

大型水利水电项目施工进度控制与动态管理方法研究

张海茹

新疆北新岩土工程勘察设计有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 本文旨在系统性地探讨大型水利水电项目施工进度控制的核心挑战,并深入研究一套融合先进信息技术、科学管理理论与工程实践经验的动态管理方法体系。文章首先剖析了影响进度的关键因素,继而构建了以BIM(建筑信息模型)为核心的数据驱动平台,阐述了关键链法(CCM)在资源约束下的进度优化应用,并引入挣值管理(EVM)与预测技术进行绩效监控与趋势预警。研究表明,基于数据融合、智能分析与闭环反馈的动态管理方法,能够显著提升大型水利水电项目对内外部扰动的适应能力与响应速度,为实现工程高质量、高效率、高效益建设提供坚实的理论支撑与实践路径。

关键词: 大型水利水电工程;施工进度控制;动态管理;BIM技术;关键链法

引言

全球能源结构转型与可持续发展背景下,水利水电作为清洁可再生能源,在保障能源安全、优化能源结构等方面作用关键。近年来,“西电东送”“一带一路”等战略推进,白鹤滩、乌东德等世界级大型水利水电工程相继规划建设。这些工程规模大,且地质条件复杂、生态敏感、移民任务艰巨、技术难度高。施工进度是此类超大型工程生命线,失控会导致工期延误、成本超支,打乱国家能源布局与区域经济规划,造成巨大损失。但传统依赖甘特图等的静态进度管理模式,项目启动后易被动,难应对外部政策调整、极端天气等不确定性事件。因此,突破传统局限,构建实时感知、智能分析、快速响应的动态进度管理体系,是当前大型水利水电工程建设亟待解决的核心问题,本研究聚焦于此,欲整合前沿技术与管理理念提供系统性解决方案。

1 大型水利水电项目施工进度控制的关键挑战

1.1 工程本体的高度复杂性

大型水利水电工程本身就是一个高度复杂的巨系统。其技术集成度极高,涵盖了大坝、厂房、引水隧洞、泄洪设施、金属结构、机电设备安装等多个专业子系统,各子系统之间接口繁多、逻辑关系错综复杂。任何一个环节出现难以预料的技术难题,都可能迅速演变为制约整体进度的“瓶颈”。同时,施工工序之间存在着严格的先后逻辑和空间依赖关系,例如大坝混凝土浇筑必须在基础开挖和处理完成后才能进行,而厂房的开挖作业又常常受到大坝施工进度和空间的制约。这种强耦合性使得局部的微小延误极易通过复杂的网络关系扩散至全局,产生放大效应。此外,作为关乎国计民生的百年大计,工程对质量和安全的要求近乎苛刻,任何因

质量问题导致的返工或因安全事故引发的停工调查,都将直接造成无法挽回的工期损失。

1.2 外部环境的高度不确定性

除了工程自身的复杂性,项目所处的外部环境更是充满了高度的不确定性。这类工程多选址于偏远山区,长期暴露在复杂地质(如断层、岩爆、涌水)、极端水文(如超标准洪水、枯水期延长)和恶劣气候(如暴雨、冰雪、大风)等自然力量的直接威胁之下,而这些自然因素具有极强的随机性和不可预测性。与此同时,政策与社会因素同样多变且影响深远。移民安置、环境保护、文物保护等社会敏感问题一旦处理不当,极易引发群体性事件,导致工程被迫中断。宏观层面的政策调整、关键原材料价格的剧烈波动、以及劳动力市场的结构性变化等,也会从不同维度对项目的顺利推进构成干扰^[1]。更为严峻的是,大型水电机组、特种钢材、高强混凝土等关键物资和设备的供应链条冗长、环节众多,任何一个节点出现问题,如供应商破产或国际物流中断,都可能造成“卡脖子”式的全局性延误。

1.3 组织管理的巨大挑战

面对如此复杂的工程实体和不确定的外部环境,组织管理本身也面临着前所未有的挑战。大型项目通常汇聚了业主、设计、监理、总包、分包、设备供应商等数十家甚至上百家参建单位,各方利益诉求和目标并不完全一致,形成了天然的信息壁垒,导致沟通协调成本极其高昂。在实践中,传统的“碎片化”管理模式依然普遍存在,信息传递往往依赖层层上报的周报、月报,这不仅容易失真,更使得管理者无法实时掌握现场的真实动态,从而错失干预的最佳时机。与之相伴的是严重的“数据孤岛”现象,进度、成本、质量、安全、合同等

各业务系统各自为政，数据格式不一，难以形成统一的项目全景视图，这从根本上制约了综合分析科学与决策的能力。这些挑战相互交织、彼此放大，使得大型水利水电项目的进度控制成为一个典型的“复杂适应系统”问题，亟需一种能够拥抱变化、主动适应的动态管理范式。

2 基于BIM的施工进度动态管理平台构建

要实现有效的动态管理，首要任务是打破信息壁垒，构建一个能够实时、全面、准确反映项目状态的“数字孪生”平台。BIM技术凭借其强大的信息集成与可视化能力，成为构建该平台的理想核心。

2.1 平台总体架构

本文提出的动态管理平台采用“1+3+N”的架构。其中，“1”个核心即BIM模型，它作为项目的唯一真实数据源（Single Source of Truth），承载着几何信息、属性信息以及过程信息，是整个平台的基石。“3”大支柱则共同支撑起平台的运行能力：首先是物联网（IoT）感知层，通过部署在施工现场的各类传感器（如GPS定位、倾角仪、应力计、视频监控、无人机航拍）、RFID标签和移动终端等，实时采集人、机、料、法、环等生产要素的状态数据；其次是业务系统集成层，负责将项目管理信息系统（PMIS）、企业资源计划（ERP）、合同管理系统、质量安全管理系统等与BIM平台进行深度集成，打通各业务流的数据通道；最后是云计算与大数据平台，为海量数据的存储、计算和深度分析提供强大的算力支持。“N”个应用场景则是在这个统一、坚实的基础上衍生出的具体功能模块，如进度模拟、碰撞检查、资源调度、风险预警、虚拟验收等，服务于项目管理的方方面面。

2.2 BIM与进度计划的深度融合（4DBIM）

将传统的二维进度计划（如P6或Project文件）与三维BIM模型进行时间维度的关联，形成4DBIM模型，这不仅仅是简单的可视化展示，更是管理方式的根本性变革。通过4D动画模拟，复杂的施工逻辑变得直观易懂，能够清晰地展示未来任意时间点的施工场景、工作面分布和资源投入情况，从而实现高效的可视化交底，有效指导现场作业。更重要的是，这种融合使得前置冲突检测成为可能。管理者可以在虚拟环境中提前发现工序逻辑错误、空间冲突（例如大型吊装设备作业时与已建结构的干涉）以及资源分配不均等问题，将潜在的矛盾和风险解决在施工之前，避免了昂贵的现场返工^[2]。在项目执行阶段，平台可以将物联网采集的实际进度数据（如已完成的混凝土方量、钢结构吊装的具体位置）实时映射回BIM模型，并与计划模型进行自动比对，从而

在三维空间中直观地呈现出进度偏差（Delay）或提前（Ahead）的具体位置和程度，为管理者提供精准的决策依据。

2.3 多源数据融合与信息共享

该平台的强大之处还在于其多源数据融合能力。通过标准化的API接口、中间数据库等方式，平台能够实现来自不同源头、不同格式的异构数据的接入与融合。例如，可以将质量安全巡检记录、设计变更通知、气象预警信息等非结构化或半结构化数据，与BIM模型中的具体构件或区域进行精准关联。这种深度融合打破了传统业务系统的边界，使得所有授权用户——无论是项目经理还是现场班组长——都能在同一平台上获取其所需的、上下文相关的完整信息，确保了信息的高度对称。这种透明、高效的协同环境，为快速响应变化、做出科学决策奠定了坚实的基础，彻底改变了过去因信息不对称而导致的低效和冲突。

3 动态进度控制的核心方法体系

有了坚实的数据平台作为支撑，还需配套科学的管理方法，才能将数据真正转化为管理价值，实现对进度的有效动态控制。

3.1 基于关键链法（CCM）的初始进度计划优化

传统关键路径法（CPM）在制定计划时往往忽略了现实世界中最关键的约束——资源。这常常导致理论上完美的计划在现实中寸步难行。关键链法则从系统思维出发，认为项目的实际工期是由“关键链”而非“关键路径”决定的，这条关键链是综合考虑了任务间的逻辑依赖关系和资源约束后的最长路径。其核心思想是将原本分散在各项任务估算中、用于应对不确定性的安全时间（Safety Time）集中起来，在关键位置设置缓冲区。具体而言，会在关键链的末端设置项目缓冲（PB）以保护总工期，在非关键链汇入关键链的位置设置汇入缓冲（FB）以防止非关键链的延误侵蚀关键链，还会设置资源缓冲（RB）来提前预警关键资源的到位情况，确保关键链上的任务不会因资源短缺而中断。在任务持续时间估算上，CCM采用激进的“50%法则”，即使用有50%完成概率的紧凑工期，以此挤出计划中的水分，提高执行力。项目管理的重点也随之转变，不再是监控单个任务的完成百分比，而是监控缓冲区的消耗速率^[3]。管理者通过观察缓冲区的“颜色”（绿/黄/红）就能快速判断项目的健康状况，并在缓冲区被过度消耗前采取干预措施。对于资源（如大型缆机、稀缺的专业施工队伍）极度紧张的大型水利水电项目，应用CCM可以有效缓解窝工和等待现象，使初始计划更具可行性和鲁棒性。

3.2 基于挣值管理 (EVM) 的动态绩效监控

当项目进入执行阶段,需要一套量化的工具来客观衡量实际绩效与计划的偏离程度。挣值管理 (EVM) 通过引入“挣值 (EV)”这一巧妙的概念,成功地将进度和成本这两个维度统一到同一尺度下进行衡量和比较。挣值代表的是到某一时点为止,实际完成工作的预算价值。通过将其与计划价值 (PV, 即到该时点计划完成工作的预算成本) 和实际成本 (AC, 即到该时点实际花费的成本) 进行对比,可以计算出进度绩效指数 ($SPI = EV/PV$) 和成本绩效指数 ($CPI = EV/AC$)。这两个指数为管理者提供了清晰、客观的绩效信号: SPI 大于 1 表示进度超前,小于 1 则表示落后; CPI 同理,用于判断成本是否超支。更重要的是,结合历史绩效指数, EVM 还能对项目的最终完工估算 (EAC) 和完工尚需估算 (ETC) 进行科学预测。在本文提出的 BIM 平台上, EVM 数据可以与具体的模型构件进行关联,管理者不仅能把握项目整体的 SPI/CPI,还能下钻到某个标段、某个单元工程,精准定位绩效不佳的根源所在,从而实现精细化的过程管控。

3.3 融合机器学习的进度偏差预测与预警

面对大型水利水电项目高度不确定的环境,仅靠事后的 EVM 分析进行纠偏是远远不够的,管理必须具备前瞻性的预测能力。利用平台在项目全生命周期中积累的海量历史数据和实时采集的现场数据,可以构建机器学习模型来实现智能预警。首先,需要进行特征工程,从纷繁复杂的数据中选取那些对进度有显著影响的关键特征,例如未来一周的天气预报数据、地质雷达的扫描结果、大型设备的实时运行状态、劳动力的每日投入情况、关键材料的到货率、以及近期质量安全事件的发生频率等。然后,可以选择合适的时间序列模型 (如 ARIMA)、回归模型,或更强大的深度学习模型 (如

LSTM) 来训练算法,使其能够学习进度变化的内在规律,并对未来关键节点的完成时间进行预测^[4]。当模型的预测结果显示某项关键任务的延误概率超过预设的风险阈值 (例如 80%) 时,系统便会自动触发预警,并将预警信息精准推送给相关责任人。这种预警不仅是对风险的提示,还可以附带基于平台知识库的初步应对建议,从而将进度管理从事后纠偏、事中控制,提升到了事前预防的新高度,极大地增强了项目的韧性。

4 结语

本文聚焦大型水利水电项目施工进度控制难题,提出以数据驱动、智能分析和闭环反馈为核心的动态管理方法体系。以 BIM 为核心的多源数据融合平台打破信息孤岛,为管理提供全面准确信息;关键链法、挣值管理与机器学习预测技术集成,实现全链条覆盖,形成自我学习、持续优化的管理生态。该方法体系超越传统模式,赋予项目管理团队更强能力,是应对工程复杂性与不确定性的有效途径。展望未来,随着技术演进,进度动态管理将向更高层次发展。人工智能将在进度优化等方面深度发力,数字孪生体将成为能仿真推演、自主学习预测的智能系统,区块链技术有望确保关键数据真实不可篡改,降低协同成本。

参考文献

- [1]朱榕生.水利水电工程施工进度控制中关键问题与优化对策研究[J].水上安全,2025,(21):53-55.
- [2]蔡清发.水利水电设备工程施工进度管理方法探析[J].中国设备工程,2025,(21):50-52.
- [3]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.
- [4]刘敏.水利水电工程施工进度计划风险分析和管理[J].治淮,2024,(07):73-74.