

“通-刮-刷”一体的管道清扫机器人设计

赵轶鸣

芜湖赛宝信息产业技术研究院有限公司, 安徽 芜湖 241000

[摘要]堵塞是管道系统中常见的问题, 现有管道清扫机器人存在功能单一和适应性差的问题, 难以应对复杂工况。文中设计了一种集通、刮、刷功能于一体的智能管道清扫机器人。该系统采用多自由度蛇形分段机构与自主贴合管壁的行走机构, 能够适应不同管径并灵活通过弯管。头部集成喷药与鱼钩状抓爪装置, 可有效清除堵塞物; 变径刮刀与软毛刷实现二次清洁。仿真结果表明, 该机器人具有快速的清洁效率和较强的适应能力, 结构简洁, 多功能集于一体, 显著降低了制造成本, 提升了管道清洁与维护效率, 为家庭卫生间管道清洁提供了高效、安全的解决方案。

[关键词] “通-刮-刷” 一体; 管道清扫; 机器人; 结构设计

DOI: 10.33142/ect.v2i12.14793

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Design of an Integrated Pipeline Cleaning Robot with "Cleaning-Scraping-Brushing" Function

ZHAO Yiming

Wuhu Ceprei Information Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 241000, China

Abstract: Blockage is a common problem in pipeline systems, and existing pipeline cleaning robots have the problems of single function and poor adaptability, making it difficult to cope with complex working conditions. The article proposes an intelligent pipeline cleaning robot that integrates functions of communication, scraping, and brushing. The system adopts a multi degree of freedom serpentine segmented mechanism and a walking mechanism that autonomously adheres to the pipe wall, which can adapt to different pipe diameters and flexibly pass through bent pipes. The head is equipped with an integrated spray and hook shaped claw device, which can effectively remove blockages; Variable diameter scraper and soft bristle brush achieve secondary cleaning. The simulation results show that the robot has fast cleaning efficiency and strong adaptability, with a simple structure and multifunctional integration, significantly reducing manufacturing costs, improving pipeline cleaning and maintenance efficiency, and providing an efficient and safe solution for household bathroom pipeline cleaning.

Keywords: integration of "cleaning-scraping-brushing"; pipeline cleaning; robot; structural design

引言

家用管道系统是现代住宅的重要组成部分, 负责输送清水和排除废水的重要作用^[1]。然而, 由于油脂、头发、纸巾等杂物的积累, 管道常发生堵塞。传统清理方法, 如化学疏通剂和手动疏通, 虽然有效, 但效率较低且可能损伤管道结构。近年来机器人技术推动了新型家用管道清理机器人的发展, 但现有设计仍存在传动系统灵活性差^[2]、变径能力有限^[3]、功能单一^[4]等问题, 限制了其适用范围和清洁效果。为解决这些问题, 本文提出了一种集新型变径装置、蛇形分段机构和“通-刮-刷”功能为一体的管道清扫机器人设计, 并对此进行了运动仿真。

2 结构设计方案

2.1 结构总体设计方案

充分考虑系统的实用性和操作效率, 确保机器人结构能够高效应对各种管道清洁任务, 本设计方案集成了头部突破装置、蛇形分段机构、行走机构、变径刮刀和尾刷等5个模块(图1)。蛇形分段机构确保机器人在弯曲管道中灵活运动^[5], 行走机构通过滚轮和调节轴实现对管道内壁的自主贴合实现稳定的移动, 喷药装置和鱼钩状抓爪组合

成头部突破装置, 根据不同堵塞问题选用不同的疏通方式, 确保疏通效果。变径刮刀和软毛刷作为突破机构后的二次处理工具, 负责管道内壁的精细清理。

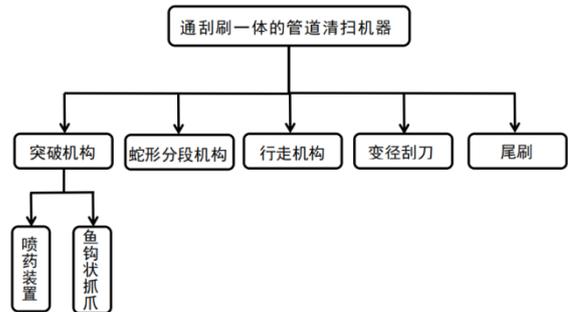


图1 通刮刷一体的管道清扫机器人整体设计图

2.2 蛇形分段机构设计

为适应管道内复杂的移动环境, 克服现有管道清洁机器人难以通过弯管和狭窄空间的较大局限, 传动结构选择由多个模块通过万向节连接而成的蛇形分段机构^[6]。蛇形分段机构的中间座作为整个机构的中心支撑点, 固定座固定在中间座上, 转动座通过连接轴和连接孔与固定座连接。

第一电机（图2）安装在连接孔内，通过动力输出轴驱动短轴，使翻转块和转动座转动，从而实现模块的角度调节（图3），使得机器人结构的每个模块可以根据管道的弯曲程度和转角进行独立调整，确保在通过弯管和狭窄空间时能够灵活调整姿态，避免卡住或损坏管道。

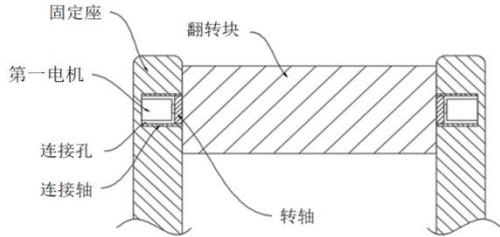


图2 第一电机安装示意图

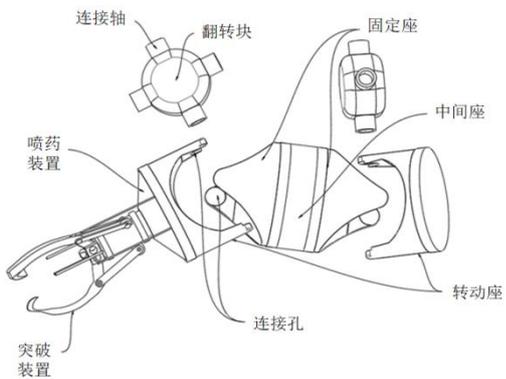


图3 蛇形分段机构结构示意图

2.3 行走机构设计

该行走机构包括固定架、转动架、滚轮、中间杆、横轴、调节轴和带轮（图4）。其中，固定架与中间座连接，转动架设置在固定架两端，通过第六电机驱动滚轮转动。滚轮与转动架铰接，中间杆连接两个转动架，通过弹簧实现转动架的复位和缓冲。弹簧连接两个转动架，横轴与齿轮连接，通过第二电机驱动横轴转动，实现转动架的张开和闭合。调节轴与转动架刚性连接，通过皮带和带轮实现调节轴的转动。第六电机驱动滚轮转动，使机器人在管道内移动。这种设计通过使用带传动，一方面可以减少电机的使用，另一方面可以结合传感器实现自主贴合不同管径的管壁。确保机器人在不同直径和形状的管道内壁上的稳定贴合，提高机器人的运动灵活性和适应性。

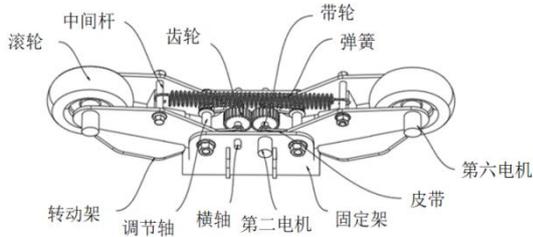


图4 行走机构结构示意图

2.4 突破机构设计

为了高效处理管道内的堵塞物，设计了喷药装置与鱼钩

状抓爪组合的头部突破机构。喷药装置用于喷射化学药剂降解堵塞物，鱼钩状抓爪用于抓取和破坏难以降解的堵塞物。

鱼钩状抓爪包括液压缸、移动平台、夹爪、限位杆、侧座和摄像头（图5）。其中，液压缸通过活塞驱动移动平台，移动平台连接鱼钩状抓爪。抓爪上“倒钩”的设计，使其能够更好地抓取蓬松物等难以物理抓取的堵塞物，提高了抓取的成功率和稳定性。夹爪通过铰链机构连接在移动平台上，限位杆限制抓爪的运动范围。摄像头安装在移动平台上，用于观察管道内的堵塞情况。

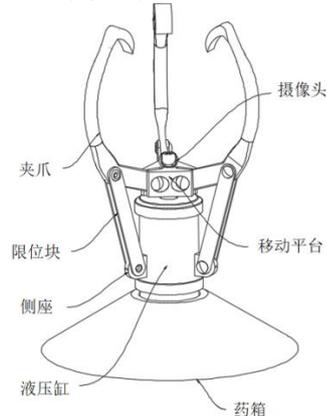


图5 鱼钩状抓爪结构示意图

对于一些易降解却不易抓取的堵塞情况，机器人将对管道内堵塞区域喷洒化学药品降解。喷药装置包括药箱、喷管、加压泵、输液管、出液管、竖轴和喷头（图6）。药箱用于储存化学药剂，进液口用于添加药剂。药箱通过进液口加入化学药剂，加压泵将药剂加压并通过输液管输送到出液管中。第三电机驱动竖轴转动，竖轴带动螺旋转子在螺旋定子内转动，实现药剂的定量输送。喷头安装在出液管的末端，用于将药剂喷射到堵塞物上。

通过将喷药装置和鱼钩状抓爪相结合（图7），突破机构能够应对更多工况，提高机器人的适应性和灵活性，使其既能够精确控制药剂的喷射量，有效降解堵塞物，同时鱼钩状抓爪能够处理难以降解的堵塞物，提高了机器人的清洁能力，确保了堵塞物的有效清除。

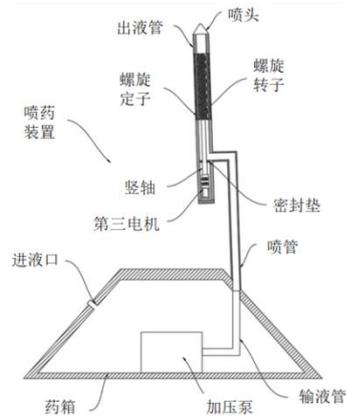


图6 喷药装置结构示意图

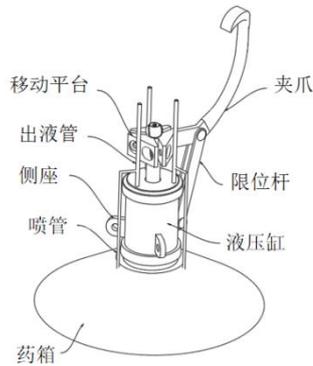


图7 突破机构结构示意图

2.5 刮刀和软毛刷设计

为了彻底清洁管道内壁，设计了刮刀和软毛刷组合的清洁装置，用于突破装置后的第二轮清洁。这种设计结合了机械刮除和软毛刷洗的功能，能够应对不同类型的污垢，确保管道内壁的全面清洁。

在设计刮刀时，刮刀的变径能力的提升是非常重要的。因管道清洁的工作会面对不同直径的管道，而刮刀清洁方式的要求使其必须紧贴管壁才能有效工作。传统的管道清洁机器人的刮刀变径能力通常有限，且需要多个电机驱动，耗能较高。故本设计提出一种“时钟”变径刮刀，通过一个电机带动旋转中心指针便可实现大幅度变径。其设计包括刮刀、软毛刷、第一箱体、第四电机、指针、传动杆、转杆、限位槽和中间板（图8）。刮刀安装在外侧的铰接轴上，通过四连杆机构连接到第一箱体。软毛刷安装在第一箱体的另一端，与刮刀形成互补清洁功能（图9）。第四电机安装在第一箱体内，通过动力输出轴驱动指针转动。指针上设有传动杆，传动杆的一端与指针铰接，另一端套设在铰接轴上。第一箱体上设有限位槽，确保刮刀的稳定伸缩。中间板连接第一箱体和转动座，第七电机驱动中间板转动，使刮刀和软毛刷能够根据管道内壁的形状进行调整。软毛刷由柔软的刷毛和刷体组成，刷体通过固定架安装在第一箱体上，确保刷毛能够均匀接触管道内壁，实现高效的二次清洁。

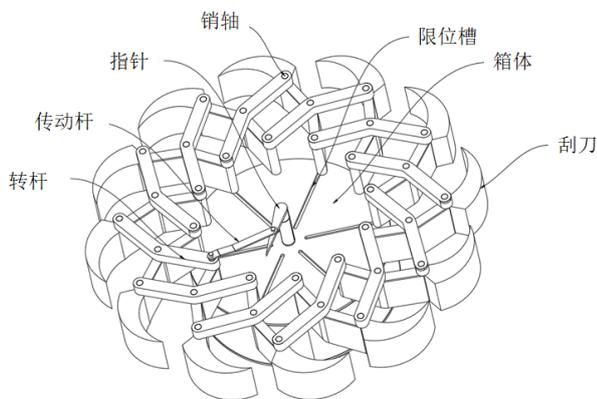


图8 “时钟”变径刮刀结构示意图

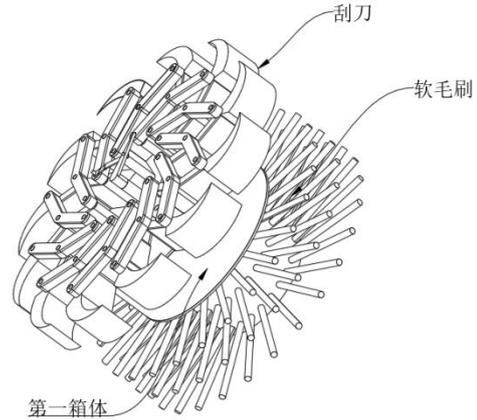


图9 刮刀与软毛刷结合示意图

3 控制系统设计

为了实现“通-刮-刷”一体的管道清洁机器人的高效运行和精确控制，本研究设计一个集成化的控制系统。该系统通过多个功能模块的协同工作，确保机器人在复杂管道环境中的高效、安全作业。控制系统的主要功能模块包括运动控制与导航、环境感知与堵塞检测、清洁控制与调整等。

3.1 运动控制与导航

伺服电机驱动两侧轮组，通过脉宽调制（PWM）信号控制电机速度和方向，使其自适应调整夹角贴合管壁并实现平稳的加速和减速，保障机器人在管道内稳定行进。舵机调节万向节角度，采用舵机控制算法，使机器人在转弯时灵活应对，确保转弯角度调整平滑。视觉传感器实时捕捉前方图像，生成环境地图，并结合同步定位与建图（SLAM）算法辅助机器人自主导航^[7]。红外对射传感器辅助导航，依据传感器数据判断前方是否有障碍物，以进行相应的运动调整^[8]。

3.2 环境感知与堵塞检测

视觉传感器捕捉管道内部图像，利用图像处理算法（OpenCV）识别堵塞位置及其原因。首先，视觉传感器通过图像处理算法识别堵塞物的性质，结合图像数据判断堵塞物类别，为后续处理提供依据^[9]。深度学习算法再经过大量训练，通过分析视觉传感器捕获的图像，自动判断堵塞原因，并推荐合适的疏通工具（抓爪或化学疏通剂）。

3.3 清洁控制与调整

步进电机根据管径和力传感器的反馈，控制刮板的清洁半径，通过比例积分微分（PID）控制算法确保刮刀在清洁过程中的稳定性和有效性，实现自动适配管壁。通过分析视觉传感器捕获的图像和力传感器反馈，机器人能够自动评估清洁效果，判断是否达到预设的清洁标准。机器人控制系统会自动决定是否增加清洁次数或调整清洁力度，以确保管道清洁彻底。湿度/温度传感器监测工作环境的湿度和温度，根据传感器数据动态调整清洁剂的使用量和类型，为调整清洁策略提供数据支持。角度传感

器实时监测轮组和万向节的角度,结合惯性测量单元(IMU)数据进行姿态估计,保障精确控制和稳定行驶。

综上所述,通过上述功能模块的协同运作,结合深度学习和传感器技术,机器人能够在管道环境中实现自主导航、自适应管径、有效清洁。这些设计不仅提高了机器人的运行效率和可靠性。

4 运动仿真验证



图 10 系统运动仿真图

为了验证“通-刮-刷”一体化管道清洁机器人的运动性能,进行了系统的仿真分析。本结构在 SolidWorks 软件中进行仿真实验,模拟了各个机构的独立运动,确保各部分能够在实际应用中协同工作,以实现高效的管道清洁。

机构的运动仿真结果如图 10,结果表明,该机器人的各个结构所设计的功能均能按照预期实现。

5 结论

本文设计了一种新型的家庭管道清洁机器人,通过集成的多功能头部装置与智能控制系统实现了“通-刮-刷”一体化清洁,显著提升了机器人的变径能力和运动灵活性,能够自动适应不同管径和弯曲管道的清洁需求,为现代家

庭管道清洁提供了高效、安全的解决方案,具有重要的实际应用价值。

在后续的研究过程中,需要对该机器人的受力分析和承载情况进行理论分析,并搭建实物进行现场测试,优化控制系统,提升机器人在更复杂管道环境中的适应性,进一步提高清洁效率和稳定性。

[参考文献]

- [1]马宏燕,朱金秋.管道清扫机器人的研究及在粮油行业中的应用[J].现代食品,2024,30(7):5-9.
 - [2]李惟骞,张晓龙,宋进,等.螺旋驱动可变径管道机器人设计与实验研究[J].机床与液压,2024,52(17):14-22.
 - [3]刘昊,曹苏群.一种主动自适应管道机器人的设计[J].机械工程师,2024(8):75-79.
 - [4]宋进,张晓龙,李俊杰,等.模块化管道清洁机器人设计与通过性分析[J].机床与液压,2023,51(20):128-135.
 - [5]柳炳琦,左裕琳,张峻山,等.蛇形机器人研究综述及在核电中的应用展望[J].核电子学与探测技术,2024,44(3):555-572.
 - [6]于海文,王斌,郭岩宝.管道蛇形清洁机器人控制系统设计[J].电子技术与软件工程,2021(4):83-84.
 - [7]王虎生,聂煌.一项粮仓自动巡航多用途作业机器人的研发[J].粮食加工,2024,49(3):74-78.
 - [8]许宇博.基于立体视觉与深度学习的障碍物检测技术研究[D].陕西:西安工业大学,2024.
 - [9]吴挺,鲁少辉,韩旺明,等.基于主动式全景视觉传感器的管道内部缺陷检测方案[J].仪器仪表学报,2015,36(10):2258-2264.
- 作者简介:赵轶鸣(1996.6—)男,汉族,河南漯河人,硕士,助理工程师,主要研究方向:机器人设计。