

中小型自适应管道机器人设计与分析

张越*, 孙嘉豪, 韩严墨

天津科技大学机械工程学院, 天津

收稿日期: 2026年7月20日; 录用日期: 2026年8月13日; 发布日期: 2026年8月19日

摘要

随着现代化社会的不断发展, 管道机器人在各个行业中的应用范围日益扩展, 但现有中小型管道机器人大多仍存在牵引力小、适应性弱等问题, 严重制约其工作能力与实用发展。针对以上问题, 本文提出一种中小型自适应管道机器人系统, 采用自适应支撑结构与悬架系统, 可保障整机具备充足的支撑力与牵引能力, 适配非结构管道内壁工况。本文对机器人机械结构、驱动系统以及控制系统进行设计与分析, 最终研制出原理样机进行性能测试验证。本研究为管道机器人在大牵引力输出、稳定运动控制等方面的工程应用与理论研究提供了有益的参考和借鉴。

关键词

管道机器人, 中小型管道, 电机驱动, 气压驱动

Design and Analysis of an Adaptive In-Pipe Robot for Small and Medium-Diameter Pipe

Yue Zhang*, Jiahao Sun, Yanmo Han

School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin

Received: July 20, 2026; accepted: August 13, 2026; published: August 19, 2026

Abstract

With the continuous development of modern society, the application scope of in-pipe robots has been expanding across various industries. However, most existing small and medium-diameter in-pipe robots suffer from insufficient traction and poor environmental adaptability, which severely limit their working performance and practical promotion. To address the above drawbacks, this paper proposes a small and medium-diameter adaptive in-pipe robot system. Equipped with an adaptive supporting

*通讯作者。

structure and suspension system, the robot can provide sufficient supporting force and traction to adapt to pipelines with non-structural inner wall and various inner wall conditions. The mechanical structure, drive system and control system of the robot are designed and analyzed in this paper, and a prototype is finally manufactured for performance verification tests. This research provides valuable references for the theoretical research and engineering application of in-pipe robots in terms of high traction output and stable motion control.

Keywords

In-Pipe Robot, Small and Medium-Diameter Pipelines, Motor Drive, Pneumatic Actuation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着现代科学技术的不断推进, 机器人技术得到飞速发展。作为特种机器人的重要分支, 管道机器人已经在油气输送、城市管网、核工业等关键领域广泛应用[1]。各类输送管道多埋设于地下或架空敷设, 架空管线可直接开展外部巡检, 而深埋地下管线若要完成内部缺陷检测, 传统手段仅有开挖破管检修一种可靠方案, 施工成本高、破坏性强[2]。由此可见, 针对管道机器人开展研发具备显著工程价值与理论意义[3]。

国内外学者已针对管道机器人开展大量研发工作, 依据行走驱动形式可将现有机型划分为轮式、履带式、蠕动式、螺旋推进式、多足式等类别[4]-[6]。海外研究中, Kakogawa 团队提出四边形履带式管内机器人, 依靠四边形支撑结构提升行走平稳性, 但履带尺寸限制其仅能在直管内通行, 长距离作业耐久性能不足[7]; Carnegie Mellon 大学研制搭载多传感导航模块的巡检机器人, 可实现市政管网全自动检测, 但整机体积庞大, 难以适配中小管径工况[8]。国内相关研究起步较晚, 但近十几年发展势头十分迅猛, 邓宗全院士团队研发多节仿生蠕动机器人, 依靠伸缩结构改善光滑管壁打滑问题, 但设备行进速度偏低, 不适用于长距离管线作业; 天津大学、中国石油大学(华东)联合开发高牵引力伸缩机器人, 优化支撑与驱动耦合结构, 有效提升长时作业续航, 不过该机型面向大口径管道设计, 适配中小型管道的能力较弱[9]。

综合现有国内外研究成果, 伸缩型管道机器人相关理论与工程方案已较为完善, 但适配中小型管道的自锁伸缩式机型仍存在明显技术缺口。当前多数样机、商用设备仅针对大口径管道设计, 功能单一且以单纯巡检为主, 难以兼顾中小管径内部检测、物料输送等复合作业需求, 在自锁防滑、牵引负载、非结构化管道自适应等核心性能上仍存在较大优化空间[10]。

2. 机械结构设计与分析

2.1. 总体方案设计

为满足机器人在管道内对复杂环境、大牵引力以及运动性能弱的需求, 本文研制出一款自适应管道机器人, 整体采用对称式模块化结构设计, 沿轴向依次分布“前支撑模块-伸缩气缸模块-后支撑模块”。进入管道后, 两组周向 120° 对称分布的支撑连杆同步进行展开, 从而使机器人保持在管道中定心与姿态稳定; 当管道内径与管道内壁发生改变时, 机器人同样可以在驱动电缸和柔性悬架的共同作用下自动调整锁止机构的外径及状态, 具有良好的通过性与自适应性。并利用锁止凸轮独特的单向运动、反向自锁

的原理，通过机械自锁机制有效解决了传统伸缩式管道机器人存在的封闭力不足和运动控制精度差等技术难题，显著提升了机器人的工作可靠性。机器人整体采用电气混合驱动——通过 2 个电缸和 1 个驱动气缸同时驱动，能够在管道中实现间歇推进。整体结构如图 1 所示。

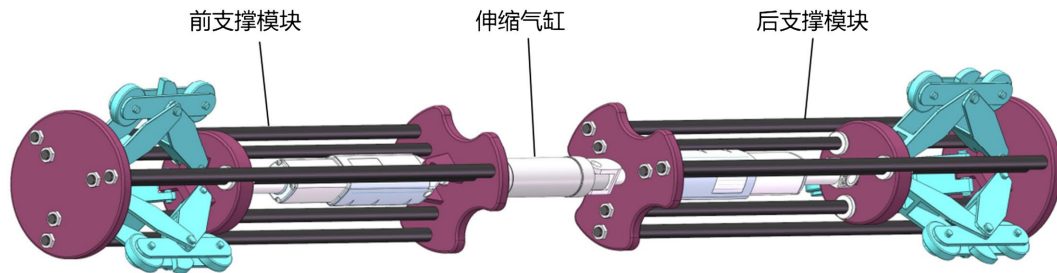


Figure 1. Schematic diagram of the overall structure of the adaptive pipeline robot
图 1. 自适应管道机器人整体结构示意图

2.2. 自适应支撑结构设计

为满足非结构管道内壁的工作需求，设计自适应支撑模块结构，具体结构如图 2 所示。通过控制电缸推动滑块移动，推动连杆机构变形，使固定于该机构柔性悬架上的凸轮压紧或脱离管壁，达到支撑或收回的目的，可适应内径为 140~180 mm 的管道环境。这种模块化的结构设计同时也增强了机器人运行的可靠性。机器人前后各布置一套支撑模块，每套模块周向 120°均布三组支撑单元，运行过程中若某一支撑单体发生故障，剩余支撑单元仍可提供有效管壁约束，维持整机基本姿态稳定与锁止能力，避免出现卡管失效等致命故障。由于凸轮滚轮与铰接副在往复伸缩、锁止过程中不可避免存在摩擦磨损，长期使用后可能出现磨损、自锁性能衰减的问题，因此需对机器人进行定期维护；依托模块化拆分设计，凸轮滚轮、销轴等易损件可单独拆卸替换，单组支撑单元也可独立拆装检修，更换完成后机器人即可快速恢复作业性能，显著提升了设备运维效率与工程可用性。

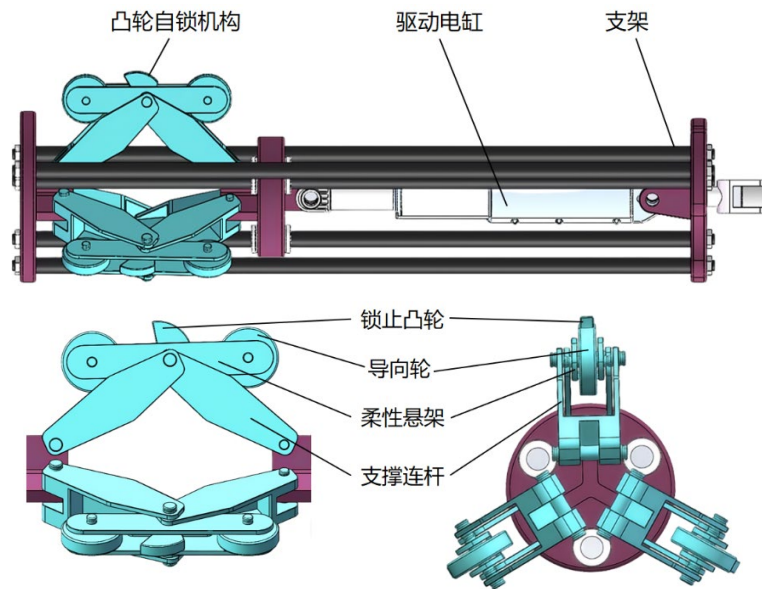


Figure 2. Three-dimensional model diagram of the adaptive support module
图 2. 自适应支撑模块三维模型图

一个自适应支撑单元主要由锁止凸轮、导向轮、柔性悬架板、支撑连杆组成。其中，我们基于凸轮自锁原理设计锁止机构，当其承受轴向外载荷时，管壁反作用力可自动增大凸轮与管壁的正压力，使得机器人的牵引力随着外载荷的增加而相应增大。此外，我们还创新设计具有自适应特性的悬架系统。采用柔顺机构设计自由摆动悬架杆，允许滚轮径向跳动，实现管道机器人在不同管道内壁环境的工作，具备更好的通过性与自适应性，大幅提升行走柔顺性。

3. 驱动系统设计与分析

3.1. 气缸驱动设计

气缸布置在机器人机身中间，它通过自身活塞杆的伸缩，带动机器人完成步进。当机器人所受静摩擦力足够大，伸缩驱动机构的输出力与管内摩擦阻力的合力即为机器人输出负载力。上述管内摩擦阻力来源为两种，一种是牵引机器人机体底部与管道内壁接触，由重力产生；另一种是由于机器人力封闭引起的摩擦阻力。机器人在管内移动，一组支撑组件与管道撑紧，提供足够静摩擦力，另一组支撑组件与管壁接触，产生一定力封闭，目的是确保机器人运动平稳。

为了简化元件参数计算，将机器人的牵引力等效为伸缩驱动机构的输出力，故伸缩机构的输出力：

$$F_t = 300 \text{ N} \quad (1)$$

采用气缸进行驱动，工作压力为 0.5 MPa，在输出负载为 300 N 时，活塞面积为：

$$A = \frac{F}{P} = \frac{F_t}{P} = \frac{300}{0.5} = 600 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

活塞直径为：

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 600}{\pi}} \approx 27.6 \text{ mm} \quad (3)$$

结合管道内部空间狭小、轻量化的需要，选用亚德客 MA 系列 MA32-50 气缸，活塞直径为 32 mm，额定输出推力满足设计要求，且两进出气孔直径一致，在维修和组装过程中，应保证原料零件的一致性，减少额外资源的利用。我们对比其他类型的气缸，在满足标准推进行程的条件下，此气缸体积小，输出推力较大并且稳定，满足力传动的稳定性，使机器能够稳定运行在管道中。

根据自适应中小型管道机器人基本运动原理，为其设计气压驱动系统。机器人中的气缸通过轴向伸缩配合前后两组自适应支撑机构带动整机在管道内行进，具体的气动原理如图 3 所示。

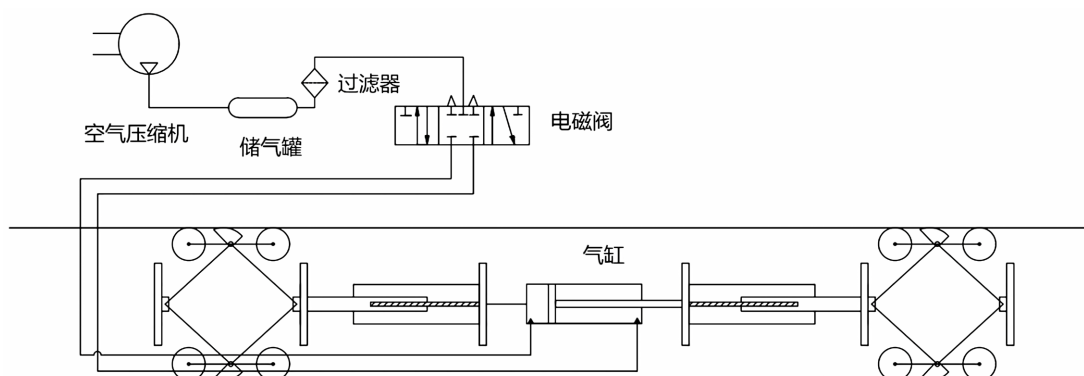


Figure 3. Pneumatic schematic diagram of the adaptive pipeline robot

图 3. 自适应管道机器人气动原理图

3.2. 电缸驱动设计

对比气缸驱动, 电缸具备推力可控、定位精准、无需外接配套管路的优点, 可使自适应支撑连杆精准展开与回收, 在管径变化时稳定维持自锁正压力, 因此选用电缸作为支撑结构驱动元件。

在连杆展开初期, 支撑机构尚未与管壁形成有效压紧, 此时电缸主要克服机构自重及导向摩擦, 牵引力并不直接作用于连杆机构。只有当支撑机构顶紧管壁并承担锚定作用时, 才需要根据牵引力要求反推管壁正压力 N , 进而计算电缸所需推力。受力分析如图 4 所示。

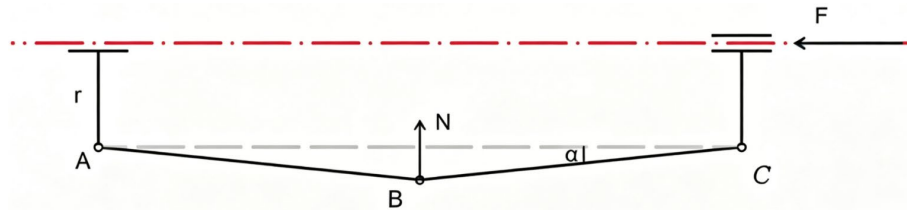


Figure 4. Force analysis diagram of the support mechanism under no-load condition
图 4. 空载时支撑连杆受力分析图

如图所示, 将支撑机构简化为对称二连杆模型。设 $AB = BC = l$, 两连杆与水平线夹角均为 α , B 点受到竖直向上的支反力 N , 右端 C 点受到电推杆水平推力 F 。忽略铰链摩擦和杆件变形, 将连杆视为二力杆。

在节点 B 处建立平衡方程:

$$T_{AB} \cos \alpha = T_{BC} \cos \alpha \Rightarrow T_{AB} = T_{BC} \quad (4)$$

$$T_{AB} \sin \alpha + T_{BC} \sin \alpha = N \Rightarrow 2T_{AB} \sin \alpha = N \quad (5)$$

$$T_{AB} = T_{BC} = \frac{N}{2 \sin \alpha} \quad (6)$$

在节点 C 处建立平衡方程:

$$F = T_{BC} \cos \alpha = \frac{N \cos \alpha}{2 \sin \alpha} = \frac{N}{2 \tan \alpha} \quad (7)$$

由上式可以看出, α 越大, 气缸所需推力越小, 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 所需的气缸推力将会无穷大。

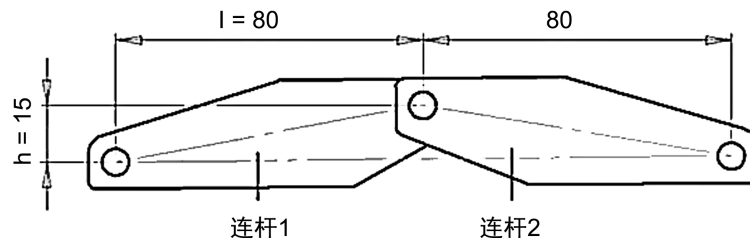


Figure 5. Schematic diagram of the support link mechanism
图 5. 支撑连杆机构示意图

在连杆展开角度很小时, 所需的推力非常大, 根据分析是因为机构在展开时存在死点即连杆机构运动的奇异点, 导致机构难以展开, 因此必须对机构进行优化设计, 避免奇异点的出现, 减少机构在小角度展开时所需驱动力, 提高连杆机构效率 and 安全性。设计中采用的优化措施如图 5 所示。设计两个连杆

连接点高于其与底座连接的点。并在连杆连接点处安装凸轮及导向板的中心轴。优化使平面连杆机构具有一定初始的角度，并且在运动中保证机构间的角度不小于初始角度，以达到消除运动奇异点、保证运动高效可靠的目的。

可以计算得到机构初始角度为：

$$\alpha_0 = \arctan \frac{h}{l} = 10.6^\circ \quad (8)$$

零部件均采用 3D 打印技术生产，重量约为 10 kg。故在空载阶段支反力 N 为 100 N。

初始角度下所需推力：

$$F_0 = \frac{N}{2 \tan \alpha_0} = \frac{100}{2 \tan 10.8^\circ} = 262 \text{ N} \quad (9)$$

故电推杆输出负载至少大于 262 N，才能够将支撑机构连杆推出。

当连杆继续展开，凸轮或支撑块已经接触管壁后，再推连杆，机构不再只是“抬起来”，而是在向管壁施加压紧力。这时的 N 应该理解为支撑机构对管壁的法向压紧力。这时电推杆推力不是为了克服重力，而是为了产生足够大的管壁压紧力。受力分析如图 6 所示。

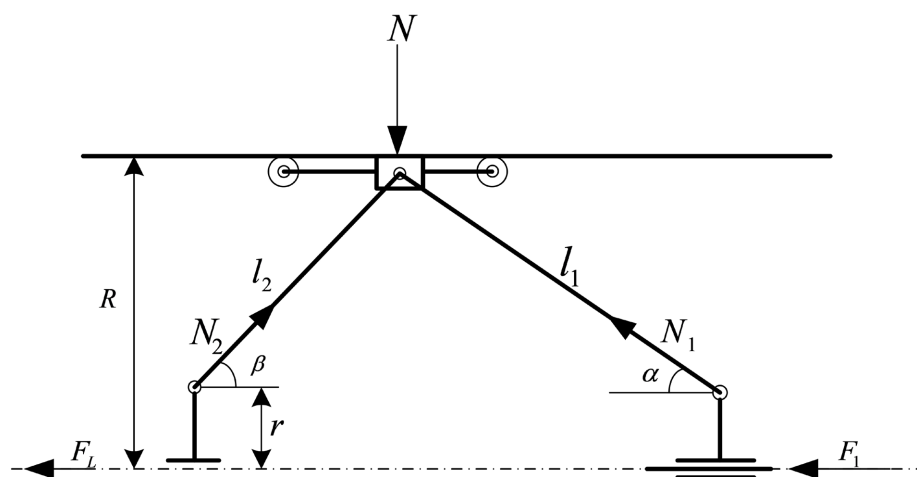


Figure 6. Force analysis diagram of the support mechanism under clamping condition
图 6. 压紧时支撑机构受力分析图

其中 F_L 为牵引力， N 为凸轮锁止机构与管壁的正压力， $f_\mu \cdot N$ 为凸轮锁止机构与管壁的摩擦力， N_1 为连杆 1 的支撑力， N_2 为连杆 2 的支撑力， F_1 为液压缸提供的推力， l_1 为连杆 1 的长度， l_2 为连杆 2 的长度， R 为管道半径。

根据力平衡条件，可得

$$\begin{cases} N = N_1 \sin \alpha + N_2 \sin \beta \\ N_1 \cos \alpha = N_2 \cos \beta \\ F_1 = N_1 \cos \alpha \end{cases} \quad (10)$$

其中根据三角关系有：

$$\frac{l_1}{\sin \beta} = \frac{l_2}{\sin \alpha} \quad (11)$$

根据平衡条件:

$$F_1 = N_1 \cos \alpha \quad (12)$$

联合上边三个公式得:

$$F_1 = \frac{N \cos \alpha}{\sin \alpha + \cos \alpha \tan \left(\arcsin \left(\frac{l_1}{l_2} \sin \alpha \right) \right)} \quad (13)$$

若取杆 1 和杆 2 等长, 则上式可简化为:

$$F_1 = \frac{N}{2 \tan \alpha} \quad (14)$$

其中可适应管径与杆长的几何关系有:

$$R = r + l_1 \sin \alpha \quad (15)$$

取 $F_L = 300 \text{ N}$, $r = 20 \text{ mm}$, $f_\mu = 0.3$ 。若使展开机构展开到 $\alpha = 60^\circ$ 时能适应最大管径 180 mm , 则根据上式可得 $l_1 = l_2 \approx 80 \text{ mm}$, 故取杆长为 80 mm 。因此可求出当展开机构能够适应管径 140 mm 时, $\alpha = 38.7^\circ$ 。

凸轮锁止机构与管壁的正压力:

$$N \leq \frac{F_L}{f_\mu} = \frac{300}{0.3} \approx 1000 \text{ N} \quad (16)$$

在管径为 140 mm 时, 最大推力为:

$$F_1 = \frac{N}{2 \tan \alpha} = \frac{1000}{2 \tan 38.7^\circ} \approx 655 \text{ N} \quad (17)$$

在管径为 180 mm 时, 最大推力为:

$$F_1 = \frac{N}{2 \tan \alpha} = \frac{1000}{2 \tan 60^\circ} \approx 303 \text{ N} \quad (18)$$

式中, F_L 为牵引力, N 为凸轮锁止机构与管壁的正压力, $f_\mu \cdot N$ 为凸轮锁止机构与管壁的摩擦力。要想机构能够向 F_L 方向移动。需要 $F_L \geq f_\mu \cdot N$ 。凸轮机构的锁止是依靠凸轮受摩擦力作用后向半径变大的方向运动, 从而产生限制, 抵制运动。

由式 (17)、(18)可知, 受支撑臂摆角随管径变化的影响, 达到自锁临界正压力 $N = 1000 \text{ N}$ 时对应的电推杆极限推力 F_1 随管径增大而减小。在 140 mm 小管径工况下, 支撑机构力放大效应显著, 触发自锁的推杆极限推力可达 655 N ; 而在 180 mm 大管径工况下, 力放大效应随摆角增大而减弱, 触发自锁的推杆极限推力仅为 303 N 。由于机器人需适配 $\phi 140 \sim 180 \text{ mm}$ 全管径范围, 电推杆推力的全局安全上限必须由约束最严苛的工况决定。

若直接选取 140 mm 管径下的极限值 655 N 作为电推杆额定推力, 代入 180 mm 管径工况计算可得管壁正压力为:

$$N = 2F_1 \tan \alpha = 2 \times 655 \times \tan 60^\circ \approx 2269 \text{ N} > 1000 \text{ N} \quad (19)$$

此时管壁正压力远超 1000 N 的自锁临界值, 机构将发生刚性自锁而完全丧失轴向行进能力。由此可见, 655 N 仅为 140 mm 单管径下的理论极限值, 无法满足全管径适配要求, 因此全工况下电推杆的安全

推力上限由最严苛的 180 mm 工况决定, 即 $F_1 = 303 \text{ N}$ 。

综合支撑机构空载展开与管壁压紧两个工作阶段, 电推杆额定推力需同时满足两项力学约束: 下限需大于 262 N, 保证机构可克服复位弹簧力与自重完成支撑臂展开; 上限需不超过 303 N, 避免大管径工况下触发自锁失效。

除力学性能约束外, 安装尺寸与工程成本同样是电推杆选型的核心考量。受最小管径 140 mm 的空间限制, 机器人内部径向与轴向布置空间十分紧凑, 300 N 级微型直流电推杆作为通用规格, 既可适配整机内部安装空间并预留装配与走线余量, 同时具备更低的采购与运维成本, 工程实用性更强。

4. 控制系统设计与分析

4.1. 整体运动流程

运动时, 机器人依靠前后支撑单元的时序变换交替锁紧管壁, 与气缸伸缩协同作用实现周期性推进, 完成一次完整循环后机器人沿管道轴向向前行进一段距离, 其周期运行过程如图 7 所示。

- (a) 初始稳态: 电缸完成管径适配后锁止行程, 两端自适应机构均与管壁自锁贴合;
- (b) 气缸伸出阶段: 左端机构作为固定锚点, 右端机构随气缸向前滑移;
- (c) 气缸回缩阶段: 右端机构切换为锚点, 左端机构随气缸同步前移;
- (d) 单周期运动结束: 气缸复位、两端机构重新自锁, 机器人单周期前进距离为 s 。

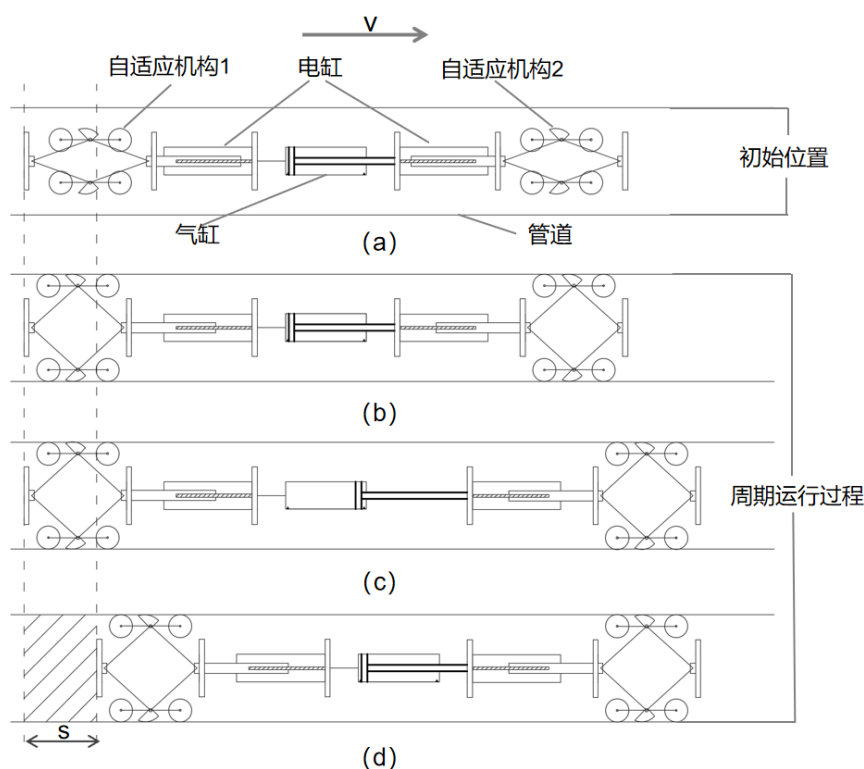


Figure 7. Motion flow diagram of the adaptive pipeline robot

图 7. 自适应管道机器人运动流程图

以上就是管道机器人单周期各阶段运行原理。通过周期性重复上述动作循环, 机器人能够在管道内持续单向向前推进; 面对 $\phi 140 \sim 180 \text{ mm}$ 区间管道内径变化时, 前后自适应机构可通过电缸改变支撑结构

展开外径，使凸轮始终贴合管壁，保障变径工况下运动过程的稳定性与可靠性。

4.2. 控制系统设计实现

电源适配器将 220 V 交流电转化为 24 V 直流电。一方面通过降压模块降压为单片机供电；另一方面连接电缸驱动模块与电磁阀驱动电路，为执行机构供电。其中 STM32 单片机通过控制引脚的高低电平与定时器输出的 PWM 信号，控制电缸驱动模块与电磁阀的开闭，从而控制管道机器人的支撑与伸缩运动。

在控制管道机器人运动方面，采用前后对称布置的凸轮自锁电缸实现管壁支撑，中间气动气缸实现伸缩推进，使得管道机器人在前进时拥有稳定的机械自锁能力，大大增强了管道机器人在复杂管道环境中的定位可靠性与运动稳定性。其中支撑单元采用位置开环控制策略：一般情况下作用管道内径已知，电推杆在初始预紧阶段按标定行程伸出到位，作业行进过程中保持伸出长度固定；管道内壁自适应能力由凸轮连杆机构中凸轮机械锁止特性被动实现，依靠支撑臂摆角随管径的自发偏转维持管壁正压力稳定。系统通过定时器中断实现全流程动作时序调度，保障气缸伸缩与支撑单元锚定、滑移的动作协同，控制流程图如图 8 所示。

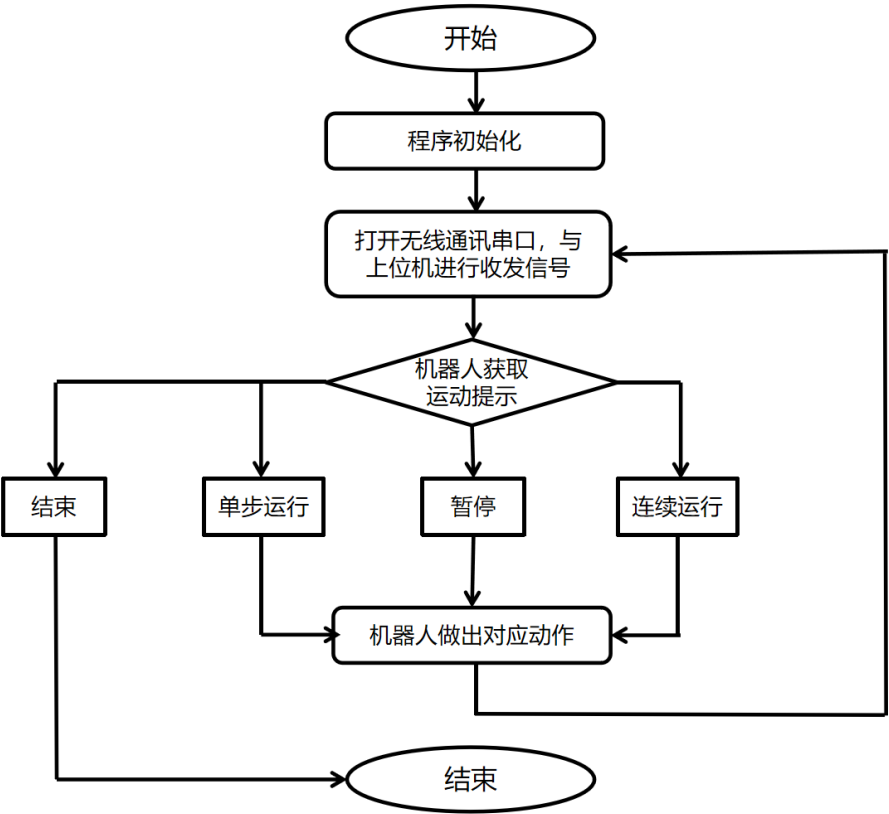


Figure 8. Control program flow diagram of the adaptive pipeline robot
图 8. 自适应管道机器人控制程序流程图

此外，为实现管道机器人的人机交互、状态监控与参数调试，构建基于 PC 端的上位机控制系统，与下位机 STM32 单片机形成“上位机决策 - 下位机执行”的协同控制架构。可通过上位机直观的图形化界面，实时调整机器人运行速度、运动模式、管道直径与长度等关键参数，并灵活执行启动、暂停及结束操作，提高了管道机器人控制过程的直观性、安全性和可追溯性，操作界面如图 9 所示。

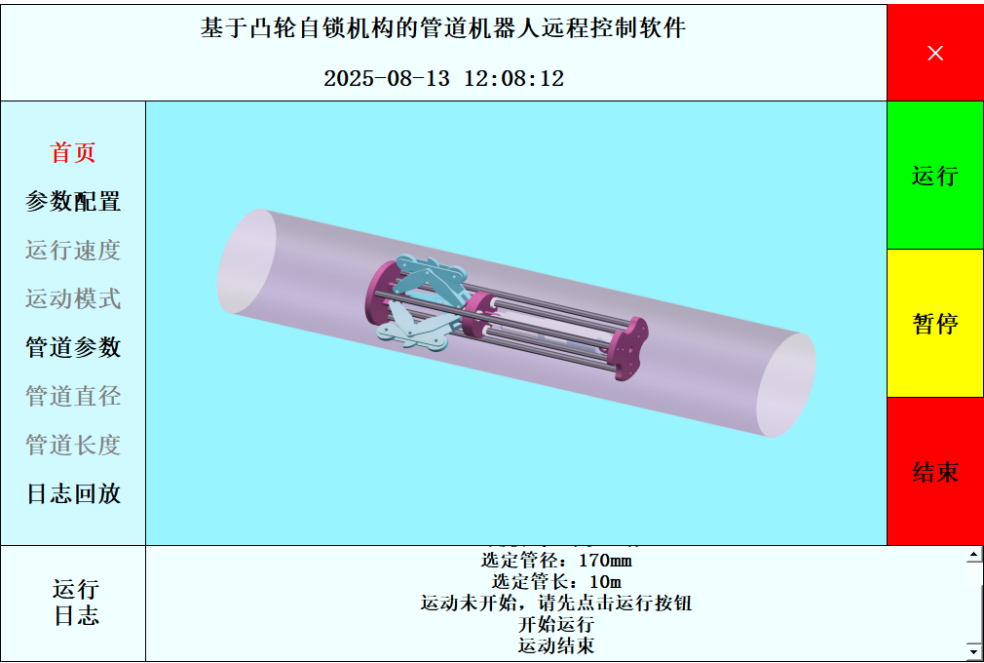


Figure 9. Operation interface of the remote control software for the adaptive pipeline robot
图 9. 自适应管道机器人远程控制软件操作界面

5. 原理样机研制与测试

样机制作是机器人研发过程中的关键环节，其主要目的是验证前期设计方案的合理性，为后续的改进与性能测试提供基础。基于前期的结构方案与系统设计，完成了中小型自适应管道机器人原理样机的制作，如图 10 所示。



Figure 10. Principle prototype of the adaptive pipeline robot
图 10. 自适应管道机器人原理样机

为验证机器人管道适用范围，在支撑结构不受外力的情况下，由电缸驱动连杆机构，实现多次展开与收回，计算其外径，最终展开后适应支撑管壁的最大直径为 190 mm，最小直径为 136 mm，满足预期 140 mm~180 mm 的设计目标。

为验证机器人运动方案的可行性，在管道内开展运动测试。试验按照预设控制机器人驱动前后支撑模块交替完成管壁锁止与解锁，配合中间伸缩气缸的往复伸缩实现正常行进。

测试结果如图 11 所示，机器人可稳定完成单周期步进动作，运动过程无卡滞、无打滑后退现象，能够沿管道持续单向平稳爬行，单步进给位移与气缸额定行程一致，验证了运动原理与控制的可靠性。

为进一步明确本设计的性能定位与适用场景，将本方案与现有两类典型管道机器人从管道适用范围、牵引能力等核心指标进行横向对比，如表 1 所示。

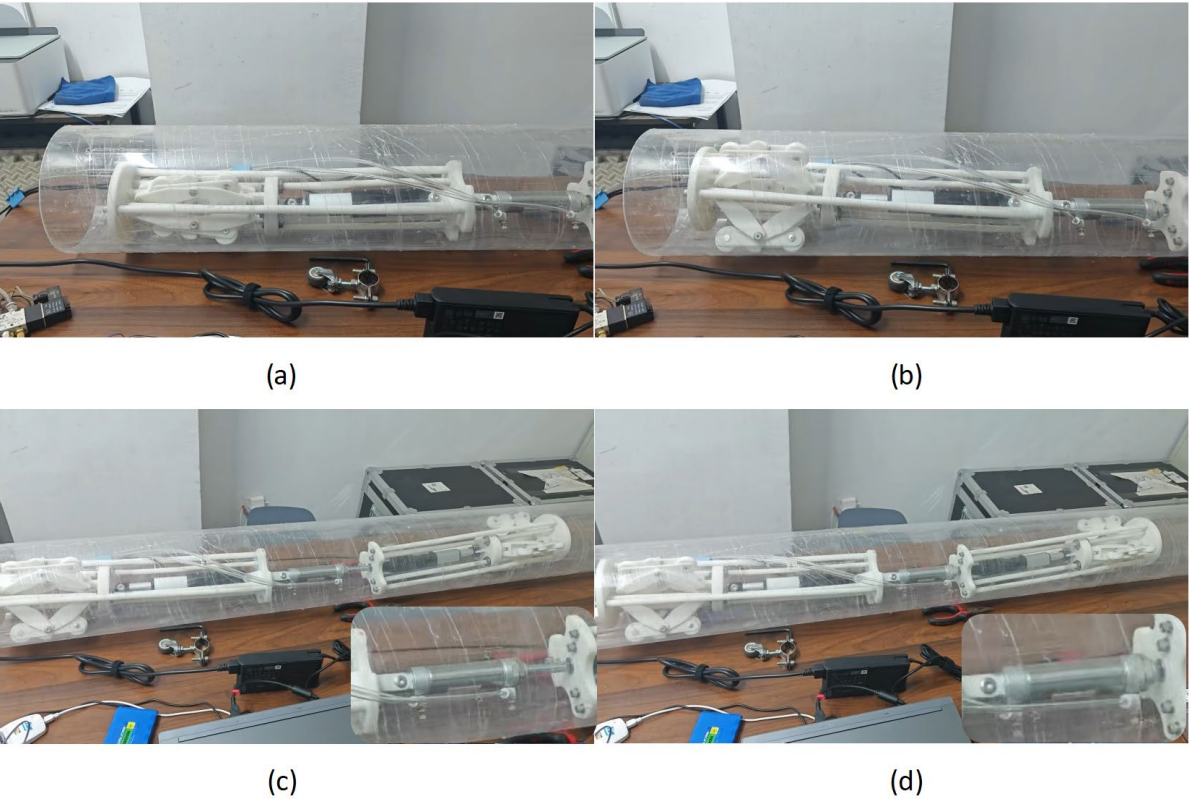


Figure 11. Motion test of the principle prototype of the adaptive pipeline robot
图 11. 自适应管道机器人原理样机运动测试

Table 1. Performance comparison of typical pipeline robots
表 1. 典型管道机器人性能参数对比表

管道机器人类型	适应管道范围	牵引力特性	驱动形式
全液压驱动管道机器人[2]	$\phi 145\sim 218\text{ mm}$	最大牵引力 30 kN，由液压工作压力决定	全液压驱动
仿生柔性伸缩式管道机器人[4]	$\phi 90\sim 120\text{ mm}$	轻载巡检级，牵引力由气囊膨胀压力决定	气压驱动
中小型自适应管道机器人	$\phi 140\sim 180\text{ mm}$	具备凸轮自锁增力特性，理论牵引力上限受构件结构强度约束	气驱 - 电驱混合

本设计针对内径为 140~180 mm 中小型管道，在管径覆盖能力、行进速度与系统复杂度之间取得了较好的平衡。相较于面向石油井下的大负载全液压管道机器人，本方案简化了动力源与液压回路，整机结构更紧凑、重量更轻、控制成本更低；相较于小管径柔性仿生管道机器人，本设计行进速度更快、凸轮自锁定位可靠性更强，更适配管道检测作业需求。

6. 结论

本文针对现有中小型管道机器人牵引力不足、适应复杂环境能力差等实际问题，完成了自适应中小型管道机器人的结构、驱动、控制系统设计。同时加工样机并搭建试验台开展实测。在机械结构方面，

设计了带有柔性悬架的自适应支撑机构，自适应自锁结构特性使得机器人能够在管道内的精准运动和定位控制，显著提升机器人在非结构管道的适应能力；采用柔顺机构设计的自由摆动悬架杆，允许滚轮径向跳动，大幅提升行走柔顺性。驱动系统方面采用电气混合驱动，结合气缸瞬时输出大推力、电缸输出力稳定的特性，提升机器人自适应运行稳定性。控制方面搭建配套远程操作软件，梳理完整运动逻辑，实现机器人远程调速、变径启停等基础操控。样机实测结果表明，机器人在管径直径 140 mm~180 mm 的管道内能顺利完成运动，无打滑、后退等现象。

基金项目

本文得到了国家级大学生创新训练项目“基于自锁机构的中小型管道机器人设计研究(项目编号: 202510057038)”的资助。

参考文献

- [1] 江海, 刘思远, 唐力. 基于数据融合分析的管道泄漏监测系统[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(12): 41-45.
- [2] 房德磊, 尚建忠, 罗自荣, 等. 全液压驱动管道机器人公理化设计[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(6): 63-69+99.
- [3] 单彦霞, 付冰双, 李若松, 等. 基于并联机构的双重驱动管道机器人设计与研究[J]. 机械设计, 2020, 37(6): 17-23.
- [4] 房德磊, 苏保龙, 邵科研, 等. 仿生柔性伸缩式管道机器人设计与分析[J]. 液压与气动, 2025, 49(10): 98-106.
- [5] Zhu, X.X., Wang, W., Zhang, S.M. and Liu, S.H. (2017) Experimental Research on the Frictional Resistance of Fluid-Driven Pipeline Robot with Small Size in Gas Pipeline. *Tribology Letters*, **65**, Article No. 49. <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0830-z>
- [6] Cai, Z.Q., Lin, C., Huo, D.H. and Zhu, C.C. (2017) Design and Analysis of Cleaning Mechanism for an Intermittent Screw-Driven Pipeline Robot. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **31**, 911-921. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0144-y>
- [7] Kakogawa, A., Ma, S. and Hirose, S. (2014) An In-Pipe Robot with Underactuated Parallelogram Crawler Modules. 2014 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, 31 May-7 June 2014, 1687-1692. <https://doi.org/10.1109/icra.2014.6907078>
- [8] 李龙辉, 张体刚, 高慧, 等. 管道机器人发展研究[J]. 机械制造, 2020, 58(10): 5-7.
- [9] 凌张伟, 缪存坚, 唐萍, 等. 工业管道内检测机器人及其变径技术的研究进展[J]. 焊管, 2020, 43(3): 31-34+40.
- [10] 田野, 顾继俊, 李宏霞, 等. 油气长输管道巡检机器人研究现状及展望[J]. 管道保护, 2025, 3(6): 56-65.