothing method; Time series

引言

随着城市化进程的加快和地下空间开发的不断深入，建筑深基坑工程已成为高层建筑、地铁枢纽和地下综合体等大型项目施工过程中不可缺少的一部分。然而，由于地质条件的不确定性、施工荷载的动态变化及周边环境的干扰等因素，深基坑在施工过程中极易引发支护结构及周边地层的变形问题[1]，如图 1。若变形值超出安全阈值，不仅会导致工程自身结构失稳，还可能次生对邻近建筑物、地下管线及交通设施造成破坏，甚至引发严重的安全事故。因此，对深基坑服役过程中变形进行实时监控和精准预测，对保障工程和人员安全十分重要[2]。

目前，传统的深基坑变形预测主要有数值模拟和经验公式推导两种方法[3-4]，但这些方法通常把岩

作者简介：索瑞（1989-），本科，工程师，主要从事建筑工程施工及质量技术生产管理工作。

土体视为均质的，简化了环境因素的影响，并不能充分反映实际非均质的复杂特性、施工过程中的动态耦合效应以及复杂环境变量的综合影响。近年来，随着物联网和人工智能的快速发展，Transformer[5]、BP 神经网络[6]、LSTM[7]以及将这些模型组合[8]等深度学习技术逐渐成为深基坑变形预测的研究热点。通过综合考虑位移、应力、地下水位等监测指标，以此构建自适应的预测模型，能够显著提升变形预测的时效性与准确性。然而，现有研究仍有局限。一方面，多因素耦合的深层机制尚不明确；另一方面，数据噪声干扰显著，导致模型泛化能力受限。尤其对于基坑监测而言，单个监测点的可用数据通常较少，难以支撑复杂模型的训练需求。在监测数据有限的场景下可迁移模型表现受限，因而在小样本条件下，参数少、可解释性强、无需预先标注且部署成本低的状态空间平滑方法更具工程实用价值。为此，亟需在算法优化、动态反馈及工程适用性上实现突破。

本研究以深基坑在服役过程中的水平和竖向变形预测为研究目标，选取某建筑深基坑工程的水平和竖向变形监测数据，建立和选取适合该工程的指数平滑预测模型，以期为深基坑工程的风险预警与智能化施工提供理论支撑与实践参考。



图 1　基坑变形引起的支护破坏

1 指数平滑法

指数平滑法是一种利用时间序列数据进行预测的方法，其核心原理在于通过递推加权平均机制消除随机波动，生成平滑化的趋势序列。该方法通过赋予历史数据和当前观测值不同权重，构建动态调整的预测模型。当期平滑值可表示为当前实际观测值与上期平滑值的线性组合，其权重系数随观测时点呈指数衰减，即越近期的数据对预测影响越大[9]。

指数平滑法主要有三种应用形式，其以时间序列作为划分根据。首先是一次指数平滑模型，适用于无明显趋势和季节性的平稳序列，通过单参数加权实现历史数据的动态预测；然后是二次指数平滑模型，通过引入趋势调整项，可有效处理具有线性变化趋势的序列；最后是三次指数平滑模型，则进一步扩展了季节因子，能够捕捉和预测具有周期性波动或二次曲线特征的复杂时间序列。这种分层递进的建模方式使指数平滑法具备从简单到复杂的系统化预测能力，在统计预测领域具有广泛应用价值[10]。

指数平滑法的基本计算公式为式（1）。

$$S_t = \alpha X_t + (1-\alpha) S_{t-1} \qquad (1)$$

式中：S_t 为第 t 周期的指数平滑值；S_{t-1} 为第 t-1 周期的指数平滑值；X_t 为第 t 周期的实际测定值；α 为平滑系数（取值范围 $0 \leqslant \alpha \leqslant 1$）；$t$ 为数据周期数（t=1，2，3，……）。

一次、二次和三次指数平滑值的计算公式分别为式（2）、式（3）和式（4）

$$S_t^{(1)} = \alpha X_t + (1-\alpha) S_{t-1}^{(1)} \qquad (2)$$

$$S_t^{(2)} = \alpha X_t^{(1)} + (1-\alpha) S_{t-1}^{(2)} \qquad (3)$$

$$S_t^{(3)} = \alpha X_t^{(2)} + (1-\alpha) S_{t-1}^{(3)} \qquad (4)$$

针对样本容量为 10~20 组的时序数据建模，本研究建立了指数平滑算法的参数优化体系。在初始值计算环节，采用首两个观测周期的实测数据均值作为初始估计值，以提升模型收敛效率。平滑系数 α 作为核心参数，表征当前观测值与历史平滑值的权重分配关系：$\alpha \in$（0，1）区间内，其数值与近期数据敏感性呈正相关，α 值趋近于 1 时模型对近期数据敏感度增强，但抗干扰能力相应减弱。特别需要指出的是，当序列存在显著波动特征时，推荐选取 0.6-0.8 区间以增强模型响应速度；对于平稳型数据序列，则宜采用 0.1-0.5 区间以提升趋势跟踪稳定性。最终通过多参数对比试验，基于均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）指标进行模型验证，选取 RMSE 最小值对应的 α 参数作为最优解，该值越小表明模型拟合优度越高。

2 应用实例

2.1 工程概况

某基坑工程呈长方形布置，平面尺寸约 200m×180m，开挖深度介于 9.25~12.7m 之间。工程场区地质条件相对简单，自上而下依次分布：第四系人工

填土（Q_4^{ml}）、中更新统冰水堆积（Q_2^{fgl}）成因的黏土与粉质黏土互层，基底为白垩系上统灌口组（K_2g）泥岩。为保障深基坑施工及后期运营安全，项目建立自动化监测系统，沿基坑周边每侧均匀布设 3 个具有代表性的监测点，共计 12 个位移监测点位，重点对支护结构顶部位移实施动态观测。监测数据作为评价围护体系稳定性的关键量化指标，可通过时空演变规律精准反演基坑安全状态，为工程风险防控提供科学依据。

2.2 设定初始值与选择平滑系数

本研究以每半月采集一次的深基坑变形监测数据构建时间序列，通过 Excel 软件分析发现基坑变形量与时间变量之间呈现显著的非线性曲线关系。鉴于数据特征的时序非线性特性，研究采用二次曲线型三次平滑（无季节项）进行预测建模。其本质是抓取曲线趋势，没有季节项，仅需设置初始值 S_0 和平滑系数 α 值，采用全样本固定窗口拟合+向外多步直接预测的方式。当样本量介于 10~20 之间时，取前 2 期平均值作为初始值 S_0。同时为优化模型精度，针对各监测点数据分别采用不同的平滑系数 α 值进行参数寻优，以均方根误差（RMSE）为评价指标，辅以均方误差（MSE）和平均绝对误差（MAE）。当 RMSE 值最小时，模型的预测精度最优。通过系统化计算比对各监测点不同 α 值对应的 RMSE 结果，最终确定各监测点对应的最优 α 值，并将计算结果汇总于表 1 中。该分析方法通过参数自适应选择机制，有效提升了基坑变形预测模型的可靠性。

表 1　模型拟合指标汇总

测点	水平变形					竖向变形				
	S_0	α	RMSE	MSE	MAE	S_0	α	RMSE	MSE	MAE
JC01	0.6	0.2	1.558	2.428	1.186	0.55	0.5	0.466	0.217	0.343
JC02	0.9	0.4	1.453	2.11	1.169	0.75	0.4	0.576	0.332	0.442
JC03	1.3	0.2	1.38	1.905	1.089	0.35	0.7	0.442	0.195	0.372
JC04	2.1	0.1	1.873	3.509	1.502	0.4	0.7	0.499	0.249	0.38
JC05	1.45	0.4	1.489	2.217	1.292	0.9	0.4	0.801	0.641	0.599
JC06	1.35	0.2	1.079	1.165	0.895	0.4	0.4	0.732	0.535	0.518
JC07	1.15	0.2	1.697	2.881	1.286	0.9	0.5	0.755	0.57	0.562
JC08	0.65	0.6	1.273	1.621	1.18	0.55	0.5	0.588	0.345	0.459
JC09	1.55	0.4	1.432	2.05	1.199	0.45	0.5	0.61	0.372	0.541
JC10	0.7	0.2	1.841	3.391	1.633	0.55	0.5	0.543	0.294	0.422
JC11	1.2	0.3	1.56	2.434	1.282	1	0.4	0.808	0.652	0.534
JC12	1.1	0.2	1.404	1.972	1.114	0.7	0.3	0.627	0.393	0.438

基于三次指数平滑法的参数优化结果显示，最佳平滑系数 α 值集中分布于 0.1-0.5 区间，表明各监测点变形序列总体波动较缓，采用指数平滑法较为适宜。从模型适用性分析，竖向变形预测的均方根误差（RMSE）较水平变形更小，表明该模型对具有显著自相关特征的竖向变形数据捕捉能力更强。这种差异源于基坑工程中竖向变形主要受土体自重应力主导，而水平变形则对支护结构刚度退化、周边堆载变化等动态扰动因素表现出更高的敏感性。

2.3 模型预测及分析

利用预测模型对 12 个监测点的变形数据进行 6 期连续预测，竖向变形和水平变形分别有 72 个预测值，预测结果如图 2 和图 3 所示。本研究采用相对误差作为预测精度的评价指标，其定义为绝对误差（即实测值与预测值之差的绝对值）与实测值的比值。从图中可以看出，在竖向变形预测方面，72 个预测值与实测值的相对误差均控制在 20%以下，其中误差低于 10%的预测值占比达 80%以上，说明模型对竖向变形预测有较好的稳定性。然而水平变形的预测更容易受到其他因素的干扰，在所有的预测结果中，有 15 个数据点与实测值的相对误差超过 20%，占总数的 20.8%。其主要是因为施工扰动对水

平变形的影响更大，在基坑继续向下开挖的过程中临空面会更深，出现卸荷效应，从而可能引发冠梁结构开裂，如果不及时处理，雨水入渗进一步加剧了水平变形，因此水平变形量的大小更有波动性。

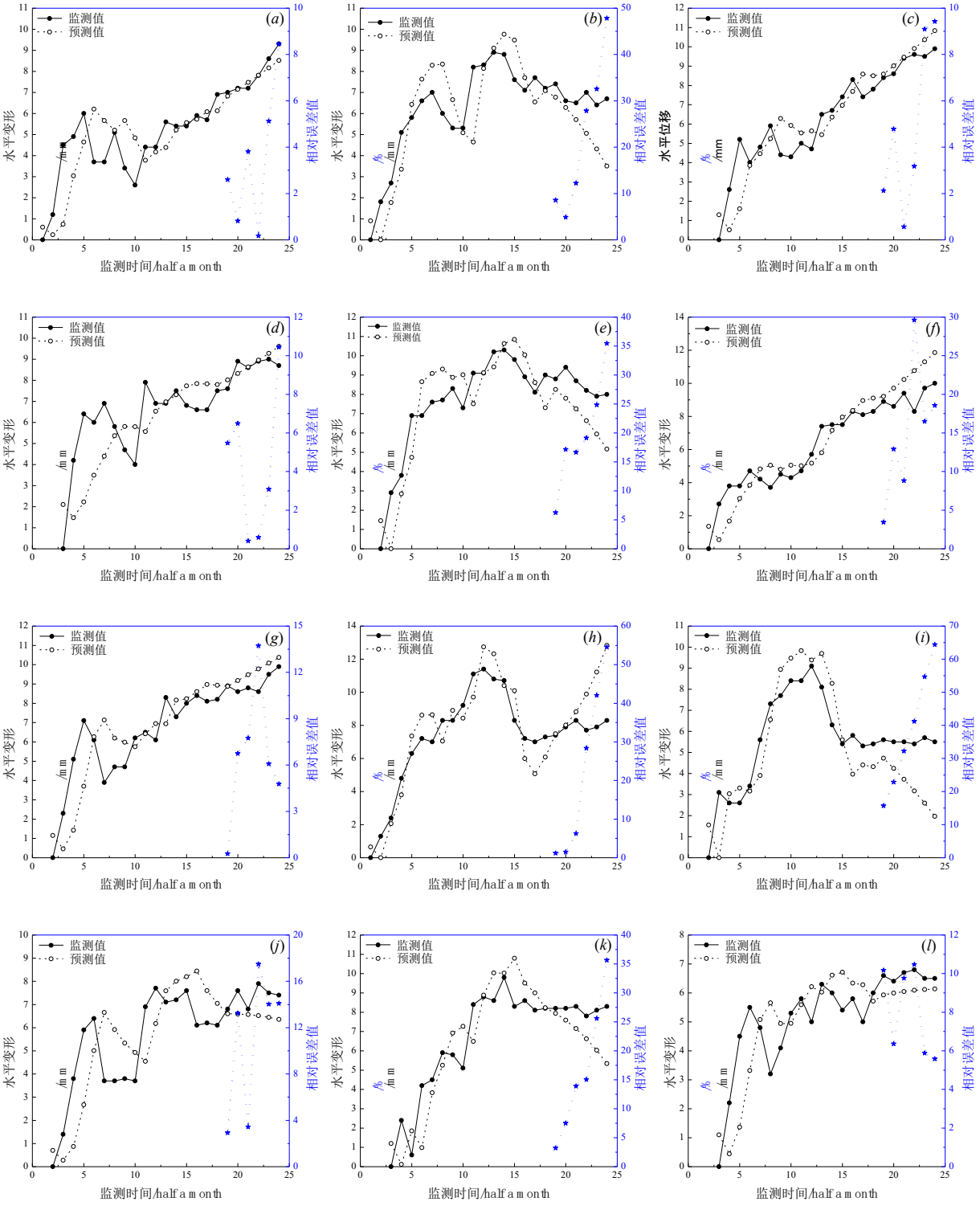

图 2　水平变形预测结果

注：图（*a*）~（*l*）代表监测点 JC01~JC12。

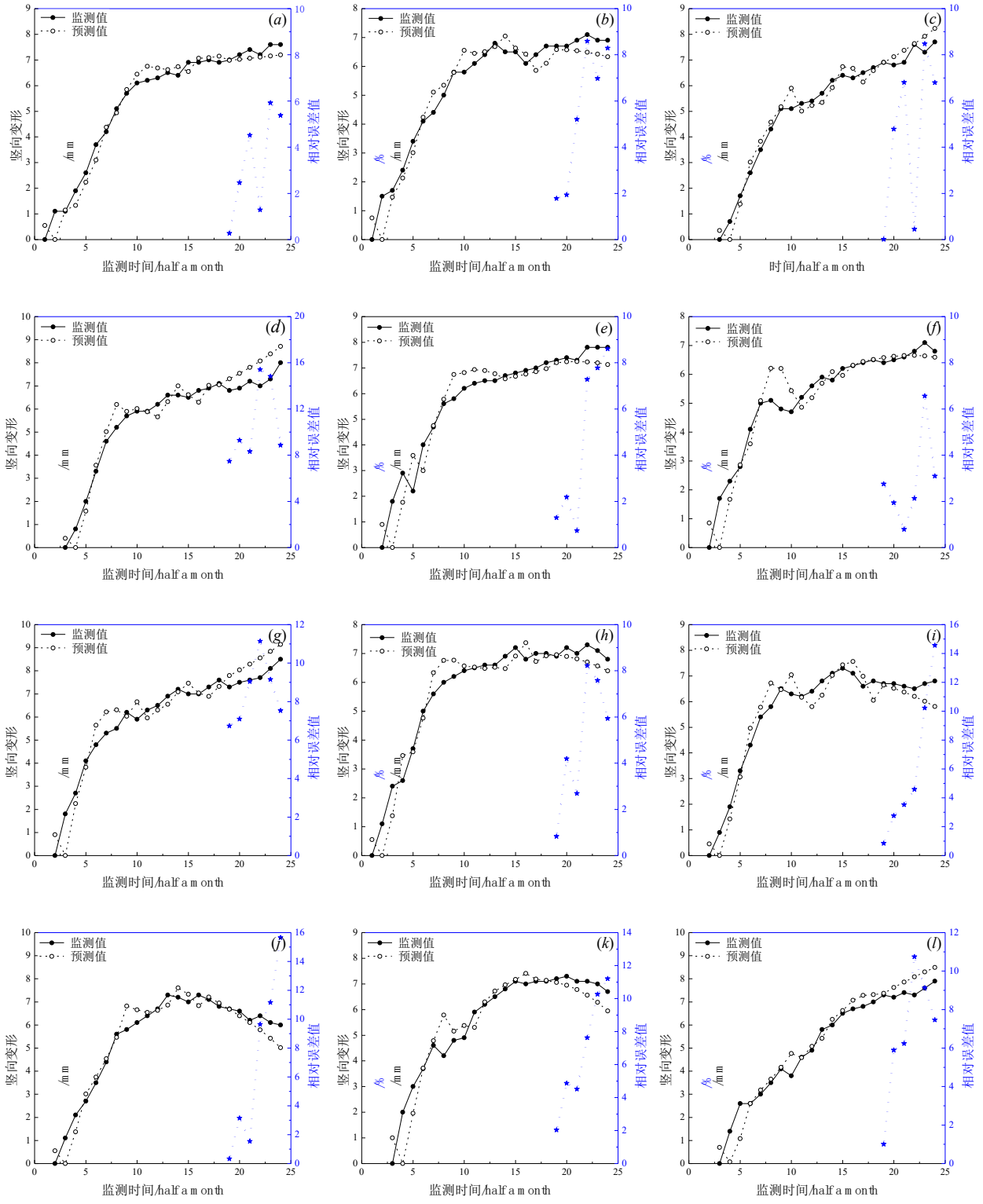

图 3 竖向变形预测结果

注：图（*a*）~（*l*）代表监测点 JC01~JC12。

在变形的时程特征方面，水平和竖向变形均呈现 3 个阶段的演化规律。在 5-8 个监测时间段内为初始快速形变阶段，其变形速率达到峰值，每个时间段增量超过 1.5mm，在第 10 个监测时间段左右为非线性衰减阶段，增速减缓至每阶段 0.8-1.2mm，而在 15-18 个监测时间段后为渐进稳定阶段，变形量逐渐收敛，总体变形过程符合快-慢-稳的三阶段非线性演化特征。这种非线性的发展过程与岩土体的应力重分布过程及蠕变效应有关。

3 结论

（1）最优平滑系数 α 值主要在 0.1-0.5 区间，表明各监测点变形序列总体波动较缓，采用指数平滑法较为适宜。但竖向变形预测结果的相对误差较水平变形有明显降低，从预测精度角度验证了三次指数平滑模型在竖向变形趋势外推中具有更高的适用性。

（2）水平与竖向变形时序特征均呈现出初始快速形变阶段、非线性衰减阶段以及渐进稳定阶段的快-慢-稳三阶段演化特征。

（3）基坑变形的非线性特征与岩土体应力动态调整及蠕变行为密切相关。预测曲线与实测数据在相位和幅值上均吻合良好，证实了该模型描述复杂非线性变形的可靠性。

参考文献

[1] TAO Y Q, ZENG S X, YING T T, et al. A deep transfer learning model for the deformation of braced excavations with limited monitoring data[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(3): 1555-1568.

[2] FAN H Y, LI L P, ZHOU S, et al. Prediction and risk assessment of lateral collapse in deep foundation pits using machine learning[J]. Automation in Construction, 2025, 171: 106011.

[3] 向冲. 软土地区深基坑施工对临近建筑物的影响及应对之策[J]. 建筑结构, 2023, 53(8): 182.

[4] 兰韡, 王卫东, 常林越. 超大规模深基坑工程现场抽水试验及土层变形规律研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2898-2910.

[5] HU B, LI W, LU W F, et al. Integrating InSAR data and LE-Transformer for foundation pit deformation prediction[J]. Remote Sensing, 2025, 17(6): 1106.

[6] HAO H M, SHUAI Y, ZHENG Z Z, et al. Application of soil parameter inversion method based on BP neural network in foundation pit deformation prediction[J]. Applied Geophysics, 2023, 20(3): 299-309.

[7] LI H L, ZHAO Z Z, DU X. Research and application of deformation prediction model for deep foundation pit based on LSTM[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 9407999.

[8] 刘彦伟, 彭洁, 任连伟, 等. 基于 CEEMDAN-SSA-ELM-LSTM 模型的地铁车站深基坑支护桩水平变形预测[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(1): 34-46.

[9] SMYL S, BERGMEIR C, DOKUMENTOV A, et al. Local and global trend Bayesian exponential smoothing models[J]. International Journal of Forecasting, 2025, 41(1): 111-127.

[10] NSABIMANA A, WU J H, WU J T, et al. Forecasting groundwater quality using automatic exponential smoothing model (AESM) in Xianyang City, China[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2023, 29(2): 347-368.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
OPEN ACCESS