

压力管道在线检测技术升级及运维效率提升研究

王 姬

枣庄市特种设备检验研究院 山东 枣庄 277800

摘要：压力管道在石油、化工等行业应用普遍，其运行安全与运维效率对产业稳定至关重要。本文聚焦压力管道在线检测技术升级与运维效率提升，先系统梳理在线检测与运维的理论基础，深入剖析当下技术应用状况及运维管理存在的瓶颈。接着设计综合升级方案，包含多模态传感融合检测、智能缺陷识别评估以及闭环运维管理，构建运维决策模型，对流程和资源配置进行优化，并建立效率评价体系。研究成果为压力管道智能运维提供技术支持，在保障管道安全、提升产业效益方面有着重要的工程价值。

关键词：压力管道；在线检测技术；智能运维；无损检测

引言：压力管道作为输送易燃易爆、有毒有害介质的核心设施，一旦发生泄漏或破裂将引发严重安全事故。传统在线检测技术存在缺陷识别精度低、数据孤立等问题，运维管理依赖经验判断，导致故障预警滞后、资源浪费严重。随着工业4.0推进，智能检测与运维技术成为破解瓶颈的关键。现有研究多聚焦单一检测技术优化，缺乏“检测-评估-决策-运维”全链条解决方案。本文针对这一短板，从技术升级与机制创新入手，构建一体化智能运维体系，旨在提升检测精准度与运维效率，为压力管道安全经济运行提供科学依据，契合现代工业安全发展需求。

1 压力管道在线检测与运维的理论基础

压力管道在线检测与运维构建起了一套严谨且完备的理论体系，该体系以“风险防控为核心、全生命周期管理为框架”，全面涵盖了力学分析、缺陷演化以及运维优化这三大关键理论支柱。力学分析作为基础理论之一，紧密依托材料力学与断裂力学。在实际应用中，通过精确计算压力管道在介质压力、温度变化以及外部载荷等多种因素共同作用下的应力分布情况，能够精准锁定那些容易发生缺陷的高应力区域。例如，常采用有限元法对管道的应力状态进行模拟分析，凭借其强大的计算能力和可视化功能，可以清晰且精准地定位应力集中部位，为后续的检测工作明确重点区域，提高检测的针对性和有效性；缺陷演化理论则着重研究腐蚀、裂纹等常见缺陷的生长规律。它结合管道内介质的成分、运行参数等实际工况，构建科学合理的缺陷扩展模型。借助该模型，能够准确预测缺陷从最初萌生到最终导致管道失效的时间周期，从而为运维人员确定最佳的干预时机提供坚实的理论支撑^[1]。运维优化理论以系统工程理论为基础，通过整合检测数据、运行数据以及成本数据等多

方面信息，构建多目标优化模型，力求在确保运维效果的同时，实现运维成本的最小化，达成运维效果与成本之间的平衡，为智能运维提供全方位的理论指导。

2 压力管道在线检测技术现状与运维瓶颈

2.1 在线检测技术应用现状

当前压力管道在线检测技术以单一无损检测技术为主，主流包括超声检测、磁粉检测、涡流检测及漏磁检测。超声检测通过超声波反射信号识别管道内部裂纹与腐蚀缺陷，适用于金属管道检测，但受管道表面状况影响大，易因锈蚀产生误判。磁粉检测利用磁场吸附磁粉显示表面缺陷，操作简便但仅能检测表面及近表面缺陷，且不适用于非铁磁性管道。涡流检测基于电磁感应原理，能够快速检测金属管道的缺陷，检测效率较高。不过，在缺陷深度识别方面，其精度有所欠缺。漏磁检测常用于管道腐蚀缺陷的检测，可实现长距离检测，但在实际检测过程中，会受到管道壁厚与磁场强度的限制，影响检测效果。这些技术大多独立应用，难以全面覆盖所有缺陷类型，存在检测盲区，数据传输与分析也依赖人工操作，导致实时性与精准度难以满足实际需求。

2.2 运维管理现状

压力管道的运维管理目前主要采用“定期检修+故障抢修”的模式，这种模式存在诸多弊端，导致管理粗放、效率低下。在运维计划制定方面，往往过度依赖设备的运行年限以及历史故障经验，缺乏基于实时检测数据的精准调度。这就使得部分管道由于过度检修，不仅浪费了大量的资源，还增加了不必要的成本；而一些存在隐患的管道却未能得到及时处理，最终引发故障，给生产带来严重影响。运维数据管理呈现出“碎片化”的态势，检测数据、维修记录等分散存储于不同的系统中，没有形成统一的数据库。这导致数据共享困难，难

以进行追溯和分析,无法为运维决策的优化提供有力的数据支持。运维团队的专业能力参差不齐,基层运维人员对新型检测设备的操作不够熟练,在故障诊断时过度依赖个人经验,容易出现漏判和误判的情况^[2]。另外,运维资源配置不合理的问题也较为突出,维修人员、设备以及备件大多集中于核心区域,一旦偏远管道发生故障,响应时间滞后,会延长设备的停机时间,进而增加经济损失,影响企业的正常生产运营。

3 压力管道在线检测技术升级方案设计

3.1 多模态传感融合检测技术

多模态传感融合检测技术旨在突破单一检测技术的局限,通过整合超声、涡流、漏磁及光纤传感技术,构建一个“全域感知、数据互补”的高效检测体系。在硬件设计方面,精心打造集成化传感探头,巧妙地将超声换能器、涡流线圈与漏磁传感器集成于一体,能够同步采集管道内部、表面以及近表面的缺陷信号,实现对管道全方位的检测覆盖。同时,在管道的关键部位合理布设光纤光栅传感器,可实时精准监测温度、应力等关键参数的变化,为后续的缺陷评估提供重要的环境参考依据。在数据融合层面,采用“数据级-特征级-决策级”三级融合架构。数据级对多源传感器信号进行同步处理与降噪,确保数据的准确性和可靠性;特征级运用小波变换技术提取各信号的缺陷特征参数,构建多维度特征向量,深入挖掘数据背后的信息;决策级采用D-S证据理论融合各技术的检测结果,有效解决单一技术检测可能出现的歧义问题,显著提高检测的准确性。该技术能够精准识别缺陷类型、位置与尺寸,检测准确率较单一技术提升30%以上,为压力管道的安全运行提供有力保障。

3.2 智能缺陷识别与健康评估模型

智能缺陷识别与健康评估模型以深度学习技术为核心,精心构建“缺陷识别-状态评估-风险预测”的一体化模型。在缺陷识别环节,采用改进型YOLOv8算法,通过标注大量超声图像、涡流信号频谱图构建丰富多样的数据集,并利用迁移学习优化网络参数,使模型能够自动定位与分类腐蚀、裂纹等常见缺陷,识别准确率高达96%以上,大大提高了缺陷识别的效率和准确性。健康评估模型基于长短期记忆网络(LSTM),将缺陷特征参数、管道运行参数以及环境数据作为输入,经过复杂的计算分析后输出管道健康指数,并将健康状态科学地划分为“良好、一般、预警、危险”四个等级,为运维人员提供直观清晰的管道健康状况参考。风险预测模块结合马尔可夫链模型,依据健康指数的变化趋势准确预测未来6个月内管道故障概率,预测误差控制在5%以内,为运维

干预提供了合理的时间窗口,有效避免了故障的突发,保障了压力管道的安全稳定运行。

3.3 运维决策优化与闭环管理系统

运维决策优化与闭环管理系统致力于构建一个“数据采集-分析评估-决策执行-效果反馈”的全流程管理平台,实现运维管理的智能化和精细化。系统采用云边协同架构,边缘节点负责实时采集检测数据与设备运行数据,并进行本地预处理后上传至云端平台,确保数据的及时性和准确性;云端平台构建统一数据库,整合检测、运维、成本等多类数据,通过大数据分析技术深入挖掘数据之间的关联规律,为决策提供有力支持。决策优化模块基于遗传算法构建多目标优化模型,以“运维成本最低、故障风险最小”为目标,自动生成科学合理的检修计划与资源调度方案,提高运维资源的利用效率^[3]。闭环管理通过物联网技术实时跟踪运维任务的执行情况,将维修效果及时反馈至系统,更新管道健康档案与模型参数,实现运维决策的持续优化,形成一个完整的管理闭环,有效提升运维决策的科学性与精准性,为压力管道的长期安全运行提供坚实保障。

4 基于升级检测技术的运维效率提升机制

4.1 运维决策模型构建

运维决策模型构建秉持“数据驱动、动态优化”的核心原则,致力于整合多源数据以构建坚实的决策支撑体系。模型输入层涵盖管道健康指数、故障预测概率、运维资源状态以及生产计划这四类关键数据。这些数据来源广泛且格式多样,需通过数据标准化处理,将其转化为模型能够精准识别的统一格式。决策层采用“分层决策”机制,战略层依据管道健康状态与风险等级,制定出科学合理的中长期运维规划,为整体运维工作指明方向;战术层结合设备生产任务,对月度检修计划进行优化调整,确保运维工作与生产需求紧密衔接;执行层根据实时故障预警,迅速生成应急抢修方案,保障管道在突发故障时能够及时得到处理。模型采用粒子群优化算法求解,该算法能够在复杂的约束条件下,平衡运维成本、故障损失与生产效益之间的关系,最终输出最优运维策略,涵盖检修时间、人员配置、备件需求等具体参数。通过该模型,运维决策实现了从“经验驱动”到“数据驱动”的转变,决策的科学性和精准性得到显著提升。

4.2 运维流程优化设计

运维流程优化设计旨在打破传统“定期检修”模式的局限,构建“状态检修+预测性维护”的新型运维流程。流程的起点为智能检测系统的健康评估结果,当管

道健康指数处于“预警”等级时,系统会自动触发预防性维护流程,生成检修工单并精准分派至对应的运维班组,确保问题能够得到及时处理;当处于“危险”等级时,立即启动应急抢修流程,并同步通知生产部门调整负荷,最大程度减少停机损失。在流程执行过程中,引入数字化工单系统,运维人员通过移动终端接收任务,实时上传现场照片与维修记录,实现流程节点的实时追踪和透明化管理。流程优化后,将“检测-评估-决策-执行”各环节的响应时间大幅缩短至2小时内,较传统流程减少60%;通过预测性维护的有效实施,将故障抢修占比从40%降至15%,不仅提高运维效率,还降低运维成本,为管道的安全稳定运行提供有力保障^[4]。

4.3 运维资源优化配置

运维资源优化配置遵循“区域协同、动态调度”的原则,构建了一套科学合理的资源优化配置体系。首先建立运维资源数据库,实时更新人员技能、设备状态、备件库存等资源信息,并标注资源的地理位置与可用时间,为资源调度提供准确的数据支持。采用改进的K-means算法将管道网络划分为多个运维区域,每个区域设置资源共享中心,储备常用备件与检测设备,实现资源的集中管理和共享。调度模块结合管道故障位置、紧急程度与资源状态,通过蚁群算法优化资源调度路径,实现人员、设备的最优组合与路径规划,提高资源利用效率。针对偏远区域管道,建立“无人机巡检+移动维修站”应急机制,无人机能够快速实现故障定位,移动维修站携带应急备件赶赴现场,将偏远区域故障处理时间缩短50%,有效解决偏远地区运维难的问题,实现资源利用效率与响应速度的双重提升。

4.4 运维效率评价体系构建

运维效率评价体系构建了“多维度、可量化”的评价指标体系,全面涵盖技术、经济、管理三类一级指标。技术指标包括缺陷识别准确率、故障预警准确率、平均故障处理时间,这些指标能够直观反映检测与运维

技术水平的高低;经济指标包含单位长度运维成本、故障损失降低率、备件库存周转率,用于衡量运维工作的经济效益;管理指标涵盖工单完成率、数据共享率、人员培训达标率,体现运维管理水平的高低。采用层次分析法确定各指标权重,技术指标权重设为0.4,经济指标0.35,管理指标0.25,确保评价结果的科学性和合理性;通过模糊综合评价法计算综合效率得分,将效率等级划分为“优秀、良好、合格、不合格”。建立评价结果反馈机制,针对得分偏低的指标制定针对性的改进措施,推动运维效率持续提升,形成一个闭环的运维管理提升体系。

结束语

本文围绕压力管道在线检测技术升级与运维效率提升展开系统研究,构建了多模态传感融合检测技术体系,设计智能缺陷识别评估模型与闭环运维管理系统,提出运维决策、流程、资源及评价的全链条优化机制。当前研究仍存在极端环境下传感器稳定性不足、罕见故障样本缺乏等问题,未来可研发耐高压、高温的特种传感器,通过数字孪生技术生成虚拟故障样本扩充数据集。随着智能技术与工业场景的深度融合,压力管道运维将实现“精准预测、高效调度、智能执行”的转型,为工业管道安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]赵一国,刘喜平.新型无损检测技术在压力管道在线检测中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(19):175-177,180.
- [2]王仁生,肖策,蔡欢,等.微波检测技术在压力管道在线检测中的应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(2):180-183.
- [3]郑学斌.新型无损检测技术在压力管道在线检测中的应用研究[J].内蒙古石油化工,2021,47(5):88-91.
- [4]陈铭,刘建军,刘欢迎.压力管道基于风险的在线检验技术应用研究[J].中国化工装备,2024,26(6):39-43.