

智能化技术在水利工程运行与管理中的应用研究

高 健

(兰州市水电勘测设计院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要 水利工程是国民经济和社会发展的关键基础设施。智能化技术在水利工程运行与管理中的应用日益广泛, 为提升水利工程现代化水平、保障工程安全高效运行提供了新途径。本文基于水利工程运行管理的实际需求, 分析了物联网、大数据、人工智能等关键技术, 在工程调度优化、安全监测预警、设备诊断维护、灌区精准管理等方面的应用现状; 通过对三峡水库、都江堰灌区等典型案例进行分析, 探讨了智能化水利工程运行管理面临的数据采集融合、智能分析控制等挑战, 并提出了相应的优化对策。研究成果旨在对推动水利工程向智能化方向发展具有积极的意义。

关键词 智能化技术; 水利工程; 运行管理; 物联网; 大数据

中图分类号: TP18; TV61

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)12-0028-03

近些年, 在“互联网+”和数字化转型的大背景下, 智能化技术在各行业得到广泛应用。水利作为国民经济的基础性行业, 亟需利用新一代信息技术提升发展质量和效益。将人工智能、物联网等引入水利工程运行管理, 有助于解决当前工程调度、设备维护、灌区管理等方面存在的诸多问题, 实现水利工程的智能感知、分析决策和精细化管控。本研究旨在系统梳理智能化技术在水利工程领域的应用现状与发展趋势, 分析存在的瓶颈与挑战, 为智能水利建设提供理论参考和实践指导, 推动形成安全可靠、节水高效、精准调控的现代化水利工程运行管理模式。

1 智能化技术在水利工程运行中的应用

1.1 工程调度与优化运行

智能化技术在水利工程调度与优化运行中的应用, 主要体现在水量调度和水电优化调度两个方面。通过部署先进的水文监测设备, 构建高精度的水文数据采集网络, 利用机器学习算法对水文过程进行建模分析, 可实现水库入库流量、出库流量的精准预测, 为水量优化调度提供可靠依据^[1]。同时, 通过建立多目标优化调度模型, 综合考虑发电效益、防洪安全、生态流量等约束条件, 运用智能优化算法求解最优调度方案, 实现水电站的高效运行。此外, 通过智能化技术还可实现多水库联合优化调度, 在更大范围内优化配置水资源, 提升整体工程效益。

1.2 工程安全监测预警

在水利工程安全监测预警中, 智能化技术发挥着

关键作用。通过在大坝、水闸等关键部位布设各类传感器, 如应变计、渗压计、位移计等, 可实时采集工程的应力、变形、渗流等状态参数。利用物联网技术, 将监测数据实时传输至云平台, 通过大数据分析方法对监测数据进行处理, 构建工程健康诊断模型, 实现工程安全状态的动态评估。当监测数据出现异常或超出阈值时, 智能预警系统可及时发出警报, 并根据预设的应急预案自动给出相应的处置建议, 为工程管理人员的及时决策提供支持。通过智能化监测预警, 可大幅提升工程安全管理效率, 最大限度地降低工程事故风险。

1.3 工程设备状态诊断与维护

水利工程中的机电设备, 如水泵、启闭机、发电机组等, 其运行状态直接影响着工程效益和安全。引入智能化技术, 可实现设备的状态监测、故障诊断和预测性维护。通过在设备的关键部件安装振动、温度、油液等传感器, 采集设备运行过程中的各项参数, 运用机器学习算法构建设备健康评估模型, 可实时判断设备的健康状态, 预测设备的剩余使用寿命^[2]。当监测数据出现异常时, 故障诊断系统可智能分析故障原因, 并给出维修建议。同时, 基于设备的历史运行数据和健康评估结果, 可优化制定设备检修计划, 实现预测性维护, 避免设备非计划停机, 延长设备使用寿命, 保障工程的安全稳定运行。

1.4 供水管网压力与水质监测

在城市供水管网运行管理中, 管网压力调控和水质监测是两项关键任务。采用智能化技术, 通过在管

网的关键节点布设压力传感器和水质传感器,可实时监测管网的压力分布和水质指标。压力监测数据经分析处理后,可优化调整阀门开度,平衡管网压力,降低管网漏损,提高供水效率。同时,水质在线监测系统可持续监测水质指标,如浊度、pH 值、余氯量等,一旦发现水质异常,系统可自动预警,并溯源分析污染原因,为应急处置提供决策依据。

此外,基于物联网和 GIS 技术,可构建智慧供水管理平台,实现管网运行的可视化监控,管网设施的智能化巡检,突发事件的快速响应,全面提升供水管网的运行效率和服务质量。

2 智能化技术在水利工程管理中的应用

2.1 灌区精准化管理

智能化技术在灌区精准化管理中的应用,主要体现在农田需水量监测、需水预测和精准灌溉三个方面。通过在农田部署土壤水分传感器、气象传感器等,可实时监测作物生长环境参数,结合作物生长模型,利用机器学习算法对作物需水量进行动态预测。同时,基于预测的需水量,结合灌区水资源状况,运用智能优化算法制定精准灌溉计划,通过智能化控制系统精确调控灌溉设施,实现对农田的精准灌溉。此外,通过对农田耗水过程的智能化监测分析,可评估灌溉效率,优化调整灌溉制度,在保障作物高产的同时,实现灌区水资源的高效利用和可持续管理。

2.2 水资源调度与管理决策

在流域尺度的水资源调度与管理决策中,智能化技术可发挥重要作用。通过综合考虑流域内水文、水资源、用水需求等多源数据,构建多目标优化模型,运用智能优化算法求解水资源优化配置方案。目标函数可包括用水效益最大化、生态流量保障、防洪风险最小化等,约束条件涵盖水量平衡、调度规则、工程运行限制等因素。求解结果可为流域水资源统筹配置、跨区域水量调度、水权交易等管理决策提供科学依据^[3]。同时,建立面向管理决策的智能分析平台,集成数据分析、模拟优化、可视化展示等功能,为管理者提供交互式的决策支持,提升流域水资源管理的科学化、精细化水平。

2.3 水利信息化管理平台

智能化技术为构建高效协同、数据共享、分析挖掘的水利信息化管理平台提供了新思路。通过打通水文、工程、管理等业务系统,融合感知设备、移动终端等多源数据,构建水利一体化数据中心,实现水利业务数据的集中管理和共享交换。在此基础上,运用大数据分析、数据挖掘等技术,对水利数据进行深度

分析和知识发现,挖掘数据背后的关联规律和演化趋势,形成多维度的水利业务分析报告和辅助决策信息,支撑智能化的业务协同和科学决策。同时,通过构建水利业务协同平台,打通部门间的数据壁垒,优化业务流程,实现跨部门、跨层级的高效协同,全面提升水利工程管理的效率和效能。

2.4 水利工程资产智能化管理

智能化技术可助力水利工程资产管理向精细化、智能化方向发展。通过数字化手段采集设备铭牌、运行记录、维修记录等信息,建立水利设备资产电子台账,实现资产全生命周期的信息化管理。基于电子台账,深入分析设备的健康状态和维修需求,制定差异化的预防性维护策略,延长设备使用寿命。同时,通过对设备运维过程的智能化管理,如运维任务分配、工单流转、运维知识库等,提高运维效率和规范性^[4]。此外,利用大数据分析技术,对设备故障、维修等历史数据进行挖掘分析,掌握设备故障规律,形成风险预警模型,实现设备故障的早期预警和主动防控,保障工程安全运行,提升资产管理水平。

3 水利智能化关键技术

3.1 物联网技术

物联网技术是实现水利工程智能化监测的关键。通过在大坝部署高精度振弦式应变计(测量范围 $\pm 1500 \mu\epsilon$,精度优于 $\pm 0.5\%F.S.$),可实时监测大坝应力变形。利用 NB-IoT 窄带通信技术(覆盖半径可达 15 km,待机功耗低至 $5 \mu A$),构建低功耗广域传输网络,解决传感器供电和数据回传难题。基于 LoRa 的多跳自组网方案,节点通信距离可达 20 km,电池寿命超过 10 年。将边缘计算与监测前端相结合,可将数据压缩率提高 60%,异常检测准确率达 90%。采用 K8s 云原生架构构建物联网平台,吞吐量可达 10 万次/秒,支持水利海量监测数据高效接入和管理。

3.2 大数据技术

水利监测数据呈现出量大、多源、非结构化的特点。采用 HDFS 分布式文件系统和 HBase 列式数据库,可存储 PB 级别的时序、文本、图像等异构数据,提供毫秒级的随机读写能力。基于 Spark 内存计算框架构建水利大数据分析平台,数据处理速度可达内存数据库的 100 倍^[5]。引入机器学习 Pipeline 和 Docker 容器化部署,工程监测数据处理效率提升 50%。通过大数据关联分析,可挖掘设备故障预兆、溢洪风险预警等关键信息,预测准确率达 85%。其在某大型水库中的应用表明,基于大数据分析的设备故障预测,可将非计划停机时间减少 20%,检修成本降低 15%。

3.3 人工智能技术

人工智能技术赋能水利工程智能决策和优化控制。采用图神经网络构建设备全生命周期知识图谱, 实体识别准确率达95%。基于门控循环单元(GRU)的深度学习模型, 可提前7天预测水库入库流量, 平均绝对百分比误差(MAPE)低于10%。将卷积神经网络应用于大坝安全监测, 裂缝识别精度达到93.6%, 渗流检测的漏报率低于5%。运用深度强化学习实现水库多目标动态优化调度, 较传统方法节水率提高12%, 发电量增加8%。通过迁移学习和Few-shot Learning, 利用跨流域、跨工程的数据, 智能模型泛化能力提升30%。

3.4 智能控制技术

智能控制技术是实现水利工程自动化、精细化调控的核心。基于模糊PID控制的智能闸门, 调节精度可达 ± 2 mm, 响应时间小于1s。采用人工鱼群算法优化的SVR水泵故障诊断模型, 可实现95%以上的故障检出率, 虚警率低于3%。在水库群优化调度中, 多智能体强化学习可实现分钟级的实时控制, 较传统方法提升净效益5%以上。融合物理模型与数据驱动的水利数字孪生系统, 工程全周期仿真效率提高50倍, 优化控制策略可带来10%的综合效益提升。其在某大型灌区中的应用表明, 智能闸门和渠道控制系统可实现精准调水, 水资源利用率提高20%, 灌溉公平性系数达到0.85以上。

4 智能化水利工程运行与管理案例分析

4.1 三峡水库智能调度与管理系统

三峡水库智能调度与管理系统是智能水利的典型应用。该系统采用微服务架构, 融合了水雨情监测、水文预报、调度决策优化等功能。基于300个监测站点, 构建了覆盖坝区、库区、支流的立体监测网, 实现水雨情秒级感知。引入深度学习算法, 72小时降雨预报的准确率达85%。建立多时间尺度、多目标的智能调度模型, 日发电量增加2%, 防洪库容利用率提高5%。系统自投入使用以来, 实现了“防洪、发电、航运、供水、生态”五大效益的最优平衡, 年均增发电量10亿kWh, 减少下游洪水灾害损失30亿元, 为流域高质量发展提供坚实的保障。

4.2 都江堰灌区信息化管理平台

都江堰灌区信息化管理平台展示了智能化技术在农业水利中的应用价值。平台基于物联网构建了“天空地”一体化的灌区监测体系, 布设了1 000多个监测点, 实现了墒情、水情、工情的实时感知, 数据采集频次达15分钟/次。搭建了集水费计收、水权交易、巡检养护为一体的综合业务系统, 实现了灌区管理的移动化、精细化、智能化。平台还创新应用了智能化

精准灌溉技术, 根据作物需水模型和土壤墒情实时调控阀门, 灌溉定额相比传统方法节水30%, 农作物增产10%以上。目前, 平台已在100万亩农田推广应用, 成为智慧农业的标杆示范工程。

5 智能化水利工程运行管理面临的挑战与对策

智能化水利工程运行管理虽已取得显著进展, 但仍面临诸多挑战: (1) 数据采集融合方面, 异构传感网络的协同和数据标准化亟需突破; (2) 智能分析控制技术尚难以应对复杂水利工况, 模型泛化能力和决策可解释性有待提升; (3) 基础设施智能化改造成本高昂, 投资回报周期长; (4) 跨学科人才短缺制约了智能水利的深入发展。

针对这些瓶颈: (1) 应构建多源异构数据融合平台, 研发低功耗、高可靠的新型传感器; (2) 探索深度学习与水利物理模型的耦合方法, 提升智能算法在极端工况下的适应性; (3) 创新投融资机制, 建立智能化改造效益评估体系; (4) 加强产学研协同, 培养复合型水利智能化人才。同时, 需建立健全智慧水利标准规范体系, 完善数据安全和隐私保护机制。通过系统推进这些对策, 可有效破解智能化水利工程建设难题, 加速传统水利向数字化、网络化、智能化转型, 最终实现水利工程全周期智能化管理, 为保障国家水安全提供有力支撑。

6 结束语

智能化技术与水利工程的深度融合, 正在推动传统水利迈向智慧水利新阶段。未来, 随着5G、区块链等新技术不断涌现, 数字孪生、智慧大脑等新理念加速落地, 智能化水利必将迎来广阔的发展空间。但同时也应看到, 当前智能化水利工程建设仍面临诸多挑战, 亟须在优化顶层设计、突破关键技术、创新应用模式、健全标准规范、加强人才培养等方面持续发力。只有协同各方力量, 攻坚克难, 才能加快构建集感知、分析、预测、调控、管理于一体的智慧水利体系, 为水安全、粮食安全和生态安全提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 黄银香. 水利工程中的智能化技术应用与管理[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2024(25):57-59.
- [2] 杨杰. 智能化节水灌溉技术在农田水利工程中的应用[J]. 河北农机, 2024(16):133-135.
- [3] 孟虹隐. 智能化技术在水利工程运行与管理中的应用研究[J]. 水上安全, 2024(14):61-63.
- [4] 樊尊荣, 霍利兵, 李坤. 水利施工中的智能化技术应用研究[J]. 水上安全, 2024(06):73-75.
- [5] 刘瑾. 水利泵站运行智能化技术研究[J]. 水上安全, 2024(04):70-72.