水库信息化设备在线安全监测系统研究与设计

陈文进 陆华 宋小燕 夏春菊
贵阳筑水水利产业发展有限公司 贵州 贵阳 550081

摘 要 随着水利工程高质量发展，传统水库安全监测依赖人工巡查与简单仪器测量，存在数据时效性差、准确性低等问题，难以满足大坝智能化监测需求。本文设计一套集数据采集、传输、分析、预警于一体的水库信息化设备在线安全监测系统，采用感知层、网络层、平台层、应用层的分层架构，为水库安全运行提供技术支撑，助力水利工程现代化建设。

关键词 水库信息化设备；在线安全监测系统；研究设计

Research and Design of an Online Safety Monitoring System for Reservoir Informatization Equipment

Chen Wen-jin, Lu Hua, Song Xiao-yan, Xia Chun-ju
Guiyang Zhushui Water Conservancy Industry Development Co., Ltd., Guiyang 550081, Guizhou Province, China

Abstract With the high-quality development of water conservancy projects, traditional reservoir safety monitoring—reliant on manual inspection and simple instrumentation—suffers from poor data timeliness and low accuracy, making it unable to meet the demands of intelligent dam monitoring. This paper proposes an online safety monitoring system for reservoir informatization equipment that integrates data acquisition, transmission, analysis, and early warning. Adopting a layered architecture of perception, network, platform, and application layers, the system provides technical support for safe reservoir operation and facilitates the modernization of water conservancy projects.

Key words Reservoir Informatization Equipment; Online Safety Monitoring System; Research and Design

随着我国水利工程进入高质量发展新阶段，水库大坝的智能化监测与长效运维已成为水利工程发展的重心之一。传统水库安全监测主要依赖人工巡察与简单仪器测量，存在数据时效性差、准确性低、无法远程监控等问题，难以解析水库大坝复杂的变化特征。近年来，物联网、云计算、大数据、人工智能等信息化技术的迅猛发展，为构建全方位、动态自动化的水库安全监测系统提供了技术支持。本文旨在研究设计一套集数据采集、传输、分析、预警于一体的水库信息化设备在线安全监测系统，实现对水库运行状态的实时感知、智能分析与精准预警，为提升水库安全管理水平提供技术支撑。

1 系统总体架构设计

水库信息化设备在线安全监测系统采用分层架构设计，由感知层、网络层、平台层和应用层组成，形成闭环控制的有机整体（见表1所示）。

表1 系统总体架构组成与功能

层级	组成要素	主要功能
感知层	水位传感器、雨量计、位移监测设备、渗流渗压监测仪器、视频监控等	实时采集水库雨水情和大坝安全数据
网络层	物联网、北斗卫星通信、5G/4G网络	传输采集数据，确保通信可靠
平台层	云计算平台、大数据中心、数字孪生平台	数据存储、处理、分析和建模
应用层	安全监测、预警预报、应急处置、可视化展示	业务应用和决策支持

1.1 感知层

感知层是系统的基础，由各类智能传感器和监测设备构成，负责实时采集水库各项运行参数。主要包括：①水位计、雨量计等雨水情监测设备；②GNSS位移监测设备、渗流渗压监测仪器等大坝安全监测设备；③视频监控设备用于实时查看水库现场情况。通过这些传感设备，系统能够实现对水库全方位实施动态自动化监测[1]。

1.2 网络层

网络层承担数据的可靠传输任务。针对不同场景的通信需求，系统采用多模式融合的通信方案：在通信信号覆盖良好的

区域，采用5G/4G网络传输数据；在偏远山区或通信信号弱区域，则利用北斗卫星通信技术进行数据传输。这种混合通信模式确保了数据传输的实时性与可靠性，解决了传统监测系统中常见的通信盲区问题。

1.3 平台层

平台层是系统的“大脑”，基于云计算和大数据技术构建，负责数据的存储、处理与分析。平台层集成数字孪生技术，通过BIM和GIS技术建立高精度三维仿真模型，构建多物理场耦合的数值模型库。此外，平台层整合机器学习和人工智能算法，建立预报—预警—预演—预案全链条专业模型，为上层应用提供智能分析支撑[2]。

1.4 应用层

应用层面向最终用户，提供一系列业务应用功能，包括安全监测、预警预报、应急处置、可视化展示等。应用层基于微服务架构构建，实现了系统的模块化与可扩展性，用户可根据需求灵活配置功能模块。通过Web端和移动端应用，管理人员可随时随地掌握水库运行状态，接收预警信息，并做出快速决策[3]。

2 关键硬件设备与技术

2.1 智能传感设备

智能传感设备是系统前端感知的核心，其选型与布设直接影响数据质量。水位监测方面，采用压力式水位计、超声波水位计等，精度可达 ± 0.5 cm；雨量监测采用翻斗式雨量计，分辨率达0.2 mm；大坝安全监测则包括测斜仪、渗压计、应变计等，用于监测大坝变形、渗流、应力等参数。为适应复杂环境，这些传感器具备防水、防雷、抗干扰等特性，确保长期稳定运行。

2.2 通信网络技术

系统采用天地一体化通信网络，融合北斗卫星通信、5G/4G移动通信等多种技术。对于普通区域，采用5G/4G网络传输，具有带宽高、成本低的优势；对于通信盲区或应急情况，则采用北斗卫星通信，确保关键数据不丢失。遥测终端（RTU）负责汇集传感器数据，通过自组织网络技术将数据传输至中心站，即使在极端条件下也能保障通信畅通。

2.3 北斗/GNSS技术

北斗/GNSS技术在大坝表面位移监测中发挥重要作用。通过在水库大坝关键部位布设北斗/GNSS监测站，实时监测大坝毫米级的位移变化。与传统的全站仪测量相比，北斗/GNSS技术具有全天候、自动化、精度高等优势，能够及时发现大坝异常变形，为安全预警提供数据支持。

3 软件平台与智能分析

3.1 数字孪生平台

数字孪生平台是系统的核心，通过虚拟建模与数值仿真技术，构建与物理水库对应的虚拟模型。平台基于BIM+GIS技术，建立高精度三维仿真模型，实现水库场景的可视化展示。同时，平台集成多物理场耦合数值模型库，包括渗流场、应力场、温度场等，通过实时数据驱动，实现对水库运行状态的精准映射与动态模拟。

3.2 大数据与AI分析

系统利用大数据分析和人工智能技术，对海量监测数据进行深度挖掘与分析。基于机器学习算法，结合全天候长时间序列监测数据，建立预测模型，实现对大坝变形的准确预测。研究表明，改进的ICA-PSO-CNN模型（独立主成分分析和粒子群优化下的卷积神经网络）比传统CNN模型具有更好的拟合效果和预测精度。此外，系统还采用知识图谱技术，构建水电站异常事件智能应急处置系统，实现异常事件的智能匹配和可视化应急处置流程建议，平均响应时间在1.0 s以内，异常识别准确率达92.5%。

3.3 微服务架构

为解决传统单体应用架构在业务扩展和系统升级时面临的瓶颈问题，系统采用微服务架构设计。将整体系统拆分为数据采集服务、分析计算服务、预警服务、可视化服务等多个独立的微服务，每个服务可独立开发、部署和扩展。这种架构大幅提高了系统的灵活性、可维护性和可扩展性，适应水利工程安全监管的复杂需求变化。

4 典型应用案例与效果分析

水库安全度汛是我国防汛工作的重点与难点，尤其是中小型水库因监测设施缺乏、手段落后，成为当前防洪体系中的薄弱环节。多数水库建于二十世纪六七十年代，属“三边工程”，普遍存在防洪标准低、工程质量差、库容萎缩、老化严重等问题，处于带病运行状态，安全隐患突出[4]。

4.1 小型水库雨水情测报与安全监测

山东省依托物联网、大数据与人工智能等技术，构建了具备预报、预警、预演、预案功能的小型水库安全运行管理系统，实现雨水工情自动测报与信息综合展示，提升管理规范化与智能化水平。琼海市也为70座中小型水库部署了基于物联网、北斗与智能传感的水雨情自动测报系统，有效解决了人工观测数据时效与精度不足的问题。

4.2 大坝安全监测与变形预测

在某混凝土双曲拱坝监测中，应用了ICA-PSO-CNN模型进行变形预测。该模型通过独立主成分分析提取特征、粒子群算法优化网络参数，形成高精度预测模型。实践表明，其拟合与预测效果显著优于传统ICA-CNN及CNN模型。

4.3 水库库容精准监测

针对传统库容测量效率低、成本高、安全性差的问题，洛宁县渡洋河大石涧水源工程采用基于HiMAX技术的高精度传感器监测方法，实现对库容的精准量测，为工程运行与安全管理提供关键数据支持。

4.4 安全监测平台与一体化交付技术

为应对水库面临的新型风险，研究人员设计了基于一体化交付技术的水库安全监测平台。该平台兼容现有监测站点，实现采集软件无缝部署与数据安全平台建设，推动从“监控、防护”到“预警、运维、决策”的一体化管理，提升网络安全与综合运维效率。

5 水库信息化设备在线安全监测系统设计优化策略

5.1 夯实感知层基础，提升监测数据精准度

为实现水库信息化设备在线安装检测系统设计的优化，在今后的发展中应该进一步夯实感知层基础，真正意义上提升检测数据的精准度。在具体的设备选型上，应该摒弃“一刀切”模式的局限性，结合水库不同区域的实际检测需求差异等情况对设备进行选择。具体而言，针对大坝坝体所产生的位移等方面的检测，应该选择全球导航卫星系统（GNSS）接收机与光纤光栅传感器组合，这样就能够实现静态位移和动态数据的同时捕捉，自然也就实现了信息获取质量的提升；而对于水文参数等方面的检测，则可以借助雷达水位计等设备来完成检测，避免检测数据出现误差等问题。

5.2 优化数据传输网络，保障信息传输稳定性

数据传输同样也是水库信息化设备在线安全监测系统有效运行的关键，因此，在今后应该对整个数据传输网络进行优化。具体而言，针对传统单一化传输模式，应该构建“主备冗余、多网融合”的传输网络架构，同时还可以结合实际情况引入卫星通信作为整个信息传输的备用通道等，这样即使在极端天气条件下，也能够保证信息数据的高质量传输。在保证信息传输质量的基础上，还应该提升信息传输的安全性，实施全流程加密处理，对数据进行端到端的加密，在数据包头还应该嵌入动态密钥，通常情况下每隔10 min更新一次密钥信息，防止数据被截获。当数据传输过程中出现网络波动问题时，系统还能够自动触发断点续传功能，避免数据传输。

5.3 升级数据处理平台，强化智能分析能力

在系统设计优化中，应充分发挥数据处理平台的“大脑”作用，提升其数据分析能力，以确保安全预警的准确性。为此，需构建多源数据融合模型，整合传感器、视频监控及历史数据库等多维数据，实现对坝体稳定性的综合评估，避免因单一参数监测导致的误判。同时，引入人工智能与大数据技术，逐步增强系统的智能分析与预测能力，建立故障诊断专家系统，整合领域监测数据并预设解决方案，实现异常数据与故障模式的自动匹配及原因识别，从而将设备故障处理时间缩短至1 h以内。此外，应完善数据存储架构，采用“边缘计算+云端存储”模式，将关键数据上传至云端处理，以减轻网络传输负荷。

6 结束语

本文研究设计了基于信息化技术的水库在线安全监测系统，集成了智能传感、多元通信、数字孪生和人工智能分析等先进技术，实现了对水库运行状态的实时感知、动态模拟和智能预警[5]。系统应用表明，其在提升水库安全监测水平、增强风险预警能力、优化运行管理效率等方面具有显著优势。

未来，随着物联网、人工智能等技术的发展，还应持续推动系统的迭代更新，构建更加智能、主动的安全监测体系，为水库安全运行保驾护航，助力水利工程现代化建设。

参考文献

[1]董家领,彭强,吴裴煜,等.水库大坝安全研判系统的设计与实现[J].水利信息化,2025(1):60-64.

[2]赵文利.河口村水库安全监测自动化系统升级改造设计[J].河南水利与南水北调,2024,53(9):56-57.

[3]唐文超,姜旭民,宋清林.基于在线监测数据的水库围坝渗流安全分析[J].山东水利,2024(8):10-12.

[4]陈荣.水库大坝自动化监测系统应用研究[J].科技创新与生产力,2024,45(7):119-122.

[5]李文涛,张建民,赵静.基于物联网与数字孪生的水库大坝智能监测系统设计[J].水利水电科技进展,2023,43(4):89-94.

（本文编辑 曹 阳）

