

# 高速公路预制梁场数字孪生协同管理平台构建

何建华

(福建第一公路工程集团有限公司, 福建 泉州 362123)

**摘要:** 为解决高速公路预制梁场管理模式粗放、信息化能力薄弱的问题,以福建政永高速德化段建设需求为出发点,构建了一套预制梁场数字孪生协同管理平台。该平台实现了对预制梁场生产过程实时监控,生产进度智能化排产,以及工程质量信息实时研判。通过视频监控大屏、生产管理看板、数字孪生模型及管理驾驶舱等工具,为管理人员提供决策支持。研究成果将为基于数字孪生技术构建高速公路预制梁场协同管理平台提供参考依据与方案借鉴。

**关键词:** 预制梁场;数字孪生;体系架构;高速公路;管理平台

**中图分类号:** TU375.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2097-3853(2024)06-0535-07

## Establishment of collaborative management platform based on digital twin technology for expressway prefabricated beam yard

HE Jianhua

(Fujian First Highway Engineering Group Co., Ltd., Quanzhou 362123, China)

**Abstract:** This research aims to deal with the challenges of extensive management mode and weak information technology capabilities in highway prefabricated beam yards. Based on the construction requirements of Dehua section of Fujian Zhengyong Expressway, a set of collaborative management platform system is established. The collaborative management platform can be used to realize real-time monitoring of the production process of highway prefabricated beam yards, intelligent scheduling of production progress, and real-time research and judgement of project quality information, and provide decision-making support for project and enterprise management personnel through the video monitoring screen, production management Kanban, digital twin model and management cockpit and other tools. The research results will provide reference for building a collaborative management platform for highway prefabricated beam yards based on digital twin technology.

**Keywords:** prefabricated beam yard; digital twin; architecture; expressway; management platform

经过几十年的发展,我国高速公路工业化建造技术取得了显著的进展,并积累了一定的实践经验。然而,由于长期以来延续着粗放式的生产模式,高速公路工业化建造在生产工艺、质量控制及管理等方面仍存在一定的不足<sup>[1]</sup>。作为高速公路工业化建造中的关键工程,传统的预制梁场存在生产效率低、耗能高、质量安全难以保证等问题。为实现预制梁场生产过程的自动化与绿色化,近年来一些高速公路工程以“固定式模板+移动式台车”为基础的环形生产线技术代替传统

的固定台座生产工艺<sup>[2]</sup>,取得了较好的应用效果。尽管目前预制梁场生产自动化技术已相对成熟,信息技术对生产与施工组织管理的赋能作用仍较为薄弱,但已有较多有益尝试。夏小刚<sup>[3]</sup>运用 BIM 和物联网技术构建的预制梁场信息化管理平台,有效地提高了预制梁场在生产、质量、安全以及进度等方面的管理效率,研究结果为桥梁建设工程行业智能化转型提供了参考。

本文以在建的福建省政和杨源至永定高速公路(简称政永高速)德化段预制梁场建设为案例

收稿日期:2024-04-07

作者简介:何建华(1977—),男,福建惠安人,高级工程师,研究方向:路桥施工管理。

背景,拟基于数字孪生技术构建高速公路预制梁场协同管理平台,实现预制梁场生产自动化与管理信息化的深度融合。

1 技术基础与应用前景

1.1 数字孪生技术

数字孪生(digital twins)技术最早由美国国防部提出,应用于航空航天飞行器的生产制造与健康维护保障。数字孪生的基本原理如图 1 所示,对于物理空间中实体生产设备,通过创建虚拟空间的“双胞胎兄弟”,即数字孪生模型<sup>[4]</sup>,在其生命周期内完成对实体生产过程的实时监测、生产工艺的动态仿真、数据驱动的优化,以及对生产现场的精准控制,进而实现物理与虚拟生产过程的双向同步与优化。近年来,数字孪生技术已广泛应用于航空航天、生产制造及城市运营管理等领域<sup>[5]</sup>,被普遍认为是推动第四次科技革命的核心技术之一。

1.2 应用前景

本文所提出的基于数字孪生技术构建的高速公路预制梁场协同管理平台,具有以下两方面意义:

(1)虚实融合:实现物理空间中的实体梁场与信息空间中虚拟梁场的深度融合,在虚拟空间中对真实梁场的生产过程进行监控、仿真与优化,

再将最优的控制策略驱动真实生产过程,以此往复循环,持续地改进与提升<sup>[6]</sup>。

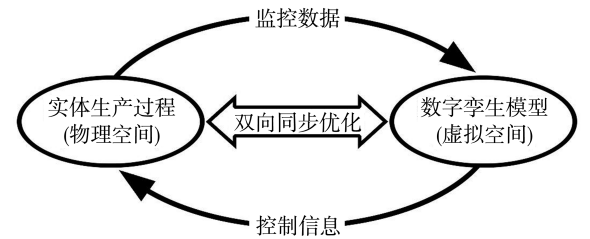


图 1 数字孪生概念示意图

Fig.1 Concept diagram of digital twins

(2)一模到底:高速公路预制梁场多属临时工程,完成生产任务后将予以拆除。采用数字孪生协同管理平台,使其在实体梁场被拆除之后,其数字孪生模型及所承载的数据信息能被永久保存,一方面实现了生产质量数据的可追溯性,另一方面所积累的数据资源将为后续工程项目提供决策参考。

2 预制梁场协同管理平台体系架构

2.1 预制梁场协同管理平台体系架构层次

图 2 为高速公路预制梁场数字孪生协同管理平台体系架构,由感知层、网络层、基础设施层、数据层、应用层和显示层组成,并提供与外部信息系统之间的数据接口。

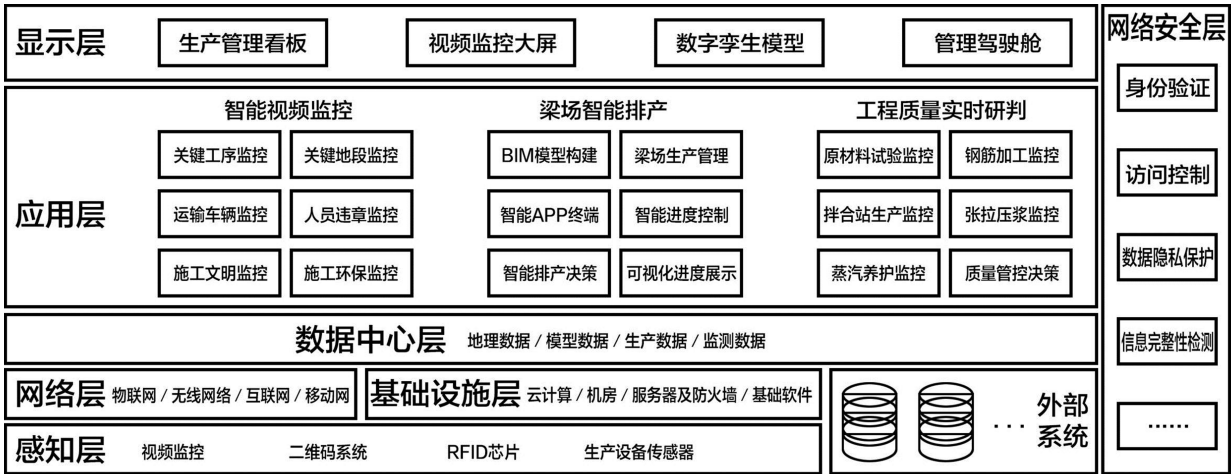


图 2 高速公路预制梁场数字孪生协同管理平台体系架构

Fig.2 Architecture of digital twin collaborative management platform for expressway prefabricated beam yards

2.1.1 感知层

在预制梁场生产现场布设各类传感器及视频监控,实现对生产过程的数据采集与实时监控;通

过在梁片喷涂二维码或预埋 RFID 芯片,实现对梁片生产工艺全过程的信息采集与追踪。

2.1.2 网络层

作为连接感知层与应用层的纽带,负责将感知层获取的信息,通过通信网络安全可靠地传输到基础设施层与数据中心层,然后根据不同的应用需求进行信息处理。

2.1.3 基础设施层

包含支撑预制梁场协同管理平台运行的各类底层资源,包括主机、存储、网络通信环境,以及各种硬件和系统软件,其中的计算与存储资源可以部署在传统的机房服务器中,也可以部署于云计算平台<sup>[7]</sup>。

2.1.4 数据中心层

用于储存、处理并分析协同管理平台的多元异构数据资源,例如预制梁场数字孪生体模型及其周边地理环境数据、梁场生产视频监控数据以及梁片的生产过程信息等。

2.1.5 应用层

在应用层开发并部署用于实现协同管理平台核心业务功能的应用软件系统,如智能视频监控系统、智能化排产系统以及工程质量实时研判系统等。

2.1.6 显示层

采用可视化的方式展示,包括远程视频监控大屏、用于展示梁场生产统计信息的生产管理看板、实时监控梁场生产过程的数字孪生模型,以及面向企业与项目领导层管理驾驶舱。

2.1.7 外部系统接口层

通过应用软件程序(API)集成、文件传输、数据同步及消息传递等方式与外单位的信息系统对接,实现与业主、供应商、行业监管部门等利益相关方的数据共享与业务流程的无缝衔接。

2.1.8 网络安全层

用于有效识别、抵御和解决预制梁场协同管理平台所面临的各种安全风险,提供包括身份验证、访问控制、数据隐私、信息完整性和防篡改能力在内的多项信息安全保护措施。

2.2 基于数字孪生的预制梁场协同管理平台体系架构耦合机制

如图 3 为预制梁场数字孪生协同管理平台体系架构,感知层部署在预制梁场的生产现场,用于实时采集梁场的生产过程数据,将采集到的生产数据通过网络层传输到基于云平台的数据中心层。通过对采集到的多源异构数据清洗与转换,并结合人工智能、机器学习等算法进行挖掘分析,一方面与应用层的各功能模块实现数据集成,另一方面通过数据接口层与系统外部各类信息系统实现数据的互联互通。在显示层中,通过生产看板、监控大屏以及管理驾驶舱等工具为预制梁场的生产管理决策提供支持,并将管理决策信息通过网络层反馈至预制梁场的生产现场,从而形成信息-物理融合的闭环控制机制。

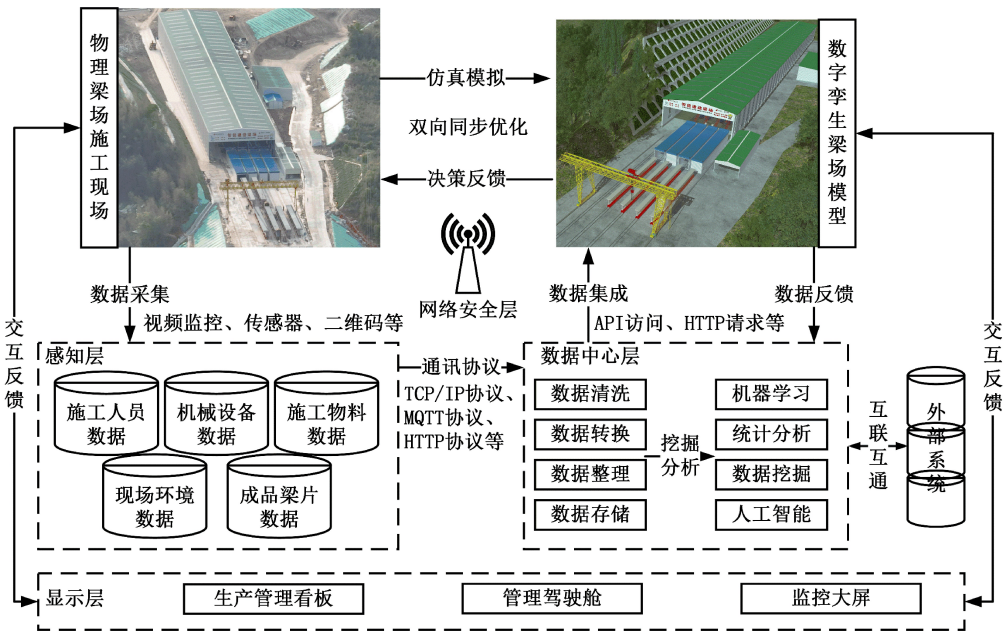


图 3 预制梁场协同管理平台体系架构耦合机制

Fig.3 Coupling mechanism of prefabricated beam yard collaborative management platform architecture



### 3 预制梁场协同管理平台数据可视化

在高速公路预制梁场协同管理平台中融合并分析来自生产现场的多源异构数据,采用多种类型的数据可视化工具为工程项目及施工企业管理决策提供技术支持。

#### 3.1 视频监控大屏

将现场采集到的视频图像传送至项目管理部

或施工企业总部的视频监控大屏,使管理人员可以远程实时监控预制梁场生产过程中的进度、质量、安全及绿色文明施工等状况。

#### 3.2 生产管理看板

基于精益管理理论中的“生产看板”工具<sup>[8]</sup>,如图 4 所示,实时显示预制梁场的生产进度、在制梁片的统计信息、生产质量监控信息、现场安全环保监测信息等,为预制梁场的生产组织管理提供决策支持。



图 4 智慧梁场生产管理看板

Fig.4 Production management Kanban of intelligent beam yard

#### 3.3 数字孪生模型

运用 BIM+GIS 技术再现高速公路预制梁场的真实场景,如图 5 所示,以三维可视化模型的形式实时展示预制梁场的生产运行状况,如移动台车定位、液压模板开合状态、在制梁片的蒸汽养护、张拉压浆等质量监测数据,以及龙门吊等大型运输设备的运行状态等信息。

#### 3.4 管理驾驶舱

建立面向项目管理及施工企业领导层的管理驾驶舱<sup>[9]</sup>,如图 6 所示,基于在现场实时获取的多维数据统计分析,将预制梁场生产过程中的预制梁片产量分布、各生产工序生产效率、生产设备运行状态、施工安全监测、生产质量监管信息等运营指标以仪表盘、柱状图、雷达网图等图形化形式展示,为管理决策提供“一站式”的支撑服务。

### 4 预制梁场协同管理平台业务应用

政永高速德化段工程路线全长 39.949 km,共有桥梁 54 座,预制 T 梁 4 095 片,受地形限制全线共设置 6 个梁场,其中,只有 4 号预制场采用基于数字孪生技术构建的预制梁场协同管理平台,其余 5 个梁场均采用普通的管理模式,经过实际施工中应用分析对比如下。

#### 4.1 智能视频监控

未采用管理平台的普通梁场,必须配备专职的安全管理人员不间断地来回巡视,耗用大量的人

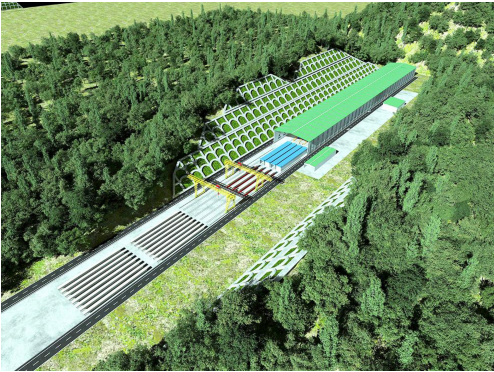


图 5 智慧梁场数字孪生模型

Fig.5 Digital twin model of intelligent beam yard



力;同时,由于安全管理人员的业务水平参差不齐,有些安全隐患问题无法及时发现,容易发生工人受伤事件。通过管理平台视频监控模块可以实时监控梁场内的生产情况,并在监控大屏中显示;有效地减少了管理盲区,同时对预制梁片生产的关键工序及地段视频监控,基于智能图像识别、处理技术自动识别和抓拍现场工人未佩戴防护措施等不安

全行为,识别场内工作人员的倒地、坠落、横卧、长时间无移动迹象等异常情况并自动智能保存过程视频,发出现场语音警报提示的同时,第一时间将异常情况反馈给现场的主要管理者,提高施工现场的安全管理覆盖面、异常事件响应及时性、安全管理事件可追溯性和智能化水平及时消除现场的安全隐患,采用管理平台的智慧梁场从未发生过安全事故。

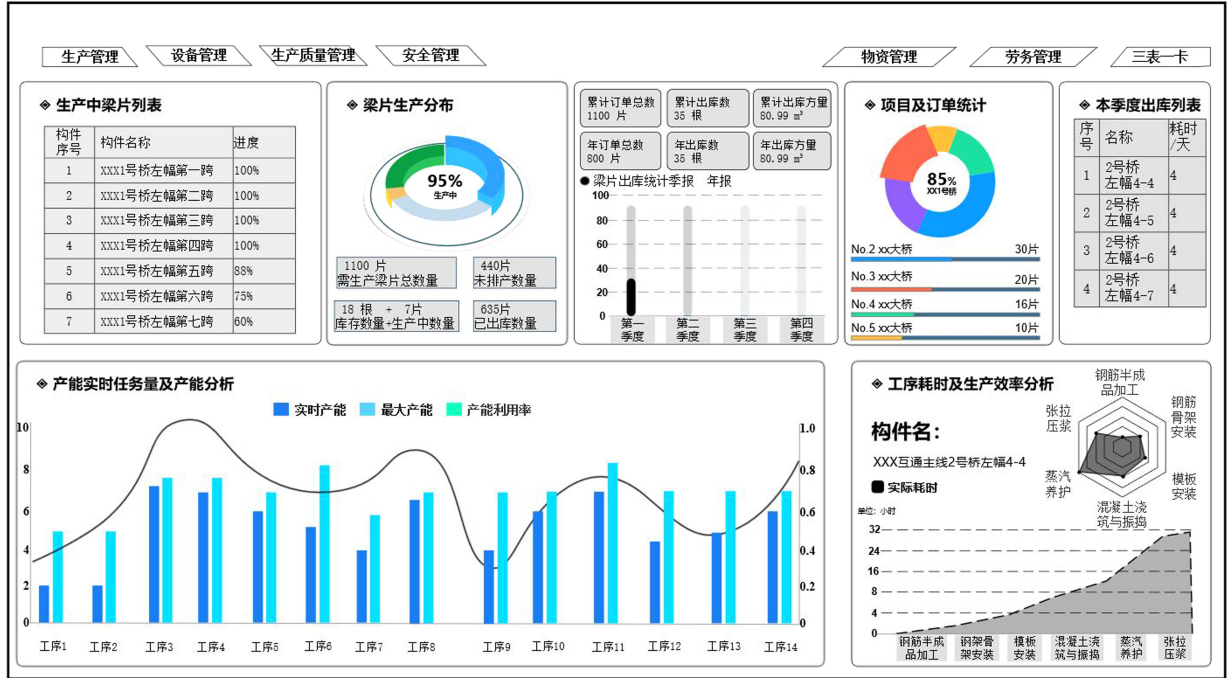


图 6 智慧梁场管理驾驶舱

Fig.6 Management cockpit of intelligent beam yard

4.2 智能化排产

普通梁场的施工计划由经验丰富的工程技术人员根据现场的实际情况手工排出生产及相应的材料计划,需人工统计预制的梁型、下部施工进度、分析是否存在卡点等具体问题,耗用大量的时间,且所排布计划的准确性、可行性与排布者的施工经验以及所统计基础数据的可靠性存在较大的关系,若排布者经验不足则计划出错的可能性大。采用管理平台在系统中应用 BIM 技术直观地区分展示工程项目各桥梁梁片的预制、吊装情况,使得管理者一目了然地掌握实时进度。基于“拉动式”精益生产管理理论<sup>[10]</sup>,根据高速工程施工现场的架梁进度计划,自动倒排预制梁场的生产计划,以及相关的人力、机械设备与物料等资源需求计划,从而达到优化预制梁场生产节拍、减少存梁库存,提升高速公路工程整体生产施工效率的目的。

的。解决了传统项目人工排产工作量大、效率低、错误多等问题,对项目管理起到了降本增效的作用。

4.3 可视化三表一卡

高速公路行业主管部门要求所有梁片均建立三表一卡台账,本系统的应用模块中,利用 BIM 技术建立梁体模型,对传统施工中的“三表一卡”表格信息进行了可视化升级,并将梁片的横坡、纵坡、梁长等预制参数在模型上标注明确,与普通梁场相比,更加直观清晰地展示梁片的三表一卡信息,使得操作工人更加准确地理解梁片参数,进一步确保施工质量,同时在模板上安装有测量仪器,能够准确地测出模板安装的横坡及纵坡,平台自动将模板安装的横坡、纵坡等实际值与“三表一卡”内的设计值对比分析,并联动设备远端控制模块自动调整模板的横坡、纵坡,解决了人工校核

和调整模板的耗时长、精度低、效率低的问题。

#### 4.4 远端设备控制

普通梁场无法确定模板安装是否牢固,各个设备是否工作正常,施工过程中存在如振捣器及养护系统损坏故障导致不能及时发现,因振捣或养护不到位造成的质量问题。采用管理平台,在平台中构建设备指令终端,不但可以查看各设备的当前工作状态、维保情况,还可以实现通过一体化平台控制梁场内的液压模板系统、智能振捣系统、智能蒸养系统等设备运行,并分析设备工作状态,具备项目生产进行设备日常状态诊断、警报等功能,第一时间提醒管理者对发生故障的设备及时维修更换,进一步保障施工。

#### 4.5 工程质量实时研判

当发生质量问题时,普通梁场生产的梁必须通过手工查找混凝土浇筑、张拉压浆数据来分析原因,过程繁琐。采用管理平台的智慧梁场在数字孪生模型中,以可视化形式展示梁片的预应力张拉、压浆监测数据,并在后台形成数据台账,实现工程质量监测数据的实时研判分析,以及工程质量问题的可追溯性,可以检索原始施工记录。当时采集到的监测数据超出预设的正常范围时,系统可以自动发出预警信息并反馈至生产现场,能够及时解决问题,避免质量问题的发生。

#### 4.6 智能计算分析

普通梁在蒸养过程中如果发生设备故障,无法判断设备发生故障的具体时间,二次蒸养会导致存在过蒸或蒸养时间不够的问题。智慧梁场管理平台通过在数字孪生平台中建立梁片强度-蒸养参数曲线,在蒸养设备故障异常而导致梁片强度未按时达到需求强度时,利用平台智能计算分析,给出第二次蒸养参数建议值并反馈给施工现场,避免出现第二次蒸养后梁片强度仍然不足而发生再次蒸养,为施工现场解决突发问题提供有效的数据支撑,提高了现场处置工作效率,避免了蒸养房被长时间占用而造成生产线停工,有效

地提高生产工效,避免了工序延误。

## 5 结论

1)构建了一套基于数字孪生的高速公路预制梁场协同管理平台体系架构,用以描述平台内部各子系统的依赖关系、交互机制与约束条件,以及各个组件之间的耦合逻辑。

2)阐述了预制梁场协同管理平台体系架构对下行框架层的逻辑联系,以揭示物理梁场与虚拟梁场之间的信息融合及实时交互机制。

3)基于上述体系架构,研发了福建政永高速公路(德化段)预制梁场协同管理平台,实现对生产全过程的实时监控、生产进度的智能化排产,以及工程质量信息的实时研判,并通过视频监控大屏、生产管理看板、数字孪生模型及管理驾驶舱等可视化工具为管理人员提供决策支持,起到降本增效的作用。

4)与传统预制梁场数字化管理系统相比,在所构建的政永高速预制梁场协同管理平台中,基于数字孪生模型的生产管理看板实现了预制梁场各工序之间的信息共享,提高了生产工效。此外,蒸汽养护及张拉压浆等生产质量监控数据采集率达到100%,实现了生产质量信息的全过程管理与可追溯。

5)基于所构建的管理平台,可以通过采集并存储当前工程的梁场生产数据资源,为将来新建工程提供分析与决策参考,对与提升施工企业精细化管理、智能化管控水平起到重要作用。

采用基于数字孪生技术所构建的预制梁场协同管理平台可以实现全过程信息化管理,提高了施工现场管理水平,进一步提升预制梁场生产自动化、管理信息化、排产智能化,有效提高地处山区、隧道众多的桥梁预制生产效率,提升建造技术水平,按时保质保量地完成建设任务。这种技术在其他高速公路工程中也具有广阔的推广应用价值。

## 参考文献:

- [1] 陈礼彪. 智能建造 数字管理[J]. 中国公路, 2023(15): 44-45.
- [2] 钱叶琳, 苏颖, 石雪飞, 等. 桥梁装配式混凝土 T 梁工业化智能制造技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2022
- [3] 夏小刚. 智能建造技术在预制 T 梁生产线的应用[J]. 建筑经济, 2020, 41(9): 121-125.
- [4] LIU Z S, MENG X T, XING Z Z, et al. Digital twin-based intelligent safety risks prediction of prefabricated construction hoisting[J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5179

[5] 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.

[6] 尤志嘉,郑莲琼,冯凌俊.智能建造系统基础理论与体系结构[J].土木工程与管理学报,2021,38(2):105-111,118.

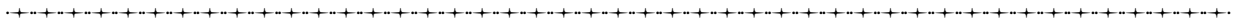
[7] TAPALE M T,BIRJE M N,CHALLAGIDAD P S,et al. Cloud computing review: concepts, technology, challenges and security[J]. International Journal of Cloud Computing,2017,6(1):32.

[8] 薛阳,蒋黎垣.精益建造与智能建造协同发展研究[J].中国建设信息化,2023(20):100-103.

[9] 陆震,刘洪霞.面向管理驾驶舱的大数据平台架构与应用[J].江苏通信,2021,37(1):86-89.

[10] MRUGALSKA B,WYRWICKA M K. Towards lean production in industry 4.0[J]. Procedia Engineering, 2017, 182:466-473.

(责任编辑:陈雯)



(上接第 534 页)

参考文献:

[1] 井旭,谢婉丽,单帅.原状及重塑黄土双轴试验微观力学特征离散元模拟[J].地质科技通报,2021(3):184-193.

[2] NGUYEN H B K,RAHMAN M M,FOURIE A B. How particle shape affects the critical state,triggering of instability and dilatancy of granular materials—results from a DEM study[J]. Géotechnique,2021,71(9):749-764.

[3] XIAO Y,LONG L H,MATTHEW EVANS T,et al. Effect of particle shape on stress-dilatancy responses of medium-dense sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2019,145(2):1-15.

[4] 邱玉芳.颗粒形态影响砂土临界状态力学行为的离散元研究[D].武汉:华中科技大学,2018.

[5] 李永强,陈波,卢玢宇,等.砂性土初始孔隙比可复现制样装置:CN216978557U[P]. 2022-07-15.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[7] 甘怡东,徐东升,魏龙海,等.级配效应下珊瑚砂不排水剪切特性研究[J].武汉理工大学学报,2023,45(7):95-101.

(责任编辑:陈雯)