

化工管道清洁机械爬虫的多技术融合与应用实践

王浩宇 马玉英 岳强 宋文豪 闫琳琳

山东工程职业技术大学, 山东省济南市, 250200;

摘要: 化工管道在长期运行过程中, 内部会积累大量污垢, 这些污垢不仅影响管道的输送效率, 还可能引发安全隐患。传统的管道清洁方式存在效率低、清洁不彻底、对管道损伤大等问题。随着科技的发展, 机械爬虫在化工管道清洁领域得到了广泛关注, 其通过多技术融合, 能够实现高效、精准、安全的管道清洁。本文将探讨化工管道清洁机械爬虫所融合的多种技术, 分析其融合机制, 并结合实际应用案例, 阐述其在化工管道清洁中的应用实践, 最后对其未来发展趋势进行展望。

关键词: 化工管道; 机械爬虫; 多技术融合

DOI: 10. 64216/3104-9672. 25. 01. 029

引言

化工行业是国民经济重要支柱产业, 管道是化工生产物料输送关键设施, 其安全运行关乎生产与人员财产安全。但化工管道输送介质时, 因介质复杂、温压等因素, 内壁会形成污垢, 包括结垢、腐蚀产物、沉积物等, 会减小管道流通截面积、增加阻力、降低效率, 还可能引发安全事故。传统清洁方法有人工清洁、高压水射流清洁、化学清洗等, 人工清洁劳动强度大、效率低, 在狭窄高危环境难开展; 高压水射流清洁对复杂结构和顽固污垢效果不佳, 还可能损伤管道; 化学清洗易污染环境, 对不同污垢需用不同药剂, 操作难度大。为克服传统清洁弊端, 机械爬虫应运而生, 它能在管道内主动, 携带清洁装置完成任务, 融合机械设计、自动化控制、传感器、人工智能等技术, 可适应不同管径和结构管道, 实现高效、精准、安全清洁。所以, 研究化工管道清洁机械爬虫的多技术融合与应用实践有重要现实意义。

1 化工管道清洁机械爬虫的多技术构成

1.1 机械结构设计技术

机械结构是化工管道清洁机械爬虫的基础, 其设计直接影响爬虫的运动性能、承载能力和清洁效果。机械结构主要包括行走机构、清洁机构和机身结构。

行走机构需要适应不同管径的管道, 能够实现前进、后退、转向等运动。常见的行走机构有轮式、履带式和蠕动式。轮式行走机构结构简单、运动灵活, 适用于管径变化不大的管道; 履带式行走机构接地面积大, 附着力强, 适用于管道内壁不平整的情况; 蠕动式行走机构通过身体的伸缩和蠕动实现运动, 能够适应较大管径范围的管道, 但运动速度较慢。

清洁机构根据管道污垢的类型和特点进行设计, 常见的有旋转刷式、高压水射流式和激光清洁式。旋转刷

式清洁机构通过刷子的旋转对管道内壁进行擦拭和清扫, 适用于去除表面附着的松软污垢; 高压水射流式清洁机构利用高压水泵产生的高压水流对污垢进行冲击和剥离, 清洁效果好, 适用于去除顽固污垢; 激光清洁式清洁机构利用高能激光束照射污垢, 使污垢瞬间蒸发或剥离, 具有清洁效率高、无损伤、无污染等优点, 但成本较高。

机身结构需要具有足够的强度和刚度, 以承受行走机构和清洁机构的重量以及工作过程中产生的载荷。同时, 机身结构还应尽可能紧凑, 以适应狭窄的管道空间。

1.2 自动化控制技术

自动化控制技术是实现机械爬虫自主运动和清洁作业的核心。它主要包括运动控制、清洁控制和远程监控等方面。

运动控制通过传感器实时检测爬虫的位置、速度、姿态等信息, 根据预设的路径或操作人员的指令, 控制行走机构的动作, 实现爬虫的精确运动。常用的传感器有编码器、陀螺仪、加速度传感器等。

清洁控制根据管道污垢的情况, 自动调节清洁机构的工作参数, 如旋转刷的转速、高压水射流的压力和流量、激光的功率等, 以达到最佳的清洁效果。同时, 清洁控制还能实现清洁机构的自动启停和切换。

远程监控系统通过无线通信技术将爬虫在管道内的工作状态、环境参数等信息传输到地面控制中心, 操作人员可以通过监控画面实时了解爬虫的工作情况, 并对其进行远程控制和操作。远程监控系统提高了操作的安全性和便捷性, 尤其适用于高危管道环境。

1.3 传感器技术

传感器技术为机械爬虫提供了感知管道环境和自身状态的能力, 是实现智能化清洁的关键。在化工管道

清洁机械爬虫中，常用的传感器有以下几种：

管道内壁检测传感器，如视觉传感器、超声波传感器等，用于检测管道内壁的污垢分布、腐蚀情况、变形等信息，为清洁机构的工作提供依据。视觉传感器可以获取管道内壁的图像信息，通过图像处理技术识别污垢的类型和位置；超声波传感器可以测量管道内壁的厚度和腐蚀程度。

环境传感器，如温度传感器、湿度传感器、气体传感器等，用于检测管道内的温度、湿度、有害气体浓度等环境参数，确保爬虫在安全的环境下工作。当环境参数超过预设阈值时，爬虫能够自动停止工作并发出警报。

位置和姿态传感器，如 GPS 定位传感器、陀螺仪、加速度传感器等，用于确定爬虫在管道内的位置和姿态，为运动控制提供准确的位置信息。

1.4 人工智能技术

人工智能技术的融入使机械爬虫具有了自主决策和学习能力，能够提高清洁作业的智能化水平。主要应用包括以下几个方面：

路径规划，利用人工智能算法，如 A* 算法、遗传算法等，根据管道的结构和污垢分布情况，为爬虫规划最优的清洁路径，提高清洁效率，减少重复清洁。

故障诊断，通过对爬虫工作过程中的传感器数据进行处理和分析，利用神经网络、专家系统等人工智能技术，能够及时发现爬虫的故障类型和位置，并给出相应的维修建议，提高设备的可靠性和可用性。

自适应控制，根据管道内环境的变化和污垢的特性，人工智能算法能够自动调整爬虫的运动参数和清洁参数，使爬虫始终保持最佳的工作状态。

2 多技术融合的实现路径

2.1 技术集成架构

化工管道清洁机械爬虫的多技术融合需要构建一个合理的技术集成架构，实现各技术之间的协同工作。该架构主要包括硬件层、软件层和应用层。

硬件层由机械结构、传感器、执行器、控制器等组成，是技术融合的物理基础。各硬件设备通过接口连接，实现数据的传输和指令的执行。

软件层包括操作系统、控制算法、数据处理软件等。操作系统为各软件模块提供运行环境；控制算法根据传感器数据和预设的策略，生成控制指令，控制执行器的动作；数据处理软件对传感器数据进行处理和分析，提取有用信息，为决策提供支持。

应用层是面向用户的功能模块，如远程监控界面、清洁任务规划界面等。用户通过应用层实现对机械爬虫的操作和管理。

2.2 数据交互与融合

各技术之间的协同工作要实现数据的交互与融合。传感器采集的管道环境和爬虫状态数据通过数据传输模块发送到控制器，控制器对数据进行处理和分析，生成控制指令发送到执行器。同时，控制器还将相关数据发送到远程监控系统，实现数据的共享和远程监控。

数据融合技术可以将来自不同传感器的信息进行综合处理，提高数据的准确性和可靠性。例如，将视觉传感器获取的图像信息与超声波传感器获取的管道内壁厚度信息进行融合，可以更全面地了解管道的状况。

2.3 协同控制策略

协同控制策略是实现多技术融合的关键，它能够协调各技术模块的工作，使机械爬虫整体性能达到最优。协同控制策略主要包括以下几个方面：

运动与清洁的协同控制，根据管道的结构和污垢分布情况，合理规划爬虫的运动路径和清洁顺序，使清洁机构在最佳的位置和时间对污垢进行清洁，提高清洁效率。

多传感器信息的协同处理，对来自不同传感器的信息进行综合分析和判断，提高对管道环境和爬虫状态的感知能力，为控制决策提供更可靠的依据。

故障协同诊断与处理，当爬虫出现故障时，各技术模块协同工作，快速定位故障原因，并采取相应的处理措施，如自动停机、报警等，确保设备的安全运行。

3 化工管道清洁机械爬虫的应用实践案例

3.1 案例背景

某大型化工企业的一条输送原油的管道，管径为 DN500，长度为 5000 米。由于长期输送原油，管道内壁积累了大量的油垢和沉积物，导致管道输送效率下降，且存在管道腐蚀的风险。该企业曾采用高压水射流清洁方式，但由于管道内存在一些弯头和阀门等复杂结构，清洁效果不理想，部分区域的污垢未能彻底清除。

3.2 机械爬虫的选型与配置

根据该管道的特点和清洁需求，选择了一款融合了轮式行走机构、高压水射流清洁机构、多种传感器和人工智能控制技术的化工管道清洁机械爬虫。该爬虫的主要参数如下：

行走机构：轮式，适应管径范围 300-600mm，最大行走速度 5m/min。

清洁机构：高压水射流式，最大工作压力 15MPa，流量 50L/min。

传感器：视觉传感器、超声波传感器、温度传感器、湿度传感器、陀螺仪等。

控制系统：采用基于 PLC 的控制系统，集成了人工智能路径规划和故障诊断算法。

远程监控系统：通过 4G 无线网络实现远程监控和控制。

3.3 清洁作业过程

前期准备：对管道进行全面检查，确定管道的走向、管径变化、弯头和阀门的位置等信息，并将这些信息输入到机械爬虫的控制系统中，作为路径规划的依据。同时，检查机械爬虫的各项性能指标，确保其正常工作。

爬虫进入管道：将机械爬虫放入管道入口，通过远程控制启动爬虫，使其按照预设的路径进入管道内部。

清洁作业：在爬行过程中，视觉传感器和超声波传感器实时检测管道内壁的污垢分布和腐蚀情况，并将数据传输到控制系统。控制系统根据这些数据，自动调节高压水射流的压力和流量，对污垢进行有针对性的清洁。同时，陀螺仪和编码器实时检测爬虫的位置和速度，确保爬虫按照规划的路径行驶。

实时监控：操作人员通过远程监控系统实时观察爬虫的工作状态、管道内的环境参数和清洁效果。当发现异常情况时，及时发出指令，控制爬虫停止工作或调整工作参数。

作业完成：当爬虫完成整个管道的清洁作业后，控制其返回管道入口，收回爬虫，并对清洁效果进行检查。

3.4 应用效果分析

清洁效果：通过对清洁后的管道进行检查，发现管道内壁的油垢和沉积物被彻底清除，管道内壁光滑，无明显损伤。与高压水射流清洁方式相比，清洁效果有了显著提高。

清洁效率：该机械爬虫的平均清洁速度为 3m/min，完成 5000 米管道的清洁作业仅用了约 28 小时，相比传统的人工清洁和高压水射流清洁，效率提高了 3-5 倍。

安全性：由于采用了远程监控和控制技术，操作人员无需进入管道内部，避免了在高危环境中作业的风险。同时，传感器能够实时检测管道内的环境参数，当发现有害气体浓度超标或温度过高等情况时，爬虫能够自动停止工作并发出警报，确保了作业的安全性。

经济性：虽然机械爬虫的初期投入较高，但从长期来看，其清洁效率高、清洁效果好，能够减少管道的维护成本和因管道故障导致的停产损失，具有较好的经济性。

4 化工管道清洁机械爬虫多技术融合的发展趋势与展望

随着人工智能发展，化工管道清洁机械爬虫智能化

水平将提升。未来，它将有更强自主决策能力，能依管道情况自动调整清洁策略与路径，实现自主清洁；还可通过机器学习积累经验，提高清洁效果与效率。其将融合更多先进技术，如利用物联网实现多台协同工作，用大数据分析管道运行与清洁数据，为维护管理提供依据。为适应复杂管道环境，爬虫将向小型化、轻量化发展，采用新材料与工艺减小体积重量，提高灵活性与机动性，降低对管道损伤风险。随着环保意识增强，绿色环保技术应用将更广泛，如开发无废排放清洁技术、采用可降解润滑剂与清洁剂。为促进其健康发展，需加强标准化、规范化建设，制定统一技术与安全规范，规范各环节，确保性能与安全；建立检测认证体系，提高质量与可靠性。

5 结论

化工管道清洁机械爬虫的多技术融合是解决传统管道清洁弊端的有效途径，它融合机械结构设计、自动化控制、传感器、人工智能等技术，实现高效、精准、安全的管道清洁作业。实际应用案例显示，机械爬虫在化工管道清洁中优势显著，能提高清洁效果与效率、降低作业风险，兼具经济性与社会效益。随着科技进步，其多技术融合将更深入，智能化水平不断提高，小型化、轻量化和绿色环保成发展趋势，标准化和规范化建设将保障其健康发展。未来，它将在化工行业管道维护管理中发挥更重要作用，为化工生产安全稳定运行提供有力支持。

参考文献

- [1] 郭会敏, 王芳. 大型新建煤化工管道清洁技术研究[J]. 石化技术, 2025, 32(08): 99-101.
- [2] 陈运胜, 张创基. 基于网络爬虫技术的旋转机械故障诊断信息采集系统[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(15): 139-141.
- [3] 山东工程职业技术大学. "一种用于管道清洁的机械爬虫." CN222470080U. 2025-02-14.
- [4] 方天阳. 可变径履带式管道清洁检测机器人结构设计及动力学分析[D]. 安徽建筑大学, 2025. DOI: 10.27784/d.cnki.gahjz. 2025.000261.
- [5] 郭会敏, 王芳. 大型新建煤化工管道清洁技术研究[J]. 石化技术, 2025, 32(08): 99-101.

作者简介：王浩宇，汉，山东潍坊，本科，现代通信工程。马玉英，1985.01，汉，山东日照，硕士研究生，教授，微电子技术。

山东工程职业技术大学 2024 年度大学生科技创新项目：化工管道清洁机械爬虫（编号 14）。