大数据视角下水利水电工程施工成本动态管控与优化路径研究

陈卓然
河南省水利第二工程局集团有限公司　河南　郑州　450016

摘　要：水利水电工程施工成本管控长期面临要素关联复杂、数据孤岛严重、动态响应滞后等结构性困境。大数据技术的深度嵌入，为突破传统静态预算管理模式提供了数据感知、智能分析与实时决策的新可能。本文基于水利水电工程施工全生命周期，系统梳理成本影响因素的时空异质性特征，构建涵盖数据采集融合、预测预警、动态调整三层架构的动态管控逻辑框架；进而从关联分析、流处理、可视化三个维度解析关键技术支撑，提出资源配置优化、进度成本协同、风险预控等优化策略，并配套数据治理、组织适配与制度激励等保障机制。研究认为，大数据赋能的动态管控本质上是将成本管理从“事后核算”推向“事中干预”与“事前预判”的系统性跃迁，其实现有赖于技术理性与管理理性的有机融合。

关键词：大数据；水利水电工程；施工成本；动态管控；优化路径

引言

水利水电工程作为国家基础设施建设的战略组成部分，具有投资规模大、建设周期长、施工环境复杂、参与主体多元等显著特征。施工成本管理贯穿规划、设计、招投标、施工实施直至竣工结算的全过程，其控制成效直接关系到工程经济效益与社会效益的发挥。然而，传统成本管控模式主要依赖定额预算、月度报表和事后结算，信息采集粒度粗、传递链条长、反馈周期久，难以适应施工过程中地质条件变化、材料价格波动、天气影响、设计变更等高频扰动因素。近年来，随着物联网、云计算、人工智能等技术的快速发展，大数据在工程管理领域的渗透日益深入，为破解上述难题提供了新的技术路径。

1　水利水电工程施工成本管控的复杂性特征与数据基础

1.1 成本构成的多维度与动态性

水利水电工程施工成本并非简单的线性加总，而是由多个相互耦合的子项构成的高维系统。从要素形态看，包括人工费、材料费、机械使用费、措施费、间接费等直接与间接成本；从空间尺度看，涉及大坝基坑、隧洞、厂房、导流工程等不同施工区域，各区域资源调配相互制约；从时间演进看，施工强度随季节、汛期、混凝土温控要求等呈现周期性波动[1]。更关键的是，这些维度之间并非独立——例如，混凝土浇筑进度延迟不仅增加人工和机械闲置成本，还可能引发汛前防洪措施追加投入，进而诱发连锁成本溢出。这种“维度交互+时序演化”的双重动态性，使得传统基于固定参数和历史平均值的预算方法频繁失灵。

1.2 施工过程数据生成特征

大数据视角下的施工过程，本质上是多源异构数据的持续生产场域。一方面，施工现场部署的传感器、GPS定位设备、视频监控、智能地磅等终端，实时产生海量流式数据，涵盖设备运行参数、材料消耗量、环境温湿度、基坑变形监测等结构化数值；另一方面，施工日志、变更签证、会议纪要、验收报告等非结构化文本，以及设计图纸、地质勘探剖面图等半结构化图形信息，同样构成成本决策的重要依据。这些数据呈现出典型的“5V”特征——体量巨大（Volume）、类型多样（Variety）、生成快速（Velocity）、价值密度稀疏（Value）、真实性存疑（Veracity）。然而，当前多数项目中，上述数据分散于物资管理、财务、工程、安全等不同业务系统，形成信息孤岛，彼此间缺乏有效关联映射，使得成本偏差原因追溯往往滞后数周甚至数月。因此，挖掘数据潜在价值的前提，必须是打破系统壁垒，构建统一的成本数据空间。

2 大数据驱动下施工成本动态管控的逻辑框架

动态管控的核心要义在于“动态”——即成本计划不是一成不变的刚性约束，而是随施工状态演进不断迭代更新的弹性基准。基于此，本文提出三层递进式逻辑框架，实现从数据到决策的智能转化。

2.1 数据采集与融合层

该层解决“用什么数据”和“如何整合数据”的问

题。首先，针对多源异构特点，建立统一的数据接入规范，对物联网流数据采用边缘计算预处理，过滤异常值与冗余信息；对业务系统数据通过ETL（抽取-转换-加载）工具进行清洗与标准化；对非结构化文本利用自然语言处理技术提取关键事件及其成本影响标签[2]。其次，构建以“施工部位-工序-时间”为核心标识的成本数据立方体，将材料、设备、人工、环境等维度映射至同一坐标系，实现跨源关联与时空对齐。该层的成熟度决定了后续分析的可靠性与精度。

2.2 成本预测与预警层

在融合数据基础上，该层承担“判断当前态势”与“预判未来走向”的双重职能。一方面，通过构建实际成本与计划成本的实时比对引擎，设定多维度的偏差阈值（如单项超支比例、累计超支趋势斜率等），一旦触发阈值，系统自动生成预警信号并推送至责任岗位。另一方面，引入时间序列预测、回归分析和深度学习算法，利用历史施工数据与环境参数，对下一周或下一工序阶段的材料需求量、机械台班消耗、人工工时进行概率性预测，形成“预测基线”。预测的不确定性区间被明确量化，为管理者的风险容忍度提供量化参照，避免过度反应或疏于防范。

2.3 动态调整与决策层

预警与预测本身不构成管控，真正的价值体现在调整行动上。该层以成本偏差分析和预测结果为依据，生成优化调整方案集。例如，当发现某坝段混凝土浇筑效率低于预期导致工期延误，系统将自动模拟“增加振捣设备”“调整施工班组”“修改浇筑顺序”等多种备选方案，并分别测算其成本增量与工期补偿效果，辅助管理者进行权衡决策。更重要的是，每次调整的结果将反馈至数据层，更新模型参数，形成“计划—执行—监测—调整—再计划”的闭环迭代。这一机制使得成本管控从静态的“预算-决算”单向流程，转变为随施工推进不断自我修正的动态过程。

3 关键技术与方法体系

3.1 基于机器学习的成本要素关联分析

传统成本管理中，超支原因常被笼统归为“管理不善”，缺乏精细化归因。机器学习方法，特别是随机森林、梯度提升树和LASSO回归，能够从高维数据中自动识别成本要素之间的非线性交互关系。例如，通过特征重要性排序，可发现“当日平均气温超过30℃时，混凝土养护用水量和人工降效成本显著上升”这类隐蔽规律；通过关联规则挖掘，可揭示“钢筋进场延迟2天，将导致后续模板工序窝工成本增加约1.5%”的传导链条。此类知识嵌入预警系统后，不仅提高了偏差归因的准确性，还能为采购计划和排程优化提供前瞻性指导。

3.2 实时数据流处理与成本偏差识别

施工过程中，每秒产生的设备油耗、材料过磅、搅拌站产能等数据流，若采用批处理方式，则延迟不可避免。分布式流处理框架（如ApacheKafka结合Flink）支持窗口计算和状态管理，能够对连续数据流进行滑动窗口聚合，在秒级时间内计算出当前时刻的累计实际成本与计划成本的即时差值，并识别偏差的突变点[3]。更重要的是，流处理引擎可集成变化点检测算法，自动标记成本异常波动的时间节点，提示管理者检查该时段内是否存在设计变更、机械故障或供应商调价等诱因。这种实时性使得管控干预窗口从“月度”压缩至“班次”，极大提升了响应敏捷性。

3.3 可视化与协同管理平台

数据分析和预警结果最终需要以直观、易懂的形式呈现给项目经理、造价工程师、施工员等不同角色。基于数字孪生理念的可视化平台，将成本信息叠加到三维施工模型上，采用热力图、进度甘特图、成本燃尽图等复合图表，展示各施工部位的成本健康状态。同时，平台内置协同工作流，当预警发生时，自动生成整改任务单，关联责任人，并跟踪处理闭环。该平台不仅是信息展示窗口，更是多方协同决策的“驾驶舱”，其设计需遵循“场景适配”原则——高层管理者关注整体超支趋势，中层关注工序级偏差，基层关注具体资源消耗明细——不同视图满足差异化需求。

4 成本优化路径的多维策略

技术工具提供可能性，但真正的成本优化需要管理策略的系统性重构。本文从资源配置、进度协同、风险预控三个维度提出优化路径。

4.1 基于数据驱动的资源配置优化

施工资源（人、材、机）的配置多依赖经验调度，常出现局部闲置与局部短缺并存的结构性浪费。大数据分析可精准计算各工序的资源需求弹性，建立资源利用率与施工强度的关联模型。在此基础上，采用动态规划或启发式算法，在满足工期约束的前提下，优化设备调拨路线、劳动力进场计划和材料库存策略。例如，通过分析历史消耗数据与天气预报，可精确调整水泥和粉煤灰的日供应量，既避免断供风险，又减少现场积压占用资金。优化目标不应局限于单项目最小成本，而应扩展至企业级多项目之间的资源均衡配置，实现整体边际效益最大化。

4.2 施工进度与成本的协同优化

进度和成本在传统管理中被分属两条线，各自考核，但二者实为“硬币两面”。工期压缩通常伴随赶工费用上升，而过度节省成本可能导致质量缺陷与返工，反而拖累进度。借助大数据建立的进度-成本耦合模型，可量化不同赶工策略下的边际成本曲线，从而找到“最优工期区间”[4]。当实际进度偏离计划时，系统不仅提示延误天数，更同步计算延误对后续工序的成本传导效应，提出兼顾工期与费用的折中调整方案。这种协同优化强调全局最优而非局部最优，要求破除部门壁垒，建立联合调度机制。

4.3 风险预控与应急成本管理

水利水电工程受自然灾害、地质突变、政策调整等不确定性因素影响显著，这些风险一旦发生，往往造成成本骤增。大数据方法支持构建风险事件库和情景库，利用历史同类型工程的灾损数据和应对措施，训练风险概率评估模型。施工期间，实时监测降雨量、库水位、边坡位移等前兆指标，动态更新风险发生概率，并提前制定分级应急预案。应急成本不应被视为“额外支出”，而应作为“或有成本”纳入动态管控范畴——通过预储部分应急物资、签订备用设备租赁框架协议等方式，以较低代价锁定应急资源，避免突发情况下被迫接受高价服务，从而平滑风险成本曲线。

5 实施保障与制度建议

先进的技术框架和优化策略若缺乏适宜的组织土壤，则难以持续发挥效用。以下从数据治理、组织能力和制度环境三方面提出保障措施。

5.1 数据标准与质量治理

数据的互操作性是一切分析的基础。当前行业普遍缺乏统一的施工成本数据元定义和编码体系，不同项目、不同标段之间数据口径各异，导致跨项目对比与知识积累困难。建议由行业协会或头部企业牵头，制定水利水电施工成本数据的采集标准、交换格式和质量评价规范，明确必采字段、采集频率、精度要求。同时，建立数据质量巡查机制，对缺失值、异常值、迟报行为进行自动记录与追溯，从源头保障数据的真实性、完整性和及时性。

5.2 组织架构与人才支撑

传统项目管理团队中，造价人员熟悉定额但未必懂数据分析，信息化人员懂技术却不懂业务。企业应设立“数据管理工程师”或“成本分析专员”岗位，负责数据治理、模型维护和分析结果解读。同时，推动复合型人才培养，鼓励造价工程师学习Python、SQL等数据分析工具，也引导信息技术人员深入施工一线理解业务场景。在组织层级上，建议成立跨部门的成本管控中心，赋予其调动数据资源和发起预警响应的权限，避免因层级冗余延误决策。

5.3 制度激励与考核机制

动态管控对管理者的主观能动性提出更高要求——预警信息是否被重视、优化方案是否被采纳，取决于责任人的内在动机。因此，需将成本动态管控指标（如预警响应时效、预测偏差率、优化方案采纳后的实际节支率）纳入绩效考核体系，并设置正向激励。同时，建立容错机制，允许在合理预测区间内的偏差，避免因过分追求“零超支”而导致瞒报或冒险行为。制度的最终目的是使数据驱动的决策文化内化为项目团队的工作习惯，而非外在强制。

6 结语

大数据技术为水利水电工程施工成本管控带来的不仅是工具升级，更是一种管理范式的变革——从依赖经验与静态定额的“开环控制”，转向基于实时数据与智能算法的“闭环自适应控制”。本文所构建的动态管控框架和优化路径，试图在技术逻辑与管理逻辑之间搭建桥梁，强调数据融合是基础，预测预警是核心，动态调整是关键，而配套保障则是持久运行的土壤。必须清醒认识到，大数据并非万能良药，其效用受限于数据质量、算法适用性和组织接受度；同时，成本管控不能片面追求“最低”，而应在质量、安全、进度与成本之间寻求动态均衡。未来研究可进一步关注多项目组合的成本优化、区块链技术在成本追溯中的应用，以及人工智能辅助决策的伦理边界等议题，推动水利水电工程管理向更高水平的智能化迈进。

参考文献

[1]顾伟.基于全过程动态管控视角的工程施工成本管理优化策略研究[J].珠江水运,2025,(6):32-34.

[2]郭洁茹.水利工程项目施工的成本控制与管理优化研究[J].工程与建设,2025,39(1):236-239.

[3]易嘉伟.典型水利工程成本高精度估算研究[J].水利技术监督,2025,(11):127-131.

[4]陈青,周晓娜.水利水电企业工程施工成本控制与管理[J].现代企业文化,2024,(24):65-67.