

面向桩基成孔施工质量管控的数字孪生体系构建

梁雨¹, 聂良涛^{1,2*}, 姜浩文¹, 孙晓浩¹

¹石家庄铁道大学交通运输学院, 河北 石家庄

²河北省交通安全与控制重点实验室, 河北 石家庄

收稿日期: 2024年6月17日; 录用日期: 2024年7月7日; 发布日期: 2024年7月18日

摘要

桩基工程作为隐蔽工程,其施工过程容易产生孔位和垂直度偏差,钻孔深度和入岩深度不足等安全隐患,采用信息化技术实现其施工质量管控至关重要。现阶段面向桩基成孔施工质量管控的数字孪生理论体系缺乏是制约桩基工程信息化发展的瓶颈之一,除了个别碎片化的应用探索外,鲜有可供参考的系统性案例。本文从桩基成孔施工的数字孪生基本概念出发,系统阐述了其框架构成,构建了一个由数字孪生技术驱动的桩基成孔施工质量管控框架体系。以泥浆护壁钻孔桩为例,提出了其成孔施工质量管控的指标与预警标准,为数字孪生技术在桩基成孔施工质量管控中的应用提供参考。

关键词

桩基成孔, 数字孪生, 质量管控, 钻孔桩

Establishment of a Digital Twin Framework for Quality Management of Pile Foundation Drilling

Yu Liang¹, Liangtao Nie^{1,2*}, Haowen Jiang¹, Xiaohao Sun¹

¹School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei

²Hebei Key Laboratory of Traffic Safety and Control, Shijiazhuang Hebei

Received: Jun. 17th, 2024; accepted: Jul. 7th, 2024; published: Jul. 18th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 梁雨, 聂良涛, 姜浩文, 孙晓浩. 面向桩基成孔施工质量管控的数字孪生体系构建[J]. 土木工程, 2024, 13(7): 1166-1174. DOI: 10.12677/hjce.2024.137126

Abstract

As a concealed engineering project, pile foundation construction is prone to hole position deviations, verticality deviations, insufficient drilling depth, and rock penetration depth, posing safety hazards. Utilizing information technology is crucial for controlling the construction quality. Currently, the lack of a digital twin theoretical system for controlling the quality of pile foundation drilling constrains the development of information technology in pile foundation engineering. Apart from sporadic fragmented application explorations, there are few systematic cases available for reference. This article starts from the basic concept of digital twin technology in pile foundation drilling construction, systematically elaborates on its framework composition, and constructs a pile foundation drilling quality control framework system driven by digital twin technology. Taking mud-covered wall drilling piles as an example, it proposes indicators and warning standards for quality control during drilling, providing a reference for the application of digital twin technology in quality control of pile foundation drilling construction.

Keywords

Pile Foundation Drilling, Digital Twin, Quality Control, Drilled Pile

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着城市化进程的加速,高层及超高层建筑和地铁工程的大规模建设,桩基础的数量和规模显著增长[1],施工环境也日趋复杂。我国《十四五规划和2035年远景目标纲要》中提出要统筹推进传统基础设施和新型基础设施建设[2],特别强调加快数字化发展以及协同推进数字产业化和产业数字化转型的重要性,为桩基成孔施工等基础设施建设领域提供了一个转型升级的契机。

在此背景下,数字孪生(Digital Twin)技术作为一种先进的信息技术,正逐步成为基础设施建设领域中的关键工具[3]。然而,现阶段数字孪生在工程施工中的应用尚处于探索阶段[4],尤其是针对桩基成孔工程这一专业领域,由于缺少理论支撑和框架体系,导致施工数据与建筑信息模型(BIM)融合不充分,应用受到限制。

因此,针对桩基成孔施工场景,如何构建数字孪生体系满足现阶段质量控制信息化需求,成为当前亟需解决的关键问题。本文从理论分析出发,面向桩基成孔施工质量管控场景,深入探究构建一套切实可行的数字孪生体系,并进一步开展质量管控指标及评价标准研究,为数字孪生技术在桩基成孔施工中的应用提供理论参考和技术支撑。

2. 成孔施工数字孪生概念及特征

2.1. 概念定义

2011年,Michael Grieves教授提出了数字孪生的三大组成部分:物理空间的实体产品、虚拟空间的虚拟产品、物理空间和虚拟空间之间的数据和信息交互接口[5]。这为数字孪生技术的发展和应用提供了

一个清晰和全面的框架。

基于数字孪生的三个组成部分，提出面向桩基成孔施工过程质量管控的数字孪生概念定义：数字孪生是一个全方位映射现实施工过程的集成系统。该系统具有极强的综合性，集成了包括现实施工过程、虚拟孪生模型、和数模交互连接三个关键模块。通过建立“信息 - 物理”这种交互连接，在计算机系统中数字化地映射现实成孔施工过程。综合调用前端感知、BIM 模型以及数模融合这些模块来实现数据的互联互通，以实现施工进度统计分析、质量统计分析、施工过程在线可视化管理以及风险预警等目的。

2.2. 基本特征分析

数字孪生的基本特征不仅构成其理论框架和内涵的根基，而且是理解其整体架构和系统运行的重要前提。以下提出了面向桩基成孔施工质量管控的数字孪生系统六项基本特征，如图 1 所示。

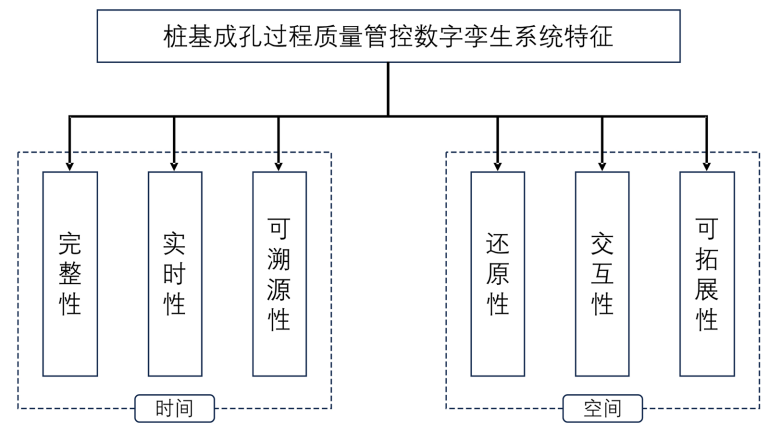


Figure 1. Basic characteristics of digital twin system for quality control of pile foundation drilling process

图 1. 桩基成孔过程质量管控数字孪生系统基本特征

(1) 完整性。在桩基成孔施工的全过程中，数字孪生覆盖从桩孔放样、下套筒、钻孔、入岩到成孔的每个环节。这包括对地质勘探数据、施工方法、设备使用等的全面记录，确保每个施工细节都得到反映和监控，从而在质量管控上提供完整的信息支持。

(2) 实时性。数字孪生的实时性是一种计算机可识别和处理的方式管理数据，以对随时间轴变化的物理实体进行表征，强调捕捉并反映施工现场的实时动态变化，以确保数字孪生模型能够及时更新以匹配物理实体的当前状态，提供即时的可视化呈现。

(3) 可溯源性。在桩基成孔过程中，可溯源性确保所有数据来源可追踪，包括施工时间、孔位偏差、垂直度、钻孔深度、入岩深度变化等，从而在出现问题时能迅速定位问题源头，及时采取纠正措施。

(4) 还原性。强调在虚拟环境中对桩基成孔施工实际情况的精确映射，通过高质量的数据输入和分析，确保数字孪生模型精确地映射出桩基成孔的每个步骤，如钻孔位置、深度、角度等，做到与实际施工过程一致。

(5) 交互性。强调数字孪生体系中信息连接与交互，主要指现实物理实体和虚拟模型之间的交互，这依赖于现代信息技术，如传感器技术、云计算技术以及交互式硬件设备等，实时感知施工现场的各种信息并进行处理和分配，以达到不同维度之间的信息交流。

(6) 可扩展性。数字孪生技术需要适应不同尺度、多物理环境和多层级的需求，考虑到桩基成孔工程可能涉及不同的地质条件、施工方法和设备，数字孪生系统需要具备适应这些多样化需求的能力。

3. 成孔施工数字孪生体系框架

3.1. 系统组成架构

随着数字孪生的概念逐步发展,现实世界与虚拟空间之间的壁垒正在被逐步打破,而 CPS (Cyber Physical System, 信息物理系统)是推进这种虚实融合的核心概念[6]。但这种通用框架更趋近于概念设计,在专业领域存在一定局限性,而在施工管理领域的研究尚属初步,特别是在针对桩基成孔施工这种特有场景更是鲜有相关的专用框架。因此在 CPS 的基础上提出一种面向桩基成孔过程的质量管控系统(Quality Management System, QMS),即 CPS-QMS,如图 2 所示。

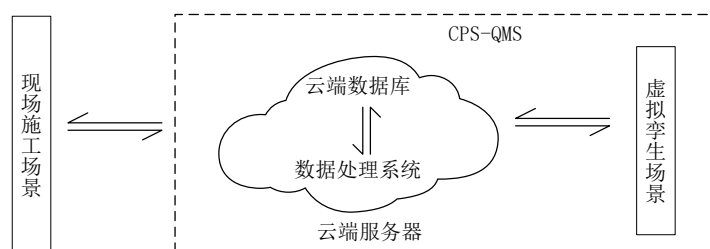


Figure 2. Architecture of digital twin system for quality control of pile foundation drilling process

图 2. 桩基成孔过程质量管控数字孪生系统组成架构

CPS-QMS 由现实物理实体端、虚拟孪生模型端、“信息 - 物理”交互连接端三部分组成,主要面向需要虚实映射的施工场景而设计。其中,“信息 - 物理”的交互连接属于本系统的核心,采用“云端服务器”作为数据处理中枢,通过数据传输、数据处理、人机交互等功能实现信息与物理之间的交互连接。以上系统组成架构可以为面向桩基成孔过程质量管控的数字孪生系统提供整体的蓝图,在确保系统的结构完整性、数据一致性和系统可用性等方面发挥重要作用。

3.2. 现实物理实体

对现实物理实体的全方位感知与准确分析是数字孪生体系的基础,也是建立虚拟孪生模型的前提。对于桩基成孔过程质量管控来说,现实物理实体指的是具体的施工对象、在场的施工设备以及施工环境。为了全面分析这些实体,需采集各种关键信息,包括但不限于地理和地质数据、施工设备状态、机械构件运行情况以及施工过程中发生其他的实际活动。

当前阶段前端感知技术手段众多,各种感知技术如传感器、监测设备等在独立使用时效果显著,但在技术整合和综合应用方面存在挑战。因此需要研究不同平台之间的数据传输、监测数据分析方法以及实时数据处理技术,以实现桩基工程精细化监测。为精确完整地描述全部施工过程以及数据信息,需要利用前端感知技术,如在打桩机上安装传感设备记录其位置、姿态等信息,这些传感设备包括但不限于深度传感器、定位传感器、智能终端系统和远程数据传输设备[7],其能够实时收集和传输施工现场的详细信息,实现物理实体或物理过程向数字表示地转换,为以后数字孪生模型提供了及时且准确的数据输入。该过程如图 3 所示。

3.3. 虚拟孪生模型

在针对桩基成孔施工的质量管控过程中,虚拟孪生模型作为数字孪生各项功能的核心组件,其构建和应用需要精确反映施工过程的复杂性和特异性[8]。虚拟孪生模型的关键组成如图 4 所示,以下针对桩基成孔施工对孪生模型的几个关键组成部分及其在桩基工程中的应用进行阐述。

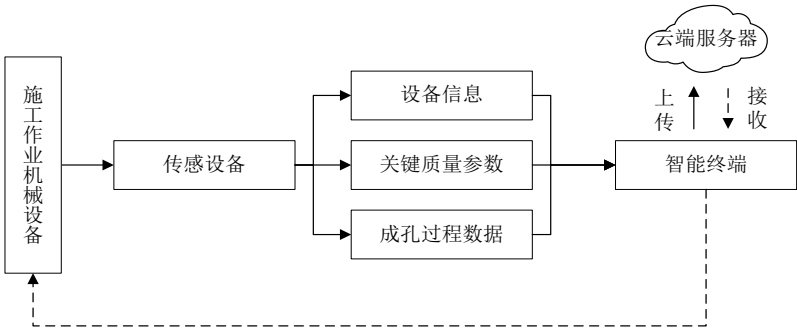


Figure 3. The process of digital transformation of physical entities
图 3. 物理实体数字化转换过程

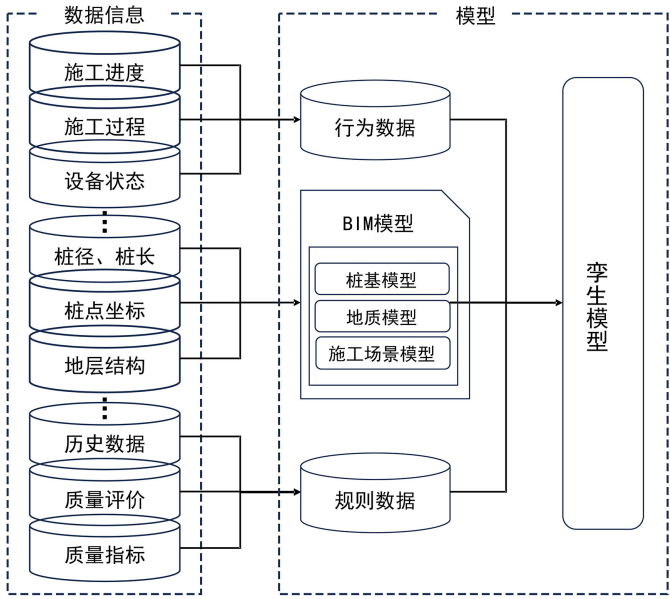


Figure 4. Key components of the twin model
图 4. 孪生模型关键组成部分

(1) BIM 模型是孪生模型的主体。不仅包括物理实体的基本几何参数和关系，如位置、尺寸、形状[9]。在桩基成孔施工中，则需详细反映钻孔的深度、直径、倾斜度等关键参数，确保模型精确对应实际施工状态。

(2) 行为数据是孪生模型的驱动数据。桩基成孔施工过程就是作业设备一系列行为变化的表现，其本质是作业设备在各种外部随机因素干扰和内部运行机制工作作用下的动态响应与行为变化[10]。这些行为变化通过设备姿态、施工速度、施工进度等多个维度得以体现。

(3) 规则数据是数字孪生系统的核心要素。它涵盖了基于历史数据规律、专家经验知识和行业规范标准的静态规则，以及随着系统运行和时间推进而不断自我更新和调整的动态规则。前者为孪生模型提供稳定的运行依据，后者则赋予模型自我适应和优化的能力。

通过以上分析可以发现，BIM 模型则具有实体形态，属于静态实体模型。展示了物理实体的几何特性，如位置、尺寸和形状。这种模型是孪生模型的“骨架”，也是直接的数据驱动对象。行为数据、规则数据多来自于施工过程中采集与分析，属于动态数据，用于捕捉、模拟施工现场的动态变化以及执行相关监测标准[11]。

尽管孪生模型和 BIM 模型在视觉呈现上可能相似，它们在功能和应用方面有明显的不同。孪生模型在表现物体几何特征、静态属性的基础上更进一步，它不仅涵盖设计阶段的所有信息，还包括整个施工过程中实时数据的集成和分析，是一个能够反映现实世界实时变化的动态模型[12]。在桩基成孔施工中，这意味着模型不仅显示钻孔的设计参数，还实时跟踪和反映施工进度、设备行为以及桩机钻头与地质层的空间关系等。

鉴于桩基施工现场环境的错综复杂性，模型构建的难度可能会相应增加。为应对此挑战，可通过深入研究并应用更高精度的传感器技术，同时丰富传感器类型，以实现施工场景的多维度、全面映射，从而优化模型的构建精度和效率。

3.4. “信息 - 物理”交互连接

综合以上对“虚拟孪生模型”与“现实物理实体”的研究，可以发现两者之间是一种“信息 - 物理”交互连接关系[13]。建立这种联系的“桥梁”就是“智能管控系统”，它运用前端感知技术、模型构建、以及数据交互连接等多种方法，实现对物理实体和孪生模型之间的动态反馈与互通。

然而，在目前的桩基施工应用中，数模融合应用的不足显著影响了模型的有效性，尤其是在地下施工这一关键环节的可视化表现上。一方面，由于缺乏深入的数模融合，现有仿真模型难以精确地模拟地下施工活动，如钻孔作业的具体过程，这限制了工程人员对于施工全貌、进度及潜在问题的理解。另一方面，当前仿真模型在实时反映施工动态方面的能力不足，这在快速变化的施工环境中尤为突出。缺乏对实时施工状态的精准映射，限制了仿真模型在施工管理决策中的作用。

因此，智能管控系统作为孪生模型的支撑，是数字孪生体系的核心，在虚实映射的基础上集成了前端感知、模型构建、数模交互连接以及质量指标管控等技术，并提供驱动数据的前端交互平台，旨在实现施工工区管理、质量指标在线管控以及成孔过程可视化等多元化的服务功能。“信息 - 物理”交互连接框架如图 5 所示。

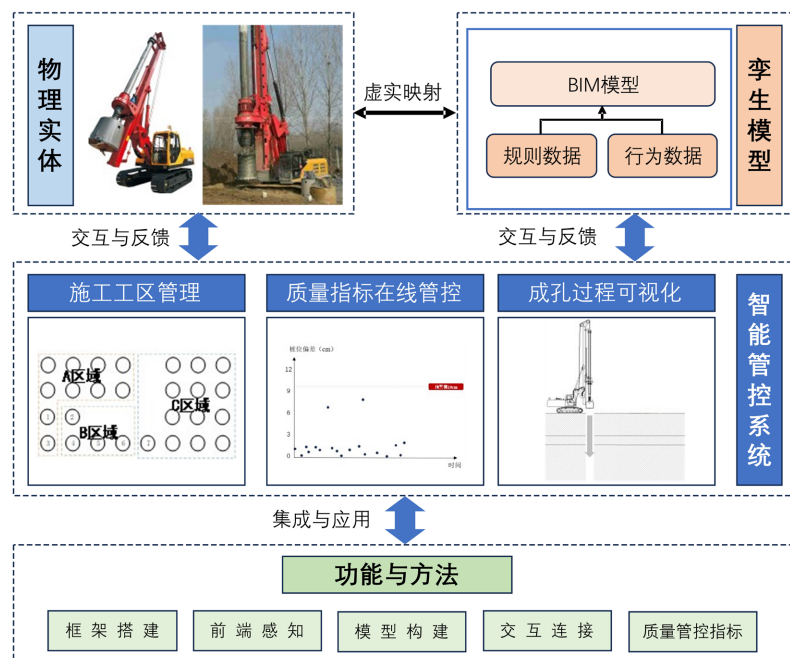


Figure 5. “Information-Physical” interaction connection framework

图 5. “信息 - 物理”交互连接框架

4. 质量管控指标及评估预警

4.1. 质量管控指标

施工进度管理是建设工程三大控制目标之一，每一项工艺都有严格的质量要求[14]。根据中国住房和城乡建设部 2018 年 3 月颁布的《建筑地基基础工程施工质量验收标准 GB50202-2018》的规定[15]，并综合考虑现场施工中实施监测的可行性，将桩位坐标偏差、垂直度偏差、钻孔深度以及入岩深度作为桩基成孔质量管控预警的四项指标。

4.2. 桩基成孔质量数据评估预警

针对以上桩位坐标偏差、垂直度偏差、钻孔深度以及入岩深度四项质量指标，对应到实际施工过程中的监测数据为孔位坐标数据、桩孔倾斜度数据、钻孔深度数据和入岩深度数据四种关键数据。在实际应用过程中，前端回传的数据往往为某一时刻的数据，记录某一时刻设备的瞬时状态。而桩基成孔施工是一个循序渐进的过程，难以通过其中某一时刻的质量监测数据作为对已完成过程的评价标准。因此，需要对实时监测数据进行筛选、分类处理，结合具体施工过程剔除非施工状态下记录的数据，保留有效数据。

基于这种数据需求，建立“同源双库”的数据处理结构，如图 6 所示，即数据统一来源于现场感知设备监测得到的实时数据，通过条件筛选分发至施工过程数据库和综合数据库。对于施工过程数据采用统计计算的方法产生分析数据，用来分析某一过程的施工质量；综合数据库保留全部监测数据，并将最新数据用于描述实时施工质量情况。

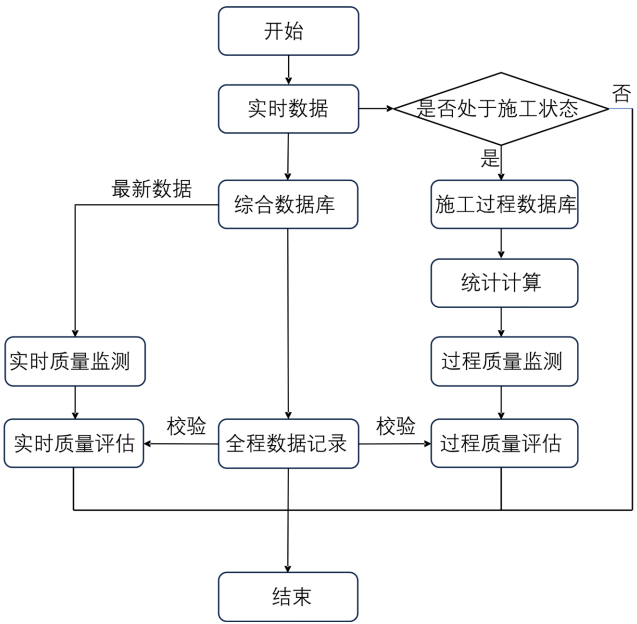


Figure 6. The data processing structure of “homologous dual libraries”

图 6. “同源双库”的数据处理结构

基于这种数据结构对实时数据的“分流”作用，可以实现对实施质量和过程质量的全面评估。以“泥浆护壁钻孔桩”为例，参照国家要求以及单桩施工质量专家经验制定桩位偏差、垂直度偏差、钻孔深度、入岩深度的质量预警标准，如表 1~4 所示。

Table 1. Standard for pile position deviation warning
表 1. 桩位偏差预警标准

桩径/mm	桩位偏差/mm	是否合格	操作
$D < 1000$	$\leq 70 + 0.01H$	是	无
	$> 70 + 0.01H$	否	预警
$D \geq 1000$	$\leq 100 + 0.01H$	是	无
	$> 100 + 0.01H$	否	预警

Table 2. Standard for verticality deviation warning
表 2. 垂直度偏差预警标准

桩径	垂直度偏差	是否合格	操作
全部	$\leq 1/100$	是	无
	$> 1/100$	否	预警

Table 3. Drilling depth warning standard
表 3. 钻孔深度预警标准

桩径	钻孔深度	是否合格	操作
全部	$\geq$ 设计值	是	无
	$<$ 设计值	否	预警

Table 4. Early warning standard for rock penetration depth
表 4. 入岩深度预警标准

桩径	入岩深度	是否合格	操作
全部	$\geq$ 设计值	是	无
	$<$ 设计值	否	预警

5. 结论

- 1) 定义了桩基成孔施工质量管控数字孪生的概念，并分析了其基本特征，详细阐述了桩基成孔施工数字孪生体系框架所包括的物理实体、虚拟模型及二者间的数据交互机制；
- 2) 将数字孪生理论与桩基成孔过程质量管控结合研究，构建了桩基成孔施工质量管控数字孪生体系框架，为桩基施工数字孪生系统研发提供了数字技术储备，有助于推进基础工程施工数字化转型；
- 3) 从理论层面阐述了数字化对桩基成孔施工质量管控的影响，通过实时监测、数据分析和预测，使得桩基项目施工过程中的质量控制更加精确、高效，及时发现并解决施工过程中的质量问题，从而显著提升桩基工程的施工质量和安全性能；
- 4) 以泥浆护壁钻孔桩为例，提出了其成孔质量数字孪生管控指标、评估分析方法和预警标准，有助于在钻孔桩施工监测中实施精准的质量管控和预报预警，可为类似工程分析及数字化应用提供参考。

基金项目

石家庄市创新应用场景项目(241230064A)；
石家庄铁道大学研究生创新项目资助(YC2023040)。

参考文献

- [1] 郭星宇, 冯世进. 基坑开挖与承压水突涌对桩基承载力影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(1): 311-319.
- [2] 国家及各地区国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[J]. 中国信息界, 2022(5): 110.
- [3] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1-10.
- [4] 王进峰, 问丛川, 花广如. 面向概念、技术与应用的数字孪生综述[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(2): 112-116+133.
- [5] Grieves, M. (2011) *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management*. McGraw-Hill Education.
- [6] 徐朋月, 刘攀, 郑肖飞. 数字孪生在制造业中的应用研究综述[J]. 现代制造工程, 2023(2): 128-136.
- [7] 朱宏伟, 蔡德钧, 陈锋, 等. 桩基施工过程自动监测系统研发及应用[J]. 铁道建筑, 2017, 57(12): 71-74.
- [8] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- [9] 陈健, 盛谦, 陈国良, 等. 岩土工程数字孪生技术研究进展[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 79-88.
- [10] 韩冬辰, 张弘, 刘燕, 等. 从 BIM 到 BDT: 关于建筑数字孪生体(BDT)的构想研究[J]. 建筑学报, 2020(10): 95-101.
- [11] 李涛, 李晓军, 徐博, 等. 地下工程数字孪生研究进展与若干关键理论技术[J]. 土木工程学报, 2022, 55(z2): 29-37.
- [12] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-15.
- [13] Feng, J., Ling, M., Tim, B., *et al.* (2022) Building Digital Twins of Existing Highways Using Map Data Based on Engineering Expertise. *Automation in Construction*, **134**, Article 104081. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104081>
- [14] 张志伟, 曹伍富, 苑露莎, 等. 基于 BIM+智慧工地平台的桩基施工进度管理方式[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(1): 180-185.
- [15] GB 50202-2018, 建筑地基基础工程施工质量验收标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.