

基于自适应的高海拔地区心墙填筑进度仿真

陈廷才¹, 胡超², 徐盛¹, 周宜红¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002; 2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120)

摘要:为实现高海拔地区特高心墙堆石坝心墙填筑进度的仿真模拟,综合考虑心墙填筑过程中仓面施工料源供给、高海拔区气象特征和仓面施工参数对施工进度影响,建立了气象预测和料源供给强度、施工机械配置等仿真参数自适应调整的高海拔地区特高心墙堆石坝心墙填筑进度仿真模型。将该仿真模型应用于某特高心墙堆石坝心墙填筑进度管控,结果表明:仿真结果与实际施工进度偏差为2.17%,比传统仿真方法仿真结果更符合施工实际情况,可用于现场施工进度仿真分析。

关键词:特高心墙堆石坝; 自适应控制理论; 进度仿真; 气象预测; 高海拔地区

中图分类号:TV512 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0115-06

Simulation of filling progress of core walls in high-altitude area based on self-adaptation//CHEN Tingcai¹, HU Chao², XU Sheng¹, ZHOU Yihong¹ (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: In order to realize the simulation of the filling progress of core walls in ultra-high core rockfill dams in high-altitude area, the influences of material supply for warehouse surface construction, meteorological characteristics of high-altitude area, and construction parameters of warehouse surface on the construction progress of core wall filling were comprehensively considered. A simulation model of the core wall filling progress of ultra-high core rockfill dams in high-altitude area with self-adaptive adjustment of simulation parameters of meteorological forecast, material supply intensity, and construction machinery configuration, etc. was established. The simulation model was applied to filling progress control of the core wall of an ultra-high core rockfill dam. The results show that the deviation between simulation results and the actual construction progress is 2.17%, which is more in line with the actual construction situation than those of the traditional simulation method, and the model can be used for on-site simulation analysis of construction progress.

Key words: ultra-high core rockfill dam; self-adaptive control theory; progress simulation; meteorological forecast; high-altitude area

我国西南地区水能资源丰富,随着开发程度的推进,近年来逐步转向地质条件复杂、地震烈度高、自然环境恶劣、交通极度不便的高海拔地区。这些地区受缺氧、高寒、强辐射、高蒸发、大温差等特殊气象因素影响,给筑坝带来极大干扰。堆石坝能直接利用当地材料,减少外来物资运输压力,且适应性强、抗震性能优良、经济优势明显,在高海拔地区修建高坝使特高坝得到更广泛的应用。目前有两河口(坝高295 m)、双江口(坝高312 m)、如美(坝高315 m)等一批特高心墙堆石坝正在展开建设或设计工作。

高海拔地区心墙堆石坝施工条件复杂。心墙填筑是筑坝施工的关键控制环节,心墙有效施工时间短,施工不连续,强度不均匀,为现场施工进度控制

和管理带来挑战^[1-4]。

近年来,为做好工程施工进度控制和管理,多采用施工仿真方法对施工进度进行模拟,如王仁超等^[5]运用自适应控制理论与方法建立了高堆石坝施工过程管理与施工控制模型;程严等^[6]根据流水作业的基本原理和堆石坝填筑的施工特点,并考虑堆石坝土石方挖运对其坝面流水施工的影响,合理确定了坝面流水施工方案;申明亮等^[7]系统分析了堆石坝填筑过程中不同分期和分区施工之间的相互联系和制约关系,建立了具有一定通用性的坝体填筑施工模拟模型;钟登华等^[8-9]通过综合考虑施工现场各项影响因素,建立了心墙堆石坝仓面施工进度动态控制模型,实现仓面施工进度的事前、事中控

制,并结合系统仿真技术、数据库技术、可视化技术、系统集成技术和实时监控技术,开展了高堆石坝施工仿真与优化理论和方法的研究。

然而,上述仿真研究多在施工前开展,仿真参数的设定受主观因素影响较大,未随填筑过程进行动态调整,难以反映现场施工条件的变化情况。心墙填筑过程不仅受仓面划分、资源配置、施工方法等内部因素影响,也受气象条件、料场供料、上坝路径等外部因素影响^[10],且这些因素都是动态变化的,导致仿真预测过程和结果均与实际情况存在一定偏差。因此,需要综合考虑高海拔地区的复杂约束条件,依据历史数据,对仿真参数进行全过程的自适应调整,使仿真结果更贴近工程实际。

本文通过对心墙填筑过程复杂约束条件的分析和研究,综合考虑了土料开采运输过程、高海拔地区气象条件,建立了基于自适应的高海拔地区特高心墙堆石坝心墙填筑进度仿真模型,工程实例应用表明,本文提出的仿真方法能够反映施工现场实际情况,仿真进度偏差较小。

1 基于自适应的心墙填筑进度仿真模型

1.1 料源约束

特高心墙坝施工过程中,心墙填筑往往是多个料场供料,考虑料场布置、料源质量、供应方式、供应时序等因素,应在满足工程用料质量的同时,尽量降低经济成本^[11]。复杂土料场土料开采模型^[12-14]可用下式表示:

$$Z_{\min} = \min \sum_{i=1}^n \left(\omega_1 \sum_{j=1}^m D_{ij} + \omega_2 \sum_{j=1}^m Q_{ij} + \omega_3 \sum_{j=1}^m T_{ij} \right) \quad (1)$$

式中: $Z_{\min}$ 为优化目标函数,表征最优开采方案; n 为土料场数量; m 为土料类别数量; D_{ij} 为第*i*个土料场第*j*类土料的开采成本,其与土料场位置、土料场覆盖层等因素有关,通常用工时进行描述; Q_{ij} 为第*i*个土料场第*j*类土料的质量效用系数; T_{ij} 为第*i*个土料场第*j*类土料在不同时间段内的时间效用系数; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为人工决策参数,且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

1.2 气象约束

高原地区气象条件复杂多变,心墙填筑受气象条件影响较大,气象模拟精度是仿真模拟精度的关键要素之一。本文采用BP神经网络算法根据历史气象数据^[15-17],对后续施工过程中降雨和温度两要素进行预测,形成每日数据,以判断施工条件。BP神经网络具有非线性映射能力,数学理论证明3层BP神经网络能够以任意精度逼近任何非线性连续函数,故本文采用3层BP神经网络对气象数据进行预测。

历史气象数据由时间序列、降水量和温度组成,首先将时间序列的起始值置为1,此后以天为单位依次递增,并使用线性映射函数将时间、降水量和温度值映射到0~1之间。设处理后的时间序列为 t_i ,降水量和温度随时间分布序列分别为 P_i 和 T_i ,其中, i 为序列号,且 $1 \leq i \leq k$, k 为历史气象数据长度。

利用数据序列 t_i 、 P_i 和 T_i 构造BP神经网络的输入和输出,本文采用错位递推的方式,对目标数据进行逐个预测。设预测时间序列长度为 l ,即共进行 l 次数据预测,则第 j ($1 \leq j \leq l$)次预测时,网络的输入数据为 $\{t_{1+j}, t_{2+j}, \dots, t_{i+j}, \dots, t_{k-1+j}\}$,网络输出数据为 $\{P_{2+j}, P_{3+j}, \dots, P_{i+1+j}, \dots, P_{k+j}\}$ 和 $\{T_{2+j}, T_{3+j}, \dots, T_{i+1+j}, \dots, T_{k+j}\}$ 。由网络输入输出数据结果可知,输出数据相对于输入数据,始终在时间序列上向后移动一位,在预测过程中,将已预测数据逐渐累加到训练集中,即训练集随预测序列*j*的改变逐步加长。

使用3层BP神经网络模型进行气象数据预测,预测效果如图1所示。图1反映了用归一化后的温度数据对模型进行训练和测试的效果,由测试结果可知,本文建立的BP神经网络模型可用于长时间序列气象数据的预测。

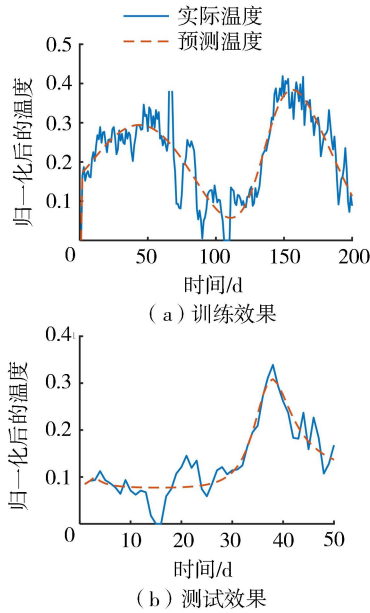


图1 BP神经网络模型测试结果

高原气象条件对仓面施工的影响主要表现在3个方面:①当降水量达到0.5mm时,仓面停止施工,并根据实际降雨情况,在雨停后等待一段时间才能复工;②当温度低于0℃时,做防护施工,温度低于-10℃时,停止施工,温度回升后,根据实际仓面冻结情况,等待一段时间再复工;③在等待复工时段,风速会加快仓面水汽蒸发,缩短待工时长。气象影响填筑施工分析流程如图2所示(图中*P*降水量,*T*为大气温度)。

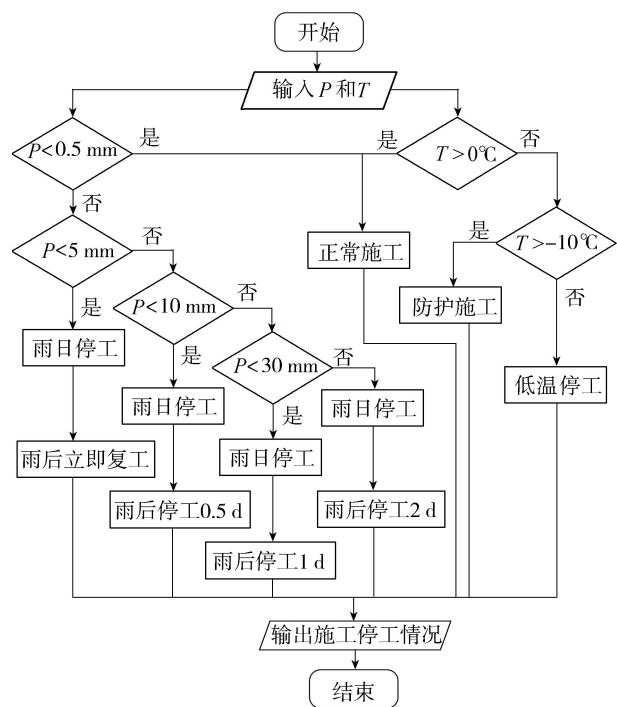


图2 气象因素影响下填筑施工流程

1.3 仿真参数自适应调整模型

心墙填筑进度仿真模型中包含仿真参数自适应调整模型,调整的参数为浮动性较大的进度控制参数,如机械配置数量、料源供给强度等。自适应调整过程的有效时段是拥有实际填筑进度数据的时段,自适应调整过程以控制心墙实际填筑进度与仿真进度的误差来实现^[18]。仿真参数自适应调整模型如下式所示:

$$Y = Y_0 + \eta \frac{S_f - S_s}{S_f} (Y_{\max} - Y_{\min}) \quad (2)$$

式中: Y 为调整后的参数; Y_0 为调整前的参数; $Y_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 分别为待调整参数的最小限定值和最大限定值; S_f 为心墙实际施工进度; S_s 为心墙填筑仿真进度; η 为仿真参数微调系数。

仿真参数自适应调整流程如下:①获取心墙实际填筑进度数据,将该数据设置为模型仿真的预期进度。②初始化仿真参数,设置仿真时间步长。③开始新一个单位步长内的填筑仿真。④该单位步长内的填筑仿真结束后,计算当前仿真进度与实际仿真进度(预期进度)的差值,在设置的允许进度误差范围内,当心墙填筑仿真进度超前于心墙实际填筑进度,则应降低填筑强度,即将控制参数调低;当心墙填筑仿真进度滞后于心墙实际填筑进度,则相应提高填筑强度,即将进度控制参数调高。参数调整完毕,将仿真进度归零,以新参数重新进行该单位步长内的填筑仿真。当心墙填筑仿真进度与实际填筑进度相吻合时,则保持当前参数,进入下一单位步长的填筑仿真。⑤重复③和④,直至心墙仿真进度在时间上超过心墙

实际填筑时间节点时,结束参数自适应调整过程,保持当前仿真参数,完成心墙填筑进度的全过程仿真。

心墙填筑仿真参数自适应调整流程如图3所示。本文建立的仿真参数自适应调整模型可以在自适应调节机制的作用下,使仿真填筑进度与实际填筑进度的偏差始终在允许误差范围内。

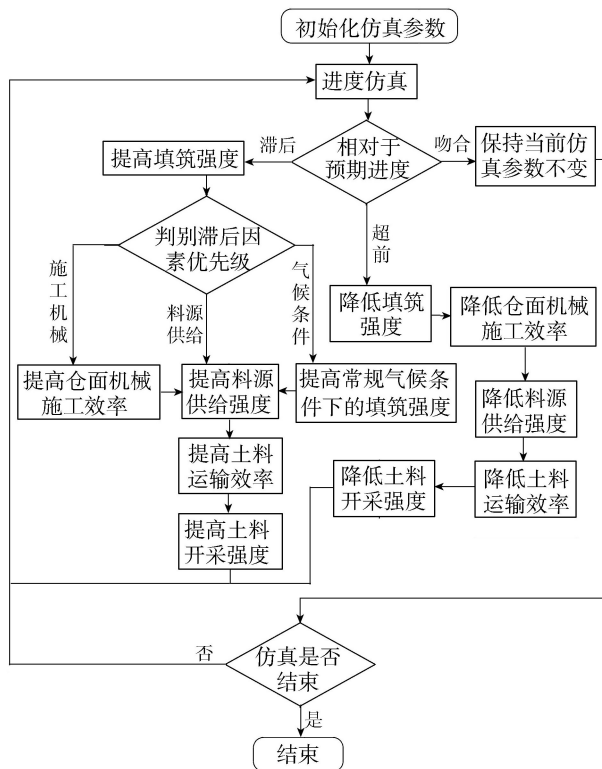


图3 仿真参数自适应调整流程

1.4 心墙填筑进度仿真流程

心墙填筑进度仿真流程如图4所示。在该流程中,将各约束条件参数加载到仓面流水作业过程中。通过求解土料开采模型,获得初始料源供给参数;利用BP神经网络进行气象数据预测,获得初始气象

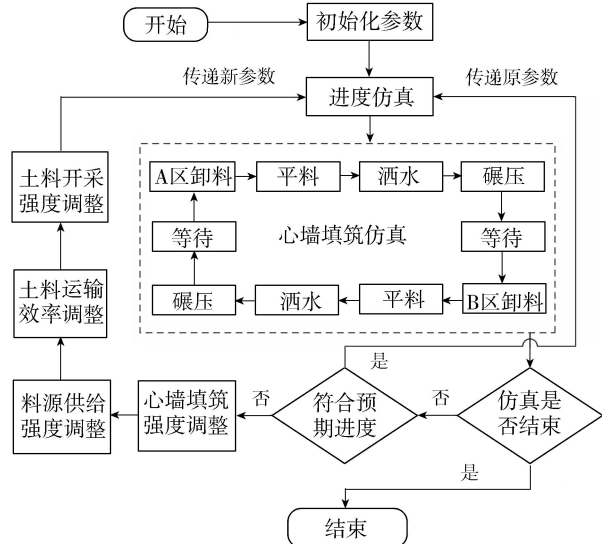


图4 心墙填筑进度仿真流程

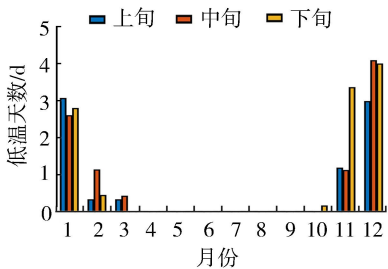
条件参数;通过仓面施工机械初始参数的配置和实际施工进度数据准备,获得心墙填筑进度仿真的全部参数条件。心墙填筑仿真时,首先获取仓面面积和填筑方量,将仓面分为 A 区和 B 区,分区进行施工资源配置(包括车辆、碾压设备等),再运用流水作业的施工方法进行填筑仿真。

2 工程应用

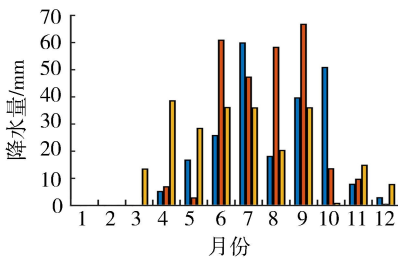
2.1 工程概况

采用构建的仿真模型对我国西南地区某水电站砾石心墙堆石坝心墙填筑进度进行仿真。该堆石坝最大坝高 295 m,坝体总填筑量约 4 300 万 m³,其中心墙填筑工程量约 442 万 m³,堆石填筑 3 900 万 m³。工程施工阶段共有 5 个料场为心墙填筑提供料源,分别为西地(1、2 区)、苹果园(A、B 区)、亚中(A、B、C 区)、瓜里(A、B1、B2 区)、普巴绒(A、B 区);实施阶段,增加普巴绒 C 区土料场。该堆石坝心墙顶宽 6 m,顶高程 2 874 m,心墙上下游坡均为 1:1.2,心墙底基座顶高程为 2 582 m,顺河向宽度为 124 m,心墙施工过程中单仓分层厚度为 0.3 m。

据当地气象站 1961—2014 年实测资料统计,工程坝区多年平均降水量为 746.1 mm;雨季(6—10 月)降水量为 694.2 mm,占全年的 93%;历年最大 1 日降水量为 70.6 mm。冬季施工主要集中在 1 月至 2 月上旬及 11 月下旬至 12 月。冬季平均出现 0℃ 以下时段主要为 1:00—11:00。对工程坝区 2018 年气象数据进行统计,结合碾压式土石坝施工停工标准及现场实际情况,将低于 0℃ 记为低温天气,每 10 d 统计一次累计低温天数,低温天数和降水量统计结果如图 5 所示。



(a) 低温天数



(b) 降水量

图 5 2018 年坝区气象数据统计结果

2.2 心墙填筑进度仿真

本工程涉及 5 个土料场,共 13 个分区,每个区域土料分为 3 个类别,采用料源约束模型对复杂土料场进行土料开采规划,结果如表 1 所示。由表 1 可见,各土料场的 I 类土开采度最高,II 类土次之,III 类土由于质量较差,开采利用程度最低。

表 1 复杂土料场开采规划

料场	分区	勘测储量/万 m ³			规划开采量/万 m ³		
		I 类土	II 类土	III 类土	I 类土	II 类土	III 类土
西地	1 区	10.0	0	0	10.0	0	0
	2 区	56.0	0	0	56.0	0	0
苹果园	A 区	0	5.0	0	0	5.0	0
	B 区	4.0	0	0	4.0	0	0
亚中	A 区	0	0	0	0	0	0
	B 区	0	20.0	0	0	20.0	0
	C 区	0	0	65.8	0	0	0
瓜里	A 区	0	0	40.4	0	0	0
	B1 区	0	56.0	0	0	56.0	0
	B2 区	0	30.2	0	0	30.2	0
普巴绒	A 区	20.0	0	0	20.0	0	0
	B 区	0	36.6	0	0	6.23	0
	C 区	25.0	0	0	25.0	0	0

本工程心墙开始填筑时间为 2016 年 10 月,计划竣工时间为 2021 年 11 月。在进行心墙填筑进度仿真时,心墙实际填筑进度已过半,因此利用已填筑数据进行参数的自适应调整。利用本文建立的仿真模型对心墙填筑全过程进行仿真,并与实际填筑进度对比,结果如图 6 所示。

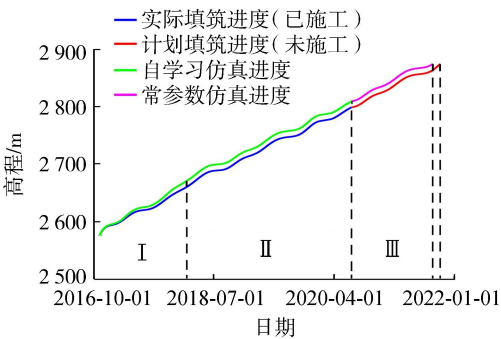


图 6 心墙填筑进度仿真结果对比

由图 6 可见,心墙实际填筑的时间进度已到 2020 年 6 月底,实际填筑高程为 2 798 m。在图 6 的 I 区,仿真参数自适应调整模型处于成长期,在该时段内,仿真参数持续调整更新,仿真模型的自适应时长为 180 仓,累计学习次数为 26 次,学习时段主要分布在前 60 仓;在 II 区,仿真参数自适应调整过程趋于稳定,几乎不再进行调整更新;III 区为未施工部分,该部分计划填筑强度与仿真填筑强度几乎保持一致。最终仿真模型的竣工时间为 2021 年 10 月 8 日,计划竣工日期为 2021 年 11 月 18 日,二者在时间进度上相差 40 d,与实际的进度偏差为 2.17%。

由于计算机仿真是在绝对理想条件下进行的,故仿真施工效率总高于实际施工效率,随着仿真模型参数自适应调整次数的增加,该效率差会更低,保证了仿真进度的可靠性。

3 结 语

本文综合考虑了心墙堆石坝心墙填筑过程中的仓面施工料源供给、高海拔地区气象特征和仓面施工参数对施工进度的影响,在传统仿真方法的基础上,基于工程实际数据,建立了土料开采模型和 BP 神经网络气象预测模型,并利用仿真参数自适应调整模型进行全过程参数优化,以获得较理想的仿真性能。将本文建立的心墙填筑进度仿真模型应用于我国西南地区某砾石心墙堆石坝心墙填筑进度管控,仿真结果与实际施工进度偏差仅为 2.17%,相较于传统仿真方法有明显的提升。因此,本文提出的高海拔地区特高心墙坝心墙填筑进度仿真模型能够更加真实地反映现场实际填筑进度,为现场施工进度分析、料源开采规划和施工进度管理提供技术支持。

参考文献:

[1] 晁升,丁晓丽,赵敏,等. 基于 BIM 技术的面板堆石坝施工进度管理研究[J]. 治淮, 2021(4): 34-36. (CHAO Sheng, DING Xiaoli, ZHAO Min, et al. Research on construction schedule management of face rockfill dam based on BIM technology[J]. Harnessing the Huaihe River, 2021(4): 34-36. (in Chinese))

[2] 特来提·艾尼瓦. 简述高寒高海拔特殊气候条件下大坝碾压混凝土施工技术[J]. 水利科技与经济, 2021, 27(2): 83-87. (TELATI Ainiwa. Brief introduction of dam RCC construction technology under special climatic conditions of high cold and high altitude [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2021, 27(2): 83-87. (in Chinese))

[3] 赵帮跃,陈武林,甘林. 高海拔地区气候特性及沥青路面铺筑关键技术工艺[J]. 四川建材, 2021, 47(4): 183-184. (ZHAO Bangyue, CHEN Wulin, GAN Lin. Climatic characteristics of high altitude area and key technology of asphalt pavement paving [J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(4): 183-184. (in Chinese))

[4] 江守燕,谢庆明,杜成斌,等. 混凝土心墙堆石坝加固施工模拟[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 57-62. (JIANG Shouyan, XIE Qingming, DU Chengbin, et al. Reinforcement construction simulation of concrete core rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 57-62. (in Chinese))

[5] 王仁超,吴桂兰,李喆. 高土石坝施工系统仿真模型及其集成研究[J]. 水利水电技术, 2002,33(12): 23-25. (WANG Renchao, WU Guilan, LI Zhe. Research on simulation model of high earth-rock dam construction system

and its integration [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2002,33(12): 23-25. (in Chinese))

[6] 程严,周宜红. 基于计算机仿真的堆石坝坝面流水施工方案研究[J]. 基建优化, 2005(1): 43-46. (CHENG Yan, ZHOU Yihong. Research on the design based on computer simulation for the project flowing construction in the rock-fill dam [J]. Infrastructure Optimization, 2005 (1): 43-46. (in Chinese))

[7] 申明亮,张春燕,曹林香,等. 面板堆石坝填筑过程施工动态模拟研究[J]. 人民长江, 2005, 27(4): 20-22. (SHEN Mingliang, ZHANG Chunyan, CAO Linxiang, et al. Dynamic simulation study on construction process of face rockfill dam [J]. Yangtze River, 2005, 27(4): 20-22. (in Chinese))

[8] 钟登华,杜荣祥,关涛,等. 心墙堆石坝仓面施工进度动态控制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 283-290. (ZHONG Denghua, DU Rongxiang, GUAN Tao, et al. Dynamic control of construction progress of core rockfill dam storehouse surface [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(4): 283-290. (in Chinese))

[9] 钟登华,常昊天,刘宁,等. 高堆石坝施工过程的仿真与优化[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 863-872. (ZHONG Denghua, CHANG Haotian, LIU Ning, et al. Simulation and optimization of high rock-filled dam construction operations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 863-872. (in Chinese))

[10] 赵春菊,胡超,周宜红. 基于坝面作业仿真的面板堆石坝施工进度优化研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(9): 65-69. (ZHAO Chunju, HU Chao, ZHOU Yihong. Study on optimization of construction progress of concrete face rock-filled dam based on simulation of working on dam construction surface [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2014, 45(9): 65-69. (in Chinese))

[11] 丁晓唐,覃牧,崔恩豪. 白鹤滩水电站料场补充开采规划优选设计[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(5): 43-47. (DING Xiaotang, TAN Mu, CUI Enhao. Optimal design of supplementary mining planning for Baihetan Hydropower Station stock yard [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(5): 43-47. (in Chinese))

[12] 庄桂亮. 水利水电工程施工土石方调配方法及其施工工艺[J]. 科技创新与应用, 2021(11): 127-129. (ZHUANG Guiliang. Earth-rock allocation method and construction technology of water conservancy and hydropower engineering construction [J]. Technological Innovation and Application, 2021(11): 127-129. (in Chinese))

[13] 赵瑜,陈传宇,张建伟,等. 基于遗传算法的面板堆石坝土石方调配研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 174-178. (ZHAO Yu, CHEN Chuanyu, ZHANG Jianwei, et al. Research on earth and rock allocation of concrete face rockfill dam based on genetic algorithm [J].

- China Rural Water and Hydropower, 2020 (11): 174-178. (in Chinese))
- [14] 张天航. 基于大系统理论的复杂地形土方调配优化研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2020.
- [15] 孙国良,伊力哈木·亚尔买买提,张宽,等. 基于小波变换与 IAGA-BP 神经网络的短期风电功率预测[J]. 电测与仪表, 2021 (1): 1-11. (SUN Guoliang, YILIHAM Yaermamat, ZHANG Kuan, et al. Short-term prediction of wind power based on wavelet transform and IAGA-BP neural network [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021(1): 1-11. (in Chinese))
- [16] 陈爽,张志,肖锦初,等. 基于 MEA-BP 神经网络的超声挤压加工表面粗糙度预测[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40 (5): 104-109. (CHEN Shuang, ZHANG Zhi, XIAO Jinchu, et al. Surface roughness prediction of ultrasonic extrusion processing based MEA-BP neural network [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), 2021, 40(5): 104-109. (in Chinese))
- [17] 田正宏,苏伟豪,郑祥,等. 基于 GA-BP 神经网络的碾压混凝土压实度实时评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (3): 81-86. (TIAN Zhenghong, SU Weihao, ZHENG Xiang, et al. Real-time evaluation method of RCC compactness based on GA-BP neural network [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 81-86. (in Chinese))
- [18] 李明超,段志龙. 耦合风险因素的大型地下厂房施工进度仿真分析[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(5): 39-44. (LI Mingchao, DUAN Zhilong. Simulation analysis of construction schedule of large underground powerhouses coupled with risk factors [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (5): 39-44. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-07-15 编辑:施业)
-
- (上接第 57 页)
- [16] 李宗坤,陈乐意,孙颖章. 偏最小二乘回归在渗流监控模型中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(2): 117-119. (LI Zongkun, CHEN Leyi, SUN Yingzhang. Application of partial least-squares regression to seepage monitoring model [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2006, 27(2): 117-119. (in Chinese))
- [17] 杨杰,胡德秀,吴中如. 大坝安全监控模型因子相关性及不确定性研究[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 99-105. (YANG Jie, HU Dexiu, WU Zhongru. Multiple co-linearity and uncertainty of factors in dam safety monitoring model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(12): 99-105. (in Chinese))
- [18] 梁波. 土石坝测压管水位观测资料分析方法[J]. 大坝与安全, 2005(4): 41-43. (LIANG Bo. Discussion on data analysis of piezometric level in earth-rock dam [J]. Dam & Safety, 2005(4): 41-43. (in Chinese))
- [19] WANG Shaowei, XU Yingli, GU Chongshi, et al. Monitoring models for base flow effect and daily variation of dam seepage elements considering time lag effect [J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(4): 344-354.
- [20] 虞鸿,包腾飞,薛凌峰. 降雨滞后效应的数值模拟[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 200-206. (YU Hong, BAO Tengfei, XUE Lingfeng. Numerical simulation of the hysteretic effects of rainfall [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 200-206. (in Chinese))
- [21] 沈晶鑫,郑东健. 改进温度分量的拱坝变形时空分布模型[J]. 水利水电技术, 2018, 49 (5): 38-43. (SHEN Jingxin, ZHENG Dongjian. Improved temperature component-based spatio-temporal distribution model for arch dam deformation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (5): 38-43. (in Chinese))
- [22] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用[D]. 上海:东华大学, 2020.
- (收稿日期:2021-08-13 编辑:熊水斌)
-
- (上接第 93 页)
- [53] 牛景太. 基于奇异谱分析与 PSO 优化 SVM 的混凝土坝变形监控模型[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 60-65. (NIU Jingtai. Dam deformation monitoring model based on singular spectrum analysis and SVM optimized by PSO [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 60-65. (in Chinese))
- [54] 任秋兵,沈扬,李明超,等. 水工建筑物安全监控深度分析模型及其优化研究[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 71-80. (REN Qiubing, SHEN Yang, LI Mingchao, et al. Safety monitoring model of hydraulic structures and its optimization based on deep learning analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 71-80. (in Chinese))
- [55] YANG G, GU H, CHEN X D, et al. Hybrid hydraulic-seasonal-time model for predicting the deformation behaviour of high concrete dams during the operational period [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(3): e2685.
- [56] CHEN B, HU T Y, HUANG Z S, et al. A spatio-temporal clustering and diagnosis method for concrete arch dams using deformation monitoring data [J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(5/6): 1355-1371.
- [57] SHI Z, GU C, QIN D. Variable-intercept panel model for deformation zoning of a super-high arch dam [J]. Springer Plus, 2016, 5: 898.
- [58] SHAO C, GU C, YANG M, et al. A novel model of dam displacement based on panel data [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(1): e2037.
- (收稿日期:2021-10-26 编辑:骆超)