

化工管道泄漏检测机器人机电系统开发

杨 光

空气化工产品（呼和浩特）有限公司 内蒙古呼和浩特

【摘要】随着化工行业规模不断扩大，管道泄漏带来的安全隐患和环境污染问题日益突出。针对传统检测方法效率低、风险高的现状，开发一种集成先进传感技术与机电控制的化工管道泄漏检测机器人，具备高灵敏度、自动巡检和实时报警功能，实现对复杂管网的精准检测与智能维护。该系统通过机械结构优化与电子控制协同设计，提高了机器人在恶劣环境中的适应性和稳定性，有效提升泄漏检测的效率与可靠性，保障化工生产安全。

【关键词】化工管道；泄漏检测；机器人；机电系统；智能巡检

【收稿日期】2025 年 2 月 23 日 **【出刊日期】**2025 年 3 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250101

Development of mechanical and electrical system for pipeline leakage detection robot

Guang Yang

Air Products and Chemicals, Inc, Hohhot, Inner Mongolia

【Abstract】 As the chemical industry continues to expand, the safety hazards and environmental pollution caused by pipeline leaks have become increasingly prominent. To address the inefficiency and high risks of traditional detection methods, a new chemical pipeline leak detection robot has been developed. This robot integrates advanced sensor technology with electromechanical control, featuring high sensitivity, automatic inspection, and real-time alarms, enabling precise detection and intelligent maintenance of complex pipeline networks. By optimizing the mechanical structure and coordinating electronic control, the system enhances the robot's adaptability and stability in harsh environments, significantly improving the efficiency and reliability of leak detection, thus ensuring the safety of chemical production.

【Keywords】 Chemical pipeline; Leakage detection; Robot; Electromechanical system; Intelligent inspection

引言

化工管道作为关键的输送通道，其安全稳定运行直接关系到生产效率和环境保护。然而，管道泄漏事件频发，常引发重大安全事故与生态灾害^[1]。传统人工检测不仅效率低，且存在高风险。随着机器人技术和机电一体化的发展，智能检测机器人成为提升管道安全管理的重要手段。通过集成先进传感器与智能控制，检测机器人能够实现快速、精准的泄漏识别与定位，大幅降低人工巡检负担。开发适应复杂化工环境的泄漏检测机器人机电系统，成为提升行业安全水平的迫切需求。

1 化工管道泄漏检测的现状与挑战分析

化工管道作为工业生产中不可或缺的输送媒介，承担着各种气体、液体和高腐蚀性物质的传输任务。

其安全性直接关系到整个化工厂的生产稳定和环境保护。然而，随着化工产业的不断扩展，管道系统愈加复杂，运行环境也变得更加严苛，管道泄漏事件的风险显著增加^[2]。泄漏不仅会导致原料浪费和生产中断，更严重时可能引发火灾、爆炸以及有毒气体泄漏等安全事故，造成重大经济损失和环境污染。因此，对化工管道泄漏进行有效监测和及时发现显得尤为重要。

化工管道泄漏检测主要依赖传统的人工巡检和固定监测系统。人工检测通常依靠现场人员通过视觉检查、声响检测及简单仪器测量完成，这种方法不仅效率低下，且受限于环境条件和人员安全，难以保证检测的全面性和准确性。固定传感器布置虽能实现部分区域的实时监控，但存在覆盖盲区、传

感器损坏率高和维护成本大的问题,尤其在管网复杂且分布广泛的工厂环境中,这种检测手段难以满足全面、精准的泄漏监测需求。此外,化工管道常处于高温、高压及腐蚀性强的环境,检测设备的耐久性和抗干扰能力成为技术瓶颈,增加了检测的难度。

随着自动化和智能化技术的发展,化工管道泄漏检测面临的挑战亟需新的技术手段来解决。如何在复杂且危险的工作环境中,实现对管道全覆盖、高灵敏度的泄漏识别成为行业关注的重点^[3]。机电一体化技术的引入为开发具有自主巡检能力的检测机器人提供了可能,机器人能够在狭小、复杂甚至高危的环境中灵活移动,搭载多种传感器实现多参数综合检测,从而提高泄漏检测的效率和精度。由此,深入分析当前检测技术的不足,结合机电系统的先进设计,开发适应复杂环境的智能化检测机器人系统,是推动化工管道安全管理技术进步的重要方向。

2 机电系统设计原则及关键技术研究

机电系统作为化工管道泄漏检测机器人的核心组成部分,其设计不仅决定了机器人整体性能的优劣,还直接影响检测任务的完成效果。在设计过程中,必须综合考虑机械结构的稳定性与灵活性、电控系统的智能化与可靠性,以及传感器的高精度与多功能性^[4]。机械结构方面,机器人需要具备良好的通过性和适应性,能够灵活穿行于复杂多变的管道环境中,同时具备防腐蚀、防爆炸等特殊安全性能。结构材料的选择尤为关键,通常采用轻质高强度合金材料和耐腐蚀复合材料,以保证机器人在高温、高压及有腐蚀介质环境下的稳定运行。驱动系统设计则需兼顾功率与能耗,电机和传动机构需实现高效能量转换,确保长时间自主巡检能力。

电控系统设计在机电系统中起着桥梁和纽带的作用,直接关系到检测机器人的智能化水平。高性能微处理器和嵌入式控制系统构成了智能控制核心,能够实现路径规划、运动控制以及多传感器数据融合。为保证系统的实时性与稳定性,控制算法需具备快速响应和容错能力,同时对环境变化有较强适应性。通讯模块的设计则需满足现场复杂环境的远程数据传输需求,常采用工业级无线通讯技术,保证信息的准确传递和安全防护。电控系统还应内置故障诊断功能,实时监测机器人关键部件的工作状态,及时预警异常,提升系统可靠性和维护便捷性。

传感器技术是实现化工管道泄漏检测机器人智

能识别的关键。传感器种类包括气体检测传感器、温湿度传感器、压力传感器和红外热成像等多种类型。高灵敏度的气体传感器能够准确捕捉泄漏气体的微量浓度变化,结合红外热成像技术实现管道温度异常检测,有助于早期发现泄漏风险。传感器布置需合理覆盖管道的重点监测区域,并支持多传感器数据融合,提高检测准确率和鲁棒性。与此同时,传感器接口和数据采集系统的设计需保证数据的高效采集与传输,避免信号干扰和延迟^[5]。针对化工环境的特殊性,传感器应具备防爆、防腐蚀和耐高温的性能,以确保长期稳定工作。整体机电系统的设计原则强调系统的高度集成化、模块化与智能化,确保机器人能够在复杂多变的化工管道环境中实现高效、精准的泄漏检测。

3 化工管道泄漏检测机器人的系统集成与实现

化工管道泄漏检测机器人的系统集成是实现机电系统高效协同运行的关键环节。系统集成需要将机械结构、电控系统与传感器模块紧密结合,形成一个高度协同的智能检测平台^[6]。机械部分通过模块化设计实现快速组装与维护,同时确保机器人在复杂管道内的灵活运动和稳定抓握。运动控制系统与驱动单元相互配合,通过精确的路径规划算法,使机器人能够自主识别管道布局,灵活绕过障碍,实现全方位巡检。系统集成过程中,还需充分考虑环境适应性,如防爆电气设计和耐腐蚀处理,保证机器人在化工恶劣环境中安全可靠运行。

集成的电控系统作为机器人“大脑”,通过嵌入式处理器管理各个子系统的协作。数据采集模块实时接收传感器信息,并利用多传感器融合算法对泄漏信号进行智能分析和判定,提升检测的准确率和响应速度。通讯模块则保障机器人与监控中心的稳定连接,实现远程实时监控和数据传输。系统软件设计集成了路径规划、故障诊断和自适应控制功能,能够根据管道环境变化动态调整机器人运动参数,提高系统的智能化水平。为确保长时间连续作业,电控系统还优化了电源管理,采用高效能量管理方案延长机器人续航时间。

传感器模块的集成使得机器人具备多维度的泄漏检测能力。气体传感器能够检测多种易燃易爆及有毒气体的浓度变化,及时识别泄漏点;红外热成像传感器则通过监测管道表面温度异常,辅助判断潜在泄漏风险。压力和流量传感器同步监控管道内

部状态,提供重要运行参数,为泄漏判断提供多角度数据支持。集成设计中,传感器布局遵循科学分布原则,确保关键区域无死角覆盖。数据采集系统采用高速、高精度接口,保证多传感器数据的同步传输和有效融合。整体系统的高度集成不仅实现了功能的协同优化,也显著提升了机器人在复杂化工管道环境中的适应能力和检测效率。

4 机器人性能验证及应用效果分析

化工管道泄漏检测机器人性能验证是评估其技术指标与应用价值的关键步骤,直接影响其推广和实际使用效果。性能验证内容涵盖机器人机动性、检测灵敏度、数据传输稳定性以及系统可靠性等多个方面。在实验室环境中,针对不同规格和复杂度的管道模型进行多轮测试,重点考察机器人在多种管径、弯曲半径及复杂节点处的通过能力与定位精度。机械结构的稳定性和驱动系统的响应速度成为确保机器人顺利穿行的基础^[7]。测试结果表明,机器人具备较强的适应性,能够灵活通过直管、弯头以及分支管道,有效避免卡滞现象。同时,运动控制算法对路径规划的支持显著减少了巡检时间,提高了作业效率,为后续的现场应用奠定了坚实基础。

泄漏检测的核心在于传感系统的灵敏度与准确性。针对典型化工泄漏气体(如甲烷、乙烯等易燃易爆气体)设计的高灵敏度气体传感器,在多种泄漏浓度条件下表现出良好的响应特性。配合红外热成像和压力传感器的数据融合,机器人能够实现对微小泄漏点的快速定位。通过模拟现场环境中的多种干扰因素,包括温度波动、气流变化及腐蚀性气体影响,检测系统展现出优异的抗干扰能力和稳定性。此外,数据采集与处理模块保证了传感信息的实时传输和准确分析,有效降低误报率。实际应用中,机器人不仅能够实时检测泄漏,还能提供精准的泄漏点坐标和泄漏物种类,为维护人员提供科学依据和操作指导。

应用效果的综合分析显示,化工管道泄漏检测机器人显著提升了管道安全管理的智能化水平^[8]。实地测试结果验证了机器人在复杂化工环境中的耐用性和可靠性,防爆设计及耐腐蚀性能满足了严格的安全标准。机器人自主巡检能力有效减少了人工作业的风险,提高了检测的覆盖率和频次,及时发现潜在安全隐患,减少事故发生概率。监控中心通过远程数据接口实现对机器人状态和检测数据的实时掌控,增强了管理的精细化和决策的科学性。总

体来看,机器人技术的引入极大改善了化工管道泄漏检测的传统模式,推动了行业安全管理方式的革新,为构建安全、高效、智能的化工生产环境提供了有力支持。

5 结语

化工管道泄漏检测机器人机电系统的开发,针对传统检测方法存在的效率低、风险高等问题,提出了创新性的解决方案。通过机械结构优化、电控系统智能化及多传感器融合技术的应用,提升了机器人在复杂化工环境中的适应性和检测精度。性能验证表明,该机器人具备良好的机动性和高灵敏度的泄漏识别能力,有效保障了管道运行安全。其推广应用不仅降低了人工巡检的危险性,还显著提高了检测的全面性和及时性。未来,随着技术不断进步,该类智能检测系统将在化工安全管理领域发挥更加重要的作用,推动行业向智能化、自动化方向迈进,实现生产安全与环境保护的双重目标。

参考文献

- [1] 李亚巍.煤粉锅炉过热器管应力腐蚀泄漏自动化检测系统[J].自动化与仪表,2025,40(05):100-104.
- [2] 胡亚蕾,秦品乐,柴锐,等.基于边缘增强和通道重建的气体泄露红外图像分割算法[J/OL].中北大学学报(自然科学版),1-10[2025-05-27].
- [3] 周雷,田德鑫,马敬德.基于光谱技术的燃气管道泄漏检测定位研究[J].粘接,2025,52(05):119-122.
- [4] 刘白云.石油化工管道施工中的焊接技术及质量控制研究[J].石化技术,2025,32(04):107-109.
- [5] 王李帅.石油化工压力管道安装技术及质量控制[J].石化技术,2025,32(04):122-124.
- [6] 余诚.化工压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析[J].石化技术,2025,32(04):311-313.
- [7] 杨梦柳.化工压力管道检验常见问题及改进对策[J].石化技术,2025,32(04):314-316.
- [8] 王志海.工业管道防腐技术在石油化工中的应用分析[J].石化技术,2025,32(04):7-9.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS