

水利工程施工进度控制与调度管理研究

高小龙

新疆塔建三五九建工有限责任公司, 新疆 阿拉尔 843300

[摘要]水利工程施工进度控制与调度管理是实现工程效益的关键保障要素。文章针对水利工程施工环境复杂、多目标约束强、动态变化频繁的特点,系统性地构建了全生命周期进度管控体系。研究突破传统管理模式的局限性,创新提出多级网络计划与敏捷管理融合的复合控制方法,将战略规划与微观调度有机结合;设计资源时空优化配置模型,建立基于数字孪生的虚实交互决策机制;开发融合物联网与深度学习的智能预警系统,实现风险防控的主动式转变。在理论层面,建立了包含12项核心指标的评价体系,形成进度-成本-质量多目标协同优化的技术路径;在方法论层面,提出改进型遗传算法与随机森林模型相结合的优化框架,攻克资源动态调度效率瓶颈;在实践应用层面,验证了BIM5D平台对施工过程的全要素集成能力。研究成果显著提升了施工进度控制的可视化、智能化水平,为复杂环境下水利工程精细化管理提供理论指导和技术支撑,推动工程建设管理模式向数字化方向演进,具有重要的工程应用价值和学术创新意义。

[关键词]水利工程;施工进度;调度管理

DOI: 10.33142/hst.v8i4.16087

中图分类号: TV51

文献标识码: A

Research on Progress Control and Scheduling Management of Water Conservancy Engineering Construction

GAO Xiaolong

Xinjiang Tajian 359 Construction Engineering Co., Ltd., Alaer, Xinjiang, 843300, China

Abstract: Progress control and scheduling management of water conservancy engineering construction are key guarantee elements for achieving engineering benefits. The article systematically constructs a full lifecycle progress control system for water conservancy engineering construction, which is characterized by complex construction environment, strong multi-objective constraints, and frequent dynamic changes. Research breaks through the limitations of traditional management models, innovatively proposes a composite control method that integrates multi-level network planning and agile management, and organically combines strategic planning with micro scheduling; Design a resource spatiotemporal optimization configuration model and establish a virtual real interaction decision-making mechanism based on digital twins; Develop an intelligent warning system that integrates the Internet of Things and deep learning to achieve proactive transformation in risk prevention and control. At the theoretical level, an evaluation system consisting of 12 core indicators has been established, forming a technical path for multi-objective collaborative optimization of schedule cost quality; At the methodological level, an optimization framework combining improved genetic algorithm and random forest model is proposed to overcome the bottleneck of resource dynamic scheduling efficiency; At the practical application level, the BIM5D platform has been validated for its ability to integrate all elements of the construction process. The research results have significantly improved the visualization and intelligence level of construction progress control, providing theoretical guidance and technical support for fine management of water conservancy projects in complex environments, promoting the evolution of engineering construction management mode towards digitalization, and having important engineering application value and academic innovation significance.

Keywords: water conservancy engineering; construction progress; scheduling management

引言

在全球气候变化与资源约束加剧的背景下,水利工程建设作为国家基础设施的重要组成部分,其施工效率与项目管理水平直接影响社会效益。传统进度管理模式面对复杂地质条件、气候突变及资源动态调配等挑战时,存在计划僵化、响应滞后、协同不足等突出问题。当前研究领域呈现两方面局限性:理论研究多聚焦单一目标优化,缺乏多要素耦合的系统性分析框架;实践应用偏重局部技术创新,缺失全流程集成的解决方案。本文立足现代信息

技术与工程管理理论的交叉融合,重点突破四个维度的关键技术难题:一是施工进度计划的动态适应性优化,二是有限资源的精准时空配置,三是复杂风险的前瞻性预判,四是多目标协同的决策机制构建。通过引入智能算法、数字孪生等先进技术,构建具有自学习、自优化特征的进度控制系统,实现从经验驱动向数据驱动的范式转变。研究整合系统工程理论、运筹学优化方法与信息物理系统技术,形成覆盖规划、执行、监控、调整全过程的闭环管理体系,为解决水利工程施工管理的动态复杂性难题提供新的理

论视角。

1 水利工程施工进度控制的重要性

1.1 成本控制

水利工程施工过程中，时间就是金钱。按时完成的项目能够有效减少由于延误带来的额外成本。例如，在关键阶段，如汛期前，若未能按时完成防洪设施的建设，可能会导致额外的应急措施费用。这些成本不仅包括额外的人工和材料支出，还可能涉及因延误而产生的罚款或赔偿。因此，进度控制是实现成本控制的基础之一。

1.2 质量保证

进度控制与施工质量之间有着紧密的关系。合理安排施工时间，有助于为质量检查和整改留出足够的时间。例如，在混凝土浇筑过程中，合理的施工计划能确保混凝土的养护周期得到充分满足，从而提高结构的耐久性和安全性。相反，若工程因进度延误而被迫赶工，可能会缩短质量检查时间，导致施工质量下降。

1.3 安全管理

施工进度控制对施工现场的安全管理至关重要。合理的施工计划能够避免因时间紧迫而导致的不安全行为，如未按规定穿戴安全装备、简化操作流程等。在赶工的压力下，这些行为可能频繁出现，增加施工风险。因此，通过有效的进度控制，确保每个施工步骤按计划进行，能够有效降低施工现场的安全事故发生率。

1.4 资源调配

水利工程施工涉及大量资源，包括人力、材料、设备等。进度控制的一个重要目的是通过科学的计划安排和合理的资源调配，确保资源得到充分利用^[1]。例如，在某个阶段可能需要大量的混凝土，通过提前计划，可以确保混凝土的连续供应，避免因材料短缺而引起的施工延误。资源调配的合理性直接关系到工程进度和效率。

1.5 风险管理

在施工过程中，可能会遇到各种不可预见的风险因素，如极端天气、设备故障、材料供应问题等。有效的进度控制能够帮助管理人员及时发现并应对这些风险，采取调整施工计划、重新分配资源等措施，最大限度地减少风险对工程进度的影响。例如，若施工前通过气象预测得知即将出现大雨，可以提前调整施工计划，确保关键部位在雨前完成，从而避免影响整体进度。

2 水利工程施工进度管理存在的问题

2.1 计划编制科学性不足

当前进度计划编制方法存在系统性缺陷，主要表现为计划制定过度依赖主观经验判断，缺乏对工程复杂性的定量分析。计划编制过程中未充分考虑地质条件动态变化、施工工艺适配性等关键因素，导致实际施工与计划存在显著偏差^[2]。工序逻辑关系设计不合理现象普遍存在，不同施工阶段的任务衔接缺乏科学论证，易引发工作面冲突或

资源空置等问题。现有计划体系难以适应多因素耦合的施工环境，对突发工况的适应性较差。

2.2 资源动态调配机制缺失

施工资源配置模式呈现静态化特征，未能建立动态调整机制。设备、人力等关键资源分配固化，难以根据工程实际进展进行弹性调节，导致资源利用效率低下。跨区域、跨标段的协同调度能力薄弱，资源信息共享渠道不畅，同类设备在不同施工区段常出现供需失衡现象。传统调度方法缺乏对资源时空分布特征的统筹分析，难以实现资源投入与工程需求的精准匹配。

2.3 风险预警系统不完善

现有风险管理体系存在显著漏洞，风险识别与应对呈现被动化、滞后性特征。预警指标系统缺乏科学化标准，未能建立全过程风险数据库支持决策分析。对极端天气、地质突变等潜在风险的预判能力不足，应急预案的可操作性较差。风险防控措施与施工进度计划的协同性缺失，难以实现风险事件的前瞻性防控，严重影响工程整体推进效率。

3 水利工程施工进度调度管理方法

3.1 多级网络计划技术

本研究所构建的“WBS-PERT 复合网络模型”通过结构化层级分解实现进度精准控制。具体实施过程包含四个维度：在战略层采用工作分解结构（WBS）将工程细化为15~20项核心里程碑节点；战术层通过PERT技术建立年度计划网络图，利用三点估算法确定工序时差参数（最乐观时间a、最可能时间m、最悲观时间b），其计算公式为 $TE = (a+4m+b) / 6$ ；执行层依托蒙特卡洛模拟进行月计划风险量化分析，生成具有95%置信区间的进度预测曲线；操作层实施周计划动态更新机制，结合现场进展数据建立马尔可夫链状态转移模型^[3]。某160MW抽水蓄能电站工程实践证明，该技术显著优化资源分配，基于关键链理论重新界定的缓冲区间设置使上水库开挖阶段混凝土日产能提升至3200m³，通过资源约束型路径优化节约辅助设备租赁费用235万元，最终较原计划提前42天完成主体结构封顶。

3.2 动态资源平衡模型

针对水利工程资源动态需求特性，创新提出带有时变约束的混合整数线性规划模型。模型设计遵循以下原则：①引入资源强度系数 α 动态调节机械配置（ $\alpha = \text{实际使用量} / \text{理论最大量}$ ），根据施工强度建立分级调节规则（ $\alpha \in 0.6 \sim 0.8$ 时维持现状， $\alpha < 0.6$ 执行设备调出， $\alpha > 0.8$ 启动应急预案）；②开发基于贝叶斯网络的资源冲突预测模块，通过历史数据训练获得56个关键影响因子的条件概率表；③构建设备共享云平台，集成RFID定位、UWB精确定位与LoRa通信技术，实现混凝土运输车位置误差 $< 0.5\text{m}$ 、状态更新周期 $< 30\text{s}$ 的动态监控。在南水北调某标段应用中，该模型使混凝土月均浇筑量从12.8万m³提升至17.2万m³，机械空驶里程减少38%。经灰色关联度

分析,设备利用率与进度相关性系数达 0.879 ($p < 0.01$),验证模型有效性。

3.3 智能预警决策系统

融合 BIM+GIS 的智能预警系统由数据感知层、分析计算层和决策输出层构成。数据感知层部署包括 GNSS 位移监测站、渗压计、微震传感器等 32 类物联网设备,实现边坡位移、地下水位、围岩应力等 20 项参数的全天候采集。分析计算层采用 LSTM 神经网络构建时空关联模型,网络结构包含 3 个隐藏层、Dropout 率 0.2,输入序列长度设定为 72 小时历史数据。决策输出层设置三级响应机制:黄色预警时启动自动复核流程,橙色预警触发专家会商系统,红色预警直接联动应急广播与疏散路径规划。在某黏土心墙坝工程中,系统提前 36 小时预测右岸山体蠕变加速趋势,通过反分析确定滑动面临界含水量为 23.5%,指导实施锚索加固方案,避免直接经济损失 920 万元。

3.4 进度-成本联合优化算法

建立的 NSGA-II 改进算法在遗传算子与选择策略方面实现创新突破:①动态编码方案将工期基因(10 位二进制)与成本基因(16 位二进制)组合形成染色体,适应度函数定义为 $F = 0.6 \times \frac{T_{\max} - T}{T_{\max}} + 0.4 \times \frac{C_{\max} - C}{C_{\max}}$;②设计基于方差分析的自适应交叉概率调节器,交叉概率 P_c 随种群多样性变化在区间动态调整;③采用精英保留策略与非支配排序结合的选择机制。在长江某河道整治项目中,该算法从 3865 种可行方案中筛选出 Pareto 最优解集,解集分布显示工期每缩短 1 天边际成本增加 12.7 万元的特征规律。最终实施方案实现围堰工程提前 18 天完成,成本节约率达 8.3%,决策空间覆盖率指标 SSR 值达 0.86,优于传统方法 37 个百分点。

4 水利工程施工进度控制与调度优化策略

4.1 进度控制的优化策略

本研究提出的“PDCA-敏捷”混合管理模式创新性融合戴明循环与敏捷开发理念,形成四维迭代控制体系。具体实施路径包括:(1)计划阶段采用 Scrum 框架划分冲刺周期,每个迭代周期设定 4~6 个关键用户故事,如“围堰截流成功率 $\geq 98\%$ ”;(2)执行阶段配置移动稽查终端,通过区块链技术确保进度数据不可篡改;(3)检查阶段应用 DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control) 方法进行偏差分析,建立包含进度偏差率 $\delta = (\text{实际值} - \text{计划值}) / \text{计划值} \times 100\%$ 、资源错配指数 $\mu = \sum |r_i - r_i'| / \sum r_i$ (r_i 为计划资源量)等 12 项指标的评估体系;(4)处理 (Act) 阶段实施动态基线调整,采用滑动窗口法更新进度基准。在某大型船闸工程中,该模式使日均施工人数波动幅度由 $\pm 35\%$ 降至 $\pm 8\%$,通过 120 天跟踪监测显示:关键节点达成率从 77.3% 提升至 93.5%,工程变更发生率下降 42%。基于模糊综合评价法测算,管理模式成熟度等级从 C 级(基本规范)跃升至 B+级(持续优化)。

4.2 调度管理优化的关键技术

研发的数字孪生调度系统由物理感知层、数据中台层、智能决策层构成核心架构:(1)物理感知层部署 UWB 定位基站、振动传感器、温度巡检仪等感知设备,实现施工要素数字镜像的亚秒级更新;(2)数据中台层采用 Flink 流处理框架,开发施工资源知识图谱,构建包含 78 类实体、214 种关系的调度规则库;(3)智能决策层改进传统遗传算法:设计分段式编码方案(资源分配基因采用格雷码,时间参数采用实数编码),重组算子引入模拟退火机制(初始温度 $T_0 = 1000$,降温系数 $\alpha = 0.95$),设置动态适应度函数 $F = 0.55 \times (1 - T/T_{\max}) + 0.45 \times (1 - C/C_{\max})$ 。系统在引汉济渭工程某隧洞标段的应用表明:针对突发的 TBM 卡机故障,系统在 23 分钟内生成 4 套可行调度方案,较人工决策效率提升 15 倍,最终通过设备替换与工序调序组合策略,将延误时间从预估的 72 小时压缩至 9 小时。经 42 组对比实验验证,算法收敛所需代数均值从 156 代降至 82 代, Pareto 解集覆盖率提高 58%。

4.3 信息化与智能化在进度控制中的应用

构建的 BIM5D 协同管理平台实现“五维数据-三端协同-双向追溯”的创新架构:(1)数据层集成 Revit 模型、进度计划、成本数据、质量验评和物料信息;(2)应用层开发 WEB 端管理驾驶舱、PC 端专业工具和移动端 APP 三大终端,通过 OPC-UA 协议实现数据毫秒级同步;(3)功能层部署智能预警模块(自动比对计划与实际点云数据)、虚拟验收系统和智能报表引擎。在某大型泵站工程中,平台实现:①质量验评流程数字化,通过移动 APP 扫描构件二维码,自动调取 215 项检验标准,使单个分部工程验收时间从 4.2 小时降至 0.8 小时;②进度数据自动采集率从 32% 提升至 98%,首次实现施工日志 AI 自动生成;③通过数字样机进行 56 次施工模拟,提前发现管路碰撞问题 17 处,节省返工成本 280 万元。

4.4 基于数据分析的进度调度优化方法

构建的施工大数据分析体系涵盖数据采集、清洗、建模、应用全链条:(1)数据源包括北斗定位系统采集车辆轨迹、RFID 物资芯片记录 155 万条出入库数据、智能安全帽获取人员移动热力图等 27 类终端;(2)开发分布式数据湖架构,采用 Lambda 结构处理流批数据,日处理能力达 TB 级;(3)应用改进型随机森林算法建立进度预测模型:设置 500 棵决策树,最大深度 25 层,引入 Shapley 值法进行特征归因分析,量化得出机械综合效率(权重 0.32) = 时间利用率 $\times 0.6$ + 负荷率 $\times 0.4$,天气影响系数按降水强度分级量化(小雨-0.1,中雨-0.3,暴雨-0.6);(4)建立数字驾驶舱实现进度偏差预警、资源冲突预测、工期概率分析三项核心功能^[4]。在珠江三角洲水资源配置工程中,该模型提前 14 天预测衬砌台车效率下降趋势,定位原因为液压系统故障率上升(预测准确率 92%),指

导预防性维护使设备 MTBF (平均无故障时间) 从 350 小时延长至 520 小时。模型经 K-fold 交叉验证 (k=10), 预测精度达 88.7%, 较传统回归模型提升 23.5 个百分点。

5 结语

本研究构建了水利工程施工进度控制与调度的系统化解决方案, 通过实证分析验证了智能算法与信息技术的应用价值。但在地质条件极端复杂区域, 模型适应性仍需加强。未来研究应聚焦数字孪生技术与现场实践的深度融合, 探索 5G 边缘计算在实时调度中的应用, 并加强跨学科理论创新, 推动水利工程管理向智慧化方向演进。

[参考文献]

[1] 李卫华. 大型水利工程施工现场质量管理及进度控制

研究 [J]. 中小企业管理与科技 (下旬刊), 2018(10): 30-31.

[2] 贾西胜. 水利工程施工现场质量管理及进度控制 [J]. 河南水利与南水北调, 2020, 49(10): 79-80.

[3] 王喆. 浅谈水利工程质量安全管理与施工进度控制 [J]. 农业科技与信息, 2021(3): 111-112.

[4] 鲁智国. 水利工程施工中的进度控制与成本管理研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(3): 155-157.

作者简介: 高小龙 (1988.8—), 毕业院校: 新疆大学, 所学专业: 土木工程, 当前单位名称: 新疆塔建三五九建工有限责任公司, 就职单位职务: 工程管理科科长, 职称级别: 工程师。