

BIM-5D 技术的工程施工进度-成本联合动态控制研究

张 鹏

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]针对传统水电工程施工管理中进度与成本信息孤岛、协同控制难的问题, 提出基于 BIM-5D 技术的进度-成本联合动态控制方法。通过构建 BIM-5D 数字化模型, 建立进度与成本的耦合关系及动态控制流程, 集成施工进度动态跟踪、工程量自动统计、成本实时核算及协同预警等关键方法。以西部某大型水电站为应用载体, 设定控制目标并开展实施分析。结果表明, BIM-5D 联合动态控制可有效提升进度偏差识别精度与成本实时管控能力, 使进度偏差率降低至 5% 以内, 成本超支风险降低 12% 以上, 为水电工程精细化管理提供了可行技术路径。

[关键词]BIM-5D; 进度控制; 成本控制; 联合动态控制

DOI: 10.33142/mem.v7i4.20281

中图分类号: F426

文献标识码: A

Research on Joint Dynamic Control of Construction Progress and Cost of BIM-5D Technology

ZHANG Peng

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: In response to the problems of isolated progress and cost information and difficult collaborative control in traditional hydropower project construction management, a joint dynamic control method of progress cost based on BIM-5D technology is proposed. By constructing a BIM-5D digital model, the coupling relationship between progress and cost and dynamic control process are established, integrating key methods such as dynamic tracking of construction progress, automatic statistics of engineering quantities, real-time cost accounting, and collaborative warning. Set control objectives and conduct implementation analysis using a large hydropower station in the western region as the application carrier. The results indicate that BIM-5D combined with dynamic control can effectively improve the accuracy of schedule deviation identification and real-time cost control capability, reducing the schedule deviation rate to within 5% and reducing the risk of cost overruns by more than 12%, which provides a feasible technical path for the refined management of hydropower projects.

Keywords: BIM-5D; progress control; cost control; joint dynamic control

引言

水利水电工程规模大、工期长、投资多, 施工期间进度同成本的协同管理一直是个工程管理的重大问题。传统管理模式, 进度计划由工程部门编制, 成本预算由造价部门核算, 二者相独立、信息滞后, 造成进度滞后不知成本增加多少、成本超支不知进度影响多大的困境。水电工程地处偏远、地质复杂, 此问题更加明显。

建筑信息模型技术的发展给以上问题的解决提供了一种新的思路。BIM 技术的核心就是 I (信息), 即模型包含进度、投资、质量、安全等重要信息, 从而达到数据集成化管理的目的, 进而衍生出 4D (时间) 和 5D (成本) 的深入应用。BIM-5D 是在三维模型的基础上加上时间维度和成本维度, 形成模型、进度、成本一体化的数据环境,

给进度和成本的联合动态控制打下了技术基础。本文以西部某大型水电站为工程背景, 建立 BIM-5D 施工进度-成本联合动态控制模型, 提出关键控制方法, 用实施分析来检验它的有效性。

1 BIM-5D 技术在工程施工进度和成本协同管理方面的行业背景

传统水电工程施工管理中进度控制和成本控制属于两个不同的业务系统。进度计划用工作分解结构做框架, 成本管理以工程量清单为依据, 两者数据关联依靠人工传递, 存在信息滞后、口径不同、协同难的问题^[1]。进度出现偏差的时候, 很难迅速衡量它给成本带来的影响, 成本超出的时候, 也不能清楚地找到具体到哪一个进度环节上。

BIM-5D 技术的核心价值在于打破这一信息壁垒。

BIM-5D 是在三维建筑模型的基础上, 将施工进度信息 (4D) 和成本信息 (5D) 结合起来形成的集成化数据模型, 实现工程实体、施工过程、资源消耗三者数字化的映射。从技术上来说, BIM-5D 把模型构件同 WBS 节点联系起来, 创建起“构件-工序-资源”之间的对应关系, 从而形成可视化的成本-度数据网络。水电工程地质条件复杂、工程量大, 对于 BIM-5D 的要求更加迫切。水电站施工工程软件可以利用 BIM 技术创建三维数字孪生体, 准确地复现大坝、厂房、引水系统等主要结构的空间联系, 提早发现碰撞情况, 缩减后期返工。同时水电工程多参建单位之间信息协同难度大, BIM-5D 平台可以提供统一的协同环境。与传统的做法相比, BIM-5D 有三个方面的优势, 即可视化、可计算、可模拟, 给创建联合动态控制模型赋予了技术支撑。

2 BIM-5D 施工进度-成本联合动态控制模型的建立

2.1 BIM-5D 数字化模型构建与数据集成

BIM-5D 数字化模型的建立采取的是由粗到细, 分步集成的方式。根据工程设计图纸建立三维几何模型, 包括大坝、引水系统、厂房等主要建筑物, 将工程分解成可以独立管理的构件单元, 并给每个构件单元赋予唯一的编码。其次就是集成施工进度信息。将工程构件唯一的编码同进度计划的任务标识联系起来, 把三维构件和进度计划的信息结合起来, 创建出 4D 模型^[2]。进度计划用工作分解结构, 确定各工序的持续时间、逻辑关系及所需资源。最后,

集成成本信息, 把工程量清单和模型构件关联起来, 实现工程量的自动统计, 把定额单价、合同单价录入系统形成成本数据库。BIM 模型构件具有时间、成本属性, 能够模拟整个施工过程和资源、成本需求, 提前发现施工问题, 避免不必要的经济损失。数据集成使用中心数据库结构, 保证进度和成本数据一致。

2.2 进度-成本耦合关系及动态控制流程设计

进度和成本之间存在着内在的耦合关系。进度的推进推动工程量完成并形成成本支出, 成本超支会使得资源供应短缺, 阻碍进度的推进。双向耦合关系可以用挣值管理三个核心参数来量度, 即计划值 (PV)、挣值 (EV)、实际成本 (AC), 计算进度偏差 $SV=EV-PV$ 和成本偏差 $CV=EV-AC$ 。当 SV 和 CV 出现相反变化的时候 (进度超前但是成本超支, 或者进度滞后但是成本节约), 说明耦合关系处于非均衡状态, 需要找出主导因素并采取相应的措施。根据耦合关系来设计出监测、分析、预警和调整四个阶段的动态控制流程图 (图 1)。

监测阶段对实际进度、成本等实行实时采集, 并及时把采集到的数据更新到模型里。分析阶段用挣值法计算偏差指标, 结合 BIM 模型的红黄绿着色功能来呈现偏差在空间上、时间上的分布情况及变化趋势, 使管理者清楚地看到偏差主要集中在何处。预警阶段偏差大于阈值就自动发出警报。在调整阶段用模型模拟不同的调整方案效果, 选择最优方案执行。该流程就形成了一个不断优化控制循环。

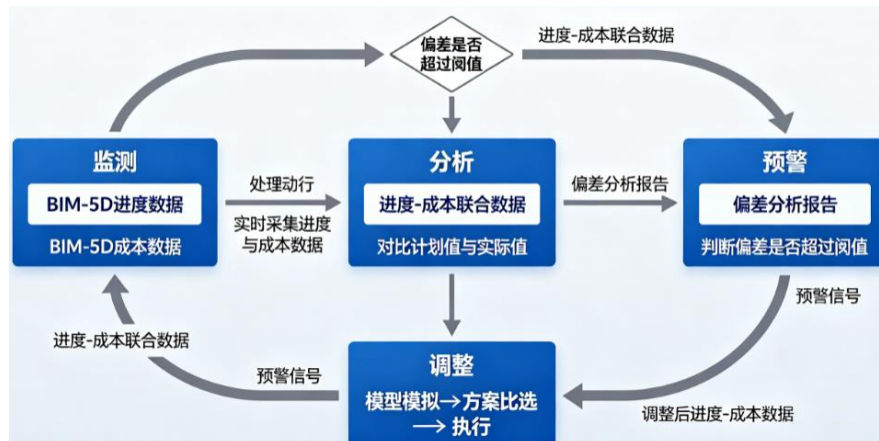


图 1 为基于 BIM-5D 的进度-成本耦合动态控制流程图

3 BIM、5D 施工进度和成本联合动态控制的关键方法

3.1 施工进度动态跟踪与偏差识别

进度动态跟踪就是对实际进度数据进行实时采集并进行模型映射。可以使用多种技术手段实现, 移动端 APP

现场录入工序完成情况, 可以拍照上传并进行位置定位, 保证数据真实性, 无人机定时飞行拍摄, 使用图像识别算法得到填筑高程、浇筑面积等宏观进度数据并同 BIM 模型叠加对比, 物联网传感器采集塔机、拌和站等关键设备的运行情况和作业时长, 间接检验施工进度^[3]。三种方式

互相补充, APP 可以对工序级的精细数据进行处理, 无人机可以对大面积的形象进度进行监控, 传感器可以对自动化监测提供连续的数据支持, 从而形成一个以点、面、线相结合的进度数据采集网络。

实际进度数据录入之后会自动和计划进度进行对比, 分为时间和形象两个方面。时间偏差体现工序开始、结束时间的提前或者滞后, 形象偏差体现已完工程量和计划工程量的差别。对大坝填筑、隧洞衬砌等线性作业, 系统自动拟合实际进度曲线和计划进度曲线, 求出任意时刻的累计偏差值。利用 BIM 技术进行施工模拟, 可以检验进度计划是否合理, 进而对进度进行调整、缩短工期。偏差识别时, 在模型中用不同的颜色标示出超前、滞后、正常的构件, 管理者可以清楚地看出整体进度的大致情况, 迅速找到滞后的地方, 分析出它所造成的不良影响的范围。对滞后工序, 系统会自动追踪它的前置工序是否已完成以及所消耗的资源情况, 从而判定延误的根本原因是否是由于计划问题、资源紧张或者外界环境改变所造成的。

3.2 工程量自动统计与成本实时核算

工程量统计属于进度同成本的纽带。BIM-5D 可以实现工程量的自动统计, 进度状态更新之后, 系统会自动识别出已经完成的构件, 读取几何参数来计算工程量, 并按照预先设定的单价生成产值。根据 BIM-5D 的绿化园林工程造价控制可知, 可使工程量统计速度提高 32%。水电工程中的土石方开挖、混凝土浇筑等主要工程量的自动统计更加适用。成本实时核算是根据成本科目的实际发生额, 直接或间接地将各项成本分类别、分品种核算到有关的成本项目中的核算方法。BIM-5D 平台同财务系统对接, 得到实际成本数据, 同预算成本对比生成报表。当成本超支时, 可以逐级查询到具体的工程部位定位原因。

3.3 进度延误对成本影响的动态分析

进度延误引起的直接损失和间接损失。直接损失有人工窝工(闲置人员 $\times$ 日均工资 $\times$ 延误天数)、机械闲置(租赁设备台班费 $\times$ 闲置台班)、材料积压占用资金成本等。间接损失有管理费分摊增加(工期拖延造成单位时间内的管理费摊销提高), 材料价格波动风险(延误期间价格上涨), 赶工措施费支出(为了追赶进度而多支出的资源费用)等。基于 BIM-5D 的分析方法, 延误发生时识别资源使用计划计算闲置成本; 分析对后续工序的影响, 如果造成关键线路的变化, 则计算工期延长造成的固定成本增加; 评价是否需要赶工并测算成本增量。

具体的计算逻辑就是从 BIM 模型中提取与延误工序

有关的资源清单(人员数量和工种、机械型号和台数), 再根据合同单价计算出单位时间资源成本, 乘以延误天数得到直接闲置成本^[4]。其次, 利用进度网络图来判定延误是否会影响关键线路, 如果延误的时间小于工序的总时差, 那么只造成局部的影响, 如果超过总时差, 那么关键线路就会发生变化, 需要重新计算剩余的工期, 并且加上现场管理费、临时设施维护费等与时间相关的成本。最后, 如果决策选择赶工方式, 则系统根据 BIM 模型中已有的替代施工方案库(增加浇筑仓位、备用设备等)来计算各个方案的成本增量和工期缩短效果。结合 DEMATEL 方法以及 WBS 工作分解结构对成本影响因素进行筛选与分解, 可以得到工程建设、技术开发、采购招标等各类因素对成本影响的大小。量化分析把进度延误成本的影响由定性判断变为定量评价。

3.4 进度-本协同优化与预警机制

协同优化目标就是同时满足工期、预算两个方面约束条件, 得到最优的资源调配方案。BIM-5D 可以对多个方案进行快速模拟比较, 进度滞后时可以模拟增加资源、延长作业时间、改变施工顺序等, 选择综合效益最好的方案。方案比选的主要指标是“成本-工期综合指数”, 也就是单位工期压缩所引起的成本增加。系统会自动计算出需要增补的人员、机械数量以及费用, 再将这些结果同延长工期方案所导致的管理费上涨量、违约风险成本等加以对比, 从中挑选出综合指数最小的那个方案。对非关键线路的延误先考虑改变逻辑关系(平行作业代替顺序作业), 不能增加资源来控制成本支出。

预警机制用挣值法偏差指标来设定三级阈值(如图 2 所示), 即黄色预警(偏差 5%~10%)、橙色预警(偏差 10%~15%)、红色预警(大于 15%)。各级预警有不同的响应流程, 黄色预警现场工程师在 48h 内分析原因并提出说明, 橙色预警进度、成本工程师共同召开专题会, 在 72h 内形成调整方案, 红色预警立即上报项目经理部, 24h 内启动应急预案。预警触发之后, 系统就会自动对相关的工序进行资源计划的冻结, 防止偏差的扩大。采用 BIM5D 技术和改进的挣值法相结合来创建成本自动预警系统, 可以对成本偏差进行实时的检测、分析, 并发出预警, 从而达到高效动态的成本控制目的。预警信息经由平台推送, 并通过模型的高亮显示来表明偏差之处, 进而引发协同处理流程。所有的预警信息以及处理记录都存入偏差知识库当中, 依靠机器学习对历史预警数据加以分析, 进而改善阈值的确定方式以及响应策略的指向性。



图2 进度-成本偏差三级预警与响应机制

4 BIM-5D 施工进度-成本联合动态控制实施及效果评价

4.1 工程基础数据与控制目标设定

以西部某大型水电站为例。该工程为一等大（1）型工程，枢纽为土石坝，最大坝高大于 200m，土石方填筑工程量大。控制目标是关键线路进度偏差在 $\pm 5\%$ 内、非关键线路进度偏差在 $\pm 10\%$ 内、成本偏差在 $\pm 3\%$ 内、黄色预警 24h 内响应、橙色预警 12 小时内响应、红色预警立即响应。

4.2 施工进度动态控制实施分析

用 BIM-5D 平台进行进度的实时监测。大坝填筑每天的高程数据经由移动端上报，自动和计划进行比较产生偏差报告。运行六个月里出现进度偏差的有 23 次，滞后偏差的有 15 次。

表 1 某季度关键工序进度偏差统计

工序名称	计划完成量	实际完成量	偏差率
大坝心墙填筑	9.2 万 m ³	9.44 万 m ³	+2.6%
上游堆石区填筑	68.5 万 m ³	71.2 万 m ³	+3.9%

溢洪道混凝土浇筑滞后主要是由于模板周转效率低，通过增加模板、调整浇筑顺序逐步追回。动态控制把偏差由“事后统计”变为“过程管理”，管理者可以在偏差刚开始时就介入。

4.3 工程成本动态控制实施分析

按月将实际成本和预算进行对比。运行期间共产生计量支付数据 156 份，产值核算 42 期。

利用快速提量，及时对材料计划进行校核，实行限额领料，从源头上控制物料消耗。钢筋制安损耗率提高，优化下料方案之后降低了 1.2 个百分点。设计变更造成混凝土增加 1200m³。

4.4 联合动态控制效果评价

经过 12 个月的运行，BIM-5D 联合动态控制取得较好的效果。进度上关键线路偏差控制在 $\pm 4.2\%$ 以内，比以前的 $\pm 8.5\%$ 有较大的提高；调整响应时间由原来的 7

天缩短到现在的 2 天。从成本角度来说，月度偏差率均值由原来的 4.8%降到现在的 2.6%，计量支付周期由原来的 15 天缩短到现在的 10 天。协同上数据更新同步率从原来的 62%提高到现在的 94%。施工进度偏差由原来的平均 $\pm 15\%$ 变为现在的 $\pm 5\%$ ，工期缩短了 8 个月左右，材料损耗率由原来的 8%降到现在的 3.5%。BIM-5D 联合动态控制把控制模式由事后控制变成过程控制，由单点控制变成协同控制，由经验决策变成数据决策。

5 结语

BIM-5D 技术给工程施工进度和成本的联合动态控制提供有效的技术支撑。本文以西部某大型水电站为研究对象，建立 BIM5D 进度成本联合动态控制模型，提出一些重要的控制方法并加以检验。经研究可知，BIM-5D 联合动态控制可以提高进度偏差识别精确度，实现工程量自动统计和成本即时核算，量化进度延误成本的影响，构建协同优化预警体系。未来可以继续探究同人工智能、物联网、大数据深度融合后的进度-成本预测。

[参考文献]

- [1]顾丽兰.基于 BIM5D 模型的绿化园林造价动态管控[J]. 中国建筑金属结构,2025,24(13):155-157.
- [2]刘平,许馨玉,房禹,等.基于 BIM5D 与改进挣值法的施工成本自动预警研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2025,17(3):63-68.
- [3]曹源,吴贤国,冯宗宝,等.基于 BIM 5D 的项目安全与质量协同管理研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2024,16(1):116-121.
- [4]王林峰,张文静,刘云,等.大数据环境下基于 BIM 与 CNN 的电力工程造价优化算法[J]. 沈阳工业大学学报,2024,46(1):7-12.

作者简介：张鹏（1992—），男，经济师，重庆邮电大学工程管理专业毕业，现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司，任项目经营管理部主任，长期从事水利水电、公路工程项目管理工作。