

压力管线泄漏检测技术综述与发展趋势

佟美皓

秦皇岛港新益港务有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘要: 压力管线作为能源、化工、水利等国民经济命脉的关键基础设施,其安全稳定运行至关重要。管线泄漏不仅会造成巨大的资源浪费和经济损失,更可能引发火灾、爆炸、环境污染等灾难性事故,严重威胁公共安全与生态健康。因此,高效、精准、可靠的泄漏检测技术是保障管线系统完整性管理(PIM)的核心环节。本文旨在对当前主流的压力管线泄漏检测技术进行系统性综述,深入剖析其基本原理、技术特点、适用场景及局限性,并在此基础上,结合人工智能、物联网、大数据等新兴技术的发展趋势,探讨未来泄漏检测技术的智能化、集成化与前瞻性发展方向,为相关领域的研究与工程实践提供理论参考与技术展望。

关键词: 压力管线; 泄漏检测; 负压波; 声学监测; 光纤传感; 人工智能

引言

全球工业化与城市化加速,压力输送管线网络覆盖全球,如国家经济“大动脉”,承担巨量物资长距离、高效输送任务。但管线服役环境复杂,受内部腐蚀、外部应力等多因素影响,结构完整性受挑战,泄漏风险存在。历史上,管线泄漏引发诸多重大安全事故,如2010年美国密歇根州石油泄漏,造成严重生态灾难和高昂清理费用。这凸显了构建有效泄漏检测与定位系统(LDLS)的极端重要性。理想LDLS应具备高灵敏度、高可靠性、快速响应、精确定位及良好环境适应性等特点。经过数十年发展,泄漏检测技术从依赖人工巡检的被动模式,演进为融合多学科原理的主动、智能监测体系。本文将分类梳理现有技术,分析性能瓶颈,展望未来技术融合与创新方向。

1 压力管线泄漏检测技术分类与原理

根据检测原理和实现方式的不同,现有的泄漏检测技术大致可分为以下几类:基于过程参数监控的方法、基于信号传播特性的方法、基于直接感知的方法以及基于数据驱动与模型的方法。

1.1 基于过程参数监控的方法

1.1.1 质量/体积平衡法

该方法是最基础、应用最广泛的泄漏检测手段之一。其原理基于质量守恒定律:在理想无泄漏状态下,管线入口的累计流入量应等于出口的累计流出量。一旦发生泄漏,两者之间将出现不可忽略的差值(不平衡量)。当该差值超过预设的阈值(通常需考虑仪表精度、流体压缩性、热胀冷缩等因素引入的正常波动),系统即判定为发生泄漏。优点是原理简单,易于实现,成本低廉,对所有类型的流体均适用^[1]。缺点是灵敏度

低,无法检测微小泄漏;响应速度慢,需要较长时间的积分才能积累足够的不平衡量;无法定位泄漏点;易受仪表漂移、操作工况变化(如启停泵、阀门开关)的干扰,导致较高的误报率。因此,该方法通常作为其他高级方法的辅助或初级筛查手段。

1.1.2 压力点分析法(PPA)

该方法通过监测管线上特定位置(通常是首末端)的压力随时间的变化趋势来识别泄漏。当泄漏发生时,泄漏点上游压力会下降,下游压力也会随之降低,但变化速率和幅度有所不同。通过分析压力梯度的异常变化,可以判断泄漏。优点是实现相对简单,对突发性大泄漏响应较快。缺点是同样难以检测微小或缓慢发展的泄漏;定位能力有限;对压力波动敏感,例如由泵的启停或阀门操作引起的瞬态压力变化极易被误判为泄漏。

1.2 基于信号传播特性的方法

1.2.1 负压波法(NPW)

负压波法是目前应用最为成功的实时泄漏检测技术之一。其物理机理在于:泄漏瞬间,由于流体的突然流失,会在泄漏点处产生一个压力骤降的扰动,即负压波。该波以声速(在液体中约为1000-1500 m/s,在气体中约为300-400 m/s)沿管线向上下游传播。在管线两端安装高采样率的压力传感器,即可捕获到这一特征波形。泄漏定位的基本公式为:

$$L = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

其中,L为泄漏点距上游(或下游)传感器的距离,v为负压波在管线中的传播速度, Δt 为负压波到达上下游两个传感器的时间差。优点是响应速度快(秒级),能够实现泄漏的实时检测;定位精度较高(通常可达管

线长度的1%以内)；适用于液体和气体管线。缺点是对微小泄漏产生的微弱负压波信号检测困难；信号在长距离传输过程中会衰减和色散，影响远端检测效果；背景噪声（如泵、阀门、湍流噪声）会淹没或干扰负压波信号，导致误报或漏报；准确测定负压波速 v 是精确定位的关键，而 v 受流体性质、管材、温度等多种因素影响，难以精确获取。

1.2.2 声学/声发射监测法

该方法利用高灵敏度的声学传感器（如加速度计、水听器）直接拾取泄漏点因流体湍流、摩擦和冲击管壁而产生的宽频带声学噪声或超声波信号。与负压波不同，声学信号的频率更高，能量更集中。优点是对微小泄漏非常敏感，尤其适用于气体管线（气体泄漏产生的声学信号比液体更强）；通过分析信号的频谱特征，可以在一定程度上区分泄漏噪声与其他机械噪声^[2]。缺点是信号衰减比负压波更快，有效监测距离较短，通常需要沿管线布设多个传感器；环境噪声（特别是工业现场的机械振动）是主要干扰源，信号处理算法复杂；定位同样依赖于信号到达不同传感器的时间差，对传感器同步精度要求高。

1.3 基于直接感知的方法

1.3.1 分布式光纤传感技术（DOFS）

近年来，以拉曼散射和布里渊散射为基础的分布式光纤传感技术在管线泄漏监测领域展现出巨大潜力。该技术将通信光缆本身作为传感器，可实现对整条管线长达数十甚至上百公里的连续、分布式温度（DTS）或应变/振动（DAS/DVS）监测。（1）基于温度的DTS：当输送热油或冷媒发生泄漏时，泄漏点周围土壤或环境的温度会发生异常变化，DTS系统能精确定位这一温度异常点。（2）基于振动的DAS/DVS：泄漏产生的声波或振动会作用于埋在管线附近的光缆，引起光纤内光信号的相位或频率变化，从而实现了对泄漏声源的定位。优点是本质安全（无电、抗电磁干扰），适用于易燃易爆环境；真正实现分布式、长距离、准实时监测；空间分辨率高（可达米级甚至亚米级）；一根光纤可同时实现温度、振动、应变等多种物理量的监测。缺点是初期投资成本高；对于非温度敏感型泄漏（如常温水或气体泄漏），DTS效果不佳；DAS/DVS系统对信号解调和模式识别算法要求极高，易受外部振动（如车辆、施工）干扰。

1.3.2 示踪剂/化学传感器法

在输送介质中注入特定的化学示踪剂，然后在管线沿线的关键位置（如阀室、河流穿越点）布设对应的化

学传感器。一旦发生泄漏，示踪剂会随介质一同渗出，被下游的传感器捕获。优点是检测结果直观、可靠，几乎无误报。缺点是属于点式监测，无法覆盖全线；响应滞后，无法实时预警；需要持续注入示踪剂，增加运营成本和复杂性；可能对输送介质造成污染，应用场景受限。

1.4 基于数据驱动与模型的方法

1.4.1 状态估计与观测器法

该方法首先建立一个能够精确描述管线水力、热力学行为的数学模型（如基于圣维南方程组的一维瞬变流模型）。然后，利用实时采集的过程数据（压力、流量等）作为输入，通过卡尔曼滤波、鲁棒观测器等算法，对管线内部各点的状态（如压力、流速）进行在线估计。将估计值与实际测量值进行比较，其残差若超出正常范围，则可判定为泄漏^[3]。优点是理论上可以克服传统过程参数法对工况变化的敏感性，通过模型补偿正常操作引起的参数波动，从而降低误报率；具备一定的故障隔离能力。缺点是模型的精度高度依赖于管线的几何参数、流体物性、边界条件等，而这些参数在实际中往往难以精确获知，且会随时间变化（如结蜡、腐蚀），导致模型失配，影响检测性能；计算复杂度高，对硬件平台有一定要求。

1.4.2 机器学习与人工智能方法

这是当前研究的热点方向。该方法将泄漏检测视为一个模式识别或异常检测问题。通过收集大量包含正常工况和各种泄漏工况的历史数据，训练机器学习模型（如支持向量机SVM、随机森林RF）或深度学习模型（如卷积神经网络CNN、长短期记忆网络LSTM），使其能够自动学习并识别泄漏的特征模式。CNN擅长处理具有空间特征的数据，如将多点压力或声学信号构建成二维“图像”进行识别。LSTM则擅长处理时间序列数据，能有效捕捉压力、流量等参数随时间演变的动态特征，对瞬态泄漏信号尤为有效。优点是不依赖于精确的物理模型，具有强大的非线性拟合和泛化能力；能够从海量、高维数据中挖掘出人眼难以察觉的复杂特征；随着数据的积累，模型性能可以持续优化。缺点是“黑箱”特性使得决策过程缺乏可解释性；模型的性能高度依赖于训练数据的质量和数量，获取真实、全面的泄漏样本数据成本高昂且困难；存在过拟合风险，对未见过的新型泄漏或工况可能失效。

2 技术对比与性能瓶颈分析

综合来看，各类技术各有千秋，也均存在难以克服的固有缺陷。表1简要对比了主要技术的关键性能指标。

表1 技术对比

技术类别	代表方法	响应速度	灵敏度	定位精度	抗噪性	成本	主要局限
过程参数法	质量平衡	慢(分钟-小时)	低	无	差	低	无法检测小泄漏, 误报率高
信号传播法	负压波	快(秒级)	中	高	中	中	微小泄漏难检, 噪声干扰大
	声学监测	快(秒级)	高(气体)	高	差	中高	监测距离短, 环境噪声敏感
直接感知法	分布式光纤	中快(秒-分钟)	高	极高	中	高	初期投资大, DTS对非温变泄漏无效
模型/数据驱动法	状态观测器	中(秒级)	中高	中	好	中高	依赖精确模型, 建模困难
	机器学习	快(秒级)	高	中高	好(经训练后)	中	依赖高质量数据, 可解释性差

从表中可以看出, 单一技术很难同时满足所有理想LDLS的要求。例如, 负压波法虽快且能定位, 但对微小泄漏和噪声敏感; 分布式光纤定位精度极高, 但成本高昂; 机器学习方法潜力巨大, 但面临数据和可解释性的挑战。因此, 当前工程实践中普遍采用“多技术融合”的策略, 以期优势互补, 提升整体系统的鲁棒性和可靠性。

3 未来发展趋势

3.1 多源信息融合与智能诊断

未来的LDLS将不再是单一传感器的孤立系统, 而是集成了压力、流量、声学、温度、振动、视频等多种异构传感器的综合感知网络。通过先进的多源信息融合算法(如D-S证据理论、贝叶斯网络、深度学习融合模型), 系统能够交叉验证来自不同传感器的信息, 有效抑制单一传感器的误报, 显著提升检测的置信度。更重要的是, 系统将具备智能诊断能力, 不仅能判断“是否泄漏”, 还能进一步分析“泄漏类型”(腐蚀穿孔、裂纹、第三方破坏)、“泄漏程度”和“潜在原因”, 为运维决策提供更全面的支持。

3.2 数字孪生驱动的预测性维护

数字孪生技术为管线安全管理带来了革命性的思路。通过构建一个与物理管线完全同步、高保真的虚拟模型, 可以将实时传感器数据、历史运行数据、环境数据(地质、气象)等全部映射到数字空间。在这个虚拟环境中, 不仅可以实时复现管线的运行状态, 用于高精度的泄漏检测与仿真, 更能利用AI算法对管线的健康状况进行评估, 预测未来可能出现的薄弱环节和泄漏风险, 从而实现从“事后响应”到“事前预防”的根本性转变, 即预测性维护。

3.3 边缘计算与云边协同架构

随着传感器数量的激增和采样频率的提高, 传统的中心化数据处理模式面临巨大的带宽和延迟压力。边缘计算技术允许在靠近数据源头的网络边缘(如RTU、PLC)进行初步的数据处理、特征提取和简单告警, 只将

关键信息或异常数据上传至云端^[4]。这种云边协同的架构既能保证本地响应的实时性(如秒级触发关阀), 又能利用云端的强大算力进行复杂的模型训练、大数据分析 and 全局优化, 是构建大规模、高效LDLS的理想架构。

3.4 自适应与自学习能力

未来的LDLS必须具备强大的环境适应能力。通过引入在线学习和强化学习机制, 系统能够根据不断变化的工况(季节、流量、介质)和环境噪声特征, 动态调整自身的检测阈值、滤波参数和识别模型, 实现“自校准”和“自优化”, 确保在各种复杂条件下都能保持稳定的高性能。

4 结语

压力管线泄漏检测技术历经从被动到主动、从单一到融合、从经验到智能的演进历程。尽管现有技术已能应对大部分常规泄漏场景, 但在检测微小泄漏、抑制复杂噪声、降低成本以及提升系统智能水平等方面仍面临挑战。未来的发展将深度融合物联网、人工智能、数字孪生等前沿科技, 构建一个多源感知、边缘智能、云端协同、具备自学习和预测能力的新一代智能泄漏检测与预警体系。这一体系不仅能极大地提升管线的本质安全水平, 减少事故损失, 还将推动管线完整性管理进入一个更加主动、精准和高效的新时代。持续的技术创新与跨学科合作, 将是实现这一目标的关键所在。

参考文献

- [1] 翟春晓, 李志林, 郑圣伟, 等. 压力管道泄漏检测技术优化研究[J]. 化工管理, 2025, (19): 126-129.
- [2] 张庆祥. 压力管道泄漏的声发射检测技术研究[J]. 石化技术, 2025, 32(03): 381-382.
- [3] 孙琼琼, 焦红军, 陈健. 压力管道泄漏信号检测与分析软件设计[J]. 特种设备安全技术, 2023, (03): 18-19.
- [4] 陈贵堂, 叶常青. 压力管道材料老化机理及其检验检测方法的创新研究[J]. 中国设备工程, 2026, (01): 180-182.