文章编号：0253-374X(2025)09-1361-11

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24097

基于数字孪生的边坡工程及时施工安全控制策略

阿迪力·如苏力[1]，李晓军[1,2,3]，芮　易[1,2,3]，吕艳云[1,2]，王圣涛[4]，张　磊[5]

（1. 同济大学 土木工程学院，上海 200092；2. 同济大学 土木信息技术教育部工程研究中心，上海 200092；
3. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室，上海 200092；4. 中铁四局集团有限公司，合肥 230023；
5. 中铁四局集团第一工程有限公司，合肥 230041）

摘要：提出了基于数字孪生(digital twin，DT)的边坡工程“及时(just-in-time，JIT)”施工安全控制策略。该策略通过引入DT技术，增强对施工过程的感知与响应能力。为提升DT技术在跨专业协同与数据复用中的适应性，进一步构建“场景-实体-关系-事件-控制”(SERIC)建模方法，以支持跨域的信息共享与协同控制。将所提出的JIT施工安全控制策略应用于黄梅山隧道改扩建工程，并融合先进的数据采集、解译与聚合技术，实现对施工状态的动态感知与精准干预。应用结果表明，该策略在提升边坡施工自动化水平、作业效率及安全管控精度方面成效显著。

关键词：边坡工程；施工安全控制；数字孪生；点云

中图分类号：U213.1^{+}3　　**文献标志码**：A

DT Based Just-in-time Construction Safety Control Strategy for Slope Engineering

ADILI Rusul[1]，*LI Xiaojun*[1,2,3]，*RUI Yi*[1,2,3]，*LÜ Yanyun*[1,2]，*WANG Shengtao*[4]，*ZHANG Lei*[5]

(1. College of Civil Engineering，Tongji University，Shanghai 200092，China；2. Engineering Research Center of Civil-Informatics of the Ministry of Education，Tongji University，Shanghai 200092，China；3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering，Tongji University，Shanghai 200092，China；4. China Railway No.4 Engineering Group Co.，Ltd.，Hefei 230023，China；5. The First Engineering Co.，Ltd. of CTCE Group，Hefei 230041，China)

Abstract：In this paper，a digital twin (DT) based just-in-time (JIT) construction safety control strategy for slope engineering is proposed. To further enhance the efficiency and precision，DT technology is integrated into the JIT safety control framework for slope construction，and a scene-entity-relationship-incident-control (SERIC) modeling method is introduced for cross-domain sharing and reuse. The proposed JIT construction safety control strategy for slope construction has been implemented in the Huangmeishan Tunnel reconstruction and expansion project，incorporating advanced methods for data acquisition，interpretation，and aggregation. The results demonstrate that the application of the JIT construction safety control strategy significantly improves the automation level，construction efficiency and accuracy of slope construction.

Keywords：slope engineering；construction safety control；digital twin；point clouds

在公路与铁路建设进程中路堑边坡是普遍存在的构筑物，其数量与规模随着基础设施建设的加速和技术进步而不断扩大，边坡的设计高度及其所面临的地质环境的复杂性亦在不断提升。此类工程项目往往规模庞大，施工现场的空间条件有限。一旦出现滑坡或崩塌等边坡失稳事件，对施工现场的机械设备和人员的生命安全构成极大威胁，因此确保边坡施工安全的重要性日益凸显。目前，大多数研究主要关注静态分析方法，如一般极限平衡法、有限元法[1-4]、概率稳定性分析法[5-6]和确定性分析法等[7]。然而，传统分析模型往往未充分考虑地质条件与施工过程的动态变化，边坡施工全过程中实时安全分析与评估手段仍显不足。主要局限体现在以下几个方面：①地质信息更新受限于各设计阶段勘察深度，难以及时纳入施工中新出现的露头地质数据，影响全评估的准确性；②边坡安全相关信息难以实现动态更新，缺乏对施工过程关键参数的实时获取与可视化手段[8]；③若施工方案发生调整，则原有结构分

收稿日期：2024-03-25
基金项目：国家重点研发计划(2024YFF0507900)；山东省重点研发计划(2021CXGC011203)；山东省住房城乡建设科技计划(2019-K7-12)
第一作者：阿迪力·如苏力，博士生，主要研究方向为智能建造。E-mail：adil@tongji.edu.cn
通信作者：李晓军，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为隧道智能建造。E-mail：lixiaojun@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

析模型往往无法同步更新,制约了施工策略的灵活调整能力。当前阶段,这些局限性可能成为边坡施工现场安全评估的瓶颈,因此应进一步开发有效的施工参数控制方法,以提供与边坡开挖过程并行的及时(JIT)施工安全控制策略。

为实现JIT施工安全控制策略的优化,准确及时地获取和控制边坡开挖参数至关重要。结构健康监测(SHM)作为一种综合监测结构体与周边环境[9-11]的先进仪器系统,被广泛视作边坡施工安全评估的关键组成部分。Peng等[12]提出一种利用贝叶斯网络融合多源监测信息的边坡安全评价方法。Xie等[13-14]基于地理信息系统(GIS)和耦合方法进行边坡安全评价,并开发了预警系统。同时,人工神经网络(ANN)与多元回归(MR)模型也在边坡安全评价中发挥了重要作用[15]。Fall等[16]提出了一种融合岩土工程实践、室内试验、GIS以及力学稳定性分析的多元方法论。此外,可视化技术和建筑信息建模(BIM)也在施工安全评估中得到了广泛应用[17-19]。Zhou等[20]将BIM模型作为实时展示工具,反映各种工况变化下相关结构部件的状态。杨雪等[21]通过二次开发技术,结合参数化BIM与有限元方法,提出了高边坡在不同工况下的稳定性快速检算整体解决方案。Cheng等[22]通过实时采集和处理施工数据,使安全和施工活动相关的信息可视化。然而,这些技术存在一定的局限性:①对于特殊地质环境和工程位置,监测仪器在边坡开挖及后续整治过程中需保持有效运行,故实现边坡的实时自动监测仍是一大挑战;②由于现有研究仅关注设计阶段的某一特定过程(如数据收集、解析或分析),因此边坡工程的设计与施工的耦合度受限,未能有效连贯各过程;③当前主流方法侧重于现场反馈控制,忽视了数值分析的预测结果,难以根据施工进度动态调整安全控制措施。

为此,提出基于数字孪生(DT)的JIT边坡施工安全控制策略。该策略主要包括数据采集、数据解译和数据聚合三大步骤:利用无人机(UAV)采集的工程数据重构工程孪生场景模型;采用基于体素的孪生模型自动化建模方法,实现开挖体孪生模型的自动建模,同时动态更新物理模型;实现边坡开挖JIT施工安全控制,并对结果进行聚合和可视化。选用“数据聚合”而非“数据分析”,是因为此处所指的数据处理涵盖了既有传统的数值分析,也包含与信息学相关的新兴方法,从而体现出一种综合处理的广义范畴。为进一步提高效率和精度,提出场景–实体–关系–事件–控制(SERIC)建模方法,作为一种DT应用模式,用于跨域的共享和重用。最后,将该策略应用于黄梅山隧道改扩建工程。

1 概念框架

现有研究表明,准确、安全且及时的边坡施工安全控制策略可以满足复杂地质条件下边坡[23-24]的安全性、稳定性等要求。“及时制”的概念源于生产工作流程,旨在减少生产系统的流动时间、成本及物料浪费[25],之后被引入计算机科学领域[26]。本文将JIT概念引入边坡工程,旨在及时控制施工安全,并减少时间消耗,提升施工控制的精确度。

边坡工程施工参数具有以下特征:①多样性,边坡施工参数涵盖了多个维度,如地形地貌参数、地质参数、气候参数、力学参数、支护结构参数、施工方法参数;②动态性,边坡施工参数并非固定不变,而是随施工进度和地质条件动态调整;③约束多元性,边坡施工参数之间存在密切的相互作用和影响,一个参数的改变可能会影响到其他参数的选择,这使得多种参数构成复杂的约束关系。因此,JIT在边坡施工中的实施不同于其他施工项目,基于实时状态优化其调度时间更具挑战性。边坡施工的动态控制流程如图1所示。可以看出,边坡施工动态控制的重点是在施工过程中利用暴露的地质和开挖参数对施工机械和人员进行调整;边坡工程的JIT施工安全控制策略对边坡工程的施工参数动态控制要求较高,施工过程中一旦有新的数据,就应及时进行边坡开挖施工方案的修订。

在边坡工程中,JIT施工安全控制策略的核心是提升效率[27-28]。近期,DT技术因其在建筑、工程与建造行业中的潜在生产力与效率增进效果而备受关注[29]。DT作为一种物理实体与虚拟镜像间的实时互动循环,能够实现实时监控、仿真及优化施工操作[30]。实质上,DT技术的核心理念与JIT追求高效的目标相一致。因此,将DT范式融入边坡工程施工安全控制流程,以提升施工效率和精度。

1.1 基于SERIC的DT建模方法

密歇根大学教授Grieves首次阐述了DT的定义[31],并指出DT原型和DT实例在DT环境中运行。在此基础上,本研究团队提出了SERIC建模方法[32-33],SERIC建模方法通过细致地划分DT的各个核心组成部分,实现对复杂系统和行业的深入理解和高效应用。该方法将DT拆解为5个关键模块,即

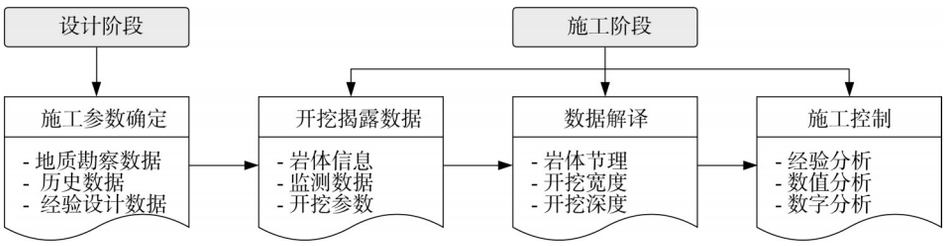


图1　边坡施工的动态控制流程

Fig.1　Dynamic control flow chart for slope construction

DT 场景(digital twin scene，DTS)、DT 实体(digital twin entity，DTE)、DT 关系(digital twin relationship，DTR)、DT 事件(digital twin incident，DTI)以及 DT 控制器(digital twin controller，DTC)。

针对边坡工程智能化需求，提出基于SERIC的边坡工程DT建模技术，通过构建全面且精细的DT模型，提升边坡工程的设计、施工、监测及管理等方面的智能化程度。

(1)DTS是特定时间、空间范围内任务与活动详细表述的环境容器，也是DTE、DTR、DTI和DTC等多元数字资源的承载平台。

(2)DTE描述了边坡工程各组成要素的几何特征、属性参数、实时状态、结构形态、内在运行机制(规则)、动态行为表现与其他实体间的连接方式。

(3)DTR用于阐述不同DTE之间的各种关联性，包括但不限于信息交互关联、空间位置关联、物理力学作用关联以及由多个DTE组成的聚合关联等。

(4)DTI记录并描述了在边坡工程DTS中发生的各类事件，如自然环境变化、工程操作行为、灾害预警信号等，有助于实时反映并预测边坡系统的动态响应。

(5)作为整个DTS的数据中枢与智能决策中心，DTC负责收集、整合、处理和分析所有DTE的实时信息，从而实现边坡工程状态的精准监控、故障诊断、优化控制和智能决策等功能。

SERIC建模方法符合经典DT范式，DTS、DTI、DTE、DTR与DTC之间的关系如图2所示。在特定的DTS中，DTI是导致物理空间和虚拟空间交互的触发器。物理空间中PEs收集到的数据被传输到虚拟空间中的DTE和DTC进行处理和分析。

1.2　JIT施工安全控制策略

边坡工程JIT施工安全控制策略中SERIC的总体范式如图3所示，其中描述了DTE(及其在物理空间中对应的PE)、DTR、DTI和DTC以及它们之间的相互关系。JIT施工安全控制策略的DTS清晰，即采用先进的现场数据采集方法，解译原始数据，并基于数据聚合快速给出施工参数，实现边坡工程JIT施工安全控制策略。边坡孪生模型、开挖体孪生模型和边坡物理模型是SERIC中需要建模的3个主要实体。利用无人机(UAV)收集工程现场的多视图图像序列，重构DTS模型；针对点云缺少语义、几何或拓扑信息等问题，提出基于体素的孪生模型自动化建模方法，实现开挖体孪生模型的自动建模。基于自动获取的边坡几何信息和地质信息，建立和更新边坡物理模型。

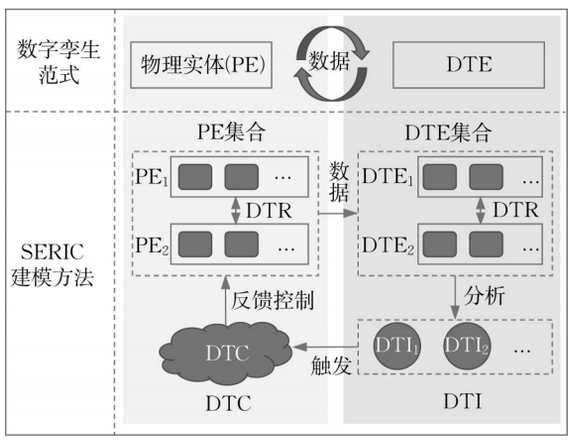


图2　基于SERIC的DT建模方法

Fig.2　DT modeling method based on SERIC

DTR模块充当了物理世界与数字世界的桥梁，实现了物理模型与数字模型之间的动态映射与同步更新。这一层数据能够精确反映实际施工过程中各项指标的变化情况，确保DTE间的时空一致性。对无人机采集的DTS点云模型数据进行解译，通过去噪、滤波、配准、分割、重构等方法，将杂乱无章的点云数据转化为具有明确特征和结构的三维点云模型。然后，将DTS模型和DTE模型映射到同一个地理坐标系中，确保与DTS和DTE之间的地理空

间要素位置相对应。依据点云模型所揭示的边坡表面形态及内部结构,结合地质力学参数,利用有限元分析软件(如GEO5等)建立边坡力学模型。分析在不同工况(如降雨、加载、开挖等)下的应力应变状态、潜在滑动面稳定性,量化边坡的物理力学作用,并与点云模型进行关联,形成可视化的力学分析结果。通过以上方法实现DTS与DTE、DTE与DTE之间的信息交互关联、空间位置关联、物理力学作用关联以及由多个DTE组成的聚合关联,如图3所示。

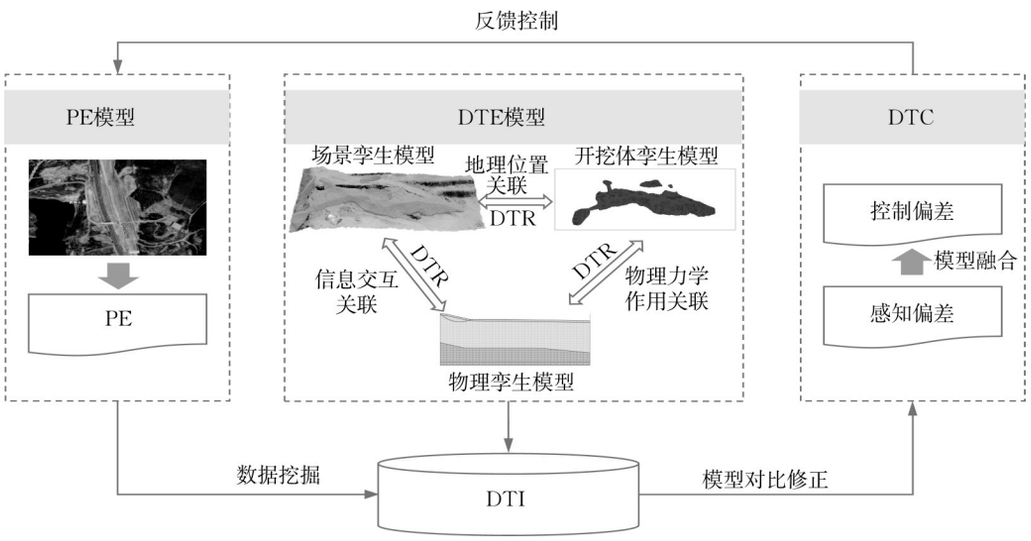


图3 边坡工程JIT施工安全控制策略

Fig.3 JIT construction safety control strategy for slope engineering

DTI负责记录差异性事件的发生,详尽描述事件背景原因与潜在风险。边坡开挖施工过程中,当基于重构的开挖体孪生模型计算获取的开挖体实际施工参数(如开挖区域、开挖宽度、开挖深度、开挖量等)与设计阶段预设的验算施工参数发生偏离时,即触发DTI的响应机制,并迅速激活DTC。DTC依据当前情况提出预警信号与相应的施工参数调整建议,确保工程安全高效地推进。

这样的闭环流程不是仅局限于单层土体开挖,而是逐层递进、迭代应用。每完成一层土体的开挖施工后,计算所得的施工参数将被反馈至边坡物理模型,以此为基础对下一层土体的开挖施工参数进行更为精准的验算和优化。通过这种方式,整个边坡开挖施工项目得以在一个严密的数据驱动与监控环境中有序进行,极大地增强了施工过程的安全性与可控性,同时也极大地提高了工程建设的整体效率。

2 工程应用

2.1 工程背景

试验对象为黄梅山隧道改扩建工程,该项目位于中国安徽省马鞍山市,海拔37.63~80.90 m。采用两侧加宽、原隧道改路堑方案,对既有黄梅山隧道进行拆除,边坡开挖断面如图4所示。勘察资料表明,上覆土层主要为人工填土、第四系全新统冲积层,下伏基岩为侏罗系上统凝灰岩和燕山期闪长玢岩安山岩。

本段边坡采用自上而下水平分台阶式开采方式,最大开挖深度为59.3 m,设计坡率为1.00~1.25。施工动态坡度要求缓于1:2,层间留设台阶,平台宽度为4~6 m。每8 m一级,1~6级边坡坡率为1:1,7级边坡坡率为1:1.25;3级坡设置10 m宽平台,其余平台宽度为2 m,如图4所示。隧道段路基土石方开挖工程量约为160万m^3。在开挖过程中采用JIT施工安全控制策略,利用DT技术实现实时、精细化的进度管理,确保施工任务严格按照预定计划执行。

2.2 数据获取

使用Phantom 4 RTK型无人机采集数据。数据的时间跨度为2022年3月21日至2022年9月30日,数据采集频次为3天1次(见图5),总共采集64组点云数据。点云数据生成过程中,存在将施工车辆和施工机械等物体识别成地面点的错误。为此,采用CSF(cloth simulation filter)过滤算法[34],减少杂物对计算精度的影响。

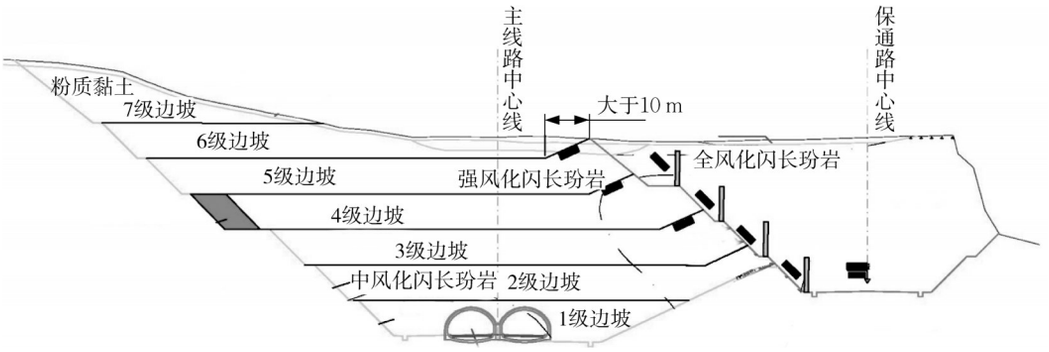


图4　边坡开挖断面

Fig.4　Cross section of the slope

a 规划路线　　b 实时动态(RTK)定位

图5　基于无人机的数据采集

Fig.5　UAV-based data acquisition

2.3　数据解译

2.3.1　边坡工程DTS模型的建立

基于无人机技术自动化建立DTS模型（见图6）。无人机按照规划好的路径和视点进行飞行和拍照，获取工程现场的二维图像。对不同视角下的序列图片进行特征检测和匹配，找出每对图像之间相同的特征点。采用stereo vision[35]和multi-view stereo（MVS）[36]方法计算特征点在不同视角间的视差，视差反映了同一物理点在不同相机位置下的投影差异，从而间接得到这些点的深度信息。根据已知的相机内参（焦距、光心等）、外参（相机姿态矩阵）以及视差信息，利用三角化算法将同一特征点在不同图像上的二维坐标转换为三维空间坐标。在多视图情况下，采用Bundle Adjustment算法[37]进行全局优化。通过以上步骤，将匹配好的特征点生成初始的稀疏点云，即仅包含关键特征点的三维坐标。采用半全局匹配（semi-global matching，SGM）[38]、光度立体匹配[39]方法估算非特征点的深度，生成稠密点云。对生成的点云进行滤波、平滑、降噪、表面重构等一系列后处理操作，即可得到DTS模型。

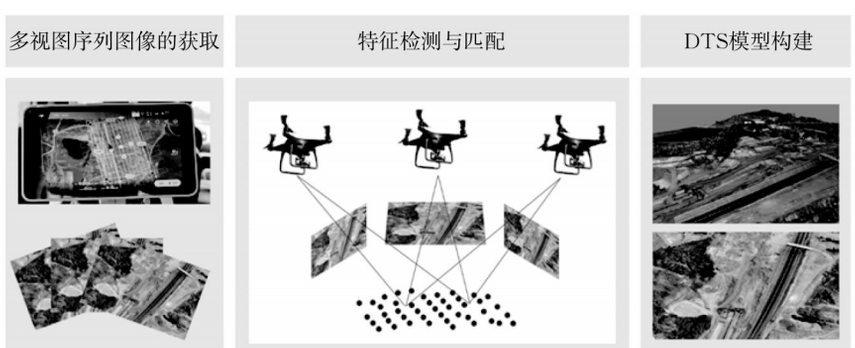


图6　基于无人机的DTS模型自动化建立方法

Fig.6　Automated establishment method of DTS model based on UAV

2.3.2 DTE模型自动化建立

2.3.2.1 开挖体孪生模型自动化建立

基于无人机构建的边坡点云模型通常是非结构化的,不包含对象的语义、几何或拓扑信息,导致无法直接获取边坡工程几何参数和不同开挖区域的开挖深度、开挖宽度、开挖坡度等施工参数。因此,本文提出基于体素的孪生模型自动化建模方法,如图7所示。

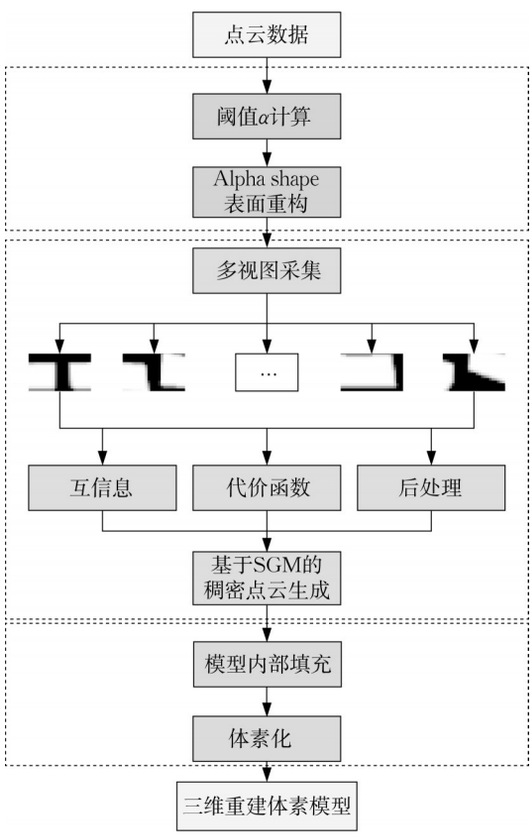


图7 基于体素的孪生模型自动化建模流程

Fig.7 Flow chart of automated modeling of voxel-based twin models

基于开挖前后2个时刻的DTS模型,通过自动化差异分析并重构得到开挖体孪生模型。首先,对每个维度的点云数据进行方差计算,取最大方差的维度作为分割轴。对当前数据按分割轴维度进行检索,找到中位数数据,完成节点的确定,并根据分割轴维度确定划分分支,完成K-D树的构建。其次,遍历开挖前DTS模型中的点云数据,获取点云的坐标$\boldsymbol{P}_n(x_n,y_n,z_n)$,迭代判断K-D树分支,再找到开挖后DTS模型中离$\boldsymbol{P}_n$最近的点云$\boldsymbol{T}_m(x_m,y_m,z_m)$。最后,基于差异因子得到差异模型。差异因子$\eta$是评定模型是否存在差异的一个重要指标,计算式为

$$\eta=\frac{d(\boldsymbol{P}_n,\boldsymbol{T}_m)}{R} \tag{1}$$

式中:$d(\boldsymbol{P}_n,\boldsymbol{T}_m)$为参考点云与目标点云间的距离;$R$为点云分辨率。$\eta\leqslant1$说明开挖前后模型中对应点云不存在差异,$\eta>1$说明开挖前后模型中对应点云存在差异,如图8所示。基于K-D树的差异分析方法避免了全局空间搜索,从而降低时间复杂度、提高建模效率。

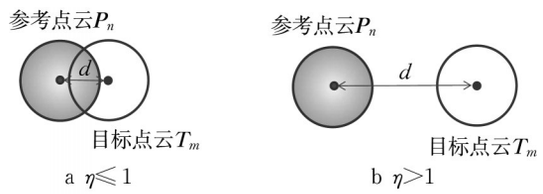


图8 差异因子的计算原理

Fig.8 Calculation principle of the difference factor

由于初始开挖体点云模型存在缺失、开口和密度不均匀等问题,因此有必要对点云进行稠密重构。对于三维空间中的离散点云,给定半径为r的球体,绕点云表面滚动,若$d\geqslant r$则表明3个点$\boldsymbol{P}$、$\boldsymbol{P}_i$、$\boldsymbol{P}_j$为边界三角形,组成一个三角网格,如图9所示。通过迭代计算,输出三角网格模型。

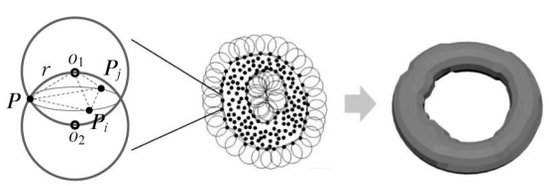


图9 表面重构计算方法示意

Fig.9 Schematic diagram of surface reconstruction calculation method

基于三角网格模型,在模型空间中生成虚拟相机,采集三角网格模型多视图图像信息,进行逐像素立体匹配,计算多视图图像信息每个像素的最优视差。然后,在每个像素视差的基础上,将像素转换为稠密点云。为赋予点云模型几何和拓扑信息,对重构的稠密开挖体几何模型进行填充和体素化操作。将稠密的点云数据以间距等于点云分辨率R的平面组切割(见图10a),点云投影到平面生成封闭区域(见图10b),最后基于种子填充(seed filling,SF)算法对模型内部空洞区域进行填充(见图10c、d)。

通过将点云数据转换为体素数据,可实现对原始点云的离散化与规则化处理。以点云模型中点云最大、最小值顶点$(X_{\max},Y_{\max},Z_{\max})$和$(X_{\min},Y_{\min},Z_{\min})$为对角顶点构成长方体包围盒,以最小顶点$(X_{\min},Y_{\min},Z_{\min})$为原点,建立一个与三维欧氏空间坐标轴

对齐的整数网格坐标系，从而构建体素空间Z^3。给定体素尺寸a，将体素空间Z^3划分为$N=\lceil(L_xL_yL_z)/a^3\rceil$个方块区域。体素空间是三维离散空间，也是三维欧氏空间的子空间($Z^3\in\mathbf{R}^3$)，每一整数组合序列(i_v,j_v,k_v)能唯一确定第v个体素。基于上述体素模型，可进一步通过体素尺寸a及单元数量化边坡的开挖深度、开挖宽度与土方量等关键参数(见图11)。

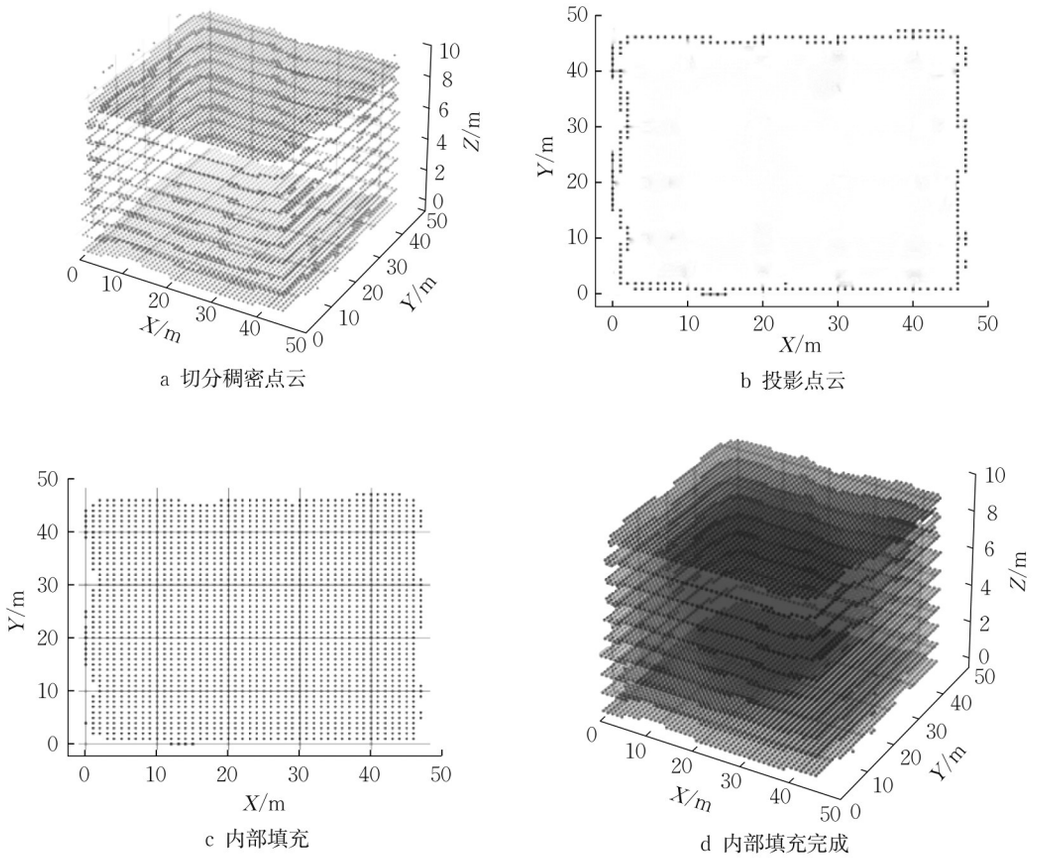


图10　基于种子填充算法对模型内部空洞区域进行填充

Fig.10　Model internal filling based on the seed filling algorithm

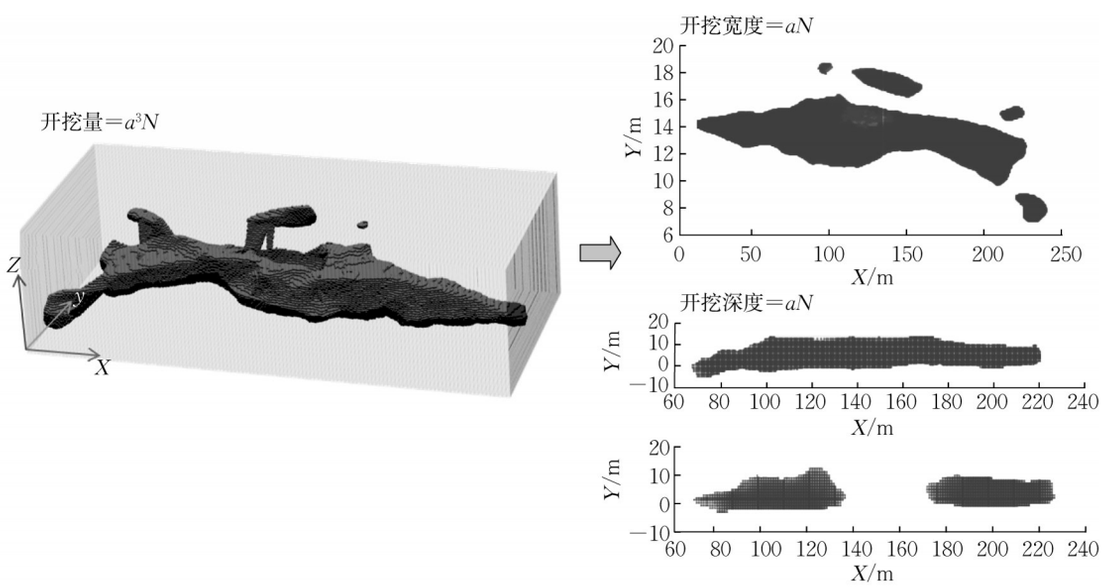


图11　基于体素的开挖体孪生模型

Fig.11　Excavation body twin model based on voxel

2.3.2.2 边坡物理孪生模型的建立

在路堑开挖安全验算物理孪生模型建立过程中,根据设计要求和实际情况采用暴雨工况参数。选择Bishop法作为计算方法,并选用GEO5软件进行计算。在软件中绘制路堑的几何模型,然后输入地质和工程参数,如土体的强度参数、地下水位数据以及荷载参数,如表1所示。定义边界条件,包括土体的边界约束和支护结构的设置。随后,利用Bishop法进行路堑开挖的稳定性分析,评估路堑的稳定性系数,以判断可能出现的失稳情况。根据计算结果,评估路堑是否满足设计要求,并在必要时调整支护结构或加固土体。

2.4 数据聚合

黄梅山边坡工程岩样主要为强风化闪长玢岩、局部为中风化闪长玢岩(饱和单轴抗压强度6.0 MPa),节理裂隙发育,完整性较差,易被风化成碎块状,为不稳定边坡。在K4+300~K4+350施工段,地质条件复杂多变。通过边坡DTS模型获取第6级边坡地质信息,该地层为强风化闪长玢岩,黄褐色,块状构造,岩质软硬不均,裂隙发育,属于Ⅳ级软石,原设计参数为强风化凝灰岩。已开挖的实际坡角为48°,较原设计理论值45°出现了明显偏移。从DTS模型中获取的边坡几何参数和地质参数(见图12),包括坡面斜率、边坡高度、平台宽度、岩性等数据,推送至物理孪生模型,对边坡稳定性进行计算验证。

表1 岩土参数取值

Tab.1 Geotechnical parameters

岩土名称	暴雨工况		
	重度/(kN·m^{-3})	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
填土	20.0	13.0	15.0
粉质黏土	20.5	12.0	13.0
强风化凝灰岩	21.5	36.0	20.0
全风化闪长玢岩	20.0	18.0	18.0
强风化闪长玢岩	22.0	36.0	20.0
中风化闪长玢岩	23.0	140.0	23.0

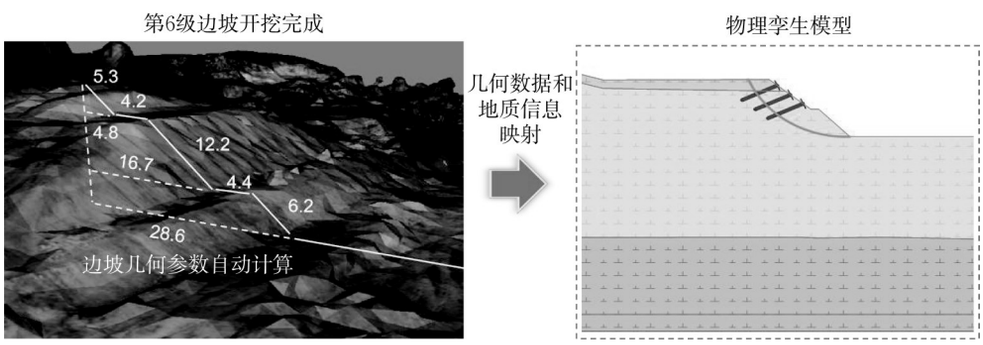


图12 边坡几何参数和地质参数获取

Fig.12 Acquisition of geometric and geological parameters

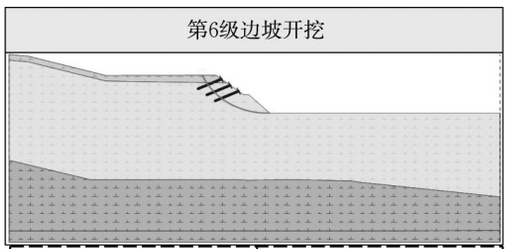
从图13可见,第6级边坡较稳定,未达到触发DTI响应机制条件。实际坡度与设计坡度之间有明显的偏差,仍需验算后续边坡开挖参数。在安全系数1.30的前提下,第5级边坡设计坡角适当减小至46°,每个施工区域内应进行分段分层开挖,每一层的开挖深度应控制在4 m内,严禁超挖。

在第5级边坡施工过程中,通过几何孪生模型提取实际开挖参数,并将其与更新后的理论开挖参数进行对比分析,结果发现在施工区域1(里程桩号K4+305~K4+325)存在超挖现象(见图14)。经过物理模型验算,此时安全系数低于1.30,自动触发DTI响应机制,记录当前发生的事件。随即DTC给出控制策略,在预定的时间以内施作防护,采用锚索框架加固,锚索长度30 m,确保高边坡及时加固。

与传统人工分析方法相比,黄梅山边坡工程的JIT施工安全控制大大节省了时间。基于无人机获取的数据,利用JIT施工安全控制策略自动对结果进行聚合和可视化,整个过程在1 h内即可完成。数据聚合允许不同的利益相关者查看和检查施工结果。

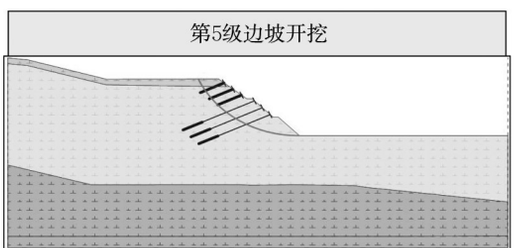
3 试验结果及分析

精准获取边坡几何参数和施工参数对施工安全控制至关重要,因此有必要对DT模型精度进行验证。为验证DTS模型的精度,对施工现场不同部位的高度差进行实测。从点云模型中提取相应计算值,利用均方根误差对所有检查点误差进行分析。将均方根误差和平均实测长度的比值作为误差率,以X向和Y向长度误差表征模型X向和Y向精度,以顶部高度差表征模型Z向精度。点云模型X、Y、Z3个方向及三维精度计算式分别为:



下滑力的总和，F_a/kN	1 593.68	下滑力的总和，F_a/kN	1 546.05
抗滑力的总和，F_p/kN	2 254.00	抗滑力的总和，F_p/kN	2 639.91
下滑力矩，M_a/(kN·m)	43 316.31	下滑力矩，M_a/(kN·m)	39 563.43
抗滑力矩，M_P/(kN·m)	61 263.71	抗滑力矩，M_P/(kN·m)	67 555.24
安全系数	1.41	安全系数	1.71

a 第6级边坡稳定性分析结果(每延米)



下滑力的总和，F_a/kN	3 445.98	下滑力的总和，F_a/kN	3 757.95
抗滑力的总和，F_p/kN	4 416.81	抗滑力的总和，F_p/kN	5 391.73
下滑力矩，M_a/(kN·m)	143 283.80	下滑力矩，M_a/(kN·m)	155 240.73
抗滑力矩，M_P/(kN·m)	183 650.51	抗滑力矩，M_P/(kN·m)	222 732.17
安全系数	1.28	安全系数	1.43

b 第5级边坡稳定性分析结果(每延米)

图 13　边坡稳定性动态验证

Fig.13　Dynamic verification of slope stability

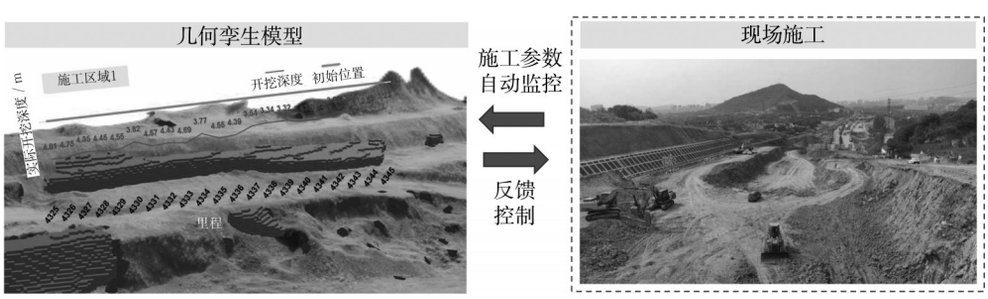


图 14　边坡施工安全控制

Fig.14　Construction safety control of the slope

$$S_T=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(T_i-T_i')^2}\,,\ T=X,Y,Z \tag{2}$$

$$S=\sqrt{S_X^2+S_Y^2+S_Z^2} \tag{3}$$

式中：T_i和T_i'为X、Y、Z 3个方向第i段现场实测值和模型分析值；S为均方根误差。相应的计算结果如表2所示，X、Y、Z向及三维误差率均在1%以内，精度满足要求。

此外，开挖体孪生模型精度会直接影响施工参数的准确度。为评估开挖体孪生模型的准确率和效率，采用交并比评估模型精度。人工提取原始点云中已经施工的部位(见图15a、b)，将其点云数据投影至二维平面，根据投影边界，计算投影面积A。随后，采用基于体素的孪生模型自动化建模方法进行同样处理，得到面积B(见图15c)。计算得到交并比为

$$\alpha_{\mathrm{IoU}}=\frac{A\cup B}{A\cap B}=\frac{AB}{A+B-AB} \tag{4}$$

表2 DTS模型精度

Tab.2 Accuracy of DTS model

位置	X向			Y向			Z向			三维
	实测值/mm	计算值/mm	误差/mm	实测值/mm	计算值/mm	误差/mm	实测值/mm	计算值/mm	误差/mm	
西侧	5 002	5 010	8	5 001	5 004	3	1 002	1 005	3	
中间	4 981	4 993	12	4 991	4 999	8	1 001	996	5	
东侧	4 998	5 004	6	5 007	5 005	2	998	1 001	3	
均方根误差	9.02			5.07			3.79			11.02
误差率/%	0.18			0.10			0.38			0.43

式中:A和B分别为提取边界和实际边界的面积;A和B的乘积为提取边界框和实际边界框的交集面积;$A+B-AB$为并集部分面积。

由表3可见,该方法提取的差异模型平均准确率为96.55%。从图15d可以看出,该方法具有较高的精度,但在施工量较小部位存在一定误差。

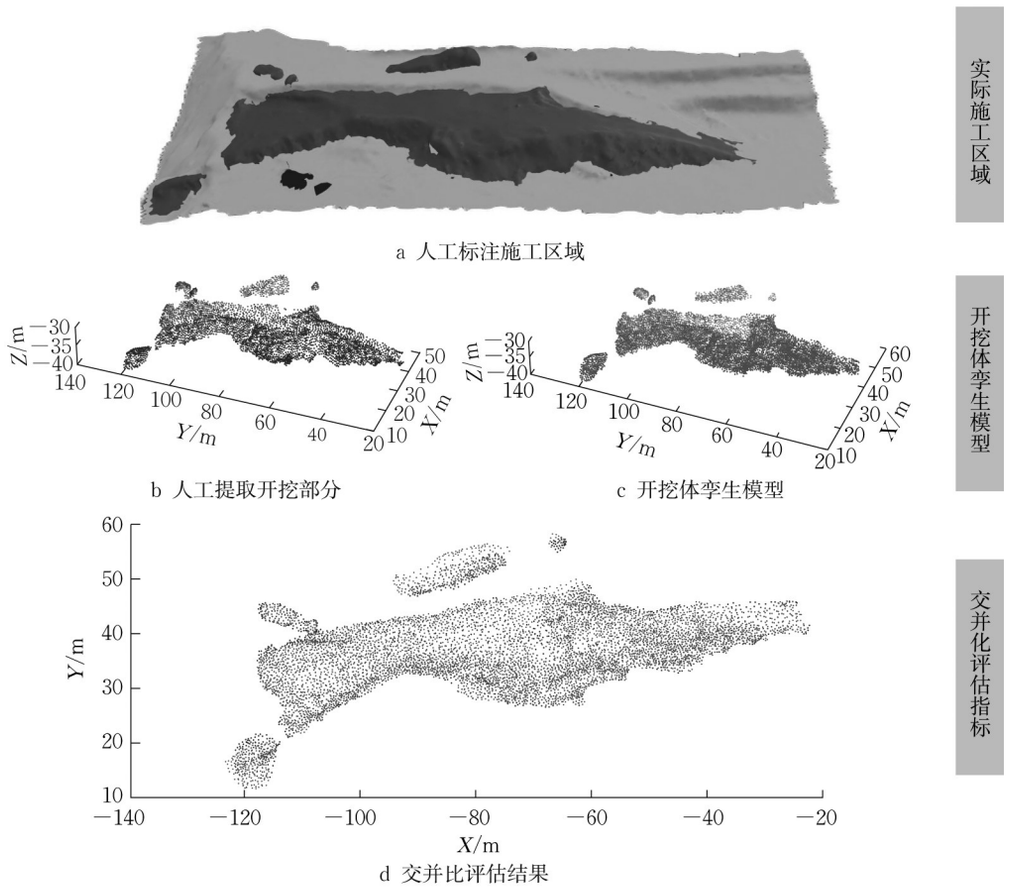


图15 开挖体孪生模型精度评估

Fig.15 Accuracy assessment of excavation body twin model

表3 开挖体孪生模型的交并比评估

Tab.3 IoU assessment of excavation body twin model

编号	计算开挖面积/m^2	实际开挖面积/m^2	交并比/%	平均值/%
1	1 553.36	1 514.96	95.23	96.55
2	1 121.92	1 143.19	97.21	
3	2 328.34	2 355.48	96.37	
4	1 037.15	1 019.22	97.39	

4 结 语

(1)通过JIT边坡施工安全控制策略,在施工过程中,可及时获取可用相关数据,实现施工参数动态分析和调整。系统阐述了JIT施工安全控制策略的概念和要求,以及影响JIT施工安全控制性能策略的关键指标。JIT施工安全控制策略的实施可分为

3个步骤，现场原始数据采集、数据解译和数据聚合。

（2）提出基于体素的DT模型自动化建模方法。该方法可实现开挖体模型的自动分离、稠密重构及体素化表达，并为点云对象赋予语义、几何与拓扑信息，从而增强模型的结构表达能力与可计算性。工程案例验证结果显示，该方法的平均建模精度达到96.55%，能够满足边坡施工安全控制的工程应用需求。

（3）基于DT模型的JIT边坡施工安全控制策略已在黄梅山隧道改扩建工程中成功应用。实践表明，该方法能够动态响应施工现场变化，提供高效、准确的决策支持，显著提升施工安全管理水平。同时，该方法还促进了施工各方之间的信息共享与协同，有利于工程项目管理的系统化与透明化。

作者贡献声明：

阿迪力·如苏力：负责论文的整体构思与框架设计。

李晓军：负责建模方法的开发与应用。

芮　易：参与数字孪生模型的构建与优化。

吕艳云：负责整理和分析实证数据。

王圣涛：提供实际工程实施建议。

张　磊：提供实际工程实施建议。

参考文献：

[1] XIE M, ESAKI T, CAI M. A time-space based approach for mapping rainfall-induced shallow landslide hazard [J]. Environmental Geology, 2004, 46(6): 840.

[2] DUNCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7): 577.

[3] MCCOMBIE P F. Displacement based multiple wedge slope stability analysis [J]. Computers & Geosciences, 2009, 36(3): 332.

[4] WANG Chao, ZHANG Sherong, DU Chengbo, *et al*. A real-time online structure-safety analysis approach consistent with dynamic construction schedule of underground caverns [J]. Journal of Construction Engineering and Management : ASCE, 2016, 142(4): 04016042.

[5] DAI Fuchu, LEE C, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview [J]. Engineering Geology, 2002, 64(1): 65.

[6] PATHAK D, GHARTI H, SINGH A, *et al*. Stochastic modeling of progressive failure in heterogeneous soil slope [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(1): 113.

[7] CHO S E. Probabilistic stability analyses of slopes using the ANN-based response surface [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 787.

[8] CHENG T, TEIZER J. Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications [J]. Automation in Construction, 2013, 34: 3.

[9] DING L Y, ZHOU Cheng, DENG Qingxu, *et al*. Real-time safety early warning system for cross-passage construction in Yangtze Riverbed Metro Tunnel based on the Internet of Things [J]. Automation in Construction, 2013, 36: 25.

[10] WANG W C, LIU J J, CHOU S C. Simulation-based safety evaluation model integrated with network schedule [J]. Automation in Construction, 2006, 15(3): 341.

[11] MARR W A. Instrumentation and monitoring of slope stability [C]// Proceedings of the Geo-Congress 2013, Stability and Performance of Slopes and Embankments Ⅲ. San Diego, CA: [s.n.], 2013: 2224-2245.

[12] PENG Ming, LI Xueyou, LI Dianqing, *et al*. Slope safety evaluation by integrating multi-source monitoring information [J]. Structural Safety, 2014, 49: 65.

[13] XIE M, ESAKI T, CAI M. A GIS-based method for locating the critical 3D slip surface in a slope [J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(3): 267.

[14] XIE M, ESAKI T, ZHOU G. GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model [J]. Natural Hazards, 2004, 33(2): 265.

[15] ERZIN Y, CETIN T. The prediction of the critical factor of safety of homogeneous finite slopes using neural networks and multiple regressions [J]. Computers & Geosciences, 2013, 51: 305.

[16] FALL M, AZZAM R, NOUBACTEP C. A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping [J]. Engineering Geology, 2006, 82(4): 241.

[17] MAHALINGAM A, KASHYAP R, MAHAJAN C. An evaluation of the applicability of 4D CAD on construction projects [J]. Automation in Construction, 2010, 19(2): 148.

[18] WANG Huajian, ZHANG Jianping, CHAU K, *et al*. 4D dynamic management for construction planning and resource utilization [J]. Automation in Construction, 2004, 13(5): 575.

[19] CHENG T, TEIZER J. Real-time data collection and visualization technology in construction [C]// Proceedings of the Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice. Banff: [s.n.], 2010: 339-348.

[20] ZHOU W, WHYTE J, SACKS R. Construction safety and digital design: a review [J]. Automation in Construction, 2012, 22: 102.

[21] 杨雪，苏谦，牛云彬，等. 基于BIM + 数字孪生的高边坡施工检算动态反馈方法 [J]. 科学技术与工程，2023，23(20)：8812.

YANG Xue, SU Qian, NIU Yunbin, *et al*. Dynamic feedback method of high slope construction check calculation based on BIM + digital twin [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8812.

（下转第1456页）