

李政, 吴斌平, 赵梦琦, 等. 考虑机械故障影响的碾压混凝土坝施工进度 SD-DES 耦合可视化仿真[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 94-106. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.008

LI Zheng, WU Binping, ZHAO Mengqi, et al. A coupled SD-DES visual simulation model for scheduling of roller compacted concrete dam construction considering mechanical failure[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 94-106. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.008

考虑机械故障影响的碾压混凝土坝施工进度 SD-DES 耦合可视化仿真

李 政, 吴斌平, 赵梦琦, 王佳俊

(天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

摘要:【目的】碾压混凝土坝(roller compacted concrete dam, RCCD)施工过程仿真方法为分析大坝施工的复杂动态系统提供了科学有效的技术手段。传统的离散事件仿真(discrete event simulation, DES)方法在仿真过程中虽然考虑了影响施工进度的主要因素(混凝土生产、运输入仓和施工降雨等),但未有效考虑仓面作业中施工机械故障情况对施工过程的影响,施工进度仿真结果的准确性以及三维可视化展示效果有待进一步提高。针对以上情况,在传统施工仿真的基础上结合系统动力学(system dynamics, SD)提出了考虑机械故障的RCCD施工SD-DES耦合可视化仿真方法。【方法】首先,基于系统动力学建立了仓面施工机械故障SD模型,从而实现仓面施工中碾压机作业、故障、维修等行为的因果关系分析;其次,以传统施工进度DES仿真模型为基础,耦合机械故障SD模型建立RCCD施工SD-DES耦合仿真模型,并以碾压施工时间作为耦合模型的接口变量,从而实现模型的数据通信和交互,有效提高了仿真结果的准确性;再次,将系统仿真技术与可视化技术结合,基于Unity 3D构建大坝施工三维动态场景,实现基于仿真结果的施工过程的三维动态可视化展示;最后,以我国西南地区某高碾压混凝土坝工程为例进行施工仿真分析与成果展示。【结果】相比于传统DES模型仿真结果(与实际偏差2.49%),基于SD-DES耦合模型的仿真结果(与实际偏差0.28%)更加贴近实际情况,同时三维动态可视化展示水平得到进一步提升。【结论】研究表明,SD-DES耦合可视化仿真方法能够有效考虑施工机械故障对施工进度的影响,提高仿真精度和施工过程的可视化表现能力,有助于大坝施工方案的合理制定和现场施工的管理决策。

关键词: 系统动力学; 机械故障; SD-DES 耦合; 碾压混凝土坝; 施工可视化仿真; 混凝土; 水利工程

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.008

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV512

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0094-13



与作者互动
请扫描二维码

收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-08-22; 录用日期: 2024-08-22; 网络出版日期: 2025-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51839007, 51879186); 天津市自然科学基金项目(17JQCNC07100)

作者简介: 李 政(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事碾压混凝土坝施工仿真研究。E-mail: tjulizheng@tju.edu.cn

通信作者: 吴斌平(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水利水电工程施工仿真与实时监控研究。E-mail: wubinping@tju.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

A coupled SD-DES visual simulation model for scheduling of roller compacted concrete dam construction considering mechanical failure

LI Zheng, WU Binping, ZHAO Mengqi, WANG Jiajun

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: [Objective] The simulation method of the construction process of roller compacted concrete dam (RCCD) provides a scientific and effective technical means for analyzing the complex dynamic system of dam construction. The traditional discrete event simulation (DES) method considers the main factors affecting the construction schedule (such as concrete production, concrete transportation, and construction rainfalls) in the simulation process. However, the influence of construction machinery failure on the construction process in the warehouse surface operation is not effectively considered, and the accuracy of the construction progress simulation result and the three-dimensional visualization display effect need to be further improved. To address the aforementioned challenges, a coupled SD-DES visual simulation method for RCCD construction considering mechanical failures is developed through the integration of system dynamics (SD) with conventional construction simulation approaches. [Methods] First of all, the SD model of mechanical failure in silo construction was established based on system dynamics, so as to realize the causality analysis of the behavior of the roller operation, failure, and maintenance in the storehouse construction. Secondly, based on the traditional DES simulation model, the coupled SD-DES simulation model of RCCD construction is established by coupling the SD model of mechanical failure and taking the time of roller compacted construction as the interface variable of the coupled model, so as to realize the data communication and interaction of the model, which effectively improves the accuracy of the simulation result. Then, the system simulation technology is combined with the visualization technology to construct a three-dimensional dynamic scene of the dam construction based on Unity 3D to realize the three-dimensional dynamic visualization display of the simulation result. Finally, taking a high roller compacted concrete dam project in the southwestern region of China as an example, construction simulation analysis and result display were conducted. [Results] Compared with the traditional DES model simulation result (deviation of 2.49% from the actual), the simulation result based on the coupled SD-DES model (deviation of 0.28% from the actual) are more in line with the actual situation, and the level of three-dimensional dynamic visualization display has been further enhanced. [Conclusion] The study demonstrates that the coupled SD-DES visualization simulation method effectively accounts for the impact of construction machinery failures on construction schedules, enhances simulation accuracy and visualization capabilities of the construction process, and contributes to the rational formulation of dam construction plans and informed management decisions for on-site construction.

Keywords: system dynamics; machinery failure; SD-DES coupling; roller compacted concrete dam; construction visualization simulation; concrete; water conservancy projects

0 引言

碾压混凝土坝具有施工速度快、质量安全可靠等优点^[1], 然而其施工过程复杂且受众多随机因素影响, 简单的数学模型难以满足进行准确量化分析和预测的要求^[2-3], 计算机仿真技术的发展尤其是离散事件仿真技术为分析大坝施工的复杂动态系统提供了科学且有效的技术手段^[4-6]。大坝施工过程中, 仓面作业是其关键环节, 由于众多施工机械和人员在同一时空作业, 施工环节较多且过程复杂, 施工进度容易受到多种因素影响。其中, 施工机械受到施工时间、仓面环境、不良天气条件以及不利人为因素等影响极易发生故障, 进而导致进度拖延。然而, 目前以离散事件仿真方法为基础的施工进度仿真模型在考虑和分析机械故障对施工进度影响方面存在一定的不足, 一

一定程度上影响了仿真结果的准确性。此外, 当前碾压混凝土坝施工仿真表现形式主要以数值仿真和二维展示为主, 在三维动态可视化展示方面还需进一步提高^[7]。因此, 有必要在现有研究的基础上合理考虑机械故障对碾压混凝土坝施工进度的影响, 建立更加科学、准确的仿真模型, 并进一步提高可视化仿真水平。

随着计算机性能的不断提升和仿真软件的持续创新, 自 JURECHA 等^[8]首次提出了混凝土重力坝浇筑方案仿真方法并成功应用于实际工程以来, 众多学者开展了一系列碾压混凝土坝施工仿真技术的研究, 取得了丰富的研究成果。罗伟等^[9]建立了包含混凝土生产、运输和仓面作业三大子系统的动态仿真模型, 实现了对大坝施工过程的全面模拟; 赵春菊^[10-11]综合考虑三大子系统在大坝施工过程中的相关作用, 建

立了仓面作业仿真模型以及基于子系统耦合的混凝土生产调度智能模型, 实现了混凝土生产、运输和仓面施工资源配置优化; 常昊天等^[12]综合考虑各种施工约束条件建立了耦合动态合仓的全过程仿真模型, 并通过工程分析验证了模型的可靠性; 钟登华等^[13]基于离散事件仿真并结合实时监控技术和可视化技术, 通过建立仓面施工精细化仿真模型实现了对仓面作业过程的精细化仿真和三维动态可视化分析; 杜志达等^[14]将入仓口作为特殊因素建立了基于离散事件仿真的仓面施工仿真模型, 并模拟了其施工过程; 韩志忠^[15]开展了碾压混凝土坝施工仿真模型的参数对施工工期影响程度的分析研究。董京艳等^[16]通过离散事件仿真开展大坝施工过程仿真计算, 为施工方案的制定提供了技术支持。

以上众多学者对碾压混凝土坝仿真开展了广泛深入的研究, 从单个系统的模拟到大坝施工过程的全面仿真, 从面向设计阶段的静态仿真研究到面向施工阶段的动态仿真, 施工仿真技术理论与实践在各个方面均得到了丰富的成果。然而, 仓面施工作业中的机械设备由于受到多种因素的影响极易发生故障进而导致施工进度拖延。在大坝施工过程中, 仓面施工作业是其核心环节, 目前碾压混凝土坝传统施工仿真中考虑了混凝土生产、运输入仓以及天气降雨等外界因素对仓面施工作业的影响, 但忽略了机械故障对施工进度的影响, 同时也缺乏对机械故障后仓面作业过程的有效分析。在其他仿真领域中, 已有部分学者研究了机械故障对施工进度的影响, 如高拱坝仿真中的缆机故障^[17], 碾压混凝土坝仿真中的生产系统故障^[18], 地下洞仿真中的施工机械故障等^[19-20], 但上述研究仅考虑了机械故障对施工进度的单向影响, 并未考虑两者之间的因果反馈关系, 一定程度上影响了仿真结果的准确性。

系统动力学具有表征系统因果反馈的能力, 因此可以从动态的角度出发, 依据系统内部各因素之间的因果反馈关系构建系统模型, 从而发现系统潜在的行为, 目前在人类社会和自然科学领域的多个方面得到广泛应用, 包括经济和政策分析^[21-22]、优化控制^[23]、系统预测^[24-25]和风险分析^[26-27]等。在机械设备方面, 任天翔等^[28]建立了施工设备维修对工程进度影响的 SD 模型; 黄建文等^[29]构建了综合考虑机械设备在内的多种因素影响的碾压混凝土坝资源配置 SD 模型, 分析各因素对实际施工进度偏差的影响。以上研究为本文建立机械故障 SD 模型实现仓面作业系统内机械故障对施工进度影响分析提供了良好的

理论基础。

近年来, 将 SD 模型与其他模型相结合的混合建模方法在解决复杂系统问题时得到了广泛应用。MORADI 等^[30]提出了一种 SD-DES 混合建模方法来模拟建筑项目中的劳动生产率, 通过综合考虑不同影响因素提高了预测结果准确性; TAHA 等^[31]提出了一种结合 SD 和 DES 的混合动态方法来研究不同风险对建设项目成本的影响, 通过工程应用验证了模型的有效性; ZHU 等^[32]基于多代理模型和 SD 模型进行仿真, 研究了资源共享对智能制造效率的影响; BAI 等^[33]提出了一种基于 SD 和 DES 的混合共享资源分配模型, 通过项目管理案例研究, 验证了模型的有效性和优越性; 以上研究通过混合建模方法充分发挥各个模型的优势, 有效提高了混合模型的性能。在施工仿真方面, 也有部分学者开展了相关研究。毕磊^[34]建立了地下洞室群机械设备故障与施工工期相互影响的 SD 和 DES 耦合仿真模型, 实现了对施工工期更准确地预测; 赵梦琦等^[35]建立了地下洞室群施工进度纠偏策略的 SD 模型, 并将其与离散事件仿真模型结合, 通过实际工程应用验证了这一耦合模型的卓越性能。任炳昱等^[36]通过将基于多智能体的仿真与建模方法和 SD 方法结合进行混合建模, 降低了仿真工期偏差率, 实现了工程仿真结果准确性的提高。

综上所述, 针对碾压混凝土坝施工仿真领域以及系统动力学领域的研究, 在各个方面都取得了较为丰富的成果。但仍然存在以下不足之处: 目前研究中未考虑施工过程中的机械设备故障对碾压混凝土坝仓面施工进度影响, 缺乏对仓面作业系统内机械设备故障与施工进度之间的影响机制分析, 难以准确描述仓面施工过程的复杂性和真实情况。虽然少数学者考虑了机械故障对施工进度的单向影响, 并未考虑两者之间的因果反馈关系, 一定程度上影响了仿真结果的准确性。另外还有部分地下洞仿真学者考虑了上述两者之间的影响关系, 但缺乏对质量因素的考虑, 因此其仿真结果的准确性有待进一步提高。此外, 还存在仿真结果可视化展示方式较为简单的不足, 其可视化效果和水平需进一步提高。

针对以上问题, 本文开展考虑机械故障的碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合可视化仿真研究: 首先, 引入系统动力学方法建立施工机械 SD 模型, 在考虑施工质量的同时揭示机械故障对施工进度的影响机制, 全面准确的分析仓面施工过程; 其次, 在传统 DES 仿真模型基础上耦合机械故障 SD 模型建立考虑机械故障的 SD-DES 耦合仿真模型, 实现了对仓面作业系

统的深入分析与模拟,从而提高了施工仿真结果的准确性;最后,将上述耦合模型与可视化技术结合,建立考虑机械故障的碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合可视化仿真模型,通过可视化仿真模型将仿真成果以更加生动、直观的方式呈现出来,实现仿真结果可视化展示水平的进一步提高。

1 研究框架

本研究提出的考虑机械故障的碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合可视化仿真模型的整体研究框架如图 1 所示,包括三个部分,分别为参数层,模型层和应用层。

在参数层,数据集包括两个部分,施工组织设计数据集和施工日志数据集。前者包括大坝体型控制、

机械控制、高差约束和时间约束等参数,以及混凝土入仓方案和合仓分仓方案等。后者包括施工机械设备故障记录和维修记录等参数。以上参数作为仿真模型的输入参数和边界条件。

模型层由施工进度 DES 模型、机械故障 SD 模型和三维可视化模型组成。其中,机械故障 SD 模型通过应用系统动力学方法有效的揭示了机械故障对施工进度的影响关系,通过与施工进度 DES 模型进行耦合,实现了对传统仿真模型的改进。在 DES 与 SD 耦合仿真模型中,以碾压施工时间作为接口变量实现数据通信与交互,实现了机械故障对施工进度影响的科学考虑。最后,将可视化仿真技术与上述耦合仿真模型相结合建立三维动态可视化模型,实现基于仿真结果的碾压混凝土坝施工过程三维可视化动态展示。

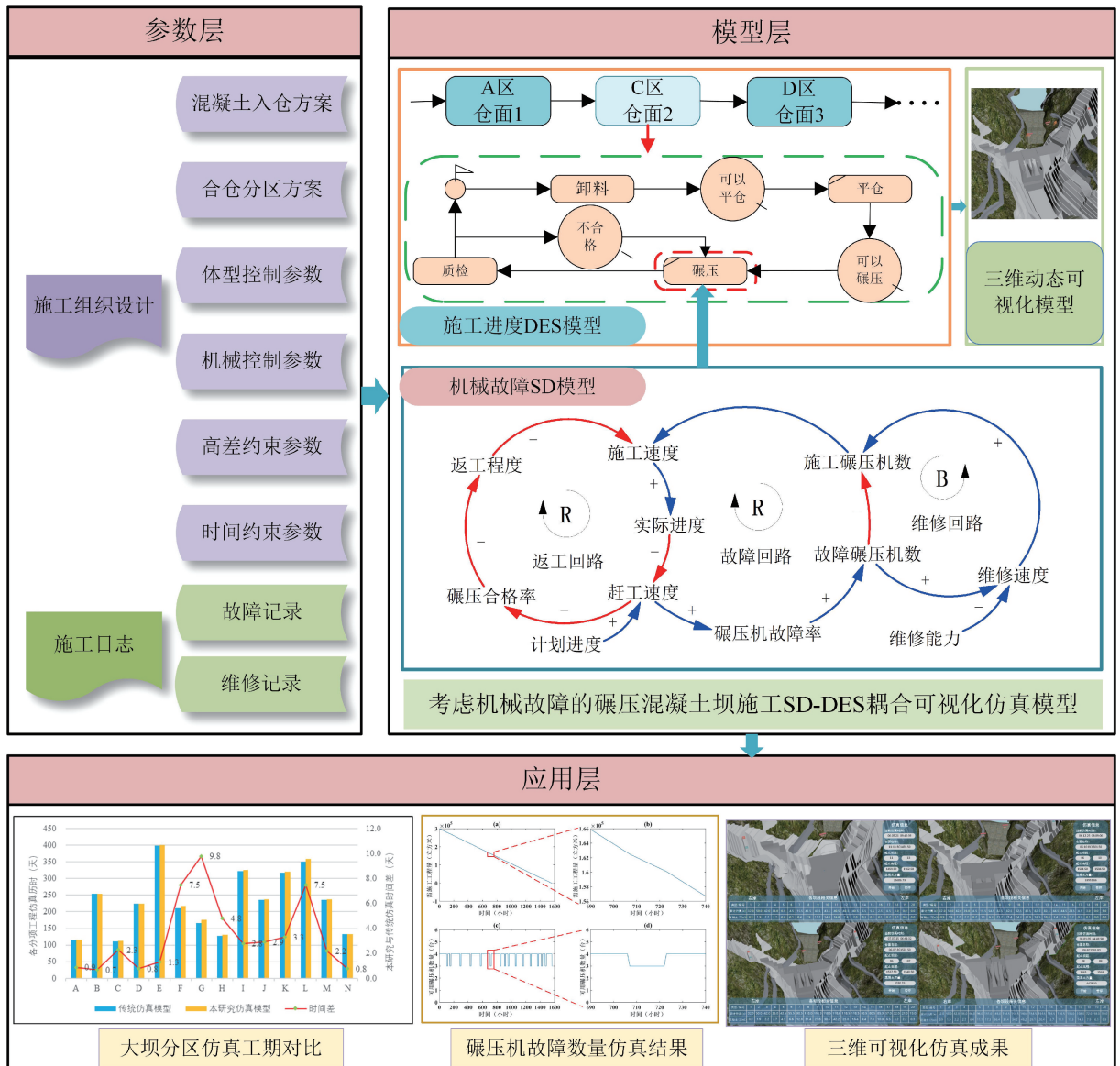


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

在应用层, 将该模型应用到位于我国西南的某高碾压混凝土坝工程项目。通过与传统仿真模型相比, 验证了本文方法的准确性和优越性, 提高了碾压混凝土坝三维可视化展示水平, 为碾压混凝土坝的建设提供了有效的决策工具。

2 考虑机械故障的碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合可视化仿真方法

2.1 施工仿真数学模型

本研究中碾压混凝土坝施工耦合可视化仿真模型中含有多个仿真模型, 且碾压混凝土坝施工本身环节众多、过程复杂, 参数较多, 为此建立如图 2 所示的施工仿真数学模型, 以更直观、清楚地表达仿真模型的整体结构以及相关参数之间的逻辑关系。

数学模型包括三个部分, 如图 2 所示, 第一部分定义了仿真的模型集 M , 第二部分定义了模型集 M 中的参数集 P , 第三部分定义了子模型之间的逻辑关系 f_1 和 f_2 。

其中, (1) 第一部分中, 模型集 M 定义了施工进度 DES 模型 (M_{DES})、机械故障 SD 模型 (M_{SD}) 和大坝施工三维动态可视化模型 (M_{3D})。(2) 第二部分中, 参数集 P 定义了: 碾压混凝土坝施工进度 DES 模型 (M_{DES}) 的参数集 P_{DES} , 包括输入参数集 I_{DES} 和输出参数集 O_{DES} 。其中, 前者包括高差约束参数 I_H 、时间约束参数 I_T 、体型控制参数 I_p 、机械设备控制参数

I_M 、平仓作业时间 I_S 、碾压施工时间 I_R 、质检作业时间 I_Q 、混凝土入仓方案 I_F 以及合仓分区方案 I_L , 后者包括资源配置强度 O_R 、仓面作业工期 O_{UT} 和施工总工期 O_T 。机械故障 SD 模型 (M_{SD}) 的参数集 P_{SD} , 包括输入参数集 I_{SD} 和输出参数集 O_{SD} 。其中, 前者包括机械设备数量 I_{MN} 、机械设备故障率 I_{MF} 、机械设备标准施工效率 I_{ME} 、需施工工程量 I_E 和工程计划总工期 I_{TP} , 后者包括仿真时间 O_{TS} 。三维动态可视化模型 M_{3D} 的参数集 P_{3D} , 其中输入参数集 I_{3D} 包括三维可视化建模技术 V_{3D} 和 O_{DES} , 输出参数集 O_{3D} 是考虑机械故障的大坝施工 SD-DES 耦合三维动态可视化仿真模型 M_T 。(3) 第三部分中, 逻辑关系 f_1 定义了 M_{DES} 与 M_{SD} 两子模型之间的逻辑关系, 逻辑关系 f_2 定义了 M_{DES} 与 M_{3D} 两子模型之间的逻辑关系。

2.2 机械故障 SD 模型构建

基于 DES 的传统仿真模型无法对仓面作业系统内部的运行机制进行有效的模拟。仓面施工过程主要由卸料、摊铺、碾压、质检等工序组成, 一般采用流水作业或者顺序作业, 其中碾压都是关键工序^[13], 是关系仓面施工进度和质量的关键环节。当仓面机械设备发生故障时, 不仅会导致施工进度的拖延, 反而为了追赶进度会进行加速施工, 这种情况会导致施工质量的下降, 为了保证施工质量而返工则增加了额外的施工量, 进一步延误了工程进度, 同时加速施工也会增加机械故障发生的概率, 从而导致施工速度的减小。

通过以上分析可知, 机械故障与施工进度以及施工质量之间并不是简单的单向影响关系, 而是存在较为复杂的因果反馈关系。针对传统 DES 仿真模型难以模拟仓面系统内各种因果关系的缺点, 本研究引入系统动力学方法建立机械故障 SD 模型, 在考虑施工质量因素的同时全面准确地描述与分析机械设备故障对仓面作业施工进度的影响。

系统动力学通过建立因果回路图和存量流量图完成对系统内变量的定性分析和定量分析。本研究针对仓面作业系统内的机械故障情况建立系统动力学模型 (SD 模型), 其因果回路图和存量流量图如图 3 和图 4 所示。

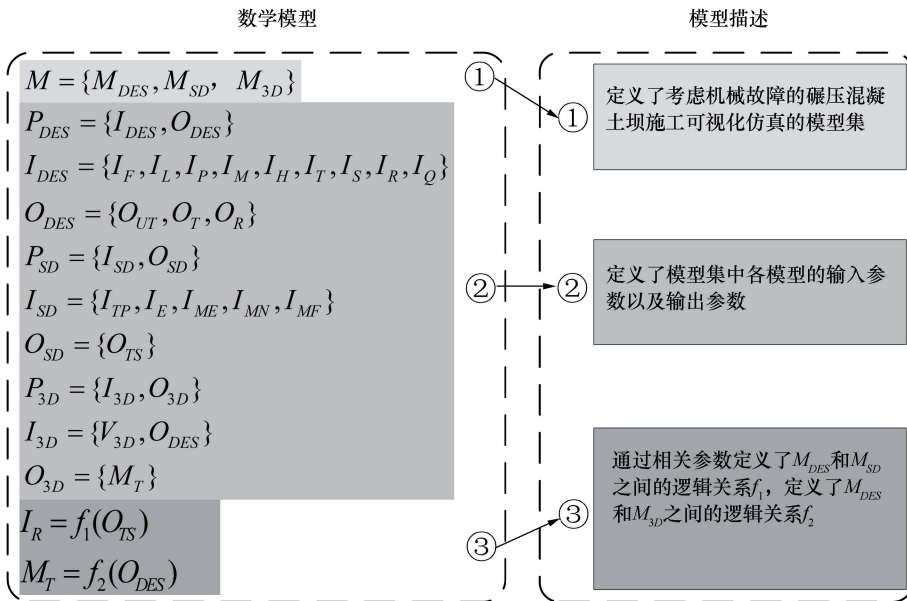


图 2 碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合可视化仿真数学模型

Fig. 2 Mathematical model for SD-DES coupled visualization simulation of RCC dam construction

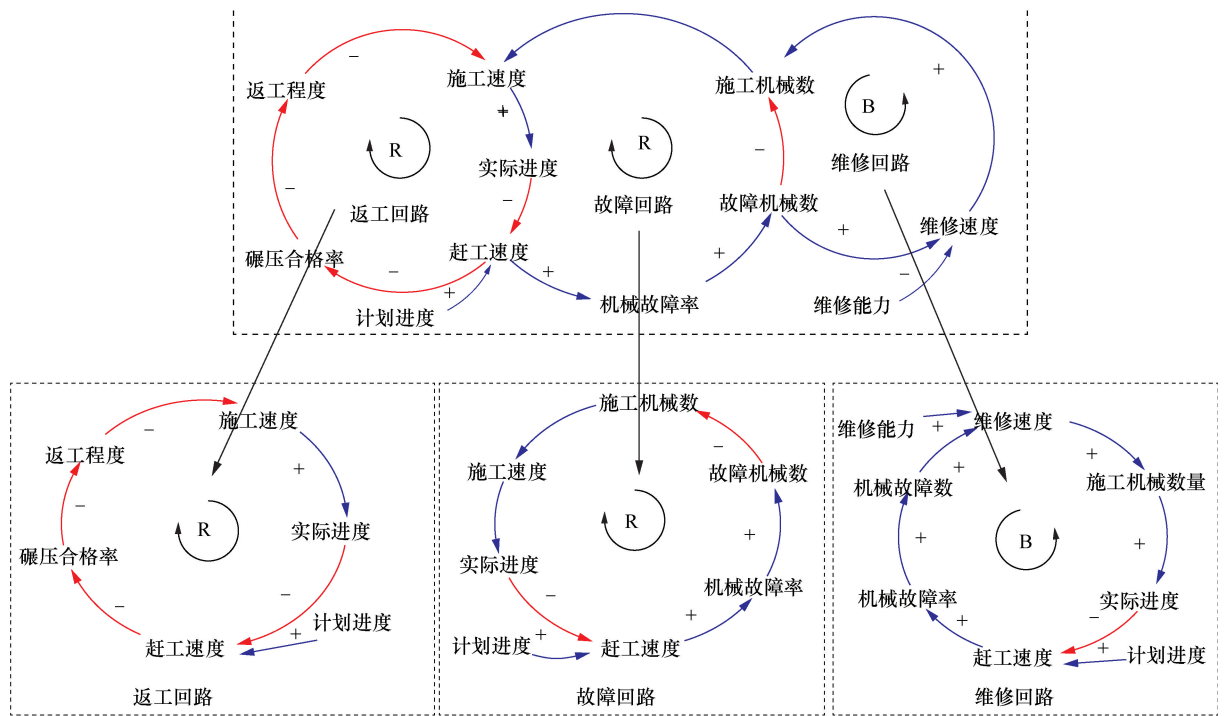


图 3 机械故障回路

Fig. 3 Machinery failure circuit

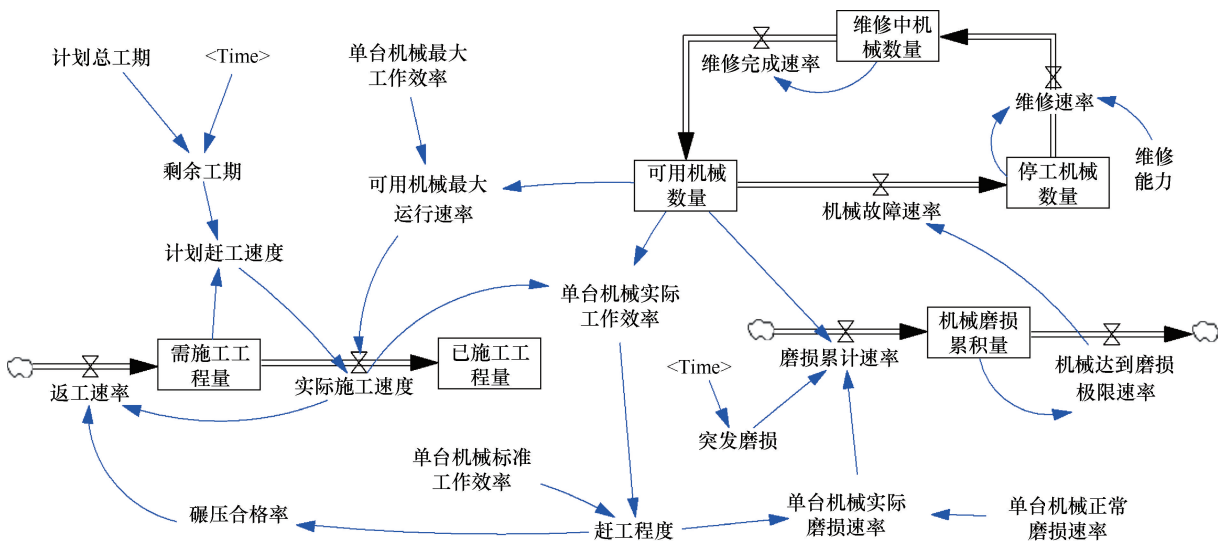


图 4 存量流量

Fig. 4 Stock and flow

机械故障 SD 模型包括三个反馈回路, 分别为返工回路、故障回路和维修回路, 下面进行具体分析。

(1) 返工回路如图 3(a) 所示。当实际进度滞后于计划进度时, 现场追赶进度会提高赶工速度, 碾压合格率会因施工速度的增大而降低, 然而现场为了达到施工质量的要求需要对碾压遍数合格率不达标即施工质量不合格的区域进行补碾, 这无疑增大了返工程度, 而额外增加的补碾施工量又进一步导致施工速度

的减小, 实际进度进一步滞后。上述因果关系构成了返工回路。

(2) 故障回路如图 3(b) 所示。当实际施工进度滞后于计划进度时, 赶工速度增大会导致机械故障率的提高, 然后发生故障的机械数量增大而施工机械数量减小, 从而导致现场施工速度降低, 实际进度进一步滞后。上述因果关系构成了故障回路。

(3) 维修回路如图 3(c) 所示。当实际施工进度

表 1 主要变量及其方程表达式

Table 1 Main variables and their equation expressions

变量类型	变量名称	变量含义	变量表达式
状态变量	需施工工程量	需要施工的工程量以及由于碾压不合格产生的返工工程量	INTEG(返工速率-实际施工进度, 初始施工工程量)
状态变量	机械磨损累积量	机械磨损的累积量, 当数值为 1 时表示碾压机出现故障	INTEG(磨损累计速率-机械达到磨损极限速率, 0)
状态变量	可用机械数量	可以用于施工的机械数量	INTEG(维修完成速率-机械故障速率, 初始机械数量)
速率变量	实际施工进度	实际的施工进度	MIN(可用机械最大运行速率, 计划赶工速度)
速率变量	机械故障速率	机械由于磨损而出现故障的速率	INTEGER(机械达到磨损极限速率)
速率变量	磨损累计速率	机械磨损累计的速率	单台机械实际磨损速率×可用机械数量+突发磨损
速率变量	维修速率	机械出现故障后的维修速度	IF THEN ELSE(停工机械数量>0, 维修能力, 0)
辅助变量	赶工程度	机械超过标准工作效率的程度	单台机械实际工作效率/单台机械标准工作效率

滞后于计划进度时, 赶工速度增大会导致机械故障率的提高和机械故障数量的增加, 维修速度在一定的维修能力内也会随之增大, 然后施工机械数量增加, 从而加快实际进度, 缩小与计划进度的偏差。上述因果关系构成了维修回路。

上述三个因果回路图实现了机械故障对施工进度影响的定性分析。为了实现定量分析, 基于上述三个因果回路图建立如图 4 所示的存量流量图, 图中包含了系统中各类变量以及变量间的数学关系, 具体的变量类型、变量含义以及变量表达式如表 1 所列。

2.3 考虑机械故障的碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合仿真模型构建

本研究在传统 DES 仿真模型的基础上, 采用系

统动力学方法建立机械故障 SD 模型并与 DES 模型进行耦合, 科学、合理地考虑施工过程中机械设备故障对仓面施工进度影响机制, 建立了碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合仿真模型, 实现对传统 DES 仿真模型的改进, 如图 5 所示。如前文所述, 碾压作业是大坝仓面施工过程中的关键环节, 关系到仓面作业系统的施工进度和施工质量, 因此本研究主要考虑碾压作业中碾压机故障对仓面施工进度的影响, 并以仓面碾压施工时间作为接口变量, 实现 SD 模型和 DES 模型的数据通信与交互。

模型耦合方式如图 5 所示。首先, 综合考虑多种限制条件和工程要求, DES 模型确定各个浇筑仓面的施工顺序, 其中碾压作业是仓面施工过程的主导步

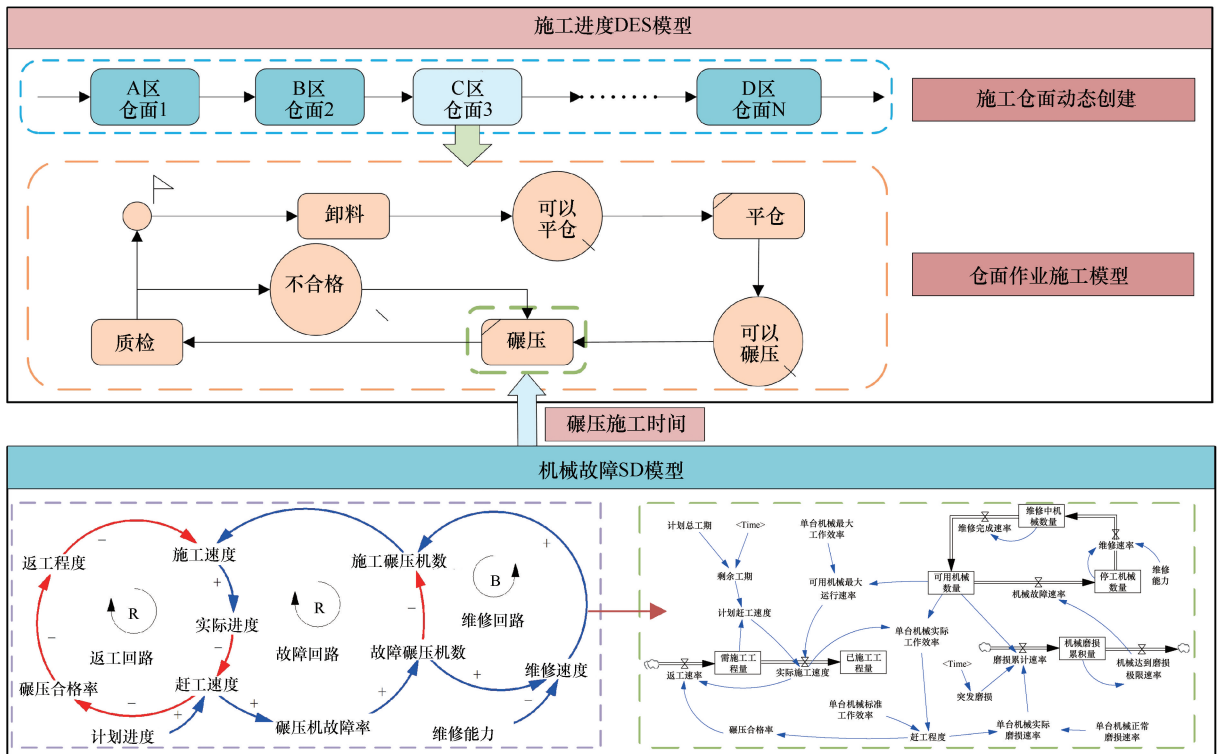


图 5 考虑机械故障的大坝施工 SD-DES 耦合仿真模型

Fig. 5 The SD-DES coupled simulation model for dam construction considering machinery failure

骤;在SD模型中,构建实现碾压机故障对施工进度影响定性分析的因果回路图,进而构建存量流量图,以实现定量计算;最后,将碾压施工时间作为接口变量实现SD模型与DES模型耦合。

2.4 碾压混凝土坝三维可视化仿真模型构建

三维可视化技术提供了直观、多维的数据表达方式,在前文实现系统耦合仿真的基础上,通过引入可视化技术并与耦合仿真结合,有助于实现仿真计算结果的生动三维呈现。首先,本研究采用3ds Max进行三维建模,构建了包含坝基、坝体、水工建筑物等物体的模型,并进行了贴图处理以呈现真实特征。其次,将模型导出为FBX文件,为通过Unity 3D引擎构建碾压混凝土坝施工的三维动态可视化仿真场景奠定基础。最后,通过Unity 3D编码将SD-DES耦合模型仿真结果与大坝实体模型相关联,构建碾压混凝土坝三维可视化仿真模型,此模型能够根据系统仿真结果实现大坝施工过程三维动态可视化展示,同时支持实时查看施工进度仿真信息。

3 工程应用

以我国西南地区某高碾压混凝土坝为研究对象,通过建立考虑机械故障的碾压混凝土坝施工SD-DES耦合可视化仿真模型,进行大坝施工仿真分析与可视化展示。大坝坝高203 m,坝顶长度为464 m,共分为20个坝段,从左岸至右岸分别为:5个(16[#]—20[#])进水口坝段,4个(12[#]—15[#])左岸非溢流坝段,4个(8[#]—11[#])溢流和泄洪放空底孔坝段和7个(1[#]—7[#])右岸非溢流坝段。

3.1 施工仿真计算

3.1.1 仿真边界条件

仿真边界条件的确定是开展施工仿真的重要前提。本研究中该碾压混凝土坝施工过程较为复杂,根据施工组织设计,考虑工程建设规模、施工周期以及混凝土入仓方案等相关因素将大坝20个坝段分为14个区域,作为仿真的边界条件,具体划分如图6所示。

3.1.2 仿真参数选取

在确定施工仿真边界条件后,根据施工组织设计并结合施工日志中的机械故障记录和维修记录数据的分析结果,规定施工仿真的主要参数如下:该工程开工时间为第5年10月1日,考虑降雨以及气温等因素对施工的影响,全年有效工作日拟定为355 d,日工作时间取20 h。层间间隔允许时间根据不同的季节进行相应的调整,每年的4—9月取5 h,10—3月取7 h。碾压机标准工作速度为1.2 km/h,最大工作速度为1.5 km/h,碾压机标准磨损速率为 1.74×10^{-3} 。混凝土生产系统位于左岸上下游,其设计生产能力分别为420 m³/h和480 m³/h。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 机械故障SD模型仿真分析

本文以该工程C区为例进行SD仿真计算,以分析碾压机故障对施工进度的影响。该区域分14个仓面进行施工,碾压混凝土方量共计30万m³,施工仓面内配置4台碾压机,计划总工期即仓面施工历时为1505 h,施工时间和碾压机故障数量的仿真结果如图7所示。

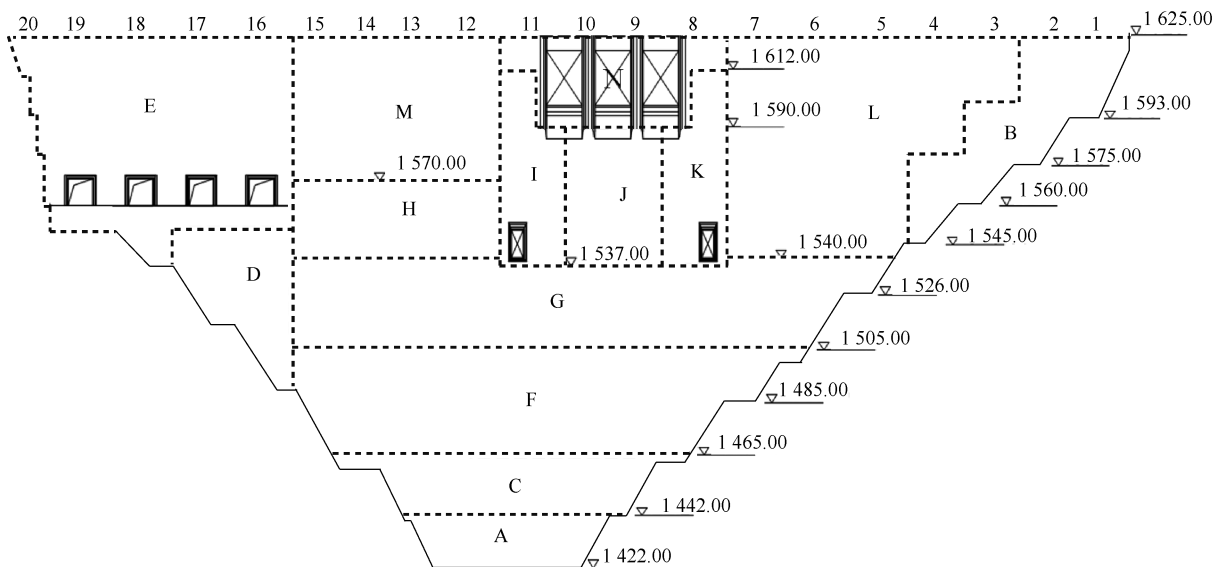


图6 碾压混凝土坝分区规划(高程单位:m)

Fig. 6 Zoning plan of RCC dam(Elevation Unit: m)

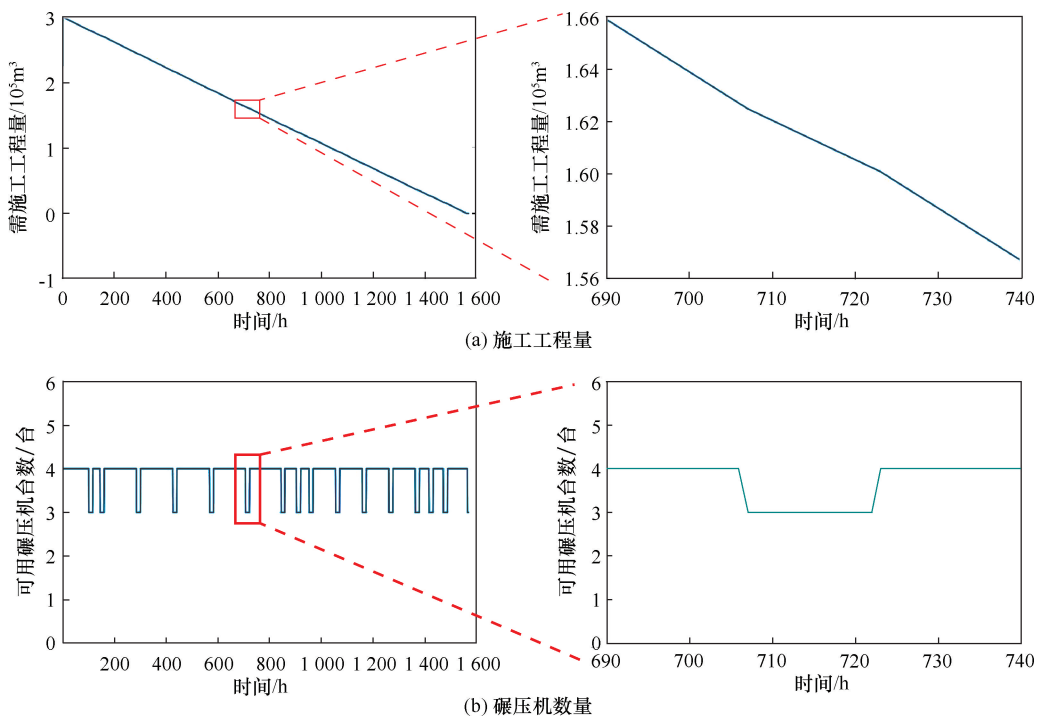


图 7 碾压混凝土施工时间与碾压机数量仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the construction time of compacted concrete and the number of rollers

由图 7(a)可知,考虑施工过程中的碾压机故障时,该区域完工时间为 1 562 h,相较于原施工历时 1 505 h,增加 57 h,施工时间变长。在施工过程中,可用碾压机数量处于动态变化中,本文中假设机械磨损集中于一台碾压机上,即施工过程中所有碾压机的累计磨损集中体现于一台碾压机上,故机械故障发生的时间呈现出整体均匀的规律,同时由于突发因子的影响也含有突变的特点,突发因子是指施工过程中直接导致机械故障的各类不确定性因素,包括人为原因导致的操作失误,恶劣的天气和施工环境,以及机械设备本身突发的故障等,可用碾压机数量整体变化过程如图 7(c)所示。具体来看,当碾压机发生故障时,可用碾压机数量减少,即由 4 台减少为 3 台,如图 7(d)所示,同时实际施工速度减慢,即需施工工程量随时间变化的斜率减小,如图 7(b)所示,故施工完成相同的工程量时施工时间增加,因此仓面整体完工时间较不考虑碾压机故障时的原施工历时延长。

3.2.2 考虑机械故障影响的碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合仿真结果分析

分别使用不考虑机械故障的传统仿真模型和本研究所提出的考虑机械故障影响的耦合仿真模型进行大坝施工进度仿真计算。仿真结果如表 2 所列,该工程施工计划工期和实际施工工期分别为 1 062 d 和 1 085 d,传统仿真模型工期和本研究提出的考虑机

械故障影响的耦合仿真模型工期分别为 1 058 d 和 1 082 d。对比上述不同施工工期可知,实际施工工期较计划施工工期滞后 23 d,不考虑机械故障影响的传统仿真模型工期与计划施工工期较为接近,且提前了 4 d,但与实际施工工期差值较大,差值达到了 27 d,偏差率为 2.49%;而本研究提出的考虑机械故障影响的耦合仿真模型工期虽然比传统仿真模型工期滞后 24 d,与计划施工工期差值也较大,但与工程实际施工工期较为接近,差值为 3 d,偏差率仅为 0.28%。

表 2 各仿真模型工期

Table 2 Duration of each simulation model

模 型	计划施工 工期/d	传统仿真 模型工期/d	本研究耦合 仿真模型工期/d	实际施工 工期/d
天 数	1 062	1 058	1 082	1 085
差 值	23	27	3	0

在实际施工过程中,碾压机由于日常磨损累积以及其他因素影响下发生故障而退出施工作业,进而导致仓面施工进度的滞后,现场施工管理人员在常常采取赶工措施以减小进度偏差,然而这会导致碾压机故障的进一步增加,从而导致施工进度进一步滞后;同时,赶工还是造成施工质量下降(碾压遍数合格率降低),额外增加了碾压机补碾的工作量,在一定程度上也扩大了进度滞后的程度。本文提出的考虑机械

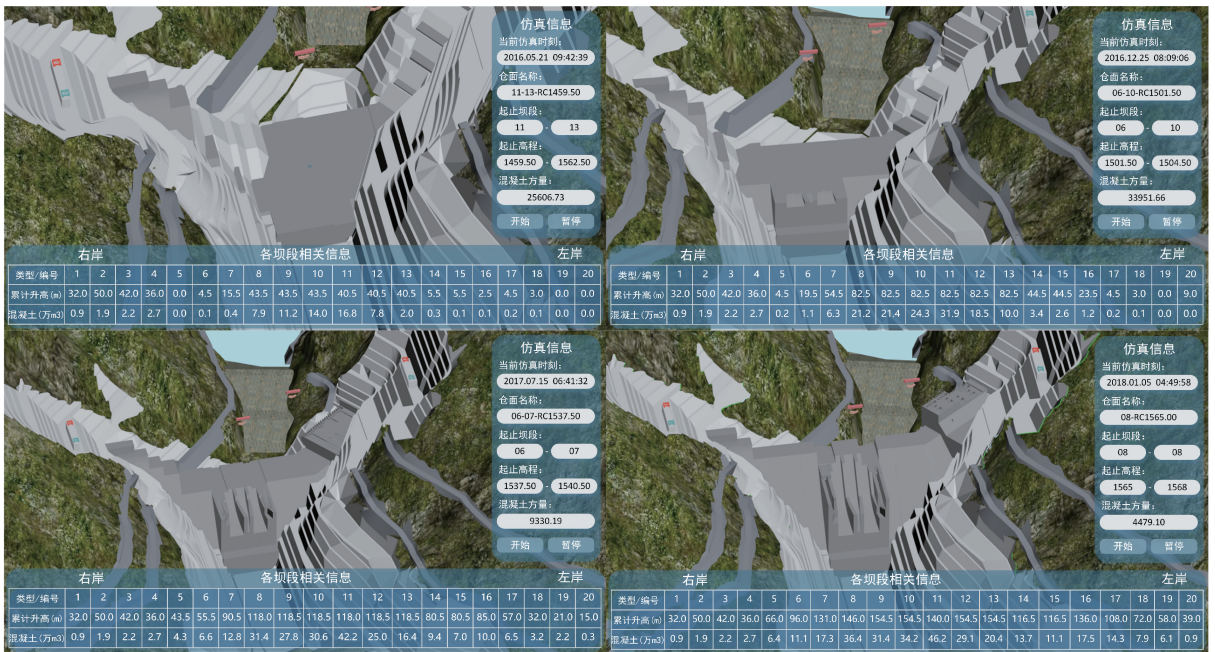


图 8 大坝施工过程三维动态可视化仿真

Fig. 8 3D dynamic visualization simulation of dam construction process

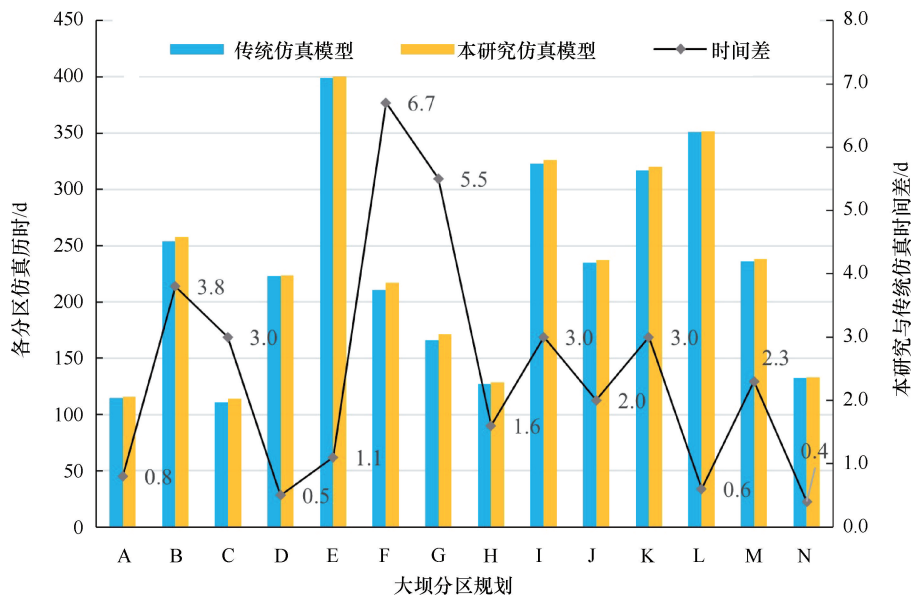


图 9 大坝分区仿真工期

Fig. 9 Simulation duration of each zone of the dam

故障的 SD-DES 耦合仿真模型由于较为全面的考虑了上述因果关系, 故其仿真工期相较于传统仿真模型工期更加贴近实际施工情况。

3.2.3 仿真成果可视化展示

上述耦合仿真模型仿真结果通过三维可视化技术实现了在虚拟场景中的实时展示。大坝施工进度典型面貌的三维可视化展示效果如图 8 所示, 能够较为直观的展示施工仿真进度信息和大坝施工面貌, 并能够

在虚拟场景中进行交互展示。

3.3 对比分析与讨论

将本研究提出的考虑机械故障影响的碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合仿真模型与传统 DES 仿真模型的仿真结果, 与实际施工工期进行对比分析, 以验证本研究中改进模型的准确性和优越性。本研究改进模型与传统仿真模型的各分区仿真历时及对比如图 9 所示, 结合表 2 数据, 经过对比分析可以得出以下结论。

(1) 本研究所提出的改进仿真模型相较于传统仿真模型, 其仿真结果更加准确。由表 2 可知, 与实际施工工期相比, 本研究的耦合仿真模型工期偏差率 (0.28%) 相对于传统仿真模型工期 (2.49%) 减小了 2.21%, 即仿真工期更加贴近实际施工工期。

传统仿真模型中不考虑机械故障对施工的影响, 即假设碾压机一直处于理想状态下进行施工作业, 导致其仿真结果与实际工期相差较大 (比实际工期少 27 d)。而本研究在传统 DES 仿真模型的基础上通过耦合 SD 模型合理地模拟施工过程中碾压机故障对施工进度的影响并同时考虑了质量因素的影

响,因此其仿真结果更接近实际工期(比实际工期少3 d)。可以看出,相较于传统 DES 仿真模型,本研究提出的改进模型具有更高的准确性。

(2)本研究提出的耦合仿真模型与传统仿真模型相比,在各分区的施工历时均有不同程度的增加。对比两个模型不同分区施工历时时间差可知,F区、G区和L区的施工历时增加较多,均超过了7 d,表明本研究提出的考虑机械故障影响的耦合仿真模型在大坝分区层面亦能体现出相对于传统模型的优势。机械故障对施工进度的影响同时也反应在整体施工工期中,本研究耦合仿真模型工期比传统仿真模型工期增加了24 d,占总工期的2.21%。以上分析表明,本研究的耦合仿真模型相较于传统仿真模型更加合理全面地模拟了施工过程,具有明显的优越性。

4 结论

本研究针对目前碾压混凝土坝施工仿真中缺乏考虑机械故障对施工进度影响分析的不足,且仿真结果可视化水平有待进一步提高的现状,提出了考虑机械故障的碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合可视化仿真方法。取得的成果如下。

(1)通过利用系统动力学方法具有分析系统行为特性的优点实现了碾压机故障对施工进度的影响分析,进而提出了机械故障 SD 模型仿真方法,揭示了碾压机故障对施工进度的影响机制。

(2)通过耦合机械故障 SD 模型对传统 DES 仿真模型进行改进,同时与可视化技术结合,提出了考虑机械故障影响的碾压混凝土坝施工 SD-DES 耦合可视化仿真方法,更加合理全面地模拟了大坝施工过程,并实现了仿真成果三维动态可视化展示。

(3)利用本研究所提出的耦合仿真模型对实际工程进行了仿真计算,仿真结果表明,该耦合仿真模型工期(与实际偏差0.28%)比传统仿真模型工期(与实际偏差2.49%)更符合实际,具有较高的优越性,为碾压混凝土坝建设的施工方案选择和现场施工指导提供了科学且生动形象的分析手段与决策工具。

参考文献 (References):

[1] 赵春菊,周宜红. 碾压混凝土坝施工智能仿真原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
ZHAO Chunju, ZHOU Yihong. Principles and Applications of Intelligent Simulation in Roller Compacted Concrete Dam Construction [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.

[2] 常昊天. 高碾压混凝土坝施工过程仿真与进度风险研究[D]. 天津:天津大学,2014.

CHANG Haotian. Simulation and Schedule Risk Analysis of High Roller Compacted Concrete Dam Construction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[3] 王乾伟. 基于自适应仿真的高碾压混凝土坝施工进度实时控制理论及应用研究[D]. 天津:天津大学,2017.
WANG Qianwei. Theory and Application of Real-time Control of High Roller Compacted Concrete Dam Construction Progress Based on Adaptive Simulation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.

[4] WANG Q W, ZHONG D H, BIN-PING W U, et al. Construction simulation approach of roller-compacted concrete dam based on real-time monitoring[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2018, 19(5): 367-383.

[5] HU W, ZHONG D, WU B, et al. Construction phase oriented dynamic simulation: taking RCC dam placement process as an example [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 25(7): 654-672.

[6] ZHANG C, WANG H, CAO J Y, et al. Type selection between arch dam and gravity dam based on construction simulation: a case study [J]. WATER, 2023, 15(8), 1482.

[7] 魏立巍,胡凯,牛广利. 数字孪生小浪底大坝安全监测管理平台建设与应用研究[J]. 水利发展研究, 2024, 24(9): 90-95.
WEI Liwei, HU Kai, NIU Guangli. Digital Twin Xiaolangdi: construction and application of dam safety monitoring and management platform [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(9): 90-95.

[8] 周厚贵,戴志清,张开广,等. 混凝土坝施工模拟研究现状与展望[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(3): 1-5.
ZHOU Hougui, DAI Zhiqing, ZHANG Kaiguang, et al. State of the art and prospects of construction simulation for concrete dams [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2014, 36(3): 1-5.

[9] 罗伟,刘全,胡志根. 基于 Petri 网的碾压混凝土坝施工系统耦合研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(7): 2053-2056.
LUO Wei, LIU Quan, HU Zhigen. Coupling research of roller compacted concrete dam construction system based on Petri nets [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(7): 2053-2056.

[10] 赵春菊,周华维,周宜红. 系统耦合机制在碾压混凝土坝施工仿真中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(4): 458-463.
ZHAO Chunju, ZHOU Huawei, ZHOU Yihong. Application of system coupling mechanism in roller compacted concrete dam construction simulation [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2013, 46(4): 458-463.

[11] 徐小蓉,金峰,廖仕信,等. 堆石混凝土坝信息化施工管理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(7): 150-160.
XU Xiaorong, JIN Feng, LIAO Shixin, et al. Research of informatization in construction management of rock-filled concrete dam [J].

- Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(7): 150-160.
- [12] 常昊天, 钟登华, 王双起, 等. 耦合动态合仓的碾压混凝土坝施工进度全过程仿真[J]. 天津大学学报: 自然科学版, 2013, 46(1): 29-37.
- CHANG Haotian, ZHONG Denghua, WANG Shuangqi, et al. Comprehensive simulation of roller compacted concrete dam construction progress with coupling dynamic combined storehouse[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2013, 46(1): 29-37.
- [13] 钟登华, 张元坤, 吴斌平, 等. 基于实时监控的碾压混凝土坝仓面施工仿真可视化分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2016, 44(5): 377-385.
- ZHONG Denghua, ZHANG Yuankun, WU Binping, et al. Visual analysis of roller compacted concrete dam storehouse surface construction simulation based on real-time monitoring[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 377-385.
- [14] 杜志达, 王奉金, 刘运鹄. 考虑入仓口因素的碾压混凝土坝仓面施工仿真研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 172-175.
- DU Zhida, WANG Fengjin, LIU Yunhu. Simulation study on roller compacted concrete dam storehouse surface construction considering inlet factors[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(4): 172-175.
- [15] 韩志忠. 碾压混凝土坝施工工期模拟参数影响分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- HAN Zhizhong. Analysis of Parameters Impact on Construction Duration Simulation of Roller Compacted Concrete Dam [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [16] 董京艳, 翟建, 杨晓箐, 等. 基于施工过程仿真的高碾压混凝土坝施工工艺研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(3): 75-78.
- DONG Jingyan, ZHAI Jian, YANG Xiaoqing, et al. Research on construction process simulation-based high roller-compacted concrete dam construction process[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(3): 75-78.
- [17] GUAN T, ZHONG D H, REN B Y, et al. Construction simulation of high arch dams based on fuzzy Bayesian updating algorithm[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2018, 19(7): 505-520.
- [18] 周华维. 基于生产系统故障响应的碾压混凝土坝施工仿真机制研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2013.
- ZHOU Huawei. Research on Simulation Mechanism of Roller Compacted Concrete Dam Construction based on Production System Failure Response [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2013.
- [19] 钟登华, 林瀚文, 吴斌平, 等. 基于 M5P-SVR 故障预测的地下洞室施工仿真[J]. 水力发电学报, 2019, 38(4): 199-212.
- ZHONG Denghua, LIN Hanwen, WU Binping, et al. Underground cavern construction simulation based on M5P-SVR fault prediction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(4): 199-212.
- [20] 余佳, 钟登华, 肖尧, 等. 基于机械故障精细分析的引水隧洞施工进度仿真[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(6): 638-648.
- YU Jia, ZHONG Denghua, XIAO Yao, et al. Construction progress simulation of water diversion tunnel based on detailed analysis of mechanical failures [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology Edition), 2019, 52(6): 638-648.
- [21] WANG L, TAN H W. Economic analysis of animal husbandry based on system dynamics [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 5641384.
- [22] WANG T F, LI H, XIAO B R, et al. Policy analysis and implementation impact of government subsidies on shared-bikes operation mode using system dynamics methodology: A case of Mobike in China[J]. Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2021, 97(9): 589-599.
- [23] WANG C, ZOU F, YAP J B H, et al. System dynamics tool for entropy-based risk control on sleeve grouting in prefabricated buildings [J]. Engineering Construction and Architectural Management, 2022, 30(2): 538-567.
- [24] 段晓晨, 孟阳, 钱睿. 高铁智能建造造价演变机理及 SD 估算方法研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(3): 110-115.
- DUAN Xiaochen, MENG Yang, QIAN Rui. Research on the evolution mechanism of cost and SD estimation method for high-speed railway intelligent construction [J]. Journal of Railway Engineering, 2023, 40(3): 110-115.
- [25] 张兵, 周丹丹, 周珣, 等. 基于改进系统动力学模型的公路客运量预测[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 111-119.
- ZHANG Bing, ZHOU Dandan, ZHOU Xun, et al. Prediction of high-way passenger volume based on improved system dynamics model[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(2): 111-119.
- [26] 左其亭, 王子尧, 马军霞. 我国现代治水研究热点与发展展望[J]. 水利发展研究, 2024, 24(6): 13-19.
- ZUO Qiting, WANG Ziyao, MA Junxia. Hot spots and development prospects of modern water governance research in China [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(6): 13-19.
- [27] ZHU B R, LIN J Q, LIU Y, et al. Multi-risk interaction analysis of cascade hydropower stations based on system dynamics simulation [J]. Water Resources Management, 2024, 38(1): 45-62.
- [28] 任天翔, 乐云. 施工设备维修对工程进度影响的 SD 模型及应用—以中亚某天然气管线建设工程为例[J]. 工程管理学报, 2012, 26(4): 61-66.
- REN Tianxiang, LE Yun. SD model and application of construction equipment maintenance impact on project schedule: A case study of a natural gas pipeline construction project in Central Asia [J]. Journal of Engineering Management, 2012, 26(4): 61-66.

- [29] 黄建文, 李朝全, 刘凯丽, 等. 地下洞室开挖施工进度系统动力学仿真模型[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(2): 78-84.
HUANG Jianwen, LI Chaoquan, LIU Kaili, et al. System dynamics simulation model of underground cavern excavation construction schedule[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(2): 78-84.
- [30] MORADI S, NASIRZADEH F, GOLKHOO F. Modeling labor productivity in construction projects using hybrid SD-DES approach[J]. Scientia Iranica, 2017, 24(6): 2752-2761.
- [31] TAHA G, SHERIF A, BADAWY M. Overall cost overrun estimate in residential projects: A hybrid dynamics approach[J]. Applied Computational Intelligence and Soft Computing, 2022, 2022(1): 2285971.
- [32] ZHU X X, GUO X, LIU H, et al. The influence of system dynamics resource sharing on collaborative manufacturing efficiency: Based on the multiagent system and system dynamics method[J]. Frontiers in Psychology, 2022, 13: 837171.
- [33] BAI L B, LIN J C, XIE Q. A hybrid simulation model for the allocation of shared resources in a project portfolio[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2024, 71: 5998-6014.
- [34] 毕磊. 基于不确定性分析的地下洞室群施工进度仿真分析与优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
BI Lei. Simulation Analysis and Optimization of Underground Cavern Group Construction Schedule Based on Uncertainty Analysis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [35] 赵梦琦, 余佳, 任炳昱, 等. 地下洞室群施工进度纠偏的 SD-DES 模型[J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 112-123.
ZHAO Mengqi, YU Jia, REN Bingyu, et al. SD-DES model for schedule correction of underground cavern group construction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(8): 112-123.
- [36] 任炳昱, 李东, 关涛, 等. 高拱坝施工的 SD-ABMS 混合仿真建模研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(10): 99-111.
REN Bingyu, LI Dong, GUAN Tao, et al. Research on SD-ABMS hybrid simulation modeling of high arch dam construction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(10): 99-111.

(责任编辑 王 璐)