

物联网监测技术在基层水利工程防汛预警中的应用探析

李蕾蕾

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘要: 本文在梳理基层水利工程防汛预警特殊需求的基础上,系统分析了物联网监测体系的技术架构,包括感知层、网络层、平台层与应用层的功能定位与协同关系,探讨了水位雨量监测、大坝安全监测、泄洪设施工况监测及视频智能分析等核心应用场景。针对基层应用面临的建设成本、供电保障、通信条件、运维能力等现实约束,提出了适合基层特点的技术选型与部署策略,包括低功耗广域网技术应用、边缘计算节点部署、多源数据融合预警模型构建及分级预警响应机制设计。

关键词: 物联网监测; 基层水利工程; 防汛预警; 传感器网络; 边缘计算

引言

我国水旱灾害频发,近十万座水库中95%以上为建于20世纪50—70年代的小型水库,工程老化严重,成为防汛体系中最薄弱环节。极端天气频发背景下,中小河流洪水、山洪和溃坝风险加剧,而传统人工巡查、水位尺观测等预警方式存在盲区多、信息滞后、覆盖不足等问题,难以满足应急响应时效要求。物联网技术凭借自动采集、实时传输与智能分析能力,为提升基层防汛预警水平提供了新路径。但基层工程普遍地处偏远,面临供电难、通信弱、运维缺人等现实约束,亟需低成本、低功耗、高可靠、易维护的适配方案。本文立足基层实际,系统探讨物联网监测技术在水情、雨情、工情感知中的适用性、架构设计、典型应用场景及实施策略,旨在为提升基层水利工程防汛预警能力提供理论支撑与技术参考。

1 基层水利工程防汛预警的现状与需求

1.1 基层水利工程的基本特征

基层水利工程具有“点多、面广、标准低、基础弱”特征。以安阳市小南海水库为例,该库建于1958年,为粘土斜墙堆石坝,总库容1.075亿立方米,承担洹河上游防洪。因建设早,坝体渗漏、变形隐患突出,库区岩溶发育加剧渗漏。工程地处偏远,公网通信弱,管理局需兼顾两座水库,人力紧张。区域内水库众多,水文资料匮乏,防洪评估不准。这些特点决定了其防汛预警需采用低成本、低功耗、高可靠、易部署的专用技术路径。

1.2 现行预警模式的局限性

当前基层预警仍以人工巡查和简易观测为主,存在明显短板:一是监测频率低、不连续,难以捕捉突发险情,尤其在夜间或恶劣天气下;二是信息上报依赖逐级

电话传递,易延误、误报或关键信息丢失;三是预警阈值设置简单,通常仅有溢洪或坝顶两级,缺乏分级响应机制;四是缺少对闸门状态、渗流压力、泄洪通道等工情参数的实时感知,调度多凭经验,难以科学决策。这些问题在极端暴雨事件中极易导致预警滞后,错失抢险时机。

1.3 对物联网监测的核心需求

为破解上述困境,基层防汛亟需物联网技术支持:一是实现降雨量、水位、渗压、位移、闸门开度等全要素自动连续感知;二是确保数据分钟级上传,支撑快速预警;三是设备须具备超低功耗与太阳能等自供电能力,适应无市电环境,实现长期无人值守;四是平台应具备智能分析功能,融合多源数据,自动识别异常,按风险等级生成并精准推送预警信息至责任人,提升“早发现、早预警、早处置”能力。

2 物联网监测技术架构与系统组成

2.1 总体技术架构

面向基层水利工程防汛预警的物联网监测体系,宜采用“端-边-管-云”四层架构。感知层(端)由各类传感器、智能采集终端及执行器组成,负责原始数据的采集与初步处理。边缘层(边)部署于监测现场或靠近现场的位置,承担数据汇聚、协议转换、实时分析与预警触发等功能,能够在网络中断时独立运行。网络层(管)依托蜂窝移动通信、低功耗广域网、北斗短报文等传输手段,将数据安全可靠地传送至上层平台^[1]。平台层(云)部署在县级水利部门或云服务中心,提供数据存储、融合分析、模型计算、可视化展示及预警发布等核心服务。该架构的核心优势在于边缘计算节点的引入,有效解决了基层工程通信不稳定对系统可靠性的影响。

2.2 感知层:关键传感器选型与布设

感知层是监测体系的基石。根据基层水利工程防汛预警的实际需求,重点配置以下传感器类型。水雨情监测方面,采用压力式水位计或雷达水位计测量水库水位、河道水位,配合翻斗式雨量计或称重式雨量计获取降雨强度与累计雨量。大坝安全监测方面,选用振弦式渗压计测量坝体浸润线及坝基扬压力,采用阵列式位移计或GNSS表面位移监测站获取坝体表面变形。泄洪设施监测方面,在闸门启闭机上加装闸门开度传感器,在溢洪道关键断面设置流量监测设备。所有传感器的选型需优先考虑低功耗特性(静态功耗小于1毫瓦)、防护等级(不低于IP67)以及宽温工作能力(-20℃至60℃)。传感器的布设密度与位置应依据工程规模、隐患分布及水力特性确定,关键断面应设置冗余测点以提高数据可靠性。

2.3 网络层:适用通信技术比较

基层水利工程监测点的通信条件差异较大,需根据具体场景选择适宜的技术组合。对于具有4G/5G公网覆盖的区域,采用蜂窝物联网模组(NB-IoT或Cat.1)是性价比最高的选择,其功耗低、覆盖广、资费低廉,能够满足水位、雨量等中低频数据的传输需求。对于公网信号薄弱或无覆盖的偏远站点,可采用LoRa、Sigfox等低功耗广域网技术组建局域自组网,通过中继节点将数据汇聚至有公网信号的网关节点后统一上传^[2]。对于完全没有地面通信条件的站点(如深山峡谷中的小型水库),则需部署北斗短报文通信终端,虽然传输速率低、单次报文容量小,但可保障极端情况下的应急数据上报。建议采取“主备双链路”设计,以公网或LPWAN为主通道,北斗为应急备份通道。

2.4 平台层:数据融合与预警决策

平台层是监测体系的中枢。在县级水利部门建设统一的基层水利工程防汛预警平台,汇聚辖区内所有物联网监测站点的数据。平台应具备以下核心功能模块。数据接入与质量管理模块,负责解析不同厂家、不同协议的传感器数据,执行异常值检测与缺失数据插补。多源数据融合分析模块,将水位、雨量、渗压等时序数据与气象预报、雷达回波等外部数据进行关联分析,识别险情前兆模式。预警规则引擎模块,支持分级阈值的灵活配置,当监测值超过预设阈值时自动生成预警事件,并结合GIS地图展示风险分布。信息发布与应急联动模块,按照预警级别自动匹配责任人及通知方式(短信、语音电话、APP推送等),实现预警信息的“一键直达”。平台应采用微服务架构,支持弹性扩展与远程升级维护。

3 核心应用场景与技术实现

3.1 水库水位与雨量实时监测预警

物联网监测方案包括:在库区适当地点安装一体化水位雨量站,设备集成雷达水位计、翻斗雨量计、太阳能供电系统及无线通信模块,实现全自动运行。水位数据按小时采集,降雨时自动加密至分钟级采集。预警规则采用双阈值设计:当水位达到汛限水位时,发布蓝色关注预警,提示管理人员加强巡查;达到设计洪水位时,发布橙色警戒预警,启动应急预案;达到校核洪水位时,发布红色紧急预警,立即组织下游人员转移。同时,将实时水位与降雨量进行关联计算,基于单位线汇流模型动态预测水位上涨趋势,实现超前预警。

3.2 小型水库大坝安全监测

小型水库大坝的安全隐患主要表现为渗流异常、变形加剧及结构老化。物联网监测可在大坝关键断面布设渗压计和位移计。渗压测点应沿坝轴线布置在最大坝高处及穿坝建筑物两侧,每一横断面不少于三个测点(上游坝脚、坝体中部、下游坝脚)。位移监测可采用GNSS自动化监测方案,在坝顶及上下游坝坡布设监测点,基准点设置在两岸稳定基岩上。平台软件实时绘制浸润线过程线及位移时程曲线,与历史数据和设计限值进行对比^[3]。当渗压值或位移速率出现持续上升或超阈值时,系统自动报警。对于已出现渗漏迹象的坝体,可增设流量监测堰,实时测量渗漏水量,量化评估安全风险。

3.3 泄洪设施运行工况监测

泄洪设施能否正常运行直接关系到水库调蓄能力。物联网监测的对象包括:闸门启闭状态、启闭机电源及控制系统状态、溢洪道及泄洪洞畅通性。在闸门启闭机上安装接触式或非接触式开度传感器,实时上传闸门开度值,并在平台端与控制指令进行比对校验,防止误操作。在启闭机供电线路加装电量监测模块,监测电压、电流及断电报警。溢洪道进口及泄洪洞入口安装视频监控与水位传感器,判断是否存在堵塞或壅水。此外,可在泄槽末端安装流量监测设备(如雷达流量计),推求泄洪流量,为洪水调度提供实时反馈。所有工况数据同步推送至防汛值班室和移动终端,管理人员可远程确认泄洪设施状态。

3.4 视频监控与智能图像分析

视频监控是人工巡查的有效补充,但在基层应用中长期受限于供电与传输带宽。近年来,低功耗智能摄像头的发展为解决这一难题提供了可能。这类摄像头采用PIR红外唤醒技术,平时处于休眠状态,仅当监测到运动目标(如水位上涨、人员闯入、漂浮物堵塞)或收到远程唤醒指令时才启动录像与传输,单次触发功耗仅需0.5至1瓦时。摄像头内置边缘AI芯片,可运行轻量化目标检

测模型,实现溢洪道堵塞识别、水面异常漂浮物检测、坝体表面裂缝识别等智能分析功能。分析结果以告警图片或短视频的形式上传至平台,大幅节省了传输流量与存储空间^[4]。在缺乏光纤和稳定4G信号的地区,可采用4GCat.1或北斗短报文进行缩略图传输。

4 基层应用的关键问题与优化策略

4.1 供电保障与低功耗设计

供电问题是基层水利工程物联网建设面临的首要挑战。多数监测站点不具备市电接入条件,须采用太阳能独立供电系统。系统容量设计需综合考虑当地日照资源、设备总功耗及连续阴雨天数保障要求。以典型的一体化水位雨量站为例,设备日均功耗约0.5瓦时(按1小时采集一次计算),搭配20瓦光伏板和12安时蓄电池,即可满足全年不间断运行。对于功耗较高的GNSS位移监测站(日均功耗约5瓦时),需配置60瓦以上光伏板和30安时以上蓄电池。优化策略包括:采用超低功耗MCU与传感器,延长采集间隔(汛期加密、非汛期稀疏),利用深度休眠模式降低待机功耗,以及部署超级电容作为缓冲储能。

4.2 恶劣环境下的通信可靠性

基层水利工程往往地处山区河谷,气象条件复杂,通信易受暴雨、雷电、山体滑坡等因素干扰。提升通信可靠性的策略包括:一是站点选址时优先选择有公网信号的区域布设传感器,将数据采集与通信模块分离,采集端安装在监测点,通信端安装在信号最优位置,通过有线连接。二是在同一流域或同一乡镇的多个站点间组建Mesh自组网,任一站点都可作为其他站点的中继,提高网络抗毁性。三是配置通信状态自动监测与恢复机制,当检测到链路断开时,本地存储未发送数据,待通信恢复后自动补传。四是对于国家级重点小型水库,应强制配置北斗短报文作为备用通信链路,确保极端条件下至少能上报水位和雨量两个关键参数。

4.3 低成本与易维护的平衡

基层水利工程数量庞大,但地方财政投入有限,传感器单价和运维成本是制约大规模部署的瓶颈。需要在

性能、成本与可维护性之间寻求平衡。低成本策略包括:优先部署水位、雨量两类核心传感器,大坝位移和渗压可根据风险评估结果按需布设;采用NB-IoT公网通信替代专网,降低通信模块与资费成本;选用标准化、模块化的传感器产品,便于更换维修;推行“共享基站”模式,将多个监测功能集成于一个一体化杆塔,减少土建与立杆费用。在运维方面,建立“县级运维中心+乡镇管护员”的两级运维体系,县级负责平台运维与数据分析,乡镇管护员负责现场巡检与简单故障处理。开发远程诊断工具,平台端可实时查看各站点在线状态、电池电压、信号强度等健康指标,实现主动式运维。

5 结语

物联网监测技术推动基层水利工程防汛预警由“被动应对”迈向“主动感知、智能预警”。本文立足基层实际,构建了以“实用、可靠、经济”为原则的适应性技术架构,明确感知层、网络层、平台层与边缘层的功能分工,提出水位雨量、大坝安全、泄洪设施及视频智能分析等核心场景的实施路径,并针对供电、通信、成本与预警精度等瓶颈给出优化策略。强调应优先实现水位、雨量全覆盖,再逐步拓展至安全监测与智能分析,同时配套匹配基层能力的运维机制,避免“建而不用”。未来,随着5G RedCap、北斗三代和边缘AI等技术成熟与成本下降,物联网有望实现基层工程全覆盖,打通防汛预警“最后一公里”。后续研究可聚焦中小流域实时洪水预报模型优化、多源数据融合的险情识别算法及面向基层的智能预警人机交互设计。

参考文献

- [1]王浩,严登华,贾仰文.基于物联网的水利监测预警技术研究进展[J].水利学报,2020,51(5):523-534.
- [2]张建云,刘九夫,王金星.中小型水库防洪预警技术现状与发展趋势[J].水科学进展,2021,32(4):604-615.
- [3]唐瑞,陈树果,马建光.基于LoRa与边缘计算的基层水利监测预警系统设计[J].人民长江,2022,53(6):216-222.
- [4]许小华,黄萍,雷声.NB-IoT技术在小型水库水雨情监测中的应用研究[J].中国农村水利水电,2021(8):102-107.