

水利工程中安全监测自动化系统的应用研究

陆秋月 吕志槟

北京中水科工程集团有限公司 北京 100038

摘要:为解决传统水利工程监测模式的固有缺陷,提升工程安全管控水平,本文围绕安全监测自动化系统展开研究。首先明确系统核心构成包括感知层、传输层、处理层与应用层;进而剖析各层级关键技术,涵盖高精度传感、多模式通信、数据融合分析等核心要点;最后结合大坝、堤防、水闸工程,阐述系统在结构状态、渗流、运行参数等方面的具体应用。研究表明,自动化监测系统可实现水利工程全维度、实时化安全监测,有效提升监测效率与数据可靠性,为工程安全决策提供有力支撑。

关键词:水利工程;安全监测;自动化系统;关键技术;具体应用

引言:水利工程是保障民生安全与区域发展的核心基础设施,其运行安全直接关系公共利益。传统监测模式以人工为主,存在效率低、覆盖窄、数据滞后等局限,难以适配现代水利工程精细化管理需求。安全监测自动化系统凭借实时性、精准性优势,成为提升工程安全管控能力的关键支撑。

1 水利工程安全监测的核心需求与传统监测模式局限

1.1 水利工程安全监测的核心需求

水利工程作为关乎民生安全与区域发展的关键基础设施,其安全监测的核心需求集中于实时性、全面性与精准性。实时性需求源于水利工程运行环境的动态变化,需及时捕捉结构状态与周边环境的异常波动,为应急处置提供时间支撑。全面性需求要求监测覆盖工程主体结构、附属设施及周边水文地质环境等关键维度,形成完整的安全监测体系,避免因监测盲区导致安全隐患遗漏。精准性需求则是保障监测数据有效应用的基础,需通过科学的监测手段获取真实可靠的数据,为工程安全评估与运行决策提供准确依据,同时满足工程全生命周期内长期监测的连续性要求,实现对工程老化、病害发展过程的动态追踪。

1.2 传统水利工程安全监测模式的局限

传统水利工程安全监测模式以人工监测为主,存在诸多难以规避的局限。在监测效率方面,人工监测依赖人力完成数据采集、记录与传输,难以实现全天候、高频次监测,无法及时响应工程运行中的突发安全状况。在监测范围与覆盖面方面,受人力与成本限制,传统模式难以实现对工程全域的全面监测,易形成监测盲区,无法完整反映工程整体安全状态。在数据质量方面,人工操作易引入主观误差,且数据记录与传输过程中可能出现遗漏、失真等问题,影响监测数据的可靠性与可用

性。传统模式的数据处理多依赖事后人工整理分析,无法实现数据的实时处理与反馈,导致安全预警滞后,难以满足现代水利工程精细化安全管理的需求^[1]。

2 水利工程安全监测自动化系统的核心构成

该系统核心构成可分为感知层、传输层、处理层与应用层四大模块,各模块协同实现监测全流程自动化。感知层作为数据采集终端,集成各类传感器与数据采集设备,负责捕捉工程结构及环境的相关监测指标。传输层承担数据传输功能,通过有线或无线通信技术,将感知层采集的原始数据稳定传输至处理层。处理层是系统数据处理核心,配备数据存储、解析与校准设备,完成对原始数据的筛选、校验与标准化处理。应用层面向用户需求,提供数据展示、查询、分析及预警等功能,为工程安全管理决策提供支撑^[2]。

3 水利工程安全监测自动化系统的关键技术

3.1 感知层核心感知技术

感知层是水利工程安全监测自动化系统数据采集的基础,核心技术直接决定监测数据原始质量与覆盖范围,主要涵盖以下四大核心方向。(1)高精度传感技术,核心是提升监测精度与环境适应性,实现位移、应变、渗压等核心指标精准捕捉。技术要点包括传感元件微型化设计,减少对工程结构力学特性干扰;优化抗干扰技术,降低湿度、电磁等环境因素对信号的影响;强化长期稳定性设计,通过材料选型与结构优化保障设备长期服役性能。(2)数据采集与同步技术,聚焦多源数据高效采集与时间同步。技术要点包含多通道并行采集技术,提升异构传感器信号采集效率;采集频率自适应调节技术,平衡数据完整性与冗余度;高精度时间同步技术,依托卫星授时或时钟同步协议,实现全域监测点数据时间戳统一,为数据融合提供基准。(3)感知数据

预处理技术，核心目标是提升原始数据可靠性。技术要点包括信号滤波去噪、基于阈值与逻辑规则的异常数据识别剔除，以及异构数据格式标准化转换，为后续传输与处理奠定基础。（4）低功耗运行技术，适配野外监测点供电困境，保障系统持续运行。技术要点涵盖低功耗传感元件选型、休眠-唤醒能耗控制机制设计，以及太阳能等清洁能源集成的自主供电技术。

3.2 传输层数据通信技术

传输层承担数据从感知层到处理层的传输任务，核心技术需保障数据实时性、稳定性与安全性，适配水利工程大范围、复杂地形场景，主要包括以下技术方向。

（1）多模式通信组网技术。核心是构建全域无缝传输网络。技术要点包括LoRa、NB-IoT、5G等无线通信技术互补集成，光纤、以太网等有线通信技术在核心区域的优化应用，以及无线-有线协同的混合组网与智能切换机制，提升网络覆盖完整性与抗干扰能力。（2）数据传输优化技术。针对性解决复杂环境下延迟与丢包问题。技术要点包含无损/有损数据压缩、基于链路质量的自适应传输速率调节，以及断点续传技术，同时通过传输优先级划分保障核心监测数据优先传输。（3）通信安全防护技术。技术要点包括传输数据加密处理、设备身份认证与访问控制，以及基于校验码的数据完整性验证，确保通信双方合法性与数据可靠性。（4）网络状态监测与自愈技术，实现对通信网络运行状态的实时监控与故障自动修复。要点包括网络节点状态监测，实时采集通信设备的信号强度、传输速率、功耗等指标；故障诊断技术，通过数据分析识别网络故障类型与位置。

3.3 处理层数据处理与分析技术

处理层是数据价值转化核心，关键技术要实现海量数据高效处理、深度分析与精准评估，为安全预警与决策提供支撑，主要包括以下技术。（1）数据存储与管理技术，核心是实现海量数据安全存储、高效检索与长期管理。技术要点包括分布式存储提升容量与访问效率，时序数据库优化监测数据存储与查询性能，本地与异地容灾备份保障数据安全，以及分级化数据生命周期管理提升存储资源利用率。（2）数据融合分析技术，解决多源异构数据整合与价值挖掘问题。技术要点包括多源数据校准消除系统误差，加权平均、卡尔曼滤波等算法实现数据融合提升可靠性，核心特征参数提取，以及基于聚类分析的异常模式识别，为隐患排查提供方向。（3）安全状态评估与预测技术，要点包括多维度安全评估指标体系构建，结合力学理论与机器学习的动态评估模型搭建，时间序列分析、神经网络等算法的趋势预测应

用，以及基于运行状态与环境的预警阈值动态优化，提升预警准确性^[3]。

4 安全监测自动化系统在水利工程中的具体应用

4.1 在大坝工程中的具体应用

大坝作为水利工程核心枢纽，安全监测自动化系统的应用覆盖坝体、坝基及周边环境全关键区域，形成全方位监测体系，核心应用方向包括以下方面：（1）坝体结构状态监测。系统针对坝体混凝土、土石等不同结构类型，实现多维度结构参数的自动化采集与监测。核心应用包括坝体位移监测，通过布设高精度位移传感器，实时捕捉坝体水平位移、垂直沉降及挠度变化，覆盖坝顶、坝肩、坝体上下游面等关键部位；坝体应变监测，通过分布式应变传感网络，监测坝体在水压力、温度变化等工况下的应变分布与发展趋势，及时识别结构应力集中区域；坝体裂缝监测，采用裂缝宽度监测传感器与图像采集设备联动，实现裂缝开度、延伸长度的自动化监测，精准捕捉裂缝发展动态。（2）坝基渗流监测。聚焦坝基渗透稳定，实现渗流相关参数的连续自动化监测。应用要点包括渗压监测，在坝基防渗体、透水层等关键部位布设渗压传感器，实时监测渗流压力变化，判断防渗体系完整性；渗流量监测，通过自动化量水设备，精准采集坝基排水孔、渗沟等出口的渗流量数据，掌握渗流总量变化趋势；渗透水水质监测，集成水质传感器，实时监测渗透水的电导率、浊度等指标，间接判断坝基是否存在管涌、流土等渗透破坏风险。（3）周边环境的影响监测。覆盖大坝周边地形、水文及气象等环境要素，为坝体安全评估提供辅助依据。应用要点包括库区水位监测，通过水位传感器实时采集库区水位数据，结合坝体监测数据联动分析；岸坡稳定监测，在大坝上下游岸坡布设位移、倾角传感器，监测岸坡变形动态，防范岸坡滑坡对大坝安全的影响；气象参数监测，集成风速、雨量、气温等气象传感器，实时采集气象数据，为极端天气下大坝安全预警提供支撑。

4.2 在堤防工程中的具体应用

堤防工程作为防洪重要屏障，安全监测自动化系统重点针对堤防渗漏、变形及结构完整性开展监测，适配堤防线路长、地形复杂的特点，核心应用方向包括以下。（1）堤防渗漏监测。针对堤防渗漏隐患隐蔽性强的特点，构建多手段协同的渗漏监测体系。应用要点包括堤身渗压监测，在堤身、堤脚及堤后戕台等关键部位布设渗压传感器，实时监测渗流压力分布，识别渗漏异常区域；堤后地下水位监测，通过堤后地下水观测井传感器，监测地下水位抬升情况，判断堤防渗漏程度；渗漏

通道定位监测,采用分布式光纤传感技术或电磁感应监测技术,实现对堤身渗漏通道的精准定位,为渗漏隐患处置提供靶向依据。(2)堤身变形监测。覆盖堤身整体与局部变形,及时发现堤身失稳风险。应用要点包括堤身沉降监测,在堤顶布设沉降传感器,定期监测堤身垂直沉降量,分析沉降均匀性,防范不均匀沉降导致堤身开裂;堤身水平位移监测,通过布设拉线式、GPS等位移传感器,监测堤身在水平方向的位移变化,掌握堤身整体滑动趋势;堤坡坡度监测,采用倾角传感器实时监测堤坡坡度变化,及时发现堤坡坍塌前兆。(3)堤身结构状态监测:聚焦堤防关键构筑物及堤身材料状态,保障堤防结构完整性。应用要点包括堤身压实度监测,通过预埋传感器或无损检测技术集成,实时监测堤身填土压实度变化,评估堤身材料稳定性;护坡结构监测,在堤防护坡部位布设振动、位移传感器,监测护坡块石、混凝土板等的松动、脱落情况;穿堤建筑物监测,针对涵闸、管道等穿堤构筑物,监测其与堤身结合部位的渗压、位移及应变变化,防范结合部位渗漏与结构破坏。

4.3 在水闸工程中的具体应用

水闸作为水资源调控与防洪排涝的关键设施,安全监测自动化系统重点监测闸室结构、闸门运行及地基基础状态,核心应用方向包括以下。(1)闸室结构状态监测。覆盖闸室混凝土结构及连接部位,保障闸室承载稳定性。应用要点包括闸室位移监测,在闸墩、闸底板等关键部位布设位移传感器,实时监测闸室在水压力作用下的水平位移与垂直沉降;闸室应变监测,通过应变传感器监测闸室混凝土的应力应变分布,识别应力集中区域,防范混凝土开裂;闸室裂缝监测,针对闸室易开裂部位,布设裂缝监测传感器,实时捕捉裂缝发展动态。

(2)闸门运行状态监测。聚焦闸门启闭过程与运行稳定

性,保障闸门操作安全。应用要点包括闸门开度监测,通过编码器、位移传感器等设备,实时精准采集闸门开度数据,实现闸门运行的闭环控制;闸门启闭力监测,在闸门启闭设备上布设力传感器,监测启闭过程中的拉力、压力变化,判断闸门是否存在卡阻等异常情况;闸门振动监测,在闸门叶体、门槽等部位布设振动传感器,监测闸门在水流作用下的振动幅值与频率,防范共振导致结构损坏。(3)地基基础监测。针对水闸地基承载力与渗透稳定,开展常态化监测。应用要点包括地基沉降监测,在闸室基础及上下游翼墙基础布设沉降传感器,监测地基沉降变化,评估地基变形稳定性;地基渗压监测,在地基透水层、防渗帷幕前后布设渗压传感器,实时监测渗流压力变化,判断防渗帷幕效果;渗流量监测,通过自动化量测设备,监测闸基排水系统的渗流量数据,掌握地基渗流变化趋势^[4]。

结束语:安全监测自动化系统在水利工程中的应用,突破了传统监测模式的束缚,构建了全流程、精细化的安全监测体系。本文通过对系统构成、关键技术及典型应用的研究,明晰了自动化监测技术的应用逻辑与核心价值。未来要进一步强化技术融合创新,提升系统在复杂环境下的适应性与智能化水平。

参考文献

- [1]王振华.水利工程中安全监测自动化系统的应用研究[J].智能城市,2021,7(22):165-166.
- [2]汤红兵.自动化监测系统在水库大坝安全监测中的应用研究[J].中国高新科技,2025(20):99-101.
- [3]刘子轩.汛期水利工程监测系统的智能化管理与应用研究[J].数字农业与智能农机,2025(2):62-64.
- [4]孙燕飞.水库大坝安全监测中自动化监测系统运用研究[J].水上安全,2025(17):150-152.