

基于数字孪生的深基坑变形控制技术与应用

李森¹ 李明煜¹ 徐梦强¹ 韩磊¹ 邹佳旺²

1. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300000

2. 大连海事大学交通运输系, 辽宁 大连 116026

[摘要]随着城市地下空间开发的加速, 深基坑工程面临复杂地质条件与高安全风险挑战。传统监测方法依赖静态数据, 难以实现动态预测与实时控制。文中提出一种基于数字孪生技术的深基坑变形智能控制方法, 通过整合 BIM 模型、CNN-LSTM 复合神经网络与多源监测数据, 构建“感知-预测-调控”闭环控制体系。数字孪生平台实时融合传感器数据(地表沉降、地连墙位移、钢支撑轴力)与地质环境信息, 利用 Adam 优化算法训练的 CNN-LSTM 模型预测钢支撑轴力变化趋势, 并通过控制模块动态调整支撑力, 实现对变形的超前干预。实例表明, 预测误差低于 3%, 结合 BIM 可视化界面, 施工人员可实时监控变形状态并优化调控策略, 显著提升基坑安全性与施工效率。

[关键词]数字孪生; 深基坑变形控制; CNN-LSTM; BIM 技术

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16624

中图分类号: U44

文献标识码: A

Deformation Control Technology and Application of Deep Foundation Pit Based on Digital Twin

LI Sen¹, LI Mingyu¹, XU Mengqiang¹, HAN Lei¹, ZOU Jiawang²

1. China Railway Construction Bridge Engineering Group Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

2. Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

Abstract: With the acceleration of urban underground space development, deep foundation pit engineering is facing challenges of complex geological conditions and high safety risks. Traditional monitoring methods rely on static data, making it difficult to achieve dynamic prediction and real-time control. The article proposes an intelligent control method for deep excavation deformation based on digital twin technology, which integrates BIM models, CNN-LSTM composite neural networks, and multi-source monitoring data to construct a "perception prediction regulation" closed-loop control system. The digital twin platform integrates real-time sensor data (surface subsidence, diaphragm wall displacement, steel support axial force) with geological environment information. The CNN-LSTM model trained using Adam optimization algorithm predicts the trend of steel support axial force changes, and dynamically adjusts the support force through the control module to achieve advanced intervention in deformation. The example shows that the prediction error is less than 3%. Combined with the BIM visualization interface, construction personnel can monitor the deformation status in real time and optimize the control strategy, significantly improving the safety and construction efficiency of the foundation pit.

Keywords: digital twin; deformation control of deep foundation pit; CNN-LSTM; BIM technology

引言

深基坑变形控制是确保基坑周围土体稳定, 防止地面沉降、周围建筑物受损等重大事故的关键技术。在基坑施工过程中, 基坑壁、底板等结构会随着土体的变化、地下水的变化以及施工过程的影响发生变形, 尤其是深基坑工程中, 随着深度的增加, 变形问题愈加严重。因此, 基坑的实时变形监测、分析与控制就显得尤为重要。深基坑变形控制通常需要使用一系列监测设备、计算模型和控制手段, 确保基坑在施工过程中的安全稳定。然而, 传统监测方法(如沉降仪、测斜仪)依赖单点静态数据, 缺乏对时空动态变化的捕捉能力; 传统被动式钢支撑系统也因轴力固定难以适应动态荷载变化, 易导致支护刚度不足或应力集中问题。此外, 传统数值模拟(如有限元分析)受限于模型假设, 难以适应复杂地质条件的动态变化。

近年来, BIM 与数字孪生技术的融合为深基坑智能

化管控提供了突破方向。数字孪生通过集成多源数据(设计、施工、监测)构建三维动态模型, 实现工程全生命周期的可视化与协同管理。姚湘静^[1]开发的 BIM 孪生仿真云平台, 可自动生成监测数据分析曲线, 显著提升信息处理效率; 盛灿军^[2]提出的“BIM+GIS+IoT”协同平台进一步强化了多维度数据融合能力。与此同时, 钢支撑伺服控制系统通过实时监测-反馈-调整机制(黄祖超^[3]、张灵熙等^[4]), 显著提升了围护结构变形的主动抑制效果; 深度学习技术(如 LSTM、粒子群优化神经网络^[5])也为变形时序预测提供了新方法。

然而, 现有研究仍存在局限性: 首先, BIM 与伺服系统的数据交互不足, 数字孪生体未能充分整合实时力学响应; 其次, 单一预测模型(如 LSTM)难以同步提取时空特征, 与伺服控制缺乏闭环联动; 再次, 多源异构数据(地质、结构、环境)的融合度与决策实时性亟待提升。

因此，构建“感知-预测-调控”一体化的智能控制框架，已成为深基坑变形控制的研究方向。

1 工程概况

1.1 车站概况

本文研究采用宁波某地铁车站为研究对象，车站为地下三层 13m 岛式站台车站，车站起止里程为 CK14+866.500~CK15+025.500，车站总长 159m，地下一层为车站站厅层，地下二层为设备层，地下三层为车站站台层，底板埋深 29.21~30.81mm，覆土约 3.2m。

车站标准段主体结构净宽度为 20.3m，底板埋深为 29.21m，采用地下三层双柱三跨钢筋混凝土框架结构；围护结构采用 1200mm 厚连续墙加内支撑体系（第一、六道支撑为钢筋混凝土支撑，其余支撑为钢管支撑，共八道支撑+一道换撑）。

1.2 工程地质情况

本车站基坑开挖及围护范围上部土层由淤泥质土及软黏性土组成，而中下部为性质较好的厚层黏土层及其它土层，上部淤泥质土在动力作用下土体强度极易降低，发生塌滑，而下部土层开挖后稳定性较好，造成上下土层侧向变形差异较大。当土体原有应力状态发生变化后，墙后土体势必向基坑方向发生位移，而且变形历时较长。为控制基坑围护体及墙后土体发生过大的水平及垂直向位移，在确保围护体强度、足够的入土深度的同时，采取设置多道内支撑措施进行预防。采用钢支撑时，采取多次施加预应力，来减少水平位移。

2 数字孪生平台的搭建

数字孪生平台由以下模块组成：数据采集模块、BIM 交互模块、预测模块、控制模块。基坑变形控制系统通过数据采集模块获取深基坑的监测时序数据，实现对基坑变形的实时动态监控与全面预测，通过构建深基坑变形控制数字孪生平台，构建基于 Adam 优化算法的 CNN-LSTM 复合神经网络实现对深基坑变形的动态预测，根据动态预测结果对钢支撑轴力进行实时调整，来控制深基坑的变形；通过基坑 BIM 模块构建深基坑变形的深基坑 BIM 模型，通过 Revit API 数据接口与深基坑 BIM 模型实时交互，以实现深基坑变形的可视化。

2.1 数据采集模块

数据采集模块设置有自动化采集箱、盒式固定测斜仪、钢支撑轴力计以及静力水准仪。将静力水准仪布设在基坑周边监测基坑周边地表沉降，盒式固定测斜仪安装在基坑地连墙上监测地连墙的水平位移，钢支撑轴力计安装在钢支撑的一端来监测钢支撑轴力，安装好传感器后将这些传感器连接在自动化采集箱中，通过采集程序采集到的数据保存到数据库，数据库连接到数字孪生平台。

采集并获取深基坑的监测时序数据，将采集到的深基坑的监测时序数据保存到预设的 SQL server 数据库中，通过深基坑变形控制数字孪生平台的数据输入模块调用

SQL server 数据库中的监测时序数据，且通过深基坑变形控制数字孪生平台能够进行数据和图表的展示，能够进行监测数据的增、删、查、改等操作。

2.2 BIM 交互模块

BIM 交互模块的模型部分主要包含钢支撑伺服模型、深基坑模型以及各种传感器模型，其中钢支撑伺服中主要包括钢支撑模型和伺服加载模型。深基坑模型中主要的模型为地连墙模型，传感器模型中主要包含静力水准仪模型、钢支撑轴力计模型和盒式测斜仪模型。相关模型建立后导入到数字孪生平台上。相关传感器安装在地连墙模型如图 1 所示，整体维护结构模型如图 2 所示。用户可以点选相关传感器模型，通过 Revit API 数据接口连接到数据库，可以查看到相关的监测数据。

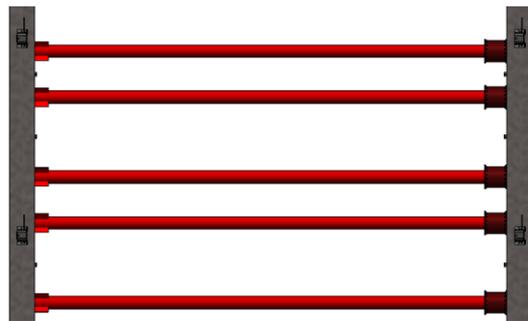


图 1 传感器布置俯视图

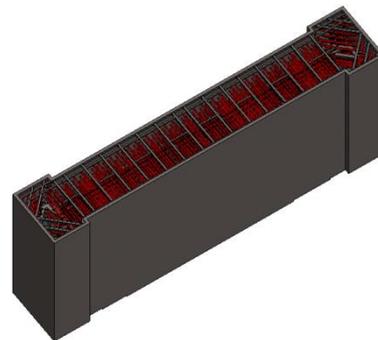


图 2 围护结构三维模型

2.3 预测模块与控制模块

预测模块主要原理基于 Adam 的 CNN-LSTM 复合神经网络来进行预测。单一的 LSTM（长短时记忆网络）神经网络在长序列数据上训练时容易出现梯度消失或爆炸，导致收敛速度慢，通过将 CNN（卷积神经网络）与 LSTM 结合，能够有效提取空间特征，减少 LSTM 层的负担，从而使模型在处理长时序数据时的收敛更快、稳定性更强。尽管如此，这种组合模型仍存在一定的局限性，为了解决此问题，进一步引入 Adam 优化算法，使模型表现更优。

Adam 优化算法通过自适应学习率机制，能够根据不同层的参数变化动态调整学习率，加快收敛速度，避免了单一 CNN-LSTM 模型中因固定学习率导致的训练缓慢或陷入局部最优的情况。此外，由于深基坑变形预测数据复

杂且带有时空特征,传统深度模型在复杂环境下容易出现梯度震荡或不稳定,通过引入 Adam 优化算法的动量机制能够平滑网络参数更新,减少 CNN 与 LSTM 层的梯度震荡,提高模型的整体稳定性。在处理长时间序列数据时,Adam 结合一阶矩与二阶矩,能够有效缓解梯度消失或爆炸问题,使 CNN-LSTM 复合神经网络在面对复杂、多维的时空数据时更加精准。

在数字孪生平台集成控制模块,预测模块的预测结果上传至数字孪生平台后,点击控制模块可以进行钢支撑轴力的控制,在控制模块预设钢支撑轴力阈值,在施加钢支撑伺服系统的钢支撑处可以自动根据所设阈值进行轴力变化,若预测结果大于预设钢支撑轴力阈值时,则通过钢支撑轴力伺服系统卸载对深基坑的钢支撑轴力;若预测结果小于预设钢支撑轴力阈值时,则通过钢支撑轴力伺服系统加载对深基坑的钢支撑轴力;

若预测结果等于预设钢支撑轴力阈值时,则通过钢支撑轴力伺服系统保持对深基坑的钢支撑轴力。

在未施加钢支撑伺服系统的钢支撑处,可以通过比较预测结果与所设阈值的大小,人工地提前进行钢支撑轴力的调整,进行一个超前调整,保证基坑稳定性。数字孪生平台搭建完毕后嵌入 Revit 软件中,数字孪生平台功能图见图 3。

3 基坑变形控制应用

根据所搭建的数字孪生平台进行工程应用,首先根据工程设计信息通过 Revit 建立围护结构 BIM 模型并导入数字孪生平台,在围护结构模型上按现场监测布置点定位静力水准仪(监测地表沉降)、盒式固定测斜仪(监测地连墙位移)和钢支撑轴力计(监测轴力)的传感器模型,同步在 SQL Server 数据库中创建包含时间戳、设备 ID 和监测值的时序数据表并与平台实时连接;将采集的监测时序数据经去噪后,通过基于 Adam 优化的 CNN-LSTM 复合神经网络输出钢支撑轴力预测值;根据预设轴力阈值与预测结果对比,在部署伺服系统的区域通过数控泵站驱动液压千斤顶自动调整轴力,未部署区域则通过 BIM 模型红/橙/黄三色预警提示人工干预,最终通过 Revit API 将轴力调整数据与基坑变形状态实时映射至 BIM 模型。

将该平台用于现场第二道某处钢支撑的施工监测,通过该平台获取深基坑监测点的监测时序数据。选择从 2023 年 3 月 12 日至 2023 年 5 月 31 日每天的地表沉降监测点 SD9-2、SD10-2 的监测数据,地连墙水平位移监测点 CX09、CX10 的监测数据,钢支撑轴力监测点 Zg1-2

的监测数据,共计 5 组数据,每组有 81 个数据。将收集到的原始数据去除噪声处理,将预处理后的数据整合为多变量时间序列,选择钢支撑轴力作为预测目标,将其设置为因变量,其他变量包含各监测点的监测数据 4 个变量作为自变量。选择多变量时间序列前 70 个数据作为输入,输出后 11 个数据,得到的数据图见图 4。

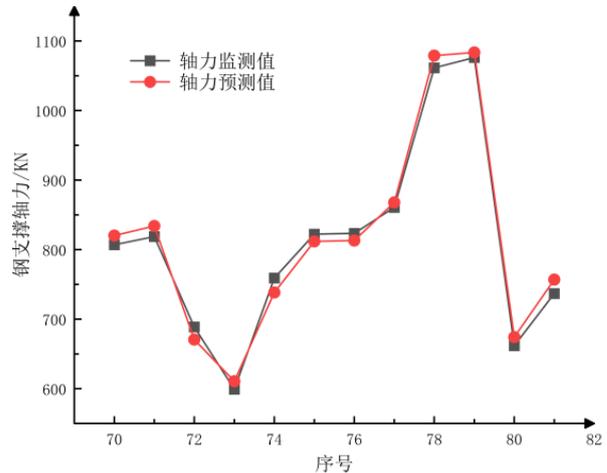


图 4 钢支撑轴力预测结果对比图

具体的预测结果如图 4 所示,由图 4 中数据可知,预测最大误差为 2.82%,预测误差相对较小。

在基于数字孪生的深基坑变形控制技术中,当预测模块通过 Adam 优化的 CNN-LSTM 复合神经网络判定地表沉降或轴力超出阈值时,系统将进行动态调控。以宁波地铁车站工程为例,若 SD9-2 监测点沉降预测值达 32.1mm (阈值 30mm),数字孪生平台通过 Revit API 接口同步更新 BIM 模型,高亮显示风险区域并给出施工建议,可以根据施工建议进行以下动态调控:

(1) 伺服系统智能补偿:在沉降超标区域(如 SD9-2)自动启动钢支撑轴力梯度加载,通过数控泵站驱动液压千斤顶动态平衡土压力,将轴力波动控制在 $\pm 3\%$ 阈值内。

(2) 土体主动加固:结合 BIM 模型定位淤泥质土层渗水点,联动高压旋喷桩设备进行智能注浆,使软黏土层抗剪强度提升。

(3) 施工紧急干预:暂停当前开挖层,优先施工底板利用结构刚度约束位移,同时在 12 小时内加密布设临时钢支撑,并通过轴力计实时监控预应力损失。调控完成后,平台通过 Adam 优化算法迭代更新 CNN-LSTM 参数,并二次验证沉降速率。



图 3 数据孪生平台功能图

4 结论

本文提出了一种基于数字孪生的深基坑变形控制技术方法,通过融合物联网监测、深度学习算法与 BIM 技术,实现了深基坑施工过程中变形预测与控制。通过具体实例表明,该方法在工程实践中具有显著的技术优势与应用价值,具体体现在以下方面:

(1) 数字孪生平台通过构建 CNN-LSTM 复合神经网络,有效解决了传统模型在时空特征提取与长时序预测中的局限性。卷积神经网络(CNN)提取基坑地表沉降与地连墙位移的局部时空特征,长短期记忆网络(LSTM)捕捉时序依赖关系,结合 Adam 优化算法使模型在宁波地铁工程案例中预测误差降低至 2.82%,显著优于传统经验方法。

(2) 数字孪生平台通过静力水准仪、盒式固定测斜仪及钢支撑轴力计组成的传感器网络,实现了基坑变形数据的实时采集与预处理。数字孪生平台基于预测结果动态调整钢支撑轴力将轴力波动范围控制在预设阈值内,通过预测结果,提前变化钢支撑轴力或进行人工干预,对深基坑变形进行超前预测,提前对深基坑变形进行控制,有效避免了基坑坍塌风险。

(3) 数字孪生平台结合 BIM 模型,实现了深基坑变

形控制的可视化, BIM 模型通过 Revit API 接口实时映射变形数据与控制指令,支持用户通过交互界面快速定位风险点,提升施工决策效率,满足设计施工要求,为施工过程提供了可视化的效果。

[参考文献]

- [1]姚湘静.基于建筑信息模型的地铁车站深基坑工程孪生仿真云平台的研发与应用[J].城市轨道交通研究,2023,26(11):176-180.
- [2]盛灿军.基于“BIM+GIS+IoT”信息管理平台的钢支撑轴力伺服系统在地铁基坑变形控制中的应用[J].城市轨道交通研究,2022,25(6):221-224.
- [3]黄祖超.轴力伺服系统在软土明挖基坑中的变形控制[J].山西建筑,2020,46(9):71-72.
- [4]张灵熙,张雯超,颜静,等.软土地区地铁车站深基坑变形伺服控制分析[J].施工技术(中英文),2023,52(17):55-60.
- [5]刘贺,张弘强,刘斌.基于粒子群优化神经网络算法的深基坑变形预测方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(5):1609-1614.

作者简介:李森(1989.2—),性别,男,民族汉,籍贯:辽宁省沈阳市,学历大学本科,研究方向:地下工程。