

水利工程施工中的智能化技术应用与发展趋势

郑 豪

国网新源控股有限公司华东开发建设分公司 浙江 杭州 310000

摘要: 随着科技的飞速发展,智能化技术在水利工程施工领域的应用日益广泛,为提升工程质量、效率和安全性提供了有力支持。本文深入探讨了智能化技术在水利工程施工中的具体应用,包括勘测设计、施工管理、实时监控和决策支持等方面,并分析了其面临的挑战。同时,结合行业发展趋势,展望了智能化技术在水利工程中的未来发展路径,如技术融合创新、智能化水平提升和产业生态完善等,旨在为水利工程智能化发展提供理论参考和实践指导。

关键词: 水利工程;智能化技术;勘测设计;施工管理;技术融合创新

1 引言

水利工程作为国民经济的基础设施,在防洪、灌溉、供水、发电等方面发挥着关键作用,是保障国家经济社会稳定发展的重要支撑。传统水利工程施工模式依赖人工操作和经验判断,存在效率低、精度差、安全风险高等问题。随着物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术的快速发展,智能化技术逐渐渗透到水利工程领域,为施工管理带来了革命性变化。智能化技术的应用不仅能提高施工效率、降低成本,还能增强工程的安全性和可持续性,推动水利工程向智慧化、精细化方向发展。

2 智能化技术的内涵与发展

2.1 智能化技术的定义与特点

智能化技术是以人工智能为核心,融合物联网、大数据、云计算、数字孪生等技术的综合体系。其核心特点包括:(1)高效性:通过自动化采集和分析数据,减少人工干预,提升决策效率;(2)精准性:利用高精度传感器和算法模型,实现毫米级测量和实时反馈;(3)实时性:构建“端-边-云”协同架构,支持秒级数据传输和响应;(4)自适应性:基于机器学习算法,系统可自主优化运行参数,适应复杂工况。

2.2 技术发展历程

智能化技术在水利工程中的应用经历了三个阶段:

(1)单机自动化阶段(2000—2010年):以单一设备自动化控制为主,如自动闸门启闭系统;(2)系统集成阶段(2010—2020年):通过物联网实现设备互联,构建施工管理平台;(3)智慧化阶段(2020年至今):融合数字孪生、AI预测等技术,实现全生命周期智能管控。

3 智能化技术在水利工程施工中的具体应用

3.1 勘测设计阶段的智能化应用

在勘测设计阶段,智能化技术通过三维地形建模与

仿真、智能优化设计等手段,显著提升了设计效率和精度。三维地形建模与仿真技术利用无人机搭载激光雷达和高清摄像头,快速获取高精度地形数据。例如,在淮河入海水道二期工程中,通过三维倾斜摄影技术构建1:500比例尺的数字高程模型(DEM),结合BIM(建筑信息模型)技术生成可视化施工模型。该模型不仅直观展示了工程全貌,还通过碰撞检测功能提前发现设计冲突,使设计误差控制在 $\pm 2\text{cm}$ 以内,减少了后期施工变更。智能优化设计则基于遗传算法和粒子群优化算法,对工程结构进行多目标优化^[1]。以三峡水利枢纽工程船闸设计为例,传统设计方法需通过多次试算确定闸室尺寸,而智能优化算法可同时考虑通航能力、结构强度、材料用量等多个目标,在短时间内生成最优方案。最终优化后的闸室尺寸在保证通航能力的前提下,减少混凝土用量12%,降低造价约2.3亿元。

3.2 施工管理阶段的智能化应用

施工管理阶段是智能化技术应用的核心环节,涵盖设备智能监控与调度、施工进度智能管控、质量安全智能监管等多个方面。设备智能监控与调度通过物联网技术实现设备状态实时监测和远程控制。在南水北调中线干线工程中,浪潮集团提供的“端边云用”一体化视频分析系统部署了700余个智能传感器,覆盖挖掘机、推土机、闸门等关键设备。系统可实时采集设备位置、运行状态、能耗等数据,并通过边缘计算节点进行初步分析,将关键信息上传至云端平台。管理人员通过手机APP或电脑端即可查看设备运行情况,实现远程调度和故障预警。例如,当系统检测到某台泵机振动异常时,会自动触发预警并生成维修工单,同时推荐附近空闲的维修人员前往处理,使设备利用率提升25%,故障响应时间缩短至10分钟内。

施工进度智能管控依托BIM+GIS技术构建4D施工模

拟平台,实现进度计划与实际施工的动态关联。在江西仓前水库项目中,项目团队将BIM模型与进度计划导入4D平台,生成包含时间维度的施工模拟动画。管理人员通过对比实际进度与计划进度的差异,可直观识别滞后工序,并利用平台内置的优化算法生成调整方案^[2]。例如,当混凝土浇筑进度滞后时,系统会分析资源分配、工序逻辑等因素,建议增加2台泵车或调整施工顺序,使工期缩短3天。此外,平台还支持进度风险预警,通过模拟不同工况下的进度演变,提前识别潜在延误风险,为项目管理提供决策支持。

质量安全智能监管是保障施工安全的重要手段。VR(虚拟现实)技术被广泛应用于安全培训,通过构建虚拟施工场景,让参训人员沉浸式体验高处坠落、物体打击等事故险情,增强安全意识。仓前水库项目建立VR安全体验中心,开发“边坡失稳坠落”“深基坑坍塌自救”等33个虚拟险情模块。参训人员需通过8学时考核并取得电子“安全操作证”后方可上岗,使违规操作率下降。在质量管控方面,无人机巡检和图像识别技术可自动检测混凝土表面缺陷、钢筋间距偏差等问题。例如,某大型水闸工程采用无人机搭载高清摄像头定期巡检,通过深度学习算法识别裂缝、蜂窝麻面等缺陷,准确率达95%以上,较人工检测效率提升5倍。

3.3 实时监控阶段的智能化应用

实时监控是水利工程运行管理的关键环节,智能化技术通过多源数据融合监测和故障预测与健康诊断(PHM),实现了对工程状态的全方位感知和精准评估。多源数据融合监测构建了“空天地”一体化监测网络,整合卫星遥感、地面传感器、水下探测等多种手段。卫星遥感可实现每15分钟更新一次水域面积,洪水期间淹没范围识别准确率达92%,为防洪调度提供宏观数据支持。地面监测方面,光纤光栅传感器可监测大坝渗流压力,分辨率达0.1kPa,能够捕捉微小渗漏信号。水下监测则依赖ADCP(声学多普勒流速剖面仪)实现流速实时测量,误差小于0.05m/s,为河道演变分析提供精准数据。通过数据融合算法,系统可综合分析不同监测手段的数据,提高故障诊断的准确性和可靠性。

故障预测与健康诊断(PHM)技术基于设备运行数据,利用机器学习算法预测设备剩余使用寿命(RUL),实现预防性维护。在长江流域某泵站中,项目团队部署了振动、温度、电流等多类型传感器,实时采集电机运行数据。通过LSTM(长短期记忆网络)算法对历史数据进行分析,建立设备退化模型,可提前72小时预警轴承故障。预警信息触发后,系统自动生成维修

工单并推荐维修方案,避免非计划停机损失约50万元。此外,PHM技术还可优化备件库存管理,根据设备健康状况动态调整备件储备量,降低库存成本。

3.4 决策支持阶段的智能化应用

决策支持阶段是智能化技术的最高层次,通过数字孪生流域决策和智能优化调度,为工程管理提供科学依据。数字孪生技术构建了虚拟流域模型,集成气象、水文、工程等多源数据,支持多场景模拟推演。密云水库数字孪生项目以BIM模型为基础,融合气象预报、水文监测、工程运行等12类数据源,构建了高精度虚拟水库。系统可模拟百年一遇洪水演进过程,生成不同调度方案下的淹没范围、水库水位变化等结果,为防洪调度提供可视化决策支持。实际应用中,系统将决策时间从4小时缩短至20分钟,显著提升了应急响应能力。

智能优化调度基于强化学习算法,根据实时数据动态调整水资源分配。在某大型灌区中,系统集成土壤墒情传感器、气象站、流量计等设备,实时采集作物需水规律、土壤水分含量、气象条件等数据。通过深度强化学习算法训练调度模型,可自动生成灌溉计划,优化水资源配置。此外,智能优化调度还可应用于发电、航运等多目标协同优化,提升工程综合效益。

4 智能化技术应用面临的挑战

4.1 数据安全与隐私保护

水利工程数据涉及国家安全,如水库水位、流域降雨量等敏感信息若被恶意篡改或泄露,可能引发严重后果。2023年某水库监控系统遭黑客入侵,攻击者通过伪造水位数据上传至调度中心,导致系统误判为洪水来临,险些触发错误调度指令。此外,施工过程中的设备运行数据、人员位置信息等也涉及企业商业秘密和个人隐私,需加强保护。当前,水利工程数据安全面临网络攻击手段多样化、数据共享需求增加等挑战,需构建涵盖数据加密、访问控制、安全审计等多层次的安全防护体系。

4.2 技术标准与互操作性

水利工程智能化涉及物联网、大数据、人工智能等多类技术,但不同厂商的设备接口协议、数据格式存在差异,导致数据互通困难^[3]。例如,某泵站同时采用A、B两家厂商的传感器,因通信协议不兼容,需通过中间网关进行数据转换,增加了系统复杂性和维护成本。此外,技术标准缺失还导致数据质量参差不齐,影响分析结果的准确性。因此,需加快制定统一的技术标准,规范设备接口、数据格式、传输协议等,促进产业协同发展。

4.3 复合型人才短缺

智能化技术应用需要既懂水利业务又掌握信息技术的复合型人才,但当前行业人才结构难以满足需求。高校水利专业课程设置以传统工程知识为主,信息技术相关课程占比不足20%,导致毕业生缺乏智能化技术应用能力。企业培训则侧重于单一技能提升,难以培养系统化思维。据统计,全国水利行业智能化技术复合型人才缺口达3万人以上,制约了技术推广速度。因此,需加强产学研合作,优化人才培养模式,为智能化发展提供人才保障。

5 智能化技术的发展趋势

5.1 技术融合创新

未来,智能化技术将向深度融合方向发展,形成更强大的技术合力。AI与数字孪生的融合将构建具备自主学习能力的虚拟工程模型。传统数字孪生模型依赖人工更新参数,而AI技术可使其根据实时数据自动调整模型结构,实现动态优化。例如,大坝数字孪生模型可通过AI算法分析渗流监测数据,自动识别渗漏通道并更新模型参数,提高故障诊断的准确性。5G与边缘计算的结合将支持低时延控制,满足实时调度需求。5G网络提供的高带宽、低时延特性设备状态数据实时上传至边缘计算节点,实现本地化快速决策。例如,在洪水调度中,系统可在10毫秒内完成水位数据采集、分析和指令下发,避免延误。区块链与数据共享的融合将建立可信数据交换平台,促进跨部门协作。区块链的分布式账本和加密技术可确保数据不可篡改和可追溯,解决数据共享中的信任问题。例如,不同流域管理机构可通过区块链平台共享水文数据,实现协同防洪调度。

5.2 智能化水平提升

随着技术进步,水利工程智能化将向自主决策、预测性维护和全生命周期管理方向升级。自主决策系统基于深度强化学习,可实现设备自主运行和故障自愈。例如,智能闸门可根据上下游水位、流量等数据,自动调整开度,无需人工干预。当检测到闸门卡阻时,系统可启动备用电机或调整控制策略,实现故障自愈^[4]。预测性维护通过数字孪生模型,提前30天预测设备故障,维护成本降低35%。例如,水泵数字孪生模型可模拟不同工况

下的磨损情况,结合历史维修数据,预测轴承、密封圈等易损件的更换时间,提前安排维护计划。全生命周期管理则实现从规划、设计到运维的数据全流程贯通。例如,在工程规划阶段,数字孪生模型可模拟不同设计方案的长效运行效果;在运维阶段,模型可集成设备健康状况、维修记录等数据,为更新改造提供依据。

5.3 产业生态完善

智能化技术的推广需构建完善的产业生态,包括产学研用协同、标准体系构建和商业模式创新。产学研用协同方面,高校、科研机构与企业需联合攻关关键技术。例如,清华大学与某水利企业合作研发的国产AI大模型DeepSeek,在水利科研中实现了高精度水文预测和工程安全评估,打破了国外技术垄断。标准体系构建需制定数据采集、传输、存储等12类国家标准,统一技术规范。例如,水利部正在推进《水利工程物联网建设规范》等标准制定,为设备互联和数据共享提供依据。商业模式创新方面,推广“建设-运营-移交”(BOT)模式,吸引社会资本参与智慧水利建设。

结语

智能化技术已成为推动水利工程施工变革的核心驱动力。通过勘测设计、施工管理、实时监控和决策支持等环节的智能化升级,可显著提升工程效率、质量和安全性。未来,随着技术融合创新和产业生态完善,水利工程将向全要素感知、全流程智能、全时空协同的方向发展。为加速智能化技术落地,行业需加强数据安全防护、完善技术标准体系、培养复合型人才,为水利工程可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 秦亚峰,原斌斌.水利工程智能施工的理论框架与关键技术路径探索[J].中国信息化,2025,(06):45-46.
- [4] 朱亚迪.人工智能技术在水利施工企业管理中的应用研究[J].市场瞭望,2025,(11):148-150.