

# 大型水利水电工程施工进度优化与动态控制研究

魏传林

四川川交路桥有限责任公司 四川 德阳 618300

**摘要:** 大型水利水电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、建设周期长、技术复杂、参与方众多、环境影响深远等特点。施工进度管理是确保工程按期、优质、高效完成的核心环节。然而,受地质条件、气候环境、资源调配、政策调整及突发事件等多重不确定因素影响,传统静态进度计划难以适应复杂多变的施工环境,导致工期延误、成本超支等问题频发。本文聚焦于大型水利水电工程施工进度的优化与动态控制问题,首先系统分析了影响施工进度的关键因素,继而构建了融合关键链法(CCM)、BIM技术与智能算法的综合进度优化模型,并在此基础上提出了基于“监测—评估—预警—调整”闭环机制的动态控制体系。该体系能够显著提升进度计划的鲁棒性与适应性,有效降低工期风险,为大型水利水电工程的精细化、智能化管理提供理论支撑与实践路径。

**关键词:** 大型水利水电工程;施工进度;进度优化;动态控制;关键链法;BIM;智能算法

## 引言

水利水电工程在防洪、灌溉、供水、发电、生态保护等方面发挥着不可替代的作用。随着“双碳”目标的推进和国家水网建设的加速,一批超大型、综合性水利水电项目相继启动,如白鹤滩、雅砻江两河口、滇中引水等工程。这些工程不仅规模空前,且往往地处偏远、地质复杂、生态敏感,对施工组织与进度管理提出了前所未有的挑战。传统的施工进度管理多依赖甘特图或关键路径法(CPM),虽能清晰表达工序逻辑,但其假设条件理想化,忽视了资源约束、任务缓冲及不确定性扰动,导致计划与实际严重脱节。尤其在大型项目中,微小的进度偏差经多工序传导后可能引发“蝴蝶效应”,造成整体工期失控。因此,如何在复杂环境下实现施工进度的科学优化与实时动态控制,已成为工程管理领域的核心课题。近年来,随着信息技术的发展,BIM(建筑信息模型)、物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)等技术为进度管理注入了新动能。然而,现有研究多聚焦于单一技术应用,缺乏系统性整合,难以形成闭环控制机制。本文旨在构建一个集进度优化与动态控制于一体的集成化框架,以提升大型水利水电工程的进度管控效能。

## 1 大型水利水电工程施工进度影响因素分析

### 1.1 自然环境因素

自然环境是制约大型水利水电工程施工进度的基础性变量。由于此类工程多选址于山区河谷地带,地质构造复杂,岩体稳定性差、断层发育、地下水丰富等问题普遍存在,极易在开挖、支护或基础处理阶段引发塌方、涌水等事故,进而打乱原有施工节奏。同时,气象

水文条件亦构成重大干扰源,例如汛期洪水不仅会中断围堰施工和导流作业,还可能冲毁临时设施;持续强降雨则会导致边坡失稳、道路泥泞,严重影响材料运输与机械作业效率。此外,随着生态文明建设的深入推进,施工活动必须严格规避鱼类洄游期、鸟类繁殖季等生态敏感时段,环保法规的刚性约束进一步压缩了有效施工窗口,使得进度安排面临更多限制。

### 1.2 技术与资源因素

技术难度与资源配置共同构成了施工进度的内在驱动力。大型水利水电工程常涉及高边坡开挖、深覆盖层防渗墙施工、大体积混凝土温控防裂等高技术含量工序,任一环节出现技术瓶颈都可能造成连锁延误。例如,若混凝土温控措施不到位,可能导致裂缝超标,需返工处理,直接拉长工期。与此同时,资源保障能力直接影响工序衔接的流畅性。缆机、塔吊等大型专用设备数量有限,若调度不当或故障频发,将严重制约关键部位的施工进度;专业施工队伍的技术水平与稳定性亦不容忽视,人员流动或技能不足易导致效率下降<sup>[1]</sup>。更值得警惕的是,在全球化背景下,关键设备或特种材料的供应链日益脆弱,一旦遭遇国际物流中断或出口管制,极易引发“卡脖子”风险,使整个工程陷入被动。

### 1.3 管理与协调因素

大型水利水电工程通常由多方主体协同推进,包括业主、设计单位、监理单位、总承包商及众多分包商,各方目标诉求不一,沟通协调成本高昂。设计图纸滞后或频繁变更尤为突出——前期地质勘探深度不足,导致施工中揭露的实际地质条件与设计不符,不得不进行方案调整;或因功能需求变化,临时增加结构构件,均会

打乱既定施工序列。此外，高标准的安全文明施工要求和严格的质量验收流程虽有助于保障工程品质，但也客观上延长了单道工序的完成时间。若缺乏高效的协同机制与统一的信息平台，信息传递失真、指令执行滞后等问题将不断累积，最终演变为系统性进度失控。

#### 1.4 政策与社会因素

外部政策环境与社会关系同样深刻影响工程进度。征地移民工作涉及大量土地征收与居民安置，若地方协调不力、补偿标准争议较大，极易引发群体性事件，导致主体工程无法进场施工。近年来，国家在能耗双控、安全生产、生态红线等方面的政策持续收紧，部分施工工艺或材料可能被临时叫停，迫使项目方紧急调整技术路线。更为不可预测的是突发事件的冲击，如新冠疫情曾导致全国范围停工停产，劳动力无法到位、物资运输中断；地震、山体滑坡等自然灾害亦可能直接损毁工程实体。这些外部扰动虽属小概率事件，但一旦发生，其破坏力巨大，亟需在进度管理体系中嵌入足够的弹性与韧性。

### 2 施工进度优化模型构建

#### 2.1 基于关键链法 (CCM) 的进度计划编制

针对传统关键路径法忽视资源约束与不确定性的问题，本文引入关键链法 (CriticalChainMethod, CCM) 重构进度计划逻辑。该方法首先依据工作分解结构 (WBS) 对施工任务进行系统拆解，明确各工序间的逻辑先后关系；随后重点开展资源负荷分析，识别出缆机、爆破班组、混凝土供应等关键资源，并通过资源平衡技术消除资源冲突，确保同一时段内资源需求不超过可用上限<sup>[1]</sup>。在此基础上，重新确定考虑资源约束后的最长逻辑路径，即为关键链。区别于传统方法仅关注时间逻辑，关键链法的核心创新在于引入三类缓冲区：项目缓冲 (PB) 置于关键链末端，用于吸收整条链上的不确定性扰动，其大小通常取关键链任务总历时的50%；汇入缓冲 (FB) 设置于非关键链汇入关键链的位置，防止非关键路径延误波及关键链；资源缓冲 (RB) 则作为预警信号，提前通知关键资源准备就绪。这种以缓冲代替安全时间冗余的策略，不仅压缩了计划总工期，还显著提升了应对突发扰动的能力。

#### 2.2 BIM技术驱动的可视化与协同平台

为支撑进度优化的可视化表达与多方协同，本文深度融合BIM技术构建数字管理平台。通过将优化后的进度计划与三维BIM模型关联，生成4D-BIM施工模拟，管理者可直观观察任意时间节点的工程空间状态，预判潜在冲突。例如，在地下厂房施工中，机电设备吊装路径

与结构施工区域可能存在空间干涉，传统二维图纸难以发现，而4D模拟可提前暴露此类问题，促使施工顺序优化。同时，BIM平台作为信息集成中枢，汇聚设计图纸、施工方案、物资清单、设备台账等多源数据，打破信息孤岛，实现业主、设计、施工、监理等各方在同一平台上协同作业。当设计发生变更时，系统可自动更新关联任务的工期与资源需求，确保进度计划始终与最新工程状态同步，极大提升了管理效率与决策准确性。

#### 2.3 智能算法辅助的进度优化

为进一步提升进度计划的科学性，本文引入智能优化算法在复杂约束条件下自动搜索最优解。以最小化总工期为目标函数，综合考虑工序逻辑约束、资源总量限制及缓冲区设置阈值等多重条件，构建数学优化模型。

优化目标函数：

$$\min T = \sum_{i=1}^n t_i + \text{Buffer}$$

约束条件包括：

工序逻辑约束： $ES_j \geq EF_i$  (若i为j的紧前任务)

资源总量约束： $\sum r_{ik} \leq R_k, \forall k$

缓冲区阈值约束： $PB \geq \alpha \cdot T_{\text{critical}}$

通过算法迭代，可在海量可行解中快速定位帕累托最优解，提升计划科学性。

遗传算法 (GA) 或粒子群优化 (PSO) 等元启发式算法因其全局搜索能力强、对非线性问题适应性好，被用于求解该高维组合优化问题。算法通过迭代进化，在海量可行施工序列中快速逼近帕累托最优解，不仅可压缩关键路径长度，还能合理分配非关键任务浮动时间，实现资源利用最大化。相较于人工排程依赖经验判断，智能算法能更客观、高效地平衡工期、成本与资源三者关系，为大型工程提供数据驱动的决策支持。

### 3 施工进度动态控制体系设计

优化后的进度计划仍需在实施中动态调整。本文构建“监测—评估—预警—调整”四阶闭环控制体系。

#### 3.1 实时进度监测

动态控制的前提是精准掌握现场实际进展。本文依托物联网与BIM平台，构建多源感知的实时监测网络。通过在工人安全帽内置UWB定位标签、在大型机械设备加装GPS与运行状态传感器，系统可自动采集人员分布、设备工时、物料消耗等数据；同时，部署在工地的高清摄像头结合计算机视觉算法，可自动识别混凝土浇筑面积、模板安装完成度等视觉特征，量化施工进度。所有原始数据经边缘计算初步处理后，实时回传至云端BIM平台，并自动映射到对应的4D模型构件上，形成与物理工

地同步演化的“数字孪生体”<sup>[3]</sup>。这种自动化、无感化的数据采集方式,大幅减少了人工填报误差,为后续评估提供高保真输入。

### 3.2 进度绩效评估

在获取实际进度数据后,需采用科学指标评估计划执行健康度。本文融合挣值管理(EVM)与缓冲消耗率(BCR)进行双重诊断。挣值管理通过比较计划价值(PV)、挣值(EV)与实际成本(AC),计算进度偏差( $SV = EV - PV$ )与成本偏差( $CV = EV - AC$ ),反映当前绩效与预算基准的偏离程度。然而,EVM对不确定性吸收能力有限,故补充引入缓冲消耗率指标:BCR等于已消耗缓冲时间与已用关键链时间之比。若BCR接近或超过1,表明不确定性扰动消耗缓冲的速度快于计划推进速度,即使SV尚未显著为负,也预示延期风险正在积聚。二者结合,既能反映短期绩效波动,又能预警长期趋势风险,为分级响应提供依据。

### 3.3 风险预警机制

基于上述评估结果,系统自动触发三级预警机制。当 $SV \geq 0$ 且 $BCR \leq 0.8$ 时,判定为绿色状态,进度处于可控区间;若SV转负或BCR升至0.8-1.0之间,则进入黄色关注区,提示管理人员需加强监控并准备预案;一旦SV显著为负且BCR突破1.0阈值,系统立即发布红色预警,推送至项目经理、施工负责人及相关方移动端,并同步激活应急预案知识库<sup>[4]</sup>。该机制将模糊的经验判断转化为清晰的量化阈值,确保风险信号及时传递,避免“温水煮青蛙”式的延误累积。

### 3.4 动态调整策略

预警触发后,需迅速采取针对性调整措施。对于黄色预警,优先采用柔性手段,如优化相邻工序搭接时间、增加夜班作业、局部增派熟练工人或调整设备调度,以最小代价恢复进度;若升级为红色预警,则需启动刚性干预,包括对关键链任务实施赶工(如采用更高

强度混凝土缩短养护期)、将串行工序改为并行施工、甚至变更技术方案(如改钻爆开挖为TBM掘进)。所有调整方案均需先在BIM平台进行4D模拟验证,确认无空间冲突、资源超载或安全风险后方可实施。调整后的计划自动更新为新基准,形成“计划—执行—检查—行动”的PDCA闭环,确保进度管理始终处于动态优化状态。

## 4 结语

本文针对大型水利水电工程施工进度管理难题,构建了“优化+控制”一体化框架。研究表明,关键链法通过引入缓冲机制有效解决了资源约束与不确定性问题,显著提升了进度计划的鲁棒性;BIM与智能算法的深度融合实现了进度计划的可视化、协同化与智能化优化;而基于“监测—评估—预警—调整”的动态控制闭环体系,则通过实时数据驱动与分级响应策略,极大增强了进度管控的敏捷性与韧性。未来研究可进一步探索将数字孪生技术深度融入进度管理,实现物理工地与虚拟模型的实时双向交互与自主优化;同时,引入强化学习等先进人工智能算法,使控制系统具备从历史扰动中学习并自主生成最优调整策略的能力;此外,构建基于区块链的多方协同信任机制,亦可提升进度数据的真实性与共享效率,为大型复杂工程的智慧建造开辟新路径。随着智能建造技术的持续演进,大型水利水电工程的进度管理必将迈向更高水平的精准化、自动化与智慧化。

## 参考文献

- [1]黄院亭.大型水利水电工程施工技术进度风险分析[J].居舍,2021,(13):49-50.
- [2]刘洋,杨宗彭,吴学斌,等.水利水电工程施工进度控制[J].科技风,2023,(05):76-78.
- [3]邵祥.关于水利水电工程施工进度控制的探讨[J].科学技术创新,2019,(30):124-125.
- [4]张泽锋,谢尚奎.浅析水利水电工程施工进度控制[J].治淮,2024,(11):96-97.