

# 管道机器人技术综述与未来展望

冉文豪, 高进, 程家杰, 朱利昊, 于荣婷

(嘉兴南湖学院机电工程学院, 浙江嘉兴 314001)

**摘要** 随着自动化技术的发展, 管道机器人在检测领域的重要性日益凸显。本文首先概述了管道机器人的研究背景、分类及其特性, 包括轮式、履带式、蠕动式和软体管道机器人; 其次讨论了国内外研究现状, 涵盖技术发展、应用创新和市场前景。本文还评估了不同检测技术的优缺点, 如漏磁检测和超声波检测, 并指出了实际应用中的挑战, 如运动控制、定位准确性和移动距离限制; 最后展望了管道机器人未来在自主性、模块化设计和能量供给等方面的发展方向, 旨在为相关人员提供借鉴。

**关键词** 管道机器人; 自动化技术; 管道检测; 漏磁检测技术; 超声波检测技术

**基金项目:** 2024 浙江省大学生科技创新活动计划, “新苗人才计划” (项目编号: 2024R440A001); 2024 特种设备科教融合学院创新训练项目 (项目编号: KJRH-2024003); 2024 国家级大学生创新创业训练计划 (项目编号: 202413291008)。

**中图分类号:** TP242

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2097-3365(2024)12-0001-03

我国石油和天然气管道数量不断增加, 但管道老化和腐蚀等问题可能引发环境和安全风险。因此, 定期检查和维修至关重要。由于传统维修方法效率低且风险高, 特别是在难以进入的管道中, 管道机器人在检测中发挥了关键作用。自 20 世纪 50 年代以来, 受益于自动化、计算机和通信技术的进步, 我国管道机器人技术迅速发展, 不仅在科学研究中具有重要价值, 还在提升公共安全、促进经济发展、保护环境和推动社会进步方面发挥着重要作用。

## 1 管道机器人分类

根据在管道内的行走方式不同, 管道机器人主要分为轮式、履带式、蠕动式、软体式管道机器人等, 也是目前使用比较广泛的几种机器人类别。

### 1.1 轮式管道机器人

轮式管道机器人广泛用于管道检查, 许多商业机器人属于这一类型。如图 1, 轮式机器人通常设计较为紧凑, 能够在管道中灵活移动。相比于其他类型的管道机器人, 轮式设计使得机器人在管道内行进时阻力较小, 提高了作业效率。轮子的设计具有一定的通用性, 然而, 它们在遇到障碍或不平整管道时可能难以越过, 存在倾覆风险<sup>[1]</sup>。

### 1.2 履带式管道机器人

履带式机器人使用履带代替轮子, 适应于较大管径或矩形管道, 如图 2。履带式机器人适合在各种地形条件下工作, 包括粗糙、湿滑或不均匀的管道表面。

其在管道中稳定性较高, 不易倾覆。但相对的, 其工作效率较低, 且结构更复杂, 需要更多的维护成本<sup>[2]</sup>。

### 1.3 蠕动式管道机器人

蠕动式管道机器人主要依靠机体的不断重复伸长与收缩运动, 来实现机器人在管道内的运动, 优点是其与管道内壁的摩擦力较小, 越障性能优良, 缺点是其牵引力局限性大, 速度较慢、效率低, 蠕动式机器人的应用场景只能局限于一些小管径、短距离的管道。其结构较为复杂, 所以应用较少<sup>[3]</sup>。

### 1.4 软体式管道机器人

相比于传统的刚体机器人, 软体式管道机器人具有更好的灵活性、复杂环境适应性和高安全性等优点, 软体式管道机器人在设计中普遍采用柔性材料, 制造成本较低, 且可以定制以适应特定的应用需求。但其柔软材料可能在不断发生的热胀冷缩中损坏, 需要进一步的材料研发来提高耐久性。目前软体式管道机器人领域的应用还不成熟, 可能还存在其他潜在问题<sup>[4]</sup>。

## 2 管道机器人研究现状

### 2.1 国内管道机器人研究现状

国内管道机器人的研发起步较晚, 但近年来发展迅速, 在多个领域取得了显著成果。

早期的研究主要集中在特定领域, 如哈尔滨工业大学邓宗全教授团队研究的轮式行走管道机器人, 主要用于大口径管道的自动化检测。随着研究的深入, 管道机器人的形式和应用场合变得更加灵活与常见。



图1 轮式管道机器人

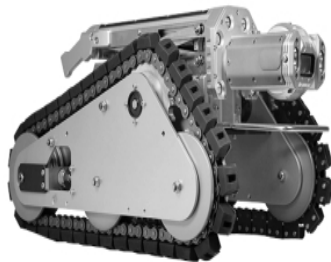


图2 履带式管道机器人

国内管道机器人技术集成了机械设计、控制系统、传感器技术、图像处理等多种先进技术,形成了机电一体化设备。这些机器人能够响应控制系统的操作指令,完成管道内部的检测、维修、清洗等多种任务。

管道机器人可依据其功能、驱动方式及应用领域进行分类。在城市排水、水下清淤、管道修复检测等领域发挥着重要作用。它们能够进入人类难以到达的管道内部,完成较为复杂的任务,提高了工作效率和安全性。

我国管道机器人市场规模持续增长,预计未来几年将保持高速增长态势。随着5G、人工智能等技术的不断发展和普及,市场应用前景广阔。

## 2.2 国外管道机器人研究现状

国外在管道机器人领域的研究起步较早,拥有深厚的技术积累和丰富的应用经验。管道机器人在石油、化工、天然气等工业领域的应用非常广泛。

国外的管道机器人技术不断创新,集成了更多先进的技术和功能。例如,一些新型管道机器人可以实现自主导航、智能检测和预测性维护等多种功能。这些机器人通过引入深度学习算法、物联网设备等新兴技术,智能化水平不断提升,能够更好地适应复杂环境和多变任务的需求<sup>[5]</sup>。

国外管道机器人市场规模较大,市场竞争激烈。众多知名的管道机器人制造商和服务商在全球范围内展开竞争,为用户提供多样化的产品和服务。同时,一些国家和地区也在出台相关政策和计划支持管道机器人产业的发展,进一步推动市场的增长和技术的创新。

## 3 管道机器人检测方式的研究

### 3.1 漏磁检测技术

漏磁检测技术是利用磁场在铁磁性材料中的传播特性,通过检测缺陷处的漏磁场来识别和评估管道内部的缺陷。该技术具有快速、高效和非破坏性等优点,适用于铁磁性材料的检测。然而,其应用范围受到限制,仅能对铁磁性材料进行有效检测。

### 3.2 超声波检测技术

超声波检测技术运用高频声波对材料内部的缺陷

进行检测,具有高精度、非破坏性和深度穿透能力等优点,广泛应用于管道、结构件和焊接等领域。但是,该技术对表面条件要求较高,操作较为复杂,且对于复杂形状的工件检测存在一定的局限性。

### 3.3 红外热成像技术

红外热成像技术依据热辐射原理,通过检测物体表面的温度分布状况来甄别管道系统中存在的异常。该技术具有非接触式检测、能够实时成像以及可进行大面积检测等优势,但同时也存在对表面依赖性强、易受环境影响以及数据解释复杂等局限性。对于需要进行快速、广泛巡检的管道系统而言,红外热成像技术是一种有效的检测工具,但通常需要与其他检测方法相结合使用,才能获得更为全面且准确的检测结果。

### 3.4 视频检测技术

机器视觉技术结合自动检测识别技术,可实现对管道内壁的自动检测。通过数字化检测,利用先进的图像处理算法和机器学习方法,实现管道内部图像的自动检测和缺陷识别,具有直观性、实时性以及全面覆盖等优点,广泛应用于管道缺陷的检测与维护。然而,该技术存在视野受限、对光照依赖以及依赖人工判断等局限性。通常情况下,需要与其他检测方法联合运用,以获取更全面且准确的检测结果。

### 3.5 激光扫描技术

激光扫描技术利用激光测量原理生成管道内部的高精度三维模型,具有高精度、全面覆盖以及非接触检测等优点,适用于对管道结构进行详细的分析与评估。然而,该技术对环境条件、数据处理以及操作技术有着较高的要求,且成本较高。在实际应用中,通常需要与其他检测方法结合使用,以获取更全面且准确的检测结果。

### 3.6 涡流检测技术

涡流检测技术通过电磁感应原理对导电材料表面和近表面的缺陷进行检测,具有高灵敏度、非接触式检测以及快速检测等优点,适用于多种导电材料和应用场景。然而,该技术检测深度受限,对表面条件要

求较高, 对非导电材料无效, 且信号解释较为复杂。在实际应用中, 通常需要根据具体的检测需求和材料特性选择合适的检测方法, 并可能与其他检测技术结合使用, 以获得全面且准确的检测结果。

### 3.7 电磁声波检测

电磁声波检测是一种不需要介质耦合的超声波检测方法, 适用于高温、高速流体的管道检测。通过在管道表面产生电磁声波, EMAT 技术可以检测到管道壁内的损伤情况, 具有无损检测、效率高、准确性高等优点, 但对环境和操作条件要求较高, 需要专业的设备和技术人员进行操作和数据分析, 适用于涂层或腐蚀严重的管道环境。

## 4 管道机器人实际应用中存在的问题

### 4.1 控制运动问题

管道机器人在作业中的运动性能直接影响作业效果, 包括运行速度、平稳性、过弯能力和越障能力等。受管道内障碍、执行机构误差和载荷变化影响, 运动控制成为研究重点。复杂多变的管道环境要求机器人实现精确、稳定运动, 以完成检测任务, 同时需具备高效实时性能和良好的鲁棒性。

### 4.2 定位问题

管道机器人需准确定位以监测工作情况, 尤其在检测缺陷位置时尤为重要。常用定位方式有里程轮、GPS 和 CCD 视觉定位。管道内复杂结构、障碍物和积水等增加了定位难度。传感器技术受限, 实时性能要求高, 如何在保证精度的同时提高实时性是一大挑战。

### 4.3 移动距离限制

由于管道和通信及电源电缆之间的摩擦阻力, 机器人的移动距离被限制在大约 100 米。特别是在 L 形管道的 L 部分, 摩擦力特别大, 使得机器人的移动距离随着遇到的 L 形管道数量的增加而进一步缩短。由于通信和电源电缆沿管道的摩擦阻力, 机器人的移动距离受限, 通常不超过 100 米。

## 5 未来展望

### 5.1 增强自主性

开发更先进的自主导航算法, 使机器人能够在没有外部指导的情况下探索未知环境。管道机器人将朝着更高的自主性和智能化方向迈进。这不仅能够大幅度提高工业维护的效率, 还可以减少人为操作的风险和成本。同时, 这些技术的成熟也将带来新的应用场景, 例如在极端环境下执行无人任务, 甚至在外太空或深海中进行管道维护。

### 5.2 模块化

模块化设计方法通过将复杂的系统分解为独立的、可互换的模块, 提高了系统的可维护性和扩展性。西安工业大学祝海珍等人的研究中提出了一种基于模块化设计的管道机器人资源库构建方法, 通过模块化技术与数据库技术的结合, 实现了管道机器人设计的标准化和系列化模块化设计方法的应用, 使得管道机器人的设计更加灵活和高效。通过构建模块化资源库, 设计人员可以快速地进行管道机器人的定制和优化<sup>[6]</sup>。同时, 随着技术的进步, 可以方便地添加新的功能模块, 提升机器人的性能。

### 5.3 能量供给

管道检测机器人通常需要在长时间内连续工作, 对能源供给提出了较高的要求。常见的供电方式有电缆供电、电池供电。然而, 传统的电池供能方式存在续航时间有限、体积重量大等问题, 限制了机器人的工作能力和应用范围。

目前在科研方向较为成熟的解决方案有新型电池技术、无线充电技术和能量转换技术。

1. 新型电池技术: 研发更轻、能量密度更高的新型电池, 如固态电池、燃料电池等, 以提高机器人的续航能力。

2. 无线充电技术: 利用无线充电技术为机器人提供持续的能源供给。通过在管道内部或附近设置无线充电站, 机器人可以在工作时自动进行充电, 无需人工干预。

3. 能量转换技术: 研究将管道内部的环境能量(如热能、振动能等)转换为电能的技术, 为机器人提供持续的能源供给。这种技术可以进一步降低机器人的能耗和成本。

## 参考文献:

- [1] 张莹杰. 管道机器人综述[J]. 装备制造技术, 2021(06): 114-117, 138.
- [2] 同[1].
- [3] 杨家岐. 排水管道自适应清理机器人设计与研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [4] 刘磊, 温涛, 韩伟涛, 等. 管道内软体爬行机器人的设计与性能分析[J/OL]. 工程设计学报, 1-9[2024-09-23]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-GCSJ20240321005.htm>.
- [5] 秦德昭, 李延锋, 张用之. 管内机器人的研究与发展趋势[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(07): 31-32, 35.
- [6] 祝海珍. 基于模块化设计的管道机器人资源库的构建[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.