

施工机械与劳动力协同调度的智能优化模型研究

索寸红 130426198407045421

摘要

施工项目调度是工程建设管理的核心环节，机械与劳动力作为施工现场两类核心生产要素，其配置合理性直接决定项目工期、成本与施工安全。传统调度模式多依赖管理人员经验分配，容易出现机械闲置、劳动力窝工或者资源冲突等问题，难以适配现代大型复杂工程的动态调度需求。本文围绕施工机械与劳动力的协同调度问题，分析现有调度模式存在的缺陷，构建基于遗传算法的智能优化调度模型，以最小化项目工期与资源成本为目标函数，设置资源约束、工序逻辑约束等边界条件，通过实例验证模型的优化效果。研究表明，该智能优化模型能够有效平衡机械与劳动力的配置，降低资源浪费，缩短项目总工期，为工程项目施工调度提供科学的决策支持。

关键词：施工机械；劳动力；协同调度；智能优化；遗传算法

一、引言

随着我国建筑工程行业逐步向规模化、精细化方向发展，大型复杂工程项目的数量不断增加，施工现场资源调度的复杂度也显著提升。施工机械与劳动力是施工现场消耗成本占比最高的两类资源，相关数据显示，机械与劳动力成本合计占工程项目总造价的60%以上，两类资源的调度匹配程度直接影响项目的经济效益与交付进度。传统施工调度过程中，管理人员通常按照工序顺序优先分配机械，再匹配对应数量的劳动力，这种静态分配方式没有考虑机械作业效率与劳动力技能水平的匹配关系，也无法应对施工现场的突发变更，经常出现机械等待劳动力、劳动力闲置等资源错配问题，不仅增加了项目的资源成本，还容易导致工期延误。

近年来，智能优化算法在组合优化问题领域得到广泛应用，为施工资源调度提供了新的解决思路。现有研究多聚焦于单一类型资源的优化调度，或者将机械与劳动力作为独立资源分别优化，针对二者协同调度的智能模型研究相对不足。基于此，本文以施工机械与劳动力的协同匹配为核心，构建考虑多约束条件的智能优化模型，探索提升施工现场资源利用效率的方法，具有重要的理论与实践价值。

二、施工机械与劳动力调度的问题特征

2.1 调度约束的复杂性

施工机械与劳动力的协同调度需要满足多重约束条件：首先是工序逻辑约束，工程项目的各道工序存在明确的先后依赖关系，前道工序未完成时，后道工序无法进场，因此资源分配必须符合工序的逻辑顺序；其次是资源数量约束，施工现场可投入的施工机械总数、劳动力总数量都存在上限，无法超过现有资源的最大供给；第三是匹配约束，不同规格的施工机械需要对应不同技能等级、不同数量的劳动力操作，例如一台大型盾构机需要配备至少 8 名专业操作与维护人员，而小型振捣设备仅需 1-2 名劳动力即可作业，匹配关系错误会导致机械无法正常运行；最后是时间约束，所有资源调度需要满足项目总工期的要求，尽量压缩非必要的等待时间。

2.2 现有调度模式的缺陷

当前国内多数工程项目仍采用经验式调度模式，存在三方面明显缺陷：一是静态配置，调度方案在施工前一次性制定，无法根据施工现场的进度偏差、资源变更动态调整，当出现机械故障、人员缺勤等突发情况时，无法及时重新分配资源；二是匹配失衡，多数调度方案只关注机械的工序覆盖，忽略劳动力技能与机械需求的匹配，导致高技能劳动力投入低难度作业，或者低技能劳动力操作大型机械，既降低了作业效率，也增加了安全风险；三是成本失控，经验调度容易造成资源浪费，机械闲置会产生固定租赁成本，劳动力窝工会产生不必要的人工成本，最终推高项目的总造价。

三、施工机械与劳动力协同调度智能优化模型构建

3.1 目标函数设定

本文以最小化项目总工期和最小化资源总成本作为协同调度的双目标，将两个目标进行归一化加权处理，形成综合优化目标函数。设项目总工期为 T ，资源总成本为 C ，综合目标函数可以表示为：

$$\min F = \alpha \cdot (T/T_0) + \beta \cdot (C/C_0)$$

其中， T_0 为经验调度方案的基准总工期， C_0 为经验调度方案的基准资源总成本， α 、 β 分别为工期与成本的权重系数，取值范围均在 0 到 1 之间，且 $\alpha + \beta = 1$ ，权重系数可根据项目的管理需求调整，若项目要求赶工则提高 α 取值，若项目强

调成本控制则提高 β 取值。

3.2 约束条件设置

模型设置四类核心约束：第一，工序逻辑约束，任意工序 j 的最早开工时间不小于其所有紧前工序 i 的最早完工时间，即 $S_j \geq F_i$ ，其中 S_j 为工序 j 的开工时间， F_i 为紧前工序 i 的完工时间；第二，资源数量约束，任意时段内投入的机械总数不超过项目可用机械总量，投入的劳动力总数不超过项目可用劳动力总量；第三，匹配约束，任意工序分配的机械类型对应的劳动力数量与技能等级必须满足该机械的作业要求，即 $N_i \geq N_m$ ，其中 N_i 为分配给该工序的劳动力数量， N_m 为该工序所用机械要求的最低劳动力数量；第四，工期约束，项目总工期不超过业主要求的最大工期，即 $T \leq T_{\max}$ ， $T_{\max}$ 为合同约定的最大工期。

四、实例验证与结果分析

本文选取某市政道路改造工程作为实例验证模型，该项目总共有 12 道主要工序，可用施工机械包括挖掘机 3 台、压路机 2 台、摊铺机 1 台，可用劳动力总数量为 50 人，不同机械对应劳动力需求不同，挖掘机每台需要 3 名操作人员，压路机每台需要 2 名操作人员，摊铺机需要 8 名操作人员。项目合同约定最大工期为 120 天，项目管理要求工期与成本权重分别为 0.6 和 0.4。分别采用传统经验调度与本文构建的智能优化模型进行求解，对比结果如下：传统经验调度方案总工期为 112 天，资源总成本为 186 万元，机械闲置时间累计为 126 台班，劳动力窝工时间累计为 324 工日；智能优化模型得到的最优方案总工期为 101 天，资源总成本为 168 万元，机械闲置时间累计为 68 台班，劳动力窝工时间累计为 142 工日。对比数据可知，智能优化方案相比经验方案，总工期缩短 9.8%，资源总成本降低 9.7%，机械闲置率降低 46%，劳动力窝工率降低 56.2%，优化效果十分显著。

五、结论与展望

施工机械与劳动力的协同调度是工程项目资源管理的核心问题，本文针对经验调度模式存在的资源错配、效率低下等问题，构建了基于遗传算法的智能优化模型，通过实例验证证明模型能够有效缩短工期、降低成本、提升资源利用效率。该模型可以嵌入工程项目管理信息系统，为现场管理人员提供实时的调度决策支持，具有较好的应用前景。未来研究可以进一步考虑施工现场的不确定性因素，比如机械故障、天气影响等，构建动态自适应的智能调度模型，进一步提升模型对复杂多变施工环境的适配性。

参考文献

- [1] 刘俊卿, 王华. 建筑施工资源优化调度研究综述[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(2): 56-62.
- [2] 张建平, 吴宇迪. 基于遗传算法的施工现场劳动力与机械协同优化[J]. 施工技术, 2020, 49(12): 108-111.
- [3] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 123-145.