

数字化技术赋能水利工程施工全过程管理研究

余剑锋, 方 刚

(淳安县凤林水电发展有限公司, 浙江 杭州 311700)

摘 要 水利工程建设是国家基础设施的重要组成部分, 施工质量、进度控制、安全风险管理与流域生态和社会经济的发展密切相关。传统的施工管理方式由于存在信息孤岛、人工决策迟缓以及数据割裂等问题, 不能适应现代化大型水利工程施工的精细与智能要求。本文对数字化技术如何推动水利工程施工全过程的管理进行研究, 分析重要的因素, 论证其应用的可能性, 构建由感知层到决策层的应用途径。论述了先进技术与施工场景融合的过程以及管理范式的转变机理, 并预估未来水利工程施工自主、协同、生态化的走向, 以期为水利行业的数字化转型提供有益参考。

关键词 数字化技术; 水利工程; 施工全过程管理; 数字孪生; 智能决策

中图分类号: TV5; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.032

0 引言

当前, 全球科技革命和产业变革正处于快速发展阶段, 数字经济成为重组全球要素资源、塑造经济结构的重要力量。水利工程属于复杂的巨系统, 其施工环境恶劣、工期漫长、参与单位众多、技术接口繁杂。传统的管理方式在处理海量异构数据时会遇到资源配置低效、安全隐患识别迟缓、质量追踪难等难题。随着智慧水利的推进, 工程建设管理工作发生了变化。数字化赋能不是简单的技术叠加, 而是在数据流动和聚合的基础上, 突破物理和数字空间的障碍, 实现施工全过程透明、可见、可控。

1 水利工程施工全过程管理要素分析

水利工程施工全过程管理是包含规划、准备、实施到竣工验收的一系列动态复杂的系统, 主要要素有进度、质量、安全、成本和环境五个方面, 这五个要素之间存在很强的耦合性和非线性关系。进度管理不只是工序之间的逻辑联系, 还会受到水文气象、地质状况等不可预知的外界因素的影响, 传统的网络计划技术很难及时做出反应。质量管理涵盖了从原材料进厂、中间产品检测到最后隐蔽工程验收这一整条链路, 任何一个环节的数据缺失都会造成质量追踪链条断裂。对于深基坑、高边坡以及隧洞挖掘这类高危作业的安全管理而言, 依靠的是对风险源实施即时察觉并发出警报的功能, 在这样的环境下, 人工巡视存在明显的时空盲区。成本管控要精确计算人工、材料和机械的耗费, 在多变的施工现场, 实际花费的数量与预算常常相差

很大。环境治理需要在施工期间持续监测噪声、扬尘以及水土流失状况, 以符合日益严格的环保条例^[1]。

2 数字化技术赋能水利工程施工全过程管理的可行性

2.1 技术成熟度与场景适配性深度契合

当前数字化技术集群爆发式增长, 为水利工程施工管理提供了技术基础, 其成熟度可支撑复杂场景的规模化应用。物联网传感器具有微型化、低功耗的特点, 在多个地方布置感知节点以收集重要的物理量, 克服了传统的监测难题。5G通信具有高带宽、低时延的特点, 可以保证数据的实时传输, 消除信息延迟。云计算平台具有很高的弹性计算能力, 可处理PB级以上异构数据, 能完成复杂的模型运算以及仿真工作。计算机视觉和深度学习算法的准确率比人类高得多, 在识别不安全行为方面也优于人类。这些技术形成一个完整的闭环, 并且与水利工程施工的要求相适应, 因此具有技术上的可行性^[2]。

2.2 数据驱动决策与管理范式转型的内在逻辑

数字化技术赋能水利工程施工管理深层次可行性的体现在于改变决策的产生方式, 使施工管理由经验型转向数据型。传统的决策方式依靠个人经验或滞后报表做出决定, 存在主观性和滞后性的缺点。然而, 数字化技术构建全要素数字映射, 使管理者能够依据全部数据进行判断。大数据分析可以发现规律、预测风险, 人工智能算法可以自动生成施工调度方案。以数据为基础的决策方式使管理重心前移, 且更加科学、

作者简介: 余剑锋(1977-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程施工管理。

准确。数据成为新的生产要素，打破部门壁垒，推动协同效率发生质的飞跃，显示数字化助力是提升管理效能的必然之路。

3 数字化技术赋能水利工程施工全过程管理应用路径

3.1 构建全域感知与泛在互联的物联网底座

实现水利工程施工全过程管理的数字化跃升，首先要创建起一张涵盖物理施工现场所有时空层面的泛在感知网，这是把分散的施工要素转变成连续数据流的前提。这条路径不是简单的设备堆积，而是要形成一个可以穿透施工准备、主体施工到竣工验收全过程的动态感知系统，消除传统管理中因信息缺失和时滞造成的弊端^[3]。

施工准备阶段，在布设高精度北斗定位基站和无人机倾斜摄影系统的基础上，可以完成地形地貌、地质构造以及周边环境等各个方面的毫米级数字复制工作，为后续工序提供准确的时空基准。主体施工期间，感知网络要渗透到混凝土内部、岩土体深处乃至大型机械设备的核心部位，依靠光纤光栅、无线应力计、振弦式传感器以及嵌入式 RFID 芯片，持续获取温度场的变化情况、应力应变状况、振动频率分布以及材料流转路线等细节信息，从而保证从原材料进厂到隐蔽工程全部完工的每一个细微变动都能立刻被察觉，直到竣工收尾之际，感知节点会自动成为长期健康监测系统的有机部分，延续数据的生命。

全域感知底座的核心价值在于它的“泛在性”和“实时性”，它冲破了物理空间和数字空间之间的隔阂，让进度落后、质量问题、安全风险、成本超标这些管理难题从事后被发现变成事先能够预知、事中可以干预的动态要素。依靠统一通信协议同边缘计算节点相互配合，大量的异构数据从一开始就在源头处被清洗并初步融合起来，形成一条贯穿全过程的、高保真的数据流，给上层的应用管理提供唯一、真实的数据，从而打下了全流程精细化管理的基础。

3.2 打造虚实映射与动态演进的数字孪生引擎

以全域感知数据流作为支撑，创建出高保真的、可以计算并且不断更新的数字孪生引擎，是实现水利工程施工全过程可视化管理和仿真推演的主要途径，其实质在于在数字空间中建立一个与物理施工现场完全同步的虚拟双胞胎。它冲破了传统 BIM 技术仅仅表现几何信息这一限制，把 GIS 地理信息、IoT 实时监测数据以及水力学、结构力学等多物理场仿真算法融合起来，塑造出一种拥有物理属性、行为逻辑和演化规律的三维动态模型。

数字孪生引擎在施工全过程管理中起到“预演、监控、复盘”的全面赋能作用，在方案策划时期，用孪生体做多工况下的施工模拟，比如围堰合龙水流冲击模拟、大体积混凝土温控防裂仿真以及复杂洞室群开挖支护优化等，提前找出设计矛盾和施工风险，把问题化解于虚拟之中；在实施控制期间，孪生体同物理现场始终保持毫秒级同步，管理者借助沉浸式的界面可以清楚地看到地下管网、内部钢筋的分布情况以及设备运转状况，系统会自动对比实测数据和仿真设定阈值之间的差异，若发现到沉降超出限制或应力出现异常，会立即发出反向控制命令或警报信号，从而实现从“被动应付”向“主动调节”的转变；在验收交付环节，孪生体会收集整个过程中的施工记录、质量检验成果、变更申请书等内容，将这些资料整合成包含完整基因图谱的数字资产，然后将其顺利移交至运维阶段。

虚实映射机制把施工进度透明化控制提升到新的高度，用物理规律的深入计算为管理者提供了精准的预判，在整个生命周期内保证工程质量可控、安全可靠。

3.3 实施数据融合与智能辅助的决策中枢系统

对于水利工程施工过程中产生的 PB 级多源异构数据而言，需要建立一个基于大数据分析和人工智能技术的智能决策中枢，以应对传统管理中存在的数据孤岛、经验决策以及反应迟缓等问题，从而推动管理范式由原来的定性判断转变为定量智策。其关键之处在于打破进度、质量、安全、成本、环境等诸多业务部门之间的数据壁垒，建立一个统一的数据湖和知识图谱，将零散的施工日志、监测报表、视频影像以及合同文件转化为机器可读的结构化知识^[4]。

在此基础上，用深度学习、强化学习和运筹优化算法来训练出一个面向全过程场景的智能模型群。在进度管理方面，系统根据历史效能数据和实时资源状况动态预估关键路径的变化，进而自动生成最佳的纠偏方案和资源调配命令，以确保工期目标得到严格遵守。在质量管控方面，采用计算机视觉技术识别混凝土表面的裂缝、钢筋间距错误等问题，并依据材料溯源信息建立质量预估模型，以防止不合格品进入下一道工序。在安全防控方面，依靠多模态数据融合分析手段找出深基坑坍塌、高边坡失稳等系统性风险的早期信号并及时进行评价和预警。在成本管控方面，将工程量清单与实际耗费联系起来，持续核算成本差错，防止资金外流。

智能决策中枢是数据汇集的地方，也是智慧培育之地，它把人类专家的经验变成算法模型，24 小时不

停地对整个过程展开全局扫描并做多维度寻优,为管理层提供科学、精确且可实施的辅助决策,以实现施工全过程中管理的智能化闭环。

3.4 建立全程追溯与可信共享的区块链协作机制

为了解决水利工程施工参建主体多、供应链条长、责任不清而产生的信任缺失和协同低效的问题,利用区块链技术创建去中心化、不可篡改的全程追溯与协作信任体系,从而保证全过程管理闭环的完整性。此路径依靠区块链的分布式账本、时间戳以及非对称加密等特性,将施工全过程中涉及的所有重要行为数据,即原材料采购出厂、进场复检、配合比设计、浇筑施工、养护监测以及最后的验收评定等全部上传至区块链系统,并且建立起一条无法被篡改的证据链。

从质量管理的角度分析,每一块混凝土、每一根钢筋都有一个独一无二的“数字身份证”,它的全生命周期履历是公开透明且不能被修改的。一旦出现质量问题,可以立刻找到责任人的姓名、工作时间以及所用的技术参数等信息。从供应链协同角度来讲,借助智能合约将合同条款、技术标准和支付条件代码化,当物联网传感器显示材料验收合格或者工程进度节点达成时,则会马上触发资金支付或者下一步流程指令,从而大大缩减结算周期、削减交易费用,加快供应链反应速度;在多方可信合作方面,区块链依靠共识机制创建信任网络,业主、监理、施工、设计以及监管机构各自享有不同权限但共享同样的真实数据,消除信息不对称引发的博弈内耗,营造一种多方参与、互相监督的透明化治理环境。

如此,不但加强了工程质量安全的终身责任制,而且用技术手段重新塑造了工程建设领域的生产关系,给创建阳光工程、廉洁工程和高效协同的全过程管理体系奠定了牢靠的根基。

4 基于数字化技术的水利工程施工全过程管理未来发展趋势

4.1 从人机协同向自主化智能施工演进

未来水利工程施工管理将会冲破当下依靠辅助决策的人机协同时期,朝着完全自主化的智能施工发展。随着机器人技术的发展、边缘计算的出现以及强化学习算法的进步,施工设备对环境的感知越来越强,自主作业的能力也越来越高。无人碾压机群、自动焊接机器人和智能喷锚台车已经不是简单的遥控执行终端了,它们可以按照当前的工作情况来自行规划路线、改变参数并开展复杂的作业任务。管理系统由原来的指令下达者变成规则的制定者和异常的接管者,智能集群可以完成大部分常规、重复以及高危的工作。

这样则会改变施工现场的人力结构,减少人工的安全风险,提高施工的精度和速度,达到“无人化工厂”式的水利工程建设环境^[5]。

4.2 从单项目数字化向产业链生态化协同拓展

数字化技术的应用范围会由原来一个项目的内部管理向外延伸到整个水利建设产业链的生态化协同发展。未来管理平台不是孤立存在的,它会和整个产业链形成一个工业互联网平台。依靠统一的标准和规范,上下游企业可以在同一个数字空间里实现无缝对接,设计变更可以即时传递给生产计划,物料需求会促使生产计划产生,设备故障也会引起售后的联动。协同可以加快供应链反应速度,缩减存货开支,改善资源调配状况,塑造起数据纽带的共同利益群体。水利工程建设已经从原来的接力赛转变为多方互动、并行推进的工程,行业的运行效率会由于数字化生态的建立而得到质的提升。

5 结束语

数字化技术对水利工程施工全过程管理进行赋能,属于深刻的社会变革,它既是工具的更新换代,又是管理思想、组织结构和业务流程的重构。依靠创建物联网底座、搭建数字孪生引擎、推进决策中枢建设、形成区块链合作体系等手段,水利工程施工渐渐脱离了对传统经验的依赖,向着数据主导、智能引领的新阶段迈进。虽然转型会遇到技术标准统一、数据安全保护以及复合型人才匮乏这些难题,不过它所带来的系列好处也十分明显,即效率得到改善、风险得以控制并创造出更多的价值。随着技术的更新和应用场景的加深,水利工程施工将会呈现出自主化、生态化以及全生命周期价值最大化的发展趋势,从而提高我国水利基础设施的质量和安全性,给水利行业的高质量发展提供数字动力,最终达到人水和谐、可持续发展的目标。

参考文献:

- [1] 王梦梦.现代数字技术在水利施工管理中的运用研究[J].科技与创新,2026(03):227-229.
- [2] 丁继勇,施沁含,张兆波,等.重大水利工程项目法人数字胜任力研究[J].水力发电学报,2026,45(01):87-98.
- [3] 王利娟,柴晓燕.现代数字技术在水利施工管理中的运用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(34):205-207.
- [4] 谭魏欣.数字孪生技术在水利工程中的应用策略研究[J].水上安全,2025(18):64-66.
- [5] 李昱霏,李祯.数字技术赋能农业水利建设路径研究[J].现代营销,2025(22):35-37.