

智能化无损检测技术在油气长输管道中的应用前景

纪 虎 韩曙光

中石化胜利海上石油工程技术检验有限公司 山东 东营 257000

摘 要：油气长输管道安全运行关乎能源战略，传统检测技术在复杂工况下暴露出效率低、精度差等局限。智能化无损检测技术融合超声导波、漏磁内检测等多技术原理，通过多源数据整合与算法分析，实现管道缺陷快速识别、精确定量与实时监测。其在提升完整性评估准确性、降低检测成本、推动技术智能化升级等方面成效显著，尤其适用于新能源输送场景，为保障管道全生命周期安全提供关键技术支撑。

关键词：智能化无损检测技术；油气长输管道；管道完整性；缺陷检测；应用前景

引言

油气长输管道作为国家能源动脉，长期面临内外部腐蚀、机械损伤等风险，传统目视、射线检测等手段已难以满足现代化运维需求。随着管道规模扩张与服役年限增长，精准、高效的检测技术成为保障能源安全的迫切需要。智能化无损检测技术凭借自动化、多参数融合等特性，为管道检测带来革新契机，研究其应用前景对提升管道运维水平、推动能源行业发展具有重要意义。

1 油气长输管道检测需求与传统检测技术局限性

油气长输管道通常埋地铺设，运行环境复杂多变，面临着内腐蚀（如输送介质中的硫化氢、二氧化碳等对管道内壁的腐蚀）、外腐蚀（土壤中的电解质、微生物等对管道外壁的侵蚀）、机械损伤（施工挖掘、地质灾害导致的管道变形）等多种潜在风险。为保障管道安全运行，需要定期对管道进行全面检测，准确识别缺陷位置、类型与严重程度，以便及时采取维护措施。传统的无损检测技术，如目视检测、射线检测、超声波检测等，在油气长输管道检测中发挥过重要作用，但也存在明显不足。目视检测依赖人工观察，受检测人员主观因素影响大，难以发现埋地管道内部及隐蔽部位的缺陷；射线检测虽然能检测出内部缺陷，但存在辐射危害，检测成本高且效率低；常规超声波检测对检测人员的操作技能要求高，检测结果的准确性与可靠性不稳定，且无法实现长距离快速检测。随着油气长输管道规模的不断扩大与运行年限的增加，传统检测技术已难以满足高效、精准、全面的检测需求，亟需引入智能化无损检测技术^[1]。

2 智能化无损检测技术原理与特点

2.1 超声导波检测技术

超声导波检测技术基于超声导波在管道中传播时遇到缺陷会发生反射、散射和模式转换的原理。当超声导

波在管道中传播时，遇到腐蚀、裂纹等缺陷，部分能量会被反射回检测端，通过分析反射波的特征，可确定缺陷的位置、大小和类型。该技术具有检测距离长（单次检测距离可达数十米甚至上百米）、检测速度快、可实现非接触检测等特点，能够快速对管道进行大面积筛查，尤其适用于埋地管道的快速检测，但对缺陷的定量分析精度相对较低。

2.2 漏磁内检测技术

漏磁内检测技术是利用铁磁性材料的高磁导率特性，当管道被磁化后，若存在缺陷，会在缺陷处产生漏磁场。通过安装在检测器上的高灵敏度磁敏传感器检测漏磁场信号，经过信号处理与分析，可获取缺陷的形状、尺寸和位置信息。该技术对铁磁性管道的腐蚀、孔洞等缺陷检测灵敏度高，能够实现缺陷的定量检测，是目前油气长输管道内检测的主要技术之一。但漏磁内检测需要对管道进行磁化，检测设备体积较大，不适用于非铁磁性材料管道检测，且检测成本相对较高。

2.3 声发射检测技术

声发射检测技术是基于材料在受力变形或断裂过程中会释放弹性波（声发射信号）的原理。在油气长输管道运行过程中，当管道发生腐蚀、裂纹扩展等损伤时，会产生声发射信号。通过布置在管道表面的声发射传感器接收信号，并对信号进行采集、分析，可判断管道损伤的位置、程度和发展趋势。该技术具有实时在线监测、能够检测动态缺陷等优点，可在管道不停输的情况下进行检测，但声发射信号易受外界噪声干扰，信号分析处理难度较大。

2.4 智能机器人检测技术

智能机器人检测技术是将机器人技术与无损检测技术相结合，通过搭载超声、涡流、磁粉等多种检测传感器的智能机器人，在管道内部自主移动进行检测。智能

机器人能够适应复杂的管道环境,可对管道的不同部位进行全方位检测,尤其适用于对管道弯头、三通等特殊部位的检测。同时,机器人可通过无线通信技术将检测数据实时传输至控制端,实现远程操作与数据处理。该技术提高了检测的自动化程度与检测效率,但目前智能机器人的续航能力、复杂环境适应能力还有待进一步提升^[2]。

3 智能化无损检测技术在油气长输管道中的应用前景

3.1 提升管道完整性评估准确性

管道完整性评估是保障油气长输管道安全运行的核心环节,而智能化无损检测技术通过多源数据融合与先进分析算法,显著提升了评估的准确性与可靠性。在实际检测中,超声导波检测技术凭借其长距离传播特性,可对管道进行快速扫查,获取缺陷的初步位置与大致类型信息。例如,在管径为1016mm的输气管道检测中,超声导波可实现单端激发下50m范围内的有效检测,能快速识别出腐蚀减薄、裂纹等宏观缺陷。漏磁内检测技术则专注于缺陷的精确定量分析,通过高灵敏度磁敏传感器,可对铁磁性管道的缺陷深度、长度和宽度进行精确测量。在某原油输送管道检测项目中,漏磁内检测设备能够检测出深度仅为管道壁厚5%、长度10mm的微小腐蚀坑,测量误差控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 。将超声导波检测的宏观筛查结果与漏磁内检测的高精度数据相结合,可构建起管道缺陷的三维模型,直观呈现缺陷形态。进一步结合管道运行参数,如实时压力、温度、输送介质成分等,利用机器学习算法建立管道完整性评估模型。以支持向量机(SVM)算法为例,通过输入管道材质、运行年限、缺陷特征参数以及环境参数等数据进行训练,能够有效预测管道剩余强度与剩余寿命。研究表明,基于该算法建立的模型,对管道剩余寿命预测的误差可控制在10%以内。此外,结合有限元分析方法,模拟管道在不同工况下的应力分布,可进一步验证评估结果的准确性,为管道维护决策提供科学、可靠的依据^[3]。

3.2 实现缺陷实时在线监测与预警

实时在线监测与预警是智能化无损检测技术保障油气长输管道安全运行的重要功能。声发射检测技术作为实时监测的重要手段,基于材料损伤过程中释放弹性波的特性,能够捕捉管道内部缺陷的动态发展。在实际应用中,通过在管道沿线每隔50-100m布置声发射传感器,构建传感器阵列网络,可实现对管道的全面监测。当管道发生腐蚀穿孔、裂纹扩展等损伤时,产生的声发射信号被传感器接收,经前置放大器放大、滤波器降噪后,传输至数据采集系统。系统利用时差定位算法,通过计算声发射信号到达不同传感器的时间差,可精确确

定缺陷位置,定位精度可达 $\pm 1\text{m}$ 。同时,对声发射信号的波形、频率、能量等参数进行分析,能够判断缺陷的类型与严重程度。例如,突发型声发射信号通常与裂纹快速扩展相关,而连续型信号可能对应缓慢发展的腐蚀过程。一旦检测到异常信号,系统立即发出声光报警,并通过短信、邮件等方式通知运维人员,为及时采取措施争取时间。基于物联网与云计算技术,可将分散在管道沿线的大量传感器数据进行集中管理与分析。物联网实现了传感器、检测设备与数据中心之间的互联互通,确保数据的实时传输。云计算平台则提供强大的计算能力,对海量数据进行快速处理与分析。通过建立管道运行状态数据库,利用大数据分析技术挖掘数据背后的规律,可实现对整个油气长输管道网络的统一监控与管理。例如,通过分析历史数据,预测管道在不同季节、不同运行工况下的缺陷发展趋势,提前制定维护计划,实现预防性维护。

3.3 降低检测成本与人工风险

智能化无损检测技术的自动化与高效性,有效降低了油气长输管道检测的成本与人工风险。智能机器人检测技术在复杂管道环境检测中优势明显。以管道弯头、三通等特殊部位检测为例,传统人工检测不仅难度大、效率低,还存在人员坠落、中毒等安全风险。而搭载多种检测传感器的智能机器人,可通过自主导航或远程控制,在管道内部自由移动,对这些部位进行全方位检测。在某天然气管道检测项目中,采用智能机器人进行检测,相比传统人工检测,效率提升了5倍以上,同时避免了人员进入狭小、危险空间作业。此外,智能机器人还可配备高清摄像头,实时回传管道内部图像,便于检测人员直观了解管道状况。超声导波检测与漏磁内检测技术的高效性,同样显著降低了检测成本。超声导波检测单次检测距离长,可大幅减少检测设备的布置数量与检测时间;漏磁内检测设备虽然体积较大,但检测速度快,且可在管道运行状态下进行内检测,无需停产,减少了因检测导致的停产损失。以一条长度为100km的输油管道检测为例,采用超声导波与漏磁内检测相结合的方式,检测周期可从传统方法的15天缩短至5天,节省了大量的人力、物力成本。同时,智能化检测设备的维护成本相对较低,通过定期校准与保养,可确保设备长期稳定运行,进一步降低了综合检测成本^[4]。

3.4 推动管道检测技术智能化升级

随着人工智能、大数据、物联网等技术的不断发展,智能化无损检测技术与前沿技术的深度融合,正推动管道检测技术向智能化、自动化、集成化方向发展。

在人工智能领域,深度学习算法在缺陷识别与分析中发挥着重要作用。卷积神经网络(CNN)通过对大量检测图像数据的学习,能够自动提取缺陷特征,实现对管道腐蚀、裂纹等缺陷的高精度识别。在实际应用中,基于CNN算法开发的缺陷识别系统,对管道缺陷图像的识别准确率可达95%以上。大数据技术则为管道检测提供了强大的数据分析能力,通过收集、整合大量的管道检测数据、运行数据以及环境数据,利用数据挖掘算法,可发现数据之间的潜在关联,为管道维护决策提供支持。例如,通过分析不同地区、不同管径管道的缺陷数据,总结出缺陷发生的规律,为类似管道的检测与维护提供参考。物联网技术实现了检测设备的互联互通,构建起智能化检测网络。在该网络中,各检测设备可自动上传检测数据,实现数据共享;同时,根据检测任务需求,可自动调度检测设备,实现检测资源的优化配置。例如,当某段管道检测任务紧急时,系统可自动调配附近闲置的检测设备前往检测,提高检测效率。此外,集成化发展趋势使得智能化无损检测系统能够整合多种检测技术,实现对管道的多参数、全方位检测。例如,将超声检测、漏磁检测、涡流检测等技术集成于同一检测设备中,一次检测即可获取管道缺陷的多种信息,提高检测的全面性与准确性。

3.5 适应新能源与多能融合发展需求

在能源转型的大背景下,油气长输管道逐渐向输送新能源与多能融合方向发展,智能化无损检测技术通过针对性的技术创新,为管道在新工况下的安全运行提供保障。对于氢气输送管道,氢气的小分子特性与高扩散性,使其容易渗透到管道材料内部,引发氢致损伤,如氢脆、氢鼓泡等。智能化无损检测技术通过研发新型检测方法及设备,实现对氢致损伤的有效检测。例如,基于声发射与超声相结合的检测技术,利用声发射技术监测氢气在管道材料内部扩散、聚集产生的微小声发射信号,同时利用超声技术检测材料内部微观结构变化,可实现对氢致损伤的早期检测。在多能融合输送方面,如

天然气与电力、氢能的混合输送,管道运行工况更为复杂,对检测技术提出了更高要求。智能化无损检测技术通过开发多参数传感器,能够同时检测管道内介质成分、压力、温度、电场、磁场等参数,实时掌握管道运行状态。结合机器学习算法,对多参数数据进行综合分析,可及时发现因多能混合输送导致的管道异常情况,如电化学腐蚀、应力变化等。此外,针对不同输送介质的特性,优化现有检测技术的参数与算法。例如,调整漏磁内检测设备的磁化强度与传感器灵敏度,以适应不同介质对管道磁性的影响;改进超声检测的探头频率与波形,提高对不同介质环境下管道缺陷的检测能力,确保管道在新能源与多能融合输送工况下的安全稳定运行^[5]。

结语

智能化无损检测技术通过技术创新与多技术融合,有效解决油气长输管道检测难题,在完整性评估、实时监测、成本控制等方面展现显著优势。在能源转型背景下,其对新能源输送管道检测的适应性,进一步拓展了应用价值。未来,随着技术持续迭代,智能化无损检测技术将在提升管道安全韧性、支撑能源体系变革中发挥更关键作用。

参考文献

- [1]刘华锋,刘小强,权威.无人机技术在油气管道巡检中的应用研究[J].产品可靠性报告,2024(10):83-84.
- [2]杜怀林.无人机技术在油气长输管道巡检中的应用研究[J].科学技术创新,2021(7):55-56.
- [3]单祥斌.无人机技术在油气长输管道巡检中的应用分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(11):419-421.
- [4]张钊干,李永明.边缘计算与物联网技术在长输油气管道智能化监控系统中的协同与优化[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术.2023(08):50-53.
- [5]孙建磊.天然气长输管道裂纹的无损检测方法探究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术.2024(03):0013-0016.