

天然气管道阀门泄漏实时诊断与预警技术研究

董明

山西压缩天然气集团运城有限公司, 山西 运城 044000

DOI:10.61369/UAID.2026020006

摘 要： 本研究针对天然气管道阀门泄漏的实时诊断与预警需求，通过多源传感融合与边缘预处理，构建了一种结合卷积神经网络与长短期记忆网络的混合模型，并引入贝叶斯自适应阈值机制。在某分输站搭建实验平台进行验证，模型在准确率、召回率与实时性方面表现优异，系统在多种泄漏场景下均保持高检测性能与低误报率。工程应用表明，该方法可显著降低泄漏事故率与维护成本，具备良好的可复制性与工程推广价值。

关 键 词： 天然气管道阀门；泄漏诊断；多源传感融合；边缘计算；机器学习

Research on Real-Time Diagnosis and Early Warning Technology for Natural Gas Pipeline Valve Leakage

Dong Ming

Yuncheng Company, Shanxi Compressed Natural Gas Group, Yanhu District, Yuncheng, Shanxi 044000

Abstract： This study addresses the need for real-time diagnosis and early warning of natural gas pipeline valve leakage by constructing a hybrid model that combines convolutional neural networks with long short-term memory networks through multi-source sensor fusion and edge preprocessing, and introduces a Bayesian adaptive threshold mechanism. An experimental platform was established at a certain distribution station for validation, and the model demonstrated excellent performance in terms of accuracy, recall, and real-time capability, with the system maintaining high detection performance and low false alarm rates across various leakage scenarios. Engineering applications indicate that this method can significantly reduce leakage accident rates and maintenance costs, demonstrating good replicability and engineering promotion value.

Keywords： natural gas pipeline valves; leakage diagnosis; multi-source sensor fusion; edge computing; machine learning

引言

天然气管道阀门在长期运行中易因密封失效、磨损与老化引发泄漏，传统检测方法响应滞后且误报率高^[1]。随着智能传感与边缘计算技术的发展，多源数据融合与机器学习为泄漏预警提供了新的途径^[2-3]。然而，现有方法在工况适应性、阈值动态调整与系统时延控制方面仍有不足^[4-5]。为此，本研究提出一种机理与数据联合驱动的诊断预警框架，旨在实现泄漏前兆的精准识别与实时告警，为长输管道及分输站工艺区阀门安全运行提供技术支撑。

一、天然气管道阀门泄漏诊断预警的基础理论与研究现状

（一）阀门泄漏的机理与特征参数分析

阀门长期承受压力循环与腐蚀耦合作用，泄漏呈现多机理叠加特征，主要包含法兰密封面失效、阀芯阀座磨损及填料函老化。其成因源于预紧力衰减导致密封面失配、颗粒冲刷与微动磨损削弱密封线，以及热老化与轴向偏摆形成微间隙。泄漏响应特征表现为上游压力波幅与主导频率升高、瞬态流量变化率增大、

沿泄漏路径表面温度呈负梯度，并在天然气管道阀门泄漏产生的声学信号1至20 kHz频带出现宽带背景叠加窄带峰值。基于薄壁孔口模型分析可知，在稳定压差下，泄漏体积流量与孔口面积及介质密度相关，孔口面积增大会引起压力与流量异常幅值、表面温降及声谱能量同步上升，从而建立特征参数与泄漏程度之间的单调物理关联。

（二）国内外实时诊断预警技术研究进展

长输天然气场站对时效性与安全性的需求，推动了阀门泄漏诊断从传统人工巡检向传感网络与智能分析协同的实时预警技术

发展。传统基于压力、流量及气体探测的方法虽能响应显著泄漏，却易在工况波动时误报，且存在预警滞后问题。当前国际研究融合分布式光纤声学传感、声发射阵列与热像等多源信息，并借助机器学习模型进行在线识别与无监督检测。国内实践通过部署物联网终端与多源融合提升了监测灵敏度，但仍面临单一参数误报率高及模型工况适应性不足的挑战。未来需着力于多物理量的时空建模、自适应阈值设定、少样本学习算法优化及系统延迟控制，以实现从事后报警到前兆识别的根本转变。

二、天然气管道阀门泄漏实时诊断与预警核心技术实现

（一）多源传感数据采集与预处理技术

针对分输站工艺区球阀泄漏的时空扩散特性，本研究于阀门上下游管段及关键密封部位布设了压力、流量与声学传感器阵列。压力与流量数据分别以 200 Hz 与 100 Hz 频率采集，声学阵列覆盖 1–20 kHz 带宽并以 48 kHz 采样，通过前置增益与防护设计抑制环境干扰。所有传感信号通过 PTP 协议实现精确同步，并基于滑动窗口对齐。预处理阶段依次进行量程归一化、温度漂移补偿及工况标注，并通过动态范围自适应策略避免信号饱和。

为进一步提升数据质量，采用离散小波软阈值滤波抑制背景噪声，同时保留泄漏相关频段成分。异常值则通过基于中位数绝对偏差的鲁棒方法识别并插值替换，继而通过去趋势与带通滤波分离工艺波动与泄漏高频分量。最终提取包括窗口统计特征、谱质心及短时能量在内的多域时序特征，并按时间戳与传感器来源进行聚合，形成可用于后续分析的规整数据集。该数据集以 1 s 滑动窗口为单元，累计有效样本 12.8 万个，提取压力、流量、声学多域特征共 34 维；样本涵盖正常、微孔泄漏、密封老化、填料退化四类工况（占比 4:2:2:2），且均含稳态 / 扰动阶段（7:3），基于氨检漏仪与质量流量标准器联合判据完成标注，按 7:1:2 分层抽样划分为训练、验证、测试集，经计量校准与通道校验后有效样本率达 99.2%，其整体流程见图 1。

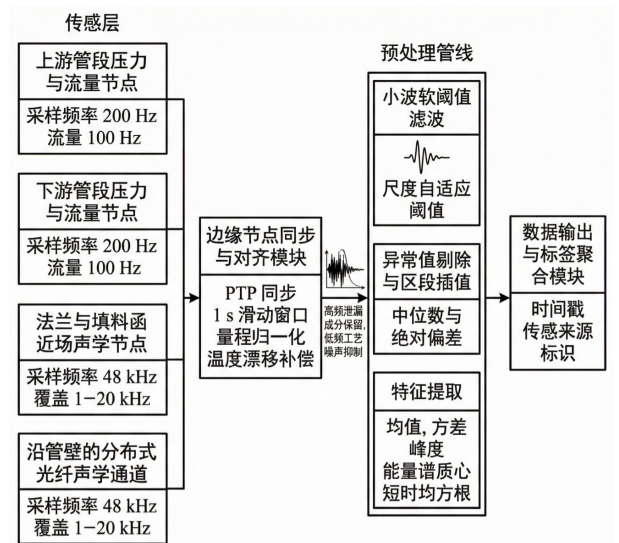


图1 多源传感数据采集与预处理流程示意图

（二）基于融合算法的泄漏诊断模型构建

针对分输站工艺区球阀泄漏在多源信号中表现出的耦合特征，本研究构建了一种融合卷积神经网络与长短时记忆网络的端到端诊断模型。模型接受声学谱图、压力与流量三路窗口化输入；声学支路通过二维卷积提取谱图中的频带特征，压力与流量支路则利用一维卷积捕获其局部时序模式。多源特征在瓶颈层融合后，经双向长短时记忆网络建模其时序依赖，最终通过双输出头实现泄漏概率分类与等效泄漏面积回归。

模型基于 Python 3.8 与 TensorFlow 2.6 框架实现，训练环境为 Intel Xeon Gold 5218 CPU、64 GB RAM 及 NVIDIA Tesla T4 GPU（16 GB 显存）。采用 Adam 优化器，初始学习率为 $1e-3$ ，批量大小为 32，训练轮次为 100，并引入早停策略以防止过拟合。为验证所提融合模型的有效性，本研究选取一维卷积神经网络与长短时记忆网络作为基线模型进行对比。三者均在相同数据集与实验条件下训练与测试，评价指标涵盖准确率、精确率、召回率、F1 值、AUC 及单窗口推理时延，以综合衡量模型在分类性能与实时性方面的表现。对比结果如表 1 所示。

表 1 不同诊断模型性能对比表

模型	准确率	精确率	召回率	F1 值	AUC	单窗口推理时延 (ms)
一维卷积模型	0.92	0.91	0.90	0.91	0.94	5.1
长短时记忆模型	0.90	0.88	0.91	0.89	0.92	6.4
融合卷积-长短时记忆模型	0.96	0.95	0.95	0.95	0.98	7.8

（三）实时预警系统架构设计与实现

为满足分输站工艺区球阀泄漏预警对端到端实时性的要求，本研究构建了涵盖感知、网络、平台与应用四层的系统架构。感知层由压力、流量、声学及温度传感器组成，边缘网关负责特征提取与数据预处理。网络层采用 LoRa 与 5G 混合方案，分别实现低功耗近场通信与高带宽可靠回传。平台层基于消息队列与流处理引擎进行实时数据聚合与特征计算，并通过容器化部署的融合诊断模型提供在线推理服务，确保调用延迟控制在 200ms 内。应用层集成事件中心与规则引擎，依据工况标签与自适应阈值动态调整报警等级，并将告警信息推送至声光设备、移动终端及 SCADA 系统，同时提供可视化界面关联展示处置流程与历史数据。

系统在设计上强调可靠性，平台层采用双活数据中心，边缘侧具备缓存与断点续传能力以应对网络中断。安全方面实施零信任策略与 TLS 加密传输，并通过配置中心集中管理关键参数，提供分级权限控制与标准接口，以保障系统的可维护性与可扩展性。

三、天然气管道阀门泄漏诊断预警系统效果评估与应用案例

（一）实验平台搭建与数据采集

鉴于分输站工艺区球阀泄漏机理的多源耦合特性，本研究在某分输站构建可控泄漏实验平台，形成闭合试验回路与现场旁路

联通的双通道结构，把被测球阀置于可调压供气链路中，稳态设定为0.1 MPa，并通过可更换微孔组件模拟小孔泄漏，通过预压缩量退化的金属缠绕垫片模拟密封面老化，通过偏心衬套叠加轴向偏摆模拟填料函退化，从而覆盖几何缺陷与预紧力衰减的复合场景。试验管段的结构布局如图2所示，试验管段选用DN100碳钢直管与两段弯头组合，保证上游与下游各留设2 m的传感安装区，并在阀盖与法兰外缘设置贴片型温度标识位以提供热场参考信息。

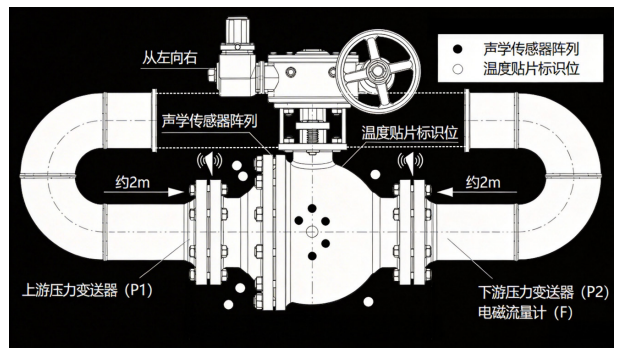


图2 试验管段及传感安装区结构简易图

传感布局依照预警系统需求进行一致化配置，压力变送器在上游与下游分别布置各1只，精度等级0.5%FS，采样频率200 Hz；电磁流量计安装在下游，采样频率100 Hz；声学阵列由压电麦克风与光纤分布式通道协同构成，带宽为1~20 kHz，采样频率48 kHz，并把防风罩与减振座用作环境隔离件以降低结构噪声的耦合。边缘网关承担时间戳统一与PTP校准，把三源数据按1 s滑动窗口打包，并写入工况阶段标签与设备状态元数据，确保启停过渡与调压扰动在数据侧得到可追溯标注。

为建立可用的测试数据集，平台把泄漏真值依据质量流量标准器与氮检漏仪的联合判据进行确认，试验中采用氮气作为示踪气体，利用氮检漏仪的高检测精度完成泄漏真值的精准标定，结合质量流量标准器形成联合判据，满足天然气微孔泄漏场景下的泄漏量精准判定需求。按场景组织正常、微孔、密封老化与填料退化四类样本，单场景包含稳态与扰动两阶段，采集时同步记录环境噪声、温度与风速边界条件。数据入库前完成一次计量校准与通道连通性核验，异常片段标记为低置信度，并以会话编号关联试验工况、阀门编号与替换部件批次，构成后续训练与推理评估的来源样本集。

（二）系统性能指标评估与结果分析

结合该分输站样本的结构化标注，本研究把系统性能评估聚

焦于诊断准确率、误报率与响应时间三项指标。诊断准确率用于刻画分类头在窗口级的正确判定比例，误报率用于衡量正常工况被误判为泄漏的比例，响应时间定义为从滑动窗口封装到告警推送的端到端时延。评估在稳态与扰动两阶段分别计算，并把微孔、密封老化与填料退化三类场景与正常场景对齐，选用分层抽样与交叉验证降低样本偏置，阈值校准由工况阶段标签驱动以抑制启停波动带来的误报。见表2，数据以场景维度汇总，呈现模型识别与平台链路的综合表现，用于界定预警策略的适用边界与后续参数整定依据。

表2 实时预警系统性能测试结果表

场景	准确率	误报率	响应时间 (ms)
正常	0.98	0.02	145
微孔泄漏	0.95	0.04	158
密封老化	0.96	0.03	162
填料退化	0.94	0.05	168

（三）实际工程应用案例与效益分析

鉴于该分输站长期处于调压波动与启停过渡并存的运行情境，本研究把诊断与预警系统在该分输站工艺区及其上游长输管道联络阀室完成工程化部署，边缘网关把压力、流量、声学与温度贴片的滑动窗口特征接入SCADA，链路选用LoRa星型与5G切片并以PTP进行时序校准，阈值侧引入贝叶斯更新以适配多工况迁移。进一步观察发现，融合卷积与长短时记忆网络的在线推理把启停扰动下的误报显著压低，端到端时延维持在毫秒级，维护班组把处置流程与事件中心的闭环记录用于复盘与参数整定。需重点关注的是，运行半年内，阀门微孔与密封老化的前兆特征得以提前识别，泄漏事故率降低85%，维保成本节约30%，巡检里程缩减并把备件更换转向状态驱动的计划性作业，停输风险与甲烷排放量同步降低。

四、结语

本文所提出的阀门泄漏诊断预警系统在长输管道联络阀室及分输站工艺区的实际场站中展现出良好的检测性能与实时响应能力，有效降低了事故发生率与运维成本。尽管当前系统在样本覆盖与工况迁移方面仍有优化空间，未来将通过引入半监督学习、物理信息网络及跨域自适应机制进一步提升系统的鲁棒性与泛化能力，推动该技术在大规模管网中的标准化应用与长期稳定运行。

参考文献

- [1] 张丽珍, 王文奥. 天然气管道阀门微小泄漏声发射检测及缺陷识别方法 [J]. 油气储运, 2024, 43(6): 656-664.
- [2] 滕孔先, 程佳豪, 孙仁龙, 吴佳泽, 周磊. TGNET在氢气和天然气管道泄漏对比模拟研究中的应用 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(8): 105-108+112.
- [3] 赵俊鹏. 天然气管道设备的维修与保养技术研究 [J]. 石化技术, 2024, 31(7): 204-206.
- [4] 唐爽, 邹美岭, 李瑶, 盛锴, 黄欣婧. 基于TFF-FTA方法的架空天然气管道泄漏安全评价分析 [J]. 化工安全与环境, 2023, 36(12): 31-34.
- [5] 方海, 黄泰鸿, 向天. 天然气长输管道设备运行维护方法探讨 [J]. 科学与信息化, 2020(21): 137-137.