

公路施工机械调度优化模型与算法研究

康 东

新疆北新岩土工程勘察设计有限公司 新疆 乌鲁木齐 831400

摘要: 当前公路施工中普遍存在机械调度粗放、资源配置不合理、任务冲突频发等问题, 导致资源浪费与工期延误。本文针对公路施工机械调度问题, 构建了以最小化总成本(包括机械使用成本、空驶成本和延期惩罚成本)为目标的多目标混合整数规划模型, 并综合考虑了机械类型匹配性、任务时间窗约束、工作量需求、机械可用性等现实因素。在此基础上, 设计了一种融合遗传算法(GA)与局部搜索策略的混合智能优化算法(HGA-LS), 以高效求解该NP-hard问题。通过仿真实验, 将所提模型与算法在不同规模的算例上进行测试, 并与传统调度规则及标准遗传算法进行对比。实验结果表明, 所提出的HGA-LS算法在求解质量与计算效率方面均具有显著优势, 能够有效提升公路施工机械调度的科学性与经济性, 为智慧工地与数字化施工管理提供理论支撑与技术路径。

关键词: 公路施工; 机械调度; 混合整数规划; 遗传算法; 局部搜索; 智能优化

引言

“十四五”期间, 我国公路建设高质量发展, 大规模、高复杂度项目增多。施工机械作为完成土方开挖、路基压实等关键工序的重要工具不可或缺, 在典型公路项目中, 其成本占总施工成本超30%。科学高效调度施工机械, 实现资源最优配置, 是提升项目管理水平、降低成本、保障工期的关键。但实际工程中机械调度挑战重重: 任务有时空分布特性, 不同段落任务有先后逻辑与时间窗口限制; 机械种类多、功能各异, 需匹配特定机型与性能要求; 资源有限且存在非作业时间; 施工现场环境动态变化, 如天气、故障等增加调度不确定性。传统“经验式”“就近分配”调度方法难以应对, 易致机械闲置、空驶率高、任务延误^[1]。因此, 建立科学数学模型并设计高效求解算法, 系统优化公路施工机械调度, 理论价值与实践意义重大。既能推动施工管理从粗放向精益转变, 还能为BIM、物联网、数字孪生等新技术在智慧工地中的应用提供核心算法支持。

1 问题描述与建模

1.1 问题定义

公路施工机械调度问题可描述为: 给定一组施工任务集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 每项任务 t_i 具有地理位置 (x_i, y_i) 、最早开始时间 EST_i 、最晚完成时间 LFT_i 、所需工作量 W_i 及所需机械类型集合 $M_i \subseteq M$ (M 为所有可用机械类型集合)。同时, 给定一组可用机械集合 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, 每台机械 k_j 属于某一类型 $type(k_j) \in M$, 具有单位时间使用成本 c_j , 初始位置 (x_j^0, y_j^0) , 且每日可用工作时长有限。目标是在满足所有任务时间窗、机械类型匹配、工作量完成等约束条件下, 为每项任务分配合适的机械, 并确定

其开始时间与作业顺序, 使得总成本最小。

1.2 模型假设

为便于建模, 作如下合理假设: 任务不可中断, 一旦开始必须连续完成; 机械在任务间转移时间由欧氏距离与平均行驶速度计算; 同一任务可由多台同类型机械并行作业, 总工作量为各机械工作量之和; 机械完成任务后可立即前往下一任务地点; 不考虑机械故障等随机因素(确定性模型)^[2]。

1.3 数学模型构建

1.3.1 决策变量

$x_{ij} \in \{0, 1\}$: 若机械 k_j 被分配执行任务 t_i , 则为1, 否则为0;

$s_i \geq 0$: 任务 t_i 的实际开始时间;

$f_i \geq 0$: 任务 t_i 的实际完成时间;

$d_{ij} \geq 0$: 机械 k_j 从其前一任务(或初始位置)到任务 t_i 的转移距离(若 $x_{ij} = 1$)。

1.3.2 目标函数

最小化总成本 Z :

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$$

其中:

机械使用成本: $Z_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_j \cdot \frac{W_i \cdot x_{ij}}{r_j}$ (r_j 为机械 k_j 的单位时间工作效率)

空驶成本: $Z_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha \cdot d_{ij} \cdot x_{ij}$ (α 为空驶单位距离成本)

延期惩罚成本: $Z_3 = \sum_{i=1}^n \beta \cdot \max(0, f_i - LFT_i)$ (β 为单位时间延期惩罚)

1.3.3 约束条件

任务完成约束:

$$\sum_{j:\text{type}(k_j)\in M_i} x_{ij} \geq 1, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

时间窗约束:

$$\text{EST}_i \leq s_i \leq f_i \leq \text{LFT}_i + \delta_i, \forall i$$

(δ_i 为允许的最大延期, 通常设为0或小值)

任务持续时间约束:

$$f_i = s_i + \frac{W_i}{\sum_j r_j x_{ij}}, \forall i$$

机械转移时间约束:

对于机械 k_j , 若其执行任务序列 $\pi_j = (t_a, t_b, \dots)$, 则:

$$s_b \geq f_a + \frac{\text{dist}(\text{loc}_a, \text{loc}_b)}{v}$$

其中 v 为平均行驶速度。

机械类型匹配约束:

$$x_{ij} = 0, \text{if type}(k_j) \notin M_i$$

变量域约束:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, s_i, f_i, d_{ij} \geq 0$$

该模型为混合整数非线性规划 (MINLP) 问题, 属于NP-hard问题, 难以用精确算法在合理时间内求解大规模实例。

2 求解算法设计

2.1 算法框架选择

鉴于问题的组合优化特性与高维搜索空间, 本文采用元启发式算法。遗传算法 (GA) 因其全局搜索能力强、易于处理离散变量, 被广泛用于调度问题。但标准GA易陷入局部最优^[3]。为此, 本文设计一种混合遗传算法 (Hybrid Genetic Algorithm with Local Search, HGA-LS), 在GA框架中嵌入局部搜索 (Local Search, LS) 算子, 以增强局部开发能力。

2.2 编码与解表示

采用基于任务的排列编码。染色体长度为 n (任务数), 每个基因位表示任务编号。同时, 为每个任务附加一个机械分配列表 $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$, 其中 $a_i \in \{1, \dots, m\}$ 表示分配给任务 t_i 的机械索引。

为保证可行性, 解码过程需:

按染色体顺序依次安排任务;

对每个任务, 检查候选机械是否满足类型要求、时间窗及转移时间;

若无可行机械, 则触发修复机制 (如调整顺序或重新分配)。

2.3 初始种群生成

采用贪心启发式生成部分优质个体:

按任务最早开始时间升序排列;

对每项任务, 优先分配成本最低且满足约束的可用机械。

其余个体随机生成, 并经可行性修复。

2.4 遗传操作

选择: 采用锦标赛选择 (Tournament Selection), 大小为3。

交叉: 采用改进的顺序交叉 (OX) 算子, 保持任务相对顺序。

变异: 采用交换变异 (Swap Mutation) 与插入变异 (Insertion Mutation) 组合, 概率分别为0.05和0.03。

2.5 局部搜索策略

在每代进化后, 对精英个体 (如前10%) 执行局部搜索:

任务重分配: 对某任务, 尝试更换其他同类型机械, 评估成本变化;

任务顺序调整: 对相邻任务对, 尝试交换顺序, 检查是否改善目标值;

时间微调: 在时间窗内微调任务开始时间, 减少空驶或等待。

局部搜索采用爬山法 (Hill Climbing), 直至局部最优。

2.6 算法流程

初始化参数: 种群大小 $N = 100$, 最大代数 $G = 200$, 交叉率 $P_c = 0.8$, 变异率 $P_m = 0.1$

生成初始种群Pop

评估适应度 (1/Z)

4for $g = 1$ to G :

NewPop = \emptyset

while |NewPop| < N :

parent1, parent2 = 选择(Pop)

child1, child2 = 交叉(parent1, parent2, P_c)

child1 = 变异(child1, P_m)

child2 = 变异(child2, P_m)

NewPop.add(child1, child2)

Pop = NewPop

对Pop中前10%个体执行局部搜索

更新全局最优解

输出最优调度方案

3 实验设计与结果分析

3.1 实验设置

算例生成: 设计三组算例 (小规模 $n = 10$, 中规模 $n =$

30, 大规模 $n = 50$), 任务位置随机分布在 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 区域内, 时间窗、工作量、机械参数按工程实际设定。

对比算法:

FCFS (先到先服务): 按任务EST顺序分配最近可用机械;

标准GA;

本文HGA-LS。

平台: Python 3.9, Intel i7-11800H, 16GB RAM。

3.2 结果分析

表1 结果分析

算例规模	算法	平均总成本	最优成本	平均运行时间(s)
n = 10	FCFS	12,580	12,320	0.1
	GA	11,250	10,980	2.3
	HGA-LS	10,820	10,750	3.1
n = 30	FCFS	38,900	37,600	0.5
	GA	33,400	32,800	18.7
	HGA-LS	31,200	30,950	22.4
n = 50	FCFS	65,200	63,800	1.2
	GA	56,700	55,900	68.3
	HGA-LS	52,400	51,800	75.6

分析:

HGA-LS在所有规模下均显著优于FCFS与标准GA, 成本降低约8%~15%;

随着问题规模增大, HGA-LS的优势更加明显, 表明其具有良好的可扩展性;

运行时间虽略高于GA, 但在工程可接受范围内 (< 2 分钟);

局部搜索有效提升了GA的收敛精度, 避免早熟收敛。

4 工程应用与展望

4.1 应用建议

本文所提出的模型与算法并非仅停留在理论层面, 其具备良好的工程落地潜力。在实际应用中, 可将其作为核心引擎集成至智慧工地管理系统之中。具体而言, 系统可通过与BIM模型的深度对接, 自动提取施工计划中的任务信息, 包括位置、工程量、工艺要求等; 同时, 利用部署在机械上的GPS/北斗定位终端, 实时获取设备的当前位置与状态; 在此基础上, 调度模块可周期性地

调用HGA-LS算法, 生成或动态更新最优调度方案, 并通过移动终端推送给现场管理人员与操作手。这种“数据驱动+智能决策”的模式, 将极大提升施工组织的响应速度与资源利用效率。

4.2 研究局限与未来方向

尽管本文取得了一定成果, 但仍存在若干局限。最突出的是模型的确定性假设, 忽略了施工过程中普遍存在的不确定性因素, 如机械突发故障、恶劣天气导致的停工等。这使得当前模型在面对真实动态环境时可能表现欠佳^[4]。未来的研究可沿着多个方向拓展: 其一, 构建鲁棒优化或随机规划模型, 将不确定性纳入考量, 优化方案在最坏情况或期望意义上的性能; 其二, 设计动态调度框架, 结合滚动时域优化 (RHO) 思想, 实现对突发事件的在线响应与重调度; 其三, 将问题扩展为多目标优化, 同步考虑成本、碳排放、能源消耗、工期等多个相互冲突的目标, 为绿色施工提供决策支持; 其四, 探索深度强化学习 (DRL) 等前沿人工智能方法, 利用其强大的状态感知与序贯决策能力, 处理更高维度、更复杂的调度场景。

5 结语

本文针对公路施工机械调度问题, 构建了一个综合考虑成本、时间窗、机械匹配等多约束的优化模型, 并设计了HGA-LS混合智能算法进行求解。实验结果验证了模型的合理性与算法的有效性。研究成果不仅丰富了施工调度理论体系, 也为公路工程智能化管理提供了实用工具。随着数字建造技术的发展, 基于数据驱动的智能调度将成为提升基建项目效能的关键路径。

参考文献

- [1]陶毅.建筑工程施工机械设备调度效率提升策略[J].智慧中国,2025,(S1):166-167.
- [2]刘颖.土方施工多机柔性作业调度及优化方法研究[D].华中科技大学,2023.
- [3]陈碧海,刘世龙,孙思遥.BIM技术在施工机械协调调度中的应用[J].建筑机械,2022,(09):68-71.
- [4]马骅.面向路桥施工调度的机群智能协调系统的研究.河北省,邢台职业技术学院,2013-06-29.