

管道机器人研究综述

查益程¹ 陈炜峰^{1,2} 刘雪飞³ 蔡怀璇¹ 粟冰³ 吉爱红^{3,4}

(1. 南京信息工程大学 自动化学院, 南京 210044)

(2. 泉州信息工程学院 机械与电气工程学院, 泉州 362008)

(3. 南京航空航天大学 机电学院 运动仿生与智能机器人实验室, 南京 210016)

(4. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

摘要:【意义】管道机器人是一种高效智能的设备, 专门设计应用于管道内执行检测和清理等任务。这种技术的应用可显著减少管道人工作业的风险与成本, 提高作业效率和安全性。【分析】深入分析了管道机器人在管道检测和清理领域的应用前景及其技术的发展动态。对管道机器人的研究现状进行了概述, 从多个角度进行分类, 包括管道机器人的运动方式、功能、应用领域。通过对管道机器人发展历程的梳理, 进一步提炼出该领域的关键技术点, 并针对技术难题和未来发展趋势提出见解, 旨在为管道机器人技术的进一步研究和应用提供参考和指导。

关键词: 管道机器人; 研究现状; 运动方式; 关键技术

中图分类号: TP242 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2025.09.021

0 引言

随着“西气东输”工程的提出, 中国越发重视管道运输行业, 运输管道已经遍布全国各地^[1]。作为中国五大运输行业之一, 管道运输在液体和气体运输方面具有天然优势^[2], 不仅具有运量大、连续、快捷、稳定、安全、有效、稳定的优点, 而且投入小、占用少、代价小, 还能够实现自动控制^[3]。随着使用时间的增加, 运输管道会出现堵塞、裂隙、漏孔等问题, 长此以往, 会严重影响运输效率、危及从业人员的安全。因此, 对管道进行定期检测与维护, 就成为管道运输作业中一项必不可少的环节。受管道口径的尺寸和所处环境的限制, 人工维护的成本和难度都较大。为降低事故率, 必须定期进行全面管道检测, 及早发现和修复管道缺陷。然而, 技术和检测方法的限制给检测与维修带来困难。过去通常采取人工开挖和定期巡检管道的方法进行管道的预防性或提前报废检测, 以确保安全使用^[4]。显然, 这样做易导致巨大的经济损失, 并且很容易漏检, 还可能造成严重的安全隐患。管道机器人可沿管道内壁行走, 可配备多种传感器和操作装置。用于管道机器人的传感器种类多样, 包括用于视觉检测的电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机、用

于定位的位置与姿态传感器、用于测量距离的超声传感器、用于裂纹检测的涡流传感器等。管道机器人配备的操作装置包括清理设备、裂纹检测工具、焊接设备、喷涂装置以及机械手等, 可以完成诸多复杂的检测和维护任务。操作人员通过遥控和预设程序, 能够灵活操控管道机器人, 实现对管道的全方位检测与维护^[5]。本文对管道机器人技术的多个分支进行了全面综述。梳理了管道机器人的发展现状、分类方式和关键技术等; 揭示了管道机器人技术所涉及的多元化领域; 同时, 着眼于管道机器人技术的发展方向, 对该领域可能的趋势和创新方向进行了展望。通过全景式的论述, 为该领域未来的研究和实践提供有益的参考与启示。

1 管道机器人分类及研究现状

管道机器人的种类繁多, 国内外的研究成果都很丰富。结构不同的管道机器人能够灵活应对不同的工作环境、满足多样需求。可根据不同的角度, 对管道机器人进行多维度分类, 主要包括运动方式、功能、应用领域。其中, 运动方式能够表明不同类型的管道机器人在管道内部的移动和导航方式; 管道机器人的功能凸显了这些机器人在执行任务时的多样性和灵活性; 管道机器人的应用领域可显示它

收稿日期: 2024-05-07 修回日期: 2024-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075248)

作者简介: 查益程, 男, 1999年生, 安徽铜陵人, 硕士研究生; 主要研究方向为管道机器人; 2521277294@qq.com。

吉爱红(通信作者), 男, 1973年生, 江苏如皋人, 博士, 研究员; 主要研究方向为智能机器人、运动仿生与运动力; mecahji@nuaa.edu.cn。

引用格式: 查益程, 陈炜峰, 刘雪飞, 等. 管道机器人研究综述[J]. 机械传动, 2025, 49(9): 175-192.

ZHA Yicheng, CHEN Weifeng, LIU Xuefei, et al. Review on pipeline robots[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(9): 175-192.

们在各个工业和环境领域的应用场景。

1.1 管道机器人运动方式

管道机器人的运动方式可分为主动运动和被动运动两种；而根据机械结构的不同特征进一步细分，可分为仿生型、车型、支撑型、履带型和螺旋驱动型等几个亚类别。本文依据这些运动方式和机械结构的差异(图1)，将管道机器人分为7类^[6]，以更全面地阐述其多样性和复杂性。

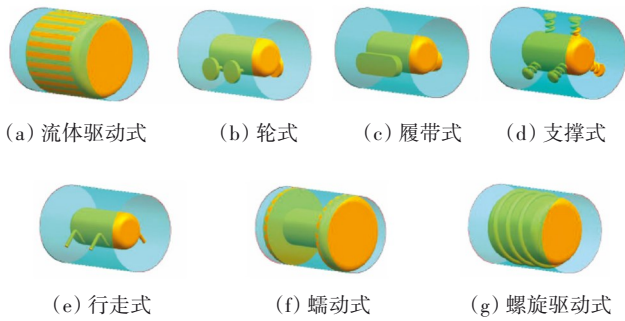


图1 管道机器人运动方式分类

Fig. 1 Motion classification of the pipeline robot

1.1.1 流体驱动式管道机器人

流体驱动式管道机器人凭借液体介质的压力差实现自驱动，在解决能源供应难题上具有显著优势，相较于其他管道机器人，更适用于对长距离油气管线进行检测。

HU等^[7]对自驱动管道的动态特性进行了研究。如图2所示，这种管道机器人能够利用管道中流体流动的动能，通过涡轮和反向螺旋机构获得动力。该机器人具备双向移动能力，可以随着流动的液体一同前进或逆流而动，其涡轮系统精密而可靠，能够有效地将流体动能转化为机械动力，为机器人提供持续而稳定的运动。反向螺旋机构的精巧设计使机器人能够灵活应对管道内的各种复杂条件。

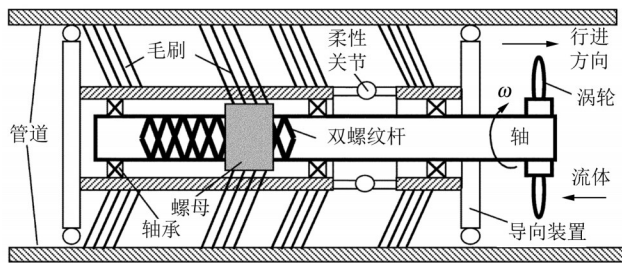


图2 自驱动管道机器人的基本结构

Fig. 2 Basic structure of the self-driven pipeline robot

如图3所示，德国Rosen公司研制了一种智能流体驱动式管道机器人^[8]，其动力来源于涡轮和反向螺旋机构，二者共同协作以实现动力传输。该机器人的移动能力具备双向性，可随着管内介质流动而行动自如；检测部分由多组不同的单元组成，其中

动力单元负责提供机器人运动所需的动力，检测单元用于执行管道内部的检测任务，里程测量单元则负责准确测量机器人在管道中的行进里程，从而确保导航准确、任务顺利完成。

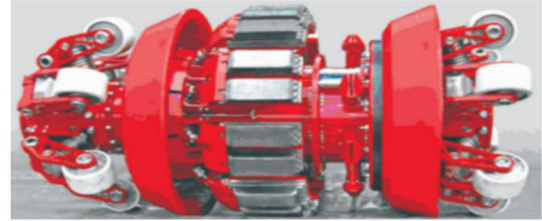


图3 流体驱动式管道机器人

Fig. 3 Fluid-driven pipeline robot

流体驱动式管道机器人在速度方面受到介质压差的制约，难以精确控制，会影响检测的准确性。受管道内介质的影响，机器人也会发生摇摆和晃动，所以，其整体稳定性并不高。流体驱动式管道机器人仅适用于流体介质的管道，对于干管道或半干管道的作业效果并不理想。

1.1.2 轮式管道机器人

如图4所示，轮式管道机器人以驱动轮为行走机构，结构简单、行走速度快、驱动和控制相对简单，具有较好的通用性，制造成本相对较低。轮式管道机器人的应用较为广泛。

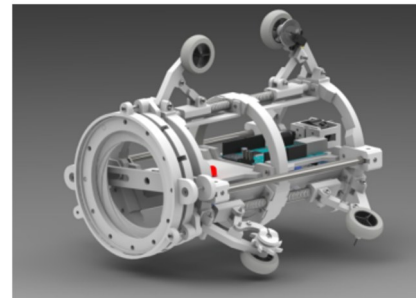


图4 三轮腿式管道机器人

Fig. 4 Tricycle-legged pipeline robot

如图5所示，张学文等^{[9]22-23}设计了一种全新的驱动单元，并将其应用于轮腿式管道机器人。该驱动单元为三轴差动式，包含驱动和正压力调节两个部分：①驱动部分由锥齿轮、行走轮、驱动轮组成的轮组实现单个电动机驱动，三路差动输出；②正压力调节部分包括预紧滑套、支撑杆、平行四杆式驱动轮支架等。控制方式为通过电动机驱动，调整弹簧的预压缩量以控制驱动轮与管壁的接触压力，确保获得足够的拖动力以适应管径变化。

JIANG等^[10]以独立双驱动轮式管道机器人为研究对象，构建了基于分数阶比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)和整数阶PID的控制系统。PID控制是一种被广泛采用的控制技术，其核心原理

是依据输入信号与设定值之间的误差, 通过比例(P)、积分(I)和微分(D)3种控制方式对系统进行调整。试验验证显示, 分数阶PID系统表现出更强的抗干扰能力和鲁棒性。这项研究成功解决了管道机器人在不平整路面引起的振动问题, 改善了管内图像的清晰度。

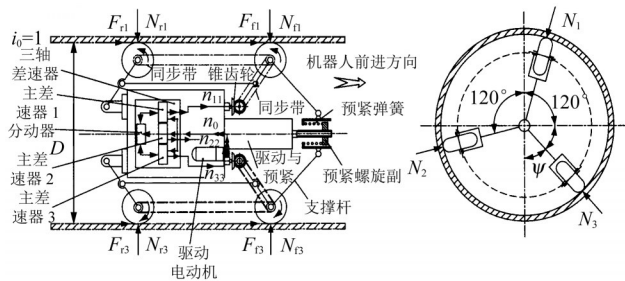


图5 三轴差速式驱动单元结构原理图

Fig. 5 Structure principle diagram of the three-axis differential drive unit

尽管轮式管道机器人在各领域的应用已经相当广泛, 但也存在一定的局限性。轮式结构使得机器人与管道之间的接触面积相对较小, 这就对管道机器人的驱动力产生了一定的影响, 使其不足以满足部分对机器人驱动力较大的需求^[11]; 轮式管道机器人的越障能力和地形适应性较差, 因此, 在管道内部遇到障碍物时, 机器人的行进可能会受到阻碍。

1.1.3 履带式管道机器人

如图6所示, 履带式管道机器人的主要行走机构是履带, 此种结构可显著增强机器人的驱动力。机器人的两侧履带有一定的夹角, 通过调整夹角, 可灵活地改变管道机器人的活动范围, 以适应各种不同直径的管道。履带式管道机器人具有牵引力大、转动灵活、不易打滑、越障性能好等优点。

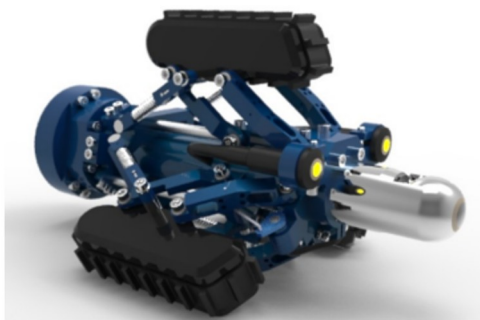


图6 履带式管道机器人

Fig. 6 Crawler type pipeline robot

如图7所示, BOGDAN等^[12]研发了一种磁性跟踪机器人, 专门用于管道检测。该款机器人采用履带式设计, 其移动方式是通过2个外部磁性轨道沿着管道内表面行进。具体来说, 这些轨道包含柔性磁铁带, 而这些磁铁带能够自动调整其弯曲角度, 以适

应管道内表面的曲率变化。整个磁轨系统由2条齿状橡胶带组成。每条橡胶带上带有2组6 mm×4 mm圆柱形N42钕磁铁平行排列, 并通过金属链连接。这一设计的优势在于磁铁带能够在管道的不同曲率和表面上保持紧密接触, 从而提高机器人在复杂管道环境中的稳定性和可靠性。这种磁性跟踪机器人为管道检测提供了一种高效而灵活的解决方案。

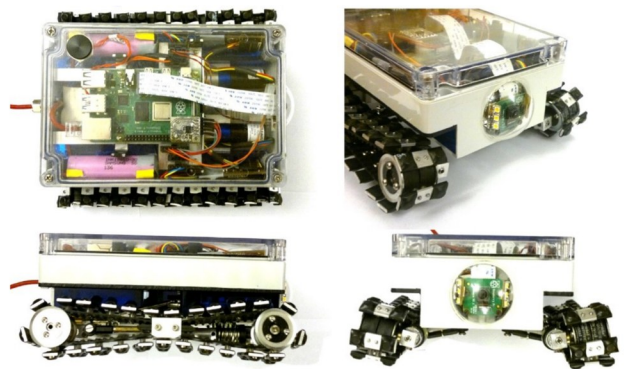


图7 磁性跟踪机器人

Fig. 7 Magnetic tracking robot

喻九阳等^{[13]57-58}于2023年研发出一款创新的可变径油气管道巡检机器人, 以解决管道机器人适应性和爬坡能力不足等问题。如图8所示, 该款机器人结合了2个可调节直径的履带轮和1个被动支撑轮, 通过提高履带轮在管道内壁的摩擦力, 显著提升了机器人的承载能力和爬坡性能。驱动装置采用滚珠丝杠、螺母、连杆等组件, 而变径效果则由丝杠电动机的伸缩机制来实现。

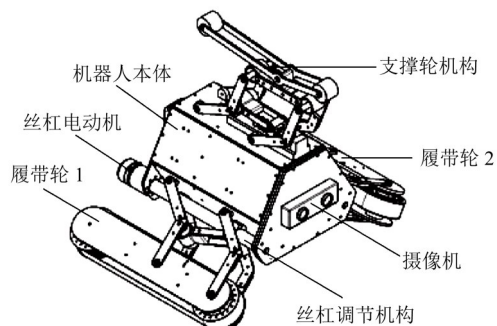


图8 油气管道巡检机器人

Fig. 8 Oil and gas pipeline inspection robot

但是, 履带式管道机器人也存在一些不足。这类机器人质量及尺寸较大, 主要适用于大口径管道, 在一些狭窄或有限空间中的运动受到限制。在机器人行进的过程中, 履带与管道内壁摩擦, 不可避免地产生较大的能量损失^[14], 进一步增加了机器人的能耗, 影响其长时间运行的效率。履带系统的复杂设计和制造也涉及更高的成本^[15], 在投入和维护方面就会相对昂贵。

1.1.4 支撑式管道机器人

支撑式管道机器人利用被动支撑轮或其他支撑结构与管道内壁保持接触,借助这种支撑方式在管道内移动。由于支撑结构的稳定性,该机器人能够执行管道系统的巡检和维护任务。

作为管道机器人结构上的一个分支,通常情况下,支撑式结构并非独立存在,而是与其他结构融合,形成混合式结构的管道机器人,如文献[9]^[23-24]中的轮腿式管道机器人和文献[13]^[58-60]中的油气管道巡检机器人。这种结构设计使得管道机器人在执行巡检和维护任务时能够在管道内保持平稳移动。可变径的支撑式结构还能够使管道机器人灵活适应不同直径和形状的管道,具备广泛的适用性。

1.1.5 行走式管道机器人

行走式管道机器人采用仿生结构,具备多条腿足,对各种复杂的管道内壁环境展现出较强的适应性。相较于其他类型的管道机器人,行走式管道机器人在应对不同曲率的弯折管道时表现出更高的灵活性和稳定性。其仿生多足结构使其能够应对一些由管道结构和障碍物导致的运动受限问题。由于仿生的设计理念,行走式管道机器人可模拟自然界中一些动物的运动方式,这种创新性的结构为管道巡检、维护和修复任务提供了全新的解决方案。

如图9所示,ZAGLER等^[16]研发了一款名为MORITZ的多足行走管道机器人。该机器人质量为20 kg,配备了8足爬行驱动,具有150 N的牵引力。其尺寸为0.75 m×0.6 m×0.6 m(长×宽×高)。在最佳条件下,该机器人最大速度可达到0.1 m/s。

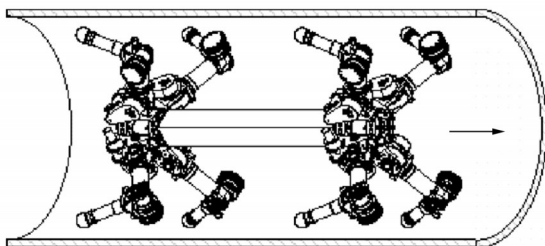


图9 MORITZ 机器人

Fig.9 MORITZ robot

如图10所示,张铁等^[17]设计了一种四足管道内壁机器人。他们进行了周向运动位姿的探索,精心设计了机器人在运动中的位置与姿态,建立了管道坐标系以及机器人的位置与姿态方程,提出周向运动策略,包括对足部姿态的精准调整、机身的旋转与平移操作,并通过试验验证了这种周向运动位置与姿态规划的准确性。

与其他结构简单的管道机器人相比,行走式管

道机器人的结构设计更为复杂,多足之间的协调较为困难^[18]。因此,为了确保机器人在行走时的稳定性,需要更复杂的控制系统和步态规划,从而增加了机器人的设计成本和维护难度。

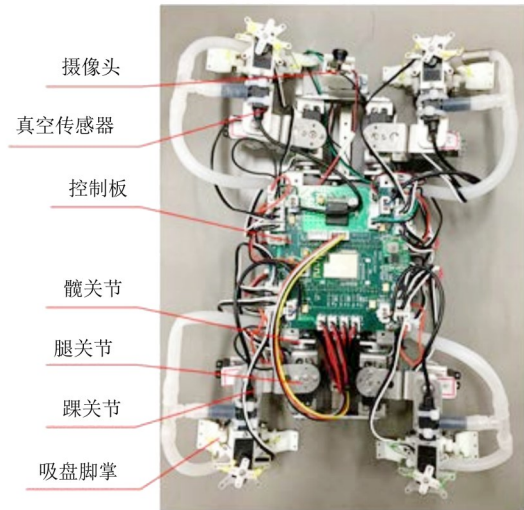


图10 四足管道机器人

Fig.10 Quadrupedal pipeline robot

1.1.6 蠕动式管道机器人

蠕动式管道机器人的设计和运动方式参考了生物的蠕动动作。这种机器人能够在管道内部自由移动,具备前后、左右、上下等多方向运动^[19]的能力,可在复杂的管道网络中灵活地运动。蠕动式管道机器人在运动过程中保持相对稳定,可在管道中连续工作。得益于蠕动式的仿生结构,蠕动式管道机器人在管道中可表现出大的牵引力^[20]。

如图11所示,GAO等^[21]研制了一种微型管道蠕动机器人,其驱动机制基于形状记忆合金技术。该机器人由多个相同结构的模块组成,每个模块直径为20 mm,搭载3个形状记忆合金弹簧并作为驱动器。这3个弹簧被固定在模块的端部,形成一个等边三角形。机器人通过模块之间的规律性膨胀以及与运动表面的摩擦实现蠕动运动,成功解决了传统记忆合金蠕动机器人延伸速度较低的问题。

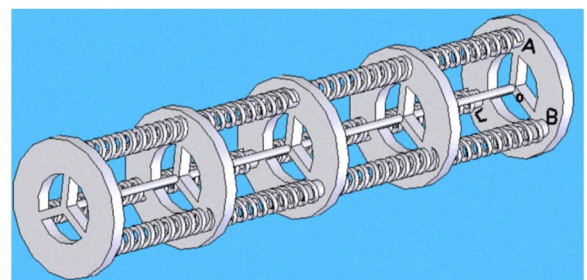


图11 基于形状记忆合金驱动的微型管道蠕动机器人

Fig.11 Miniature pipeline peristaltic robot based on the shape memory alloy actuation

如图 12 所示, ISHIKAWA 等^[22]设计开发了一种用于长距离复杂排水管道检查的蠕动式爬行机器人。该机器人采用了类似蚯蚓的蠕动运动原理, 如图 13 所示, 通过增加气压驱动的人工肌肉单元来实现前进和收缩运动。该方式使得机器人能够在狭窄的空间内稳定移动, 提高了在复杂管道中的检查效率。

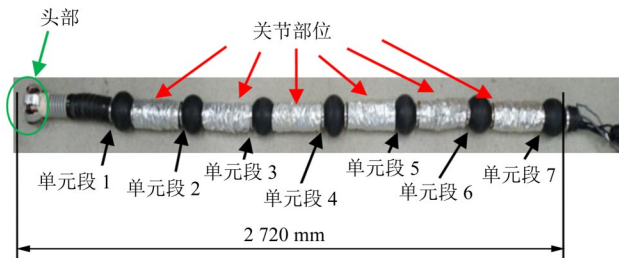


图 12 蠕动式爬行机器人

Fig. 12 Peristaltic crawling robot

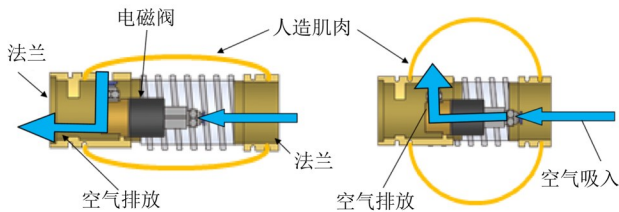


图 13 驱动单元伸长状态与收缩状态

Fig. 13 Extension and contraction states of the unit section

蠕动式管道机器人的运动方式模仿了生物蠕动的运动方式, 因此, 速度相对较慢; 在弯曲的管道中, 其灵活性不如轮式或履带式管道机器人, 因此, 运动效率较低。

1.1.7 螺旋驱动式管道机器人

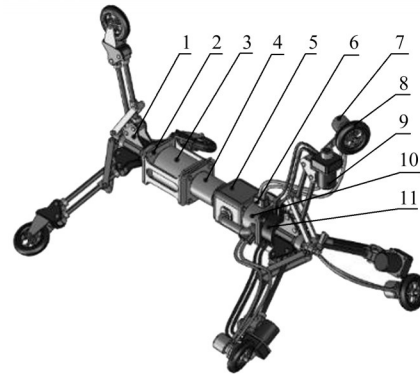
采用螺旋旋转的驱动方式在管道内移动的机器人被称为螺旋驱动式管道机器人^[23]。螺旋驱动的运动方式一般分为主动驱动和被动驱动。在牵引力与机械传动上, 主动驱动要优于被动驱动。

如图 14 所示, YAN 等^[24]研制了一种主动螺旋驱动式管道机器人。该机器人采用微液压系统来实现主动螺旋驱动, 采用变径结构以实现管道中的自适应角度差调整。这种驱动方式和可变径结构使得该机器人在管道中具备大的牵引力和较高的机械传动效率。

如图 15 所示, ZHENG 等^[25]设计了一款能够适应复杂环境的可变径螺旋驱动管道机器人。该机器人在结构设计上集成了轮腿式管道机器人的特点, 采用了六轮支撑结构, 前、后各有 3 个轮子均匀分布。为了确保机器人在不同管径下的适应性, 还采用了弹性支撑臂。相较于传统的轮式和腿式机器人, 该款机器人在能耗、轴向力传输以及变径能力等方面具有显著优势。

螺旋驱动式管道机器人一般用于检测和防止石

油和天然气管道泄漏。通过对螺旋角度、法向力、管道材质以及操作姿态等因素进行全面分析优化, 可以提升该机器人的运动稳定性和牵引力^[26]。



1. 支撑架; 2. 电动机框架; 3. 电动机; 4. 联轴器; 5. 齿轮泵; 6. 限流器; 7. 液压电动机; 8. 驱动轮; 9. 转角缸; 10. 主油箱; 11. 转角调节油池。

图 14 可变径螺旋驱动式管道机器人

Fig. 14 Variable diameter spiral driven adjustable pipeline robot

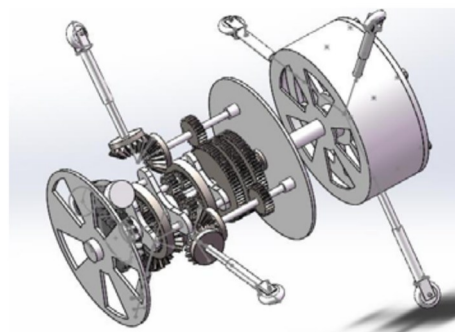


图 15 螺旋驱动自适应管道机器人

Fig. 15 Screw-driven adaptive pipeline robot

除了上述几种基本类型, 管道机器人还存在其他种类, 如腹壁式管道机器人和蛇形管道机器人。腹壁式管道机器人的运动方式是通过其机械臂的伸缩与管道内壁接触, 进而推动自身前行。而蛇形管道机器人则具有多节构造、高度的灵活性和冗余自由度^[27]等特点。

1.2 管道机器人功能

1.2.1 检测与监控

一些管道机器人配备了 CCD 相机等传感器, 能够对管道内部进行详细的检测和监控, 从而完成管道系统的验收工作。管道机器人还能够找出并定位故障管段, 并通过其图像传感器来评估管道的损坏程度, 大大提高了管道维护工作的效率。

如图 16 所示, JAIN 等^[28]设计了一种用于地下管道探测的机器人。该款机器人配备视觉摄像设备、丝带机构、厚度测量单元以及气体检测器等, 并采用数字图像处理技术进行裂缝检测, 实现对地下管道的全面检测。

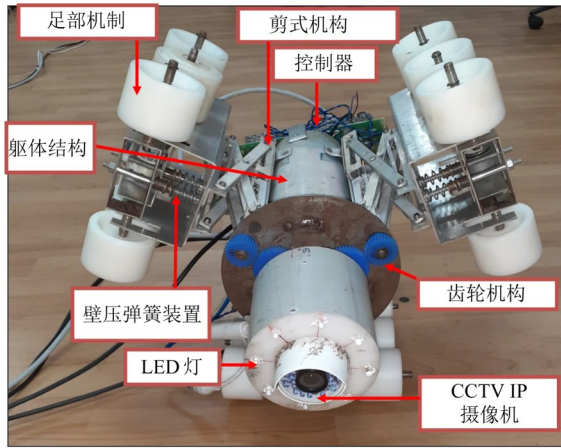


图16 地下管道检测用机器人

Fig. 16 Robot for the underground pipeline inspection

如图17所示，TANG等^[29]开发了一种管道检测机器人，可在亚厘米级管道内高效移动并顺利完成检测工作。该机器人质量为2.2 g，长度为47 mm，直径小于10 mm，采用了蠕动式的仿生结构，并使用智能材料作为驱动，采用高功率密度的柔性电介质肌肉执行器作为机器人的伸长单元，基于结构复合材料的高效传输作为固定单元。该机器人还配备了微型摄像头，可检测飞机发动机和石油炼油设备等复杂管道系统的内部状况。



图17 亚厘米级管道检测机器人

Fig. 17 Sub-centimeter pipeline inspection robot

1.2.2 清理与维修

由于工业废弃物、生活垃圾的积累或者管道设计和安装的问题，管道可能会出现堵塞和裂缝。在此类情况下，需要负责清理与维修的管道机器人及时处理相应问题。

如图18所示，YUAN等^[30]针对排水管道疏浚作业设计了一种管道清理机器人。该机器人由机械体、测量系统、可收缩电缆装置、电源系统等组成，通过升降机将自身送入垂直检查口和水平排水管入口，然后开始在管道内部工作。机器人的测量和控制系统由地面上的主控计算机和机器人体内的系绳计算机共同构成。主控计算机能够显示来自系绳计算机的实时数据，实现对机器人的自动控制，使机器人

能够按照预设的轨道进行移动。

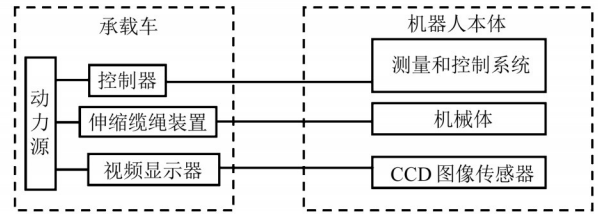


图18 管道清理机器人系统框图

Fig. 18 Block diagram of the pipeline cleaning robot system

如图19所示，姜明明等^[31]设计了一种新型管道机器人，其特点是装有除锈机械臂。该管道机器人系统的主要组成部分包括1个控制箱、1个视觉检测装置以及1个装有步进电动机和打磨装置的除锈机械臂。机械臂位于机器人的前端，步进电动机可以精确地驱动机械臂，使打磨装置到达预定的目标位置进行操作。视觉检测装置的功能是实时监测并反馈焊渍和金属锈的去除情况，以确保除锈效果进一步优化。这种设计使得该机器人在管道维护中能够提供高效、准确的服务。

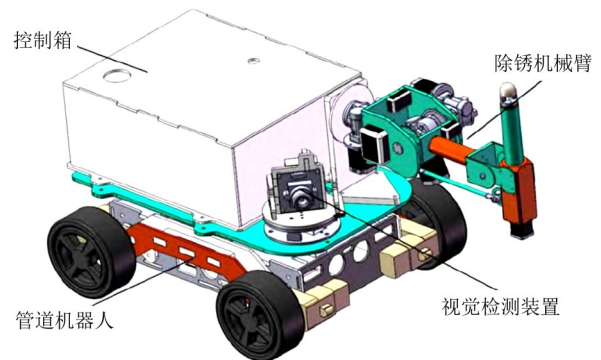


图19 装有除锈机械臂的管道机器人

Fig. 19 Pipeline robot equipped with a descaling robot arm

管道机器人的出现增强了管道检测与监测的可达性，在一些小直径管道、折弯管段、横截面各异的管道中，管道机器人可在复杂密闭空间中导航^[32]。与传统的管道检测方式不同，管道机器人的优势在于其可在不中断管道介质流的前提下执行连续、实时监控。

然而，目前的一些技术瓶颈，如电池续航、复杂导航、传感器限制等，使得管道机器人对管道监控检测的全面性和精确性受限。这些技术瓶颈对机器人的操作效率与数据传输的稳定性都有影响。机器人搭载的传感器也会受制于管内的极端环境。管道机器人在检测与监控方面相比传统方式具有显著优势，但只有克服上述技术难题，管道机器人才能得到更加可靠与高效的应用。

1.3 管道机器人应用领域

管道机器人应用广泛，在工业生产、医疗卫生、

化工勘测等诸多领域都有涉及^[33]。

1.3.1 工业生产

在工业生产领域, 管道机器人的应用范围广泛, 特别是在石油和天然气行业。它们不仅可以用于焊接, 提高焊接效率、减轻劳动强度, 而且能够适应管道建设所需钢管的钢级、管径、壁厚以及输送压力的逐步增加^[34]。

目前的管道机器人装载有多种检测设备和操作工具, 能够在地面操作人员远程操控下自行执行探伤任务^[35], 可以检测管道的腐蚀程度、裂纹以及焊接缺陷, 并进行必要的修复工作。其控制原理主要涉及驱动方式、变径机构、运动控制、数据传输以及感测与控制几个方面。工业管道机器人通常采用电动机作为驱动源, 负责输出动力, 在控制单元的作用下将动力传递到中央差速单元以及自适应变径单元^[36]。部分管道机器人配备有丝杆电动机, 以此带动滚珠丝杠, 使轮足的变径具有主动性, 可实现在行进过程中主动适应管道内径的效果。一般情况下, 由微处理器来实现管道机器人的运动控制, 包括前、后双向移动、转向与越障。数据传输主要涵盖了传感器数据^[37]、图像数据^[38]、控制指令^[39]、检测结果^[40]等。这种自动化的操作方式显著提高了管道检测和效率。

管道机器人在新建排水系统的完工和验收阶段、在寻找和确定非法排放污水的源头和接口, 以及在运行中的管道内部执行状态检查等任务中, 都起着至关重要的作用^[41]。它们还可用于寻找由于排水系统或基础设施建设而难以定位的检修井或未知去向的管道段。这些功能使得管道机器人在现代城市基础设施的维护和管理方面有着重要意义。

工业管道内部环境的复杂性以及直径的变化和管道的弯曲程度, 均增加了运动机制设计的复杂性。集成清洁、焊接、检测功能的管道机器人需要在有限的空间中高效工作, 并且不能影响其他功能。提升管道机器人的性能需要持续地研究与开发。

1.3.2 医疗卫生

管道机器人在医疗领域的应用广泛, 主要体现在为确保治疗的一致性、安全性和高效性, 医生可以根据机器人的检测结果对病人进行诊断和治疗; 甚至可以将其用于手术等方面^[42]。医疗管道机器人可以用来为人体血管清除血栓^[43-44]、监测胃肠管道的健康^[45-48]等。

在医疗行业应用较为广泛的是胶囊内窥镜技术^[49]。胶囊内窥镜, 也称胶囊摄像头, 一般用于检查胃肠管道的健康状况。这项技术涉及微型无线摄

像、无线信号传输、磁控运动控制等多个领域。磁控运动涉及体外磁场控制装置、磁性操纵器、多角度转动拍摄等方面。胶囊内窥镜系统包含体外磁场控制装置、内置磁体的胶囊内镜、图像实时显示装置, 通过体外磁场主动控制, 可以精确改变胶囊内镜的位置与方向, 使胶囊内镜在胃腔内定向移动至目标位置, 多角度转动拍摄, 减少了检查盲区, 保证了体内检查完整度和诊断准确性。图20所示为一种尺寸为11 mm×26 mm的胶囊内窥镜^[50], 其外壳材料可以抵御胃液的腐蚀。

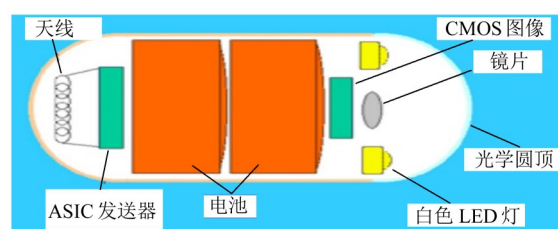


图20 胶囊内窥镜结构

Fig. 20 Structure of the capsule endoscopy

目前的胶囊机器人主要是被动运动^[51], 这种运动方式的缺点是耗时且无法精确控制, 因此, 主动运动是胶囊机器人技术发展的重要方向。胶囊机器人基于人工智能的算法, 可以增强自主病变和异常检测的能力, 增加胶囊机器人扩展性, 也可实现无创的药物递送和组织活检。解决这些问题将显著提升胶囊内镜机器人技术在医学诊断中的能力和可靠性。

医疗管道机器人的应用不仅可以收集数据以改进治疗, 还有可能增加位于服务不足的社区、偏远地区以及受自然灾害影响的人群获得治疗的机会。医疗管道机器人不仅在有效缓解医疗资源紧张的状况方面发挥了作用, 还推动了医疗信息化的进展。

1.3.3 化工勘测

化工管道在使用过程中可能会出现一些常见问题。由于化工管道安装中的焊接工序较为繁杂^[52], 若焊接工艺未能满足规定的质量要求, 在内部介质的持续冲击下, 管道的结构稳定性可能会遭到破坏, 进而触发安全隐患。

化工管道中所运输的多为高温、高压且具有腐蚀性的易燃、易爆等有害物质^[53]。如果管道内部发生腐蚀, 可能会导致管道泄漏, 增加事故发生的概率。如果管道的材质不达标, 可能会影响管道的使用寿命和安全性^[54]。在石化工程管道安装过程中, 如果防护措施不到位, 工程的复杂性可能会导致管道在使用过程中出现问题。而管道机器人可以代替

人工来勘测可能存在有害物质的管道,进行化工管道检测和维护^[55],并通过融合多传感器、智能化移动平台、设备无损检测等技术,极大地提升工作效率。随着技术的不断更迭,管道机器人的应用领域将进一步扩大。

化工管道中的介质特性可能会腐蚀损坏管道机器人的材料,管道内的高温 and 压力也会影响机器人

的组件和整体功能,介质的黏度和密度会增加机器人的运动和能量消耗。因此,用于化工勘测的管道机器人需要通过改进优化性能,提高耐用性和可靠性,以应对恶劣环境、保障长期使用,实现更好的化工管道的维护与勘测效果。

表1所示为按时间顺序总结的近20年管道机器人的发展概况。

表1 管道机器人研究历程

Tab. 1 Research history of pipeline robots

管道机器人(参考文献)	研发单位	研究年份	运动方式	适应管径/mm	研究目标
气动软执行器的管内移动机器人 ^[56]	日本冈山大学	2000	蠕动式	20	适应任意形状管道
液压驱动式管道机器人 ^[57]	日本工业大学	2001	蠕动式	5	辅助医疗
带有弹性元件的管道机器人 ^[58]	维尔纽斯格迪米纳斯技术大学	2002	蠕动式	—	结构设计
壁式移动管内机器人 ^[59]	日本电气通信大学	2003	轮式	100	管道维护
X射线检测实时成像管道机器人 ^[60]	哈尔滨工业大学	2004	轮式	660~1 400	管道检测
行星齿轮驱动管内移动机器人 ^[61]	日本企业研发中心	2007	轮式	48	静力学分析
管道内表面检测机器人 ^[62]	大连海事大学	2007	轮式	580~1 000	管道检测
柔性管内检测机器人 ^[63]	韩国海洋大学	2008	轮式	150	管道检测
选择性驱动机构管道机器人 ^[64]	成均馆大学	2009	履带式	203	管道检测
预应力结构管道机器人 ^[65]	苏利亚大学	2012	轮式	80	管道维护
柔性连杆管道机器人 ^[66]	韩国延世大学	2013	蠕动式	—	自主导航
管内机器人双边自锁机构 ^[67]	国防科技大学	2014	蠕动式	17~20	双向运动和位置锁定
螺旋驱动管内机器人 ^[68]	西南石油大学	2016	螺旋驱动式	160~210	管道检测
间歇式清洁机器人 ^[69]	厦门大学	2017	螺旋驱动式	—	管道清洗
管道多胶囊机器人 ^[70]	南方科技大学	2018	流体驱动式	20	辅助医疗
复合行星齿轮管道机器人 ^[71]	西华大学	2019	螺旋驱动式	90	管道维护
压壁式管道清洗机器人 ^[72]	中国人民大学	2020	轮式	1 200~1 500	管道清洗
可调大型管内机器人 ^[73]	山东大学	2020	履带式	950~1 200	管道检测
蛇形管道机器人 ^[74]	科希策技术大学	2020	蠕动式	15~120	狭窄空间的运动
管道检测机器人 ^[75]	日本中央大学	2021	蠕动式	28	管道检测
永磁全方位轮式管内机器人 ^[76]	泰国马哈沙拉堪大学	2022	轮式	127	管道检测
管道内爬行软体机器人 ^[77]	哈尔滨理工大学	2023	蠕动式	25~32	提升适应能力
轮腿式小型管道机器人 ^[78]	桂林电子科技大学	2024	轮式	120	管道检测

2 管道机器人关键技术

管道系统规模庞大,种类繁多^[79]。其中包括:用于生产的工业管道,负责输送原材料、产品或废物;城市的排水管道,可以从城市的各个角落将雨水、生活污水、工业废水输送至处理的地方,对于维护城市的环境卫生有着重要作用;人类的身体内部也有许多类似管道的结构,如血管、胃肠管道等,负责输送血液、食物和其他物质,以此维持人体基本的生命活动。

对管道机器人的基本技术要求是能够在各种复杂环境中执行多种任务。这就要求管道机器人能够

在狭窄、曲折的管道中移动,或者在高温、高压、腐蚀性强的环境中工作。管内作业可能包括检测管道状况、清理管道积物、修复管道损伤等操作。为了满足这些需求,管道机器人必须集成多个领域的关键技术。本节对管道机器人的关键技术进行了归纳叙述。

2.1 转向机制

管道系统的结构非常复杂,包含许多弯曲和交叉的管段。管道机器人需要在各种不同的管段中移动,包括直线管道、弯曲管道、上升和下降的管道,甚至是交叉的管道。管道的直径和材质也可能会有所变化,这增加了管道机器人在管道中移动的难度。

转向机制有主动转向与被动转向。①主动转向

依赖于机器人自身的驱动力来完成转向, 例如一种配置双活动万向节的管道机器人^[80], 这种万向节的蛇形铰接结构和拖线设计使管道机器人能够适应复杂的地下管道环境。②被动转向机制利用管道的弯曲和变形来旋转机器人的关节, 从而实现转向和适应管道变化。当遇到分支管道时, 被动转向机制无法进行路径选择^[81]。

在管道机器人转向的过程中, 可控的驱动轮、支撑弹簧、差速控制也是其重要因素^[82]。

如图21所示, 这种结构设计能够使管道机器人在作业中快速调整姿态, 通过优化姿态角, 管道机器人可在弯管中实现平稳高效地转向。驱动轮转向系统利用转向电动机通过减速箱驱动大锥齿轮, 并带动4个小锥齿轮旋转。这些小锥齿轮通过4个传动轴驱动2个前支撑臂和2个后支撑臂, 实现它们的联动转动。

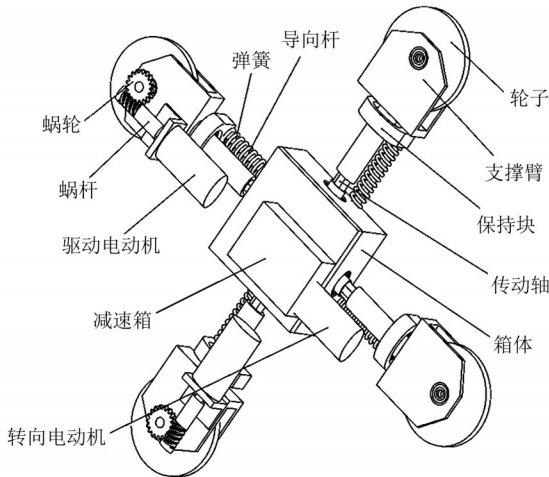


图21 驱动轮转向可控管道机器人总体结构

Fig. 21 Overall structure of the driving wheel steering controllable pipeline robot

为了确保机器人能够适应不同管径并平稳通过弯曲管道, 驱动轮的支撑结构被设计成柔性的, 因此, 采用弹簧支撑结构。在转向时, 弹簧的变化量为

$$\Delta L = \frac{r}{2} (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

式中, ΔL 为弹簧变化量; r 为驱动轮半径; θ 为驱动轮与管道截面的夹角。

差速控制的作用是通过调节左、右两侧车轮的转速, 确保机器人能够平稳地行驶和转向。机械式差速控制是通过传动结构来控制驱动轮旋转速度的一种主要方式。在管道机器人中, 差速器将驱动力传递到两侧驱动轮, 当机器人左、右驱动轮的旋转速度不一致时, 差速器会自动调节驱动轮的旋转速度, 以保持机器人的整体平衡。除了差速器外, 电子式差速控制系统还包括传感器、控制器和执行器

等组件。传感器主要用于检测转向角度和行进速度, 控制器根据传感器信号计算左、右驱动轮的转速差异, 并通过执行器来调节差速器的工作状态。差速控制原理在管道机器人中的应用主要是通过调节机器人的运动, 提升其灵活性和稳定性, 并控制其在复杂管道环境中的导航和移动。

2.2 越障性能

管道机器人的越障性能主要是为了提高其在物体运输过程中的效率, 并在复杂环境中顺利完成管内作业^[83]。管道机器人需要在各种复杂的环境中进行工作, 例如直管、弯管、T形管、交叉管等, 这些环境中可能会遇到法兰、阀门、管道接口等障碍物^[84]^[2417-2418]。

根据文献^[84]^[2418-2422], 图22和图23分别为被动螺旋驱动轮越障和主动螺旋驱动轮越障的示意图。

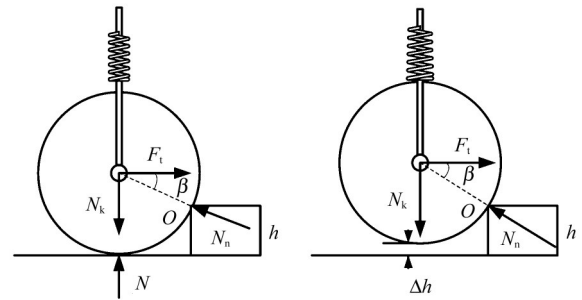


图22 被动螺旋驱动轮越障示意图

Fig. 22 Schematic diagram of obstacle crossing of passive spiral driving wheel

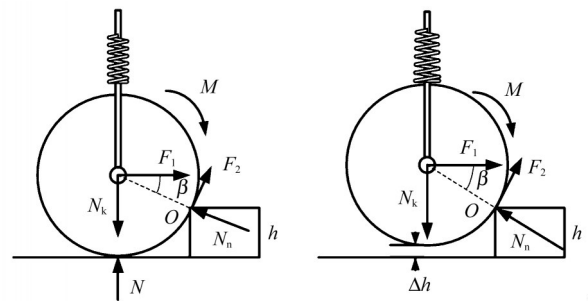


图23 主动螺旋驱动轮越障示意图

Fig. 23 Schematic diagram of obstacle crossing of active spiral driving wheel

被动螺旋管道机器人的越障模型为

$$\beta = \arcsin \frac{h - h_0}{R} \quad (2)$$

$$F_1 = \frac{N}{k} + N_n + k(h - h_0) \cot \beta \quad (3)$$

式中, N 为壁面对驱动轮的支撑力; β 为障碍角度; h 为障碍物的高度; h_0 为轮子底部到管道底部的高度; R 为轮半径; F_1 为驱动力; N_n 为轮子与障碍接触点的支撑力; k 为弹簧系数。

主动螺旋管道机器人的越障模型为

$$M = \frac{N}{k} + \frac{N_n R}{2} + \frac{k(h - h_D)R}{2} \cot \beta \quad (4)$$

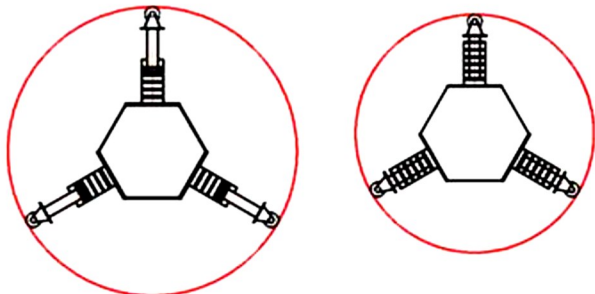
式中, M 为电动机传递给驱动轮的转矩。电动机转矩 M_a 与驱动转矩 M 的关系为: $M_a = M$, 被动螺旋管道机器人的电动机转矩 M_p 与驱动力 F_l 的关系为: $M_p = \frac{F_l R}{2}$ 。

主动螺旋管道机器人由于能够直接将电动机转矩传递给驱动轮, 在越障性能上优于被动螺旋管道机器人。

管道机器人的越障性能与其牵引力有直接联系, 无论是主动型还是被动型的管道机器人, 在设计其越障结构时, 都会考虑到横向和纵向的滑移特性。一般通过提高附着系数和减少驱动轮的滑移, 可以有效地提升管道机器人在管道中的牵引力。

2.3 变径能力

变径能力可以使机器人适应各种直径的管道, 并且能够穿越复杂的曲线管道, 比如L形和T形曲线管道。可变径结构可以使机器人更好地适应各种工业环境, 完成管道内壁的探测和清洁工作^[85]。图24为一种腿部伸缩和可调设计的结构在极限状态下的示意图, 管道直径分别为400、300 mm, 这种结构可以使机器人在管道内部进行自我调整, 以适应管道直径变化。



(a) 400 mm 极限状态 (b) 300 mm 极限状态

图24 一种腿部伸缩和可调设计的结构在极限状态下的示意图

Fig. 24 Schematic diagram of a structure with leg extension and adjustable design in extreme state

图25所示为变径管道机器人的静态模型。腿部伸缩和可调设计的结构包括弹簧机构, 为使机器人在管道中顺利行进, 在转弯时需要机构固定。图中, β' 为转角; α 为倾斜转子角度。

转角 β' 与倾斜转子角度 α 的关系为

$$\beta' \in [0, \arccos \frac{3f_{rn, \max} \sin \alpha}{f_{fn, \max}}] \quad (5)$$

式中, $f_{rn, \max}$ 为径向最大摩擦力; $f_{fn, \max}$ 为法向最大摩擦力。当转角 β' 满足式(5)时, 变径管道机器人的转向运动才稳定。

这种自适应的变径能力让机器人可以在管道内

部进行有效的检测。通过感应压力变化的压力陀螺仪感应结构可以将反馈信息传递给控制中心进行调整, 然后由执行器变径电动机进行直径变化。在这个过程中, 平行四边形减速器机构的配合使得机器人能够稳定地进行直径变化和移动^[86]。具有变径能力的管道机器人可以在各种不同尺寸的管道中进行有效的操作, 提高了管道检测和清洁的效率。

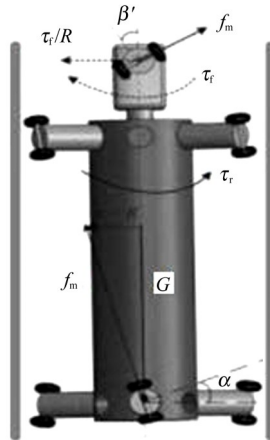


图25 机器人静态模型

Fig. 25 Static model of the robot

2.4 能源供应

良好的能源供应是管道机器人顺利完成管道作业与任务的基础。能源供应是管道机器人续航、操作范围、适应性的决定因素, 对管道机器人的安全性、维护成本、鲁棒性都有着重要意义。优化管道机器人的能源供应系统也是该领域中的一个重要方向。随着能源供应技术的发展, 管道机器人的自主性得到进一步提高、工作范围进一步扩大。

管道机器人获取能源的方式主要有两种: 有线和无线^[87]。如图26所示, 有线的管道机器人通过实体电缆与操作装置连接, 以达到电力供应和数据交换的效果。这种设计确保了机器人能稳定可靠地执行任务, 可承担大量数据传输及实时控制的任务需求。但是由于电线长度有限, 管道机器人在管道中活动的范围受到限制, 且在复杂管道环境中, 由于电线走线干扰, 有线管道机器人的作业会非常困难。



图26 有线管道机器人

Fig. 26 Wired pipeline robot

相比之下, 无线管道机器人的自主灵活性更佳。如图 27 所示, 因为没有电线干扰, 无线管道机器人更易于布置在狭窄复杂的管道环境内。无线管道机器人通常依赖内置的电池来提供能源供应, 并通过无线技术与操作装置进行数据传输。这种设计使得机器人能够摆脱线缆的束缚, 但也面临着续航能力和数据传输的挑战。两种类型的管道机器人各有优劣, 选择何种类型, 主要取决于特定的应用需求和环境条件。

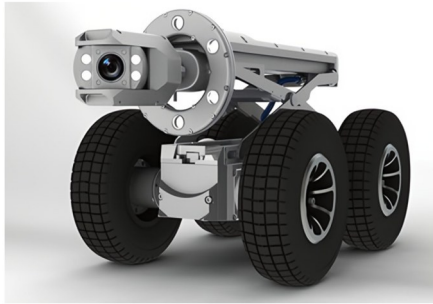


图 27 无线管道机器人

Fig. 27 Wireless pipeline robot

2.5 控制算法

控制算法也是机器人发展的关键技术之一。管道机器人的控制算法随着技术的不断发展而升级与改进。高效的控制算法对于管道机器人工作时的稳定性有着显著作用。除此之外, 管道机器人能够通过控制算法来提高对复杂环境的适应性, 通过优化控制算法提高工作效率, 在面对外部环境的干扰时, 保持自身的稳定性, 增强鲁棒性。管道机器人还能够通过学习算法来实现高度的自主性, 这对于机器人在管道内的自主导航有着重要意义。

在机器人的技术领域, PID 算法因其结构简明、容易复制, 鲁棒性也较为优秀, 应用最为广泛。

如图 28 所示, PID 控制算法的原理是通过调整系统的比例 K_p 、积分 K_d 、微分参数 K_i , 优化整个机器人系统的性能。比例控制、积分控制、微分控制分别可以使系统快速接近目标、消除系统的静态误差、预测误差的变化趋势。在管道机器人中, PID 控制算法可应用于闭环控制的电动机, 实现机器人在管道中自主行进的效果。

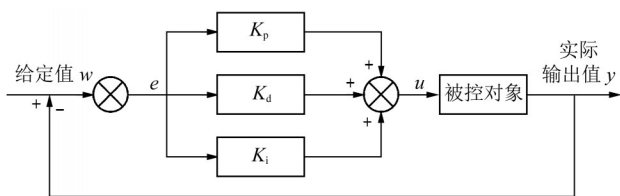


图 28 PID 控制架构图

Fig. 28 Architecture diagram of the PID control

模糊神经网络控制算法是一种神经网络与模糊逻辑相结合的控制算法。其主要过程是先对输入的信号进行模糊化处理, 将精确的输入量转化为模糊量, 再通过神经网络的学习模拟 PID 控制的行为。通过学习数据, 神经网络可以处理输入与输出之间的关系。因此, 根据系统实时情况, 模糊神经网络可对 PID 控制器的参数进行自动调整, 以求得控制效果的最优解。模糊神经网络控制算法结合了模糊逻辑的解释性与神经网络的自适应性, 适用于非线性、不确定性特征显著的复杂系统。

图 29 所示为一种基于模糊控制的管道清淤机器人的控制方案^[88]。为了应对管道环境的复杂情况, 在不同外部条件与变化的内存参数下, 该机器人的控制器具有一定的稳定性, 其控制系统由模糊神经网络与常规的 PID 控制结合, 这是多模态控制方法的一种。考虑到计算的简洁性, 并且和 PID 控制方法易于结合^[89], 该机器人采用了动态非线性模型 Takagi-Sugeno。如图 30 所示, 由 Takagi-Sugeno 模型推理出自适应模糊神经网络 (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, ANFIS) 结构, 可自主从样本数据中提取模糊规则, 并根据具有自学习特性的神经网络, 优化前提与结论的参数, 以此提高整个模糊系统的推理性^[90]。结合最小二乘法与梯度下降法的学习算法可用于训练确定 ANFIS 的参数, 旨在降低原始反向传播算法的搜索空间维度, 以便加速网络的收敛过程并提升学习的速率。

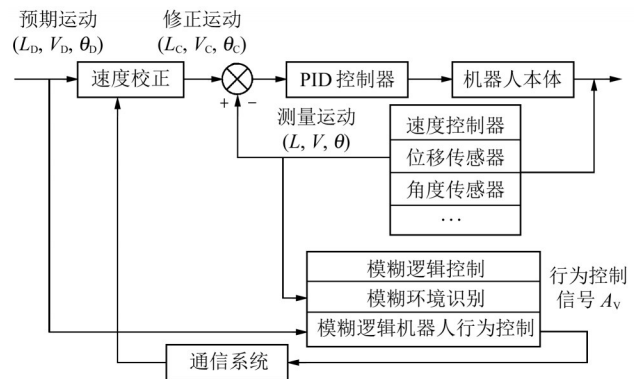


图 29 模糊控制系统

Fig. 29 Fuzzy control system

管道机器人的研发和制造是一项涉及多个学科、技术和工艺的复杂工程, 它的成功将极大地提高生产效率、保护自然环境, 保证人类身体健康。

YOLOv7 是 YOLO (You Only Look Once) 系列中的最新版本, 是一种先进的物体检测算法。这种算法在速度和精度上都表现出色。它有 3 种基本模型: YOLOv7-tiny、YOLOv7、YOLOv7-W6, 分别适用于边缘 GPU、普通 GPU 和云 GPU 这 3 类运行环境,

YOLOv7的算法网络主要由4个部分组成，包括Input（输入）、Backbone（骨干网络）、Neck（颈部）、Head（头部）。为改善排水管道内照度不足、图像分辨率偏低的情况，曾飞等^[91]基于坐标注意力机制(Coordinate Attention, CA)和多尺度上下文增强(Multi-scale Context, MC)模块对YOLOv7算法进行了改进。如图31和图32所示，这种改进算法通过有限的对比度受限自适应直方图均衡化，来调整检测图像的局部对比度，不仅可以增强有效信号，还可以抑制噪声信号，以此提高检测网络对排水管道的探伤能力。

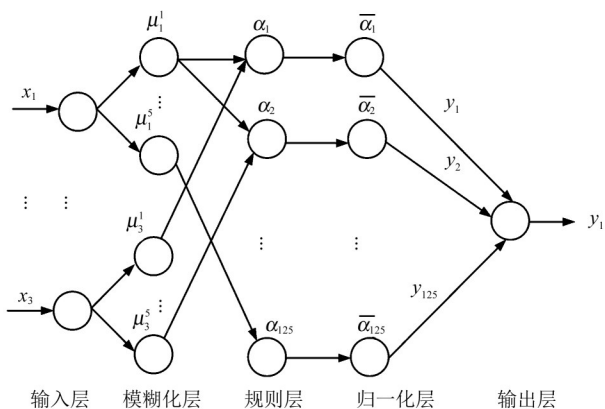


图30 ANFIS的网络结构

Fig. 30 Network structure of ANFIS

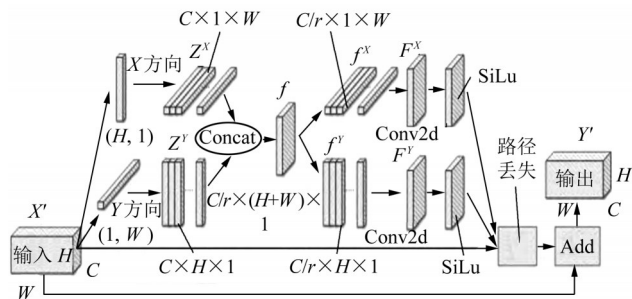


图31 Drop-CA模块结构

Fig. 31 Structure of the Drop-CA module

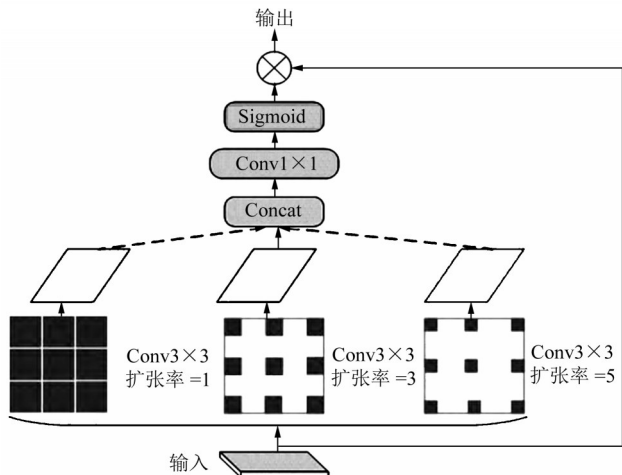


图32 MC模块结构

Fig. 32 Structure of the MC module

3 管道机器人技术难题

3.1 感测与控制

管道机器人的感测与控制是其核心技术之一，涵盖了物体定位、视觉跟踪、控制信号和应力波信号等多个方面。图33所示为一种名为“智能触摸”的管道检查机器人系统，它可以自动抓取管道的法兰，并自主进行螺栓松动检查^[92]。该系统包括1个带有立体摄像系统的机器人臂和1对安装在机器人臂手指上的压电陶瓷换能器。当机器人臂抓住法兰时，压电陶瓷换能器会产生应力波信号，另一个压电陶瓷换能器接收的信号则表明法兰是否被紧固。该系统还利用了视觉跟踪算法来提供法兰的3D位置，并根据手指中心与法兰之间的距离生成比例增益控制信号，以控制机器人臂的运动。这些都是管道机器人在感测与控制方面的关键技术。

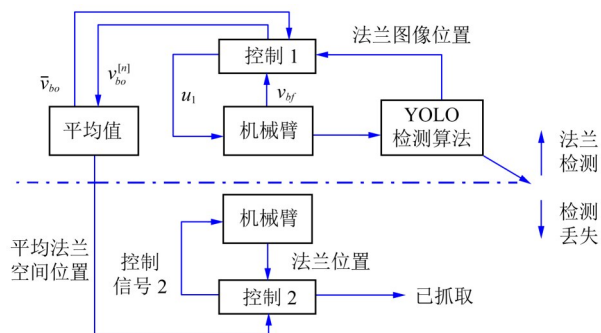


图33 控制系统示意图

Fig. 33 Schematic diagram of the control system

精确控制管道机器人在各种环境和条件下的运动是一个难题。在大直径管道的预投运阶段，由于动力不足，存在管道机器人卡住和停滞的风险；速度也难以控制，有超速前进的风险，使得探测器无法正常收集数据^[93]。当管道机器人在管道折弯处行进时，需要通过控制系统，使驱动单元实现差速与变径的功能，保证管道机器人顺利过弯^[94]。当管道出现老化的问题时，需要研究新的感测和分析方法来原因确定管道的老化程度、定位损坏点，以及为管道创建新的机器人映射^[95]。设计和实现一个能够在地下环境中有效工作的无线控制是一个重大挑战，这需要解决如何在地下环境中实现可靠的无线通信，以及如何在地下环境中通过控制系统进行多参数传感器的数据传输^[96]。

对于管道机器人的感测与控制，在复杂环境的管道中，需提升抗干扰性；在有流体介质的管道中，要能够在介质中保持自身的稳定性。为了提高自主性，轮式管道机器人需要实现驱动轮独立速度控制的效果。集成多种传感器的管道机器人，要能够同时处理多项数据，控制算法具备实时响应环境变化

的能力, 对管道环境进行有效的同时定位与地图构建 (Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)。解决这些问题, 管道机器人在路径规划与自我修复上的技术进步会更为显著。

3.2 定位与映射

管道机器人在定位与映射方面的主要任务是确定机器人在管道内的具体位置, 并创建管道网络的详细地图, 以便于机器人进行导航^[97]。这两个任务通常同时进行, 被称为同时定位和映射。这是一个复杂的过程, 需要使用各种传感器(如光学、声学、惯性、热量、压力等)和计算设备^[98]。除此之外, 管道机器人还负责导航和检查任务。导航是指机器人在管道内部移动的能力, 而检查则包括评估管道的状况、检测泄漏、检测流体质量等。

如图 34 所示, 可通过 3D LiDAR 传感器生成 3D 点云, 并将其投射至 2D 点云, 通过特征匹配和异常值剔除来提取图像的局部特征, 然后通过 3D 模型初始化和跟踪映射来逐步构建模型^[99]。

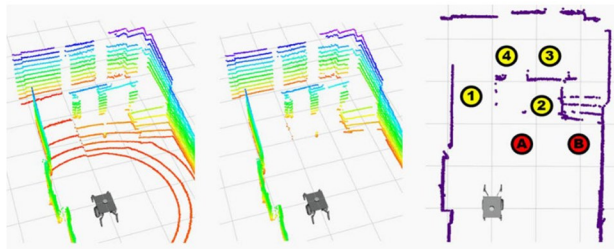


图 34 3D 点云投射至 2D 点云的过程

Fig. 34 Process of projecting 3D point cloud onto 2D point cloud

定位与映射控制原理主要涵盖了自主导航与定位、检测与监测、电涡流传感器定位以及数据融合。通过多种定位技术, 如视觉传感器、激光雷达和惯性导航系统等, 机器人在管道内部可实现自主导航和定位。配备的高分辨率摄像头、红外线传感器、超声波传感器等, 可以实时监测管道内部的状态, 及时发现异常情况, 对机器人的工作进行监测与预警。利用电涡流传感器探测油气管线中的焊缝, 机器人可以实现在管线内的粗略定位, 再结合里程仪, 在相邻焊缝之间进行精确定位^[100]。采用多个里程仪提供的定位数据, 可以保证里程信息的准确性, 并且能够采用一致性数据融合算法, 对冗余定位数据进行融合处理, 从而提高管道机器人的定位精度。

管道机器人的定位与映射技术中, 也存在一些局限。管道机器人需要在管道中长时间运行, 这就要求其定位与映射的能力具有很高的稳定性。另外, 无线通信方法在金属管道中并不适用, 因为无线电信号在金属环境中会衰减^[101]。相较于其他用于地面或是空中的机器人, 管道机器人常应用于狭窄细长

的管道, 所处的环境数据集中不连续出现, 对于传感器数据融合具有难度。管道机器人要维持定位与映射的准确性, 就要适应管道环境的动态变化, 克服无线通信在数据传输和处理方面的难题。另外, 为提高管道机器人在管道中的适应性与操作效率, 需要确保在长途或复杂管道环境中的导航精度, 处理多模态环境, 提升自主性和智能决策能力, 优化能源效率以便延长工作周期, 同时增强系统对传感器噪声、数据丢失和环境干扰的鲁棒性。

4 展望

中国对机器人的技术发展给予高度重视, 在国家政策层面提供了必要的支持, 出台了《“机器人+”应用行动实施方案》和《“十四五”机器人产业发展规划》, 上述政策促进了机器人技术在多个技术领域的应用发展。只有政府鼓励技术创新, 高端产品的供给量才能提高, 相关的产业结构也可得以优化。上述政策也拓展了管道机器人应用的广度与深度, 为打造良好的产业生态奠定了坚实的基础。通过对管道机器人研究现状、关键技术、技术难题的分析, 总结出以下几点管道机器人未来的发展趋势。

4.1 模块化设计

模块化设计是一种结构设计策略, 主要是将复杂系统拆分为多个可以独立设计和测试的模块。在设计管道机器人时, 可以对某一位置的构件进行模块化处理, 这样就能够根据具体需求, 对该位置的构件进行增添或替换。模块化设计有助于整体系统的维护, 并提高扩展性。如果其中某个模块出现问题, 只需更换该模块, 并不影响系统的整体功能。若需要增加新功能, 也可以通过添加新模块来实现, 而无需对整个系统进行大规模修改。模块化设计可增加管道机器人的灵活性与适应性, 在应对不同管内环境时, 可满足快速调整以适应环境的需求。这种结构设计可大大简化机器人的维护成本, 缩短机器人的升级时间, 同时也促进技术迭代和集成。模块化设计也增加了管道机器人的应用范围, 通过模块化设计的管道机器人可执行管道检测、管道维护、管道清洗等多种管内任务, 大幅提高管内作业的效率。此外, 模块化设计也保证了管道机器人的安全性和环境友好性, 符合国家“自主创新、保护环境”的理念。

4.2 自主导航

由于管道系统通常位于地下, 管道长、细且复杂, 所处环境可能对人类构成危险, 所以, 管道机器人正在向更高级别的自主导航方向发展。使用能够自主导航的管道机器人进行检查可以提高安全性。自主导航的管道机器人可以在没有人工干预的情况

下工作,利用位置探测器和CCD相机来识别管道元素,提高检测的效率。如果对管道的污染状态存在任何不确定性,就必须将其视为污染废物,这可能导致非常高的处置成本。使用能够自主导航的管道机器人进行检查可以帮助确定管道的污染状态,降低处置成本。自主导航技术需要高级传感器的集成,才能实现精确的管内环境感知。机器学习与人工智能等技术可保证管道机器人的路径规划和智能避障。将来,这些管道机器人能对管内环境进行3D建模,以此实现多个管道机器人之间的协调工作。通过多层安全协议和故障检测机制,管道机器人的安全性和可靠性会得到进一步加强,各个系统间的稳定协同也会受到标准化与兼容性的影响。随着技术的发展,成本效益分析可确保机器人技术的经济适用性,推动管道机器人的自主导航技术向着更为高效智能的方向发展。

4.3 无线通信

无线通信在管道机器人中的主要应用是实现远程控制和数据传输。采用无线通信系统的管道检测机器人能够稳定且高速地传输图像信息。基于无线通信系统,也可以开发新的管道检测机器人,实现对机器人的运动控制,对管道内部的缺陷或问题进行检查,并实时传输管道内部的图像。另外,由于无线电信号在金属管道中会衰减,这一技术难题需要进一步的研究和解决。无线通信技术应集中于开发低功耗低延迟的通信方案,以提高管道机器人在管内作业的续航能力,同时,机器人可使用高频宽带来传输大量数据。将来,管道机器人也会具备自适应频率和多模通信技术,以应对管道本身对信号的屏蔽与干扰。信号增强和抗干扰技术可保证管道机器人无线通信的稳定。智能路由算法将优化数据传输路径,减少无线通信的延迟。故障自主检测和信号恢复机制可确保无线通信的连续性。管道机器人的无线通信技术也可兼容现成的基础设备,并且适应管道环境的变化,为特定的任务需求进行通信方案的定制化。这些技术的进步,将使管道机器人在复杂环境中的数据传输更加可靠,提高执行任务的效率与安全性。

5 结论

1) 深入探讨了管道机器人的运动方式、功能和应用领域,并对其关键技术和当前的技术难题进行了总结。详细介绍了管道机器人(如轮式、履带式 and 流体驱动式等)的运动方式,并对相应的运动原理进行了描述。通过分析管道机器人的功能和应用领域,展现了它们在各个领域的应用场景。

2) 总结了管道机器人在模块化设计、自主导航、无线通信3个技术方向的发展趋势。模块化设计

使机器人能够根据任务需求进行组装和重组,自主导航技术使机器人能够在没有人工干预的情况下独立完成任务,而无线通信技术则使机器人能够在执行任务的同时将数据实时传输回基地。这些技术的发展也将进一步提高管道机器人的性能,扩大管道机器人的应用范围。

参 考 文 献

- [1] 盛心怡. 低碳经济环境下天然气产业的发展与探究[C]//第33届全国天然气学术年会(2023)论文集. 成都:中国石油学会天然气专业委员会, 2023:379-384.
SHENG Xinyi. Development and research of natural gas industry in low-carbon economic environment[C]//Proceedings of the 33rd National Natural Gas Academic Annual Conference(2023). Chengdu: Natural Gas Committee of China Petroleum Society, 2023: 379-384.
- [2] 江海,刘思远,唐力. 基于数据融合分析的管道泄漏监测系统的设计[J]. 自动化技术与应用,2023,42(12):41-45.
JIANG Hai, LIU Siyuan, TANG Li. Design of pipeline leakage monitoring system based on data fusion analysis[J]. Techniques of Automation and Applications, 2023, 42(12): 41-45.
- [3] 李智,王志刚,辛明亮. 在用PE燃气管道失效分析[J]. 广东化工,2023,50(14):124-125.
LI Zhi, WANG Zhigang, XIN Mingliang. Failure analysis of in-service PE gas pipeline[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(14): 124-125.
- [4] 刘清友. 油气管道机器人技术现状及发展趋势[J]. 西华大学学报(自然科学版),2016,35(1):1-6.
LIU Qingyou. Research status and development tendency of the oil and gas in-pipe robot[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2016, 35(1): 1-6.
- [5] 李锐琴,何健锋. 管道清洗机器人专利技术综述[J]. 科技创新与应用,2023,13(24):22-28.
LI Ruiqin, HE Jianfeng. Overview of patent technology for pipeline cleaning robot[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(24): 22-28.
- [6] ROH S G, CHOI H R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1): 1-17.
- [7] HU Z, APPLETON E. Dynamic characteristics of a novel self-drive pipeline pig [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(5): 781-789.
- [8] ZHANG Z, HU L H, LI X H, et al. Motion analysis of screw drive in-pipe cleaning robot [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(10): 5605-5617.
- [9] 张学文,邓宗全,贾亚洲,等. 管道机器人三轴差动式驱动单元的设计研究[J]. 机器人,2008,30(1):22-28.
ZHANG Xuewen, DENG Zongquan, JIA Yazhou, et al. Design and research of a tri-axial differential drive unit for in-pipe robot [J]. Robot, 2008, 30(1): 22-28.
- [10] JIANG M H, XIONG H J, HE C Z. Research on wheeled pipe robot based on fractional order PID control[C]//2023 IEEE 6th Infor-

- mation Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference(ITNEC). IEEE, 2023:1470-1473.
- [11] 贾仕豪,赵弘. 油气管道内退磁检测机器人结构设计[J]. 石油机械, 2020, 48(8):117-122.
JIA Shihao, ZHAO Hong. Structural design of demagnetization detection robot in oil and gas pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(8):117-122.
- [12] BOGDAN P A, WHEADON J, KLEIN F B, et al. Magnetic tracked robot for internal pipe inspection[C]//2021 European Conference on Mobile Robots(ECMR). IEEE, 2021:1-6.
- [13] 喻九阳,张德安,戴耀南,等. 履带式油气管道巡检机器人爬坡特性分析[J]. 机床与液压, 2023, 51(15):57-61.
YU Jiuyang, ZHANG Dean, DAI Yaonan, et al. Climbing characteristic analysis of crawler oil and gas pipeline inspection robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(15):57-61.
- [14] 兰玉彬,闫瑜,王宝聚,等. 智能施药机器人关键技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20):30-40.
LAN Yubin, YAN Yu, WANG Baoju, et al. Current status and future development of the key technologies for intelligent pesticide spraying robots[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(20):30-40.
- [15] 罗建国,卜泽昊. 摆臂前置救援机器人运动特性分析[J]. 机械设计与制造, 2018(7):260-262.
LUO Jianguo, BU Zehao. Kinematic analysis of swing arm front fixed rescue robot [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(7):260-262.
- [16] ZAGLER A, PFEIFFER F. "MORITZ" a pipe crawler for tube junctions [C]//2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003:2954-2959.
- [17] 张铁,吴骄任,蔡蒂,等. 四足管道爬壁机器人周向运动位姿规划[J]. 机械传动, 2021, 45(11):34-40.
ZHANG Tie, WU Jiaoren, CAI Di, et al. Pose planning of quadruped pipe wall-climbing robot during circumferential motion [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(11):34-40.
- [18] 谢绍川,余祖龙,曾杰,等. 基于无线智能控制的六足仿生机器人[J]. 科技资讯, 2010, 8(18):1.
XIE Shaochuan, YU Zulong, ZENG Jie, et al. Hexapod bionic robot based on wireless intelligent control[J]. Science & Technology Information, 2010, 8(18):1.
- [19] 王嵩,曹志奎. 一种基于SMA的管道里蠕动机器人及其反馈控制[J]. 传动技术, 2005, 19(1):29-32.
WANG Song, CAO Zhikui. In-pipe worming robot driven by SMA actuator and its feedback control system [J]. Drive System Technique, 2005, 19(1):29-32.
- [20] 甄久军,马涛,王晓勇. 一种基于集成阀控制的管道机器人设计[J]. 机床与液压, 2022, 50(17):57-60.
ZHEN Jiujun, MA Tao, WANG Xiaoyong. Design of a pipeline robot based on the integrated valve control [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(17):57-60.
- [21] GAO H T, DU J, TANG M, et al. Research on a new type peristaltic micro in-pipe robot [C]//The 2011 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering. IEEE, 2011:26-30.
- [22] ISHIKAWA R, TOMITA T, YAMADA Y, et al. Development of a peristaltic crawling robot for long-distance complex line sewer pipe inspections [C]//2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM). IEEE, 2016:413-418.
- [23] 刘清友,李雨佳,任涛,等. 主动螺旋驱动式管道机器人[J]. 机器人, 2014, 36(6):711-718.
LIU Qingyou, LI Yujia, REN Tao, et al. An active helical drive in-pipe robot [J]. Robot, 2014, 36(6):711-718.
- [24] YAN H W, PENG F X, WANG Y, et al. Analysis of the motion mechanism of actively spirally driven pipe robot [C]//2018 3rd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). IEEE, 2018:40-44.
- [25] ZHENG J, LIU M, DOU Y H, et al. Structure design of spiral driven adaptive pipeline robot under complex conditions [C]//2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). IEEE, 2018:1838-1841.
- [26] YAN H W, ZHAO P Y, XIAO C J, et al. Design and kinematic characteristic analysis of a spiral robot for oil and gas pipeline inspections [J]. Actuators, 2023, 12(6):240.
- [27] XIAO S S, BING Z S, HUANG K, et al. Snake-like robot climbs inside different pipes [C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(ROBIO). IEEE, 2017:1232-1239.
- [28] JAIN R K, DAS A, MUKHERJEE A, et al. Experimental performance of robotic inspection system for underground pipelines [J]. Journal of the Institution of Engineers(India): Series C, 2021, 102(3):683-703.
- [29] TANG C, DU B Y, JIANG S W, et al. A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the sub-centimeter scale [J]. Science Robotics, 2022, 7(66):eabm8597.
- [30] YUAN F C, WANG L Z. The design and study of the drainage pipelines dredging robot [C]//2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. IEEE, 2010:17-20.
- [31] 姜明明,赵弘. 一种装有除锈机械臂的管道机器人结构设计与优化[J]. 工程机械, 2022, 53(5):57-62.
JIANG Mingming, ZHAO Hong. Structural design and optimization of a pipeline robot equipped with derusting manipulator [J]. Construction Machinery and Equipment, 2022, 53(5):57-62.
- [32] ZHANG J, NIU X D, CROXFORD A J, et al. Strategies for guided acoustic wave inspection using mobile robots [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2022, 478(2259):20210762.
- [33] 宋懋征,刘晓敏,赵云伟,等. 蠕动式气动软体管道机器人设计与实验[J]. 液压与气动, 2022, 46(7):90-97.
SONG Maozheng, LIU Xiaomin, ZHAO Yunwei, et al. Design and experiments of inchworm-type soft pneumatic pipe robot [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(7):90-97.
- [34] 尹铁,赵弘,张倩,等. 长输油气管道焊接机器人的技术现状与发展趋势[J]. 石油科学通报, 2021, 6(1):145-157.
YIN Tie, ZHAO Hong, ZHANG Qian, et al. Current situation and development of welding robots for long distance oil and gas pipelines [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(1):145-157.
- [35] 祝海珍,袁艳,雷永军. 面向管道机器人的模块划分方法研究 [J]. 机床与液压, 2022, 50(21):33-38.
ZHU Haizhen, YUAN Yan, LEI Yongjun. Research on the module division method for the pipeline robot [J]. Machine Tool & Hy-

- draulics, 2022, 50(21): 33-38.
- [36] 吴落. 关于机械自适应中管道机器人的机构原理与驱动技术分析[J]. 山东工业技术, 2015(2): 63.
WU Luo. Mechanism principle and driving technology analysis of pipeline robot in mechanical adaptation [J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2015(2): 63.
- [37] 林时雨, 闫雪娇, 谢哲, 等. 基于时间序列及邻域分析的管道点云障碍物检测[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(22): 2210007.
LIN Shiyu, YAN Xuejiao, XIE Zhe, et al. Obstacle detection for a pipeline point cloud based on time series and neighborhood analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(22): 2210007.
- [38] 孙志刚, 赵毅, 刘传水, 等. 基于深度学习的金属焊接管道内壁缺陷检测方法研究[J]. 焊管, 2020, 43(7): 1-7.
SUN Zhigang, ZHAO Yi, LIU Chuanshui, et al. Research on inner wall defect detection method of metal welded pipe based on deep learning [J]. Welded Pipe and Tube, 2020, 43(7): 1-7.
- [39] 刘东, 罗亮, 卢丙举, 等. 轮式变径管道机器人结构分析及控制系统设计[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(22): 67-71.
LIU Dong, LUO Liang, LU Bingju, et al. Mechanical structure analysis and control system design of wheeled variable diameter pipeline robot [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(22): 67-71.
- [40] 黄开鑫, 曹亮. 交通工程规划核实测量与管道检测的关键技术[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(11): 167-170.
HUANG Kaixin, CAO Liang. Key technology of transport engineering planning verification survey and pipeline inspection [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023, 46(11): 167-170.
- [41] 龙杰, 胡鸿川, 李磊, 等. 岩溶地区隧道排水系统结晶及处治技术现状分析[J]. 公路交通科技, 2023, 40(5): 162-169.
LONG Jie, HU Hongchuan, LI Lei, et al. Analysis on crystallization and treatment technology of tunnel drainage system in karst area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(5): 162-169.
- [42] 宋晓峰, 谈士力. 微型机器人的发展和研究现状[J]. 机床与液压, 2004, 32(8): 1-2.
SONG Xiaofeng, TAN Shili. Development and research state of micro-robot at home and abroad [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004, 32(8): 1-2.
- [43] WAN M M, WANG Q, WANG R L, et al. Platelet-derived porous nanomotor for thrombus therapy [J]. Science Advances, 2020, 6(22): eaaz9014.
- [44] XIE M H, ZHANG W, FAN C Y, et al. Bioinspired soft microrobots with precise magneto-collective control for microvascular thrombolysis [J]. Advanced Materials, 2020, 32(26): e2000366.
- [45] 迟明路, 张永顺. 花瓣型胶囊机器人空间转弯磁矩研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 80-85.
CHI Minglu, ZHANG Yongshun. Research on spatial steering magnetic moment for petal-shaped capsule robot [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(4): 80-85.
- [46] 刘亚涛, 张永顺. 双半球胶囊机器人倾斜环境爬行性能研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(10): 22-25.
LIU Yatao, ZHANG Yongshun. Crawling performance of dual hemisphere capsule robot in inclined environment [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(10): 22-25.
- [47] 梁亮. 液体环境下螺旋管道机器人的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 2-10.
LIANG Liang. Spiral micro in-pipe robots in liquid environment [D]. Changsha: Central South University, 2012: 2-10.
- [48] 唐蒲华, 梁亮, 许焰, 等. 液固两相流中内螺旋胶囊机器人运行特性研究[J]. 润滑与密封, 2018, 43(9): 62-66.
TANG Puhua, LIANG Liang, XU Yan, et al. Study on characteristics of inner spiral capsule robot in liquid-solid two-phase flow [J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(9): 62-66.
- [49] 杨艺, 陈涛, 陈辉. 无线传输系统线圈的仿真模拟[J]. 机电工程技术, 2021, 50(7): 111-115.
YANG Yi, CHEN Tao, CHEN Hui. Simulation of coil in wireless transmission system [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(7): 111-115.
- [50] OSAGIE M S U, ENAGBONMA O, INYANG A I. Structural dynamics and evolution of capsule endoscopy (pill camera) technology in gastroenterologist assertion [J]. International Journal in Foundations of Computer Science & Technology, 2018, 8(1/2): 1-12.
- [51] CAO Q, DENG R Y, PAN Y, et al. Robotic wireless capsule endoscopy: recent advances and upcoming technologies [J]. Nature Communications, 2024, 15: 4597.
- [52] 金侠杰, 林财兴. 化工管道工程进度集成控制与管理[J]. 化工进展, 2011, 30(增刊1): 451-456.
JIN Xiajie, LIN Caixing. Integrated control and management of chemical pipeline project progress [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(Suppl. 1): 451-456.
- [53] 张昊, 刘明, 王梅丰, 等. 石化行业碳钢检修工具置换镀厚铜工艺研究[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(13): 25-30.
ZHANG Hao, LIU Ming, WANG Meifeng, et al. Study on replacement thick copper plating process of carbon steel maintenance tool in petrochemical industry [J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(13): 25-30.
- [54] 高睿, 包平, 徐亮, 等. 硅酸盐钝化对化工管道用钢耐腐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(5): 13-20.
GAO Rui, BAO Ping, XU Liang, et al. Effect of silicate passivation on corrosion resistance of chemical pipeline steel [J]. Plating and Finishing, 2022, 44(5): 13-20.
- [55] 陈柏, 朱倩芸, 蒋素荣, 等. 仿鞭毛菌游动的微型机器人近壁运动[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(1): 106-113.
CHEN Bai, ZHU Qianyun, JIANG Surong, et al. Locomotion of flagella-like micro robot near solid-liquid interface [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 106-113.
- [56] NORITSUGU T, KUBOTA M. Development of in-pipe mobile robot using pneumatic soft-actuator [J]. Journal of the Robotics Society of Japan, 2000, 18(6): 831-838.
- [57] NAKAZATO Y, ISHII T, ARIGA Y. F-0441 development of mechanism of in-pipe mobile robot driven by hydraulic pressure [J]. The Proceedings of the JSME Annual Meeting, 2001, III.01.1: 265-266.

- [58] MATULIAUSKAS A, SPRUOGIS B. Pipeline robots with elastic elements[J]. *Transport*, 2002, 17(5): 177-181.
- [59] KOBAYASHI S, TAGUCHI K. Development of a wall moving in-pipe robot[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2003, 15(2): 238-243.
- [60] DENG Z Q, XU F P, ZHANG X H, et al. Key techniques of the X-ray inspection real-time imaging pipeline robot[J]. *High Technology Letters*, 2004, 10(2): 54-56.
- [61] MIYAGAWA T, IWATSUKI N. Characteristics of in-pipe mobile robot with wheel drive mechanism using planetary gears[C]//2007 International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2007: 3646-3651.
- [62] MA Z, HU Y, HUANG J, et al. A novel design of in pipe robot for inner surface inspection of large size pipes[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2007, 35(4): 447-465.
- [63] CHOI H S, KIM D H, KIM D H, et al. Design of a new flexible in-pipe inspection robot[J]. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 2008, 32(1): 175-183.
- [64] ROH S G, KIM D W, LEE J S, et al. In-pipe robot based on selective drive mechanism[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2009, 7(1): 105-112.
- [65] URDANETA M A, GARCIA C, SALTAREN R, et al. Prestressed structure for robotics robot oil pipeline[J]. *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 2012, 9(2): 135-143.
- [66] JEON W, KIM I, PARK J, et al. Design and control method for a high-mobility in-pipe robot with flexible links[J]. *Industrial Robot*, 2013, 40(3): 261-274.
- [67] YANG J H, XUE Y, SHANG J Z, et al. Research on a new bilateral self-locking mechanism for an inchworm micro in-pipe robot with large traction[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, 11(10): 174.
- [68] REN T, LIU Q Y, CHEN Y H, et al. Variable pitch helical drive in-pipe robot[J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2016, 31(3): 263-271.
- [69] CAI Z Q, LIN C, HUO D H, et al. Design and analysis of cleaning mechanism for an intermittent screw-driven pipeline robot[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(2): 911-921.
- [70] GUO S X, YANG Q X, BAI L C, et al. Development of multiple capsule robots in pipe[J]. *Micromachines*, 2018, 9(6): 259.
- [71] REN T, ZHANG Y, LI Y J, et al. Development of an active helical drive self-balancing in-pipe robot based on compound planetary gearing[J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2019, 34(3): 235-242.
- [72] FENG G H, LI W H, ZHANG H, et al. Development of a wheeled and wall-pressing type in-pipe robot for water pipelines cleaning and its traveling capability[J]. *Mechanics*, 2020, 26(2): 134-145.
- [73] ZHAO W T, ZHANG L, KIM J. Design and analysis of independently adjustable large in-pipe robot for long-distance pipeline[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): 3637.
- [74] VIRGALA I, KELEMEN M, BOŽEK P, et al. Investigation of snake robot locomotion possibilities in a pipe[J]. *Symmetry*, 2020, 12(6): 939.
- [75] ITO F, TAKAYA K, KAMATA M, et al. In-pipe inspection robot capable of actively exerting propulsive and tractive forces with linear antagonistic mechanism[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 131245-131259.
- [76] THUNG-OD K, KANJANAWANISHKUL K, MANEEWARN T, et al. An in-pipe inspection robot with permanent magnets and omnidirectional wheels: design and implementation[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1226.
- [77] ZHANG Y, HUANG P Y, YOU B, et al. Design and motion simulation of a soft robot for crawling in pipes[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2023, 2023(1): 5334604.
- [78] WANG J, MO Z J, CAI Y, et al. Kinematic analysis of a wheeled-leg small pipeline robot turning in curved pipes[J]. *Electronics*, 2024, 13(11): 2170.
- [79] 张静文. 改进粒子群算法在管道密封性能预测中的应用研究[J]. *化工设备与管道*, 2023, 60(6): 106-113.
ZHANG Jingwen. Research on the application of improved particle swarm optimization in the prediction of pipeline sealing performance[J]. *Process Equipment & Piping*, 2023, 60(6): 106-113.
- [80] RYEW S M, BAIK S H, RYU S W, et al. In-pipe inspection robot system with active steering mechanism[C]//Proceedings of 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000). IEEE, 2002: 1652-1657.
- [81] REN T, ZHANG Y, LI Y J, et al. Driving mechanisms, motion, and mechanics of screw drive in-pipe robots: a review[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(12): 2514.
- [82] 陈还, 翟华, 陈梁玉, 等. 驱动轮转向可控管道机器人的设计与运动分析[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(6): 744-747.
CHEN Huan, ZHAI Hua, CHEN Liangyu, et al. Design and kinematic analysis for an in-pipe robot with steerable wheels[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2018, 41(6): 744-747.
- [83] HU J, LIU W, ZHANG H, et al. Obstacle crossing by multi-mobile robots in object transportation with deformable sheet[J]. *arXiv e-prints*, 2021: 1-8.
- [84] TU Q, LIU Q Y, REN T, et al. Obstacle crossing and traction performance of active and passive screw pipeline robots[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(5): 2417-2427.
- [85] LI Y M, TANG W C, XU Y. Structure design and research on pipeline robot of variable diameter[C]//2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC). IEEE, 2017: 1211-1216.
- [86] LIANG Y T, ZHU Y, PAN W B, et al. Design and simulation of variable diameter pipe cleaning robots[C]//Second International Conference on Electronic Information Technology (EIT 2023). SPIE, 2023: 68-73.
- [87] 荆杰华, 罗涛, 田晓江, 等. 城市燃气管道内检测技术综述[J]. *城市燃气*, 2023(6): 35-40.
JING Jiehua, LUO Tao, TIAN Xiaojiang, et al. Review of city gas pipeline internal detection technology[J]. *Urban Gas*, 2023(6): 35-40.
- [88] 孟庆梅, 沈惠平, 邓嘉鸣, 等. 基于模糊控制的管道清淤机器人设

- 计与研制[J]. 机械工程与技术, 2014, 3(1): 18-25.
- MENG Qingmei, SHEN Huiping, DENG Jiaming, et al. Design and development in-pipe sewer robot based on fuzzy logic control [J]. Mechanical Engineering and Technology, 2014, 3(1): 18-25.
- [89] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996: 483-494.
- LI Shiyong. Fuzzy control neurocontrol and intelligent cybernetics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996: 483-494.
- [90] DALDABAN F, USTKOYUNCU N, GUNEY K. Phase inductance estimation for switched reluctance motor using adaptive neuro-fuzzy inference system [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(5): 485-493.
- [91] 曾飞, 李斌, 周健, 等. 改进YOLOv7算法的排水管道缺陷检测与几何表征[J]. 现代制造工程, 2024(3): 110-118.
- ZENG Fei, LI Bin, ZHOU Jian, et al. Improved defect detection and geometric characterization of drainage pipes in YOLOv7 algorithm [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2024(3): 110-118.
- [92] YI X F, WANG F R, ZUO W Y, et al. Robotics assisted smart-touch pipeline inspection [J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2021, 5(3): 326-336.
- [93] LI H, LI R Q, WANG Y. Design and control of in-pipe inspection robot for pre-commissioning [C]//Intelligent Robotics and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2021: 56-66.
- [94] 夏文凤, 喻九阳, 戴耀南, 等. 油气管道机器人过弯特性研究与仿真[J]. 机械传动, 2023, 47(4): 38-43.
- XIA Wenfeng, YU Jiuyang, DAI Yaonan, et al. Research and simulation of cornering characteristics on oil and gas pipeline robots [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(4): 38-43.
- [95] NGUYEN T L, BLIGHT A, PICKERING A, et al. Autonomous control for miniaturized mobile robots in unknown pipe networks [J]. Frontiers in Robotics and AI, 2022, 9: 997415.
- [96] KAZEMINASAB S, BANKS M K. SmartCrawler: a size-adaptable in-pipe wireless robotic system with two-phase motion control algorithm in water distribution systems [J]. Sensors, 2022, 22(24): 9666.
- [97] KAZEMINASAB S, SADEGHI N, JANFAZA V, et al. Localization, mapping, navigation, and inspection methods in in-pipe robots: a review [J]. IEEE Access, 2021, 9: 162035-162058.
- [98] AITKEN J M, EVANS M H, WORLEY R, et al. Simultaneous localization and mapping for inspection robots in water and sewer pipe networks: a review [J]. IEEE Access, 2021, 9: 140173-140198.
- [99] KAGAMI S, TAIRA H, MIYASHITA N, et al. 3D pipe network reconstruction based on structure from motion with incremental concic shape detection and cylindrical constraint [C]//2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). IEEE, 2020: 1345-1352.
- [100] 王忠巍, 曹其新, 栾楠, 等. 基于信息融合的海底管道机器人自主定位控制[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(10): 1707-1711.
- WANG Zhongwei, CAO Qixin, LUAN Nan, et al. Autonomous localization technique of submarine in-pipe robot based on multisensor data fusion [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(10): 1707-1711.
- [101] KAZEMINASAB S, BANKS M K. Towards long-distance inspection for in-pipe robots in water distribution systems with smart motion facilitated by particle filter and multi-phase motion controller [J]. Intelligent Service Robotics, 2022, 15(3): 259-273.

Review on pipeline robots

ZHA Yicheng¹ CHEN Weifeng^{1,2} LIU Xuefei³ CAI Huaixuan¹ SU Bing³ JI Aihong^{3,4}

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Quanzhou University of Information Engineering, Quanzhou 362008, China)

(3. Laboratory of Locomotion Bioinspiration and Intelligent Robots, College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(4. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: [Significance] Pipeline robots are efficient and intelligent devices specifically designed for mobility within pipelines to perform tasks such as inspection and cleaning. The application of this technology can significantly reduce the risks and costs associated with manual pipeline operations while improving operational efficiency and safety. [Analysis] The application prospects of pipeline robots in the fields of pipeline inspection and cleaning, as well as the development trends of their technologies, were analyzed in depth. An overview of the current research status of pipeline robots was provided, with classifications from multiple perspectives including their movement modes, functions, and application fields. Through the review of the development history of pipeline robots, the key technical points in this field have been further refined. Insights into technical challenges and future development trends have been put forward, aiming to provide references and guidance for the further research and application of pipeline robot technology.

Key words: Pipeline robot; State of research; Mode of movement; Key technology