

长输天然气管道泄漏检测系统应用分析

黄从坤（山东济华润昌燃气有限公司，山东 聊城 252100）

刘天伟（山东港华燃气集团有限公司，山东 济南 250000）

摘要：长输天然气管道作为国家能源输送的关键基础设施，其泄漏检测技术的科学性与可靠性直接关系到能源安全、生态环境保护及公共安全。本文从理论层面系统梳理了压力流量平衡法、光纤传感、声波检测、红外热成像及智能算法等主流泄漏检测技术的核心原理、适用边界及技术瓶颈，结合《油气输送管道完整性管理规范》等行业标准，深入分析了复杂工况下检测系统面临的技术适配性难题。

关键词：长输天然气管道；泄漏检测；技术融合；智能诊断；全生命周期管理

中图分类号：TE88；TP274 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)028-0151-03

Application analysis of leakage detection system for long-distance natural gas pipelines

Huang Congkun (Shandong Jihua Runchang Gas Co., Ltd., Liaocheng Shandong 252100, China)

Liu Tianwei (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: The long-distance natural gas pipeline as one of the important national energy transportation infrastructure, the reliable leakage detection technology is closely linked with energy security, ecological environment protection and public safety. The basic concepts, the application range and technical obstacles of common leak detection technology including pressure and flow balance method, fiber optic sensing technology, acoustic sensing, infrared thermal imagery and intelligent algorithm are comprehensively summarized in this article from the aspects of theories. In addition to the industry specifications, such as “Integrity Management Specification for Oil and Gas Pipeline”, it systematically studies the adaptability technical challenge of detection systems in complex working conditions.

Keywords: long-distance natural gas pipeline; Leakage detection; Technology integration; Intelligent diagnosis; Whole life cycle management

1 研究背景

伴随我国“双碳”目标实施，天然气占我国能源消费结构的比重不断提升，2024年全国的长输天然气管道里程已达13万公里以上，覆盖全国范围内的能源输送。与此同时，由于管道被腐蚀、第三方破坏、应力疲劳等原因而导致的泄漏事故层出不穷，近5年平均重大泄漏事故15~20起，造成能源浪费（单起重大事故平均约 $50 \times 10^4 \text{m}^3$ 天然气），甚至导致火灾、爆炸等灾难性事故。泄漏检测作为管道完整性管理中的关键技术环节，管道泄漏检测技术的选择与系统优化也成为其安全平稳运行的重要课题。

2 主流泄漏检测技术原理与适用边界

2.1 基于流体力学的传统检测技术

压力流量平衡法：该方法以管道中流体运动的连续性方程及能量守恒定律为依据，依据上下游压力、流量出现的异常变化情况进行判断是否存在泄漏。如实时模型法(RTM)，通过建立管道流体动力学模型，比较实测与模型预测结果之间的差值判断是否存在泄漏；**压力梯度法(PIG)**，依据压力随距离沿管道的梯度变化状况进行泄漏定位。优点：无须额外敷设传感器、

初始投资较少，适用于地形平坦及工况稳定的长输管道段；缺点：不敏感于微小泄漏（泄漏率<1%），对压缩机启停、温度变化等因素较为敏感，精度能达到 ± 5 公里，难以满足高后果区的精准监测。

负压波检测法：泄漏产生的流体快速逃逸产生的负压波以声速沿管道向上下游传播，在设置的压力传感器上捕捉波形突变点，从而实现泄漏的检测和定位。**优势：**反应迅速(<30s)，适用于突发大泄漏（泄漏率>5%）的应急监测；**局限：**负压波随距离沿管道传播的过程中受管内摩阻、弯头数量的影响而衰减，因此对泄漏定位精度随距离的衰减，还不能检测缓慢泄漏（例如密封圈老化造成的微量泄漏）。

2.2 基于物理传感的新型检测技术

2.2.1 光纤传感技术

分布式光纤温度传感(DTS)：基于光时域反射法，采用光纤检测管道附近温度场变化，泄漏的天然气发生焦耳-汤姆逊效应后会造成局部温度降低，呈现温差区，可被识别。**优点：**抗干扰能力强，穿跨越段、电磁复杂地段使用；测温精度达到 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ；受外界温度的影响比较大，对于冬日冻土区域温度检测灵敏

度会较低。

分布式声波传感 (DAS)：利用光纤断面检测管道周边振动，泄漏湍流噪声拥有特征频率(10–100Hz)，能够与第三方施工、自然振动背景噪声相区分。优点：单纤监测距离超过100km，定位精度 $\pm 50m$ ，可以进行全管道实时监测，但易受风雨、管道振动等噪声干扰，需要配合信号处理手段提升识别精度。

2.2.2 声波检测技术

管道内检测 (清管器)：管道内检测 (清管器) 携带超声波、漏磁等检测装置在管道中随流体运行，在管道内检测管壁厚度、缺陷(裂纹)等，间接判断管道的泄漏危险性，优势：可以准确定位管道的内壁腐蚀、裂纹等缺陷(检测精度 $\pm 0.1mm$)，对管道的维修提供了准确的数据；局限：管道内检测 (清管器) 需要停气检测，周期较长 (一条管道检测一般需要3~5天时间)，不能满足实时监测的要求。

地面声学检测 (GIS)：将麦克风阵列架设在管道上方，接收管道泄漏所产生的低频声波(<20Hz)，利用波束成形算法进行泄漏定位。优点：不与管道直接接触检测，泄漏定位精度为 $\pm 2m$ ，可适用于城市人口密集、稠密区的准确定位；缺点：易受到交通噪声、工业设备等环境噪声的干扰，夜间检测比白天效果好。

3 检测系统应用中的核心理论问题

3.1 单一技术的适用边界限制

不同检测技术的物理原理决定了其适用场景的局限性：

光纤 DAS 技术因长距离的监测特点，在长输油气管道检测过程中占有一席之地。它沿着输气管线上铺设的光纤，去探知沿线各个信号，最长可以达到数十公里甚至上百公里的无缝覆盖。但是实际上，这种方法由于其先天的不足，在实际应用中也显得非常局限：在高湿度的应用环境下，因为管道周围空气中的水汽会对光纤产生影响，在信号的传输过程中引入大量的噪声；在剧烈震动环境下，如施工场地、铁路等附近环境中的剧烈震动干扰，会使管道传感器周围的噪声信号特别强，强的信号甚至会完全覆盖天然气泄漏产生的特征信号；为了解决这一问题，往往还要加装相对复杂的信号降噪处理装置，设备的成本增大，而且对系统的实时性及稳定性要求高。

地面声波检测是通过对泄漏时天然气产生的声波进行检测来实现监测的。在最理想的状态下，可以在单点上监测到泄漏声波的范围约500m，并且有一定的精度。而长输天然气管道往往有几十公里、上百公里，仅仅一个地面声波检测点或少数几个点远远达不到对长输管道的监测范围的要求。所以，仅仅依靠地

面声波检测技术是无法对长距离的管道进行有效检测的，必须和其他的检测技术如分布式光纤测温技术、压力流量监测技术相结合，组成一个综合的监测网络从而达到监测整个长距离管道，全方位监测长输管道的情况，提高检测的效率和可靠性。

3.2 多源数据融合的理论瓶颈

高质量的标注数据是训练有效机器学习模型的前提。实际工程中的长输天然气管道泄漏样本很少，在整个长输油气管道系统中，泄漏概率很低。长输管道是长距离输送天然气的重要基础设施，管线大多深埋于地下或者远山区，地形条件复杂且难以保养维修。长输管道泄漏由多种要素共同影响，如管道腐蚀老化、外力碰撞、地质沉降，各种因素发生较为随机，因此在长输管道正常运行过程中实际泄漏数据采集非常有限。对于泄漏有限的样本，模型训练学习困难，不能很好地学习到不同类型的泄漏特征信息。以卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN) 为代表深度神经网络模型为例，模型在训练的过程中通过对大规模标注信息的训练，建立泄漏特征信息表征，少样本泄漏使模型只能学习到部分简单的特征，对于一些细微泄漏特征表现复杂的泄漏特征不能进行学习，降低了泄漏模型的泛化性能。

在其他工况条件下，模型对于管道的检测精度有所降低，例如当管道所处地理条件发生变化（山区、平原、沼泽地不同环境下的管道地质环境、应力状态等不同），气候条件发生变化（管道处于严寒地区，温度更低可能导致管道材质脆弱，管道处于高温环境，温度较高使金属管道腐蚀加速），运行压力发生变化等条件下。

3.3 复杂工况下的检测效能衰减

穿河穿隧区：穿河穿隧管段所处的特殊工况管道环境十分复杂，水下的管道长时间受水流持续、大强度冲击，在穿隧道段管道又受到隧道结构随车、地铁等结构振动的影响，在这种复杂工况下，背景噪声具有多样性，其频率范围大多与管道泄漏信号频率重合，此时传统的声学算法由于难以对背景噪声和管道泄漏信号加以有效区分，很容易产生误判，给管道泄漏检测增加了很大的困难。

城市高后果区：对于城市高后果区来说，存在的问题也不少。城区内人口密度大，建房集中，遮挡点多，很难将无人机作为红外检测的有效工具，无人机在空中的行驶路线也受建筑遮挡，难以准确地获取管道温度异常信息。而地表声波检测同样需要受阻，城市的交通很发达，经过车辆等交通工具所产生的噪声干扰太大，导致信号干扰严重，即使再先进、效果

再好的声波检测设备，在噪声环境中也不容易探测到管道泄漏声信号。因此，亟须开发一种信号处理算法具有更强的抗干扰能力，以应对城市高后果区复杂的检测环境。

4 检测系统优化的理论框架与实施策略

4.1 多技术协同检测体系构建

一级预警后，系统会自动响应、启动地面声波侦察或无人机红外巡线，地面声波侦察装置利用先进的声波感应设备来感知管道由于泄漏而产生极小的声波变化，定位精准度可达到 $\pm 50\text{m}$ 左右。无人机搭载红外高清晰度摄影头，采用低空飞行的形式来对输油气管道线路进行地毯式搜索，通过泄漏点与其周围环境存在温差来发现管道泄漏段的位置，为及时处理提供导向。

在精准定位泄漏区段后，会派遣智能清管器或管道机器人深入管道内部开展内窥检测。智能清管器周身配备多种高精度传感器，能在管道内平稳运行的同时，对管道内壁进行细致“体检”。管道机器人则凭借灵活的机械臂与高清摄像头，可近距离观察管道内部状况，精确认定泄漏类型，无论是因长期腐蚀导致的穿孔，还是因应力集中引发的裂纹扩展，亦或是第三方施工等外力造成的破坏，都能准确判断，为后续维修决策提供坚实可靠的依据。

4.2 智能算法优化与数据融合理论

4.2.1 多源数据特征融合方法

通过提取压力变化率、流量不平衡度、声波信号能量值、温度梯度等12个关键特征，并运用主成分分析（PCA）算法对原始数据进行降维分析去除冗余信息。如将压力和流量数据映射到主成分空间来彰显泄漏事件的关键特征，抑制压缩机启停等干扰因素。

4.2.2 集成学习模型构建

CNN因其具备对采集的声波信号信息的全面分析提取能力，有效解析其时频域信息。因此，在长输管道运行过程中，若发生泄露，将会有相应的泄漏湍流噪声，CNN可有效的响应这种由泄露引起的湍流噪声特征，并将其提取成为可被系统识别的特征信息。与此同时，另一模型（假设为模型B）也在并行的状态下对管道运行状态进行分析监测，当两个模型同时给出泄露告警信息时，结合双重识别的机制，最终判别泄露的发生。经大量的实试验结果统计发现，基于上述联合检测的方法，系统漏报率由之前的22%成功下降至8%，极大地保证了长输天然气管道泄漏检测的正确率和可靠性。

5 工程实践与案例分析

西气东输某平原段优化实践：长度为150km的标

段原采用单一负压波检测系统，2022年因为压缩机启停、温度剧变等因素发生误报17次，漏检3次（泄漏率1%-2%）。

改进方法：采用随机森林算法对压力、流量、光纤振动信号进行处理，同时利用管道历史工况和当前运行工况建立智能工况波动去除策略，该策略能够对正常工况波动造成的干扰信息进行有效去除，大幅减少泄漏误报率。

效果：新版算法以及过滤算法应用以来，从每年几十起的误报下降到3次/年，零漏报率；泄漏定位误差从 $+/-5$ 公里下降为 $+/-100\text{m}$ ，使得泄漏位置可快速精确定位。

此外，泄漏响应时间为10min平均变为2min，即泄漏发生之后，有关部门可以在最短时间内发现，并启动应急处理的机制，为后续的抢险救援工作做好充分准备，进一步提升了应急处置效能，有效保证了长输天然气管道运行的安全稳定。

6 结论

单个检测技术已经不能满足复杂实际长输管道泄漏工况，因而需要摆脱单一检测技术，形成基于传统检测技术的“基础设施”，新型传感技术的“有益补充”和基于智能算法处理的“提升促进”。其中，传统检测技术如负压波、流量平衡等在实际应用多年的技术，具有不足，即检测精度和检测及时性。新型传感技术如分布式光纤传感，基于传感器光纤感压和分布式光纤长距离测量特征，进行检测技术的有益补充。在新型检测技术的基础设施和有益补充的基础上，基于智能算法处理，实现对数据的再挖掘和再分析。综合实现长输管道泄漏的检测有效性、检测及时性和检测准确性。

参考文献：

- [1] 李保生, 王树立, 魏新利. 长输天然气管道泄漏检测技术研究进展 [J]. 油气储运, 2019, 38(5):501-507.
- [2] 陈严飞, 李霄, 张仕民. 基于分布式光纤传感的管道泄漏检测技术应用 [J]. 压力容器, 2020, 37(8):45-51.
- [3] 王莉莉, 乔宏宇. 机器学习在管道泄漏检测中的应用研究 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(12):268-273.
- [4] 帅健, 张春娥, 陈福来. 天然气管道泄漏检测技术对比及适用性分析 [J]. 天然气工业, 2007, 27(3):112-115.
- [5] 张来斌, 王朝晖, 樊建春. 长输管道泄漏检测技术的现状与发展趋势 [J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(1):46-51.