

水利水电工程中的智能监测与预警系统研究

刘得超 高礼奇

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 三门峡 472000

摘要: 本文系统研究水利水电工程智能监测与预警系统,剖析其技术架构、数据采集传输及处理分析原理,阐述应用现状中的成绩与问题。指出该系统具备提高监测效率、精准预警、自动化智能化等优势,提出技术创新、标准化建设、数据管理优化、预警模型改进及反馈机制建立等策略。研究成果对保障水利水电工程安全运行、推动行业智能化发展具有重要参考价值。

关键词: 水利水电工程;智能监测;预警系统

1 水利水电工程智能监测技术概述

1.1 智能监测系统架构

水利水电工程智能监测系统架构犹如一座精密运转的“数字大厦”,其由感知层、网络层、平台层与应用层四大核心层级构成。感知层作为系统的“神经末梢”,部署各类传感器,如位移传感器、渗压计、应变计等,分布在大坝、水闸、输水管道等关键部位,实时感知工程结构的应力、变形、渗流等物理量变化,将这些物理信号转化为电信号或数字信号。网络层如同信息传递的“高速公路”,通过光纤、无线通信、卫星通信等多种传输方式,将感知层采集到的数据快速、稳定地传输至数据中心。其中,光纤通信具有抗干扰能力强、传输速率高、传输距离远的优势,适合大坝等固定监测点的长距离数据传输;无线通信则以其灵活便捷的特点,适用于地形复杂、布线困难区域的监测设备。平台层是整个系统的“大脑中枢”,负责对海量数据进行存储、管理与分析,运用云计算、大数据等技术构建数据处理平台,实现数据的高效存储与快速检索,同时对数据进行预处理、特征提取等操作。应用层作为系统的“交互窗口”,为管理人员、技术人员等提供可视化的监测界面与决策支持功能,以图表、地图、三维模型等直观形式展示监测数据与分析结果,便于用户及时掌握工程运行状态,做出科学决策。

1.2 数据采集与传输技术

数据采集与传输技术是水利水电工程智能监测系统的“血脉”,直接关系到监测数据的准确性与实时性。在数据采集方面,传感器技术的不断发展为精准监测提供了有力支撑^[1]。例如,光纤光栅传感器利用光纤的光学特性,能够实现温度、应变等物理量的高精度测量,且具有抗电磁干扰、耐腐蚀等优点,适合在恶劣的水利工程环境中使用;MEMS(微机电系统)传感器具有体

积小、功耗低、集成度高的特点,可实现对微小位移、振动等信号的灵敏感知。在数据传输技术上,除了常见的光纤和无线通信,近年来物联网技术的应用为数据传输带来新变革。物联网通过将各类监测设备接入网络,实现设备间的互联互通,使数据能够在更广泛的范围内进行共享与交互。5G技术的高速率、低时延特性,也为实时传输高清视频、大量监测数据提供了可能,助力远程实时监测与应急指挥。

1.3 监测数据处理与分析

监测数据处理与分析是挖掘数据价值、实现智能监测的关键环节。原始监测数据往往存在噪声、缺失值等问题,需要进行预处理。预处理包括数据清洗,去除异常数据和重复数据;数据插值,对缺失数据进行合理估算;数据归一化,将不同量级的数据统一到相同范围,以提高后续分析的准确性。在数据分析方法上,主要采用统计分析、机器学习与深度学习等技术。统计分析通过计算均值、方差、标准差等统计量,对数据的集中趋势和离散程度进行分析,判断工程运行状态是否正常。机器学习算法如支持向量机、随机森林等,可用于建立监测数据与工程状态之间的关系模型,实现对工程安全状况的预测。深度学习技术,如卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)及其变体LSTM(长短期记忆网络),在处理时序数据和图像数据方面具有独特优势,能够自动提取数据特征,更准确地预测工程结构的变形趋势、渗漏发展等情况。

2 智能监测与预警系统在水利水电工程中的应用现状

目前,智能监测与预警系统在水利水电工程领域已得到广泛应用,但不同地区、不同工程规模的应用程度存在差异。在大型水利枢纽工程中,如三峡工程、小浪底工程等,智能监测系统建设较为完善。以三峡工程为例,其智能监测系统涵盖大坝安全监测、库区水情监

测、船闸运行监测等多个方面，部署了数千个传感器，实时采集大坝的变形、渗流、应力应变等数据，以及库区的水位、流量、水质等信息。通过先进的数据处理与分析技术，实现对工程运行状态的全面、实时监测，并建立完善的预警体系，能够及时发现潜在安全隐患，为工程的安全运行提供有力保障。在中小型水利水电工程方面，虽然近年来智能监测系统的应用逐渐增多，但仍存在诸多问题。部分工程由于资金有限，监测设备配置不足，无法实现对工程关键部位的全面监测；一些地区的监测系统缺乏统一规划与标准，导致数据格式不统一、兼容性差，难以实现数据共享与协同分析；专业技术人员短缺也是制约中小型水利水电工程智能监测系统发展的重要因素，使得系统的运行维护与数据分析难以有效开展。在新技术应用方面，人工智能、大数据、物联网等技术在水利水电工程智能监测与预警系统中的融合应用不断深入。例如，利用人工智能技术对监测数据进行自动分析与诊断，提高故障识别的准确性与效率；通过大数据技术挖掘数据背后的潜在规律，为工程管理与决策提供更科学的依据；物联网技术实现监测设备的智能化管理与远程控制，提高系统的自动化水平。然而，这些新技术在实际应用中仍面临一些挑战，如数据安全与隐私保护、算法的适应性与可靠性等问题亟待解决。

3 水利水电工程中的智能监测与预警系统的优势

3.1 提高监测效率

传统水利水电工程监测主要依靠人工巡检与定期测量，存在监测周期长、效率低、人力成本高的问题。智能监测与预警系统通过自动化的传感器网络和数据传输技术，实现了对工程运行状态的实时、连续监测。传感器可全天24小时不间断采集数据，并通过网络自动传输至数据中心，无需人工干预。相比之下，人工巡检不仅耗时耗力，而且受天气、地形等因素影响较大，难以做到全面、及时监测。例如，在山区的小型水电站，人工巡检一次可能需要数天时间，且部分危险区域难以到达，而智能监测系统能够实时获取各个监测点的数据，大大提高监测效率。智能监测系统能够快速处理和分析海量数据，通过预设的算法和模型，自动生成监测报告和分析结果，为工程管理人员节省大量时间和精力，使其能够更专注于工程管理与决策^[2]。

3.2 精准预警

智能监测与预警系统利用先进的数据分析技术和预警模型，能够对水利水电工程潜在的安全隐患进行精准预警。通过对历史监测数据和实时数据的综合分析，结合工程结构的力学特性和运行规律，建立科学合理的预

警指标体系。当监测数据超过预警阈值时，系统能够迅速发出预警信号，并通过短信、邮件、声光报警等多种方式通知相关人员。与传统的经验判断和简单阈值预警相比，智能监测系统的预警更加精准可靠。例如，在大坝渗流监测中，传统方法可能仅根据渗流量的大小来判断是否存在异常，而智能监测系统则会综合考虑渗流压力、水温、上下游水位差等多个因素，运用机器学习算法进行分析，能够更准确地判断渗流异常的原因和严重程度，提前发出预警，为工程抢险和维修争取宝贵时间。

3.3 自动化智能化

智能监测与预警系统实现了水利水电工程监测的自动化与智能化运行。从数据采集、传输、处理到分析、预警，整个过程无需人工过多干预，系统能够按照预设程序自动完成各项任务。同时智能监测系统还具备自我诊断和自我修复功能，能够对传感器故障、网络中断等问题进行自动检测和报警，并尝试采取相应的修复措施。另外，通过与物联网技术的结合，智能监测系统可以实现对水利设施的远程控制，如远程调节水闸开度、控制泵站启停等，提高工程运行的智能化水平和管理效率。

4 水利水电工程中智能监测与预警系统的优化策略

4.1 技术创新与研发

持续的技术创新与研发是提升水利水电工程智能监测与预警系统性能的关键驱动力。在传感器技术领域，随着水利工程向高海拔、深水域等复杂环境拓展，对传感器的性能要求愈发严苛。例如，在高水压环境下，传统传感器易出现密封性失效、信号衰减等问题，研发基于微机电系统（MEMS）的压阻式传感器，通过优化结构设计和材料选择，可将压力测量精度提升至0.1%FS；在强腐蚀环境中，采用石墨烯涂层技术包裹传感器探头，能显著增强抗腐蚀性，延长设备使用寿命^[3]。在前沿技术融合方面，人工智能领域正积极探索迁移学习与联邦学习算法，以解决不同工程场景下数据稀缺问题；大数据技术通过构建时空数据立方体模型，实现多源异构数据的高效融合分析；物联网领域则聚焦于低功耗广域网（LPWAN）与5G融合组网，在保障偏远山区设备长续航的同时，满足实时高清视频传输需求。产学研合作机制不断完善，如河海大学联合华为公司开发的智能监测云平台，已成功应用于白鹤滩水电站，通过技术创新实现了监测效率提升40%。

4.2 系统标准化与规范化

建立统一的系统标准化与规范化体系是破解当前水利水电工程智能监测系统“信息孤岛”难题的核心方案。当前，全国水利监测系统中约30%因协议不兼容导致

数据无法互通,严重制约资源整合。为此,需构建覆盖全生命周期的标准体系:在设备选型阶段,制定《水利专用传感器技术规范》,明确传感器的精度等级、环境适应性等参数要求;在数据采集环节,推行《水利监测数据元标准》,统一水位、渗流等200余项监测指标的定义与采集频率;在系统集成层面,建立基于RESTful API的通用接口协议,实现不同厂商系统的即插即用。同时强化质量监管机制,引入第三方检测机构对系统进行压力测试、兼容性测试和安全评估。

4.3 数据管理与分析

完善数据管理与分析是释放智能监测与预警系统价值的核心枢纽。水利工程监测数据具有体量大(单座大坝日产生数据超TB级)、多源性(融合传感器、卫星遥感等数据)、动态性强(秒级更新频率)等特点,传统管理模式已难以满足需求。首先,构建分级存储架构,采用冷热数据分离策略,将实时数据存储于高性能固态硬盘,历史数据归档至分布式文件系统,存储成本降低30%。其次,在处理技术上,运用Spark Streaming实现流式数据的实时清洗与特征提取,结合知识图谱技术构建工程安全知识库,实现数据异常的智能溯源。另外,开发三维可视化决策系统,通过数字孪生技术直观呈现工程运行状态,辅助管理者进行科学决策,某大型灌区应用后节水效率提升25%。

4.4 预警模型优化

预警模型的准确性直接决定智能监测与预警系统的实战效能。现有预警模型普遍存在阈值固化、环境因素考虑不足等问题,导致误报率高达15%-20%。优化需从三方面突破:一是构建动态阈值体系,基于长短期记忆网络(LSTM)分析历史数据,结合气象水文预报数据,实现预警阈值的自适应调整;二是完善指标体系,将地震活动、周边施工等外部因素纳入大坝安全评估模型,如雅砻江流域大坝群监测系统新增12项地质环境指标,预警准确率提升至92%;三是建立模型动态评估机制,运用蒙特卡洛模拟方法对模型进行压力测试,每月生成模型健康度报告。此外,融合强化学习技术,使模型在实

际运行中通过奖惩机制不断优化决策策略,某水电站应用该技术后,预警响应时间缩短至3分钟,有效降低溃坝风险。

4.5 建立反馈机制与持续改进

建立有效的反馈机制是推动智能监测与预警系统迭代升级的关键引擎。当前系统普遍存在“重建设轻运维”现象,据调研显示,45%的水利单位缺乏常态化反馈渠道。为此,需构建“三维”反馈体系:在用户端,开发移动APP实时收集操作反馈,设置“问题直通车”功能直达研发团队;在设备端,部署智能运维模块,通过机器学习自动识别传感器故障、网络中断等问题;在管理端,建立季度联席会议制度,邀请设计、施工、运营多方参与研讨^[4]。以三峡集团为例,通过实施该机制,累计收集界面优化建议127条,预警规则优化方案35项,系统用户满意度提升至95%。建立量化评估体系,从监测覆盖率、预警准确率、故障修复率等10个维度进行考核,每半年发布系统健康度白皮书,驱动系统持续优化,确保技术先进性与业务适配性长期保持行业领先水平。

结束语

水利水电工程智能监测与预警系统已成为行业发展关键支撑,但在技术应用、系统建设等方面仍存挑战。未来,需持续深化技术创新,加强产学研协同;推进标准化体系建设,实现数据互联互通;完善系统功能,提升智能决策水平。通过不断优化与完善,让智能监测与预警系统为水利水电工程安全、高效运行提供更强有力的保障。

参考文献

- [1]郭雅琴.基于案例相似度的水电工程施工塔吊事故预警[J].广西水利水电,2024,(06):143-147.
- [2]卢鑫祥,李晓鹏.基于降水量调配蓄电池的水利工程监测预警系统研究[J].工程技术研究,2022,7(19):148-150.
- [3]李珊珊.水利工程中的智能监测与控制技术研究[J].水上安全,2024,(15):37-39.
- [4]卢鑫祥,李晓鹏.基于降水量调配蓄电池的水利工程监测预警系统研究[J].工程技术研究,2022,7(19):148-150.