

# 数智管控下输水管道泄漏预警技术对策

王兵, 熊伶\*, 蒋有高, 黄才生

重庆市西部水资源开发有限公司, 重庆 401121

DOI:10.61369/WCEST.2025010009

**摘要**：输水管道泄漏问题一直是水资源输配系统中的关键隐患，其隐蔽性和突发性为常规监测带来了极大挑战。随着数字化与智能化手段的逐步引入，传统人工巡查难以覆盖的盲区开始被打通，数据驱动的预警机制正在形成。然而，在感知技术、信号识别与系统联动方面仍存在明显短板，制约了整体预警效能的提升。面对复杂地形、多源干扰与现场环境的高度不确定性，构建具有实时响应能力与高度协调性的数智化预警体系，是当前必须正视与深入攻克的方向。本文立足实际问题，从结构复杂性、干扰源识别、数据整合等多个维度出发，探讨切实可行的数智管控对策，力图推动输水管道安全监控向更高水平迈进。

**关键词**：输水安全；智能监控；泄漏检测；数据融合；管控机制

## Countermeasures for Water Pipeline Leakage Warning Technology under Digital Intelligence Control

Wang Bing, Xiong Ling\*, Jiang Yougao, Huang Caisheng

Chongqing Western Water Resources Development Co., Ltd., Chongqing 401121

**Abstract**：The problem of water pipeline leakage has always been a key hidden danger in the water resource transmission and distribution system, and its concealment and suddenness pose great challenges to routine monitoring. With the gradual introduction of digital and intelligent means, blind spots that are difficult to cover with traditional manual inspections are being opened up, and data-driven warning mechanisms are taking shape. However, there are still significant shortcomings in perception technology, signal recognition, and system linkage, which restrict the overall improvement of early warning efficiency. Facing the high uncertainty of complex terrain, multi-source interference, and on-site environment, building a digital early warning system with real-time response capability and high coordination is the direction that must be addressed and deeply overcome. This article is based on practical problems, starting from multiple dimensions such as structural complexity, interference source identification, and data integration, to explore practical and feasible digital control measures, and strive to promote the safety monitoring of water pipelines to a higher level.

**Keywords**：water supply safety; intelligent monitoring; leakage detection; data fusion; control mechanism

## 引言

城市化进程不断加快的当下，水资源的高效输送已成为基础设施运行中不可回避的重要课题。管道泄漏虽不新鲜，却始终没有被真正有效掌控，它不仅造成水量损失，更容易引发次生风险，干扰社会稳定运行。随着技术迭代与数字系统的落地，输水安全从粗放式管理转向数智化调控已具现实基础。但仅有技术堆砌并不能构成有效防线，感知的精准性、识别的敏锐性、响应的及时性缺一不可。本研究尝试从实际管控困境出发，剖析制约泄漏预警系统实效的核心问题，并对数智手段的应用路径进行针对性梳理和思辨，旨在探索一条既贴合技术发展逻辑，又符合现场需求特性的管道泄漏预警提升路径。

基金项目：本文系重庆市技术创新与应用发展专项重点项目“大型水资源配置工程建设数智管控关键技术研究及应用”（项目编号：CSTB2022TIAD-KPX0127）。

通讯作者：熊伶。

## 一、数智化背景下输水管道泄漏预警的总体认知

### （一）输水管道泄漏的行业现状

一方面，输水管道作为城市水资源系统运行链的重要环节，当前泄漏一直没有获得系统有效的解决，现阶段各地主要依靠人工巡检、经验主义为主，不够及时、不够准确。局部管网虽然有感知网分布，但是覆盖不够全面、缺乏协同、数据缺乏集成分析、尚未构成完整的闭环风险预警系统，另一方面，当前许多地区的管网没有按照规范施工，因此结构信息不明确，排查费用昂贵、修复时间长，进而影响了泄漏后的响应速度。技术瓶颈的困境和管理瓶颈的困境共存<sup>[1]</sup>。

### （二）数字智能手段在泄漏预警中的融合应用

同时，近几年信息技术和智能化设备逐步引入到管网监控系统中，从前端感知到中端控制逐渐形成一个信息采集—传送—处理—反馈的技术闭环。在广度和精度上通过物联网、水质水压传感网、边缘计算等技术也已初见成效，但融合度尚不足，大多数是数据孤岛，不同软件平台没有统一的接口和协作，虽数据量大，但缺少利用。建设融合、统一的数据通道和智能调度是泄漏预报预警真正实施的必要基础。

## 二、输水管道泄漏预警面临的主要挑战

### （一）管道分布复杂性对监测提出的难题

城市供水管网一般由城市各管辖范围和不同地面形式组成，由城市核心区再到城郊园区甚至山体之间，其覆盖物理单元非均等性表现突出，且管网布局缺乏统一的区域规划，而目前原有建设管网大多属于改造之前留下的管网，管网文件不规范或者缺失造成现场地形和台账信息脱节严重。在这种情况下，如何布局合理监测站，感知盲区和覆盖区域可能同时存在重叠。其次管网穿插跨越不同地形，同时可能有道路、房屋和地下构筑物，且部分地方施工过程中受到限制，例如传感节点无法布置或者存在数据传输的问题<sup>[2]</sup>。由此也会带来在管道结构上的未知性和复杂性，那么对此警报系统的反应也就相应复杂，现有技术应对手段薄弱，导致漏检误报频发，影响机制的可靠性和有效性。

### （二）报警信号的多源干扰识别困难

现有泄漏监控的方法大多基于管道漏水前水压、流速、流量变化进行的预警，受到管道系统水锤、用户取水、抽水口启停以及泵闸开启和关闭等因素的影响，会产生很多假数据，很容易触发异常数据，使得一些波动在数值上近似与管道漏水一样。而这种假的数据对于预设阈值的干扰较大，使得报警后运维人员很难对频繁的报警加以判断，容易导致运维人员的怠倦情绪<sup>[3]</sup>。对于假警报事件由于缺乏语义信息和人工判断，无法对多源、异构及混杂属性数据进行关联和融合分析。系统难以灵活识别多变状态，遇到多种不确定因素时，识别难度和误判率显著增加。

### （三）现场环境变化对预警准确性的制约

现场环境往往是不稳定和可变的，季节性温度、水文水质、工程地层等环境因素在很多情况下可间接通过传感器的使用影响其工作状态，致使传感器采样存在不可避免的系统误差。在高温、低温条件和较强的电磁干扰、遮蔽环境中数据上传不顺畅，甚至有一定程度的延时、甚至断链的现象。施工现场人员、车辆

等外力冲击容易造成设备遭受轻度损坏甚至严重破坏，致使数据不可靠、不可持续<sup>[4]</sup>。环境因素的随机性和不可控性要求系统除了具有良好的鲁棒性外，系统还要求必须有在线调整参数和错误检测功能，但目前大部分监测平台在实际工程应用时多为单一阈值与单一策略应用，缺少针对现场随机性与可变性的应变策略，极有可能造成漏报或误报，因此降低了监测的可靠性与实用性。

## 三、数智管控下输水管道泄漏预警技术对策

### （一）数据采集方式的多元融合思路

输水隧洞跑水的预判最终决定于数据的多样程度、完整性和时效性，但搭建起实时化的数智体系需先要解决单一的信号来源问题，也就是创建多元化的数据采集平台。现今大部分的体系还是停留在水位、水量、流速等物理量的采集，没有考虑其他环境参数和人为动作的交叉影响，所以要通过多元化的传感平台完成对物理、环境、行为信息的同步采集。一方面，在信号感知方式上要推进声、光、电、化学反应、水质仪等信号传感方式对传统流量监测设备的复位式部署，而不是要求单一品类的传感器作为可靠的信号来源。另一方面，在数据感知节点上要优先布设在高风险区域的组合式信号采集平台，增强局部定位能力，同时采用流动式采集平台对重点点位实现定期巡逻，从而打通固态覆盖下的动态监测盲区。为确保数据一致性，可以通过边缘服务器对获取信息进行提前筛查、分类，防止未加工信息在链路上进行冗余传递而造成网络卡顿。整合方案的核心并不在于对不同类型采集方式的叠加使用，而是能构建多层分布式的数据采集框架，在底层实现对信号完整的控制，在中间实现对数据时效的压缩，在顶层实现对感知度的分级调度，这个形态的构建应当以体系对复杂现场环境的匹配程度为参照，不要陷入注重单点采集率的设计盲区<sup>[5]</sup>。集中信息采集不但是信息覆盖率提升，还能使后续的认识提供有维度根据的数据资料，实现真实有效的自发式的信息感知系统。

### （二）通信链路稳定性的强化路径

通信链路的稳定性和可靠性最终影响着系统闭环处理是否能够顺利启用，提高通信链路抗干扰能力和稳定性也不应该是后期才考虑的，而应该是作为系统架构设计初期就应当考虑的任务之一。由于传输环境上通常采用的是输水管网区域分散、环境干扰严重的特性，所采用的通信架构应为分散的通信网络，并采取无线和有线相结合的双通道通信方式，保障传输过程中的分层级数据可靠性，通常在埋地传输的地点优先选用广域低功耗通信（LoRa）、窄带 IoT（NB-IoT）等具有穿墙特性的技术，克服物理环境对通信的干扰；同时，在通信盲点位置，设置相应的无线中继和信号中转设施，保障回传链路完整。为了减轻链路负载，应对节点传输速率进行自适应调节，引入节点本地缓存，可在无链路时将数据缓存在本地，直至链路恢复，在保障数据不丢失的前提下提高链路完好率；通信数据完整性验证也需加强，可通过在数据上添加哈希码并加上时间戳的方式避免数据在传递过程中被篡改或上传重复现象<sup>[6]</sup>。系统应具备链路的实时感知和实时自适应特性，应实时对通信延迟、传输损耗和强度进行观察，并根据结果实时进行主备传输通道的切换或自适应地调整链路传输协议等配置项，保障系统能长期稳定运行。稳定通讯链路不是技术能力

的叠加,而是配合数据采样、信息处理乃至预报决策等工作的底层支撑、基础保证,是管控体系正常运作的重要保障。

### (三) 识别机制中的精细化处理策略

识别是泄漏事件发生后预警体系的决策核心,但是当前以阈值作为判别逻辑的泄漏识别方法在高复杂工况条件下区分度不足。实现精细化处理异常数据需要以数据结构化和识别路径模块化为基础,逐层剥离影响判断精度的冗余影响因素。识别逻辑不能依赖单一信号参数波动直接进行判断,应建立多维信息交叉互证的信号判别策略,将水压、流速、声频、环境湿度、电导率等指标组合在一起,进行相关联建模,交叉验证。识别逻辑需要设置多级判断路径,先进行初步判别,再进入更高层级数据比对和行为逻辑判别环节,逐渐剔除非泄漏信号。在数据挖掘层,应设置基于时序特征差异的鉴别策略,对异常持续时间、变化幅度、空间扩散等特征进行关注,建立动态阈值调节策略,使系统具备根据运行环境和历史信息进行自主调节的能力。在联动响应层,识别逻辑应具备反馈调节功能,对于误判和错判事件,在发生后能够通过操作记录和后验信息对识别逻辑进行调节,而不是仅仅依赖固定参数<sup>[7]</sup>。这种机制对识别逻辑的要求是判断精度要高,并且具备不断学习和进化的能力。另外,应该对数据来源进行可靠性分析,给不同形式的感知设施预设权重优先级,防止次优信号对整体识别结论造成误导。精细化的策略核心在于分层建构识别逻辑,将感知数据由粗向细处理,从筛查到比对再到判断形成闭环逻辑路径,真正实现由数据驱动向机制驱动的转变。

### (四) 平台化监控体系的构建逻辑

输水管道泄漏预警监控平台建设应结合输水管道泄漏预警工作全过程业务需求出发,不仅要考虑数据集中管理层面,更要达到原始数据到结果信息层的精确、及时、实时和动态映射和转换。平台应摆脱以往监控系统按功能分区建设导致的数据孤岛,应支持不同类型数据、来源、格式的融合,在顶层建立统一、多层次的数据体系,满足数据动态变化和时效性的要求,并以此建立多级数据管理体系,实现底层数据层级的实时汇聚,数据中间层的数据清洗和标准化,中间层的数据结构和结果表征的数据管理层的综合性和完整性;应具备必要的警情触发规则,根据输水管道不同的地理线性及安全风险因子要求调整不同区域输水管道监控规则以及异常数据报警门限值,控制针对性地监控调整;支撑云边结合的计算架构,在边缘进行数据预处理、分析、汇总过滤报警的初步排查,减轻中心平台的运算压力。同时平台应保持灵活的公开接口、开放协议设计,支持调度管理系统、维护管理系统、GIS等各类外部信息系统之间互联互通,共享数据资源,协同工作;提供开放的管理功能和多层次数据视图报表设计功能,用户能够自主设置不同层级管理者不同视图的数据功能权限

## 参考文献

- [1]李明,张伟.城市输水管道泄漏监测技术现状分析[J].给水排水,2022,48(5):45-51.
- [2]王强,赵云.智能感知技术在输水管网监测中的应用研究[J].自动化仪表,2023,44(3):12-18.
- [3]陈晓东,刘芳.多源数据融合技术在管道泄漏预警中的实践探讨[J].传感器与微系统,2021,40(7):67-71.
- [4]何静,周磊.输水管道泄漏预警系统中的通信保障技术分析[J].通信技术,2022,54(10):89-95.
- [5]张华,李军.数字化平台在城市供水管网监控中的建设思路[J].城市水务,2023,27(2):33-38.
- [6]刘洋,高峰.输水管道智能监控与运行响应机制研究[J].水利科技与经济,2022,28(4):102-108.
- [7]徐平.基于分布式光纤传感的输水管道泄漏监测研究[D].哈尔滨理工大学,2024.
- [8]高欢.基于负压波法输水管道泄漏监测研究[D].沈阳农业大学,2022.
- [9]黄美信,陈建城,于任鑫,等.输水管道泄漏智能在线监测预警系统设计及实现[J].福建水力发电,2021,(01):58-61+64.
- [10]林天翔,冯少孔,叶冠林,等.大型压力输水管道泄漏监测方法的试验研究[J].振动与冲击,2021,40(05):136-142.

及灵活报表,包含用户查看原始数据、告警记录变动以及数据报警的历史追溯等功能。智能化管控平台的设计要遵循适应原理,能及时响应外部条件、设备能力和管道运行状况的变化而不断改变自身状态,不能让管控平台固化和封闭<sup>[8]</sup>。智能化管控系统的应用除了体现在智能外,还体现在提供给用户正确的信息辅助决策,并且更有利于风险研判工作有科学性、可操作性。

### (五) 运行机制响应机制的协同完善

数智管控系统是否能够充分发挥作用是取决于运行机制以及响应机制协调完善的情况,这需要管理过程和技术手段有机结合,从而构成一个完善的泄漏事件发现、确认以及处置的闭环运行机制。其运行机制需要定义出责任人和流程节点,更好地协调不同参与主体之间的信息交互与任务分担,消除不同部门之间的信息孤岛,确保资源和信息的高效流转。而响应机制需要与预警等级以及泄漏程度的大小相联系,规划出不同的泄漏处置响应措施,确保响应措施的灵活性与高效性<sup>[9]</sup>。在实际运行当中,应当实现自动预警和人工复审的有机结合,通过智能识别算法剔除易引发误判的警告信息,减少人工对泄漏预警进行判断与选择的任务量,然而也需要人工判断权作为必要的辅助环节,以保障最终响应决策的科学性和可操作性;运行机制需要保持灵活性,针对不同的运行效果以及反馈信息对运行参数以及策略进行相应调整,构成一个系统化的运行机制调整和修正的闭环机制。协调的另一层意义在于在应急响应层面,需要做好多层次、多维度的预案演练和培训工作,提升现场人员对于数智系统的掌握和使用水平,同时数智系统的应急资源包括人、材、机和材料等资源也要做好规划和响应,确保在发出泄漏信号后能够按照具体泄漏情况进行相应的应急力量动员等应急工作开展<sup>[10]</sup>。在响应方面也并非仅仅是为了事故发生后开展相应的响应措施,同时也应当前移至对风险事件的预见和潜在安全隐患的排查,将泄漏预警作为持续安全保障的主要组成部分之一。

## 四、结束语

监测预警不仅是一个技术手段,而且是系统和机制,用现在推进数字改革的大背景,再去重新思考这个问题时,我们不能局限地停留在埋点、埋设备这样的高度,应是数据打底,协同指挥为主导的全流程控制与管理。本文所提出的思路不是追求一个技术的叠加,而是能够每一级都能够真的用起来、每一项技术都能够切实地有它的定位,在实际的复杂场景中都站得起来,因此数智化手段不能成为空转的一个花架子,它才能够真正成为守护输水安全真正的利器。