

水利工程施工组织优化方法研究

邢卫环

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘要: 水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分,具有投资规模大、施工周期长、技术复杂、环境影响敏感等特点。科学合理的施工组织是保障工程安全、质量、进度与成本控制的关键环节。然而,传统施工组织模式在面对复杂多变的自然条件、资源约束及多重目标冲突时,往往难以实现整体最优。本文系统梳理了水利工程施工组织的核心要素与面临的主要挑战,深入分析了当前主流的优化方法,包括关键路径法(CPM)、计划评审技术(PERT)、线性规划、动态规划、启发式算法以及智能优化算法(如遗传算法、粒子群优化、模拟退火等)的应用机理与适用场景。在此基础上,结合BIM(建筑信息模型)、数字孪生、物联网(IoT)等新一代信息技术的发展趋势,探讨了智能化、集成化施工组织优化的新范式。研究表明,融合多学科理论与先进技术的综合优化方法,是未来水利工程施工组织向精细化、智能化、绿色化发展的必然方向。

关键词: 水利工程; 施工组织; 优化方法; 智能算法; BIM; 多目标优化

引言

水利工程类型多样,关乎国计民生与生态环境。我国“十四五”及2035远景目标对水安全保障体系提出更高要求,一批重大水利工程启动,它们规模大、地质条件复杂、施工干扰多、社会关注高,给施工组织管理带来挑战。施工组织设计是指导施工全过程的技术经济文件,核心是科学配置与动态协调资源以实现目标。但实际操作中,受前期勘察不足、设计变更、气候水文不确定等因素影响,传统方案常致工期延误、成本超支等问题。因此,构建科学高效的施工组织优化方法体系是提升管理水平的关键。近年来,多领域发展为施工组织优化提供理论工具与技术手段,其正从“经验驱动”向“数据”“智能驱动”变革。本文将梳理相关理论、方法与技术前沿,为研究与工程实践提供参考。

1 水利工程施工组织的核心要素与挑战

1.1 核心要素

水利工程施工组织是一项高度系统化的管理活动,其成功实施依赖于多个核心要素的协同运作。首先,施工进度计划是整个组织体系的时间骨架,它不仅明确了各项施工活动的先后逻辑关系与持续时间,还通过识别关键路径为工期控制提供依据。其次,资源配置贯穿于施工全过程,涉及劳动力、施工机械、建筑材料等要素的数量、投入时机与空间分布,直接决定施工效率与成本水平。再者,施工方案的选择是技术可行性和经济合理性的集中体现,尤其在导截流、基础处理、大体积混凝土浇筑等关键工序中,方案优劣往往成为项目成败的分水岭。此外,现场平面布置作为空间维度的统筹安排,需科

学规划施工道路、料场、加工厂、临时设施及弃渣场的位置,以减少物料二次搬运、提高物流效率并保障作业安全。最后,安全与环境管理已不再是附加项,而是施工组织设计中必须前置考虑的核心内容,既要制定完善的风险防控措施确保人员设备安全,也要最大限度降低施工对周边生态系统的扰动,满足日益严格的环保法规要求。

1.2 主要挑战

尽管上述要素构成了施工组织的基本框架,但在水利工程这一特殊领域,其实施过程仍面临诸多独特而严峻的挑战。最突出的是高度的不确定性,尤其是水文气象条件的随机性,如突发洪水可能打乱导截流窗口期,持续降雨则会严重影响土方开挖与填筑作业,这种外部环境的不可控性使得静态计划极易失效。同时,资源约束呈现出刚性特征,大型专用设备如缆索起重机、高喷灌浆台车等数量有限且调度复杂,熟练技工的流动性也增加了人力资源配置的难度。更为复杂的是多目标之间的内在冲突——压缩工期往往意味着增加资源投入从而推高成本,而过度追求成本节约又可能牺牲质量或延长工期;安全与环保标准的提升虽具社会效益,却带来额外的时间与资金压力^[1]。此外,水利工程项目通常涉及业主、设计、施工、监理、地方政府乃至移民安置等多个利益相关方,协调链条长、信息不对称问题突出,容易导致指令混乱或执行偏差。在新时代背景下,绿色低碳、生态友好等可持续发展要求被置于前所未有的高度,进一步增加了施工组织的复杂度。这些交织叠加的挑战,使得传统的、单一维度的优化方法难以奏效,亟需发展能

够处理多目标、多约束、动态不确定性的综合优化方法体系。

2 水利工程施工组织优化方法综述

2.1 经典网络计划技术

自20世纪50年代问世以来,关键路径法(CPM)与计划评审技术(PERT)作为项目管理的基石,在水利工程施工组织中得到了广泛应用。CPM适用于活动持续时间相对确定的工程场景,其核心在于通过网络图模型识别出决定项目总工期的关键路径,从而将管理焦点集中于这些无浮动时间的活动上,有效提升了进度控制的针对性。然而,CPM对时间确定性的假设在面对水利工程常见的水文不确定性时显得力不从心。为弥补这一缺陷,PERT引入了三点时间估计(最乐观、最可能、最悲观),通过概率统计方法计算活动期望持续时间及其方差,进而评估项目整体完成时间的概率分布。这种方法在应对研发型或不确定性任务时具有一定优势,但其对活动时间服从 β 分布的假设在实际工程中往往难以成立,且随着网络规模扩大,计算复杂度急剧上升,限制了其在大型复杂水利工程中的实用性^[2]。尽管如此,这两种经典方法因其逻辑清晰、易于理解,至今仍是编制初始施工进度计划不可或缺的基础工具,并常作为更高级优化模型的输入框架。

2.2 数学规划方法

数学规划方法通过建立严谨的数学模型,将施工组织问题转化为在特定约束条件下寻求目标函数最优解的过程。在线性规划(LP)框架下,当目标(如最小化成本)与约束(如资源上限、工序逻辑)均可线性表达时,可借助单纯形法等高效算法求得全局最优解,特别适用于资源均衡分配等场景。然而,工程实践中大量存在非线性关系,例如设备使用效率随规模变化的规模经济效应,或工人技能随重复作业提升的学习曲线,这些都无法被线性模型准确刻画。为此,整数规划(IP)及混合整数规划(MIP)应运而生,用于处理决策变量必须取整数值的问题,如确定所需挖掘机的具体台数或施工班组的数量。虽然这类模型能更贴近现实,但其求解难度显著增加,尤其在变量维度较高时易陷入“组合爆炸”。动态规划(DP)则擅长解决具有阶段性特征的多阶段决策问题,例如在分期导流方案比选中,每一期的决策会影响后续阶段的可行域与成本,DP通过逆序递推可找到全局最优策略。但其“维数灾”问题同样制约了在大规模工程中的应用。总体而言,数学规划方法以其理论完备性和解的精确性著称,但对问题抽象能力要求极高,且在处理模糊性、随机性及大规模非线性问题时存在明显局限。

2.3 启发式与元启发式算法

面对水利工程施工组织中普遍存在的NP-hard复杂优化问题,精确算法往往因计算耗时过长而失去实用价值,启发式与元启发式算法因其高效性和鲁棒性成为更具吸引力的选择。传统的启发式规则,如“最早开始时间优先”或“资源强度最小优先”,通过简单直观的经验法则快速生成可行调度方案,在资源受限项目调度(RCPSP)等场景中表现良好,但其解的质量高度依赖于规则设计者的经验,缺乏普适性^[3]。相比之下,元启发式算法通过模拟自然界或物理系统的演化机制,在全局搜索与局部开发之间取得精妙平衡,展现出强大的问题求解能力。遗传算法(GA)借鉴生物进化原理,将施工方案编码为“染色体”,通过选择、交叉、变异等操作迭代优化种群,特别适合处理离散变量和多峰优化问题,但存在早熟收敛风险。粒子群优化(PSO)模拟鸟群觅食行为,每个“粒子”根据自身历史最优和群体最优位置调整飞行轨迹,收敛速度较快,但在复杂地形中易陷入局部最优。模拟退火(SA)则受金属退火过程启发,以一定概率接受劣质解以跳出局部极值点,全局搜索能力强,但参数设置敏感且收敛较慢。蚁群优化(ACO)通过模拟蚂蚁释放信息素寻找最短路径的机制,在解决施工物流路径优化等问题上效果显著。这些算法的共同优势在于对问题形式要求宽松、易于与工程实际结合,已成为当前水利工程施工组织优化研究的主流方向。

2.4 多目标优化与决策

水利工程施工组织本质上是一个典型的多目标优化问题,工期、成本、质量、安全、资源均衡度等目标之间往往相互制约,难以同时达到最优。传统的单目标优化方法通过加权求和将多目标问题简化为单目标,但权重的设定具有较强的主观性,难以反映决策者的真实偏好。 ϵ -约束法则通过将除一个主目标外的其他目标转化为约束条件,并通过调整约束阈值 ϵ 来探索不同权衡下的解,虽能获得部分Pareto最优解,但效率较低。近年来,直接搜索Pareto最优解集的方法受到广泛关注,其中NSGA-II(带精英策略的非支配排序遗传算法)因其能高效生成分布均匀、收敛性好的Pareto前沿而成为多目标优化的标杆算法。该方法通过非支配排序和拥挤度计算维持种群多样性,使决策者能够在可视化界面上直观比较不同方案在各目标上的表现,从而根据项目具体需求和风险偏好做出科学权衡。这种以Pareto最优解集为基础的决策模式,显著提升了施工组织方案选择的透明度与科学性,是应对复杂工程多维目标冲突的有效途径。

3 新一代信息技术驱动的智能优化新范式

3.1 BIM与4D/5D施工模拟

建筑信息模型(BIM)技术的兴起为水利工程施工组织优化注入了新的活力。BIM不仅构建了工程的三维几何模型,更集成了材料属性、施工工艺、成本信息等丰富数据,形成了一个全生命周期的信息载体。将BIM模型与施工进度计划关联,即可生成4D-BIM施工模拟,使管理者能够直观地“预演”整个施工过程,提前发现工序冲突、空间干涉或物流瓶颈等问题,从而在施工前优化方案^[4]。在此基础上,进一步关联成本数据库,形成5D-BIM模型,实现了进度与成本的动态联动分析。例如,当某项工序延期时,系统可自动计算由此引发的直接成本增加(如人工窝工、设备租赁延长)和间接成本变化(如管理费分摊),为动态成本控制和索赔管理提供精准依据。这种基于BIM的可视化、集成化模拟,极大地提升了施工组织设计的预见性与可控性。

3.2 数字孪生与实时优化

数字孪生(DigitalTwin)技术代表了施工组织优化的更高阶形态。它通过在虚拟空间构建物理工程的动态镜像,利用物联网(IoT)传感器(如GPS定位、RFID标签、视频监控、环境监测仪等)实时采集施工现场的人、机、料、环状态数据,并同步映射至数字模型中。基于此,可构建一个“感知-分析-决策-执行”的闭环优化系统:感知层负责实时数据采集;分析层利用机器学习算法预测潜在的进度偏差或资源短缺;决策层则调用内嵌的优化算法(如前述的智能算法)生成调整方案;执行层通过移动终端将指令推送至现场管理人员。这种模式彻底改变了传统“事后纠偏”的被动管理模式,实现了对施工过程的“事前预控”与“事中动态调控”,显著提升了组织响应的敏捷性与精准度。

3.3 大数据与人工智能辅助决策

海量工程数据的积累为施工组织优化提供了前所未有的知识基础。历史工程数据库、区域气象水文大数据、

建材价格波动信息、设备运行日志等,均可作为优化模型的输入,提升其预测与决策的准确性。人工智能技术,特别是深度学习,在此过程中扮演着关键角色。例如,卷积神经网络(CNN)可分析无人机航拍图像,自动识别土方压实度是否达标;循环神经网络(RNN)可基于历史天气与施工日志,预测未来一周的有效作业天数;强化学习则有望用于解决动态设备调度问题,通过与环境的不断交互学习最优调度策略。AI与优化算法的深度融合,正在催生新一代的智能决策支持系统,使施工组织从依赖专家经验逐步转向数据与算法驱动的科学决策。

4 结语

本文研究水利工程施工组织优化方法体系,发现其演进呈现由简到繁、由静态到动态、由单一到多目标协同的特点。现代水利工程管理需兼顾工期、成本等多维目标,BIM、物联网等信息是关键引擎,推动管理模式变革。展望未来,研究空间广阔:一是量化建模多重不确定性,发展鲁棒性优化模型;二是探索人机协同决策机制,融合AI与人类专家优势;三是将优化视角拓展至工程全生命周期,实现全链条价值最大化;四是在“双碳”战略下,纳入绿色指标,推动绿色低碳转型。总之,持续融合管理科学、信息技术与工程实践成果,才能构建现代化施工组织优化体系,服务经济社会可持续发展。

参考文献

- [1]张辉.水利工程施工组织设计的优化策略探析[J].居舍,2021,(30):119-120.
- [2]蒲福东,罗成忠.关于水利工程施工组织设计的优化分析[J].中国设备工程,2021,(07):209-210.
- [3]汪明.水利工程施工组织设计优化方法[J].河南水利与南水北调,2020,49(06):94-95.
- [4]卢惠仙.优化水利工程施工组织设计的方法分析[J].绿色环保建材,2020,(05):225-226.