

引用格式 陈宏达,李欣,俞财照,等. 基于物联网技术的三大建筑超大基坑安全监测孪生系统[J]. 工业建筑,2024,54(5):1-8. CHEN H D, LI X, YU C Z, et al. Safety Monitoring Twin System for Three Major Building Super-large Excavation Pits Based on Internet of Things Technology[J]. Industrial Construction, 2024, 54(5): 1-8 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG23111319

编者按:智能建造技术正以前所未有的速度推动建筑行业迈向高效、精准、绿色的新时代。通过集成人工智能、大数据、BIM 技术、物联网等前沿科技,智能建造技术不仅极大地提升了建筑行业的效率和质量,还为大型地下空间项目的精益建造、安全监测和绿色施工提供了新的解决方案。为此,本刊特组织了四篇大型公共建筑智能建造技术的研究文章,深入探讨了智能建造技术的最新应用和发展趋势,提出了基于多源多维数据的数字化交付方法、BIM 与本体技术的精益建造框架、基于物联网的安全监测孪生系统,以及低碳目标的施工方案智能优化方法。这些创新方法不仅丰富了智能建造技术的理论体系,也通过实践验证了其可行性和有效性,为建筑行业的可持续发展提供了有力支撑,展现了智能建造技术的巨大潜力和广阔前景。

基于物联网技术的三大建筑超大基坑安全监测孪生系统^{*}

陈宏达¹ 李欣¹ 俞财照¹ 何猛² 刘占省² 佟丽¹

(1. 上海宝冶集团有限公司, 上海 201900; 2. 北京工业大学, 北京 100124)

摘要 随着经济蓬勃发展与城市化快速推进,超大基坑工程的规模与数量激增,然而,超大地地下空间结构施工面临着地下环境复杂、致险因素众多等挑战,其安全问题日渐显著。针对超大地地下空间结构施工过程中面临的复杂问题,通过引入物联网技术和数字孪生理念,提出了一个适用于超大地地下空间结构施工的智能安全监测孪生系统,同时探究了物联网和数字孪生的融合机理。该孪生系统利用 BIM 技术建立对应的物理施工模型,并通过物联网技术实时采集多源异构监测数据实现虚拟施工模型与物理施工模型的信息交互,借助孪生系统对多源异构数据进行实时安全分析,得到结构的安全状态并反馈在应用服务层中,通过实例项目验证了孪生系统在超大基坑施工中的有效性和实用性。

关键词 超大基坑;数字孪生;物联网技术;安全监测

Safety Monitoring Twin System for Three Major Building Super-Large Excavation Pits Based on Internet of Things Technology

CHEN Hongda¹ LI Xin¹ YU Caizhao¹ HE Meng² LIU Zhansheng² TONG Li¹

(1. Shanghai Baoye Group Corp., Ltd., Shanghai 201900, China; 2. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: With the rapid development of economy and urbanization, the scale and number of super-large excavation pit projects have surged. However, the construction of super-large underground space structure is faced with challenges such as complex underground environment and many risk factors, and its safety problems are becoming more and more obvious. Aiming at the complex problems faced in the construction process of ultra-large underground space structure, the paper proposed an intelligent safety monitoring system suitable for the construction of ultra-large underground space structure by introducing the Internet of Things technology and the concept of digital twin, and explored the integration mechanism of Internet of Things and digital twin. BIM technology was applied in the twin to establish the corresponding physical construction model, and multi-source heterogeneous monitoring data was collected in real time through the Internet of Things technology to realize the information interaction between the virtual construction model and the physical construction model. The real-time safety analysis of multi-source heterogeneous data was carried out with the help of the twin system, and the safety status of the structure was obtained and fed back to the application service layer. The effectiveness and practicability of the twin system in the construction of super-large excavation pits were verified by an example project.

Keywords: super-large excavation pit; digital twin; Internet of Things (IoT) technology; safety monitoring

^{*} 北京市科技计划项目(Z211100004321010)。

第一作者:陈宏达,高级工程师,主要从事施工管理与成本控制工作,bj082b@126.com。

通信作者:刘占省,博士,教授,主要从事智能建造及数字孪生方法研究,lzs4216@163.com。

收稿日期:2023-11-13

0 引言

随着现代城市化进程的加快,大型建筑和地下空间工程的需求不断攀升,从而也推动了大型基坑工程数量和规模的持续增长。然而,由于基坑通常处于地下,且施工工期长、施工难度大、影响因素复杂多变,导致基坑工程施工风险相对较高^[1-2]。因此,基坑安全监测是确保基坑工程施工安全和保证基坑结构稳定的重要手段之一。

传统的基坑监测依赖人工定期通过仪器到现场进行测量,不仅工作量大,而且易受到天气、场地等外部因素的影响。随着电子技术和计算机技术的不断发展,越来越多的新型技术被应用于基坑监测中^[3-4],这些技术的应用可以对基坑周边环境、土体变形、位移、水位等参数进行采集和监测,从而实现对基坑安全状态的全面监测。

徐志春等^[5]设计了一种基于振弦式传感器的基坑自动化监测系统,能够实时监测深基坑施工的全过程和结构安全的预警。张阳等^[6]研制了一种基于物联网和 WebGIS 的基坑监测系统,通过传感器、数据采集器、数据传输设备和信息管理模块组成无线监测系统,能够实现基坑水平位移、沉降等监测指标的在线监测和预警。Hashash 等^[7]在城市地下空间挖掘过程中通过传感器捕获基坑的水平位移、沉降等参数,实现对施工过程地面变形的实时监测。此外,基于微波、激光、无人机等监测技术也逐渐应用于基坑监测领域^[8],通过对基坑周边土体的三维扫描和高精度测量能够更加精准地反映基坑的变形情况。韩达光等^[9]介绍了一种利用 BIM(建筑信息模型)和三维激光扫描技术进行基坑变形监测的方法,并以某大型基坑为例验证了该方法可以高效、精准地监测基坑的三维整体变形。在挖掘引起的地表沉降预测方面, Lee 等^[10]基于长短期记忆网络提出了用于捕获挖掘引起的地表沉降特征并预测沉降的两个模型,提出的深度学习模型能够准确地预测训练集和测试集的沉降。Li 等^[11]则介绍了一种基于多点测量技术改进的支持向量机算法,用于监测和预测深基坑的变形。这些研究为挖掘工程引起的地面变形监测和预测提供了有效的技术支持。

国内外研究人员从不同的角度和方面对基坑安全监测问题进行了研究,然而,目前将各类监测数据整合形成集中化、统一化的系统仍在发展阶段,为此提出一种基于物联网的超大基坑安全监测孪生系统,实现多维多源数据的集中化处理和地下空间施

工的孪生同步,在应用层给决策者提供基坑的安全状态,使其可以根据这些信息及时采取相应的措施来保障基坑施工时人员安全。

1 数字孪生系统框架建立

在超大地地下空间结构的施工过程中,由于空间规模庞大,导致存在结构复杂、扰动强烈、地质环境多变、致险因素众多、风险防控困难等问题^[12-13],无法满足高精度、实时性的安全分析要求。针对超大地地下空间结构施工问题复杂的特点,引入数字孪生理念,结合物联网技术,开发一个能够满足工程实际需求的孪生系统架构,提高结构施工安全监测的智能化水平,保证地下空间结构施工时处于安全状态。

1.1 大型基坑的施工安全风险

施工安全风险数据是驱动数字孪生框架的基础,因此通过住房和城乡建设部等官方网站发布的基坑安全事故报告、文献调研、专家访谈等方式收集大型基坑施工风险相关资料并构建指标体系,收集到 108 例大型基坑工程施工安全风险,按施工风险类型可分为工程自身风险、水文地质风险和周边环境风险三大类^[14-18],如图 1 所示。其中工程自身风险包括围护结构失稳、支撑体系失稳、坑底变形破坏和整体失稳破坏,占总数的 56.5%;水文地质风险包括土体滑塌和涌水涌砂,占总数的 22.2%;周边环境风险包括建(构)筑物破坏和地下管线破坏,占总数的 21.3%。

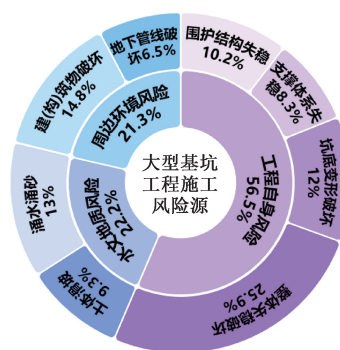


图 1 大型基坑工程施工风险源

Fig. 1 Large excavation pit construction risk sources

1.2 数字孪生系统框架

为满足大型地下空间的高精度、实时性施工安全监测的要求,考虑时间、空间多个维度的因素,将数字孪生理念融入地下结构工程施工安全监测的系统中并构建数字孪生五维模型,如图 2

所示。该模型由物理施工现场、虚拟施工模型、孪生数据平台、安全监测应用服务和各部分之间的连接构成。其中物理施工现场表示真实世界中地下空间结构施工所包含的物理要素以及各要素之间的交互关系,例如大型基坑结构、动态变化的作业现场、环境条件等,借助物联网等技术将物理施工现场中的多源异构数据实时传输到虚拟施工模型中。虚拟施工模型则是驱动孪生模型的载体,根据物理空间提供的实时信息和数据在虚拟空间中建立相应的孪生模型,同时根据物理空间的多源异构数

据对虚拟模型进行动态更新。孪生数据平台集成了物理空间和虚拟空间的数据,保障数据传输的实时性。安全监测应用服务根据实际需求对孪生模型的数据进行分析并在平台进行可视化展示。通过传感器、传输协议、网络服务协议等实现数据的实时采集与交互。在地下空间结构施工过程中,通过数字孪生技术实现物理空间和虚拟空间的信息实时交互,并在虚拟空间中映射物理实体在现实环境中的行为变化^[19],借助对孪生数据的信息挖掘从而实现施工过程的动态监测。

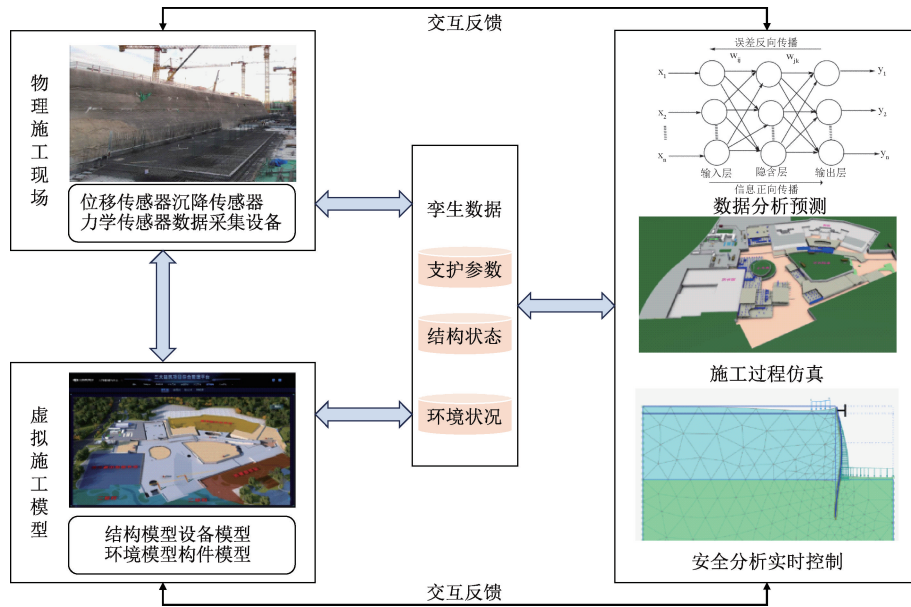


图2 超大基坑安全监测孪生系统框架

Fig. 2 The framework of twin system for safety monitoring of super-large excavation pits

超大基坑施工安全监测最重要的是对关键安全风险因素的数据获取,通过对大型基坑工程施工安全风险源的梳理可知,施工过程中采集的信息主要分为工程自身风险 O 、水文地质风险 H 、周边环境风险 D 和施工人员管理 P_i ,由此建立的孪生模型框架可以真实映射出施工的安全状态。在施工过程中,造成基坑施工安全问题的原因是多方面且互相耦合的,综合多方面的影响因素作用,重点考虑地下空间结构的施工安全关系密切的围护结构 E 、支撑体系 S_1 、坑底变形 F 、整体失稳 G 、土体滑坡 S_2 、涌水涌砂 W 、邻近建(构)筑物破坏 A 和邻近地下管线破坏 P 。根据对施工安全分析需要采集的信息,将孪生信息分为三类,分别由式(1)~式(3)表示。

$$O = \{E, S_1, F, G\} \quad (1)$$

$$H = \{S_2, W\} \quad (2)$$

$$D = \{A, P\} \quad (3)$$

对于各个施工风险要素建立与实体相对应的BIM模型、有限元模型,并将虚拟模型上传至孪生系统平台中进行可视化展示。根据规范要求、工程经验,对每个关键的风险要素设立管理标准,建立孪生系统的智能辅助决策模块,保证在施工全过程安全监测的科学性。该框架中物理施工实体与虚拟仿真模型通过物联网技术实现虚实交互,借助实时的多因素数据采集并传输至云平台进行云计算,通过智能算法对历史积累数据进行分析挖掘及预测,得到结构的安全状态,并将该信息反馈在应用服务层中,实现施工过程的自动决策和自我调度。

2 物联网技术融合

地下空间施工过程安全监测孪生系统框架为施工过程安全管理提供了理论框架的基础。为实现地下空间结构施工过程的自动决策和自我调度,最首要的就是数据的采集,物联网技术作为数据之眼,能够实时采集提供孪生所需的大量监测数据,研究得出物联网技术与孪生系统的融合机理,从而得出基于物联网技术的超大基坑安全监测孪生系统。

2.1 物联网技术与数字孪生系统的融合机理

物联网 (IoT) 是指用传感设备,如射频识别技术、全球定位系统等信息传感设备,在互联网技术的基础上,将物质本身与虚拟信息数据沟通连接起来,实现对物品的智能化识别、定位追踪,达到信息化和远程监控管理的技术方法^[20]。

物联网具有配置方便快捷、安全性和稳定性高等特点^[21],并且拥有简单易行的操作界面。然而,结构的施工过程是一项复杂的任务。一方面,结构本身会随着时间的推移而不断变化;另一方面,施工环境也常常复杂多变。为了解决这些特殊情况,利用物联网技术对结构的施工监测进行更适合和有效的传输,以此监测结构在施工期间的状态变化,并将其作为施工程序的控制信息,确保施工的安全进行^[22-23]。

数字孪生技术的原理是通过数据采集、虚拟建模、实时监测与反馈、仿真与优化、控制与决策以及状态诊断与维护等关键步骤相互作用,实现对物理实体的模拟、监测和优化^[24-25]。通过传感器和监测设备采集物理实体的数据,并将其与数字孪生模型进行同步,确保模型与实际实体的状态保持一致。再基于采集到的数据,构建物理实体的虚拟模型,包括结构、属性和行为规则等详细信息。通过与实时数据同步,实时监测物理实体的状态、性能和行为,并提供实时反馈信号,用于控制和调整实体的运行。利用数字孪生模型进行仿真和优化分析,预测结构的性能和状态,并提供优化建议和决策支持。最后,基于数字孪生模型和实时数据进行状态诊断,识别结构的安全风险原因,并提供相应的维护建议和策略。

从物联网技术和孪生系统的原理总结可以得到两者的共性,所以在孪生系统框架的基础上,融合物联网技术,探寻出以下 5 点融合机理,并给出机理融合框架,如图 3 所示。

1) 物联网技术通过连接与传输设备和传感器

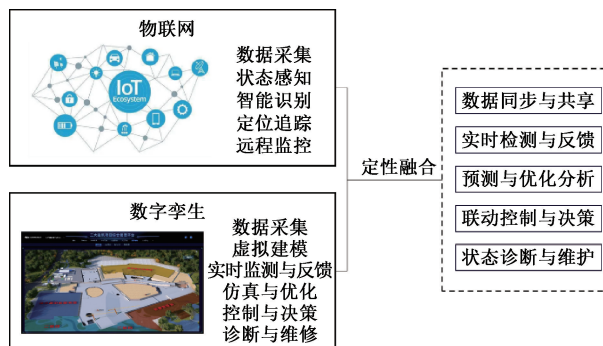


图3 物联网与数字孪生融合机理

Fig. 3 Integration mechanism of Internet of Things and digital twin

间的数,实现实时数据的采集和共享,这些数据可以用于更新和维护孪生系统的模型,保持模型与实际物理世界的同步。

2) 物联网技术能够实时监测物理世界中的各种参数和状态,包括设备运行状态、环境条件、能源消耗等。通过与孪生系统的结合,可以将实时监测数据与孪生模型进行比对和分析,发现异常情况并提供实时反馈。这种实时监测和反馈机制有助于准确了解物理系统的运行状态,并及时做出调整和优化。

3) 物联网技术产生的大量数据可以用于孪生系统的预测和优化分析。通过孪生系统对历史数据和实时监测数据的分析,可以预测物理系统的未来行为和性能,并进行优化建议。这种预测和优化分析可以用于设备维护、资源利用优化、能源效率提升等方面,实现更高效和可持续的运营。

4) 物联网技术与孪生系统的融合可以实现联动控制和智能决策支持。通过物联网技术采集到的实时数据,孪生系统可以生成与物理系统相匹配的虚拟模型,并进行模拟和分析。基于孪生模型的分析结果,可以实现对物理系统的远程控制和操作,并为决策制定者提供智能化的决策支持,以优化运营和管理。

5) 物联网技术的实时监测和孪生系统的建模分析相结合,可以实现对物理系统的状态诊断和维护支持。通过监测数据和模型分析,可以准确识别结构的安全状态,并提供相应的维护建议和方案。这有助于提高结构的可靠性和维护效率,降低事故对施工的影响。

2.2 融合机理数学模型建立

经过对物联网技术基本原理的分析,结合数字孪生技术的特点,探寻得出物联网技术和孪生系统

的融合机理。由于地下空间施工过程安全监测是以时间维度为导向,融合多维多源数据共同进入云平台进行计算分析,以融合机理为核心,建立数学模型,为后续孪生系统的开发应用提供参考。

在数学模型中, t 表示时间, $S(t)$ 表示物理空间模型在时间 t 的状态, $M(t)$ 表示虚拟空间模型在时间 t 的状态, $D(t)$ 表示物联网采集到时间 t 的数据, $P(t)$ 表示根据孪生数据在虚拟空间模型中分析得到的预测结果, $C(t)$ 表示根据预测结果生成对物理空间控制的决策。由此得到以下融合机理数学模型:

1) 数据共享与同步:

$$M(t) = f(D(t)) \quad (4)$$

将物联网技术采集到的实时数据 $D(t)$ 通过函数 f 将其映射到虚拟空间模型 $M(t)$ 中,确保虚拟空间模型与实际物理空间的同步。

2) 实时监测与反馈:

$$M(t) \approx S(t) \quad (5)$$

通过实时监测数据的同步,使得虚拟空间模型 $M(t)$ 与物理空间模型 $S(t)$ 相近似。

3) 预测与优化分析:

$$P(t) = g(M(t)) \quad (6)$$

通过函数 g 对虚拟空间模型 $M(t)$ 进行预测和优化分析,得到物理空间模型的预测结果 $P(t)$ 。根据预测结果 $P(t)$,制定优化决策,调整物理空间的运行状态和参数。

4) 联动控制与决策:

根据孪生系统模型 $M(t)$ 和实时数据 $D(t)$,生成控制指令 $C(t)$,用于联动控制物理系统的行为。同时基于模型分析和实时数据,提供决策支持,例如根据 $M(t)$ 和 $D(t)$ 进行智能化决策。

5) 状态诊断与维护:

根据虚拟空间模型 $M(t)$ 和实时数据 $D(t)$ 进行状态模拟分析,识别物理空间模型的风险原因。基于状态诊断结果,提供维护支持,包括维护建议和维护策略。

通过函数 f 将实时数据 $D(t)$ 映射到孪生系统模型 $M(t)$ 中,以确保模型与实际物理空间的同步。其次,通过实时监测数据的同步,使得孪生系统模型 $M(t)$ 与物理系统状态 $S(t)$ 近似,从而实现实时监测和反馈。此外,利用函数 g 对孪生系统模型 $M(t)$ 进行预测和优化分析,得到预测结果 $P(t)$ 。根据预测结果 $P(t)$,制定优化决策,调整物理系统的运行状

态和参数。同时,根据孪生系统模型 $M(t)$ 和实时数据 $D(t)$,生成控制指令 $C(t)$,用于联动控制物理系统的行为。基于模型分析和实时数据,可以提供决策支持,例如根据 $M(t)$ 和 $D(t)$ 进行智能化决策。最后,利用孪生系统模型 $M(t)$ 和实时数据 $D(t)$,进行状态诊断,以识别物理系统的风险原因。

综上所述,物联网技术和数字孪生系统的融合机理为地下空间施工过程安全监测提供了强大的工具和决策支持。通过实时数据采集、模型分析和预测优化,可以监测、控制和维护物理系统,以确保施工过程的安全性和效率。

3 基坑安全监测孪生系统

3.1 工程案例

以城市副中心三大建筑共享配套设施项目为例进行超大基坑安全监测验证。该项目位于北京市通州区永顺镇,占地约 15.4 万 m^2 ,总建筑面积约 25.5 万 m^2 ,主要功能为综合性配套服务设施配套停车、三大建筑停车及综合性配套服务设施。三大建筑共享配套设施基坑工程平面如图 4 所示。



图 4 三大建筑共享配套设施基坑工程平面示意

Fig. 4 A schematic diagram of the excavation pit engineering for three building shared supporting facilities

本项目是中国规模最大的商业地下中心,工程体量巨大,作业面多,结构体系复杂、施工精度要求高,专业接口众多,专业整合与协调难度巨大;并且临近北运河,高地下水位可能导致基坑涌水,影响工程稳定性;同时项目内有两座运河遗址需要进行单独支护,工程地质条件复杂。

3.2 数字孪生模型建立

利用 BIM 技术建立与基坑相对应的几何模型。几何模型是对超大基坑施工现场的高度还原与仿真,并将虚拟模型上传至孪生系统平台中。通过 Revit 软件分别建立基坑开挖、边坡支护、地下结构等实体要素模型,并根据物理实体信息对各要素的尺寸、位置和属性进行精确建模,由此形成高精度的几何模型。对桩基、支护构件等模型进行参数化处理并建立相应族库,以便实现快速建模,三大建筑共享配套设施基坑几何模型如图 5 所示。同时考虑施工过程的动态性,利用 BIM 技术的 4D 施工模拟对施工顺序及总体工期计划进行可视化模拟,如图 6 所示,将几何模型与施工进度计划相关联以此对孪生模型进行动态更新。

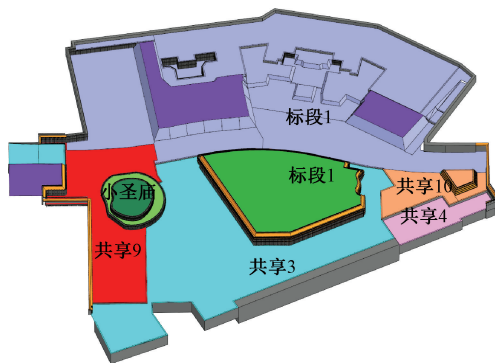


图 5 三大建筑共享配套设施基坑几何模型

Fig. 5 The geometric model of the excavation pit for three building shared supporting facilities

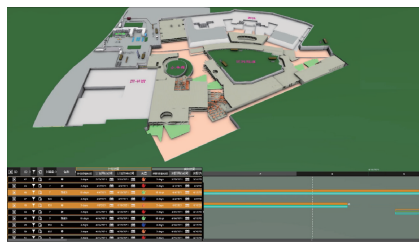


图 6 三大建筑共享配套设施施工进度模拟

Fig. 6 Construction progress simulation of three building shared supporting facilities

3.3 传感器布设与数据映射

通过在施工现场安装相对应的传感器对围护结构失稳、支撑体系失稳、坑底变形、地表沉降等易引起超大基坑施工安全风险的指标进行数据收集。超大基坑安全监测对象主要包含水平位移监测、沉降监测、地下水位监测、锚索内力监测等,通过在监测点布设传感器和监测设备实时采集基坑的数据,具体监测类型及传感器型号见表 1 所列。传感器监测

布设要求包括:1) 基坑工程传感器的布设应能反映监测对象的实际状态及其变化趋势,例如布置在内力及变形关键特征点上并满足监控需求;2) 基坑工程传感器的布置应不妨碍监测对象的正常工作,减少对施工作业的不利影响,同时对布设位置进行标识,有助于提醒施工人员和监测人员准确找到传感器。3) 建立定期的巡检和校准计划,确保传感器的正常工作,一旦传感设备发生故障或异常时及时采取维护措施。

表 1 超大基坑安全监测类型及传感器名称

Table 1 Super-large excavation pit safety monitoring types and sensor names

监测类型	传感器名称	传感器型号
混凝土支撑应力	埋入式混凝土应变计	YB-MR01
锚索轴力	锚索轴力计	YB-MS300
深层水平位移	自动化测斜仪	LRK-CX06
基坑周边沉降	静力水准仪	LRK-J112
基坑周边沉降及水平位移	二维激光位移计	LRK-DL630
地下水位监测	无线水位计	RYY-SW01
周边建筑倾斜监测	无线高精度双轴倾角仪	LRK-RG911
周边建筑物裂缝位移监测	无线位移计	LRK-LG931
数据采集	智能无线数据采集仪	LRK-DZ622A

通过无线自组网的方式将各类型的基坑监测设备、传感器进行连接,然后综合利用 Zigbee、4G、WIFI 等无线传输网络的方式将多源异构的监测数据传输至孪生平台的 MySQL 数据库中,以此实现监测数据的自动采集和实时传输。再通过调用孪生平台中的智能算法对数据进行处理,确保基坑安全监测孪生模型能够实时、准确地反映物理空间中的基坑实体。三大建筑共享配套设施基坑孪生模型如图 7 所示。

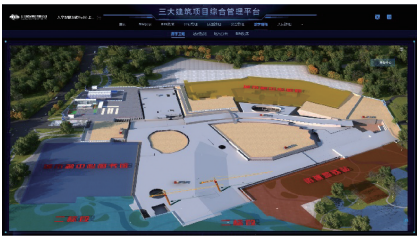


图 7 三大建筑共享配套设施基坑孪生模型

Fig. 7 The excavation pit twin model of three building shared supporting facilities

3.4 基坑安全监测孪生平台

通过集成上述孪生模型和监测设备来构建基坑安全监测孪生系统平台,如图 8 所示。孪生系统能够对原始多源异构监测数据进行实时处理,借助孪

生平台中的安全风险评估和控制算法对历史积累数据和实时数据进行数字化建模分析,得到基坑的安全状态,形成各类变化曲线和图形、图表,并以可视化的方式反馈给现场管理人员,及时发现工程及周边建筑物、管线隐患,从而指导现场安全风险管理。

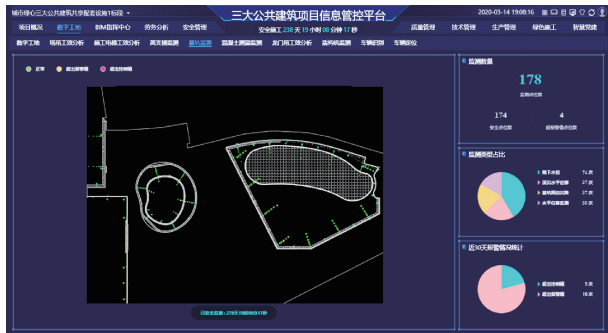


图 8 大型基坑安全监测孪生平台

Fig. 8 Large excavation pit safety monitoring twin platform

系统平台能够统计监测类型占比,实时展示地下水位、深层水平位移、基坑周边沉降、水平位移监测数据,并统计 30 d 内报警情况。通过物联网技术和数字孪生系统的融合,可实现基坑数据的实时监测,测量整个工期中基坑安全状态的变化,通过对监测数据分析、报警,及时反映基坑工程的状态,避免重大事故的发生。

4 结 论

通过引入物联网技术和数字孪生理念,构建了一个适用于超大基坑施工安全的智能化监测系统框架。通过分析物联网和数字孪生的概念,探究了物联网和数字孪生的融合机理,并以此提出融合物联网和数字孪生的超大基坑安全监测孪生系统。该孪生系统利用 BIM 技术建立对应的物理施工模型,并通过物联网技术实时采集多源异构监测数据,实现虚拟施工模型与物理施工模型的信息交互,借助孪生系统对多源异构数据进行实时安全分析,以三大建筑共享配套设施基坑为案例,验证了孪生系统在超大基坑施工中的有效性和实用性。该研究为提高施工安全水平和风险防控能力提供了新的解决方案,对地下空间施工过程的安全管理具有重要的理论和实践价值。

本文在超大大地下空间结构施工安全监测系统方面取得了一定的成果,但仍有以下问题值得进一步研究:

1) 基坑施工安全监测系统的基础是构建一个密集的、以物联网为基础的基坑施工安全监测,而目

前市场上缺少适用于全方位监测的传感器,为此要加大基坑施工安全监测专用传感器的研发和应用,积极探索现有传感器的性能优化方式,以期实现基坑施工安全监测最优的监测效能。

2) 基坑施工安全监测孪生模型是孪生系统的核心功能,安全监测孪生系统的构建需要综合基坑施工安全监测、地形、地质等多种要素,综合多学科知识和行业经验,构建准确的分析、决策知识库。这方面成果仍需要不断实践和积累。

参 考 文 献

- [1] 李小雪,雷可,谭忠盛,等. 城市地下空间施工风险因素耦合效应研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(增刊 1): 76-86.
- [2] 王国林,于富来,柳策,等. 深基坑地表沉降预测及控制研究现状分析[J]. 工业建筑, 2023, 53(增刊 1): 387-393,382.
- [3] 赵峰. 基于 BIM 的基坑工程自动化监测平台研发[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 151-158.
- [4] 廖原,乔绍财,黄海荣,等. 某超高层深基坑支护设计及智能监测技术的应用[J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43(1): 100-107.
- [5] 徐志春,王军. 基于振弦式传感器的深基坑监测系统的设计[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(7): 79-81,84.
- [6] 张阳,张国永,李吉庆,等. 基于物联网与 WebGIS 的深基坑在线监测平台研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 1): 328-336.
- [7] HASHASH Y M A, JAMMOUL M, FLEMING K L, et al. Construction monitoring for the transbay transit center excavation in San Francisco, California[G]//IFCEE 2015. 2015: 2502-2511.
- [8] WU J J, PENG L M, LI J W, et al. Rapid safety monitoring and analysis of foundation pit construction using unmanned aerial vehicle images[J/OL]. Automation in Construction, 2021[2021-05-28]. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103706>.
- [9] 韩达光,秦国成,周银,等. 基于 BIM 和三维激光扫描在基坑监测中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 72-76,102.
- [10] LEE H K, SONG M K, LEE S S. Prediction of subsidence during TBM operation in mixed-face ground conditions from realtime monitoring data[J/OL]. Applied Sciences, 2021[2021-12-20]. <http://doi.org/10.3390/app112412130>.
- [11] LI X, LIU X, LI C Z, et al. Foundation pit displacement monitoring and prediction using least squares support vector machines based on multi-point measurement[J]. Structural Health Monitoring, 2018, 18(3): 715-724.
- [12] 徐文杰,唐德泓,谭儒蛟,等. 数字基坑系统在深大基坑工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3510-3517.
- [13] 王卫东,郑筱彦,白明洲,等. 城市深大基坑施工安全风险多因素耦合作用机理分析[J]. 公路, 2022, 67(3): 361-366.
- [14] 雷升祥,黄明利,谭忠盛. 城市地下大空间建设风险特征和分类研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(10): 1663-

- 1676.
- [15] 吕超, 彭建, 彭芳乐. 滨江超大超深基坑施工风险分析与控制[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1440-1448.
- [16] 李小雪, 谭忠盛, 雷可, 等. 城市地下大空间多因素耦合的施工风险研究[J]. 公路, 2021, 66(12): 217-226.
- [17] 雷升祥, 雷可, 王秀英, 等. 城市地下大空间施工重大风险多因素耦合演变模型[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(8): 1331-1341.
- [18] 裴欣茹, 安宏斌, 郭健, 等. 深大基坑复杂系统风险特征及耦合效应研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2023, 42(5): 69-75, 89.
- [19] 刘占省, 史国梁, 杜修力, 等. 数字孪生驱动的预应力钢结构安全智能控制方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(10): 1043-1053.
- [20] 买亚锋, 张琪玮, 沙建奇. 基于 BIM+物联网的智能建造综合管理系统研究[J]. 建筑经济, 2020, 41(6): 61-64.
- [21] 柏彬, 陈勇, 杜长青, 等. 基于物联网技术的智能安全监控建筑信息模型[J]. 工业建筑, 2020, 50(4): 175-179.
- [22] ZHANG M, GHODRATI N, POSHDAR M, et al. A construction accident prevention system based on the Internet of Things (IoT) [J/OL]. Safety Science, 2023[2023-01-01]. <http://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.106012>.
- [23] 曹庆, 刘博, 赵鸣. 基于物联网的结构施工监测技术应用[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4): 169-172.
- [24] 宫志群, 王永志, 廖少明. 基于数字孪生的建设工程项目管理数字化[J/OL]. 土木工程学报, 2024[2024-04-23]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.23040317>.
- [25] 杨昊, 余芳强, 高尚, 等. 基于数字孪生的建筑运维系统数据融合研究和应用[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 204-210, 235.