

# 新型可变形串联管道检测机器人： 设计、建模及实验

张益鑫 苗忆南 易智恒 万文静 王兴坚 曾松 王少萍\*

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,北京,100191

**摘要:**面向油-气管道日常维护和检测的重大需求,提出了一种具有自适应变形能力的模块化管道检测机器人RoboChain-I。与多数轮式管道机器人不同,该机器人采用细胞启发的模块化仿生设计,具备更灵活的关节冗余转动自由度,可根据管道形状及管径变化主动变形。单体模块采用双轮独立驱动,前后各设置一对俯仰、偏航作动机构,模块间由可被动伸缩的弹簧阻尼支撑结构或可控电磁吸附分离的刚性结构连接,提高了机器人复杂管道通过能力和适应性。对机器人管道内运动受力进行建模,利用Adams实现其运动学仿真,对模型设计参数选择进行了验证。最终,RoboChain-I完成了地面、直管、弯管、变径管道及整机子母主动分离的通过实验,验证了机器人在175~440 mm管径范围内实现三维复杂管网检测作业的有效性和可靠性,最大运动速度达0.87 m/s(地面)与0.4 m/s(管内)。

**关键词:**管道检测;可变形机器人;冗余自由度;运动控制;模块化设计

**中图分类号:**TP242

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A Novel Deformable Serial Pipeline Inspection Robots: Design, Modeling and Experimentation

ZHANG Yixin MIAO Yinan YI Zhiheng WAN Wenjing WANG Xingjian

ZENG Song WANG Shaoping\*

School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing, 100191

**Abstract:** In response to the urgent demands for daily maintenance and inspection of oil and gas pipelines, a novel modular pipeline inspection robot named RoboChain-I, featuring adaptive deformation capabilities, was proposed herein. Unlike most wheel-based pipeline robots, the robot adopted a cell-inspired modular biomimetic design with more flexible joint redundant rotational degrees of freedom (DOF), allowing the robot to actively deform in response to pipelines with varying shapes and diameters. Each module was equipped with dual-wheel independent drive, and a pair of pitch and yaw actuation mechanisms were installed at the front and rear. The modules were connected by passive elastic damping support structures or controllable electromagnetic adhesion-separation rigid structures, which improved the robot's ability to navigate complex pipelines and adapt to various environments. The forces acting on the robots during their motions inside the pipeline were modeled, and kinematics simulations were conducted using Adams. The selection of design parameters for the model was validated accordingly. A comprehensive series of experiments were conducted to evaluate RoboChain-I's performance, including terrestrial locomotion, straight pipe traversal, elbow pipe navigation, diameter-varying pipeline adaptation, and active mother-child separation. Experimental results validate the robot's effectiveness and reliability in performing inspection tasks within complex three-dimensional pipeline networks with diameters ranging from 175~440 mm, demonstrating maximum velocities of 0.87 m/s on flat surfaces and 0.4 m/s within pipelines.

**Key words:** pipeline inspection; deformable robot; redundant degrees of freedom; motion control; modular design

### 0 引言

管道系统广泛应用于排水、供暖、石油和天然

气的长距离输送、农业灌溉以及众多工业设备的运作中,一旦发生管道故障,不仅会导致巨额经济损失,而且会影响日常生活,甚至造成人员伤亡<sup>[1]</sup>。管道事故的成因复杂多样,通常涉及管道材料的老化、腐蚀、裂纹以及第三方机械破坏等因素<sup>[2]</sup>。工业应用中以石油和天然气管道最为普

收稿日期:2024-06-13

基金项目:国家自然科学基金(52205299);中国博士后科学基金(2022M710304)

遍,尽管定期的维护和检修是降低事故发生风险的有效手段<sup>[3]</sup>,但并非所有管道都容易进行此类操作。一些管道由于深埋地下或架设在高处,加之内部可能充满液体或易燃气体,使得常规检修困难。利用特种机器人携带检测设备,沿着管道的内壁或外壁进行自动化检测,不仅提高了检修的效率和安全性,还减少了人工操作的风险,提供了一条解决此类管道检修问题的有效途径<sup>[4-5]</sup>。

为了满足不同的应用场景,行业内已研制出各种构型的管道检测机器人,包括蛇形、履带式、轮式等<sup>[6-8]</sup>。蛇形管道检测机器人<sup>[9-10]</sup>以其仿蛇形的串联多关节结构为特征,展现出卓越的灵活性与对复杂环境的适应性,但运动控制较为复杂。履带式管道检测机器人得益于履带本身的高通过性和稳定性,得到了较为广泛的应用,但不适用于存在高差的管道。面对管道攀爬任务的挑战,郭登辉等<sup>[11]</sup>研发的非接触变磁隙式机器人实现了对铁壁管道外的攀爬验证,并可通过磁吸附机构自动适应不同曲率的管道,但不适用于其他材质的管道。轮式管道检测机器人<sup>[12]</sup>一般结合管内支撑结构设计,具有较强的管道适应性,在管道攀爬上具有一定优势。KAKOGAWA等<sup>[13-14]</sup>研发的AI-Ro系列机器人是轮式机器人,在其前进后退功能基础上增加了绕轴向的旋转来增强机器人在三维管道中的适应能力,在变径管道中的运动能力稍弱。还有一些其他构型的机器人如轮足管道机器人<sup>[15]</sup>和蠕虫蜗杆式机器人<sup>[16]</sup>,虽然由仿生启发,具有较好的灵活性与攀爬能力,但是一般难以适应变管径管道。

综上所述,管道检测机器人的工作环境决定了运载工具本身需要具备以下能力:可在水平和垂直管道中运动;可通过不同角度的弯头;具有较长的续航能力以保证一定的作业距离;具有一定的带载能力,能够携带不同传感器,如摄像头或雷达等对环境进行探测。

现有管道检测机器人普遍面临两大技术瓶颈:一是变径管道适应性不足,二是复杂空间转向能力受限。本文针对上述问题,确定以下设计目标:①管径自适应范围不小于200 mm;②可通过90°弯管及不小于30°倾角管道;③支持多模块协同控制与动态重构。基于此,提出的模块化串联管道检测机器人RoboChain-I采用模块化设计,通过冗余自由度关节与可变刚度支撑结构实现上述目标。

在前述研究的基础上,本文系统开展了机器

人设计研制、建模及运动控制、运动学仿真分析与样机实验验证等工作,验证了RoboChain-I在管道内灵活运动和作业的可行性。

## 1 RoboChain-I的设计与研制

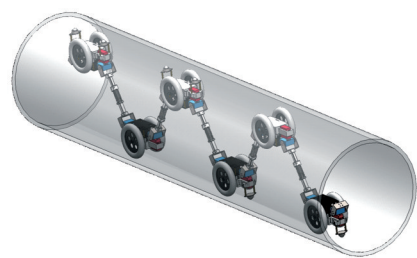
### 1.1 总体设计

为满足设计目标,机器人需具备以下关键特征:①变径适应能力。弹簧滑块支撑结构允许轴向伸缩(160~200 mm),覆盖目标管径范围。②复杂转向能力。前后俯仰/偏航舵机组合实现双模态转弯,最小转弯半径不大于150 mm。③动态重构能力。电磁连接机构支持模块主动分离,分离时间不大于1 s。

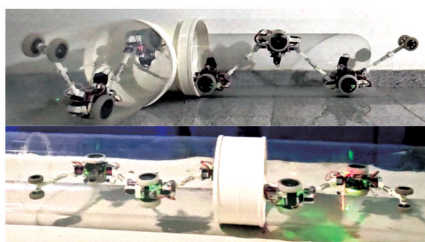
机器人系统采用模块化结构设计,灵感来源于细胞,整机类似于结构和功能相同的细胞联合形成的细胞群,单体模块相当于其中的单个细胞,既可以从主体细胞群分离,又可组合扩充细胞群规模。当其中一个模块发生故障时,可便捷地手动替换或自动脱离故障模块,从而确保整机功能不受影响。图1a所示是多模块组合RoboChain-I的3D设计模型。每个单体模块相当于单个细胞,具有一定的自主性,安装的主控和无线通信单元使得单体能够独立接收和处理数据。正如细胞群具有一定功能,而多个细胞形成的组织又具有细胞个体所不具有的功能。RoboChain-I中多个单体模块能够通过刚性结构、弹簧滑块支撑杆或可受控分离的电气物理结构实现物理连接,并结合模块间的电气连接和通信数据链路进行协同控制,共同执行任务。机器人单体设计有两轮差速底盘,并且安装有辅助支撑和滑动用的牛眼轮,每个单体可以实现独立的双轮地面运动。底盘前后两端各有一组2自由度转动结构,分别控制俯仰和偏航。电子系统集成于底盘上,整体结构高度小于轮径,保证车身后距离短且结构紧凑简洁,较大的接近角和离去角使得其运动灵活性较高。图1b所示是不同运动状态下的RoboChain-I机器人物理样机,能在多种环境与管道中作业。图中上半部分展现了它在水平L形管道内的转弯操作,下半部分则体现了机器人以倾角为0°的水平姿势在水平管道行进的情景。

### 1.2 机械结构

将单体机器人投影到管道截面上,并将机器人的投影用长方形来简化,管道的截面为圆环,如图2a所示的简单几何模型描述了RoboChain-I运动截面, $a$ 为两个车轮外侧的距离, $b$ 为车轮直



(a) RoboChain-I的3D设计模型



(b) 运行状态下的机器人物理样机

图1 RoboChain-I的3D设计模型及样机实物

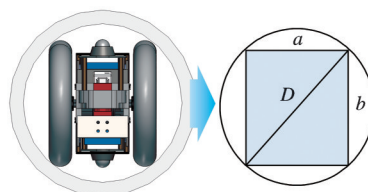
Fig.1 3D design model and prototype of the RoboChain-I

径,  $D$  为管道内径。为提高机器人的带载能力, 应增大机器人承载平台的宽度与高度, 两轮间距需尽可能大, 故机器人车轮选择大而窄的形状。为了增大机器人与管道的摩擦力, 车轮摩擦因数需要尽可能大。预期运行最小管道直径为 175 mm, 基于几何约束分析, 确定关键参数: 车轮直径 104 mm, 两轮外侧最大距离为  $a = \sqrt{(D^2 - b^2)} = 140.7$  mm。

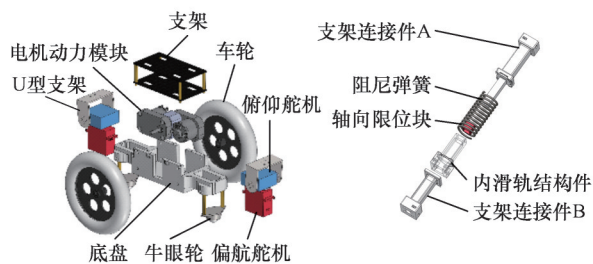
由于单体模块左右 2 自由度可动关节自身结构尺寸的限制, 无法设计在行走轮的转动轴上, 而位置距离偏差也会在其管内运动过程中产生单体机身倾覆力矩。为了保证机器人单体不会前后倾斜, 在单体前后云台关节下各增加了一个牛眼辅助轮, 根据不同数量单体模块组成系统的需求以及力在整机结构上的作用情况, 实际上仅在局部增加个别辅助轮即可解决问题。

图 2b 为机器人车体和支撑连接结构的 3D 结构爆炸视图。机器人单体按照功能分为 5 个部分: 底盘结构、电机动力单元、前俯仰及偏航转动关节、后俯仰及偏航转动关节以及电气控制单元。机器人单体采用双轮独立电机驱动。为了使机器人结构紧凑, 整套动力单元结构的纵向和横向尺寸较小, 选择较窄的 L 型减速电机 (DCGM-3865-12V-EN-240RPM), 电机自带编码器。使用 3D 打印立方体结构配合螺栓连接两个电机。根据双电机尺寸设计单体的底盘结构, 双电机安装在底盘的中部, 电机输出轴安装有胎宽 25 mm

的硅胶轮。主控板和电机驱动模块组成的电气控制单元直接固定在底盘连接的碳纤维板负载结构上。电池使用扎带固定在底盘下方。



(a) 机器人单体模块的简化几何模型



(b) 机器人车体和支撑连接结构的3D结构爆炸视图

图2 机器人单体模块的简化几何模型及结构爆炸视图

Fig.2 Simplified geometric model and 3D structural explosion view of the robot single module

单体前后安装有 2 只大扭矩双轴数字舵机组成的 2 自由度转动关节, 包括俯仰伺服舵机 (RDS3225, 扭矩为  $28.0 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ )、偏航伺服舵机 (DS3225, 扭矩为  $24.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ ), 采用 6.5 V 高电压供电, 最快转动速度达  $0.14 \text{ s}/60^\circ$ 。偏航舵机的舵盘与俯仰舵机支架连接, 俯仰舵机通过 U 形支架与连接支撑连接件底部相连。机器人单体间的支撑连接结构可选择刚性结构、弹簧滑块支撑结构或可受控分离的电气物理结构, 为了提高机器人变管径的运动能力, 本文选择单体间弹簧滑块支撑形式, 主要包括 U 形支架连接件 A 和 B、内滑轨结构件、阻尼弹簧以及轴向限位块。A、B 连接件分别与安装在底盘上的两个俯仰舵机相连。支撑连接结构中相互嵌套的滑动结构截面设计为正方形, 并具有轴向限位块, 从而限制两者绕轴的扭转运动。滑杆外套有阻尼弹簧 (弹簧不受力状态下的长度为 70 mm, 线径为 2.0 mm), 可确保 440 mm 管径下的稳定接触力 ( $\geq 20 \text{ N}$ )。弹簧两端由 A、B 连接件上的限位结构固定, 从而保证支撑结构仅存在轴向的有限的伸缩运动。在后续实验中还选择了可主动分离的电气物理结构以验证子母机器人根据工况完成受控分离协同工作的能力。

机器人对变径管道具有较强的通过能力, 可通过的最小管径由车轮直径和两轮外侧间的距离限定。可通过的最大管径与模块自身高度以及模块之间连接支撑杆长度有关。根据目标管径尺寸

范围即可确定机器人结构的物理参数值。

### 1.3 电控系统

RoboChain- I 单体的电控系统框图见图 3。主控芯片为 STM32F103, 是 ARM Cortex-M4 内核, 控制多路电机和舵机, 可获取多路数字或模拟信号数据, 包括姿态传感器、编码器等测量信息。前后俯仰及偏航转动关节均构成 2 自由度云台结构, 和左右相邻单体连接的弹簧滑块支撑结构分别称为左臂和右臂。每台机器人由一块 3 S 的 1300 mA·h 锂电池提供 12 V 直流电压并直接给电机供电。独立的降压模块将 12 V 直流电压降为 6.5 V 给四路舵机供电; 电机驱动内置降压模块, 将 12 V 直流电压降为 5 V 给主控单片机供电。

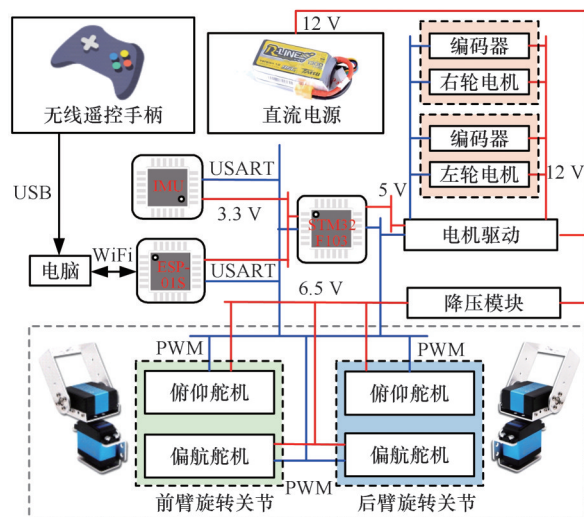


图 3 RoboChain- I 单体模块电控系统

Fig.3 Electronic control system of a single module of RoboChain- I

根据实际的管道检测需求, 提供两种控制模式: 板载控制器主导的机器人自主探测模式和使用遥控手柄控制的 operators 操作模式。地面站 PC 作为上位机监测和控制机器人。由于每个单体模块都携带独立控制器, 所以该机器人与 PC 上位机的关系是多个数据来源与一个数据中心, 常用的蓝牙通信不适用于该场景。使用 TCP 网络通信方式, 在 PC 搭建服务器, 机器人外接 ESP-01S WiFi 模块作为客户端, 接入服务器。

机器人的运动可概括为 4 种基本运动模式, 包括直行(前进后退)、竖直转向、水平转向和变形。将这 4 种运动形式封装为函数模块, 借鉴工作流的思想编写。根据建模部分基本运动形式的运动学分析, 竖直转向和水平转向的整个过程被分为工作流的不同阶段, 每个阶段对舵机和电机进行相应的控制。在工作流的不同阶段为舵机和电机设定目标值, 舵机和电机的直接控制在定时

器中断进行。定时器中断中, 对电机使用 PID 反馈控制算法, 控制电机转速; 对舵机使用插值的方法, 控制舵机转速。

自主探测模式下, 操作员根据实际情况为机器人选择运动形式, 机器人根据操作员的指令调用相应函数, 实现运动。遥控模式下, 操作员通过手柄直接控制机器人的电机和舵机来控制机器人作业。手柄的控制指令由 PC 上位机通过无线模块发送给机器人。同时, 操作员也可通过上位机程序查询机器人的状态, 如行进速度、舵机角度等。

## 2 机器人模型及运动控制分析

RoboChain- I 设计的目标主要是实现水平和竖直方向复杂管道内的攀爬, 以直管和 L 形管作为机器人建模分析的环境。机器人由多个单体模块组成, 单体组合数量可根据任务需要增加或减少。考虑到机器人能在管道中稳定运行, 整机最少由 3 个单体构成<sup>[17]</sup>。每个机器人单体配备一个姿态传感器(JY60, WiT-MOTION)。姿态传感器用于转向时确定机器人位姿。

### 2.1 系统简化模型

建立笛卡儿坐标系  $oxyz$  为地面坐标, 满足右手定则,  $z$  轴竖直向上,  $oxy$  平面为水平面。对机器人模型进行简化, 并在  $oxy$  平面投影, 对单体间连接支撑结构做出规定, 如图 4a 所示, 沿与机器人排列方向平行的坐标轴的正方向(图中  $y$  轴正方向), 机器人单体两臂依次称为左臂和右臂。

机器人之间通过左右连接臂与弹簧连接, 图 4a 为机器人在水平管道行进的俯视图。左右臂与阻尼弹簧构成可被动伸缩的连杆机构, 为每个单体提供与管壁接触的预紧力, 每根连杆的长度为  $L_i$ 。单体两端的 2 自由度云台可进行俯仰和偏航转动, 以改变连杆与机体间的相对姿态, 从而实现 RoboChain- I 的转向及变形。

### 2.2 管道内运动分析

为验证设计目标①(管径适应性), 确定支撑弹簧压缩量与管径的关系。RoboChain- I 能够以任意倾角在管道内运动, 这里以倾角为  $0^\circ$  的水平姿势(整体平行于地面)为例阐明在管内运动的情况, 这种运行方式可以使机器人避免接触沉积在管道底部的灰尘和污染物。机器人在  $oxy$  平面中的简化模型如图 4b 所示。

一个机器人由多个机器人单体组成, 机器人的可活动变量分别为  $S_i$ 、 $\varphi_{il}$  和  $\varphi_{ir}$ 。  $L_P$  表示单体机器人的左右臂连接点之间的距离。两单体机器人

之间的连接杆为可伸缩弹簧滑块支撑结构,原长记为 $L_0$ ,在压力作用下压缩,实际长度 $L_i$ 可表示为

$$L_i = L_0 - S_i (0 \leq S_i \leq S_{\max}) \quad (1)$$

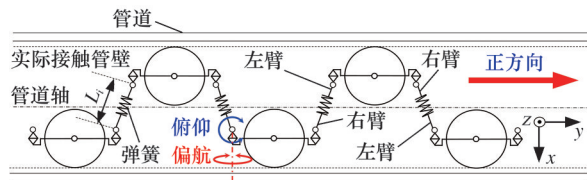
式中: $S_i$ 为实际压缩量; $S_{\max}$ 为最大可压缩长度; $\varphi_{il}$ 和 $\varphi_{ir}$ (规定正方向为逆时针方向, $0^\circ \leq \varphi_{il} \leq 90^\circ$ , $0^\circ \leq \varphi_{ir} \leq 90^\circ$ )分别为左连接臂和右连接臂与单体机器人平台的夹角。

$P_i$ 为每个单体机器人的位置向量:

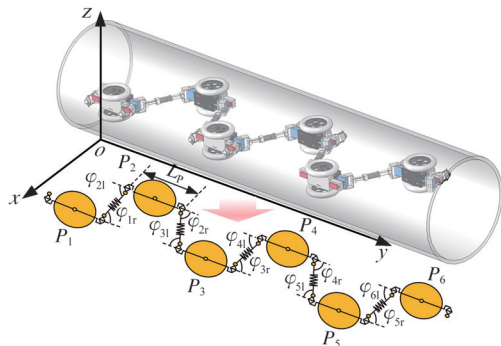
$$P_i = (x_i, y_i)^T \quad (2)$$

如图4c所示,管道内机器人受到约束。 $R_{in}$ 、 $W_c$ 、 $R_w$ 、 $H_w$ 和 $h$ 分别为管道内半径、一对驱动轮之间的宽度、驱动轮半径、驱动轮可移动空间、驱动轮不可进入空间<sup>[18]</sup>。从几何关系来看, $H_w$ 和 $h$ 可由下式得出:

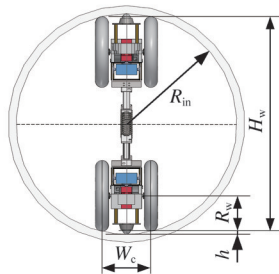
$$\left. \begin{aligned} H_w &= 2 \sqrt{R_{in}^2 - \left(\frac{W_c}{2}\right)^2} \\ h &= R_{in} - \frac{H_w}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



(a) RoboChain-I在参考坐标系中的运动模型



(b) 机器人运行在水平管道的俯视图



(c) 包含机器人的管道横截面

图4 机器人在坐标系中的运动模型及相关参数定义

Fig.4 Motion model diagram and related parameter definitions of the robot in coordinate frame

### 2.3 通过弯管时的运动学模型

针对设计目标②(弯管通过性),提出五阶段转向策略。如图5所示,L形管道包含一段方向

变化为 $90^\circ$ 的弯管,由管道内半径为 $R_{in}$ 的管道沿 $1/4$ 圆弧扫描形成,该圆弧几何半径为 $R_b$ ,圆心为 $P$ 。管道实线部分为真实管壁,虚线部分为驱动轮实际接触管壁。

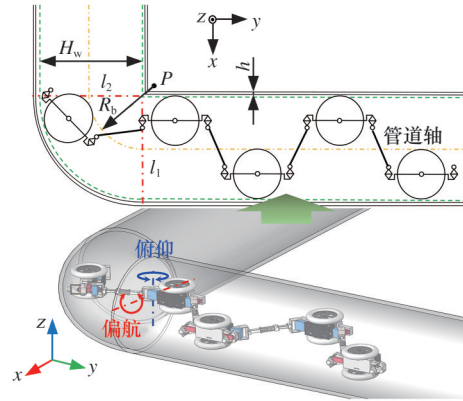


图5 RoboChain-I在L形管道中的转弯运动

Fig.5 Turning motion of RoboChain-I in L-shaped pipe

以5个单体组成的多体机器人为例,将机器人在 $90^\circ$ 弯曲管道中通过俯仰舵机转向的过程分为5个阶段(阶段1~5)。当机器人在管径不发生改变直管中前进时,令 $\varphi_{il}$ 和 $\varphi_{ir}$ ( $i=1,2,3,\dots$ )为常值且相等,该常值记为 $\varphi_c$ ,则由几何约束关系, $L_i$ ( $i=1,2,3,\dots$ )也为常值,记为

$$L_c = \frac{H_w - 2R_w}{\sin \varphi_c} \quad (4)$$

1)阶段1(1号机器人完成转向)。当 $P_1$ 中心与直线 $l_1$ 重合时,开始转向。此过程中仅改变 $\varphi_{21}$ 。 $P_2$ 的俯仰舵机顺时针转动,同时 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 匀速向前。 $P_2$ 中心与直线 $l_1$ 重合时,阶段1结束。设 $\Delta t_1$ 为1号机器人单体完成转向所用的时间, $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 在该阶段匀速直线运动速率为 $v_1$ 。转向过程需要满足以下条件:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi}_{21} \Delta t_1 &= -\frac{\pi}{2} \\ v_1 &= -\frac{L_p + L_c \cos \varphi_c}{\Delta t_1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2)阶段2(2号机器人完成转向)。当 $P_2$ 中心与直线 $l_1$ 重合时,开始转向。此过程仅改变 $\varphi_{21}$ 与 $\varphi_{2r}$ 。 $P_2$ 左右连接臂的俯仰舵机逆时针以相同速率转动,使 $P_2$ 旋转, $P_2$ 中心做绕 $l_1$ 和 $l_2$ 交点的圆周运动。同时驱动 $P_1$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 向前做直线运动。当 $P_2$ 中心与直线 $l_2$ 重合时,阶段2结束。设 $\Delta t_2$ 为2号机器人单体完成转向所用的时间, $P_1$ 向前运动的速率为 $v_{2p_1}$ , $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 向前匀速直线运动速率为 $v_2$ , $P_1$ 在阶段1时的 $x$ 坐标为 $x_{11}$ ,在阶段2时的 $x$ 坐标为 $x_{21}$ 。转向过程中存在以下关系:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi}_{21}\Delta t_2 = \dot{\varphi}_{2r}\Delta t_2 = \frac{\pi}{2} \quad v_2\Delta t_2 = R_w \\ x_{21} - x_{11} = R_w + \frac{L_p}{2} + (L_c - L_1)\cos\varphi_c = -v_{2p_1}\Delta t_2 \\ L_1 = \frac{H_w - R_w - \frac{L_p}{2}}{\sin\varphi_c} \end{aligned} \right\} (6)$$

3)阶段3(3号机器人完成转向)。P<sub>2</sub>中心与l<sub>2</sub>重合时开始转向,仅改变φ<sub>21</sub>与φ<sub>2r</sub>,P<sub>2</sub>右连接臂俯仰舵机和P<sub>4</sub>左连接臂俯仰舵机同向以相同速率顺时针转动,同时驱动P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>、P<sub>4</sub>、P<sub>5</sub>继续做直线运动,当P<sub>4</sub>中心与l<sub>1</sub>重合时,阶段3结束。设Δt<sub>3</sub>为3号机器人单体完成转向所用的时间,P<sub>1</sub>和P<sub>2</sub>的运动速率为v<sub>3p<sub>12</sub></sub>,P<sub>4</sub>和P<sub>5</sub>向前匀速直线运动速率为v<sub>3p<sub>45</sub></sub>,P<sub>2</sub>在阶段2时的x坐标为x<sub>22</sub>,在阶段3时的x坐标为x<sub>32</sub>,P<sub>4</sub>在阶段2时的y坐标为y<sub>24</sub>、在阶段3时的y坐标为y<sub>34</sub>。转向过程中存在以下关系:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi}_{2r}\Delta t_3 = -\frac{\pi}{2} \quad \dot{\varphi}_{2r} = \dot{\varphi}_{4l} \quad v_{3p_{45}} = \frac{y_{24} - y_{34}}{\Delta t_3} \\ y_{24} - y_{34} = -\frac{\frac{3}{2}L_p + L_2\sin(\frac{\pi}{2} - \varphi_c) + L_c\cos\varphi_c - R_w}{\Delta t_3} \\ v_{3p_{12}} = \frac{x_{32} - x_{22}}{\Delta t_3} = -\frac{\frac{3}{2}L_p + (L_c + L_3)\cos\varphi_c - R_w}{\Delta t_3} \\ L_2 = L_3 = \frac{H_w - R_w - \frac{L_p}{2}}{\sin\varphi_c} \end{aligned} \right\} (7)$$

4)阶段4(4号机器人完成转向)。该阶段的运动控制与阶段2相同。

5)阶段5(5号机器人完成转向)。该阶段的运动为阶段1的逆运动,仅改变φ<sub>4r</sub>,同时驱动P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub>向前水平运动,当P<sub>5</sub>中心与l<sub>2</sub>重合时结束转向。机器人通过对电机速度与俯仰舵机角度的控制通过L形管道。

## 2.4 管内受力分析

为了进一步了解RoboChain-I的力学特性,对RoboChain-I的机械结构进行简化,并分析RoboChain-I在平面内被水平放置时管道对各个单体所施加的力,如图6所示。

列写机器人在水平管道内的静力学方程。考

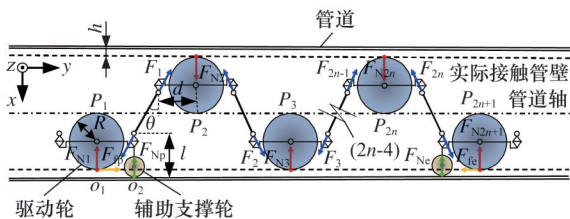


图6 RoboChain-I的静力学分析  
Fig.6 Static Analysis of RoboChain-I

虑第1,2,⋯,2n+1个模块处于水平状态,列举2n+1个单体模块组成的机器人的综合受力情况。本文仅在头尾两端的单体模块中各使用了一个内侧的牛眼辅助轮,实际样机管内运动和嵌位的实验中,在两端安装的这2个牛眼辅助轮足够提供整体所需的除去行走轮本身产生的支撑力。

需要说明的是,首尾两个模块只有一根弹簧连杆作用,即只受到一侧的压力。以P<sub>1</sub>为例,由于支点O<sub>1</sub>位于动力轮与管壁相交处,单侧压力F<sub>1</sub>会对P<sub>1</sub>产生一个旋转力矩,使单体发生俯仰变化。为了消除力矩对模块姿态的影响,在偏航舵机下方安装一个辅助支撑轮。这样支点将转移至辅助轮与管壁切点O<sub>2</sub>处,抵消原旋转力矩的影响。

管壁对每个单体的驱动轮的支持力的x方向分量为F<sub>Ni</sub>(i=1,2,⋯,2n+1);弹力杆对相邻两个单体的压力为F<sub>i</sub>(i=1,2,⋯,2n),为每个单体提供与管壁接触的预紧力从而提供摩擦力;管壁对首尾模块辅助轮的支持力为F<sub>Np</sub>和F<sub>Nc</sub>;由于辅助轮与管壁摩擦力较小,这里只考虑管壁对首尾单体驱动轮的摩擦力,即F<sub>fp</sub>和F<sub>fe</sub>。设单个模块主体框架长度为2d,俯仰舵机旋转轴到管壁距离为l,弹性连接杆与x轴夹角为θ,驱动轮实际接触管壁与辅助轮接触管壁的位置距离为h。

根据力的平衡原理,F<sub>i</sub>(i=1,2,⋯,2n)彼此相等,不妨设其大小为F,可得到以下力学关系:

$$\left. \begin{aligned} F_1 = F_2 = \dots = F_{2n} = F \\ F_{N2} = F_{N3} = \dots = F_{N2n} = 2F\cos\theta \\ F_{fp} = F_{fe} = F\sin\theta \\ F_{N1} = F_{N2n+1} = \frac{F(l-h)}{d}\sin\theta \\ F_{Np} = F_{Nc} = F\cos\theta - \frac{F(l-h)}{d}\sin\theta \end{aligned} \right\} (8)$$

RoboChain-I每个机器人模组具有冗余的水平 and 垂直方向转动自由度,结合各模组双轮转速反馈控制完成整机构型的变化,探究了较复杂管道结构内的全新运动策略,具有特别并优于其他同类轮式机器人的转向方式:相较于SAWABE等<sup>[18]</sup>设计的轮式机器人,本文机器人垂直L形管的转向方式与其水平L形管的转向方式类似,但本文机器人的水平L形管转向方式与其垂直方向的转向方式有明显区别与优势:RoboChain-I利用拓展的解析几何关系控制机器人,对舵机和轮速进行精确的伺服控制,整机结构灵活可变。

## 3 运动学仿真与实验验证

### 3.1 管道内运动仿真模型

在Adams中构建由6个机器人单体组合而成

的RoboChain- I。通过将接触力、物理模型和预设的运动参数等加载到仿真模型中进行RoboChain- I的动力学仿真。

在仿真模型中,对6个机器人单体沿y轴正方向依次编号,每个机器人单体都包含2个运动轮(图7中绿色部分),1个主体框架(图7中浅蓝色部分),1个2自由度云台(图7中红色部分),1个弹簧连杆A(图7中深蓝色部分),和1个弹簧连杆B(图7中黄色部分)。仿真过程中2自由度云台不发生俯仰和偏航转动。

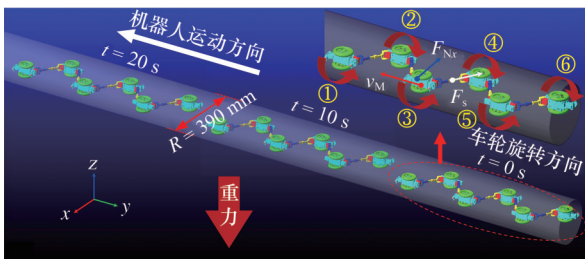


图7 RoboChain- I 运行在水平直管道中的仿真模型

Fig.7 Simulation of RoboChain- I driving in horizontal straight pipe

图7中RoboChain- I以平躺姿态水平放置在内径为390 mm的管道中,重力方向沿z轴负方向朝下。分析主体框架运动速度 $v_{Mn}$ ( $n=1, 2, \dots, 6$ )、弹簧连杆压力 $F_{Sn}$ ( $n=1, 2, \dots, 5$ )、管壁对驱动轮支持力的x方向分量 $F_{Nxn}$ ( $n=1, 2, \dots, 6$ )等仿真参数。RoboChain- I由静止开始沿y轴负方向运动,设置仿真时间为20 s,仿真步长为2000,使RoboChain- I爬过一根长4 m的管道。

### 3.2 管道内运动仿真结果

在水平管道中,RoboChain- I沿着直线路径运动,因此,差速电机为所有6个单体提供相等的速度,相当于机器人的平均速度 $v_r$ 。如图8a所示,在水平管道仿真中观察到的单体速度为 $v_{Mn}$ ( $n=1, 2, \dots, 6$ )= $v_r=0.116$  m/s。RoboChain- I 20 s内沿y轴负方向的位移为2.32 m。

根据力学分析可知,单体间的弹簧连杆的压力应当相同,即 $F_{S1}=F_{S2}=F_{S3}=F_{S4}=F_{S5}$ 。如图8b所示,在水平管道模拟中观察到的五根弹簧连杆压力分别为 $F_{S2}=F_{S4}=98.78$  N, $F_{S1}=F_{S3}=F_{S5}=96.25$  N,与预期出现了微小差异。

经过分析发现,单体行进过程中在 $oxy$ 平面会发生微小倾斜,也就是主体框架不再平行于管壁,导致单体左右弹簧连杆的压缩量不一致,使弹簧连杆的压力出现差异。在下一步研究中将探究主体框架倾斜对RoboChain- I性能的影响。

RoboChain- I 仿真模型中单体的俯仰舵机旋转轴到驱动轮最低点距离为 $g=l-h=72$  mm,弹性连杆与x轴夹角为 $\theta=53^\circ$ ,单个模块主体框架长度为 $2d=243.6$  mm。根据式(8),1号单体与6号单体驱动轮受到管壁的正压力沿x方向的分量相同, $F_{Nx1}=F_{Nx6}=45.43$  N;而2、3、4、5号单体驱动轮所受管壁的正压力沿x方向的分量相同, $F_{Nx2}=F_{Nx3}=F_{Nx4}=F_{Nx5}=116.75$  N。

如图8c所示,在水平管道模拟中观察到的1号、6号单体驱动轮所受管壁正压力的x轴分量为 $F_{Nx1}=46.58$  N和 $F_{Nx6}=38.76$  N,与理论分析结果存在差异。经分析发现,原因同样为行进时主体框架发生倾斜导致驱动轮与管壁贴合度减小,从而引起6号单体驱动轮所受管壁正压力的x轴分量减小。2、3、4、5号单体驱动轮所受管壁正压力的x轴分量为 $F_{Nx2}=F_{Nx3}=F_{Nx4}=F_{Nx5}=117.35$  N,基本符合理论分析结果。

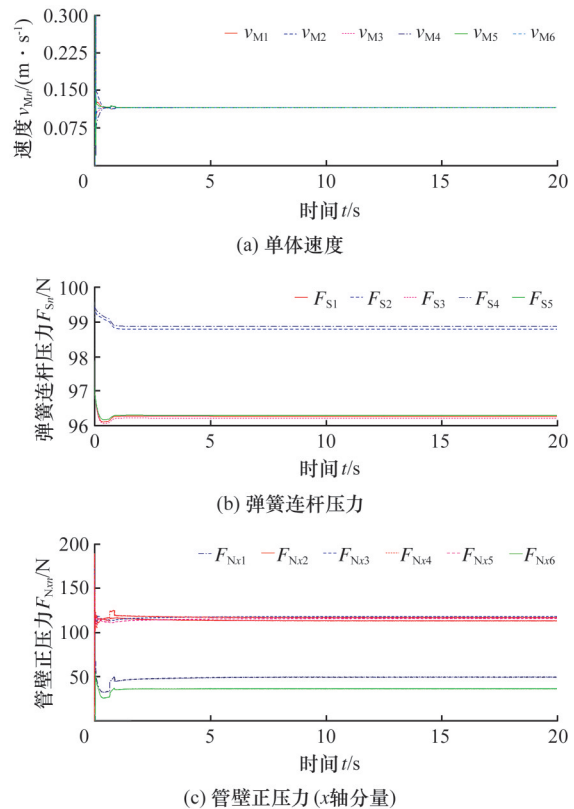


图8 机器人管内运动仿真结果曲线

Fig.8 Simulation results of robot motion in pipe

### 3.3 地面运动实验验证

RoboChain- I的设计可行性验证实验主要包括2个场景,分别为地面上和管道内。分别选择沥青混凝土地面和管径390 mm的亚克力透明直管作为测试环境。在机器人单体轮心连接支撑结构两端分别贴有标记点,架设固定视角摄像头采集机器人地面运动视频,通过图像处理方

究机器人运动学特性。

实际测试中,由于偏航舵机的扭矩及连接结构刚度稍显不足,机器人整体刚度与理论假设有一定偏差。机器人水平放置时,由于重力作用,边缘的两个单体存在起始偏航角,边缘两个单体机器人只有一个车轮与管壁接触,不能提供足够的摩擦力,无法在管道中行进。因此仅设计机器人在管道中以竖直姿态运行的实验,后续将改进结构使 RoboChain- I 能实现在管道中以水平放置姿态行进。

沥青混凝土地面上 RoboChain- I 的直线运动实验见图 9。结果表明,RoboChain- I 的模块化结构可以实现地面的基本直线运动,有一定的地形适应能力。分析固定单摄像头拍摄的多组机器人地面运动的视频,5个单体模块组合而成的 RoboChain- I 在地面直线运动速度最快可达 0.87 m/s。

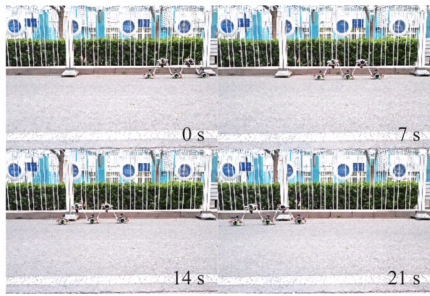


图 9 地面运动的实验验证

Fig.9 Experimental validation of motion on the ground

### 3.4 管道内运动实验验证

RoboChain- I 在管道中运行的第一个实验见图 10,即 RoboChain- I 以竖直姿态在长 2 m、内径 390 mm 的水平亚克力透明管道中实现管道自适应变形功能,再行进 1 m 后自行驶出管道的过程。如实验结果所示,RoboChain- I 在水平管道内作业时,面对机器人与管道管径不匹配的情形,可以通过多个单体协同配合改变机体与连杆之间的相对姿态实现变形,从而适应不同管径的管道,保证其面对不同管径的管道都能正常运动,具备良好的适应能力。第二个实验见图 11,RoboChain- I 以竖直姿态进入与地面夹角为 30°、长 2 m、内径 390 mm 的透明亚克力直管,爬行到管道尽头后停止,展示了它在倾斜管道内的通过能力。

结合图 12 对图 11 所示的实验进行详细分析。图 12 所示曲线详细展示了机器人由水平管道进入倾角为 30°的倾斜管道内的运动状况,每三个单体构成一个单元,曲线描述了每个单元在运

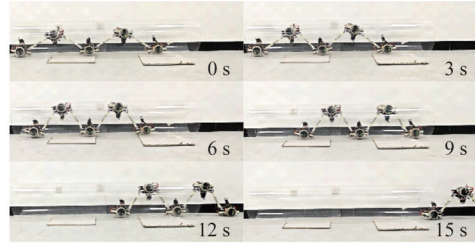


图 10 水平管道内运动的实验验证

Fig.10 Experimental validation of motion in horizontal pipe

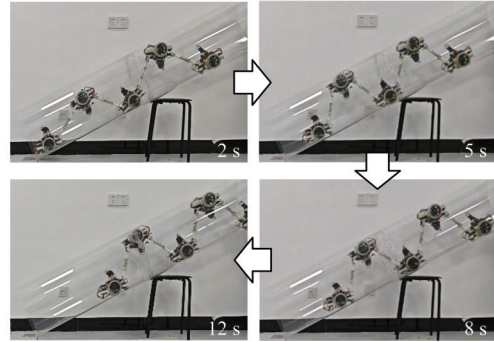
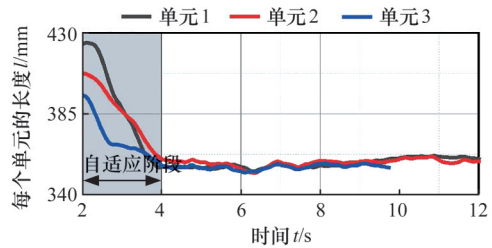
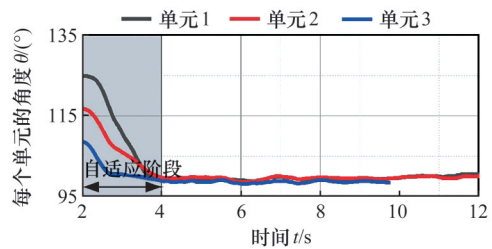


图 11 倾角为 30°的倾斜管道内运动的实验验证

Fig.11 Experimental validation of motion in inclined pipe with an inclination angle of 30°



(a) 各单元长度变化曲线图



(b) 各单元角度变化曲线图

图 12 倾角为 30°的倾斜管道内运动的实验结果曲线  
Fig.12 Experimental results of motion in inclined pipe with an inclination angle of 30°

动过程中长度与夹角的变化情况。实验结果表明,RoboChain- I 能够迅速适应管道弯折和管径变化作出相应的构型调整,同时具备在三维管道中稳定作业的能力。其驱动电机输出力矩及速度控制精度满足样机设计要求,轮子的摩擦力满足管内作业需求,俯仰及偏航舵机的力矩能够支撑相邻结构的质量,甚至实现悬空支撑,并保持机器人设定的形态。机器人可自主调整构型以适应变

径管道( $\Delta D=265\text{ mm}\geq 200\text{ mm}$ ),并在 $30^\circ$ 倾角管道中保持 $0.25\text{ m/s}$ 的稳定速度,验证了设计目标①和②。

除此之外,RoboChain- I 在管道内运行过程中完成了类似“细胞群分离”的机器人最小运动作业单元受控分离主机体的功能验证,如图13所示。实验证明机器人可以在短短的1s内(约0.8s)完成前后2段结构的分离,分离后的2个子机器人可以分别通过与基站构建的无线链路继续在管道内进行可控的运动,仍可独立执行检测任务,支撑力波动小于10%,满足设计目标③。如此可大大提高该新型模块化机器人的避障和多任务作业能力。

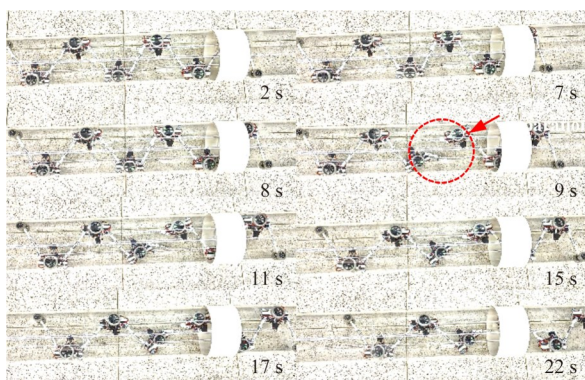


图13 机器人最小运动单元受控分离实验验证  
Fig.13 Experimental validation of controlled separation of robot's minimal motion unit

最终,本文提出的新型串联管道检测机器人在管道攀爬等应用场景的结构可行性和运动能力得以验证。实验数据显示,机器人通过弯管的最大转向角速度 $0.3\text{ rad/s}$ ,验证了双模态控制的有效性。当前RoboChain- I 样机实物的具体运动性能参数测量结果见表1。

表1 RoboChain- I 样机实际运动性能参数  
Tab.1 Motion performance parameters of the RoboChain- I

参数	数值
可检测管径范围/mm	175~440
地表最大运动速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.87
管内最大运动速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.4
最大转弯速度/( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.3
弹簧杆可承受外力范围/N	20~120
弹簧杆长度变化范围/mm	160~200
操作电压/V	12

## 4 结论

本文研制了一种具有较高自由度的新型模块化可变形串联管道检测机器人,对其在管道内运

动的动力学特性进行了分析,并通过系列实验验证了其在平地 and 管道内的基本运动能力。机器人平地运动速度最高可达 $0.87\text{ m/s}$ ,可实现空间变结构。机器人在水平管道内最高运动速度可达 $0.4\text{ m/s}$ ,自适应管径范围为 $175\sim 440\text{ mm}$ 。文中机器人具有以下优势:

1)整机设计为主被动可变形的风琴机构,这种弹簧滑块支撑结构及多自由度单体关节的应用使RoboChain- I 具备自适应变径和复杂空间形状管道的能力。无需进行物理结构更改,即可自行适应内径在较大范围内变化的管道,将适应管径大小变化提高至 $265\text{ mm}$ 。只需更换保证刚度的更长弹簧支撑结构即可实现对更大内径管道的探索。

2)机器人的每个单体模块设计了前后两组具有俯仰、偏航冗余自由度的旋转关节和独立电控系统,可实现高鲁棒双模态变形转弯。配合单体双电机独立驱动轮,同时采用双模态转向控制策略,机器人复杂弯管通过成功率较传统轮式机器人有所提高,能更好地通过复杂空间形状的管道。

3)提出模块动态重构机制,为多任务协同检测提供新范式。采用可主动连接分离的电气物理接口,结合单体模块间无线通信链路,可根据作业需求和工况调整模块串联的总数或实现子母机器人受控分离。

下一步我们将聚焦于RoboChain- I 轻量化设计与能源优化,增加视觉、红外和超声波等环境感知模组,进一步拓展机器人在三维复杂管网中的应用。提高系统的集成度和机器人的带载能力,优化系统能源管理进而提高续航时间,进行三维空间内复杂弯管的通过实验,优化模块间机械和电磁连接分离接口,保证用户可以根据任务需要更为便捷地选择组成机器人的模组数量,进而得到更为合适的整机物理尺寸。

## 参考文献:

- [1] 胡灯明, 骆晖. 国内外天然气管道事故分析[J]. 石油工业技术监督, 2009, 25(9):8-12.  
HU Dengming, LUO Hui. The Analysis of Accidents on Foreign and Domestic Natural Gas Pipelines [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2009, 25(9):8-12.
- [2] 赵汉青. 我国油气管道的事故成因及环境预防措施[J]. 油气储运, 2015, 34(4):368-372.  
ZHAO Hanqing. Causes of Oil and Gas Pipeline In-

- cidents in China and Environmental Precautions[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(4):368-372.
- [3] SALAZAR-BANÓ A G, CHAS-AMIL M L, RUZO-SANMARTÍN E, et al. The Key Role of Risk Perception in Preparedness for Oil Pipeline Accidents in Urban Areas; a Sequential Mediation Analysis[J]. The Extractive Industries and Society, 2024, 17:101398.
- [4] DEBENEST P, GUARNIERI M, HIROSE S. PipeTron Series—Robots for Pipe Inspection[C]//Proceedings of the 2014 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Foz do Iguassu, 2014:1-6.
- [5] VERMA A, KAIWART A, DUBEY N D, et al. A Review on Various Types of In-pipe Inspection Robot[J]. Materials Today:Proceedings, 2022, 50:1425-1434.
- [6] SHAO Lei, WANG Yi, GUO Baozhu, et al. A Review over State of the Art of In-pipe Robot[C]//2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Beijing, 2015:2180-2185.
- [7] TANG Chao, DU Boyuan, JIANG Songwen, et al. A Pipeline Inspection Robot for Navigating Tubular Environments in the Sub-centimeter Scale[J]. Science Robotics, 2022, 7(66):eabm8597.
- [8] ISMAIL I N, ANUAR A, SAHARI K S M, et al. Development of In-pipe Inspection Robot; a Review [C]//2012 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT). Kuala Lumpur, 2012:310-315.
- [9] TANAKA M, TANAKA K. Control of a Snake Robot for Ascending and Descending Steps [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(2):511-520.
- [10] KIM H M, CHOI Y S, LEE Y G, et al. Novel Mechanism for In-pipe Robot Based on a Multiaxial Differential Gear Mechanism [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(1):227-235.
- [11] 郭登辉, 陈原. 管道攀爬机器人非接触变磁隙式永磁吸附机构的设计与吸附性能优化[J]. 中国机械工程, 2021, 32(14):1659-1668.
- GUO Denghui, CHEN Yuan. Design and Adsorption Performance Optimization of Non-contact Variable Magnetic Gap Type Permanent Magnet Absorption Mechanisms of Pipe Climbing Robots[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(14):1659-1668.
- [12] 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.
- [13] KAKOGAWA A, MA Shugen. Design of a Multilink-articulated Wheeled Pipeline Inspection Robot Using Only Passive Elastic Joints [J]. Advanced Robotics, 2018, 32(1):37-50.
- [14] KAKOGAWA A, MA Shugen. A Multi-link In-pipe Inspection Robot Composed of Active and Passive Compliant Joints[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas, 2020:6472-6478.
- [15] LIU Yahong, SUN Yi, CAO Kai, et al. Wheel-legged In-pipe Robot with a Bioinspired Hook and Dry Adhesive Attachment Device[J]. Journal of Bionic Engineering, 2024, 21(3):1208-1222.
- [16] FANG Delei, JIA Guofeng, WU Junran, et al. A Novel Worm-like In-pipe Robot with the Rigid and Soft Structure [J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(6):2559-2569.
- [17] ZHANG Yixin, CHEN Hanli, WANG Lu, et al. Design of a Novel Modular Serial Pipeline Inspection Robot[C]//2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Harbin, 2023:1847-1852.
- [18] SAWABE H, NAKAJIMA M, TANAKA M, et al. Control of an Articulated Wheeled Mobile Robot in Pipes[J]. Advanced Robotics, 2019, 33(20):1072-1086.

(编辑 王旻玥)

**作者简介:**张益鑫,男,1990年生,博士后研究人员。研究方向为智能机器人及机电系统建模控制。E-mail:zhang\_yixin@buaa.edu.cn。王少萍(通信作者),女,1966年生,教授、博士研究生导师。研究方向为故障诊断、健康管理及机电控制与仿真。E-mail:shaopingwang@vip.sina.com。

**本文引用格式:**

张益鑫,苗忆南,易智恒,等. 新型可变形串联管道检测机器人:设计、建模及实验[J]. 中国机械工程,2025,36(9):2140-2149.

ZHANG Yixin, MIAO Yinan, YI Zhiheng, et al. A Novel Deformable Serial Pipeline Inspection Robots: Design, Modeling and Experimentation[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9):2140-2149.