

智能化技术在水利工程施工中的应用研究

马占山

中国水利水电第六工程局有限公司 辽宁 沈阳 110167

摘要: 随着人工智能、物联网、大数据、BIM等新一代信息技术的突破性发展,水利工程建设领域正经历着从传统粗放式建造向精细化、自动化、智能化建造模式的深刻变革。本文系统梳理了智能监测、BIM协同管理、无人化施工装备、数字孪生等核心智能化技术在水工建筑物施工中的创新应用场景。通过深入剖析南水北调、三峡工程、新疆大石峡水利枢纽等重大项目的实践案例,论证了智能化技术对提升施工效率、节约项目成本和实现毫米级质量控制精度的显著成效。同时,文章也指出了当前应用中存在的技术集成度不足、数据孤岛、标准体系缺失及复合型人才匮乏等关键瓶颈,并针对性地提出了构建“云-边-端”一体化智能施工体系、加强顶层设计与标准制定、深化产学研融合等发展对策。研究表明,智能化技术是驱动水利工程施工现代化、保障国家水网安全高效建设的核心引擎。

关键词: 水利工程;智能建造;BIM;物联网;无人施工

引言

水利工程是支撑经济社会发展的命脉工程,其建设质量与效率直接关系到国家水安全、粮食安全和生态安全。然而,传统的水利工程施工模式长期面临着诸多痛点:施工现场环境复杂多变,高边坡、深基坑、大体积混凝土浇筑等作业安全风险极高;施工过程依赖大量人工经验判断,进度、成本、质量控制精度有限;各参与方信息割裂,协同效率低下,导致返工、窝工现象频发。在全球新一轮科技革命和产业变革的浪潮下,以人工智能(AI)、物联网(IoT)、建筑信息模型(BIM)、5G通信、北斗导航等为代表的智能化技术,为破解这些难题提供了全新的解决方案。“智慧水利”已上升为国家战略,《“十四五”水安全保障规划》明确提出要加快推动水利工程建设数字化、网络化、智能化转型。在此背景下,深入研究智能化技术在水利工程施工全过程中的集成应用,不仅具有重要的理论价值,更是指导工程实践、提升行业核心竞争力的迫切需求。本文旨在系统探讨智能化技术如何赋能水利工程施工,分析其应用成效与挑战,并展望未来发展方向,以期为我国水利事业的高质量发展提供智力支持。

1 智能化技术体系及其在水利工程施工中的核心应用

1.1 基于BIM+GIS的全生命周期协同管理平台

BIM技术作为智能建造的“数字底座”,通过创建包含几何、物理、功能等全要素信息的参数化三维模型,彻底改变了传统的二维图纸管理模式。(1)设计施工一体化:在设计阶段,BIM模型即可进行多专业(水工、机电、金结)的碰撞检测,提前发现并解决管线冲突、结构干涉等问题,避免施工阶段的返工。例如,在泵站

厂房设计中,通过BIM可以精确模拟大型水泵、电机、管道的安装空间和顺序,优化设备布局^[1]。以广东省的珠三角水资源配置工程为例,项目团队利用Bentley公司的MicroStation平台,构建了覆盖全线113.1公里的BIM+GIS协同设计平台,实现了从宏观线路走向到微观隧洞管片拼装的无缝衔接,有效解决了超长线性工程的设计协同难题。(2)4D/5D进度与成本模拟:将施工进度计划(时间维度)和工程量清单(成本维度)与BIM模型关联,形成4D/5D模型。管理者可以在虚拟环境中直观“预演”整个施工过程,动态监控资源投入,实现进度与成本的联动管控。一旦现场出现延误,可快速模拟多种赶工方案,选择最优解。在深圳罗田水库—铁岗水库输水隧洞工程中,通过5D BIM模型,项目方实现了对21.68公里隧洞掘进、竖井开挖等关键工序的精细化成本核算与动态预警,有效控制了投资。(3)GIS空间赋能:对于南水北调这类超长线性工程,BIM与地理信息系统(GIS)的深度融合(BIM+GIS),能够将微观的工程构件精准锚定在宏观的地理环境中,实现对数百公里工程全线的可视化管理和环境影响评估。

1.2 物联网驱动的智能感知与实时监控

物联网技术通过在施工现场广泛部署传感器、RFID标签、高清摄像头等感知终端,构建起一张覆盖人、机、料、法、环的“神经网络”。(1)人员与设备安全管理:为施工人员佩戴集成定位、生命体征监测和SOS报警功能的智能安全帽;为塔吊、挖掘机等大型设备加装倾角、应力、运行状态传感器。一旦发生异常(如人员进入危险区域、设备超载),系统可立即报警并联动视频监控,极大提升了本质安全水平。(2)关键工序质量

监控：在大坝混凝土浇筑过程中，预埋温度、应力、应变传感器，实时采集内部数据，通过无线网络传输至云端平台。结合BIM模型，可动态展示混凝土的温控曲线和强度发展，确保大体积混凝土不开裂，实现毫米级的质量控制。具体而言，常用的传感器包括渗压计用于监测坝体内部水压力，裂缝计用于捕捉微小形变，而GNSS位移监测站则能精确到毫米级地跟踪大坝的整体位移。

(3) 物料追踪与供应链优化：利用RFID或二维码技术，对钢筋、水泥、管材等大宗材料进行全流程追踪，从出厂、运输到入库、领用，全程透明可溯，有效防止偷工减料和库存积压。

1.3 无人化与自动化施工装备的应用

智能化技术正逐步将人从繁重、危险的体力劳动中解放出来，推动施工装备向无人化、集群化方向发展。

(1) 智能碾压与摊铺：在土石坝填筑和道路基层施工中，无人驾驶的智能压路机和摊铺机，通过北斗高精度定位和路径规划算法，能够严格按照预设参数进行作业，保证压实遍数、速度和轨迹的均匀性，大幅提升填筑质量和效率。新疆哈密抽水蓄能电站、成都久隆水库以及世界最高的新疆大石峡面板堆石坝均成功应用了无人碾压机组技术^[2]。以大石峡工程为例，其采用的智能碾压系统不仅能自主规划路径，还能通过远程监控中心实时显示每台设备的运行轨迹、碾压遍数、搭接宽度，有效杜绝了漏压、欠压等质量问题。(2) 无人机(UAV)巡检与测绘：搭载高清相机或多光谱传感器的无人机，可快速完成高边坡、库区、渠道等难以到达区域的地形测绘、进度核查和安全巡检。通过定期航拍生成的实景三维模型，可与BIM模型进行比对，精确计算土方量，及时发现滑坡等地质灾害隐患。在南水北调焦作段的深挖方边坡改造中，无人机被用于吊运物料，每次可运送100公斤，极大地提高了在复杂地形下的施工效率。(3) 水下机器人(ROV)作业：在水下基础处理、闸门检修等作业中，遥控水下机器人可以替代潜水员，执行高风险任务，保障人员安全的同时，提高作业精度和效率。

1.4 数字孪生与人工智能辅助决策

数字孪生技术是上述各项技术的集大成者，它通过构建一个与物理工地实时同步、双向互动的虚拟映射体，为智能决策提供强大支撑。(1) 施工过程全要素仿真：数字孪生平台整合了BIM、IoT、GIS、气象、水文等多源数据，能够对整个施工过程进行高保真度的动态仿真。管理者可以在虚拟世界中测试不同的施工组织方案、应急预案，评估其效果后再付诸实施。(2) AI驱动的风险预警与优化：利用机器学习算法，对历史施工数

据和实时流数据进行深度挖掘，可以智能识别出影响进度、质量和安全的关键风险因子。例如，AI模型可以预测未来一周因降雨导致土方作业停滞的概率，并提前调整施工计划；也可以根据设备运行数据，预测其故障发生时间，实现预测性维护。水利部信息中心主导的“数字孪生黄河”项目，通过构建覆盖中下游典型河段的L2级数据底板，集成了“天空地水工”一体化监测网络，实现了对洪水演进、泥沙输移等过程的精准模拟与预报，为防洪调度提供了科学依据。

2 典型应用案例分析

2.1 南水北调中线工程的智能化实践

南水北调中线干线工程全长1277公里，是缓解华北地区水资源短缺的战略性基础设施。面对如此庞大的工程体量和复杂的管理需求，智能化技术的应用显得尤为重要。该工程全线配备了近7000个视频监控装置，构建了一个覆盖所有闸站、渠道和园区的全方位监控网络。通过引入先进的人工智能算法，这套系统能够自动识别入侵、水面漂浮物、水位异常等多种事件，并即时发出告警，这不仅将管理人员从繁重的监看任务中解放出来，更将事件响应时间缩短了数倍。在此基础上，中国南水北调集团正积极推进数字孪生流域建设，通过整合水文、气象、工程运行等多源异构数据，构建出一个与物理世界同步演化的虚拟模型。这个数字孪生体具备强大的“四预”功能——预报、预警、预演、预案，能够对未来的水情变化和工程运行状态进行模拟推演，从而为科学调度和应急决策提供前瞻性支持，显著提升了整个工程的智能化安全运行管理水平。

2.2 三峡升船机改造工程

三峡升船机作为目前世界上规模最大、技术难度最高的垂直升船机，被誉为“船舶电梯”，其建设和运维本身就是一项智能化工程的典范。在建造阶段，为了确保万吨级承船厢能够平稳升降，其高达百米的塔柱垂直度误差被严格控制在3毫米以内，承船厢本身的制造和安装也大量采用了先进的数字化测量与控制技术，以保证极高的装配精度。在运行阶段，升船机的驱动系统采用了“电气行程同步+机械同步”的双重冗余控制模式，通过精密的传感器和控制系统，确保四个巨大吊点的运动高度同步，从而保障了承船厢在升降过程中的绝对平稳与安全。正是凭借这一系列智能化技术的深度集成与应用，三峡升船机在2022年荣获“智慧船闸”称号，标志着其在智能化运维方面已达到国际领先水平。

3 应用挑战与发展对策

3.1 主要挑战

尽管智能化技术前景广阔,但在其大规模推广应用的过程中,依然面临着一系列现实的挑战。首当其冲的是技术集成度不足与由此产生的“数据孤岛”问题。由于市场上软硬件供应商众多,各自采用的数据标准和通信协议互不兼容,导致BIM系统、物联网平台、项目管理软件等独立运行,彼此之间难以有效集成和共享数据,无法形成合力,制约了数据价值的最大化挖掘。其次,智能化系统的初期投入成本较高,包括软硬件采购、系统部署、定制开发以及后续的维护费用,这对于投资回报周期较长的中小型水利项目而言,构成了不小的资金压力^[3]。第三,复合型人才严重短缺也是一个瓶颈,既精通水利工程技术又熟悉信息技术的跨界人才凤毛麟角,这直接影响了智能化系统的深度应用、有效运维和持续创新。此外,随着大量设备接入网络,系统的网络安全风险也随之增加,如何保障关乎国计民生的关键水利设施的数据安全和系统稳定运行,已成为一个亟待解决的新课题。最后,行业层面统一的技术标准、数据接口规范和评价体系尚不健全,导致各项目在智能化建设上“各自为战”,难以形成可复制、可推广的经验和规模效应。

3.2 对策建议:构建“云-边-端”一体化智能施工体系

为系统性解决上述问题,本文提出构建“云-边-端”一体化的智能施工体系架构。(1)端:指部署在施工现场的各种智能终端,包括传感器、摄像头、无人机、无人施工机械等。它们负责最前端的数据采集和简单的指令执行。(2)边:指部署在靠近数据源的边缘服务器或网关。它负责对“端”采集的海量原始数据进行初步处理、过滤、融合和实时分析,例如进行视频流的AI识别、传感器数据的异常检测等。这可以大大减轻云端的计算负担,并实现毫秒级的本地响应。(3)云:指位于数据中心的云平台。它作为整个体系的“大脑”,负责存储和管理全生命周期的工程数据,运行复杂的分析模

型(如数字孪生、大数据预测),进行全局性的资源调度、协同管理和决策支持^[4]。该体系的优势在于:通过统一的数据标准和接口,实现“端-边-云”各层数据的无缝流转与共享。边缘计算处理实时性要求高的任务,云端处理复杂分析任务,二者协同工作,兼顾了效率与深度。边缘节点分担了云端算力,降低了网络带宽和云服务成本。敏感数据可在边缘侧进行处理,减少向云端传输的数据量,降低了数据泄露风险。

4 结语

智能化技术正在深刻重塑水利工程施工的面貌,从设计协同、过程监控到装备作业、决策支持,其应用场景日益丰富,成效日益凸显。它不仅是提升施工效率、保障工程质量和安全的强大工具,更是推动水利行业转型升级、实现高质量发展的核心驱动力。面对当前存在的集成、成本、标准和人才等挑战,唯有通过顶层设计、技术创新、模式变革和人才培养的多轮驱动,才能打通智能化技术落地的“最后一公里”。展望未来,随着5G、AI大模型等前沿技术的持续融入,水利工程施工将迈向更高水平的自主感知、自主决策和自主执行的“智慧工地”新纪元,为构建现代化国家水网提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]张新生,杨小成.智能化技术在水利工程施工中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(33):220-222.
- [2]聂威.水利工程智能化施工中的技术管理要点与实施路径[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十二届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集.中国水利水电第五工程局有限公司,2025:392-394.
- [3]乔亮,张胜利.水利工程施工中的智能化技术应用研究[J].张江科技评论,2025,(04):65-67.
- [4]肖晶,陈明文.智能化技术在水利工程施工中的应用研究[J].水上安全,2024,(24):37-39.