

基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位方法研究

李运成, 岳晟, 李自然

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ERA.2025060028

摘 要 : 本文对基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位方法进行了论述, 通过优化传感器布局、构建融合算法及实时动态跟踪等手段, 提出基于压力流量、声波信号、温度变化传感协同的定位方法, 进一步提升泄漏定位精度与可靠性的效果, 解决输油管道泄漏难以及时精准定位的问题, 为保障管道安全运行提供有力支撑。

关 键 词 : 多传感器; 融合; 输油管道; 泄漏定位

Research on Leak Location Method of Oil Pipeline Based on Multi-sensor Fusion Technology

Li Yuncheng, Yue Sheng, Li Ziran

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd. Changde, Hunan 415137

Abstract : This paper discusses the leak location method of oil pipelines based on multi-sensor fusion technology. By optimizing sensor layout, constructing fusion algorithms, and real-time dynamic tracking, a positioning method based on pressure and flow, acoustic signals, and temperature change sensing collaboration is proposed. This method further improves the accuracy and reliability of leak location, solves the problem of difficult and timely precise positioning of oil pipeline leaks, and provides strong support for ensuring the safe operation of pipelines.

Keywords : multi-sensor; fusion; oil pipeline; leak location

输油管道作为能源输送关键纽带, 其安全运行关乎国计民生。然而, 管道泄漏事故频发, 不仅造成经济损失, 还威胁生态环境。传统单一传感器定位方法存在诸多不足, 难以满足精准、及时定位需求。多传感器融合技术凭借独特优势, 为输油管道泄漏定位带来新契机。本文聚焦此技术, 深入探究其在输油管道泄漏定位中的应用, 力求突破现有定位困境, 提升管道安全监测水平。

一、多传感器融合技术的特点

(一) 数据多元丰富精准感知

多传感器融合技术凭借其数据多元丰富的特性, 能够提升泄漏定位的精准度。输油管道运行涉及压力、流量、温度、声波等多种物理量变化, 通过部署压力传感器, 可实时监测管道内压力波动, 一旦发生泄漏, 压力会出现异常下降; 流量传感器则能捕捉流量变化, 泄漏处会导致流量失衡。温度传感器可感知因泄漏引发的局部温度差异, 声波传感器能探测到泄漏瞬间产生的声波信号。这些不同类型传感器采集的数据从多个维度反映管道状况。将这些多源数据融合, 利用数据融合算法进行分析处理, 能有效去除噪声干扰, 挖掘数据间潜在关联, 精准定位泄漏点。虽然单纯依据压力数据可能误判泄漏位置, 但若结合流量、温度等数据综合分析, 便能更准确锁定泄漏位置, 为及时抢修提供有力依据。

(二) 提升系统可靠稳定性能

输油管道分布广泛, 运行环境复杂多变, 恶劣天气、电磁干

扰等因素随时可能影响传感器正常工作。多传感器融合技术通过多源数据相互校验, 提升系统在输油管道泄漏定位中的可靠稳定性能。当某一压力传感器因受到电磁干扰出现数据异常波动时, 流量传感器、声波传感器等其他类型传感器的数据仍保持正常。融合系统可依据这些正常数据, 运用特定算法对异常压力数据进行修正或排除, 确保对管道状态判断的准确性^[1]。不同类型传感器对环境干扰的敏感程度各异, 部分传感器在高温环境下性能稳定, 另一些在强电磁环境中表现良好。将多种传感器融合, 即便部分传感器受环境影响出现故障, 其他传感器仍能正常工作并提供有效数据, 维持系统基本功能, 保证泄漏定位工作持续进行。

(三) 智能互补拓展监测范围

不同类型传感器具有不同监测特性, 声波传感器对近距离泄漏产生的高频声波敏感, 能精准定位近处泄漏点; 分布式光纤传感器可沿管道长距离铺设, 通过监测光纤中光信号变化, 实现对长距离管道的整体监测, 虽定位精度相对较低, 但能快速发现大范围潜在泄漏区域^[2]。将两者融合, 当声波传感器检测到疑似泄漏信号后, 分布式光纤传感器可进一步确定泄漏大致位置, 缩小排

查范围,实现优势互补。压力传感器、流量传感器等也能与其他传感器协同工作,从不同角度监测管道状态。这种智能互补的监测方式拓展了输油管道监测范围,使管道沿线任何位置发生泄漏都能被及时察觉并精确定位,全面提升输油管道泄漏监测与定位能力。

二、基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位方法

(一) 压力流量数据融合定位

在输油管道沿线,按照一定间隔合理布置压力传感器和流量传感器,确保能全面覆盖管道。压力传感器实时采集管道内各监测点的压力值,流量传感器则同步获取对应位置的流量数据。当管道发生泄漏时,泄漏点上游压力会升高,下游压力降低,而流量在泄漏点处会出现异常波动,上游流量增加,下游流量减少。通过建立压力与流量的数学模型,结合流体力学原理,对采集到的压力和流量数据进行深度分析。运用基于质量守恒和能量守恒定律的管道流动方程,将压力和流量数据代入方程中进行求解;根据压力变化趋势初步判断泄漏点所在的大致区间,再利用流量数据进一步精确泄漏位置^[3]。在实际操作中,由于压力和流量数据可能受到管道摩擦、油泵运行状态等多种因素干扰,可采用卡尔曼滤波算法对原始数据进行预处理,去除噪声干扰,提高数据的准确性和稳定性;将经过滤波处理的压力和流量数据输入到融合定位算法中,该算法综合考虑压力和流量的变化关系,通过不断迭代计算,最终确定泄漏点的准确位置。

(二) 声波信号联合分析定位

当输油管道发生泄漏时,油品泄漏瞬间会产生强烈的声波信号,该信号会沿着管道壁和周围介质传播。在管道沿线安装多个声波传感器,形成声波监测网络。这些声波传感器能够捕捉到不同位置、不同强度的声波信号。在具体操作过程中,需对声波传感器采集到的原始信号进行预处理,采用小波变换等信号处理技术,去除信号中的噪声和干扰成分,突出泄漏产生的有效声波特征。根据声波传播的特性,利用时差定位原理进行泄漏点定位。由于泄漏产生的声波信号会在不同时间到达各个声波传感器,通过精确测量声波信号到达不同传感器的时间差,并结合声波在管道介质中的传播速度,运用双曲线定位算法,就可以计算出泄漏点的位置。假设有三个声波传感器 A、B、C,当泄漏发生时,声波信号先到达传感器 A,然后依次到达 B 和 C,通过测量声波到达 A 与 B、A 与 C 的时间差,以及已知的声波传播速度,在以 A、B、C 为焦点的双曲线簇上确定泄漏点所在的位置^[4]。为了提高定位精度,还可以引入更多的声波传感器,增加定位方程的约束条件,减少定位误差。考虑到实际环境中可能存在管道内油品流动的噪声、外界环境噪声等多种声波干扰源,还需采用模式识别技术对声波信号进行分类和识别,排除干扰信号,准确识别出由泄漏产生的声波信号,提高声波信号联合分析定位的准确性和可靠性,实现对输油管道泄漏点的快速、精准定位。

(三) 温度变化传感协同定位

在输油管道周围的土壤或管道壁上安装分布式光纤温度传感

器和接触式温度传感器,分布式光纤温度传感器可沿管道长距离连续测量温度分布,能快速发现管道沿线温度异常区域;接触式温度传感器则对重点监测部位进行定点精确测温,两者相互配合,实现对温度变化的全面感知。当管道发生泄漏时,泄漏的油品与周围环境发生热交换,导致泄漏点附近温度场发生变化。对于埋地输油管道,泄漏油品会使周围土壤温度升高,分布式光纤温度传感器能够捕捉到这种温度升高的趋势,并将温度变化信息以光信号的形式传输至解调仪,解调仪将光信号转换为温度数据。通过对分布式光纤温度传感器采集的温度数据进行分析,运用温度场反演算法,初步确定泄漏点所在的大致范围。利用接触式温度传感器对初步确定的泄漏区域进行精确测温,获取更准确的温度变化数据。结合传热学原理,建立泄漏点温度场模型,将接触式温度传感器测量的数据代入模型中进行求解,精准锁定泄漏点的位置。在实际操作中,考虑到环境温度的自然波动、太阳辐射等因素对温度测量的影响,采用自适应滤波算法对温度数据进行处理,消除环境因素干扰,突出泄漏引起的温度变化特征^[5]。通过对历史温度数据的学习和分析,建立温度变化趋势预测模型,提前预警可能发生的泄漏风险,实现对输油管道泄漏的实时监测与精准定位,保障输油管道的安全运行。

三、基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位策略

(一) 优化传感器布局

在输油管道复杂的运行环境中,合理的传感器布局能够最大程度发挥多传感器融合的优势。需全面分析输油管道的地理信息、运行工况以及历史泄漏数据,对于断层、软土地基等管道穿越地质条件复杂区域,由于管道受地质因素影响易发生变形进而引发泄漏,应加密布置传感器,确保对可能出现的泄漏情况能及时察觉^[6]。在泵站进出口、阀门连接处等管道的关键节点,因压力变化大、机械应力集中,是泄漏高发区域,需重点部署各类传感器,包括压力、流量、声波以及温度传感器等,实现对这些部位的全方位监测。考虑到传感器的监测范围与精度,根据不同传感器的特性确定其安装间距。分布式光纤温度传感器监测范围广但定位精度相对较低,可沿管道长距离均匀铺设,用于初步筛查大面积温度异常区域;接触式温度传感器精度高,在重点怀疑区域或已通过分布式光纤传感器锁定的大致泄漏区间内,按照合适间距精准安装,获取更精确的温度数据^[7]。对于声波传感器,依据声波在管道介质中的传播特性以及衰减规律,计算出合理的安装间隔,确保能有效捕捉到泄漏产生的声波信号且信号不会因传播距离过长而失真。还需考虑传感器的安装方式,保证其与管道紧密连接,避免因松动影响数据采集的准确性。通过综合考量这些因素,构建起科学、高效的传感器布局网络,为后续基于多传感器融合技术的泄漏定位工作提供可靠的数据来源,提升泄漏定位的及时性与准确性。

(二) 构建融合算法运算

输油管道上各类传感器采集到的数据具有不同特征与量纲,需借助有效的融合算法对其进行整合分析。在构建融合算法时,

要根据传感器类型与数据特点，选择合适的融合模型。对于压力、流量这类连续变化且物理意义明确的数据，可采用基于物理模型的融合算法，结合流体力学原理的管道流动方程，将压力和流量数据代入方程进行求解，充分利用两者在泄漏发生时的内在关联，提高定位精度。对于声波信号和温度数据，因其受环境干扰较大且信号特征复杂，可运用基于机器学习的融合算法^[8]。以声波信号为例，采用神经网络算法，先对大量包含泄漏与非泄漏情况下的声波信号进行训练，让神经网络学习到泄漏声波信号的独特特征。当有新的声波信号输入时，神经网络能够准确判断是否为泄漏信号，并结合其他传感器数据进一步确定泄漏位置。在实际运算过程中，考虑到不同传感器数据的可信度与重要性不同，引入数据加权机制。在泄漏初期，压力传感器数据可能对判断泄漏位置更具指示性，赋予其较高权重；随着泄漏发展，流量数据的变化趋势对精确定位更为关键，适时调整权重，突出流量数据作用^[9]。为提高算法运算效率与实时性，采用并行计算技术，将不同传感器数据的处理任务分配到多个计算单元同时进行，缩短数据处理时间，实现对输油管道泄漏的快速响应与精准定位。通过不断优化融合算法运算，充分挖掘多传感器数据的潜在价值，提升基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位系统的智能化水平与定位效能。

（三）实时动态跟踪定位

输油管道运行状态处于动态变化中，泄漏情况也可能随时间推移而发展，需进行实时动态跟踪定位。在实际操作中，利用实时通信技术，将各类传感器采集的数据以最短延迟传输至数据处理中心。数据处理中心运用构建好的融合算法对实时数据进行持续分析，一旦发现异常，立即启动实时动态跟踪流程。当通过压

力流量数据融合定位初步确定泄漏点位置后，持续监测该区域周边传感器数据变化^[10]。若声波传感器检测到该区域声波信号强度持续增强，结合温度传感器显示温度异常升高，印证泄漏情况，并依据新采集的数据不断更新泄漏位置信息。为实现更精准的动态跟踪，建立泄漏传播模型。根据流体力学、传热学以及声学原理，模拟泄漏油品的扩散路径、温度场变化以及声波传播范围随时间的演变。将实时采集的传感器数据代入模型中，对模型参数进行实时修正，使模型更贴合实际泄漏情况。借助地理信息系统（GIS），将输油管道地理位置信息与泄漏定位数据相结合，以直观可视化方式呈现泄漏位置及其动态变化过程，为工作人员提供清晰的决策依据^[11]。实时动态跟踪定位还需具备预警功能，当预测到泄漏可能扩大至周边居民区、水源地等敏感区域，及时发出预警信息，以便提前采取防控措施，降低泄漏造成的危害。通过实时动态跟踪定位，在输油管道泄漏发生的全过程中，持续、精准地掌握泄漏位置与发展态势，为高效抢修与应急处置提供有力支持，保障输油管道安全运行与周边环境安全。

四、结束语

根据以上分析可知：合理布局传感器，能全面获取管道数据；构建有效融合算法，深度挖掘数据价值；实施实时动态跟踪，精准掌握泄漏动态。基于此技术的压力流量、声波信号、温度变化传感协同定位方法，大幅提高了定位精度与可靠性，实现对泄漏点的快速、准确锁定，为输油管道抢修及安全保障提供了可靠技术方案。

参考文献

[1] 陈伟. 基于 ICEEMDAN 和加权融合算法的多传感器输油管道泄漏定位方法研究 [J]. 油气田地面工程, 2025, 44(2): 49-54, 64.
[2] 白柯祯, 刘艳红, 翟延忠, 等. 成品油管道运输混油界面多传感器融合检测 [J]. 华北科技学院学报, 2024, 21(5): 57-64.
[3] 丛军, 王薇, 牟建荣. 管道附件影响的管道声发射信号衰减特性 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(4): 445-452.
[4] 王斌, 郭岩宝, 于海文, 等. 基于超声法清洗的管道蛇形机器人研究 [J]. 机床与液压, 2022, 50(11): 35-40.
[5] 张继峰. 石油储运管道的智能监测与维护技术研究 [J]. 石油石化物资采购, 2023(23): 67-69.
[6] 蔡昌新, 易康, 廖锐全. 长输油管道泄漏检测与定位技术研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(24): 10177-10189.
[7] 李明, 李慧娜, 郭辉, 等. 管道泄漏检测及定位算法的改进和应用 [J]. 焊管, 2023, 46(3): 31-34, 40.
[8] 刘珊珊. 基于负压波法输油管道泄漏监控软件的开发 [J]. 北京石油化工学院学报, 2023, 31(4): 40-44.
[9] 田海峰, 张藤, 陈默, 等. 一种基于气压感知的地下输油管道泄漏监测系统 [J]. 曲阜师范大学学报 (自然科学版), 2023, 49(2): 77-80.
[10] 施晓东. 基于次声波的海底输油管道泄漏监测系统实施 [J]. 科技资讯, 2022, 20(11): 1-3.
[11] 沈志军, 冯弋秦, 韩艳敏. 长距离石油输油管道泄漏原因分析与泄漏事故应急抢险技术 [J]. 现代职业安全, 2024(10): 37-39.