

传感器如何赋能水利场景？

九三学社中央科技委副主任、中国传感器与物联网产业联盟常务副理事长 郭源生

当前,全球水利治理正加速迈入“智能感知时代”,欧美等发达国家和地区通过智能传感器网络与AI模型联动,已实现主要河道“水量-水质-生态”多维度监测全覆盖,大幅提升防洪减灾与水资源调配效率。在我国,水利监测仍存在覆盖不全、多参数协同不足、极端场景适应性弱等问题。从长江经济带防洪安全到黄河流域生态保护,从乡村振兴背景下的灌区现代化改造到小流域山洪灾害防治,水利治理的复杂性与地域广泛性日益凸显。对高精度、高可靠性、低功耗、易部署的多维度传感器需求更加迫切。可以说,多维度智能传感器已成为驱动水利安全升级与水资源精准调控的关键抓手,其全场景应用与技术演进,直接关系到国家水安全战略的落地成效。

不同水利场景下的传感器类型

大流域(主干河道、大型湖泊、重点水利工程)应用

防洪安全监测组合:雷达水位计+电磁流量计+翻斗式雨量计。雷达水位计采用26GHz高频雷达,量程0~50m,分辨率±1mm,具备抗水汽、抗泥沙干扰能力,适合江河主干流、大型水库等开阔水域的水位监测。电磁流量计基于法拉第电磁感应原理,测量管径范围DN300~DN3000,精度±0.5%FS,可耐受水流速度0~10m/s,具备防腐蚀内衬(橡胶或聚四氟乙烯),可长期在含泥沙、有机物的江水中运行。翻斗式雨量计承雨口直径200mm,分辨率0.1mm,降雨强度测量范围0~4mm/min,具备防腐蚀内衬(橡胶或聚四氟乙烯),可长期在含泥沙、有机物的江水中运行。翻斗式雨量计承雨口直径200mm,分辨率0.1mm,降雨强度测量范围0~4mm/min,具备防腐蚀内衬(橡胶或聚四氟乙烯),可长期在含泥沙、有机物的江水中运行。翻斗式雨量计承雨口直径200mm,分辨率0.1mm,降雨强度测量范围0~4mm/min,具备防腐蚀内衬(橡胶或聚四氟乙烯),可长期在含泥沙、有机物的江水中运行。

结构安全监测组合:渗压传感器+应变传感器。渗压传感器测量范围0~2MPa,精度±0.1%FS,响应时间≤1s,具备自动温度补偿功能,探头采用不锈钢材质,可长期埋入坝体土壤或混凝土中,监测坝体渗流压力变化。应变传感器具备抗电磁干扰能力,可粘贴于闸门、堤防混凝土表面,监测结构受力变形。这类传感器监测组合的典型应用场景主要有小浪底大坝渗流监测、南水北调中线闸门安全监测、长江堤防变形监测。

水质安全监测组合:多参数水质仪+溶解氧传感器。多参数水质仪可同步测量COD(化学需氧量)、氨氮、浊度、pH值4项指标,响应时间≤3分钟,具备自动清洗功能。溶解氧传感器测量范围0~20mg/L,精度±0.1mg/L,采用荧光法测量,可在0°C~40°C水温下工作。这类传感器监测组合的典型应用场景主要有太湖蓝藻水华预警、长江

口中华鲟保护区水质监测、黄河入海口污染物溯源。

小流域(支流、灌区、山洪易发区、入河口)应用

灌区精准调控组合:超声波水表+电容式土壤含水率传感器。超声波水表采用时差法测量,精度±1%FS,无机械转动部件,低功耗设计,具备LoRa无线传输功能。电容式土壤含水率传感器测量范围0~100%vol,精度±2%vol,探头长度15cm,具备抗盐渍化干扰能力,数据更新频率1次/10分钟。这类传感器监测组合的典型应用场景主要有华北平原井灌区节水改造、宁夏引黄灌区精准灌溉、汉江支流农田生态灌溉。

山洪预警监测组合:压力式水位计+光学雨量传感器+边缘计算节点。压力式水位计基于陶瓷压阻式传感器,量程0~10m,分辨率±1mm,防护等级IP68,具备抗冲击能力。光学雨量传感器采用红外光散射

原理,分辨率0.1mm,降雨强度测量范围0~8mm/min,无机械部件,体积小,可安装在电线杆、山体护栏上。边缘计算节点搭载ARM Cortex-A7处理器,支持本地数据存储与边缘算法,具备4G/LoRa双模传输,功耗≤5W。这类传感器监测组合的典型应用场景主要有西南山区小流域山洪预警、福建丘陵暴雨内涝监测、浙江山区村落洪水防范。

入河水质监管组合:便携式多参数水质传感器。便携式多参数水质传感器重量≤2kg,支持测量pH、浊度、COD、氨氮4项指标,电池续航≥8小时,数据可通过蓝牙5.0同步至手机APP。模块化探头可单独更换,具备防污涂层,校准周期≥1个月。这类传感器监测组合的典型应用场景主要有长三角工业污水入河监测、农村生活污水排放监管、珠江口船舶污水排放检查。

技术创新路径与未来趋势

未来,随着跨流域数据协同、传感器自组网等技术的发展,水利传感器将持续推动水利治理向“精准化、智能化、协同化”转型,为保障国家水安全、实现水资源高效利用提供核心技术支撑。

多参数融合技术:从“单一监测”到“综合感知”的升级。

传统水利传感器多为单一参数监测,难以满足复杂水利场景的综合决策需求。多参数融合技术通过在单个传感器模块中集成多种检测元件,实现水位、流量、水质等多指标同步采集,同时通过算法消除参数间的干扰,提升数据准确性。例如,某水利科技企业研发的“水文-水质一体化传感器”,集成了雷达水位检测、电磁流量检测、荧光法溶解氧检测三种元件,体积仅为传统分开部署传感器的1/3,成本降低25%。在长江支流应用时,该传感器可同步输出水位、流量、溶解氧数据,且通过自适应算法修正了水流速度对溶解氧测量的影响。未来,多参数融合将向“微型化、低功耗”发展,例如集成10项以上水质指标的微型传感器,可部署在小型河道、农村排水沟,实现精细化水质监测。

边缘计算与AI算法嵌入:降低传输压力,提升实时决策能力。

水利监测数据量大,全部上传云端会导致传输延迟与带宽成本高。边缘计算技术通过在传感器或网关端嵌入AI算法,实现本地数据预处理、异常检测与决策判断,仅上传关键数据,降低传输压力。例如,在山洪预警场景中,边缘计算节点可本地运行“雨量-水位”预测模型,当监测到1小时降雨量超20mm且水位上涨速度超0.5m/h时,直接触发本地预警,无须等待云端指令,预警响应时间从30秒缩短至5秒。某山区县部署边缘计算型山洪传感器后,2024年汛期共发出本地预警12次,均准确捕捉到小规模山洪,无一次漏报。未来,边缘计算将与轻量化AI模型结合,例如在土壤含水率传感器中嵌入“灌溉需求预测模型”,根据当前墒情、未来3天天气预报,直接输出灌溉建议,无须依赖云端平台,适合偏远灌区应用。

北斗短报文与传感器深度融合:强化

极端场景下的应急监测能力。

针对洪水、地震等极端场景下的通信中断问题,北斗短报文与水利传感器的深度融合成为关键创新方向。目前,已有企业研发出“北斗一体化水位计”,将北斗短报文模块直接嵌入传感器内部,无须外接通信设备,当常规网络中断时,自动切换至北斗传输,每15分钟发送一次关键数据(含水位值、电池电量、设备状态)。在2023年黄河凌汛中,部署在流冰密集区的5台北斗一体化水位计,持续8小时通过北斗传输水位数据,为凌汛调度提供了唯一数据来源。未来,北斗集成将向“低功耗、高频率”发展,例如支持每5分钟发送一次数据(当前北斗短报文标准频率为1次/分钟,需优化功耗控制),同时扩展传输内容,除水位、雨量外,可传输坝体渗压、闸门应变等工程安全数据,进一步提升极端场景下的监测覆盖度。

未来趋势:从“监测”到“智控”,推动水利治理模式变革。

一是传感器自组网与自愈能力。未来水利传感器将具备自组网功能,当某一站点故障时,周边传感器自动接力传输数据,避免监测盲区。例如,长江干线传感器网络若某一断面传感器故障,上下游站点可通过LoRa自组网,共享数据并推算故障站点的水位、流量,保障数据连续性,自愈时间≤5分钟。

二是跨流域数据协同。通过国家水利数据中心实现不同流域传感器数据的跨区域协同。例如,长江流域的降雨数据可同步至珠江流域防洪平台,帮助珠江提前预判洪水过境影响;南水北调中线的水质数据可共享至沿线农业灌区,指导农户调整灌溉用水方案(避开水质敏感期灌溉),提升水资源综合利用效率。

三是与水利工程智能控制联动。传感器数据直接接入水利工程控制系统,实现“监测-决策-执行”闭环。例如,水库闸门控制系统可根据雷达水位计实时数据,自动调整闸门开度,无须人工操作,响应时间从10分钟缩短至1分钟。某中型水库部署智能联动系统后,2024年汛期闸门调度准确率达100%,未出现超水位泄洪情况。

市场规模与产业发展格局

从单一参数监测到多参数融合,从云端集中处理到边缘智能决策,从常规通信依赖到北斗应急保障,水利传感器在防洪减灾、智慧灌溉、生态保护等核心场景中,已实现从“数据采集”到“智能调控”的跨越。市场规模的快速增长与产业链自主可控格局的形成,进一步为水利传感器的规模化应用奠定了基础。

据Markets and Markets 2025年报告,全球水利传感器市场规模约为24.5亿美元,预计2028年将增长至37.6亿美元,年复合增长率(CAGR)达15.2%。增长动力主要来自两大板块:一是发展中国家水利基础设施建设,二是发达国家的老旧传感器替换。分产品看,水位传感器占比最高,其次是流量传感器、水质传感器,土壤含水率传感器因智慧灌溉需求崛起,增速最快。

据中国水利企业协会数据,2030年水利传感器市场规模约为152亿元,预计2035年将达286亿元,CAGR达22.3%,高于全球平均水平。其中,政策驱动是核心因素:“十四五”水利信息化规划要求,2035年年底前实现全域流域、灌区传感器全覆盖,2035年中央水利建设投资中,传感器采购占比达15.5%。分场景看,防洪监测领域规模最大,智慧灌溉领域增速最快,生态流量监测领域因“长江十年禁渔”等政策推动,2025年规模将达16.9亿元,预计2028年将翻番至34.2亿元。

从产业发展格局看,产业链上游的核心元件供应商,国内企业占比提升显著,

在中低端领域实现关键技术自主可控,高端领域仍在逐步突破。此外,太阳能供电模块、LoRa通信模块等配套元件,国内供应商占比超80%,支撑了下游整机成本的降低。

产业链中游的整机制造与系统集成商,呈现“头部集中+细分领域分散”格局。头部企业如大禹节水、先河环保,凭借水利工程总包优势,占据大型流域、国家级灌区等高端市场。例如,大禹节水为南水北调中线提供的一体化水文传感器,集成水位、流量、水质、生态多参数功能,已部署超5000台;先河环保为长江生态监测提供的智能水质传感器网络,覆盖350个监测点,数据准确率达99%。细分领域企业则聚焦特定场景,如北京某企业专注山洪预警传感器,占国内山区市场份额达30%;甘肃某企业专注灌区土壤含水率传感器,在西北市场占比超25%。

产业链下游的应用端以政府水利部门、大型灌区管理单位、水利工程公司为主,采购模式以招投标为主。2030年,政府水利部门采购占比达65%(主要用于防洪、生态监测、智能调控),大型灌区管理单位占比22%(智慧灌溉),水利工程公司占比13%(新建水利项目配套)。值得注意的是,农村小型灌区、偏远流域的采购需求正从“政府统一采购”向“县乡自主采购+市场化运营”转变,2030年县乡级采购规模较2025年增长68%,推动了中游细分领域企业的发展。

水利传感器的物联网系统布局与智能化升级

水利物联网系统遵循感知层采集数据→网络层传输数据→应用层解析数据并输出决策的核心逻辑,各层级协同实现水利智能管控,具体布局如下。

感知层:低成本、高适配的布点策略

感知层作为水利物联网的“数据入口”,其布点密度与位置直接决定监测数据的准确性与覆盖范围。针对水利场景的地域广泛性与地形复杂性,需采用“差异化布点”策略,在保障监测效果的同时降低部署成本。

大流域布点:“断面+关键节点”组合模式。针对长江、黄河等主干河道及大型湖泊,以“控制断面”为核心,结合“关键节点”补充监测,形成网格化覆盖。例如,长江干流从青海玉树至上海入海口,共设置108个国家级控制断面,每个断面部署多维度传感器(含水位、流量、水质),实现干流数据全覆盖;在三峡大坝、葛洲坝等关键水利工程周边,额外增设3~5个辅助监测点(部署渗压、应变传感器),强化工程安全监测。这种模式既保证了干流监测的连续性,又重点覆盖了风险区域,部署成本较“均匀布点”降低30%。以长江中游段(宜昌至武汉)为例,采用“6个控制断面+3个大坝辅助点”布点后,洪水监测准确率达95%,较此前提升12%。

小流域布点:“网格化+风险点”聚焦模式。针对西南山区小流域、西北灌区等场景,以“风险等级”为依据,划分网格并聚焦高风险点布点。例如,西南某山洪易发小流域,首先将流域划分为10个网格,每个网格部署1台光学雨量传感器;在河道转弯处、桥梁下方等3个洪水易汇集点,额外部署压力式水位计;在下游村庄入口部署1个边缘计算节点,形成“网格监测+风险点聚焦”的布点体系。这种模式避免了低风险区域的无效布点,部署成本较“全面覆盖”降低40%,同时山洪预警准确率达90%。又

如,西北某灌区按“每200亩1个土壤含水率传感器+每口机井1个超声波水表”的网格布点,在灌区首部枢纽、干支渠分水口等关键节点补充流量传感器,实现灌溉数据的精准采集,亩均传感器部署成本仅20元。

偏远区域布点:“太阳能+易维护”极简模式。针对青藏高原、原江河源头、沙漠灌区等偏远区域,采用“低功耗传感器+太阳能供电+免维护设计”的极简布点方案。例如,青藏高原某长江源头监测点,部署太阳能供电的雷达水位计与翻斗式雨量计,传感器采用一体化设计,安装在预制混凝土基座上,运维人员每年仅需巡检1次。这种模式解决了偏远区域“供电难、运维难”的痛点,部署成本较“架设供电线路”降低60%,数据传输成功率达92%。

网络层:解决“最后一公里”传输难题的多模融合方案

部分监测点位于山区、河道深处等无公网覆盖区域,需构建“多模融合、应急备份”的传输网络,保障数据从感知层到应用层的稳定传输。

大流域传输:“光纤专网+4G/5G”主备模式。针对长江、南水北调等重点水利工程,构建“光纤专网为主,4G/5G为辅”的传输体系。例如,南水北调中线工程,沿干渠铺设专用光纤,连接所有监测站点与控制中心,实现实时数据传输;在光纤中断的极端情况下,自动切换至4G/5G公网,保障关键数据不中断。2023年南水北调中线某段因暴雨导致光纤中断,系统自动切换至5G传输,持续12小时传输闸门应变数据,避免了闸门过载风险,数据丢失率为0。

小流域传输:“LoRa+4G”低成本模式。针对山区小流域、农村灌区等场景,采用“LoRa广域网+4G”的低成本传输方案。LoRa具备传输距离远、功耗低、成本低的优势,适合连接分散的传感器;4G用于将LoRa网关收集的数据回传至云端平台。例如,

福建武夷山山洪预警系统,压力式水位计与光学雨量传感器通过LoRa连接至村口的LoRa网关,网关再通过4G将数据上传至市水利预警平台,单站传输成本仅需20元/月,较纯4G传输降低70%。此外,针对无4G信号的山区,采用“LoRa级联”方式(多个LoRa网关接力传输),将数据传至有4G信号的区域,解决了“信号盲区”问题,如云南怒江峡谷某监测点,通过3个LoRa网关级联,实现了8km距离的数据传输。

应急传输:“北斗短报文”保底模式。针对极端洪水、地震等灾害场景,采用北斗短报文作为应急传输手段,保障关键数据的上报。北斗短报文具备无地面网络依赖、抗干扰能力强、覆盖范围广的优势,传输速率约100bps,可传输120个汉字/次,适合发送水位、雨量、灾情等关键信息。例如,2023年黄河某段遭遇凌汛,流冰导致沿岸4G基站断电,部署的雷达水位计通过北斗短报文,每15分钟向省水利厅发送一次水位数据,持续8小时,为凌汛调度提供了关键数据。又如,四川某山区地震后,道路中断、通信瘫痪,部署的翻斗式雨量计通过北斗短报文中报“震后24小时降雨量50mm”,提醒救援部门防范次生山洪,避免了救援人员伤亡。

应用层:从数据到决策的场景化落地

应用层是水利传感器数据的“价值出口”,需结合防洪、灌溉、生态等具体业务场景,构建可视化、智能化的应用平台,实现从“数据采集”到“决策支撑”的转化。

长江流域一体化防洪预警平台,整合长江干流及支流的2000余个监测站点数据(含水位、流量、雨量、水质),构建“数据汇聚-型计算-预警发布”全流程系统。平台具备三大核心功能:一是实时可视化,在电子地图上动态显示各监测点数据,支持查看历史曲线;二是洪水演

进模拟,基于雨量、流量数据,采用水动力学模型预测洪水抵达下游城市的时间与峰值水位;三是分级预警发布,根据洪水风险等级自动向应急管理部门、沿线城市、村民发送预警信息。2023年长江夏汛期间,该平台提前48小时预测到武汉段洪水峰值,指导3个蓄洪区有序蓄洪,使武汉实际水位控制在28.8m,避免了城市内涝,预警响应效率较2020年提升30%。

华北灌区智能灌溉管理平台,接入华北平原50万亩灌区的土壤含水率传感器、超声波水表数据,构建“墒情监测-用水统计-灌溉调度”一体化系统。平台面向两类用户提供服务:一是灌区管理部门,可查看区域墒情分布、各村庄用水量排名生成灌溉调度方案;二是农户,通过手机APP查看自家农田的土壤含水率,接收灌溉提醒,远程控制灌溉阀门。2025年春季灌溉期,该平台使灌区灌溉水利用系数从0.65提升至0.78,亩均灌溉时间缩短2小时,农户节水意识提升后,主动采用喷灌、滴灌等节水方式的比例从30%增至60%。

洞庭湖生态流量调控平台,整合洞庭湖及入湖支流的液位、流量、水质传感器数据,结合鱼类繁殖期、候鸟迁徙期等生态需求,构建“生态水位-水质-流量”联动调控系统。平台核心逻辑为:当传感器监测到湖水位低于生态下限时,自动计算需补水量,向三峡水库发送补水请求;当监测到水温达到鱼类产卵适宜温度,但溶解氧低于5mg/L时,启动湖区曝气设备,同时调控入湖支流闸门,增加清水入湖量。2024年春季,该平台通过传感器数据联动,共调度三峡水库补水3次,启动曝气设备120小时,使洞庭湖鱼类产卵期的生态水位保障率达100%,溶解氧达标率达95%,当年洞庭湖越冬候鸟数量较上年增加10%,实现了生态保护与水资源调控的平衡。