

## 数字孪生驱动下的水电工程碾压机组协同调度优化算法研究

米刚利

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

**[摘要]**针对西部高海拔大型水电站大坝填筑施工的现场难题, 依托实际高原水电工程项目, 引入数字孪生技术, 搭建了虚拟仿真与现场实景双向联动、闭环管控的机群协同施工架构。将 NSGA-II 算法与麻雀搜索算法进行融合优化, 创新提出改进混合智能算法, 有效破解传统调度方式路径冗余、任务分配滞后、设备调度僵化等问题。通过实际工程仿真试验验证, 相较于传统人工经验调度、单一智能算法调度模式, 碾压设备待机等待时间减少 21.7%, 设备整体作业利用率提升 14.3%, 大坝填筑碾压施工质量合格率可达 99.2%。该研究成果能够为高海拔地区水电站大坝智能碾压施工、设备精细化协同调度提供可靠的理论支撑和可直接落地的工程应用参考。

**[关键词]**数字孪生; 碾压机组; 协同调度; 混合优化算法; 水电工程; 智能施工

DOI: 10.33142/ect.v4i8.20333

中图分类号: TV53

文献标识码: A

## Research on Collaborative Scheduling Optimization Algorithm for Hydroelectric Engineering Rolling Machine Group Driven by Digital Twins

MI Gangli

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

**Abstract:** In response to the on-site difficulties of dam filling construction for large high-altitude hydropower stations in the western region, based on actual high-altitude hydropower engineering projects, digital twin technology was introduced to build a virtual simulation and on-site scene bi-directional linkage, closed-loop control machine group collaborative construction architecture. By integrating and optimizing the NSGA-II algorithm with the sparrow search algorithm, an innovative hybrid intelligent algorithm is proposed to effectively solve problems such as path redundancy, delayed task allocation, and rigid device scheduling in traditional scheduling methods. Through actual engineering simulation experiments, it has been verified that compared to traditional manual experience scheduling and single intelligent algorithm scheduling modes, the standby waiting time of rolling equipment is reduced by 21.7%, the overall operational utilization rate of equipment is increased by 14.3%, and the qualified rate of dam filling and rolling construction quality can reach 99.2%. This research achievement can provide reliable theoretical support and directly applicable engineering reference for intelligent rolling construction and equipment precision collaborative scheduling of hydropower dams in high-altitude areas.

**Keywords:** digital twin; rolling mill group; collaborative scheduling; hybrid optimization algorithm; hydroelectric engineering; intelligent construction

### 引言

我国西部的水电资源储量十分丰富, 普遍存在填筑方量大、施工强度高的特点, 而坝体填筑环节的碾压施工是核心工序, 碾压设备的作业调度效率、施工成型质量, 直接决定了整体工程的建设进度, 同时关系到大坝主体结构长期运行安全<sup>[1]</sup>。受西部高海拔深山峡谷的特殊地形地貌限制, 水电站坝体填筑的作业仓面空间十分有限, 施工现场多工种、多设备交叉作业现象普遍。在多台碾压设备

同时开展施工作业, 经常出现设备拥堵、作业路径冲突、施工任务分配不均的问题。目前现场施工大多依靠管理人员的传统经验进行人工调度, 调度方式滞后、实时性极差, 无法同步兼顾施工质量、建设进度与设备能耗三大核心指标, 难以实现三者的协同管控。而数字孪生技术的落地应用, 为碾压机组的智能化、精准化调度提供了全新的解决思路与技术路径<sup>[2]</sup>。文章依托西部高原水电站实际工程场景, 搭建适配碾压施工场景的数字孪生机群调度整体架构,

构建兼顾质量、进度、能耗的多目标优化数学模型，自主设计改进 NSGA-II 麻雀混合优化算法。经过多组仿真试验验证，该技术方案能够有效实现碾压机群高效作业、施工质量精准可控、施工能耗优化降低的多重目标，可为高原水电工程智能化碾压施工提供可靠的技术支撑与工程参考。

## 1 工程概况

西部大型水电站作为核心骨干工程，大坝采用砾石土心墙堆石坝结构，最大坝高突破 200m，整体总填筑方量超 3000 万 m<sup>3</sup>，工程建设规模大、施工体量庞大。该水电站坐落于海拔 3000m 以上的高山峡谷区域，现场施工环境复杂、自然条件恶劣，且全年可开展施工的有效工期十分有限，整体施工压力极大。大坝施工全程采用分层碾压填筑工艺，单层填筑厚度固定为 30cm，为保障施工进度，每个作业仓面都会配置 6~8 台振动碾压机同时开展碾压作业。受现场地形和施工布局限制，当前施工现场存在多项突出难题：一是坝体仓面作业空间狭窄，多台碾压设备同时作业时，行驶路径容易交叉重叠，频繁出现设备拥堵、作业避让的情况，严重影响施工效率；二是大坝碾压施工质量管控标准严苛、约束条件多，依靠传统人工巡检、人工管控的方式，无法实现全方位、精准化的质量把控，容易出现管控盲区和偏差；三是现场施工进度、施工质量、设备能耗三大核心目标相互制约，很难实现统筹均衡、同步优化。传统的人工调度、经验化施工管理模式，无法兼

顾设备协同、质量管控、进度提速、节能降耗等多重施工需求，已经难以适配本工程的高标准施工要求，迫切需要引入数字化、智能化技术手段，实现碾压机群的高效协同作业，全面提升大坝填筑施工的整体质效与管理水平<sup>[3]</sup>。

## 2 数字孪生碾压机群协同调度架构构建

针对水电大坝碾压施工的现场工况，搭建五层式数字孪生碾压机群协同调度架构，从下到上分为数据感知层、虚拟映射层、调度决策层、调度决策层、现场执行层，达成施工场景虚实联动、动态模拟推演和闭环优化管控效果。数据感知层是整个系统的基础，以 10Hz 频率持续采样，通过各类传感器和监测设备，精准采集碾压设备作业状态、施工现场环境等多类原始施工数据。数据传输层采用 5G 结合边缘计算的模式，经由网关整合处理数据，实现 20ms 超低延迟的数据同步与调度指令下发，保障数据传输高效稳定。虚拟映射层依托 BIM 和三维实景建模技术，搭建 1:1 还原的全要素虚拟施工现场，接入实时数据驱动模型动态更新，完成真实施工场景的数字化精准复刻<sup>[4]</sup>。调度决策层为系统核心，借助仿真推演和智能优化算法，运算多目标调度模型，动态匹配最优作业方案，精准排查施工隐患并输出优化指令<sup>[5]</sup>。最后由现场执行层落地各项调度指令，同步回传实时作业数据，形成完整管控闭环，实现碾压机群协同作业的动态优化管理。整体架构如图 1 所示。

数字孪生碾压机群协同调度五层架构模型



图 1 数字孪生碾压机群协同调度五层架构模型

### 3 碾压机群协同调度数学模型构建

#### 3.1 模型假设

为简化模型求解、贴合工程实际，做出如下假设：

- (1) 所有碾压设备性能一致，无突发重大故障，设备故障仅考虑常规轻微损耗；
- (2) 仓面施工环境参数稳定，忽略极端天气突发影响；
- (3) 碾压作业严格遵循施工规范，碾压速度、厚度符合设计标准；
- (4) 设备启停时间、转向时间计入作业时长。

#### 3.2 目标函数构建

(1) 工期最短目标。优化目标为单仓面碾压作业总作业时长取最小值。单仓面碾压总作业时长由全部碾压设备的有效碾压作业时长、设备等待冲突时长、设备路径行驶时长三部分累加得到。总作业时长等于所有碾压设备各自的有效碾压时长、设备等待冲突时长和路径行驶时长的求和结果。

(2) 能耗最低目标。优化目标为碾压设备总能耗取最小值。设备总能耗由设备行驶能耗和碾压作业能耗两部分构成，总能耗等于每台设备单位行驶距离能耗系数乘以该设备总行驶距离，加上单位碾压时长能耗系数乘以该设备有效碾压时长，再对全部设备进行求和。

(3) 碾压质量最优目标。优化目标为碾压作业合格率取最大值。碾压作业合格率用 1 减去碾压轨迹重叠面积与仓面总碾压作业面积的比值进行计算。

#### 3.3 约束条件设置

- (1) 安全间距约束：相邻碾压设备作业间距不小于安全阈值，避免设备碰撞冲突；
- (2) 碾压遍数约束：仓面各区域碾压遍数满足设计规范（6~8 遍）；
- (3) 作业边界约束：所有设备作业轨迹不得超出仓面施工边界；
- (4) 速度约束：碾压行驶速度控制在 2~4km/h 的规范区间；
- (5) 任务覆盖约束：仓面所有作业区域均被全覆盖碾压，无遗漏区域。

### 4 改进 NSGA-II-麻雀混合优化算法设计

传统 NSGA-II 算法在多目标优化中存在收敛速度慢、种群多样性不足、易陷入局部最优的缺陷，麻雀搜索算法具备全局搜索能力强、收敛精度高的优势。融合两种算法优势，设计改进 NSGA-II-麻雀混合优化算法，通过麻雀算法优化种群初始化与迭代更新机制，提升多目标模型的求解精度与效率，算法流程如图 2 所示。

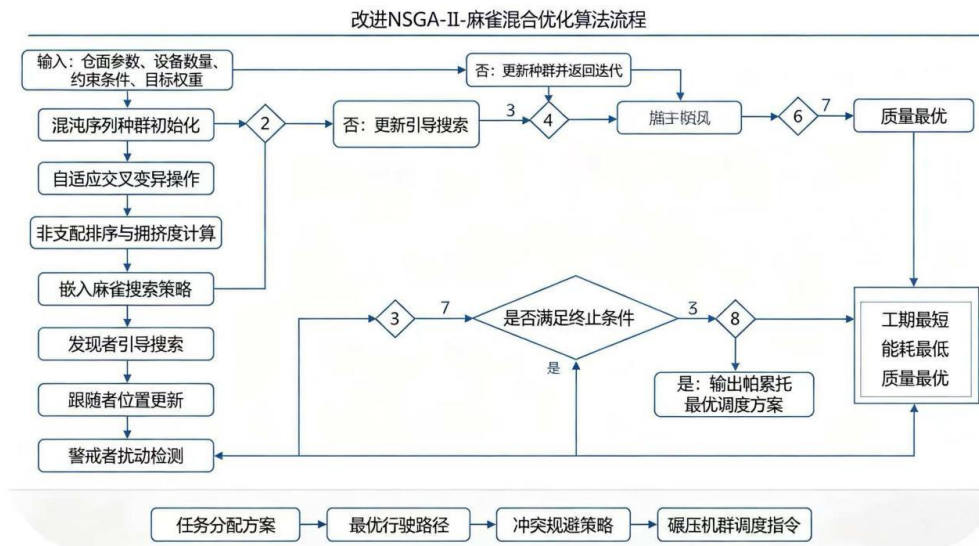


图 2 改进 NSGA-II-麻雀混合的优化算法流程

#### 4.1 种群初始化优化

采用混沌序列初始化种群，彻底替代传统随机初始化模式。混沌序列具备随机性、遍历性和规律性的特点，能够让初始种群个体更均匀地分散在整个求解空间中，有效拓宽了算法的解空间覆盖范围，大幅提升初始种群的多样性，从根源上规避初始种群分布集中带来的局部最优隐患，

为后续全局搜索奠定良好基础。

#### 4.2 自适应交叉变异算子改进

为平衡算法全局探索与局部开发能力，本次设计动态可调的自适应交叉变异算子，可根据算法实时迭代进程自动调节交叉概率和变异概率。在迭代前期，适当提高交叉概率、降低变异概率，重点强化算法的全局搜索能力，快

速遍历解空间、锁定优质解区域；在迭代后期，反向调低交叉概率、调高变异概率，聚焦优质区域开展精细局部寻优，精准打磨最优解，完美兼顾算法的全局探索和局部开发性能。

#### 4.3 麻雀搜索策略嵌入

改进嵌入麻雀搜索算法的核心搜索机制，依托麻雀算法特有的发现者、跟随者、警戒者三层分工机制，对非支配解集中的劣质个体进行扰动更新。通过该策略，可有效剔除解集内的冗余无效个体，持续优化保留的优质个体，解决算法迭代后期收敛停滞、搜索乏力的痛点，显著提升算法的收敛速度和最优解的求解精度<sup>[6]</sup>。

#### 4.4 算法终止条件

设置最大迭代次数为 200 次，当连续 10 次迭代帕累托最优解无明显变化时，判定算法收敛，终止迭代，输出最优调度方案。

### 5 工程仿真试验与结果分析

依托西部某大型水电站填筑仓面实际工况，搭建数字孪生仿真试验平台，设置传统人工调度、单一 NSGA-II 算法调度、本文改进混合算法调度三组对比试验，选取设备等待时间、设备利用率、碾压合格率、施工能耗四项核心指标开展性能验证。仿真试验参数设置：仓面作业面积 8000m<sup>2</sup>，碾压设备 6 台，单层填筑厚度 30cm，设计碾压遍数 8 遍。

#### 5.1 调度效率对比分析

不同调度模式的设备作业效率对比情况见表 1。从试验结果能够看出，采用传统人工调度时，设备作业安排比较混乱，经常出现设备扎堆拥堵、排队等待的情况，设备利用率只有 78.2%；直接使用原始 NSGA-II 算法做调度，还是会出现部分区域调度分配不均衡的现象。提出的改进混合算法，既能够完成整体方案的最优求解，又可以动态处理作业中的冲突问题。和传统调度方式相比，设备平均等待时间减少 21.7%；对比原始 NSGA-II 算法，等待时间

下降 10.3%，设备利用率提高到 92.5%，能够减少设备无产出的空耗作业，让多台设备组成的机群配合作业的整体效率得到改善。

结合表 1 的工程实测数据可以看出，传统人工调度方式下，碾压机作业轨迹重叠、施工漏压的问题频繁出现，施工质量合格率仅为 95.6%。即便采用单一智能算法开展调度优化，虽然能一定程度解决施工问题，但依旧存在局部作业不规范、优化不彻底的缺陷。本文改进算法依靠精准的作业路径规划和智能任务分配，从根源上大幅降低了碾压轨迹重叠概率，实现大坝碾压作业全域完整覆盖，施工合格率提升至 99.2%，完全符合大坝填筑施工的质量规范要求。

#### 5.2 算法收敛性能对比分析

为进一步验证改进混合算法的优越性，选取迭代收敛次数、帕累托解均匀度、多目标优化偏差三项核心指标，对比单一 NSGA-II 与改进 NSGA-II 麻雀混合算法。统一仿真参数：种群规模 100、最大迭代 200 次，交叉概率 0.8，变异概率 0.1，性能结果如表 2 所示。

由表 2 数据可知，提出的改进混合算法在收敛性能上实现了大幅提升，整体迭代收敛次数减少 58 次，收敛速度提升 37.2%。不仅如此，算法生成的帕累托解集分布均匀性得到明显优化，多目标优化结果的平均偏差也大幅降低，能够有效解决算法迭代后期容易陷入局部最优、迭代停滞不前的常见问题。该算法通过引入麻雀搜索策略优化种群迭代更新机制，有效补齐了传统多目标优化算法全局搜索能力弱、收敛效率低的核心短板，更加适配水电碾压机群这种多约束、多目标相互耦合的复杂施工场景。

综上，和普通单一优化算法相比，提出的改进 NSGA-II-麻雀混合算法收敛迭代速度提升，得到的帕累托最优解分布也更加均衡，可以较好协调工期、质量、能耗三者之间的相互制约关系。该算法能够适配高海拔水电站复杂仓面的动态调度实际工况，在工程落地使用上更有优势。

表 1 不同调度模式施工综合性能对比

| 调度模式            | 平均等待时长/min | 设备利用率/% | 碾压合格率/% | 单位面积能耗/(kW·h·m <sup>-2</sup> ) |
|-----------------|------------|---------|---------|--------------------------------|
| 传统人工调度          | 18.4       | 78.2    | 95.6    | 2.86                           |
| 单一 NSGA-II 算法调度 | 14.2       | 85.7    | 97.8    | 2.52                           |
| 本文改进混合算法调度      | 11.3       | 92.5    | 99.2    | 2.21                           |

表 2 两种优化算法收敛性能对比

| 算法类型          | 收敛迭代次数/次 | 帕累托解均匀度 | 多目标平均偏差值 | 局部最优迭代停滞次数 |
|---------------|----------|---------|----------|------------|
| 单一 NSGA-II 算法 | 156      | 0.724   | 0.087    | 23         |
| 本文改进混合算法      | 98       | 0.916   | 0.032    | 6          |

## 6 结论与展望

结合大坝施工核心需求,构建了同时兼顾施工质量、施工进度、设备能耗的多目标优化调度模型,并基于传统算法优化改良,设计 NSGA-II 麻雀混合改进算法,有效弥补了单一算法在求解精度、收敛速度上的短板。算法整体的收敛精度和求解效率均得到显著提升,能够高效处理大坝碾压施工中多约束、多变量、复杂化的机群调度问题,精准规避多台碾压设备作业重叠、路径冲突、设备闲置等问题,科学优化每台设备的施工任务分配和行驶碾压路径,碾压设备无效等待时间缩减,设备整体作业利用率提升,大坝碾压施工合格率提高,同时有效降低了设备作业能耗,节能降耗效果十分突出,完全适配实际大坝工程施工场景。后续可引入深度学习技术,实现施工工况的提前预判、风险预警,同时融合无人智能施工技术,进一步优化机群调度逻辑,搭建全自动化、智能化的碾压机群协同调度体系,全面提升大坝碾压施工的智能化管理水平。

## [参考文献]

- [1]曾婷.碾压混凝土坝智能建造技术在大型水电工程中的应用[J].大坝与安全,2026(3):63-67.
  - [2]易程.水利水电工程碾压混凝土施工工艺优化研究[C]//江西省工程师联合会.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(四).2025:533-536.
  - [3]龚国军,白歌.水电工程建设数智转型[J].中国电力企业管理,2023(9):27-28.
  - [4]王继敏,程晓攀.雅砻江流域水电工程智能建设探索与创新[J].四川水力发电,2020,39(6):1-7.
  - [5]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.
  - [6]刘玉玺.碾压混凝土坝施工信息模型原理与应用研究[D].天津:天津大学,2015.
- 作者简介:米刚利(1981—),男,高级工程师,毕业于中国石油大学,现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,项目副经理,从事水利水电和抽水蓄能电站施工管理工作。