

基于物联网的水环境智能监测系统设计与实践

刘 梅

南阳市生态环境局镇平分局 河南 南阳 474250

摘 要：水环境监测是水资源保护和水污染防治的重要基础工作，传统的人工采样和实验室分析方式存在时效性差、覆盖面窄和人力成本高等不足。本文基于物联网技术，设计并实现了一套水环境智能监测系统。系统采用分层架构设计，涵盖感知层、网络层、平台层和应用层四个层次，通过部署多参数水质传感器实现对水温、溶解氧、酸碱度和浊度等关键指标的实时采集与远程传输。结合边缘计算和云端数据分析技术，系统能够自动识别水质异常变化并及时发出预警信息。工程实践表明，该系统运行稳定可靠，监测数据准确度高，有效提升了水环境监管的信息化水平和应急响应能力。

关键词：物联网；水环境监测；智能预警；传感器；边缘计算

引言

随着我国生态文明建设的持续推进和水污染防治攻坚战的深入推进，水环境监测工作面临着更高的数据时效性和空间覆盖度要求。传统的固定监测站虽然监测精度较高，但建设成本高昂且覆盖范围有限，难以满足面广量大的监测需求。近年来，物联网技术的快速发展和传感器成本的持续降低，为构建大规模、低成本、高时效的水环境智能监测网络提供了技术支撑。本文基于物联网技术设计了一套水环境智能监测系统，通过传感器节点实时采集水质数据并经无线网络传输至云平台进行智能分析，实现对水环境质量的全方位动态监控和及时预警。该监测系统已在多个重点流域得到应用验证，有效支撑了水环境管理的精细化决策需求。

1 系统总体架构设计

1.1 感知层设计

感知层是整个监测系统的基础，负责水质参数的采集与初步处理。本系统选用多参数水质传感器，可同时监测水温、溶解氧、酸碱度、浊度、电导率和氨氮浓度等六项关键指标。传感器节点采用低功耗微控制器进行数据采集和本地缓存，支持定时采集和事件触发两种工作模式。传感器节点采用不锈钢外壳封装，防护等级达到六十八级，可适应各种恶劣的户外部署环境。节点内置温度补偿模块，有效消除环境温度变化对测量精度的影响。每个传感器节点配置独立的编号和定位信息，便于运维管理。传感器的日常校准采用标准溶液两点校准法，每季度进行一次现场校验，每年返厂进行一次全面标定。校准数据自动记录在设备管理系统中，当传感器测量偏差超过允许范围时系统会自动发出维护提醒。在传感器选型方面，溶解氧传感器采用荧光法测量原理，

相较于传统的极谱法具有维护频率低和抗干扰能力强的优势。

1.2 网络层设计

网络层承担传感器节点与云平台之间的数据传输任务。针对野外部署环境，本系统采用窄带物联网作为主要通信方式，具有覆盖范围广、穿透能力强和终端功耗低的显著优势。在信号覆盖薄弱区域，可选用LoRa自组网方式将数据汇聚至网关节点后再转发至云端。窄带物联网的通信距离在城市环境中可达数千米，在空旷的农村和野外地区覆盖范围更广。系统采用自适应数据上报策略，在水质正常状态下每小时上报一次数据，在异常状态下自动切换为高频采集模式，每五分钟上报一次。通信模块采用工业级窄带物联网芯片，内置网络协议栈和加密算法，支持固件空中升级功能。网关设备配置了双通信链路冗余设计，主链路采用窄带物联网，备用链路采用以太网，确保数据传输的高可用性^[1]。在网络通信层面还实现了数据包的端到端加密传输，采用高级加密标准算法对上报数据进行加密处理，确保监测数据在传输过程中的安全性和完整性。数据解密在云平台端完成，中间节点无法获取明文数据。

1.3 平台层设计

平台层是系统的数据处理与存储中枢，采用微服务架构搭建于云服务器之上。平台层包括数据接入服务、数据存储服务、规则引擎服务和消息推送服务等核心模块。时序数据库用于存储海量监测数据，关系型数据库用于管理设备信息和系统配置。规则引擎是平台层的核心智能组件，支持用户自定义预警规则和联动策略。当某项水质指标连续三次超过预警阈值时，系统自动向管理人员发送短信和平台通知，并生成异常事件工单进行

跟踪处置。规则配置支持在线编辑和实时生效。数据接入服务支持多种工业通信协议的解析和转换,包括消息队列遥测传输协议和超文本传输协议等,具有良好的兼容性和扩展性。

1.4 应用层设计

应用层面向不同用户群体提供多样化的功能服务。管理端支持实时数据展示、历史数据查询、统计分析和报表生成等功能;移动端提供实时告警推送和现场巡检记录功能;大屏展示端以可视化图表呈现监测区域的整体水质状况和变化趋势。大屏展示端采用地理信息系统技术,将各监测节点的数据叠加在流域电子地图上,直观展示水质参数的空间分布格局。用户可通过缩放和平移操作查看任意区域的详细监测数据,系统支持数据动画回放功能。系统还提供了标准化的数据接口服务,支持将监测数据推送至上级生态环境监测平台和水利信息化管理系统^[2]。接口采用表述性状态传递架构风格,支持分页查询、条件筛选和时间序列数据导出等功能,方便与其他业务系统进行数据对接。移动端应用支持离线数据查看功能,在无网络连接时可浏览最近一次同步的历史监测数据。巡检人员到达现场后可通过手机蓝牙与传感器节点进行近距离通信,实时读取设备状态和最新测量数据,提高现场巡检工作效率。

2 关键技术与实现方案

2.1 多源数据融合技术

水环境监测涉及多种类型传感器,数据采集频率、精度和格式各不相同。系统采用时空数据融合算法对多源数据进行清洗、对齐和插值处理,消除异常值和缺失值的影响,生成统一规格的高质量数据集供上层分析使用。数据清洗模块能够自动识别传感器漂移和噪声干扰引起的异常数据点,通过滑动窗口均值滤波和统计检验相结合的方法进行剔除。缺失数据的插值采用基于相邻站点空间相关性的克里金插值方法,保证数据集的完整性。在数据融合的具体实施中,系统建立了传感器置信度评估机制,根据传感器的校准状态、使用年限和历史偏差表现动态调整各数据源的权重系数。置信度评估结果定期更新并反馈至数据融合模块,确保融合数据质量的持续优化。该模块支持动态添加和移除传感器节点,具备良好的扩展性和兼容性。

2.2 边缘计算与本地预处理

为降低网络传输负载和云端计算压力,系统在网关节点部署了边缘计算模块。边缘节点可对原始数据进行实时校验、压缩编码和简单阈值判断,当检测到水质指标超过预设阈值时立即触发本地告警并优先上报,减

少数据传输延迟。边缘计算模块还具备本地数据缓存功能,当网络连接中断时自动将数据暂存于本地存储器中,待网络恢复后自动续传。该机制确保了监测数据的完整性,避免了因通信故障导致的数据丢失问题,显著提升了系统的可靠性。网关节点采用工业级嵌入式处理器和固态存储设备,具备较强的计算能力和数据缓存空间^[3]。边缘软件框架采用容器化部署方式,支持计算任务的灵活配置和弹性伸缩,可根据实际负载动态分配计算资源。边缘计算框架还集成了简单的异常检测算法,能够识别传感器故障引起的数据异常模式。当检测到传感器读数持续超出物理合理范围或读数突变不符合水质变化规律时,系统自动标记该数据为可疑并触发设备检修流程。

2.3 智能预警模型构建

系统基于历史监测数据建立了水质预测模型,采用长短期记忆网络算法学习水质参数的时序变化规律。模型能够提前预测未来数小时内的水质变化趋势,当预测值接近或超过预警阈值时自动发出预警信息,为应急处置争取宝贵时间。预警模型的训练数据来源于监测站点长达两年的历史监测记录,涵盖了不同季节和水文条件下的水质变化特征。模型输入层包括当前时刻和前若干时刻的多项水质参数,输出层为未来四小时内的水质预测值和置信区间。为提升预警模型的适应性,系统建立了模型在线更新机制。当实际水质变化趋势与预测结果出现较大偏差时,系统自动使用最新的监测数据对模型进行增量训练,使模型能够持续学习新的水质变化模式,保持预测精度的稳定性。预警信息的发布采用分级机制,根据水质超标程度将预警分为蓝色、黄色和红色三个等级。不同等级的预警信息推送至不同层级的管理人员,红色预警同时通知分管领导和应急响应部门,确保重大水环境事件能够得到及时处置。

2.4 设备管理与远程维护

系统建立了完善的设备全生命周期管理机制,支持设备注册、状态监控、远程配置和固件升级等功能。通过心跳包机制实时监测各节点设备的在线状态,当检测到设备离线或电量不足时自动通知运维人员进行现场处理。固件远程升级功能支持对传感器节点的测量程序进行在线更新,无需运维人员到现场操作。升级过程中采用差分传输技术减少数据传输量,并设有版本回退机制,确保升级失败时设备能恢复到原有正常工作状态^[4]。系统管理后台提供了设备运行状态的可视化监控面板,实时展示各节点设备的电池电量、信号强度、通信状态和最近一次数据上报时间等关键指标。运维人员可通过

地图模式快速定位故障设备,大幅提升了设备运维的响应效率。

3 工程实践与效果评估

3.1 部署概况

某市重点流域的水环境监测中进行了智能监测系统示范应用,共部署了三十六个水质监测节点,覆盖干流及主要支流的关键断面。监测节点采用太阳能供电方式,续航能力可满足连续阴雨天气条件下正常工作一周以上的需求。监测站点的选址综合考虑了水文条件、供电条件和通信覆盖等因素,优先布置在河流断面变化处、支流汇入口和排污口下游等水力条件敏感区域。每个站点均安装了防雷接地装置和视频监控设备,保障设备安全运行。太阳能供电系统由单晶硅太阳能板、磷酸铁锂电池组和智能充放电控制器组成,根据当地日照条件进行容量配置。系统还预留了外部市电接入接口,在连续阴雨天气超过七天时可通过便携式发电设备进行应急供电。

3.2 运行效果分析

系统连续运行六个月的统计数据表明,数据上报成功率达到百分之九十八点五,监测数据与同期人工采样实验室分析的比对误差在允许范围内。智能预警模型对水质异常事件的预测准确率达到百分之八十五以上,平均提前预警时间约为四小时。系统在实际运行中还成功捕捉到了多次暴雨径流事件导致的水质突变过程,监测曲线清晰地记录了溶解氧骤降和浊度飙升的典型污染特征。这些高分辨率的监测数据为污染溯源分析提供了有力的数据支撑。运维团队建立了定期巡检和维护制度,每月对监测设备进行一次外观检查和参数校验,每季度更换一次传感器保护膜和电解液。系统记录了完整的运维日志,便于追溯设备运行历史和排查质量问题。

3.3 应用效益评估

在实际部署过程中,还应注意传感器布设位置的合理性和代表性,确保监测数据能够真实反映水环境的整体状况。对于河流断面监测,应在断面上设置多个采样点,综合考虑水流速度、水深和河床形态等因素。同

时,系统应具备远程诊断和故障自愈能力,当个别传感器出现故障时,能够自动切换到备用传感器或通过数据插值算法弥补数据缺失,确保监测数据的连续性和完整性。与传统人工监测方式相比,智能监测系统的建设运维成本降低了约百分之四十,监测频率由每月一次提升至每小时一次,数据时效性显著增强。系统的预警功能帮助管理部门在多次水质异常事件中提前介入处置,有效减轻了污染影响范围和程度。此外,系统的可视化分析功能帮助管理部门全面掌握了流域水质的时空变化规律,为水环境功能区划调整和排污许可总量分配等管理决策提供了科学依据。

4 结语

本文设计并实现了一套基于物联网的水环境智能监测系统,通过分层架构和多源数据融合技术实现了水质参数的实时采集、远程传输和智能分析。工程实践验证了系统的可行性和实用性。系统采用的分层解耦架构设计使其具有良好的可扩展性和可维护性,新增监测站点或功能模块无需对现有系统进行大规模改造。多源数据融合和边缘计算技术的应用有效解决了海量数据处理和网络带宽受限的矛盾。未来将进一步优化预警算法的准确性和鲁棒性,拓展监测参数覆盖范围,并探索将系统与流域水环境模型相耦合,实现从单纯监测向预测预报和决策支持的功能升级,为水环境精细化管理提供更加全面的技术支撑。随着传感器技术和人工智能算法的不断进步,水环境智能监测系统将在未来发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]张伟,李明.基于物联网技术的水质在线监测系统研究[J].环境科学与技术,2022,45(3):120-126.
- [2]王芳,陈建国,刘洋.窄带物联网技术在环境监测中的应用研究[J].中国环境监测,2021,37(5):45-51.
- [3]赵鹏,孙丽华.边缘计算在水环境智能监测中的应用探索[J].水利信息化,2023,(2):33-39.
- [4]李建华,周文杰.基于深度学习的水质预测模型研究进展[J].给水排水,2022,58(8):15-22.