

智能监测系统在水利工程设计中的集成与应用

马凤玲

杭州水利水电勘测设计院有限公司 新疆 伊宁 835000

摘要: 随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的迅猛发展,传统水利工程建设正加速向“智慧水利”转型。智能监测系统作为智慧水利体系的核心组成部分,在提升水利工程安全性、运行效率及全生命周期管理水平方面展现出巨大潜力。本文系统阐述了智能监测系统的基本构成、关键技术及其在水利工程设计阶段的深度集成路径,并分析其在大坝安全、河道水文、泵站调度及防洪预警等场景中的应用。研究指出,将智能监测理念前置至设计阶段,可实现“感知—分析—决策—反馈”闭环机制的早期嵌入,从而优化结构选型、材料配置与运维策略。最后,本文探讨了当前面临的挑战,并对未来发展趋势进行了展望,旨在为推动水利工程高质量、智能化发展提供理论支撑与实践参考。

关键词: 智能监测; 水利工程; 系统集成; 数字孪生; BIM; 安全预警; 智慧水利

引言

水利工程是国家基础设施的重要支柱,承担着防洪减灾、水资源调配、农业灌溉、水力发电及生态修复等多重功能。然而,传统水利工程在设计、施工与运维过程中长期面临信息孤岛、响应滞后、人工依赖度高等问题,难以应对极端气候频发、工程老化加剧及复杂运行环境带来的新挑战。近年来,以传感器网络、边缘计算、云计算和人工智能为代表的智能技术迅速发展,为水利工程的数字化、网络化、智能化升级提供了技术基础。智能监测系统(Intelligent Monitoring System, IMS)通过部署高精度、多类型传感器,实时采集工程结构、水文气象、地质环境等多维数据,并借助数据融合、模型仿真与智能算法进行状态评估与风险预警,已成为保障水利工程安全高效运行的关键手段。值得注意的是,当前多数智能监测系统仍以“后装式”为主,即在工程建成后加装监测设备,存在布设受限、成本高昂、与主体结构协同性差等问题。因此,将智能监测系统从“附加模块”转变为“内生要素”,在水利工程设计阶段即进行系统性集成,具有重要的理论价值与工程意义。

1 智能监测系统的基本构成与关键技术

1.1 系统架构

智能监测系统通常采用“端—边—云”三层架构:

(1) 感知层(端): 由各类传感器(如渗压计、应变计、GNSS位移站、水位计、雨量计、视频监控、声发射传感器等)组成,负责采集物理世界的物理数据。(2) 边缘层(边): 部署于现场的数据采集单元(DAU)、边缘网关或小型服务器,具备初步的数据清洗、压缩、本地存储与简单预警功能,可降低云端负载并提升响应速

度。(3) 平台层(云): 基于云计算平台构建的数据中心,集成数据库、分析引擎、可视化界面及决策支持模块,支持多源异构数据融合、模型训练与远程访问。此外,系统还需配套通信网络(如4G/5G、LoRa、NB-IoT、光纤等)与供电系统(太阳能+蓄电池组合常见于偏远地区),确保数据传输的可靠性与连续性。

1.2 关键技术

(1) 多源异构数据融合技术: 水利工程涉及结构力学、水文学、岩土工程、气象学等多个学科,监测数据类型多样(数值型、图像、视频、文本等)。通过时空对齐、特征提取与权重分配算法(如卡尔曼滤波、D-S证据理论、深度学习融合模型),可实现多源数据的有效整合,提升状态识别的准确性^[1]。(2) 数字孪生(Digital Twin)技术: 数字孪生通过构建物理工程的虚拟映射,实现“虚实互动”。在设计阶段建立高保真BIM(建筑信息模型)或FEM(有限元模型),并将实时监测数据动态注入模型,可进行结构响应仿真、灾害情景推演与运维策略优化。(3) 人工智能与机器学习: 利用LSTM、GRU等时序模型预测水位、渗流趋势;采用卷积神经网络(CNN)分析裂缝图像;通过异常检测算法(如Isolation Forest、AutoEncoder)识别潜在险情。AI模型可随数据积累不断迭代优化,形成自适应预警能力。(4) 低功耗广域网(LPWAN)通信技术: 针对水利工程分布广、地形复杂的特点,LoRa、NB-IoT等LPWAN技术以其低功耗、远距离、强穿透能力,成为野外监测节点的理想通信方案。

2 智能监测系统在水利工程设计中的集成路径

2.1 需求分析与监测目标设定

将智能监测系统有效集成于水利工程设计之中，首先需在项目立项与可行性研究阶段开展深入的需求分析。这一过程不应由设计单位单方面完成，而应联合监测技术专家、运行管理单位乃至应急管理部门共同参与，明确工程在整个生命周期中最关键的风险点与管理需求。例如，对于一座高混凝土面板堆石坝，其核心关注点在于坝体的整体稳定性、面板的完整性以及基础渗流控制，因此监测目标应聚焦于变形、应力、渗压及地震响应等参数；而对于城市排涝泵站，则更关注设备运行效率、集水井水位变化及突发堵塞风险；堤防工程则需重点防范沉降不均、管涌渗透和岸坡滑塌等隐患^[2]。在此基础上，监测目标的设定必须遵循必要性、代表性和经济性的原则，既要覆盖关键风险区域，又要避免因过度布点造成资源浪费，确保系统建设投入与预期效益相匹配。

2.2 监测点位与传感器选型的协同设计

传统水利工程设计往往忽视了监测设备的安装空间与接口预留，导致后期加装困难、成本高昂甚至影响结构安全。因此，在结构设计阶段即应将传感器布设纳入整体考虑。设计师需与监测工程师紧密协作，在混凝土浇筑前预埋光纤光栅（FBG）传感器以实现长期应变监测，在坝基帷幕灌浆带合理布置渗压计阵列以捕捉渗流路径变化，在闸门启闭机附近设置振动与温度传感器以评估机械健康状态。这些细节不仅体现在施工图纸上，更需在三维模型中标注精确坐标与安装工艺要求。同时，传感器的选型必须充分考虑工程所处的环境条件——如高湿度、强腐蚀性水质、电磁干扰或极端温差——选择具备相应防护等级（如IP68）和抗干扰能力的设备，并确保其通信协议与后续系统兼容，从而保障长期稳定运行。

2.3 BIM与监测系统的深度融合

建筑信息模型（BIM）技术为智能监测系统的集成提供了理想的三维空间载体。在设计阶段构建的BIM模型不仅是几何表达，更可承载丰富的工程属性信息。通过将传感器的型号、量程、安装位置、校准周期、通信方式等元数据嵌入BIM构件中，可实现监测系统的可视化规划与精细化管理。施工阶段，该模型可指导工人精准定位预埋件与线缆通道；运维阶段，则成为设备台账管理、故障定位与影响范围分析的数字底座。更重要的是，BIM模型可作为数字孪生体系的核心组成部分，与实时监测数据动态联动^[3]。当某处渗压异常时，系统不仅能在平面图上标红，还能在三维模型中高亮显示相关区域，并自动调取该部位的设计参数与历史数据，辅助

技术人员快速研判原因。这种深度融合使得监测系统不再是孤立的数据采集工具，而是贯穿工程全生命周期的智能管理平台。

2.4 数据标准与接口协议的统一

为避免未来系统形成“信息烟囱”，在设计初期就必须确立统一的数据标准与通信规范。不同厂商的传感器往往采用私有协议，若未提前约定接口格式，将导致数据难以整合、平台扩展受限。因此，建议在项目设计说明书中明确规定采用行业通用的数据格式（如JSON或XML）、通信协议（如MQTT或Modbus TCP）以及API接口规范。尤其应优先采纳水利行业已发布的标准，如《SL 766-2018 水利工程安全监测数据通信规约》，确保系统具备良好的互操作性与可扩展性。此外，还应规划数据分级分类策略，明确哪些数据用于实时预警、哪些用于长期分析、哪些需加密传输，从而在保障安全的前提下最大化数据价值。

3 典型应用场景与分析

3.1 大坝安全智能监测

在高坝大库工程中，智能监测系统主要用于实时感知坝体结构的力学响应与渗流状态。通过布设位移、应变、渗压及温度等多类型传感器，系统可连续追踪坝体变形趋势、面板开裂风险及基础渗漏路径。结合数字孪生模型，还能模拟极端工况下的结构行为，实现从“事后处置”向“事前预判”的转变，显著提升大坝全生命周期的安全裕度与调度灵活性。

3.2 河道水文与防洪预警

针对河流堤防与城市内涝防控，智能监测系统构建覆盖水位、雨量、流量及岸坡稳定的立体感知网络。利用雷达或超声波水位计配合视频AI识别技术，可自动判别水位超警、堤防滑坡或人员涉险等事件；结合气象预报与流域产汇流模型，系统能提前生成分级预警信息，为应急疏散、物资调配和闸泵联调提供科学依据，有效增强区域防洪韧性。

3.3 泵站与闸群智能调度

在水资源调配工程中，智能监测系统聚焦于机电设备运行状态与输水效率的精细化管理。通过对水泵振动、轴承温度、电流电压及管道压力等参数的实时采集与分析，系统可评估设备健康状况，识别气蚀、磨损或效率衰减等亚健康状态。进一步融合来水预测与电价信号，可自动生成最优启停组合与转速调节策略，在保障供水安全的同时降低能耗，推动泵站运行从经验驱动迈向数据驱动。

4 面临的挑战与对策

4.1 技术层面

在技术层面,部分传感器在长期潮湿、高盐或强电磁干扰环境下易出现漂移或失效,影响数据可靠性;野值、缺失值等数据质量问题也制约了智能模型的精度。对此,应优先选用工业级高稳定性器件,建立定期校准与自诊断机制,并引入先进的数据清洗与冗余校验算法。同时,由于不同水利工程的地质、水文条件差异显著,通用预警模型往往泛化能力不足,需结合迁移学习、小样本学习等技术,提升模型在特定场景下的适应性。

4.2 管理层面

在管理层面,跨专业协同不足是主要障碍。结构设计师、水文专家、自动化工程师与IT人员之间存在明显的知识壁垒与沟通障碍,容易导致监测需求与设计方案脱节。解决之道在于推行基于全专业BIM的协同设计平台,并在项目组织架构中设立“智能监测专项负责人”岗位,统筹技术路线与接口协调^[4]。此外,智能监测系统初期投资较高,而其带来的安全效益与运维节约难以在短期内量化,影响决策者投入意愿。因此,应将监测系统建设费用明确纳入工程概算,并探索政府与社会资本合作(PPP)等创新投融资模式。

4.3 标准与安全

在标准与安全方面,当前市场上传感器与平台厂商众多,通信协议与数据格式不统一,严重阻碍系统互联互通。亟需加快制定《水利工程智能监测系统设计导则》等行业标准,推动接口开放与生态共建。同时,随着系统远程接入与云平台应用的普及,网络安全风险不容忽视。必须部署多层次防护措施,包括防火墙、数据加密、身份认证与访问控制,并严格遵守《网络安全法》及相关等级保护要求,确保关键水利设施的数据安全与运行可控。

5 未来发展趋势

展望未来,智能监测系统将朝着更高阶的“主动感知”方向演进。系统不再仅被动接收数据,而是能根据天气预报、调度指令等外部信息,自主调整监测频率、

触发无人机巡检或启动局部诊断流程,实现资源的动态优化配置。数字孪生技术将进一步成为水利工程全生命周期管理的核心平台,BIM、GIS、IoT与AI的深度融合将构建出一个“所见即所得”的虚拟工程操作系统,支持从设计仿真、施工监控到运维决策的全流程闭环管理。边缘智能与5G技术的普及将极大提升系统实时性。5G的超高可靠低时延通信(URLLC)特性可支持毫秒级控制指令下发,使远程闸门调控、应急泵启停等操作成为可能;而集成AI芯片的边缘设备则能在本地完成复杂推理,减少对云端依赖,提升系统在断网等极端情况下的生存能力。此外,绿色低碳理念也将融入监测系统设计,自供能传感器(如利用水流振动、温差或太阳能发电)、低功耗芯片与环保封装材料的应用,将助力水利工程实现“双碳”目标,迈向可持续发展。

6 结语

智能监测系统已不再是水利工程的“附属品”,而是决定其安全性、韧性与智能化水平的关键基础设施。本文研究表明,将智能监测理念前置至设计阶段,通过需求导向、协同设计、BIM融合与标准统一,可显著提升系统效能与工程全生命周期价值。未来,随着技术持续迭代与体制机制完善,智能监测将深度融入水利工程的“基因”,推动水利行业迈向“感知无处不在、决策科学精准、响应快速高效”的智慧新时代。

参考文献

- [1]刘军.水利工程中的智能监测与控制技术研究[N].经济导报,2025-09-22(003).
- [2]燕宝红.智能传感技术在水利工程结构物监测中的应用[J].工程技术研究,2025,10(12):46-48.
- [3]张文豪.智能监测系统在水利工程安全管理中的应用研究[J].河南水利与南水北调,2025,54(04):84-85.
- [4]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.