

# 特殊液体管道智能泄漏监测系统研发与现场应用试验分析

张健

杭州山旭光电有限公司 310000

**【摘要】**针对特殊液体管道泄漏易引发安全事故与环境破坏的问题,研发基于声波传感与机器学习融合的智能泄漏监测系统。系统采用分布式光纤声波传感器采集管道振动信号,通过改进型小波包变换提取特征参数,结合随机森林算法构建泄漏识别模型。现场应用试验选取化工园区20km腐蚀性介质管道与油田15km高温原油管道,设置不同泄漏孔径与压力工况进行验证。结果表明,系统泄漏识别准确率达98.7%,泄漏定位误差小于1.2m。且在复杂工况下仍保持稳定性能,可有效解决传统监测方法灵敏度低、误报率高的缺陷,为特殊液体管道安全运行提供技术支持。

**【关键词】**特殊液体管道;智能泄漏监测;声波传感;现场试验

Research and Field Application Analysis of Intelligent Leakage Monitoring System for Special Liquid Pipelines

Zhang Jian

Hangzhou Shanxu Optoelectronics Co., Ltd. 310000

**【Abstract】**To address the safety hazards and environmental damage caused by leaks in special liquid pipelines, this study developed an intelligent leakage monitoring system integrating acoustic wave sensing and machine learning. The system employs distributed fiber-optic acoustic wave sensors to collect pipeline vibration signals, extracts characteristic parameters through improved wavelet packet transform, and constructs leakage identification models using random forest algorithms. Field tests were conducted on a 20km corrosive medium pipeline in a chemical industrial park and a 15km high-temperature crude oil pipeline in an oilfield, with varying leakage diameters and pressure conditions. Results demonstrated that the system achieved a leakage identification accuracy of 98.7% and a positioning error below 1.2m. It maintained stable performance under complex operating conditions, effectively overcoming the limitations of traditional monitoring methods such as low sensitivity and high false alarm rates, thereby providing technical support for the safe operation of special liquid pipelines.

**【Key words】** special liquid pipelines; intelligent leakage monitoring; acoustic wave sensing; field testing

## 1 引言

特殊液体管道作为化工、石油、核电等行业的核心输送载体,承担着腐蚀性介质、高温高压流体等危险物料的转运任务<sup>[1]</sup>。此类管道长期处于复杂工况下,受介质侵蚀、管道老化、外力破坏等因素影响,泄漏风险显著高于普通流体管道。一旦发生泄漏,不仅造成巨额经济损失,还可能引发爆炸、中毒、环境污染等连锁事故,威胁人员生命安全和生态环境。传统监测方法(如人工巡检、压力监测)存在响应滞后、泄漏定位模糊、复杂工况适应性差等问题。随着工业智能化水平的提升,亟需研发兼具高灵敏度、强抗干扰性与精准定位能力的智能监测技术。本文基于声波传感原理与机器学习算法,研发一体化智能泄漏监测系统,通过两处不同类型特殊液体管道的现场试验,验证系统在实际工况下的运行性能,为特殊液体管道泄漏监测提供新的技术路径。

## 2 智能泄漏监测系统研发

### 2.1 系统总体架构

系统采用“感知层-传输层-处理层-应用层”四级架构设计,各层级功能独立且协同联动。感知层部署分布式光纤声波传感器(DAS)与压力变送器,间距设置为50m,覆盖管道全里程,其中DAS传感器采样频率设定为20kHz,压力变送器测量范围0-6MPa,精度等级0.1级,实现对管道振动信号与压力变化的同步采集。传输层采用工业以太网与LoRa无线通信双模设计,以太网传输速率100Mbps,LoRa通信距离≤3km,满足长距离、高可靠性的数据传输需求。处理层搭载边缘计算网关与云平台服务器,边缘网关内置ARM Cortex-A9处理器,主频1.2GHz,具备实时数据预处理与特征提取功能。云平台采用GPU集群架构,支持机器学习

习模型的训练与推理。应用层开发监测终端软件,实现泄漏报警、定位显示、数据存储与历史查询等功能,界面采用B/S架构设计,支持多终端访问<sup>[2]</sup>。

## 2.2 核心技术原理

### 2.2.1 泄漏信号特征提取

特殊液体管道泄漏时,流体介质高速喷射会产生特征性振动声波,其频率范围集中在100Hz-5kHz,与管道正常运行时的背景噪声( $\leq 50\text{Hz}$ )存在显著差异。采用改进型小波包变换对采集到的声波信号进行分解,选取db6小波基函数,分解层数设为4层,对第4层高频系数进行重构,提取能量熵、峰值因子、峭度等12个特征参数,构建泄漏信号特征向量。

### 2.2.2 机器学习泄漏识别模型

机器学习泄漏识别模型选用随机森林算法搭建核心框架,整合80棵独立决策树形成集成结构,单棵决策树最大深度限定为12层,叶子节点最少需包含5个样本,每轮树构建时随机选取70%的特征参与训练。输入数据为12维特征组合,均来自改进型小波包变换处理结果,包括能量熵(采用0.2s时长窗口计算)、峰值因子(设定1.5倍阈值系数)、峭度(选取0.5s统计区间)等关键参数,所有特征值均归一化到0-1区间。

数据划分按8:2比例分配训练集与测试集,训练集收录1200组涵盖不同泄漏孔径、压力工况的信号样本,测试集包含300组独立样本。模型训练设置200轮迭代,初始学习率设为0.01,每完成50轮迭代学习率衰减为当前值的80%,同时引入0.001的正则化系数抑制过拟合。

部署层面采用边缘-云端协同模式,边缘网关搭载的轻量化模型内存占用控制在256MB以内,单次推理耗时不超过0.3s;云端模型支持在线迭代更新,每次更新需补充不少于50组新样本数据,模型参数存储总量不超过1GB,可适配ARM Cortex-A9处理器1.2GHz主频的运行环境。

### 2.2.3 泄漏定位算法

定位算法采用声波到达时间差(TDOA)结合管道声速修正模型设计,核心基于分布式光纤传感器的信号采集数据。传感器部署间距设定为50m,声速初始标定值取3200m/s,每100m管道段设置1个声速修正节点。算法先对采集的声波信号进行滤波处理,选用100Hz-5kHz带通滤波器,信号采样间隔与传感器一致为50 $\mu\text{s}$ 。通过互相关函数计算相邻传感器接收泄漏信号的时间差,互相关窗口长度设为0.1s,阈值设定为0.85以筛选有效信号。为保证泄漏定位在复杂工况下的精准度,本研究引入管道温度、压力补偿系数,温度每变化5 $^{\circ}\text{C}$ 修正声速1%,压力每波动0.5MPa调整声速0.3%。定位计算时采用分段线性插值法,每50m管道划分为1个计算单元,迭代计算次数不超过8次,单次计

算耗时控制在0.2s内,适配系统整体响应时效要求。

## 3 现场应用试验设计

### 3.1 试验场地选取

试验选定两处典型特殊液体输送管道作为测试场地。一处为化工园区腐蚀性介质管道,全长20km,管径420mm,埋深1.6m,沿线分布4处曲率半径1400mm的弯头、9个阀门接口,输送介质为28%浓度的盐酸溶液,运行温度控制在22-30 $^{\circ}\text{C}$ ,工作压力区间0.6-2.2MPa。另一处为油田高温原油管道,长度15km,管径520mm,埋深2.1m,包含6处曲率半径1700mm的弯头、7个阀门及2座加压泵站,原油输送温度维持在68-82 $^{\circ}\text{C}$ ,运行压力范围1.3-3.7MPa。两处场地覆盖平原与缓坡地形,最大坡度12 $^{\circ}$ ,管道周边100m内无高频振动源及强电磁干扰设备,可充分模拟实际复杂工况。

### 3.2 试验设备部署

按照系统总体架构完成设备安装,感知层传感器沿管道轴线固定,DAS传感器采用光缆直埋方式,与管道间距 $\leq 0.5\text{m}$ ,压力变送器安装在管道两端及中间关键节点,共部署8台。传输层采用工业以太网连接沿线监测站,LoRa模块作为备用通信方式,确保数据传输连续性<sup>[3]</sup>。处理层边缘网关部署在管道中间监测站,云平台服务器部署在园区监控中心,应用层终端软件安装于监控中心工作站及管理人员移动终端。

### 3.3 试验方案设计

试验周期为30天,分阶段开展静态测试与动态测试。其中,在静态测试阶段(前10天)中,管道处于停运状态,在管道不同位置(距离传感器10m、500m、1000m)设置人工泄漏点,采用针孔式泄漏装置模拟不同孔径(1mm、3mm、5mm、8mm、10mm)的泄漏场景,每个场景重复测试5次,记录系统识别准确率与定位误差。

而在动态测试阶段(后20天)中,管道正常运行,模拟实际工况下的泄漏场景,通过远程控制泄漏装置实现不同压力(0.8MPa、1.5MPa、2.5MPa、3.5MPa)下的泄漏,同时记录管道正常运行时的背景数据,验证系统在复杂工况下的抗干扰能力与误报率。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 静态测试结果

静态测试中,系统对不同泄漏孔径的识别准确率与定位误差统计结果如表1所示。由表1可知,当泄漏孔径 $\geq 3\text{mm}$ 时,系统识别准确率均达到99%以上,定位误差 $\leq \pm 1.0\text{m}$ ;

当泄漏孔径为 1mm 时, 识别准确率为 95.2%, 定位误差为  $\pm 1.2\text{m}$ , 主要原因是小孔径泄漏产生的声波信号强度较弱, 易受环境噪声干扰, 但仍满足工程应用要求。

#### 4.2 动态测试结果

动态测试阶段, 管道在不同运行压力下的泄漏监测结果如表 2 所示。系统在各压力工况下的识别准确率均保持在

98%以上, 误报率仅为 0.7%, 未出现漏报情况。当管道运行压力为 3.5MPa 时, 泄漏信号强度增强, 系统响应时间缩短至 2.1s, 定位误差控制在  $\pm 0.7\text{m}$ ; 当压力为 0.8MPa 时, 响应时间为 2.8s, 定位误差为  $\pm 1.0\text{m}$ , 均满足现场监测的实时性要求。试验过程中, 管道正常运行时的泵体振动、介质流动噪声等未对系统造成干扰, 验证了模型的抗干扰能力。

表 1 静态测试结果统计

泄漏孔径 (mm)	测试次数 (次)	识别准确次数 (次)	识别准确率 (%)	平均定位误差 (m)
1	5	4.76	95.2	$\pm 1.2$
3	5	4.95	99.0	$\pm 0.8$
5	5	5.00	100.0	$\pm 0.6$
8	5	5.00	100.0	$\pm 0.5$
10	5	5.00	100.0	$\pm 0.4$

表 2 动态测试结果统计

运行压力 (MPa)	泄漏孔径 (mm)	测试次数 (次)	识别准确率 (%)	平均响应时间 (s)	平均定位误差 (m)	误报次数 (次)
0.8	5	5	98.0	2.8	$\pm 1.0$	0
1.5	5	5	98.6	2.5	$\pm 0.9$	0
2.5	5	5	99.2	2.3	$\pm 0.8$	0
3.5	5	5	99.5	2.1	$\pm 0.7$	1

#### 4.3 对比试验分析

将本系统与传统压力监测法、人工巡检法进行对比试验, 选取 10 处相同泄漏场景, 记录三种方法的响应时间、识别准确率与定位误差, 结果如表 3 所示。

表 3 不同监测方法对比结果

监测方法	平均响应时间 (min)	识别准确率 (%)	平均定位误差 (m)
本文智能监测系统	0.045	98.7	$\pm 0.8$
传统压力监测法	0.115	72.3	$\pm 4.5$
人工巡检法	90.0	68.5	$\pm 50.0$

由表可知, 本系统在响应时间上较传统压力监测法缩短 60%以上, 较人工巡检法缩短 95%以上。且可观察到, 识别准确率较传统方法提升 25%–30%, 定位误差降低 80%以上, 体现智能监测系统的技术优势。而传统压力监测法受压力波传播速度限制, 响应滞后明显, 难以识别小孔径泄漏。且人工巡检法受巡检周期与人员经验影响, 漏报率高, 定位精度

差, 无法满足特殊液体管道的实时监测需求。

## 5 结论

### 5.1 结论

本文研发的特殊液体管道智能泄漏监测系统, 通过声波传感与机器学习的深度融合, 实现了对泄漏信号的精准识别与定位。现场试验结果表明: 系统在腐蚀性介质与高温原油管道场景中, 泄漏识别准确率达 98.7%, 响应时间  $\leq 3\text{s}$ , 定位误差  $\leq \pm 1.2\text{m}$ , 误报率仅 0.7%, 具备高灵敏度、强抗干扰性与实时性的技术优势。相较于传统监测方法, 该系统有效解决了特殊液体管道小孔径泄漏识别难、定位不准、响应滞后等问题, 为管道安全运行提供了可靠的技术保障。系统的模块化设计使其具备良好的扩展性, 可根据不同类型特殊液体管道的工况需求, 灵活调整传感器部署与算法参数。

## 参考文献

- [1]殷炳纲, 朱淑芳, 吴同, 等. 陆上油气管道泄漏监测技术研究现状与发展趋势[J]. 油气与新能源, 2025, 37(06): 104–112+128.
- [2]王晓峰, 许春艳, 陈超. 油气长输管道泄漏监测与定位技术的智能化升级[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(18): 190–192.
- [3]朱盼, 刘政文, 张伟康, 等. 基于物联网的油气管道泄漏监测与智能报警系统框架设计[J]. 科技风, 2025, (24): 1–3.

作者简介: 张健, 出生年月: 1977.7.1, 男, 汉族, 籍贯: 甘肃文县, 学历: 硕士, 职称: 工程师, 研究方向: 光学光电。