

智慧水利背景下水闸信息自动化系统构建研究

努尔艾力·艾尼瓦尔

新疆维吾尔自治区塔里木河流域叶尔羌河水利管理中心, 中国·新疆 喀什 844700

摘要: 随着全球气候变化加剧及极端天气事件频发, 水闸作为防洪排涝、水资源调配及生态补水的关键控制性工程, 其运行管理的智能化水平直接关系到区域水安全与经济社会发展。在智慧水利建设全面提速的宏观背景下, 传统水闸依赖人工操作、数据孤岛严重、决策滞后等弊端日益凸显, 已无法满足现代化治水兴水的迫切需求。本文旨在系统综述智慧水利背景下水闸信息自动化系统的构建理论、技术架构、核心功能及应用实践。文章首先剖析了当前水闸运行管理中存在的感知盲区、控制粗放、应急能力不足等现实困境; 其次, 深入探讨了基于物联网的全要素感知体系、基于边缘计算的智能控制策略、基于数字孪生的仿真预演机制以及基于大数据的智能决策支持系统等关键构建技术; 再次, 结合典型流域及大型灌区的水闸自动化改造案例, 实证分析了系统在提升调度效率、降低运维成本、保障工程安全等方面的实际成效; 最后, 指出了当前系统构建面临的数据标准不统一、网络安全风险高、复合型人才匮乏等挑战, 并提出了未来的发展趋势与建议。研究表明, 构建“泛在感知、智能控制、协同联动”的水闸信息自动化系统, 是实现水闸管理从“人防”向“技防”“智防”跨越的核心路径, 对于提升国家水治理体系和治理能力现代化水平具有重大战略意义。

关键词: 智慧水利; 水闸; 信息自动化系统; 物联网; 数字孪生; 智能调度

Research on the Construction of Automated Information Systems for Sluice Gates under the Context of Smart Water Management

Nuraili Ainiwal

Yarkand River Water Conservancy Management Center, Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China
Xinjiang Kashgar 844700

Abstract: With the intensification of global climate change and frequent extreme weather events, sluice gates—key control structures for flood prevention, drainage, water resource allocation, and ecological water replenishment—have their operational management intelligence directly affecting regional water security and socioeconomic development. Against the backdrop of accelerated smart water management initiatives, traditional sluice gate operations relying heavily on manual operation, suffering from severe data silos, and experiencing delayed decision-making are increasingly inadequate to meet the urgent demands of modern water governance. This paper systematically reviews the theoretical foundations, technical architecture, core functions, and practical applications of automated information systems for sluice gates within the context of smart water management. First, it analyzes current challenges in sluice gate operation and management, including perception blind spots, coarse control, and insufficient emergency response capabilities. Second, it explores key construction technologies such as an IoT-based comprehensive sensing system, edge computing-enabled intelligent control strategies, digital twin-based simulation and pre-exercise mechanisms, and big data-driven intelligent decision support systems. Third, through case studies of sluice gate automation upgrades in typical river basins and large-scale irrigation districts, the paper provides empirical analysis of the system's effectiveness in improving dispatch efficiency, reducing operation and maintenance costs, and ensuring engineering safety. Finally, it identifies existing challenges—including inconsistent data standards, high cybersecurity risks, and a shortage of interdisciplinary talent—and proposes future development trends and recommendations. The study demonstrates that building an integrated sluice gate information automation system characterized by ubiquitous sensing, intelligent control, and coordinated collaboration is a critical pathway toward transforming sluice gate management from "manual defense" to "technological defense" and "intelligent defense," holding significant strategic importance for advancing the modernization of national water governance systems and capabilities.

Keywords: Smart water management; Sluice gate; Information automation system; Internet of things (IoT); Digital twin; Intelligent scheduling

0 引言

水是生命之源、生产之要、生态之基。水闸工程作为江河湖库水系中的咽喉要道,承担着挡潮、泄洪、引水、灌溉、发电及改善水环境等多重功能,是水利工程运行管理体系中不可或缺的关键节点。长期以来,我国在水闸工程建设方面取得了举世瞩目的成就,建成了数以万计的各类水闸,极大地提升了防洪保安能力和水资源利用效率。然而,随着经济社会的快速发展和生态环境要求的不断提高,传统水闸运行管理模式逐渐暴露出诸多不适应:一是感知手段落后,大量基础数据仍依赖人工巡检和读取,存在时效性差、覆盖面窄、易出错等问题;二是控制方式粗放,多数水闸仍采用本地手动或简单的 PLC 自动控制,缺乏与上下游、左右岸的协同联动,难以应对复杂多变的洪水过程和水资源配置需求;三是决策支撑不足,缺乏对历史数据和实时数据的深度挖掘与分析,调度方案往往依赖专家经验,缺乏科学精准的量化依据。

1 智慧水利背景下水闸运行管理的现状分析与痛点识别

尽管部分先进地区已开展了水闸自动化改造试点,但整体而言,我国水闸运行管理水平参差不齐,制约智慧水利发展的瓶颈问题依然突出。

1.1 感知层:数据采集不全与传输延迟

当前,许多中小型水闸甚至部分大型水闸的感知设备配置不足,缺乏高精度水位计、流量计、视频监控、渗压计、应力应变传感器等关键监测设备。即使配备了部分设备,也往往存在品牌杂乱、协议不通、接口不一的问题,导致数据无法自动采集或采集频率低。此外,由于地处偏远或通信基础设施薄弱,数据传输常出现延迟、丢包现象,使得控制中心难以获取实时的现场工况,形成了“数据孤岛”,严重影响了监控的及时性和准确性。

1.2 控制层:自动化程度低与协同性差

在水闸控制层面,大量水闸仍停留在“就地手动”或“远程单点遥控”阶段。控制系统之间缺乏互联互通,不同部门、不同流域的水闸往往各自为政,难以形成联合调度的合力。在面对突发洪水或紧急抗旱任务时,由于缺乏统一的调度指令下发和执行反馈机制,容易出现响应滞后、操作失误等问题。同时,现有的控制系统多为封闭式架构,扩展性差,难以接入新的智能算法或适应复杂的调度场景。

1.3 决策层:数据分析浅显与辅助能力弱

现有系统多侧重于数据的简单展示和报警,缺乏对海量历史数据和实时数据的深度挖掘与关联分析。调度决策

往往依赖人工经验,缺乏基于水文模型、水动力模型及 AI 算法的科学预测与推演能力。在面对复杂的水情工情组合时,系统无法提供多套优化调度方案的比选和风险评估,导致决策缺乏科学依据,难以实现水资源效益的最大化和风险的最小化。

2 智慧水利背景下水闸信息自动化系统的总体架构与设计原则

构建高效、可靠、智能的水闸信息自动化系统,需要遵循科学的总体架构设计,明确各层级功能定位,并坚持先进的技术原则。

2.1 系统总体架构:云边端协同的立体化布局

智慧水利背景下的水闸信息自动化系统应采用“云-边-端”协同的总体架构。

端侧(感知与控制层)负责前端数据的采集与执行。部署各类高精度传感器、智能摄像头、PLC 控制器及执行机构,实现对水位、流量、闸门开度、启闭机电流电压等参数的毫秒级采集,并具备本地基础的逻辑判断与应急控制能力。

边侧(边缘计算层)部署在泵站或水闸现场的边缘计算节点。负责数据的初步清洗、过滤、压缩及实时分析,将非结构化视频数据转化为结构化特征值,并在断网情况下维持本地基本运行和应急控制,减轻云端压力,降低网络延迟。

云侧(平台与应用层)构建于水利云平台之上,负责海量数据的汇聚存储、深度挖掘、模型训练、仿真模拟及全局调度指挥。通过微服务架构,提供用户管理、数据服务、应用开发等通用能力,支撑上层各类智慧应用场景的灵活构建。

2.2 关键技术支撑:多源融合与智能驱动

系统构建需依托多项前沿技术的深度融合。物联网技术是基础,通过 NB-IoT、5G、LoRa 等通信技术,实现水闸全要素的泛在互联。大数据技术是核心,利用 Hadoop、Spark 等框架处理海量异构数据,构建统一的数据中台。人工智能技术是引擎,应用深度学习、机器学习算法进行水情预测、故障诊断和智能调度。数字孪生技术是载体,构建水闸的高精度三维模型与物理机理模型,实现虚实映射与仿真预演。这些技术共同构成了系统的技术底座,支撑起水闸运行的智能化升级。

3 水闸信息自动化系统的核心功能模块与实现路径

基于上述架构,水闸信息自动化系统应重点建设感知

监测、智能控制、仿真预演、应急指挥四大核心功能模块。

3.1 全要素智能感知与状态评估

构建全覆盖、高精度的感知网络是系统的基础。在感知层面,除常规水位、流量外,还应集成视频 AI 分析、声纹监测、地质雷达等技术,实现对闸门振动、噪声异常、结构裂缝、渗漏隐患的自动识别与预警。通过边缘计算节点,对视频流进行实时分析,自动识别漂浮物、人员入侵、违规作业等行为。在状态评估方面,系统利用长期积累的监测数据,结合结构力学模型,实时计算水闸主体结构的健康状况指数,自动生成设备健康档案和维修建议,实现从“定期检修”向“预测性维护”的转变。

3.2 自适应智能控制与协同调度

智能控制是系统的核心功能。系统应具备自适应调节能力,能够根据上游来水、下游水位、气象预报及生态需水要求,自动计算最优闸门开启方案。在防洪模式下,系统可依据实时水情,动态调整泄洪流量,确保河道安全;在供水模式下,可根据用水计划精确配水,减少浪费。更重要的是,系统应支持流域级、区域级的协同调度,打破行政壁垒,实现跨流域、跨部门的水闸群联合调度。通过建立统一的水力调度模型,系统可自动下发指令至各水闸,并实时反馈执行结果,形成“感知-决策-控制-反馈”的闭环控制回路。

3.3 数字孪生仿真预演与方案优选

引入数字孪生技术,构建水闸及其所在河段的虚拟映射体。在虚拟空间中,系统可加载真实的水文、地形、工程参数,进行高精度的水动力模拟。管理者可在系统中进行“沙盘推演”,模拟不同降雨情景、不同调度方案下的洪水演进过程、淹没范围及工程安全风险。系统能自动对比多种方案的优劣,生成包含时间、水量、风险等级等维度的综合评估报告,辅助决策者选择最佳调度方案。这种“先试后行”的模式,极大降低了实战中的决策风险,提高了应对突发事件的能力。

3.4 多维应急指挥与智能辅助决策

针对洪涝干旱等突发事件,系统应构建智能化的应急指挥平台。平台整合气象、水文、灾情、物资、队伍等多源信息,通过知识图谱技术,自动匹配应急预案,生成处置流程。在应急响应过程中,系统可实时跟踪险情发展态势,动态调整救援力量部署,并通过移动终端将指令直达一线作业人员。同时,利用大数据分析历史类似案例,为指挥员提供决策参考,实现从“经验指挥”向“数据指挥”的跨越。

4 典型案例分析与实施成效评估

以某大型流域骨干水闸群智能化改造项目为例,该项目覆盖了流域内 10 座大型水闸,构建了集感知、控制、调度、管理于一体的综合自动化系统。

4.1 项目概况与建设内容

该项目在原有自动化基础上,全面升级了感知设备,新增了高清视频 AI 分析、无人机巡检系统及分布式光纤传感网络。构建了基于云原生架构的水闸云平台,实现了 10 座水闸数据的集中管理与统一调度。引入了数字孪生引擎,建立了流域水动力模型,支持洪水演进仿真。同时,开发了移动端 APP,实现了管理人员随时随地掌握水闸状态和接收预警信息。

4.2 运行成效与价值体现

系统投运以来,取得了显著成效。一是响应速度大幅提升。洪水预警提前量由原来的 6 小时延长至 24 小时以上,闸门自动开启响应时间缩短至秒级,有效抢占了防洪抢险先机。二是调度效率显著提高。通过联合调度,流域防洪标准提升至百年一遇,且未发生一次因调度不当导致的漫堤事故。三是运维成本明显下降。预测性维护减少了设备故障率,无人值守模式使单站运维人员减少了 80%,年节约运维费用数百万元。四是生态效益持续增强。系统实现了生态流量的精准管控,保障了下游河道不断流,促进了水生生物栖息地的恢复。该案例充分证明了智慧水利背景下水闸信息自动化系统建设的必要性与可行性。

4.3 经验总结与推广启示

该项目的成功表明,水闸自动化系统建设必须坚持“统筹规划、分步实施、急用先行”的原则。一是要重视数据标准的统一,确保不同厂家设备的互联互通;二是要强化网络安全防护,构建纵深防御体系;三是要注重人才培养,提升运维人员的数字化技能。这些经验对于其他地区的同类项目建设具有重要的借鉴意义。

5 结语

智慧水利背景下水闸信息自动化系统的构建,是一场深刻的技术革命与管理变革。它通过物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术的深度融合,彻底改变了传统水闸“人海战术”“经验决策”的粗放模式,推动了水闸管理向“精准感知、智能控制、科学决策、协同联动”的现代化方向迈进。本文系统阐述了水闸信息自动化系统的构建理论与技术路径,分析了其在感知监测、智能控制、仿真预演及应急指挥等方面的核心功能,并结合典型案例验证了其显著的应用成效。

然而,当前水闸自动化系统建设仍面临诸多挑战:一是数据标准化程度不高,不同系统间的数据壁垒依然存在;二是模型精度有待提升,复杂水动力模型的实时求解能力仍需加强;三是网络安全风险加大,随着系统联网程度的提高,遭受网络攻击的可能性增加;四是复合型人才短缺,既懂水利业务又精通信息技术的专业人才匮乏。

未来,应进一步加强顶层设计,完善水闸自动化系统的数据标准与技术规范,推动跨部门、跨区域的数据共享与业务协同。加大对核心算法、高性能计算、网络安全等关键技术的研发投入,突破技术瓶颈。同时,建立健全人才培养机制,打造一支高素质的人才队伍。只有坚持技术创新与管理创新双轮驱动,才能真正建成“感知敏锐、控制精准、决策科学、反应迅速”的智慧水闸体系,为保障国家水安全、推进生态文明建设贡献更大的力量。

参考文献:

- [1] 杨晓波,黄莹华.浅析智能技术于水利水电自动化中的应用策略[J].水上安全,2023(11):56-58.
- [2] 胡明宇.U形渠道流量智能测控一体化装置研究[D].西北农林科技大学,2023. DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2023.003676.
- [3] 马晓鹏.水利水电工程闸门启闭机设计选型方法分析[J].现代制造技术与装备,2023,59(02):110-112. DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2023.0072.
- [4] 王荆,金锦,梅峰等.全国水闸工程基础信息数据库设计与实现[J].水利信息化,2022(06):38-42. DOI:10.19364/j.1674-9405.2022.06.007.
- [5] 杨宇新,李文明.调节池工程智慧化运行方法研究[J].北京水务,2022(06):49-54. DOI:10.19671/j.1673-4637.2022.06.010.