

数字化时代水利水电工程施工技术探究

孙胜先, 王 耀

(长江水利水电工程建设(武汉)有限责任公司, 湖北 武汉 430040)

摘 要 在数字化时代, 水利水电工程施工技术正经历深刻变革, BIM、数字孪生、物联网、人工智能等数字化技术深度融合, 推动工程施工向智能化、精细化、高效化方向转变。基于此, 本文聚焦数字化时代, 重点围绕水利水电工程施工展开研究, 首先论述数字化时代对水利水电工程施工的影响, 其次论述水利水电施工中的核心数字化技术, 最后通过理论分析和实践案例, 就数字化时代水利水电工程施工技术进行具体论述, 以为发挥数字化技术优势、不断革新水利水电工程施工技术、提高工程整体施工质量与效率、顺应数字化时代发展进程提供有效参考。

关键词 数字化时代; 水利水电工程; 土石坝; 隧道掘进

中图分类号: TV212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.014

0 引言

水利水电工程是通过修建大坝、水电站、堤防等水工建筑物, 用于水资源综合开发、利用、调节及保护的工程体系, 具备防洪减灾、水资源调配、农业灌溉保障等核心功能, 在维护社会稳定发展中扮演着重要角色。随着数字化时代的到来, 以 BIM、物联网等为代表的数字化技术被广泛应用在水利水电工程施工中, 通过实时监控工程施工过程, 辅助施工智能决策, 逐步改进工程施工流程, 推动水利水电工程走向智能化发展道路。未来相关部门还需持续加强数字化技术与水利水电工程研究, 结合数字化时代特征科学选择水利水电施工技术, 保障工程整体施工质量, 助力水利事业的创新发展。

1 数字化时代对水利水电工程施工的影响

1.1 施工现场动态监控

在物联网 (IoT)、数字孪生技术的融合运用下, 通过部署传感器网络, 逐步实现对工程现场施工环境、设备状态及人员的动态监控, 及时调整施工方案, 指导水利水电工程顺利施工。例如: 在水利大坝的混凝土浇筑过程中, 通过埋设温度传感器、应变计等技术设施, 用于混凝土内部温升与应力变化的实时感知, 通过 5G 网络将数据传输至云端, 与 AI 算法结合精准预测裂缝风险, 指导冷却水管通水策略的及时调整^[1]。例如: 南水北调工程应用数字孪生技术构建“天空地水工”一体化监测技术, 用于水流动态的实时模拟, 结合实际情况及时优化调水方案, 确保工程安全运行; 在智能挖掘机等施工机械搭载北斗定位、姿态传感器,

用于挖掘参数、铲斗角度等参数, 通过系统平台与设计模型进行对比分析, 自动生成偏差报告, 防止超挖或欠挖。工地入口处部署人脸识别系统, 安全帽内置有 UWB 定位芯片, 辅助人员位置、作业轨迹的实时追踪, 动态监控水利水电施工现场, 及时纠正不合规行为。

1.2 数字建模推动三维孪生

水利水电工程规模庞大, 通过 BIM、GIS (地理信息系统) 的融合运用, 逐步构建覆盖工程设计、施工、运维的全生命周期数字模型, 实现传统水利水电施工从二维图纸到三维孪生的转变。在设计阶段, 根据 BIM 模型内部信息, 对管道碰撞、空间冲突等问题进行自动检测, 如某抽水蓄能站项目在申请该数字技术后, 减少设计变更 30%, 降低返工成本共计 200 万元。施工阶段以 BIM 模型为基础, 将其与进度计划相关联, 自动生成 4D 施工模拟图, 通过地理信息系统平台直观展示水利水电工程中各工序时间与空间的关系, 逐步优化施工组织设计。运维阶段在 BIM 技术和 GIS 系统的配合下, 构建水利水电数字管理平台, 实时映射大坝位移、渗流等关键数据, 与机器学习模型结合预测水利结构寿命, 为预防性维护提供可靠的依据。

2 水利水电工程中的核心数字化技术

2.1 人工智能技术

基于水利水电工程施工中的人工智能技术, 强调从智能决策、质量控制以及安全风险预警三个方面, 为水利水电施工提供技术便利, 具有广阔的技术应用前景。首先, 智能决策支持。AI 算法通过加强历史施工数据分析, 精准预测工程施工中可能出现的突发事

件,如工序交叉、进度延误风险等,结合预测结果自动调整施工计划^[2]。具体来讲,工程施工中借助机器学习模型,综合应用地质、天气等关键数据,不断优化施工方案与顺序,以更好地应对复杂多变的施工环境。其次,质量控制自动化。人工智能作为水利水电施工革新的重要驱动力量,在施工质量管控方面发挥着不可忽视的作用。在人工智能背景下,借助图像识别技术定期对混凝土浇筑、钢筋布置等环节质量问题进行技术检测,准确把握施工实际,其精度明显高于人工检查。如通过构建 AI 系统,可实现对混凝土表面裂缝的自动识别,系统分析裂缝成因,并自动生成修复建议。最后,安全风险预警。依托人工智能平台的视频监控、智能分析等功能,实时监控施工现场,精准识别现场危险行为并快速发出预警信号。

2.2 BIM 技术

BIM 技术通过整合水利水电工程信息,构建虚拟建筑信息模型,真实反映工程内外结构特点,使以往复杂的大坝、电站厂房等结构以直观的形式呈现出来,便于施工人员提前发现管道交叉等设计冲突问题,及时调整施工方案,减少后续变更问题。目前,上海院基于 Solidworks 逐步实现正向参数化设计,与 BIM 模型结合,输入参数后自动更新模型信息和图纸,在提高设计效率的同时,为水利水电施工提供科学指导^[3]。在水利水电施工过程中,结合现有的 BIM 建筑信息模型,综合考虑时间维度,动态化展示施工进度计划,结合现场情况优化资源配置。例如:在混凝土浇筑阶段,根据 BIM 模型设定程序,真实模拟不同施工顺序对工程工期带来的影响,通过模拟试验和对比分析,辅助施工现场制定最优方案。此外,BIM 模型在水利水电工程领域被视为“数字档案”,贯穿在工程设计、施工、运维等关键阶段,为工程施工和后期改建或运维提供数据支持。

2.3 GPS 技术

GPS 技术(全球定位系统)是三维导航定位系统的核心构成,具有强大的定位和导航能力,可以实现全天候的实时定位,凭借其高精度、快测速等优势被广泛应用在各类工程项目中,为水利水电施工带来诸多便利。在 GPS 系统中,主要分为地面监控、用户设备、空间星座三大结构部分,将其应用在水利水电工程施工现场,实时观测工程建设进度,全面搜集施工数据完善信息网,以促进基线精准测量及工程测绘,详细了解水利水电工程的真实情况,为后续项目施工提供可靠的技术保障。为确保技术应用效果,借助 GPS 卫星系统进行施工测绘时,建议将其高度始终保持在

15° 以上,及时清理周围障碍物,以便可以准确取得更多的卫星观测数据,辅助施工决策与方案调整。此外,为更好地满足水利水电工厂内的测绘精度要求,应用 GPS 系统时要求每个测绘时段的 2 次天线高度观测误差不得超出 3 mm,实际计算期间建议参照两次天线高度的平均值,按照相关技术规范严格控制同步环闭合差。

3 数字化时代水利水电工程施工技术探讨

3.1 土石坝施工

土石坝施工是水利水电工程的关键环节,其中涉及填筑、碾压、排水等多道复杂的施工工序。整个施工过程繁琐复杂,需要在数字化技术的辅助下,实时监控关键施工参数,准确把握坝体结构特点和现场地质情况,加强地基处理,结合现场环境变化动态调整施工方案,以保障土石坝施工质量与效率^[4]。在地基处理阶段,借助数字化技术实时监测现场地质变化,准确把握地质特征,及时清除坝基、岸坡周围松动的岩石、草皮、树根等杂物;对于软弱地基进行必要的加固处理,如采用换填法、夯实加固、灌浆等施工方法,保障地基承载力和稳定性满足后续施工标准。在碾压作业环节,在数字化技术的辅助下推行智能碾压操作,具体可将 GPS 定位装置、压力传感器等设施搭载在碾压设备上,以实现施工现场碾压次数、振动频率、行驶速度等关键参数的实时监测,真实反映碾压作业情况。随即将搜集信息向系统平台传递,自动生成碾压质量热力图,借助大数据分析技术判断各碾压环节质量是否达标,并明确标识出未达标的区域,指导后续返工调整。为避免土石坝施工后出现渗流问题,建议在大坝内部埋设渗压计,与数字孪生模型相结合,用于不同水位条件下渗流场变化的动态模拟,这样既可以提前找出潜在渗漏通道,及时调整施工方案,又能有效规避突发性的安全事件,指导排水系统优化。

3.2 隧洞掘进施工

隧洞掘进施工关系重大,其施工方法多样,且施工过程中往往面临着地质条件复杂、方向控制困难等现实问题。而数字化技术的合理应用,有效提升了隧洞掘进环节的施工进度与安全性,具体施工操作期间需根据地质条件、断面大小、工期要求等因素综合选择,针对围岩坚硬、完整且具有较大断面的隧洞,施工现场建议选取全断面开挖法,其施工特点为整个开挖断面一次钻孔爆破,开挖成型后根据现场地质情况全面推进。在这一掘进施工过程中,施工现场还需结合北斗定位与激光导向技术,全面推行北斗导航掘进作业,支持对掘进方向的毫米级控制,减少传统施工模式下

的超挖、掘进精度不准等问题^[5]。例如：某水利项目应用北斗导航掘进方式后，超挖量从最初的 15% 降低至 3%，既减轻了现场人员的作业压力，又有效节约混凝土用量 2 000 m³。需要注意的是，隧道掘进施工过程中存在许多不确定因素，如隧道塌方等，需要在地质雷达等技术的辅助下，实时探测施工区域前方的岩体情况，将所探测数据与 AI 算法相结合，对围岩稳定性进行综合评估，提前预测掘进施工中可能会出现突发事件，然后自动生成支护参数建议，进而减少人工判断误差。

3.3 砌体施工

基于水利水电工程的砌体施工，合理运用物联网、三维激光扫描等数字技术，逐步实现从材料加工到后续质量监测的全流程智能化管控，从源头保障砌体工程施工进度、效率和抗震性能。在砌体施工现场，利用物联网技术对每批石料、水泥等材料执行 RFID 标签管理，用于对材料采购、运输以及存储等各阶段情况的实时跟踪，一旦发现某类材料的强度不足或含泥量超标时，立即通知现场人员退还，避免质量隐患。施工过程中利用三维激光扫描仪，定期对砌体表面数据进行采集与汇总，生成点云模型，然后与前期 BIM 模型中的具体内容进行对比分析，用于其平整度偏差检测与纠正。例如：在水利水电的溢洪道工程中，若激光扫描发现砌体局部凸出超标（达到 12 mm 时），施工现场立刻进行返工处理，及时改进不合格之处，确保可以满足 ≤ 8 mm 的规范要求。为保障砌体施工质量达标，施工现场利用探针式传感器插入砌体缝隙（插入深度应 ≤ 15 mm），根据系统反馈数据来判定砂浆饱满度是否达到相关标准，以保障砌体结构整体稳定可靠。

3.4 混凝土施工

水利水电工程中多采用大体积混凝土，对施工技术要求严格，且混凝土本身往往会因温度变化而出现裂缝问题，数字化技术通过智能装备和数据分析等措施，对混凝土施工过程进行全方位监管，最终实现了温度场的精准调控。在混凝土搅拌阶段，考虑到其原料性能波动大且组成复杂等问题，合理运用数字化技术构建水泥基拌合物流变学模型，研发智能化新拌混凝土工作性监控专家系统，用于对搅拌站及施工现场拌合物质量的实时监控，这样既能保证混凝土拌合质量，又能做到对其从生产到运输的品质一致可控。而在混凝土浇筑阶段，依托物联网监控技术，在浇筑现场部署温度传感器、应变力计等基础设施，方便现场人员对混凝土内部应力与温度变化的实时掌握。例如：在滨海枢纽项目中，将 700 余个智能传感器布设在施

工现场，实时了解混凝土浇筑进度和养护状态，显著降低开裂风险，降低养护成本约 20%。为减少水利混凝土裂缝发生率，施工现场应利用无人机搭载红外热成像仪，定期对混凝土表面进行扫描，了解混凝土内外温度变化情况，精准识别温度异常部位，与建筑数字模型相结合来定位潜在裂缝问题，及时修补保障混凝土结构安全。

3.5 施工安全监控

水利水电工程规模庞大，且所处环境复杂多变，具有较高的安全风险。针对此类情况，施工单位要借助数字化技术，建立健全的水利施工监控体系，及时发现并处理潜在安全风险。对于深基坑、高边坡等危险区域，建议部署智能摄像头，结合人工智能技术的行为识别算法，严格监测施工现场变化，判断现场人员是否存在靠近危险边缘、未系安全带等危险行为，一旦发现将快速发送警报告知管理人员。必要情况下，以 BIM 建筑模型为基础构建性虚拟工地，带领现场人员模拟真实的坍塌、火灾等事故场景，提升应急疏散效率和实战能力，确保水利水电施工顺利进行。

4 结束语

社会在发展，时代在进步，数字化时代的到来推进了社会各行业的革新，为水利水电工程施工带来诸多便利。在数字化时代背景下，水利施工单位应深刻意识到数字化对工程施工带来的积极影响，结合水利水电工程特点，科学选用 BIM、人工智能等数字化技术，不断完善土石坝施工、混凝土施工、隧道掘进施工等施工技术，从多维度出发提高水利水电施工技术水平，为水利事业的健康持续发展助力。

参考文献：

- [1] 梅雄. 数字化时代水利水电工程施工技术的优化分析: 评《水利水电工程 BIM 数字化应用》[J]. 人民黄河, 2024, 46(06): 164.
- [2] 陆宇杰. 现代数字技术在水利工程施工管理中的应用探讨 [J]. 工程建设与设计, 2021(24): 216-218.
- [3] 邓永泰, 黄伟. 浅析水利水电工程施工安全技术及管理 [J]. 长江技术经济, 2024, 08(06): 126-130.
- [4] 历明涛. 水利水电工程施工现场环境保护和污染控制技术研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 05(23): 32-34, 37.
- [5] 邢琴, 周强, 蔡文华. 水利工程施工技术关键点解析 [C]//《中国建筑金属结构》杂志社有限公司. 2024 新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集 (三). 南京明辉建设有限公司, 江苏天赐建设有限公司, 2024.