

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615030

面向非共面连续弯管的自适应 V 型管道 机器人系统设计

肖 剑¹, 缪天缘², 宋爱国²

(1. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘 要: 输油气管道作为国家工业的关键基础设施, 其巡检需求日益趋向复杂化与精细化。针对现有管道机器人在复杂管网中面临的变径适应性差、非共面连续弯管通过率低及控制系统复杂等难题, 提出并研制了一种基于主动壁压调节的自适应 V 型管道机器人。首先, 系统采用双支撑舱对称布局与中间关节驱动的新型架构, 提出基于关节电机堵转特性的主动式张力调节方法, 实现了在 110~160 mm 变径管道范围内的可靠贴壁与自适应稳定行走。其次, 为解决空间非共面连续弯管的通过性问题, 创新性地提出了一种基于关节导纳控制的被动过弯机制。该机制摒弃了传统依赖多维力传感器与复杂轨迹规划的闭环控制模式, 建立了基于电机电流限幅与物理交互的导纳动力学模型, 使机器人在纯物理交互引导下自主完成“碰撞-偏转-寻径-恢复”的平滑过弯, 并有效克服了垂直爬升与过弯过程中的自重影响。最后, 搭建了包含水平、垂直、90°连续弯管、变径管段以及多障碍物环境的真实管网场景进行实验验证。结果表明: 该机器人能以不同初始姿态在非共面弯管中平稳通过, 并在变径段与垂直段保持充足的壁面附着力与越障能力, 验证了所提机制的有效性与系统的高环境适应性。

关键词: 管道机器人; 非共面连续过弯; 导纳控制; 自适应管径

中图分类号: TH703

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

Design of an adaptive V-shaped pipeline robot system for non-coplanar continuous bends

Xiao Jian¹, Miao Tianyuan², Song Aiguo²

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As a key infrastructure in national industry, the inspection requirements for oil and gas pipelines are becoming increasingly complex and sophisticated. Aiming at the limitations of existing pipeline robots in complex pipe networks—such as poor adaptability to variable diameters, low pass rates in non-coplanar continuous bends, and overly complex control systems—this article proposes and develops an adaptive V-shaped pipeline robot based on active wall-pressure regulation. First, the system adopts a novel architecture featuring a symmetrical dual-support cabin layout driven by a central joint. An active tension adjustment method based on the locked-rotor characteristics of the joint motor is proposed, ensuring reliable wall adhesion and adaptive stable walking within 110~160 mm variable-diameter pipes. Second, to address the trafficability in spatial non-coplanar continuous bends, a passive bending mechanism based on joint admittance control is proposed innovatively. This mechanism discards the traditional closed-loop control mode that relies on multi-dimensional force sensors and complex trajectory planning. By establishing an admittance dynamics model based on joint physical interaction, the robot independently achieves smooth bending through a "collision-deflection-pathfinding-recovery" sequence, effectively overcoming the impact of self-weight during vertical climbing and turning. Finally, a physical pipe network scenario—including horizontal, vertical, 90° continuous bends, variable-diameter sections, and multi-obstacle environments—was constructed for experimental verification. The results demonstrate that the robot can smoothly navigate non-coplanar bends under various initial attitudes, maintaining sufficient traction and obstacle-surmounting capability. This verifies the effectiveness of the proposed mechanism and the

robust environmental adaptability of the system.

Keywords: pipeline robot; non-coplanar continuous bending; admittance control; adaptive pipe diameter

0 引 言

管道作为工业基础设施的重要组成部分,是输送水、油、气、蒸汽等关键介质的“生命线”,广泛应用于核电站、石油化工、市政供水、能源输送等诸多领域。其安全性和完整性直接关系到工业生产的安全运行与环境保护的核心底线^[1-2]。因此,对各类工业管道的完整性检测与运维保障,是确保相关设施长期安全运行的极其关键的任务^[3]。

这些管道长期运行在高温、高压、腐蚀性介质的严苛环境下,同时承受介质冲刷、温度循环等多重作用,长期使用后容易出现腐蚀、裂纹、磨损等老化问题,还可能因施工残留、介质沉淀等产生铁丝、焊渣、水溶纸等异物堆积^[4-5]。这些缺陷与异物若不及时检测和处理,会逐步加剧管道损伤,严重时可能导致管道破裂、介质泄漏等故障,甚至引发严重的安全事故,造成巨大的经济损失、生态破坏和社会影响^[6-7]。因此,对管道进行定期、精准的检测和维护,是不可忽视的重要安全措施^[8]。

传统的人工巡检方式主要通过内窥镜探查管内状况,这种方式在直管段尚能勉强满足基本需求,但当管内结构涉及弯管、T 型三通、变径等复杂情况时,操作灵活性大幅受限,不仅难以全面探查缺陷,检测效率也十分低下^[9]。更关键的是,人工巡检发现异物后,无法直接进行清理,只能被迫切割管道,这种处理方式不仅会对管道造成不可逆的损伤,还会导致系统停机时间延长,严重降低运转效率,同时大幅增加人工成本与作业风险^[10-11]。

为解决这一痛点,一系列管道检测机器人应运而生,它们搭载视觉、声波、电磁等传感器,能够实时获取管道缺陷数据及障碍信息,在一定程度上替代人工完成管道隐患的检修工作^[12-13]。例如 Li 等^[14]设计了基于流体自驱动的管道机器人,借助管内流体流动提供前进动力,通过调节负载与通流面积之间的关系控制运动速度,但这种驱动方式无法实现逆流运动或在特定位置精确停留;Wang 等^[15]研制了永磁轮式管道机器人,通过差速机构以及滑块滑轨结构实现变径管道的移动,但该设计主要用于管道外部检测,无法深入管道内部执行任务;Kakogawa 等^[16]开发的铰接式轮式检测机器人利用中间关节角度变化实现 T 型分支管道的自动行进,但其不足之处在于通过弯管前需提前调整转向角度,对转向空间余量有较高要求;Liang 等^[17]研发的内螺旋管道机器人利用内螺旋轮廓进行推进,在倾斜管道中展现出良好的越障性能,但其结构特点限制了驱动能力,在大管径或阻力较大的管道中运行效果不佳;Naruse 等^[18]提出了一种

蠕动式检测机器人,采用具有内骨骼结构的人工肌肉线性对抗机构来放大推进力和牵引力,但其行进速度缓慢,工作效率较低,在需要快速完成检测任务的场景中难以满足实际需求。总体而言,现有管道机器人设计和开发的局限性可总结为^[19]:

- 1) 对变径管道的适应性不强;
- 2) 面对复杂空间中非共面连续弯管通过性较差,常需要调整姿态;
- 3) 需要线缆连接机器人,增加了机器人移动的复杂性,对机器人的负载能力要求高;
- 4) 在存在污垢和障碍物的环境中适应能力差,不具有主动越障与避障能力。

为了提升管道机器人的环境适应能力,近年来部分先进研究引入了导纳控制^[20]。然而,传统的导纳控制通常依赖于末端安装的六维力传感器实时采集接触力,并结合复杂的逆运动学算法进行轨迹的实时重规划^[21]。这种方案不仅增加了系统的硬件成本与体积,且在狭小、高干扰的管道内易出现传感器失效或信号延迟,导致系统振荡。相比之下,本研究在机器人设计方面的创新性体现在:提出了一种“无外置力传感器”的关节导纳控制机制。该机制直接利用关节电机的电流环反馈与堵转限幅特性作为物理交互接口,通过将控制增益映射为虚拟刚度与虚拟阻尼,将管壁的几何碰撞约束自然转化为电机的柔顺偏转。这种设计彻底摆脱了对外部力传感器的依赖,大幅降低了控制系统的计算复杂度,以纯底层的物理交互替代了复杂的上层轨迹规划算法,显著提升了机器人在未知非共面弯管与多障碍物环境中的自适应能力与运行可靠性。

1 机器人系统设计

1.1 机器人整体机构

本文设计的 V 型管道机器人(V-shaped compliance adaptive pipeline survey robot, V-CAPS)采用双支撑舱对称布局与中间关节驱动连接的整体架构方案。该设计方案旨在实现 110~160 mm 管径范围内的自适应行走与非共面连续过弯功能,同时兼顾检测与作业的多元化需求。

V-CAPS 机器人由两个功能模块组成:第 1 支撑舱与第 2 支撑舱,两者呈镜像对称分布并通过中间关节实现连接与张力控制。整机采用 PC 塑料加工成型,在保证结构强度的同时实现轻量化设计。行走系统方面,两支撑舱两侧均配置全向轮(整机共 6 个),轮体选用硬度为 85 的聚氨酯材质,既保障横向的顺滑性,又提升了轮壁

摩擦系数,为管道内稳定行走提供充足的摩擦力,如图 1 所示。

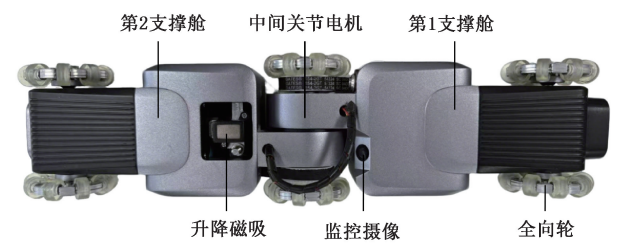


图 1 管道内检测机器人 V-CAPS
Fig. 1 V-CAPS in-pipe inspection robot

为满足管道内全方位检测需求,机器人在前、中位置均搭载高清摄像头,考虑到该机器人采用无线供电模式,后舱需搭载电池组致使空间受限,因此未配置后置摄像头。得益于其自适应连续过弯特性,机器人在无后置视觉辅助的情况下,依然能够平稳执行后退过弯动作。此外,第 1 支撑舱内集成了可伸缩磁吸机构,可实现管道内小型异物抓取。

机器人的具体几何参数总结如表 1 所示,值得注意的是,由于采用双支撑对称结构,机器人的两个模块宽度相同(均为 W_1),其展开长度为 L_6 ,全向轮半径为 C_1 ,如图 2 所示。

表 1 机器人几何参数
Table 1 Robot geometric parameters

描述	符号	长度/mm
驱动舱长度	L_1	58.5
转向舱到中间全向轮中心长度	L_2	86.6
全向轮中心到转向舱末尾长度	L_3	21.1
驱动舱前到前全向轮中心长度	L_4	12.5
机器人平放舱体总长	L_5	31.0
机器人平放总体长度	L_6	32.8
全向轮直径	C_1	51.2
转向舱侧面宽度	H_a	47.3
中部两侧全向轮距离	W_1	75.0
前部两侧全向轮距离	W_2	79.9

1.2 支撑舱连接与动力系统

1) 中心连接与扩张机制

V-CAPS 机器人的核心连接机构采用额定扭矩达 $2.0\text{ N}\cdot\text{m}$ 的关节电机,该电机通过持续堵转输出使两支支撑舱产生径向扩张力并紧贴管壁,如图 3 所示。

其力学关系可表示为: $F_n = T_m/L_7$ 。其中, F_n 为支撑舱对管壁的正压力, T_m 为电机输出扭矩, L_7 为支撑舱力臂长度,其中 $L_7 = L_1 + L_2$ 。

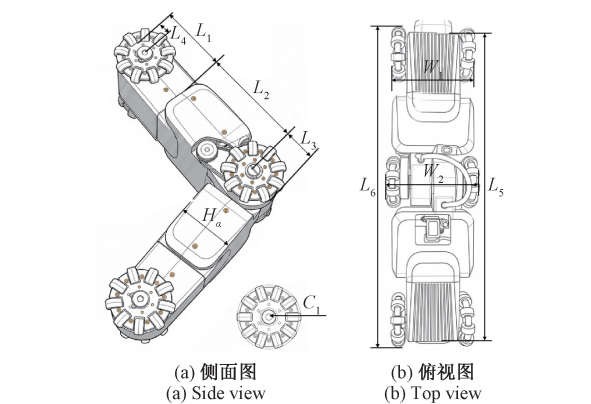


图 2 机器人的几何参数展示
Fig. 2 Display of geometric parameters of robot

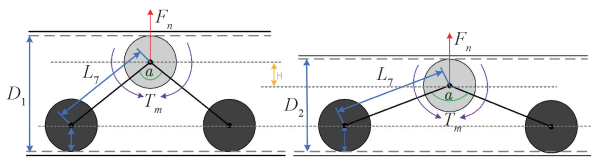


图 3 机器人在直管受力情况
Fig. 3 Force condition of robot in straight pipe

这种主动式紧张力调节方案具有强适应性:当机器人从大管径 D_1 (160 mm) 进入小管径 D_2 (110 mm) 时,支撑舱夹角自动增大,扩张力增大;反之,从小管径进入大管径时,夹角自动减小,扩张力减小,确保机器人在变径过程中始终保持与管壁的可靠接触。

2) 第 1 支撑舱详细设计

CAD 模型如图 4 所示,第 1 支撑舱采用模块化设计,分为驱动舱与转向舱两个功能子模块,通过导电滑环实现连接。该滑环支持 6 路数据与电源传输,可满足驱动舱与转向舱 360° 相对旋转需求,从根本上解决了传统线缆缠绕导致的设备损坏问题。

转向舱内置 1 个关节电机,主要用于控制驱动舱的横向转动。在正常工况下对电机施加小幅导纳控制信号;当驱动舱遇到障碍物发生偏转后,电机通过位置保持特性可迫使驱动舱与转向舱恢复初始相对位置,保障行进方向稳定性。

此外,转向舱内集成微型伸缩磁吸,工作时可伸出磁吸部件,完成管道内小型异物清理后收回,实现了检测与作业的功能融合。

驱动舱配置一个双轴行星减速电机,为 V-CAPS 提供向前行走动力;同时搭载 1 200 万像素高清摄像头,可实时采集管道内壁图像,为缺陷检测提供高质量的视觉数据支持。

3) 第 2 支撑舱功能配置

第 2 支撑舱与第 1 支撑舱在结构上对称,但在功能

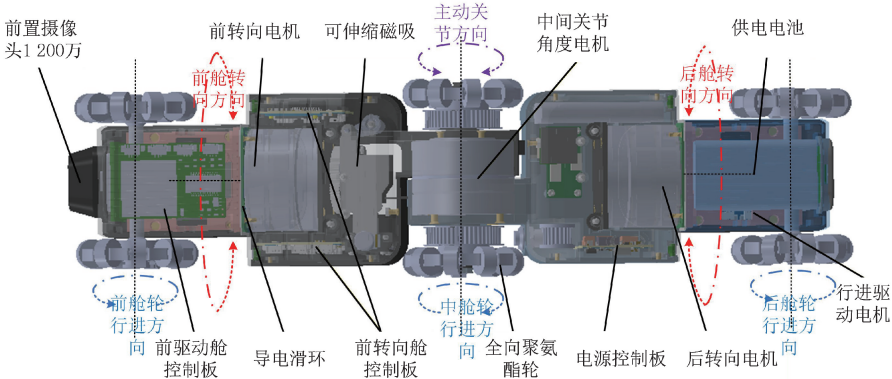


图 4 管道内检测机器人的 CAD 模型

Fig. 4 CAD model of pipeline inspection robot

上侧重动力供应与运动灵活性提升。舱内搭载 3 组锂电池,为整机所有电气组件(包括电机、摄像头、可伸缩磁吸模块等)提供持续稳定的电源供应。

与第 1 支撑舱不同,第 2 支撑舱的转向舱取消了伸缩磁吸,改为摄像头。摄像头实时拍摄伸缩磁吸的作业过程,为磁吸动作的精准控制提供实时视觉反馈。

1.3 传感与通讯系统设计

由于管道内情况复杂,若采用有线通信方式,线缆易与管壁摩擦缠绕,严重影响机器人的行进流畅度。为此,V-CAPS 机器人设计了两套独立的无线通信方案以适应不同场景需求。

基于 RY7628DAN 物联网模块的 Wi-Fi 通信方案适用于中短距离、管道分支较少的场景,可实现高清视频流的实时传输。而基于远距离(long-range,LoRa)无线模块的树莓派中继通信方案则适用于长距离、多分支的复杂管道环境,其强大的穿透能力能有效穿透多段弯管,确保通信链路的稳定性。

这种双模通信设计既保障了在简单环境下的高速数据传输,又确保了在复杂环境下的通信可靠性,为机器人在各种管道环境下的稳定作业提供了坚实保障,如图 5 所示。

为了使机器人更加稳定,因此每个舱内单独配置了驱动与控制板,实现了控制系统模块化。

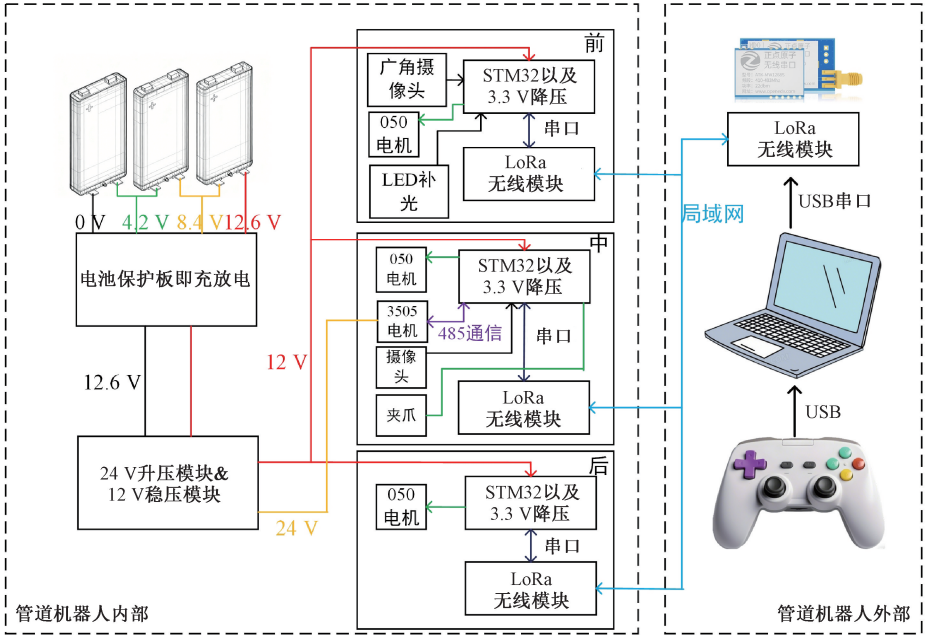


图 5 传感与通讯系统设计

Fig. 5 Design of sensing and communication system

2 机器人自适应过弯机理与特性分析

2.1 自适应过弯控制模式定义

为实现机器人在空间连续弯管中的自适应通过,系统采用一种不依赖额外接触传感器的被动过弯控制模式。该模式的核心在于:中间关节始终工作于恒定扭矩控制模式,用于维持机器人对管壁的稳定预紧;前后关节采用带扭矩约束的位置保持控制,在保证基本姿态恢复能力的同时,允许关节在壁面接触力的驱动下发生有限被动偏转,实现利用管壁几何约束引导的被动过弯。

其完整的工作流程可分解为4个连续的阶段,如图6所示。

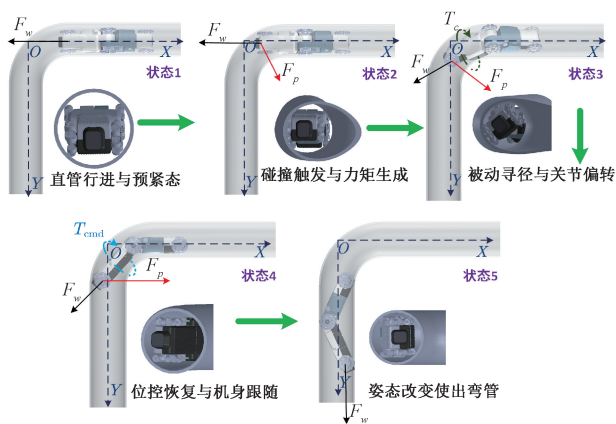


图6 管道机器人过弯流程

Fig. 6 Bending process of pipeline robot

2.2 关节导纳控制模型构建

本文提出的自适应机制本质上是将关节电机模拟为一个具有特定物理特性的“虚拟弹簧-阻尼-质量”系统。通过调节电机底层的PD控制参数及电流限幅,构建导纳控制模型。

1) 中间关节预紧机制

中间关节在过弯全过程中始终工作于扭矩控制模式,旨在维持机器人对管壁的稳定预紧力,从而保持基本的“V”型构型并确保驱动轮组的附着能力。中间关节的输出转矩 T_m 与驱动电流 I_q 满足线性关系:

$$T_m = K_t I_q \quad (1)$$

其中, K_t 为电机转矩常数。通过设定恒定的轴电流,机器人可将预紧力矩转化为轮组对管壁的法向正压力,为过弯提供必要的向心力基础。

2) 关节导纳动力学建模

对于第1关节与第3关节,其控制目标是在无接触时维持参考角 θ_r (直管中为0),在接触时提供柔顺响

应。定义实际角为 θ , 则PD控制器生成的恢复力矩指令 T_{cmd} 为:

$$T_{cmd} = K_p(\theta_r - \theta) - K_d\dot{\theta} \quad (2)$$

其中, K_p 为比例增益, K_d 为微分增益。考虑关节电机驱动能力及安全约束,引入基于饱和函数的扭矩限制 T_{max} :

$$T_{out} = \text{sat}(T_{cmd}, T_{max}) \quad (3)$$

考虑关节等效动力学方程:

$$J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + T_f = T_{out} + T_{ext} \quad (4)$$

其中, J 为等效转动惯量, C 为等效阻尼, T_f 为摩擦项, T_{ext} 为管壁接触产生的等效外力矩。

在未达到限幅的线性区,系统等效导纳方程为:

$$J\ddot{\theta} + (C + K_d)\dot{\theta} + K_p(\theta - \theta_r) = T_{ext} \quad (5)$$

此模型将 K_p 与 K_d 分别映射为虚拟刚度与虚拟阻尼。当 T_{ext} 超过限幅对应的恢复力矩时,电机表现为低增量刚性的柔顺特性,允许关节被动偏转以顺应弯管几何约束。

3) 饱和约束下的被动寻径机理

真实的管道环境中,非共面连续弯管会产生极大的瞬时接触约束力。为了避免“过硬”的控制导致机体卡滞或电机过载,本文在上述线性导纳模型的基础上,引入了基于电流限制的非线性力矩饱和策略:

$$T_{out} = \text{sat}(T_{cmd}, T_{max}) = \begin{cases} T_{max}, & T_{cmd} > T_{max} \\ T_{cmd}, & -T_{max} \leq T_{cmd} \leq T_{max} \\ -T_{max}, & T_{cmd} < -T_{max} \end{cases} \quad (6)$$

当机器人进入弯头时,前舱全向轮与弯管外壁发生干涉, T_{ext} 迅速增加。当 T_{ext} 超过 T_{max} 时,系统进入“被动柔顺让步”状态。此时导纳模型中的恢复力矩被钳位在 T_{max} , 关节等效呈现出极低的增量刚度,允许 θ 随管壁几何曲率发生大范围被动偏转(即被动过弯)。这种带饱和的导纳控制机制,使得机器人能够将环境的刚性几何约束转化为柔性的关节偏转,通过纯物理交互自主完成过弯寻径。

2.3 过弯过程的数理状态描述

结合上述动力学模型,机器人通过90°弯管的全过程可由以下4个数学状态表述:

1) 直管平衡态: $T_{ext} \approx 0$, 此时 $T_{cmd} < T_{max}$ 。系统处于线性导纳区,在虚拟刚度 K 的作用下,误差 $\theta_r - \theta$ 趋近于0,维持V型直管构型;

2) 接触与偏转触发态:前轮组触壁,接触诱导力矩 T_{ext} 激增。当满足条件 $T_{ext} - T_f > T_{max}$ 时,电机力矩饱和,第一关节在管壁压力的推动下发生被动偏转,引导机身切入弯道;

3) 被动适应过弯态:机器人在弯管内行进,中置关

节的恒扭矩输出持续提供附着牵引力。前后关节在饱和力矩 $T_{\max}$ 的反向作用下,始终保持贴壁趋势,姿态角 θ 随管道曲率被动连续演化;

4) 出弯复位态:驶出弯管后,几何约束解除, T_{ext} 骤降。系统退出力矩饱和区,重新进入线性导纳状态。动力学模型退化为自由衰减响应,在过阻尼配置下,关节平滑且无超调地恢复至初始参考角 θ_r 。

2.4 与传统过弯技术的对比分析

在管道机器人中,过弯尤其重要,过弯的方式也有很多,于是将其与两种主流的过弯技术进行系统性对比,分别为预调整姿态^[22]和传感器实时控制^[23],结果如表 2 所示。

表 2 过弯技术方案对比

Table 2 Comparison of bending technical schemes			
对比维度	预调整姿态	传感器实时控制	本文过弯机制
弯管预知需求	需要	不需要	不需要
控制复杂度	中	高	极低
传感依赖度	低	高	零
机构复杂性	高	高	低
过弯行为特性	开环控制	闭环控制	导纳控制

通过对比可知,本机制在控制复杂度、可靠性(抗干扰性)和机构简练性方面具有显著优势,特别适用于传感器易失效、人工干预困难的极端工况。

2.5 过弯能力的几何约束分析

为确保自适应过弯的可行性,必须满足特定的几何约束条件。以最常见的 90°弯管为分析对象,定义管道内径为 D ,管道中心轴线弯曲半径为 R_{pipe} 。管道内侧壁弯曲半径 $R_{\text{inner}} = R_{\text{pipe}} - D/2$,外侧壁弯曲半径 $R_{\text{outer}} = R_{\text{pipe}} + D/2$ 。

图 7 所示为机器人通过弯管的几何关系。

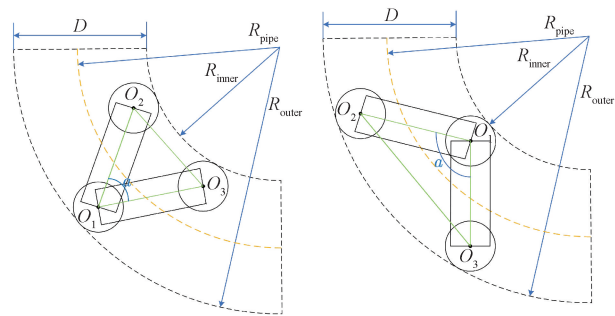


图 7 机器人弯管几何示意

Fig. 7 Geometric sketch of robot elbow passing

机器人成功通过弯管需满足两个核心约束:

1) 内侧全向轮到弯管中心的距离 $\geq$ 管道内侧壁半

径。设机器人中心关节沿管道轴线运动(距弯管中心距离 R_{pipe}),内侧全向轮距弯管中心的距离为 $R_{\text{pipe}} - L_2 \times \cos(a/2)$;

2) 外侧支撑舱外壳到弯管中心的距离 $\leq$ 管道外侧壁半径。外侧支撑舱外壳距弯管中心的距离为 $R_{\text{pipe}} = L_2 \times \cos(a/2) + W_2/2$,因此约束条件为:

$$\begin{cases} R_{\text{pipe}} - \sqrt{L_2^2 - \left(\frac{W_1}{2}\right)^2} \times \cos\left(\frac{a}{2}\right) \geq R_{\text{inner}} = R_{\text{pipe}} - \frac{D}{2} \\ R_{\text{pipe}} + L_2 \times \cos\left(\frac{a}{2}\right) + \frac{W_2}{2} \leq R_{\text{outer}} = R_{\text{pipe}} + \frac{D}{2} \\ \sqrt{\left(R_{\text{pipe}} + (L_2 + L_3) \times \cos\left(\frac{a}{2}\right)\right)^2 + \left(\frac{W_1}{2}\right)^2} \leq R_{\text{pipe}} + \frac{D}{2} \end{cases} \quad (7)$$

弯管的横向截面为圆形,机器人宽度 W_1 需满足横向最大投影小于管道截面直径 D ,但因过弯时机器人可能存在轻微姿态偏移(如绕管道轴线的旋转),需预留一定安全余量,约束条件为:

$$W_1 \times (1 + 10\%) \leq D \quad (8)$$

机器人在通过管道折弯段时,若单体关节尺寸或径向最大直径超过弯管的几何约束,将发生卡滞,影响其正常通行。基于空间几何约束方程,本文对管道弯曲区域进行二维简化:先假设 V-CAPS 机器人直径为 d ,单体关节长度为 L ,弯管外弦长为 L_{bend} ,以此分析弯管对机器人整体外形尺寸的约束,并对弯管曲率适用范围进行理论推导与计算。

$$\left(R + \frac{D}{2}\right) \times \cos\left(\frac{a}{2}\right) - \left(R + \frac{D}{2}\right) > 0 \quad (9)$$

机器人关节长度 L 小于弯管外弦长为 L_{bend} 时,机身可完全位于管道弯曲部分内部,机器人管道通过状态可视为粗短型。现考虑极限位置,在机器人关节位于弯管切边内侧时,其机身尺寸需满足如下关系式:

$$\left(R + \frac{D}{2}\right) \times \sin\left(\frac{a}{2}\right) - \left(R - \frac{D}{2}\right) < d < D \quad (10)$$

则得到机器人关节长度的极限尺寸 L_{max} 与管道弯曲处的几何约束条件关系为:

$$L_{\text{max}} = 2 \sqrt{\left(R + \frac{D}{2}\right)^2 - \left(R - \frac{D}{2} + d\right)^2} \quad (11)$$

机器人关节长度 L 小于弯管外弦长为 L_{bend} 时,机身无法完全位于弯道弯曲部分,机器人管道通过状态可视为细长型。则机器人机身尺寸需满足的条件为:

$$0 < d < \left(R + \frac{D}{2}\right) \times \cos\left(\frac{a}{2}\right) - \left(R - \frac{D}{2}\right) \quad (12)$$

由于实际管线布置中,为避免流体对管道弯曲处压力过大,主干线路所采用的弯曲角度普遍在 90°以下。因此,这里取 $a=90^\circ$ 进行计算,得到机器人关节长度的极限尺寸 L_{max} 与管道弯曲处的几何约束关系式为:

$$L_{\max} = \frac{\left(R + \frac{D}{2}\right)}{\sin\left(\frac{a}{2}\right)} - \frac{\left(R + \frac{D}{2}\right)}{\cos\left(\frac{a}{2}\right)} \quad (13)$$

在圆弧弯管曲率较大时,即管道几何尺寸在式(13)所示约束范围内:

$$\left(R + \frac{D}{2}\right) \times \cos\left(\frac{a}{2}\right) - \left(R - \frac{D}{2}\right) < 0 \quad (14)$$

则机器人在通过管道折弯处时,前后两端不可超过圆弧弯管的两个边界截面圆,得到机器人关约束尺寸与管道弯曲处的几何参数约束表达式为:

$$\begin{cases} 0 < d < D \\ L_{\max} = 2\sqrt{\left(R + \frac{D}{2}\right)^2 - \left(R - \frac{D}{2} + d\right)^2} \end{cases} \quad (15)$$

2.6 静力学与过弯驱动力分析

在弯管中,机器人必须克服额外的法向力和由此产生的摩擦力,以确保不打滑。如图8展示了机器人在弯管中的受力情况。

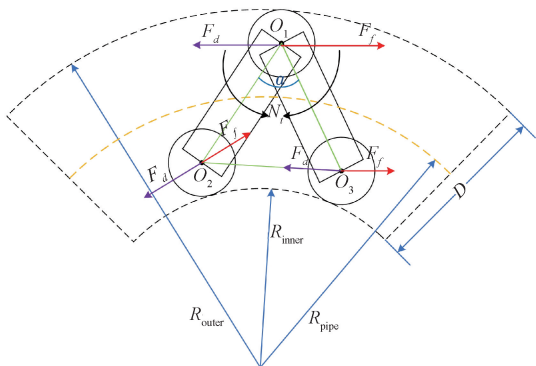


图8 机器人在弯管中的受力情况

Fig. 8 Force condition of robot in elbow

在弯管中,机器人作曲线运动,需要向心力。该力由管壁对内外侧全向轮的法向反力差值提供。中心扩张电机提供的总正压力 N_t 决定了机器人与管壁间数的最大静摩擦力 $F_f^{\max} = u \times N_t$, 其中 u 为摩擦系数。

机器人的总驱动力 F_d 需满足 $F_d \leq F_f^{\max}$ 。同时,该驱动力需用于克服重力分量(在斜管中)和加速。因此,中心电机的堵转扭矩 T_{motor} 必须足够大,以确保:

$$N_t \approx \frac{T_{\text{motor}}}{L_2} \geq \frac{F_d}{u} N_t \approx \frac{T_{\text{motor}}}{L_2} \geq \frac{F_d}{u} \quad (16)$$

本文选用的关节电机,经计算可在目标管径范围内提供大于机器人自重2倍以上的正压力,为过弯提供了充足的摩擦力,确保了运动的可靠性。

通过阐述其“碰撞-偏转-寻径-恢复”的四阶段工作流程,揭示了其作为物理伺服系统的本质。与现有技术的对比分析,从控制、传感、机构等多维度证明了该机制

的简捷性与鲁棒性。进一步的几何与静力学理论分析,明确了其过弯能力的边界条件,并从原理上验证了设计的合理性。理论结果表明,该无源过弯机制能够稳定、自适应地通过特定几何范围内的弯管,为后续的实验验证奠定了坚实的理论基础。

3 实验与结果分析

本部分通过实验验证所设计机器人在水平、垂直管道中的运动性能,以及机器人顺利通过 90° 弯管的通行能力。研究搭建两类 1:1 实际管道实验场景:1)用于验证机器人在不同平面、不同姿态下对弯管的自适应通过能力;2)构建包含变径管段、水平管段、垂直管段及弯管的复杂管网场景,开展机器人全工况移动性能测试,综合验证机器人在复杂管道环境中的运动可靠性与环境适应性。

3.1 实验场景设置

无障碍过弯性能测试选用管径 110 mm、弯头角度 90° 的实验管道,设定机器人从管道一端入管并从另一端出管的通行路径,分别在平面、垂直面两种空间姿态下,设计 4 种不同角度的初始姿态工况,开展机器人的弯管自适应通行能力测试。为全面量化机器人的通过性能,实验管网不仅包括标准的变径与弯管,还在 160 mm 直管段内专门设置了多障碍物阵列环境。

复杂管网测试同样以 110 mm 管径为基础,搭建融合变径管段、水平管段、垂直管段及多组弯管的综合实验管道系统,开展机器人全流程移动性能测试,验证其在多工况耦合的复杂管道环境中的连续通行能力。实验管道如图9所示。

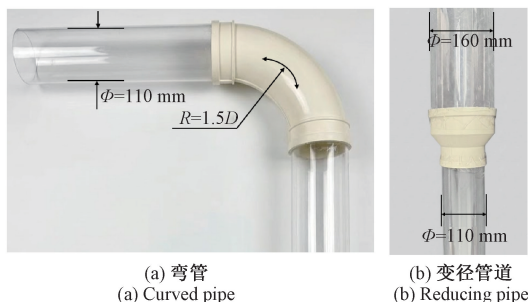


图9 实验管道

Fig. 9 Experimental pipeline

3.2 实验结果

1) 平面下的姿态过弯效果

机器人进入管道的初始姿态具有多样性,当机身前部与管道轴线同向或呈 90° 夹角时,均可采用轴线偏航角进行表征。为便于统一描述,本文将水平向右轴线偏航

角 0° 记为模式 1; 水平向右轴线偏航角 90° 记为模式 2; 垂直向上轴线偏航角 0° 记为模式 3; 垂直向上轴线偏航角 90° 记为模式 4; 垂直向下轴线偏航角 0° 记为模式 5; 垂直向下轴线偏航角 90° 记为模式 6。

在平面运动状态下, 机器人向左与向右转向的效果等效, 因此仅给出向右转向的实验结果, 如图 10 所示。该图清晰展示了管道机器人通过弯管过程中, 各关节电机的位置与扭矩变化。

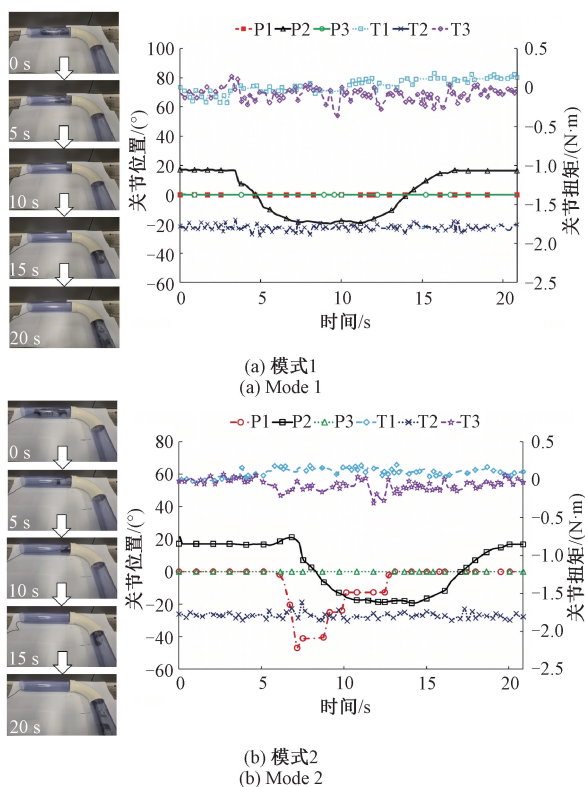


图 10 水平面过弯例图

Fig. 10 Example of horizontal plane bending

P_1 、 P_2 、 P_3 与 T_1 、 T_2 、 T_3 分别为机器人前、中、后关节电机的位置与扭矩控制参数, 其中初始姿态为轴向侧行姿态的过弯难度最大, 如图 10(b) 可知, 当运动至 6 s 时, 机器人前舱进入弯管区域, 前关节电机出现 40° 的角度偏移, 此时该电机已经存在恢复至零位的扭矩, 并通过扭矩输出带动机身后部完成旋转动作; 运动至 8 s 时, 中间关节电机顺应弯管弧度发生角度减小的自适应调整; 10 s 后, 前关节电机阻力减少恢复至零位, 受该电机扭矩输出限值偏小的影响, 零位恢复过程存在滞后性, 最终整机姿态相对初始状态偏转 90° , 实现与弯管走向的精准适配。

2) 垂直面下的姿态过弯效果

如图 11 所示, 垂直管道工况对机器人的运动性能提出了更高要求, 依托中间关节电机的高扭矩输出特性, 机

器人的 6 组全向轮可与管道内壁实现充分贴合并产生有效驱动力, 进而自适应调整机身姿态, 顺利完成弯管段的通行作业。本研究分别开展了垂直向下、垂直向上两种工况下的过弯性能测试。

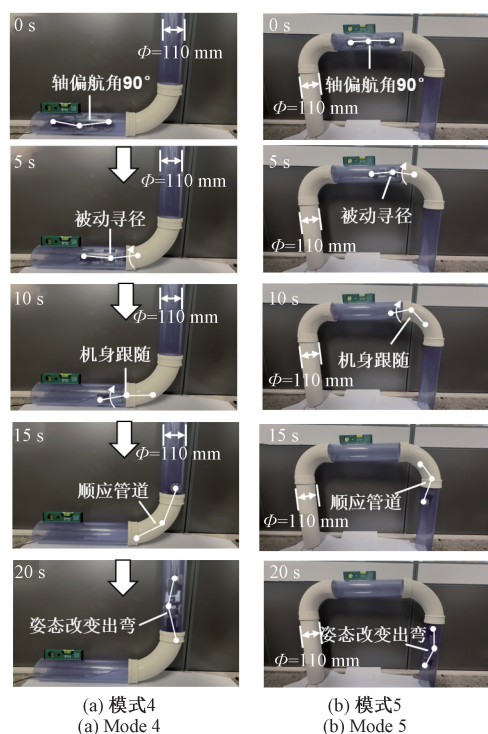


图 11 垂直面过弯例图

Fig. 11 Example diagram of vertical plane bending

3) 定量性能统计评估

为了客观评价系统性能, 对机器人进行了多姿态及极限管径的量化测试。通过调节主动壁压控制机制中的扭矩参数, 记录了机器人在不同管径下的运动表现, 经多次测量, 机器人在支撑舱最大收缩状态下, 能通过的最小管径定量数值为 99 mm; 在展开状态下能适应的最大管径为 168 mm。在 110~160 mm 的核心区间内, 机器人与管壁的平均附着牵引力大于系统自重的 1.5 倍, 确保了垂直爬升不滑落。

此外, 针对水平与垂直空间下的 6 种典型初始姿态 (模式 1~模式 6), 每种模式开展 20 次重复过弯测试, 量化统计结果如表 3 所示。

由实验可知, 机器人在模式 1、2、3、5 下均实现了 100% 的一次性无干预通过。而在模式 4 和模式 6 工况下, 由于重力矢量与运动轴向不共面, 导致部分全向轮接触法向力发生非对称突变。在极端力学死区, 偶发因局部摩擦力骤升导致的卡滞现象, 但是管道机器人在前向力的驱动下, 也能最终调整姿态通过弯管。

4) 机器人障碍通过效果

为进一步验证 V-CAPS 机器人在实际工况下的鲁棒

表 3 不同初始姿态下的过弯定量统计分析

Table 3 Quantitative statistical analysis of cornering under different initial attitudes

测试工况	初始姿态定义	通过无卡顿	成功率/%
模式 1	水平, 偏航角 0°	20/20	100
模式 2	水平, 偏航角 90°	20/20	100
模式 3	垂直向上, 偏航角 0°	20/20	100
模式 4	垂直向上, 偏航角 90°	18/20	90
模式 5	垂直向下, 偏航角 0°	20/20	100
模式 6	垂直向下, 偏航角 90°	19/20	95

性,本节模拟了管道服役过程中常见的 4 种典型障碍环境:非结构化沉积物(沙子、石子)与结构化几何障碍(凸起、焊缝)。所有实验均在内径为 160 mm 的标准亚克力管路中进行,障碍物分布如图 12 所示。

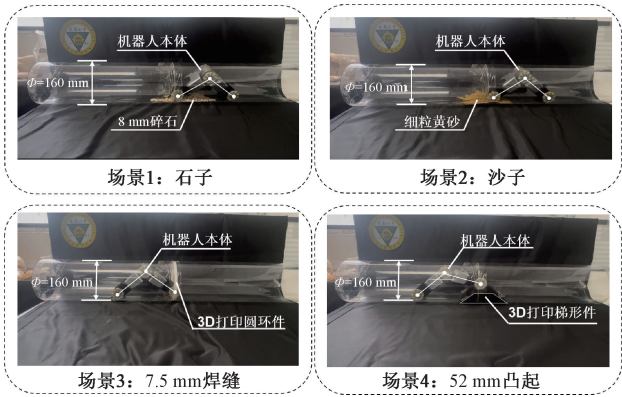


图 12 障碍物环境下的通过效果

Fig. 12 Passing effect under obstacle environment

实验结果表明,当驱动轮驶入沙石区域时,接触界面由刚性摩擦转变为松散介质间的剪切力。基于电机堵转特性的主动张力系统增加支撑臂的径向压力,通过强化正压力补偿了摩擦系数的下降,确保了稳定的巡检速度。

在面对 3D 打印的刚性障碍时,机器人的中间关节扭矩控制起到核心引导作用。当机身与凸起障碍或焊缝发生物理干涉时,关节能够进行反驱,将第一支撑舱抬起通过障碍物。

5) 复杂场景的通过效果

如图 13 所示,试验搭建了一个复杂场景的管道,包含了绝大多数的实际场景使用现状。

管道机器人顺利且平稳的通过此场景,在 0~5 s,机器人在第 1 个平面弯管 90°通过;5~15 s,机器人在水平管道移动;15~20 s,机器人通过第 2 个垂直面弯管;20~24 s,机器人在垂直管道行进;24~28 s,机器人自适应变径到 160 mm 管道。

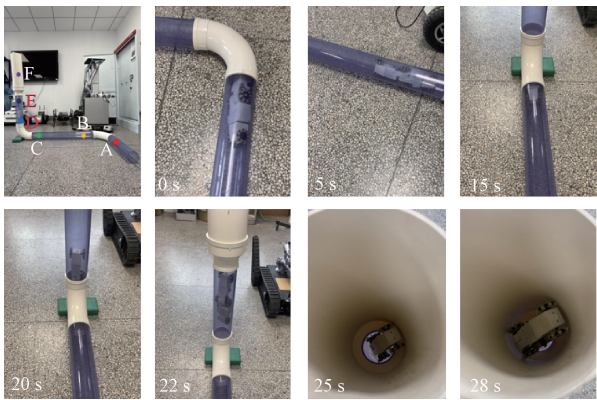


图 13 多复杂场景的通过效果

Fig. 13 Passing effect of long distance and multi-complex scenes

4 结 论

本文提出了一种双支撑舱对称布局与中间关节驱动连接的 V 型管道机器人,可实现自适应管径非共面连续过弯的通行。此研究的成果主要体现为以下方面:设计的 V 型双支撑对称架构结合中间关节电机,构建了主动式紧张力调节机制。该机制可根据管道内径变化自动调整支撑夹角,保证了机器人在 110~160 mm 变径环境下的可靠贴壁正压力与充足牵引力,配合全向轮系统实现了管道内的高速顺滑移动。创新性地提出了一种依赖物理解交互反馈与电机位置伺服的自适应过弯策略。与传统依赖先验地图或多传感器融合闭环控制的技术相比,该机制控制复杂度极低,完全免除了传感器失效带来的风险,在未知和复杂连续弯管中展现出卓越的寻径通过能力和极强的抗干扰性。

本文设计的自适应导纳过弯机制在极大精简系统硬件与控制复杂度的前提下,实现了高可靠性的管网巡检。在系统的极限工况测试中也发现,在持续高负载的过弯与越障动作下,中心关节电机存在一定的热耗散瓶颈。未来研究将聚焦于机电系统的高效热管理优化,并引入多关节协同的自适应变位算法,以期突破复杂 T 型分支管道的通行难题,进一步拓展该系统在深远海与核电极端工况下的全地形作业能力。

参考文献

[1] 花靖开, 郎宪明. 基于次声波法的天然气管道小泄漏识别方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2026, 47(1): 212-221.

Hua Jingkai, Lang Xianming. Research on small leakage identification method for natural gas pipeline based on subsonic wave method[J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2026, 47(1): 212-221.
- [2] Yang X X, Xue Y S, Cai B. Pathway planning of nuclear power development incorporating assessment of nuclear event risk [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(2): 500-513.
- [3] Cepin M. Application of new generation reliability importance factors in power systems [C]// 2019 IEEE EUROCON International Conference on Smart Technologies, 2019: 1-4.
- [4] 张行, 唐步云, 刘彤, 等. 油气管道柔性测径传感器设计及其结构优化[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 15-25.
- Zhang Xing, Tang Buyun, Liu Tong, et al. Design and structural optimization of flexible sizing sensors for oil and gas pipelines [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 15-25.
- [5] 宋明强, 丁超, 石雪焱, 等. 先进核电厂严重事故源项与放射性后果现状分析与相关问题探讨[J]. 核科学与工程, 2025, 45(4): 764-771.
- Song Mingqiang, Ding Chao, Shi Xueyao, et al. Analysis and discussion on the status quo of source terms and radioactive consequences of severe accidents in advanced nuclear power plants [J]. Nuclear Science and Engineering, 2025, 45(4): 764-771.
- [6] Mang R A, Abro G E M, Memon S A, et al. Fopid-controlled self-propelled pipeline inspection robot for internal mapping of small-diameter pipelines[J]. IEEE Access, 2025, 13: 137931-137941.
- [7] 吴擎文, 罗天文, 杨文, 等. 管道机器人监测系统在面板堆石坝中的应用: 以夹岩水利工程为例[J]. 中国水运, 2023, 23(24): 100-102.
- Wu Qingwen, Luo Tianwen, Yang Wen, et al. Application of pipeline robot monitoring system in CFRD: Taking Jiayan water conservancy project as an example [J]. China Water Transport, 2023, 23(24): 100-102.
- [8] 朱喆. 油气管道及储运设施安全保障技术发展现状及展望[J]. 中国化工贸易, 2025, 17(33): 151-153.
- Zhu Zhe. Current status and prospects of safety assurance technologies for oil and gas pipelines and storage and transportation facilities [J]. China Chemical Trade, 2025, 17(33): 151-153.
- [9] Savin S, Vorochaeva L. Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes [C]// 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2017: 1-6.
- [10] Usamentiaga R. Semiautonomous pipeline inspection using infrared thermography and unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 20(2): 2540-2550.
- [11] 洪都, 郭贤, 毛国华, 等. 管道检测机器人关键技术现状及展望[J]. 机床与液压, 2026, 54(5): 9-20.
- Hong Du, Guo Xian, Mao Guohua, et al. Status and prospect of key technologies of pipeline inspection robot [J]. Machine Tools & Hydraulics, 2026, 54(5): 9-20.
- [12] Pan W X, Xie R H, Wang S Y, et al. A modular reconfigurable wireless power transfer system with multiple hybrid outputs for pipeline inspection robots [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(6): 5736-5745.
- [13] Kamezaki M, Yamaguchi K, Zhao Wen, et al. SPIRA: Small gas pipeline inspection robot with spiral leg-wheel mechanism and single bending joint [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(12): 12676-12683.
- [14] Li J Y, Jiang S Y, Wang Y, et al. Study on speed control system of in-pipe robot power self-supported by fluid [C]// 2009 International Conference on Mechatronics and Automation, 2009: 1396-1400.
- [15] Wang Z C, Wang M Y, Yuan J J, et al. Structural design and analysis of a permanent-magnet wheeled pipe robot with pipe diameter adaption capability [C]// 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2022: 2039-2044.
- [16] Kakogawa A, Murata K, Ma S G. Automatic T-branch travel of an articulated wheeled in-pipe inspection robot using joint angle response to environmental changes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(7): 7041-7050.
- [17] Liang L, Peng H, Chen B, et al. Performance analysis and parameter optimization of an inner spiral in-pipe robot [J]. Robotica, 2016, 34(2): 361-382.
- [18] Naruse Y, Hiromoto K, Okuma R, et al. Multiple-connected variable outer diameter pigs using pneumatic artificial muscle for inspecting narrow and complex pipeline, including many bend pipes [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(11): 10535-10542.
- [19] 李逃昌, 李健璋, 侯利民, 等. 多智能体深度强化学

习优化的机器人导纳控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(5): 134-143.

Li Taochang, Li Jianzhang, Hou Limin, et al. Robot admittance control optimized by multi-agent deep reinforcement learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(5):134-143.

[20] 隋修武, 刘阳, 刘金雨, 等. 上肢康复机器人自适应阻抗交互控制策略[J]. 电子测量技术, 2025, 48(21): 47-54.

Sui Xiuwu, Liu Yang, Liu Jinyu, et al. Adaptive impedance interaction control strategy for upper limb rehabilitation robots [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(21):47-54.

[21] Cho J, Choi D, Park H J. Sensorless variable admittance control for human-robot interaction of a dual-arm social robot[J]. IEEE Access, 2023, 11: 69366-69377.

[22] 刘城, 孙永站, 李军, 等. 履带式管道机器人的弯管通过性研究[J]. 机器人, 2025, 47(5): 657-667.

Liu Cheng, Sun Yongzhan, Li Jun, et al. Study on the bending pipe possibility of tracked pipeline robots[J]. Robot, 2025, 47(5): 657-667.

[23] Jang H, Kim Y T, Lee C Y, et al. Autonomous navigation of in-pipe inspection robot using contact sensor modules [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(6): 4665-4674.

作者简介



肖剑,2024 年于吉林化工大学获得学士学位,现为南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为管道巡检作业机器人。
E-mail:202412220518@nuist.edu.cn



Xiao Jian received his B.Sc. degree from Jilin University of Chemical Technology in 2024. He is currently a master's candidate at Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests include pipeline inspection robots.

宋爱国(通信作者),1990 年于南京航空航天大学获学士学位,1993 年于南京航空航天大学获硕士学位,1996 年于东南大学获博士学位,现为东南大学教授、博士生导师,主要研究方向为机器人感知与控制技术、特种巡检机器人、机器人力触觉传感器技术等。
E-mail:a.g.song@seu.edu.cn

Song Aiguo (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1990, his M.Sc. degree from the same university in 1993, and his Ph.D. degree from Southeast University in 1996. He is currently a professor and doctoral supervisor at Southeast University. His main research interests include robot perception and control technology, special inspection robots, and robotic force and tactile sensor technology.