

天然气管道智能检测技术（漏磁 / 超声）优化研究

李 振 庞茂安（山东港华燃气集团有限公司，山东 济南 250000）

摘要：随着天然气管道运输网络的规模化发展，管道安全检测技术的智能化与精准化需求日益迫切。漏磁检测与超声检测作为天然气管道缺陷检测的主流技术，在实际应用中面临复杂环境干扰、缺陷识别精度不足、数据处理效率低下等问题。本文针对两类技术的核心瓶颈，从传感器阵列优化设计、多模态数据融合算法、缺陷特征智能识别模型三个维度展开研究。通过构建基于磁耦合共振的漏磁传感器阵列，有效提升弱磁场环境下的信号采集灵敏度；引入改进型目标检测网络实现超声回波图像的缺陷定位与分类，并结合证据理论建立多模态检测数据融合决策模型。

关键词：天然气管道；漏磁检测；超声检测；智能优化；多模态融合

中图分类号：TE973；TP274 文献标识码：B 文章编号：1674-5167(2025)031-0090-03

Optimization research on intelligent detection technology for natural gas pipelines (magnetic leakage/ultrasound)

Li Zhen, Pang Mao' an (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: With the large-scale development of natural gas pipeline transportation networks, the demand for intelligent and precise pipeline safety detection technology is becoming increasingly urgent. Magnetic flux leakage testing and ultrasonic testing, as mainstream technologies for defect detection in natural gas pipelines, face problems such as complex environmental interference, insufficient defect recognition accuracy, and low data processing efficiency in practical applications. This article focuses on the core bottlenecks of two types of technologies, and conducts research from three dimensions: sensor array optimization design, multimodal data fusion algorithm, and intelligent defect feature recognition model. By constructing a leakage magnetic sensor array based on magnetic coupling resonance, the sensitivity of signal acquisition in weak magnetic field environments can be effectively improved; Introduce an improved object detection network to achieve defect localization and classification of ultrasound echo images, and establish a multimodal detection data fusion decision model based on evidence theory.

Keywords: natural gas pipeline; Magnetic leakage detection; Ultrasonic testing; Intelligent optimization; multimodal fusion

漏磁检测与超声检测作为当下管道内检测领域的主流技术手段，各自发挥着独特作用。漏磁检测技术巧妙地基于铁磁性材料在被磁化后，若存在缺陷会导致磁力线泄漏形成漏磁场这一特性，精准识别管道缺陷。该技术具备检测速度快的突出优势，能够在较短时间内完成对长距离管道的检测作业，且检测成本相对较低，在大规模管道检测中具有较高的性价比。但不容忽视的是，其检测过程极易受到管道材质不均的干扰，不同材质区域的磁导率差异会造成漏磁信号的异常波动，影响缺陷判断的准确性；管道壁厚的变化同样会对漏磁信号产生影响，导致检测结果出现偏差。超声检测技术则是利用超声波在管道介质中传播时，遇到缺陷会发生反射、折射等特性来实现缺陷检测，同时还能精确测量管道壁厚。它在评估缺陷深度方面具有明显优势，能为管道安全状况评估提供关键数据。然而，在实际应用中，超声检测面临着回波信号易受噪声污染的棘手问题，各类环境噪声以及设备自身产生的噪声会叠加在回波信号上，使信号变得模糊不清，

增加信号分析难度；并且人工特征提取环节高度依赖检测人员的专业经验，不同检测人员对信号特征的理解和判断存在差异，导致检测结果的一致性和可靠性难以保证。

1 漏磁与超声检测技术现状及瓶颈

1.1 漏磁检测技术原理与局限性

漏磁检测作为天然气管道检测的常用技术，借助励磁装置将管道壁驱动至磁饱和状态。在这一状态下，当管道存在缺陷时，其缺陷处的磁导率会发生改变，进而引发漏磁现象。检测系统通过精心布置的传感器，对这些因磁导率变化而产生的漏磁信号进行精准采集，经一系列信号分析处理流程，最终实现对管道缺陷的精准定位与量化评估。不过，传统漏磁检测技术在实际应用进程中，暴露出诸多棘手的技术难题。在传感器阵列布局方面，早期设计缺乏全面考量，致使相邻通道间信号串扰问题突出。这种串扰严重干扰了信号的纯净度，尤其是在缺陷边缘区域，信号相互交织，使得缺陷边缘分辨率大打折扣，难以清晰界定缺

陷边界，为后续维修决策带来极大困扰。在弱磁场环境下，如管道母材磁导率存在较大差异时，漏磁信号本就微弱，加之环境噪声等干扰因素，导致信号信噪比极低。在这种情况下，微小尺寸的缺陷所产生的漏磁信号极易被噪声淹没，从而造成小尺寸缺陷漏检，给管道安全埋下重大隐患。从信号处理层面来看，传统漏磁检测长期依赖阈值分割等较为基础的方法。这类方法在简单噪声环境下尚可发挥一定作用，但面对天然气管道检测中复杂多变的噪声背景，其局限性愈发凸显，难以高效、准确地从混杂信号中提取出缺陷特征，严重制约了检测系统的性能提升与检测精度优化。

1.2 超声检测技术原理与局限性

超声检测技术在天然气管道检测领域应用广泛，其原理是通过探头发射超声波，利用超声波在管道介质中传播遇到缺陷时会产生反射回波的特性，基于对回波特性的精确分析来实现缺陷检测。在实际复杂的工业环境中，该技术遭遇了诸多棘手挑战。其一，天然气管道的曲率并非完全一致，且长期使用后管道表面粗糙度变化明显，这些因素会对超声回波信号产生强烈干扰。例如，在管道弯曲部位，超声波传播路径发生改变，回波信号出现散射与畸变，使得噪声抑制成为检测流程中的一大难题，常规的信号处理算法难以有效滤除这些干扰噪声，严重影响后续缺陷特征提取的准确性。

其二，缺陷定性环节高度依赖检测人员的专业经验。裂纹类缺陷与腐蚀坑所产生的回波特征在信号层面具有较高相似性，二者的回波均表现为信号幅值的异常变化。对于经验欠缺的检测人员而言，极有可能因难以精准区分细微差异而导致误判，将裂纹误判为腐蚀坑，或者反之，这无疑会对管道安全性评估的准确性造成严重影响，可能导致不必要的管道更换或忽略潜在的严重安全隐患。

其三，传统超声探头阵列采用固定孔径设计，这一设计缺陷致使其难以动态聚焦不同深度的缺陷。当检测深埋于管道内部的缺陷时，固定孔径的探头无法根据缺陷深度灵活调整聚焦位置，声波能量在传播过程中发散，无法有效汇聚于缺陷处，进而在检测区域内形成较大检测盲区，许多隐藏在深处的缺陷无法被及时发现，给天然气管道安全运行埋下了巨大风险。

2 检测技术优化方案

2.1 漏磁传感器阵列优化设计

针对弱磁场环境下的信号采集难题，本研究提出了基于磁耦合共振的传感器阵列优化方法。在该方法中，采用差分阵列结构，增设参考通道。通过参考通道与信

号通道的协同工作，能够有效抑制均匀背景磁场干扰，极大提升信号的抗噪能力，使得在复杂磁场环境下也能稳定采集有效信号。同时，创新性地引入磁耦合共振线圈，利用共振原理增强缺陷漏磁信号的耦合效率，使得传感器对弱信号的敏感度显著提高，即使极其微弱的缺陷漏磁信号也能被精准捕捉。此外，借助有限元仿真技术，对传感器间距进行精细优化。在全面分析不同间距下信号串扰情况的基础上，确定最佳间距值，在成功避免信号串扰问题的同时，将周向分辨率提升至毫米级水平，从而有效改善了对缺陷边缘的识别能力，能够清晰分辨出缺陷边缘的细微特征。

2.2 超声检测图像智能识别模型

为有效解决超声回波图像中复杂且精细的缺陷识别难题，我们构建了改进型目标检测网络模型。在模型的特征提取关键环节，创新性地引入注意力机制，通过对不同区域特征赋予不同权重，强化模型对缺陷边缘、纹理等关键特征的敏感度，确保细微的缺陷特征也能被精准捕捉。针对天然气管道检测场景中常见的腐蚀坑与轴向裂纹等缺陷形态，深入分析其尺寸、形状分布特点，对锚框参数进行精细化优化。经过大量实验验证，调整后的锚框参数能够更贴合小目标的实际分布，从而显著提升小目标检测精度，不放过任何一处潜在隐患。考虑到实际检测数据中正负样本不均衡的问题，采用焦点损失函数进行处理。通过动态调整损失函数权重，让模型在训练过程中更加关注少数类的缺陷样本，加大对难分类样本的学习力度，经过多轮训练优化，模型对少数类缺陷的检测能力得到显著提高，最终实现缺陷定位准确率的大幅跃升，为天然气管道安全运行提供更可靠的保障。

2.3 多模态数据融合决策模型

为充分挖掘并利用漏磁与超声检测各自的优势，实现两者互补信息的高效整合，本研究构建了基于Dempster-Shafer(D-S)证据理论的三级融合决策框架。该框架由数据层、特征层和决策层构成，各层相互协作，以提升检测精度。

在数据层，由于两类检测信号存在时空差异，我们采用了基于卡尔曼滤波的时空配准算法。通过对检测时间与空间位置的精准校准，将不同来源的检测数据统一到同一坐标系下，确保时间戳和空间坐标的严格对齐，为后续分析提供可靠的数据基础。

进入特征层，我们运用主成分分析(PCA)与小波变换相结合的方法，深入挖掘缺陷的几何特征，如长度、宽度、深度等，并细致提取检测信号的特征，包括信号幅值、频率、相位等关键参数。这些特征被组合成多维特征向量，全面且精准地描述缺陷属性，

为缺陷的准确识别提供丰富信息。

在决策层，通过科学定义基本概率分配（BPA）函数，量化不同证据对缺陷判断的支持程度，进而运用Dempster合成规则，融合多源检测信息。具体而言，我们通过计算缺陷置信度作为检测决策的依据：当融合置信度高于预先设定的阈值时，判定存在缺陷；若置信度处于中等水平，将该区域标记为可疑，以便后续重点复查；而低置信度区域则视为正常。

该精心设计的框架，成功将漏磁检测快速定位缺陷位置的优势与超声检测擅长深度评估缺陷状况的能力有效整合，显著提升了对复杂缺陷的综合识别效能，在实际天然气管道检测场景中展现出强大的应用潜力。

3 实验验证与分析

3.1 漏磁检测性能提升分析

在标准试验管道上，我们精心开展了一系列针对人工缺陷检测的实验，以此全面验证优化后的漏磁传感器阵列在性能方面的显著提升。实验筹备阶段，我们便对各项检测条件展开了细致入微的考量与严格把控，从温度、压力到管道材质特性等多维度因素，均参照实际工况进行模拟设定，力求实验环境最大程度贴近真实场景。实验伊始，各类数据采集设备便严阵以待，精准记录每一个关键数据。结果显示，相较于传统检测方法，优化后的漏磁传感器阵列在弱信号检测能力上实现了跨越式发展。在同样严苛的检测条件下，其缺陷检出率得到了大幅提升，尤其是针对小尺寸缺陷，表现更为突出。不仅如此，传感器输出信号的信噪比也大幅提高，为后续缺陷量化精度的改善筑牢了根基。通过对海量实验数据发现，深度检测误差较传统方法显著降低，充分彰显了磁耦合共振阵列在复杂磁场环境中所具备的突出优越性，能够更为精准、高效地完成天然气管道缺陷的检测与量化分析工作，为天然气管道安全运行提供坚实技术支撑。

3.2 多模态融合检测优势

在复合缺陷检测实验场景下，单一漏磁检测技术暴露出明显短板。浅裂纹因其特殊的物理特性，在漏磁检测的磁场变化监测体系中，产生的信号微弱且易受背景噪声干扰。当漏磁检测设备在管道表面移动时，浅裂纹所引发的磁场畸变极其细微，与周围环境噪声所产生的信号强度相近，这使得检测系统难以精准区分有效信号与噪声信号。根据实际检测数据统计，在复杂电磁环境下，浅裂纹检测信号的信噪比常低于3dB，导致浅裂纹存在较高的漏检风险，这意味着部分潜在的安全隐患无法被及时察觉。

单一超声检测则面临另一难题，由于管道内部复杂结构与多种缺陷类型产生的信号特征存在一定程度

的相似性。管道内部的焊缝、支撑结构等正常部件在超声检测中会产生反射回波，其波形与一些缺陷（如内部空洞、小面积腐蚀等）所产生的回波在某些特征参数（如波幅、渡越时间）上较为接近。在对信号进行分析判读时，检测人员或自动化分析算法极易因特征混淆而导致较高的误判率，可能将正常结构误判为缺陷，或对缺陷类型、程度做出错误评估。相关研究表明，在复杂结构管道中，单一超声检测的误判率可高达20%以上。

而多模态融合检测技术的出现，有效解决了上述困境。该技术通过精心构建的算法模型，深度整合漏磁检测对表面缺陷极为敏感的特性以及超声检测强大的深度分辨能力这两类互补信息。例如，所构建的融合算法采用贝叶斯推理框架，将漏磁检测获取的表面缺陷概率信息与超声检测得到的内部缺陷深度信息进行融合计算。

4 结论与展望

本文深入聚焦天然气管道漏磁与超声检测技术的核心难题，全方位从传感器设计、智能识别以及数据融合这三个关键层面提出创新优化方案。在传感器设计上，通过改良材料与结构，增强其对微弱信号的捕捉能力；智能识别方面，引入先进的机器学习算法，提升对复杂缺陷特征的精准识别；数据融合领域，则运用多元数据融合策略，深度挖掘数据价值。经严谨的理论分析与大量的实验验证，改进后的检测系统在缺陷检测准确率与效率上均实现了显著提升。展望未来，相关研究可进一步紧密结合数字孪生技术，对检测工艺进行精细化优化，借助高度仿真模型及时发现潜在问题并加以改进；利用联邦学习解决跨工况模型泛化难题，在保护数据隐私的同时，实现不同工况下模型性能的有效提升；积极探索天地一体检测体系的构建，整合卫星遥感、无人机巡检与地面检测等多元手段，为管道安全检测技术的智能化发展开拓更为广阔的空间，切实保障天然气管道安全稳定运行。

参考文献：

- [1] 陈剑 . 在用油气压力管道漏磁内检测技术优化研究 [J]. 全面腐蚀控制 ,2024(06).
- [2] 邱春雨 , 杨守玉 . 天然气管道监测技术研究及管理措施 [J]. 石化技术 ,2024(07).
- [3] 张本同 , 宗丽娜 , 吴超 . 天然气长输管道腐蚀机理及检测技术研究 [J]. 焊管 ,2017(11).
- [4] 诸秋寅 . 燃气管道建设和维护过程中质量控制与技术创新研究 [J]. 当代化工研究 ,2024(03).
- [5] 陈金忠 , 李晓龙 , 王长新 . 油气管道内检测技术研究前沿进展 [J]. 石油机械 ,2022(05).