

基于多源数据融合的大坝施工进度-成本-质量协同控制方法

范玉磊

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]针对大型水电工程施工管理进度、投资、质量三大主要因素难以同步控制的问题,在西南地区某一大型水电站大坝工程建设中,探索了一种基于多来源数据集成下的协调控制系统的方法。形成了多元异质化数据集成系统,阐述三大主要因素之间非线性的相互作用关系并设计了相应的协调控制理论体系、多目标优化方案。同时提出了以数据为基础的部分智能化控制方法以及协调控制集成策略。研究结果说明多元化的数据集成以及算法深度融合,做到对整个施工过程进行数字化管理,在实际工程中的应用也证明了进度误差减小、投资控制更加准确、工程质量优良等效果协同发生。本研究为大型水电工程智能建造提供了理论依据与技术支持。

[关键词]多源数据融合;大坝施工;进度-成本-质量协同控制

DOI: 10.33142/hst.v9i3.19330

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Collaborative Control Method for Dam Construction Progress Cost Quality Based on Multi-source Data Fusion

FAN Yulei

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

Abstract: In response to the problem of difficulty in synchronously controlling the three main factors of construction management progress, investment, and quality in large-scale hydropower projects, a coordinated control system method based on multi-source data integration was explored in the construction of a large hydropower dam project in Southwest China. A multi-dimensional heterogeneous data integration system has been formed, which elucidates the nonlinear interaction relationship between the three main factors and designs corresponding coordination control theory system and multi-objective optimization scheme. At the same time, data-driven partially intelligent control methods and coordinated control integration strategies were proposed. The research results indicate that diversified data integration and deep algorithm fusion can achieve digital management of the entire construction process. The application in practical engineering also proves the synergistic effects of reducing progress errors, more accurate investment control, and excellent engineering quality, which provides theoretical basis and technical support for intelligent construction of large-scale hydropower projects.

Keywords: multi-source data fusion; dam construction; progress - cost - quality collaborative control

引言

大型水电项目具有投资额多、工期长、难度大、质量高的特点。而其中大坝是整个水电站工程的“心脏”，其质量的好坏直接影响整个工程的安全性和经济效益，同时由于建设在高海拔和复杂的天气环境中，建造高坝工程的质量和进度难以把控，人和机器效率降低等一系列问题。传统的管理模式下进度、成本、质量各自为战，信息化系统互相独立，造成信息壁垒，使得决策层不能统一意见。近年来，物联网、BIM和人工智能等新型信息技术的应用促进了水电工程从信息化向智能化的发展转型。两河口水电

站是中国第一座运用施工全过程智能化手段来建设的300m级超高层土石坝工程项目，在施工中实现了从数字化到智能化质的飞跃，但是目前的研究大多是针对单独的目标进行选择，对于进度、成本以及质量这三者之间相互联系的关系以及协调的方式的研究还很欠缺。本文依托于西南的一个大型水电站大坝工程，系统研究了基于多源信息融合下的进度-成本-质量协同控制策略，期望能给大型水电工程建设提供一定的理论依据和指导意义。

1 大坝施工进度-成本-质量协同控制的必要性

大型水电工程施工管理中，进度、投资、质量形成一

个彼此制约、相互作用的复杂体系。进度计划缩短一般都采用加班加点的方式加快进度，直接提高了投资费用；而且，为了抢进度盲目施工可能会降低建设质量，引起返工，出现质量问题，从而拖慢后续进度。控制投资过高可能导致减少对工程质量的保障，增大质量隐患；反之，质量不合格导致返工、修补也会引发额外投资，拖延时间。提高质量虽然会加大一次性投入，但是可以避免返工损失，延长工程使用寿命，从长远看，是总体效益的最大化。这种非线性的、多重反馈的信息传递过程，使得传统的单目标最优化方法很难达到整体最佳的效果。结合工程实际分析，西南某大型水电站大坝位于高寒地带冻土地带，一年只有约 200d 的有效施工期，冬季雨季施工难度较大。高达 295m 的土石坝，填筑难度较大，技术难度较高，在这种情况下怎样安排好进度、成本、质量之间的关系就是该工程建设中的重点问题。水利信息化施工进度及质量的协同控制的研究利用多种来源的数据进行结合并建立动态警报系统模型对施工参数进行监控并作出决策，在代表性工程项目中证明了进度偏差率减少 18.7%，质量合格率提高 23.4% 的协同效果，由此可见，以多种信息来源为基础的协同控制有良好的经济效益。目前水利基础设施安全状况越来越严峻，传统的监测方式已经不能适应精确化、智能化管控的要求了。智能大坝建设的主要难点主要有四个方面：一是综合性的监测感知缺失；二是全方位的联动研判难题；三是缺乏智能化决策能力；四是缺少自主可控的能力。所以建立以多种信息集成为基础的进度-成本-品质一体化管控模式是迫在眉睫的问题，更是水利电力工程数字化施工技术创新的方向。

2 多源异构数据融合模型构建

2.1 多源数据类型与特征分析

大坝工程施工中的数据来源繁杂、种类丰富、形式多样。按数据来源及类型的不同可以将多源数据分为五种类型，它们的特点如下表 1。

大坝建设全寿命周期智能化管理体系可以做到对大坝筑坝土石方开挖、运输、掺合、摊铺、压实等所有施工工序进行智能化管理，构建起施工过程中全天候、全时段、全流程、全方位、全覆盖运转模式，而全方位监测能力则是多种类型数据集成的基础保障。

2.2 多源异构数据融合模型构建

对于多源数据之间存在的时域差距、空域差距以及语义差距。文章提出了多层次的递进式的数据融合方案。在数据层面上，将同一种传感器采集到的时间不对齐的空间错位的数据先进行时序校正和空间校正，在此基础上再用

卡尔曼滤波器、插值法解决掉这些数据中存在的空洞、污染等问题。在特征层面上，首次提出了利用注意力机制的多模态深度神经网络来融合大坝运行状况实时监测数据、历史病害档案、工程图纸资料、BIM 建模、三维时空信息等多种不同类型的异构数据。在决策层面采用加权投票以及置信度融合策略，结合各个来源的信息来做出最终结论。为了支持大规模实时数据的处理及汇集，搭建数据汇聚平台整体框架如下：感知层、传送层、数据层、融合层、应用层五个层次。感知层布设各种各样的传感器以及智能设备；传送层利用 5G/光纤混合组网模式；数据层建立统一的数据中心平台，对多元化的数据进行统一化存储和管理；融合层部署所提出的各项融合模型算法；应用层给进度、成本、质量等业务模块提供数据服务。

表 1 多源数据类型与特征分析

数据类别	具体数据源	数据结构	采集方式	采集频率	主要用途
BIM 数据	三维地质模型、坝体分区模型、施工组织设计	结构化/半结构化	设计阶段导入、施工过程中更新	按版本更新	施工模拟、碰撞检查、进度可视化
物联网数据	GPS/北斗定位、碾压机传感器、VCV 传感器、温度计	时序数据	自动实时采集	秒级~分钟级	进度追踪、碾压质量监控、环境监测
遥感数据	卫星影像、无人机航拍、激光雷达点云	栅格数据/点云	周期性航拍、按需采集	日/周/月	料场变化监测、整体形象进度、地形复核
施工监测数据	沉降仪、应变计、渗压计、测斜仪	时序数据	自动采集/人工读数	小时级/日级	坝体安全监测、变形分析、质量控制
管理数据	工程量报表、资源配置单、合同台账、进度计划	结构化	人工填报/系统录入	日/周/月	成本核算、资源调度、进度对比

3 进度-成本-质量三要素耦合机理与协同控制理论模型

3.1 进度、成本与质量三要素耦合关系分析

大坝工程建设项目中，进度、成本、质量三大指标是通过施工活动这个中间环节发生复杂的作用关系，在正面促进方面：合理的时间计划可以节约浪费的成本，一次性成型也可以节省回炉造成的浪费，适当的资金配置可以节省后期维修所花费的大量资金；负面影响方面：缩短建设周期就会加大建设成本并且可能会使工程质量下降，严格控制成本就会限制新技术新材料的应用，质量标准提升往往伴随着养护期延长以及技术难度提高等。时间、质量以及成本这三个指标既相对独立又互相联系着，任何一方的

变化都会对其他两方带来较大程度的影响。

3.2 协同控制理论模型构建

为了使大坝建设过程中的工期、费用、质量三个因素能够相互制约,我们在此基础上建立状态空间描述理论模型。设定状态变量为累计完成进度,累计发生费用和综合质量指标,设置控制变量为资源投入量、施工技术参数;扰动变量选取气象状况、机械设备损坏频率以及物资供应情况等。工期、经费、质量之间存在着复杂地互相影响的关系,工期的推进导致成本积累,质量取决于施工技术和资源投入大小,而质量问题还会引起工程返修从而影响了工期及增加了费用。因此可以得到以下的状态空间方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} S(t) \\ C(t) \\ Q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(u, v, t) \\ f_2(u, v, t) \\ f_3(u, v, t) \end{bmatrix}$$

其中: $S(t)$ 为 t 时刻的累计完成进度(%); $C(t)$ 为 t 时刻的累计发生成本(万元); $Q(t)$ 为 t 时刻的综合质量指标(0~1); $u=[u_1, u_2]^T$ 为控制变量, u_1 为资源投入强度, u_2 为施工工艺参数; $v=[v_1, v_2, v_3]^T$ 为干扰变量, v_1 为天气状况, v_2 为设备失效概率, v_3 为原料供求变化。此模型是以后进一步进行多目标优化及动态控制的基础。

3.3 多目标优化与动态平衡机制

本文针对进度-成本-质量多目标优化问题使用了基于非支配解集的多目标优化框架。因为三个目标函数相互之间有所约束,在大多数情况下不可能找到使得所有三个目标都达到最优的情况下的一种确定性的解,只能在可行解中找一个能够满足工程实际情况的一种折中解决方案。求解方法使用改进的人工智能优化算法对该状态空间模型进行搜索运算,从而得到最优前沿解集合;再利用多属性效用函数构建决策偏好模型,在所求得的所有解中筛选出同时满足工期、投资以及质量要求的最佳折中方案。这样可以有效地减少多目标决策求解的计算量的问题,解决了最优解不是唯一的难题,给动态调节提供了一个可以量化的参考意见。

4 基于数据驱动的进度-成本-质量分项智能控制方法

4.1 基于多源数据融合的进度控制方法

大坝建设工期管理的关键是即时监测、精确分析和及时修正。即时监测主要是通过碾压设备自带的北斗定位和VCV传感器,在碾压过程中收集轨迹、速度以及遍数的相关数据并将其与BIM模型进行对比以达到三维显示的效果;精确分析则是搭建长短时记忆网络模型将过往工程进展状况、资源配置及天气情况等因素结合起来对未来工程进展情况做出预估;及时纠正就是通过关键线路法确定

影响程度区域然后根据可使用的资源制定相应的调整方案。

4.2 基于多源数据融合的成本控制方法

成本控制手段上的创新是把实时施工信息及时动态地连接到造价信息系统中去。从成本构成分析来看将大坝建设项目的实际成本分为直接成本(人材机)和间接成本(管理费、措施费)。然后对各个成本单元和施工活动进行一一对应。动态监控机制通过物联网系统来自动统计实际工程数量,然后与计划工程数量比较得出成本差异;在成本估算环节上运用多变量回归与神经网络相结合的方式,结合工程量完成度、物资利用率、工效等参数进行估算出总成本及差额走势。基于混凝土坝施工水平运输多目标调度优化的应用实例证明,与传统的遗传算法模型及传统的凭经验的人工调度方式相比,在静态调度条件下能节约大约17.86%,甚至达到50.13%的运输费用开支,提升约16.7%,甚至是高达50%的工作效能。说明了依靠大数据进行优化的方法对于降低成本的效果非常明显。

4.3 基于多源数据融合的质量控制方法

大坝工程建设质量包括坝料质量、碾压质量及填筑质量等层面。建立由料源质量、摊铺参数、碾压参数、检测指标组成的质量四级指标系统,在质量数据实时采集过程中采用碾压车上安装的VCV传感器对振动压实响应值进行动态监控,使碾压质量可以得到持续性的监测而不仅仅是传统的定点抽样检测。太平水库碾压施工智慧管控系统,在碾压设备上加装北斗定位天线,VCV传感器与终端显示屏,能够实时掌握碾压设备的运行轨迹、行驶速度、碾压次数、是否开振等情况,对摊铺及碾压实施全过程数据采集、传输、统计分析、智能反馈及三维动态施工仿真模拟,利用现场采集的数据对施工质量进行快速评定和纠偏^[1];质量风险预警模型采用多种预警界限值,可即时判断是否存在质量问题并进行等级提醒。施工现场质量追踪机制把每个施工环节与原料来源、施工参数、检测结果相连接,建立起完整的过程记录档案。

5 进度-成本-质量协同控制集成方法与工程验证

5.1 多目标协同优化模型构建

将第四章分解式控制方法集成为一体化的多目标协调优化模型。该模型在目标上是以时间偏差最小化、费用最小化、质量指标最大化的三者为优化目标,在约束方面是资源约束、工法约束、安全约束等三种约束条件^[2]。采用改进型NSGA-II算法求得帕雷托前沿,用TOPSIS法从解集中得到最佳折中方案。基于两河口大坝工程项目的实际,在高寒地区特高土石坝智能化碾压施工技术、复杂土料场源精确选取开采计划智能施工技术、复杂多级配石

材智能化爆破施工技术等方面对两河口水电站大坝整个过程中的智能化施工技术进行了全面的应用。

5.2 协同决策机制与调控策略

协调决策体系采取分级分层的方式进行管理：在战略层设计总的方针和限制因素，在战术层产生每月或每周的协调方案，而执行层面负责进行调节以及相应的反作用力^[3]。调节方法有三种：单个指标发生偏差并且在允许范围之内，则使用微调的方法；多个指标或者单独一个指标发生较大偏差的情况下则激活协调改进措施，即重新解决问题的多目标优化问题；对于一些特殊状况时，采取紧急调控方案。

6 结语

本文为了克服大型水电工程施工管理过程中进度、成本、质量不能共同把控的问题，在西南某大型水电站大坝工程施工项目的基础上，全面地研究了基于多源信息集成的协同控制策略。提出了多源异构数据集成模型、揭示了三要素耦合机制，建立了协同控制数学模型，给出了分段式的智能化控制方案以及集成化策略。通过实际工程证

明所提出的方案可以有效解决大型水电工程施工中的问题，为今后的大型水电工程信息化建设打下坚实基础。下一步的工作是对数字双胞胎进行全阶段一体化的协同管控，还有就是无人机械设备群组之间相互协作的技术问题等。

[参考文献]

- [1]周创兵,姚池,杨建华,等.数智技术赋能库坝系统安全管控探讨[J].中国水利,2025(1):7-14.
 - [2]黄博豪,程刚,杜华冬.BIM 技术在新疆和田玉龙喀什水利枢纽施工管理中的应用[J].土木工程信息技术,2025,17(4):33-37.
 - [3]沈俊良,徐子堃,苑瑞芳.热带地区筑坝智能管控一体化技术实践[J].中国水能及电气化,2024(10):56-59.
- 作者简介：范玉磊（1990.4—），男，毕业院校：四川理工学院，所学专业：工程管理，当前就职单位：中国水利水电第十二工程局有限公司，职务：项目经理，职称级别：高级工程师。