

天然气管道运输泄漏监测技术优化研究

阎 帅 肖 鹏 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250002)

摘 要: 在天然气管道运输安全保障需求日益提升的背景下, 传统泄漏监测技术在复杂环境中的适应性不足问题逐渐凸显。本文从工程实践视角出发, 围绕光纤传感信号干扰、多技术协同效率低、巡检覆盖盲区等核心痛点, 探讨基于智能算法与系统集成技术优化思路。通过分析长短期记忆网络 (LSTM) 在信号降噪中的应用逻辑、多源数据融合的决策机制优化, 以及无人机巡检策略的智能化升级, 提出以“数据融合-智能决策-动态巡检”为核心的监测体系架构。研究强调技术优化需兼顾可靠性与经济性, 为燃气行业构建高适应性的泄漏监测系统提供思路参考。

关键词: 天然气管道; 泄漏监测; 智能优化; 多技术协同; 安全运维

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 029-0148-03

Research on Optimization of Leakage Monitoring Technology for Natural Gas Pipeline Transportation

Yan Shuai, Xiao Peng (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250002, China)

Abstract: Based on the background of further higher requirements for safety in gas pipeline transmission, the poor flexibility of the classical leakage monitoring technology in a complex environment is becoming more and more obvious. This article begins from the aspect of engineering practice and discusses engineering technical optimization thoughts relying on intelligent algorithms and system integration from the aspects of fiber optic sensing signal interference, technology cooperation low efficiency and blind spot coverage inspection pain point. Based on the logic of the application of Long Short Term Memory Network (LSTM) to realize signal denoising optimization, the decision-making process of multi-source information fusion is optimized, and the intelligent inspection strategy of UAV is updated, an “data fusion intelligent decision-making dynamic inspection” as the core monitoring system is proposed. This paper focuses on reliability and cost of technology, which is of great significance for constructing highly flexible leak surveillance system in the gas field. It will offer idea and reference in construction of highly flexible leak monitoring system in the gas industry.

Keywords: natural gas pipeline; Leakage monitoring; Intelligent optimization; Multi technology collaboration; security operation

1 现有监测技术的实践困境与优化方向

1.1 单一技术的应用局限分析

当前主流监测技术在实际场景中呈现明显的“能力断层”:

压力流量等流体类参量依据 SCADA 系统的阈值判断, 对于漏量缓慢的泄漏 (例如腐蚀穿孔早期) 敏感度不高, 还容易受到压缩机开停和室外温度等影响产生“伪警”, 出现假情况。据统计, 某省级管网的该技术在市内的误报率高达 20% 以上, 被误报的报警信息浪费了很多人工。

尽管 DAS 能够记录管道周围的振动信号, 但是由于存在来自自然环境 (风雨、车辆碾压) 和工业环境 (附近施工机器等) 的噪声, 因此存在大量的非泄漏信息, 而采用传统的降噪算法不能有效剔除这些“噪声”, 易造成漏报情况。

对于巡检区域分散的无人机巡检, 续航时间以及对天气条件依赖大、人工阅读红外图象的效率低下且频次难以提升的问题, 传统方式下该丘陵地区管道的

巡线覆盖率长期低于 60%, 存在很多监测不到的位置。

1.2 技术优化的核心逻辑

针对上述问题, 优化思路需从“单一技术改进”转向“系统能力重构”, 重点解决两个关键矛盾:

信息孤岛及决策延误: 在气体泄漏管道监控系统中, 压力传感器获取的压力波动信息、振动传感器获取的振动信号以及红外传感器的红外图像, 虽然各类数据信息采集源相同, 但由于缺乏高效的融合处理技术, 结果信息被单独使用, 成为“信息孤岛”, 在综合数据信息的融合分析管道是否发生泄漏以及发生泄漏的轻重时, 不得不频繁地切换数据信息并相互进行比对, 严重延误了决策处理过程, 导致不能第一时间有效应对天然气泄漏事故的发生, 进一步增大了安全隐患与经济损失。

巡检范围与有限资源的冲突: 采用无人机巡检管道, 巡查面积大、效率高, 但无人机受飞行限制, 作业覆盖面积小且作业时间有限。人巡方式由于人员耗费, 人力成本高, 存在体力与工作时间和工作强度的

限制。在有限资源的约束下，如何有效地建立合理的人机巡检方案，比如合理利用无人机巡检路径的规划、无人机航线、人巡的工作方案编排，如何优先快速识别高风险区域进行巡检，成为实现有限资源下监测效用最大的难点问题。

2 基于智能算法的核心技术优化思路

2.1 光纤信号降噪的智能化升级

常规的小波降噪等手段依靠的是对信号形式的固定性假设，在存在随机出现的施工振动的噪声环境下几乎不起作用。引入 LSTM 网络的主要作用就是对时间相关性数据的一种“动态记忆”，即将模型通过训练去记忆历史信号的正常振动特征（如频域下的车辆走行的周期性频率特征），在发现异常（如出现的泄漏导致出现的持续的低频振动）信号时，模型会通过时序性相关性的发现进行报警。

该方法其实是“管—环境”耦合交互过程的数学模型：管道周围的所有振动源（包括泄漏）都可以看作某种模式的时间序列，通过大量样本训练的 LSTM 模型就是包括了地埋位置、时间相关性（如白天与黑夜车流量差别）的多维信号模型，这样既实现了噪声去除又保留了泄漏信号的主要特性。该方法在试验路段的应用显示，能有效提高约 30% 的有效信号提取正确率，为后续判断提供了更加准确的依据。

2.2 多源数据融合的决策机制优化

单一技术的“片面性”决定了必须通过多源数据融合提升决策可靠性。传统 D-S 证据理论在处理高冲突数据时存在局限性，例如 SCADA 系统检测到压力微降（可能由用户端用气量变化引起）与光纤信号无异常的情况，直接融合易导致误判。

改进思路是引入“证据权重动态调整”：根据不同技术在特定场景下的历史表现（如城市段光纤信号受干扰概率高则降低其权重），通过模糊逻辑实时计算各数据源的可信度。

此“按需调整”的融合机制，具体实现是通过将现场经验转化为算法变量，比如将发生第三方施工高风险处的光纤振动分值提高，将输气负荷波动显著的输气站场附近压力数据的置信度阈值提高等。以某区域管网试运行数据表明，融合机制实现对泄露事故的误报率降低近 40%，决策时间由均 10min 降至 2min，大大提高了应急响应速度。

2.3 无人机巡检的策略化部署

最棘手的问题在于：无人机巡检面临的痛点是“有限续航”，即受飞行时间的限制，而现实中的监控需求却是“无限监”，这主要是因为不同的巡线区域存在不同的危险等级，如管道过江处所占比重大且管

道埋深较浅等，受外界腐蚀风险较大，因此要进行多次巡检，而人口分布较少的平原段，因人员较少，可减少巡检频次。

蚁群优化法的路径设计，实质上是“风险等级—巡检代价”的拟合过程：选择一个区域后，在可续航时间内规划一条最长的巡线路径，体现的就是在有限制的前提下规划到覆盖性最强的巡检路线。

为了落实该策略，还需要完成两条平行线：一是在现有基础资料（如土壤、管道类型等信息）的基础上建立综合风险评估模型（涉及土壤腐蚀性、第三方施工作业、管道事故历史数据等多个方面）；二是增加适应当前气象条件、管道设施的算法功能，以动态确定走线等，例如，某山区所实际使用的情况得出巡检方案，规划的巡线时间缩短了 25%，高风险地区的巡检覆盖率增加了 50%，达到了“高风险地区多巡”与“对资源进行有效使用”的效果。

3 系统集成与工程实践中的关键考量

3.1 技术融合的“渐进式”实施路径

技术改进过程中一定防止“技术主义”的问题，比如光纤式，如果要对天然气整个管道铺设，那么，对于这类型传感器的使用，费用会相当高，会给业主的财务成本造成一定的影响。因此，可以通过风险评估的过程，针对性地实施监测。在一般路段，它自身的风险程度并不是很高，可以采用以往传统的监测方式，它已经被实践所证明，可以在一定程度上满足初步监测的需求，并且处于合理的费用水平。而比如管道的高风险点、密集人口的管道线等重要的站点，因为一旦泄漏发生，产生严重的事故，所以，这样的监测方式只能在关键点上安装高精度的传感器，以充分保证能够及时、准确地捕捉到轻微的泄漏。

某省管项目中实施的改造工程，应用到了“重要站点加强，一般站点升级”的方式，实施一段时间，整体的监测效率提升有 40% 左右，较改造前能够更有效地发现潜在的泄漏；在整个成本方面，也产生了较好费用控制的效果，与全新型的改造方案即对原有的设备全面的更换相比，仅在费用上已经可以节省 30% 的费用。

3.2 人机协同的必要性

任何人工智能手段只是作为检测天然气泄漏的辅助手段，我们应当清晰地认识到这个主题，必须真正当人工智能的应用站在辅助的岗位上，成为天然气管道泄漏报警装置时，不应成为全自动判定者。比如多参数组合报警，在人工智能运用庞大的程序算法迅速分析大数据后报警，同时也必须留有员工手去仔细确认，因为人工智能的模型会受到过去所训练的数据的

局限性,例如罕见的自然灾害突然发生意外泄漏等,由此难免会有大量情况不在算法的范畴之内,人工手去复核,可能会发生算法没有出现偏差而人为后续处理出现偏差。一家管线企业就经过充分实践,在长期经验积累中,对该人机模式结合进行了详细了当的界定,对分环节的人机有所区分,经过诸多实践检验之后,相对合理的人机结合模式实现了该企业泄漏事故处置正确率相对较高,为天然气管道安全提供了有保障的基础。

4 未来发展的思考与建议

4.1 从“监测”到“预测”的能力延伸

目前更多的是“亡羊补牢”的模式,即泄漏事故后才去响应和救援,造成不必要的损失和危害。与上述分析模式相比较,未来有较深潜力的研究可以考虑“亡羊补牢”的事前模式——充分发挥管道运行过程中“海量”的历史流量和压力波动信息、有针对性“精细”测量土壤环境包括酸碱度、湿度等因素、长时间测量腐蚀因素包括管壁厚损失的微小信息等数据积累,建设高度精细的泄漏风险预测模型,此模型能够主动提前发现管道系统的薄弱区域,如,使用先进算法挖掘不同阴极保护数据与腐蚀速率之间复杂的关联性规律,据此预测腐蚀穿孔可能发生的地点,以及此时间点之后一个时间段内发生穿孔的概率,真正做到由过去的“被动监测”向当前“主动预警”的模式转变,为天然气管道的安全运行提供有力保障。

4.2 边缘计算与云端协同的架构创新

面对5G与物联网技术日益广泛及快速的推广和使用,部分信息处理可下探到边缘,例如,管道阀室配备的智能设备,对于采集的数据信号,其设备可以通过智能算法实时进行预处理,提取关键特征。这样只上传关键的有效数据。这一“边缘—云端”的分布式架构方案,好处很多,主要是通过这种方式可以有效缓解网络传输的流量压力,减少网络拥堵情况的发生概率,提升系统的实时性,从而保证监测的管道状况能够及时、正确地反馈相关信息,在较为偏远地区大规模布置传感器的使用案例中这一优点显得更加突出,能够突破偏远地区网络环境较差、无法支撑大量数据网络传输的障碍。

4.3 标准体系与产业生态的完善

目前,各生产商的监测装置大多属于异构设备,数据端口通信协议、格式不一致,算法模型由于设计思路、目的不同而存在不兼容问题。这导致监测各技术手段间的互联互通、协同工作程度较低,限制了相关技术的融通深度和融通广度。笔者主张由行业协会发挥协调、组织作用,由行业顶级学者、骨干企业等

共同探讨确立科学、合理、规范的数据交互标准以及严谨、全面的性能测试规范。

明确数据交互的端口、数据的组织方式、算法模型评价指标等要素,冲破数据和“技术壁垒”,创造开放共享、互惠共赢的发展格局,为相关监测技术融合发展提供基础、互通的桥梁和纽带,实现天然气管道泄漏监测技术的全面提升。

5 结论

本文针对目前天然气管道泄漏监测技术中存在的“复杂环境”和“监测精确”长期难以同时兼顾的问题,实际上是将创新技术与实战需求结合,从工程实践中提升监测技术的技术融合。工程实践反映“复杂环境”的主要因素包括“管体复杂”“沿线环境复杂”和“传感器信息复杂”。例如,管道在沿线的地形地貌、地质条件等方面复杂多样,有的管道经过崇山峻岭,有的管道经过湿地沼泽,有的管道穿越城市中心,也有的穿过荒芜深山等;针对不同的环境因素会对天然气管道运行相关数据带来难以避免的干扰。因此,笔者在前述大数据相关概念的基础上,分析研究了一种智能算法的应用。目前在众多机器学习与深度学习模型的演进中,都能够很好地进行数据判断,即基于目前相关设备所检测的数据结果,智能算法在得出管道运行状态后,便能够明确分析出异动数据的异常特征,使检漏的相关误差变得可以大幅度降低。

参考文献:

- [1] 王建国,李志强,张宏伟.光纤分布式声波传感技术在输气管道泄漏监测中的应用[J].天然气工业,2022,42(5):120-127.
- [2] 刘畅,陈立平,赵永涛.基于D-S证据理论的多传感器数据融合在管道泄漏检测中的应用[J].仪器仪表学报,2023,44(3):456-463.
- [3] 张伟,马明,李洋.长输天然气管道泄漏监测技术现状与发展趋势[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(2):150-157.
- [4] 陈昊,王晓东,刘俊杰.LSTM神经网络在管道振动信号降噪中的应用研究[J].振动与冲击,2024,43(1):89-95.
- [5] 杨丽,周强,吴明.无人机巡检路径优化算法在油气管道监测中的对比分析[J].工程科学与技术,2023,55(4):210-217.
- [6] 张逸飞,郭志强,周昌智,等.天然气储运泄漏检测方法[J].造船技术,2022,50(04):70-75.
- [7] 吴玉得.加强石油天然气管道运行安全隐患管理的策略研究[J].石化技术,2020,27(11):212-213.