doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.019

农业灌溉管道探查机器人设计与试验

刘晓敏　卫　恒　刘　政　张东旭　翟清淼　赵云伟
（北华大学机械工程学院，吉林 132021）

摘要：为实现农业灌溉主管道探查作业，设计了一种单驱动、低流阻、快速移动柔性管道机器人。该机器人由单个变腔室线性伸长型致动器驱动，外侧套装 6 对轴对称分列排布三角形柔性足，通过单一气路通断实现快速蠕动。研究了单驱动管道机器人蠕行机理，进行了柔性足与躯体致动器结构优化、变形建模与性能测试。建立了机器人前行过程中力和步距模型，并进行了管道内静力学试验。基于规划步态建立了机器人速度模型，利用 3D 运动捕捉系统测试了机器人运动特性，获得了气压与通气频率对速度的影响规律。搭建了农业灌溉主管道模拟管系，分别进行了机器人负载特性、不同管径和多种管道环境爬行测试，并利用机器人前端的视觉传感单元进行了管道内部环境探查作业。结果表明，规划步态下机器人实现快速移动的同时，具有较好的承载能力、适应性及稳定性，动态探查作业过程中行进平稳且捕捉影像清晰。最大移动速度为 40 mm/s，承载能力为 1 kg，可实现复杂农业灌溉管道环境的探查作业。

关键词：农业灌溉；管道探查；柔性管道机器人；单驱动；快速移动
中图分类号：TH138.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)07-0203-14　　**OSID**：

Design and Experiment of Agricultural Pipeline Inspection Robot for Irrigation Systems

LIU Xiaomin　WEI Heng　LIU Zheng　ZHANG Dongxu　ZHAI Qingmiao　ZHAO Yunwei
(*School of Mechanical Engineering*, *Beihua University*, *Jilin* 132021, *China*)

Abstract: A soft pipeline robot specifically designed for agricultural irrigation inspection was described. The robot was capable of fast and low-resistance locomotion, achieved through a single-drive mechanism. The robot's peristaltic motion was produced by a linear extension actuator and six pairs of flexible feet, controlled through a single air channel. This integrated approach reduced control complexity and increases mobility. An investigation of the peristaltic mechanism in a single-actuated pipe robot was conducted, along with structural optimization, deformation modeling, and performance testing of the flexible foot and body actuators. A mechanical model was established in order to characterize the driving force and step displacement during the robot's propulsion phase, with its predictions subsequently verified by static experiments conducted inside a pipeline. Gait-based velocity modeling was conducted to examine the robot's motion characteristics. A 3D motion capture system was employed for precise motion tracking, thereby revealing the influence of air pressure and ventilation frequency on overall locomotion performance. Experiments were performed in a simulated agricultural irrigation pipeline system to evaluate load capacity, adaptability to different pipe diameters, and mobility under varied pipeline conditions. Additionally, a front-mounted visual sensing unit was integrated to enable internal pipeline inspection. The robot achieved a maximum speed of 40 mm/s and carried a payload of 1 kg, enabling rapid exploration within complex agricultural irrigation pipeline systems.

Key words: agricultural irrigation; pipeline inspection; soft pipeline robot; single-actuation; rapid locomotion

收稿日期：2025-09-29　修回日期：2025-10-30
基金项目：吉林省科技发展计划项目(YDZJ202401396ZYTS、YDZJ202201ZYTS624)、吉林市科技发展计划项目(20230302027)和北华研创项目(2024045)
作者简介：刘晓敏(1980—)，女，教授，博士，主要从事软体驱动器和软体机器人研究，E-mail：jlulxm@163.com
通信作者：赵云伟(1978—)，男，教授，博士，主要从事智能精密制造、柔性驱动器和软体机器人研究，E-mail：jluzyw@163.com

0 引言

在农业灌溉系统中,主管道通常埋设于地下或穿越复杂地形,长期承受内部水压与外部土壤压力,其安全状态直接影响水资源利用率与农业生产成本[1-3]。因管道内部空间狭窄、环境多样、结构复杂多变,人工检测效率低、成本高,自动化管道检测需求迫切[4-7]。

农业灌溉探查管道机器人设计有其独特性,水肥一体化灌溉模式导致管道内留有肥料沉积、积水和油污,作业时甚至面对水压和水流的冲击,要求机器人不仅具有防水性和长线作业能力,还需具备多工况多环境适应性和较好的低流阻性[6]。近年来,相继出现了多类型的管道探查机器人,如采用金属或硬质材料制成的刚性管道机器人,其运动形式包括轮式[7-8]、履带式[9-10]、足式[11]、蠕动式[12-14]、螺旋式[15]与压差式[16]等,此类机器人多采用电机驱动,具有可靠性强、控制精度高、负载能力大等特点,但庞杂的系统结构、精密的电控组件限制了在潮湿或涉水工况下小管径灌溉管道的适用性,而且刚性的组件极易二次损伤管壁[17-18]。而采用软质材料的软体管道机器人[19-20],通过仿生结构设计模拟蠕虫[21-22]等生物的运动机制,具有良好的环境适应性,适用于非结构化管系,可实现管道“无损伤”检测[23]。此类机器人常采用气动、液动或电致驱动等驱动方式,依靠多个致动器协同运动[24-28]。过多的致动器和复杂步态令机器人控制系统及管线冗余庞杂,作业时其后部需要拖拽大量线缆,不利于长距离与多弯道管道作业,且刚性较弱、承载和输出能力低、低流阻性差,无法满足灌溉管道作业需求[29]。

本文针对管道探查作业需求,设计一种单驱动足式快速移动软体管道机器人,研究机器人蠕行机理与结构设计优化,建立柔性足与躯体致动器变形模型、机器人力和步距模型,规划行进步态并建立机器速度模型,制作样机并搭建农业灌溉地下主管道模拟管系,分别进行机器人运动特性、负载特性、管道环境适应性和管道探查试验。

1 机器人设计

1.1 整体设计

面向管道探查作业,借鉴蚯蚓蠕行机理(图 1),设计了一种单驱动快速移动管道机器人。在柔软躯体外侧套装可变形态柔性足,用于模拟蚯蚓纵肌、环肌的收缩与舒张。柔性足协同躯干伸缩,机器人可利用足部形态交替变化与管壁接触锚固支撑本体,实现蠕动前行。

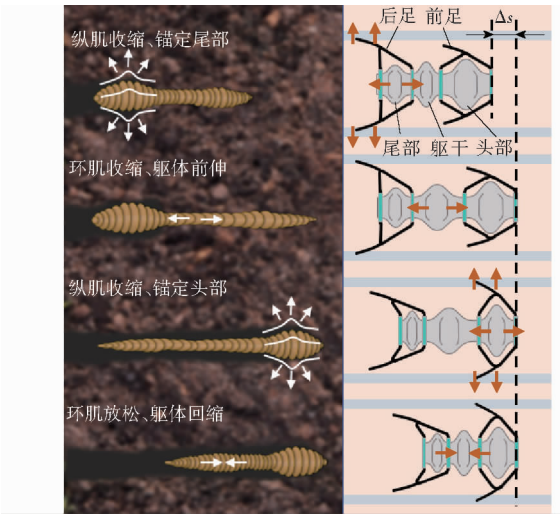


图 1 机器人蠕行机理

Fig. 1 Creep mechanism of robots

机器人整体结构如图 2 所示。根据管道规格(管道内径 D 为 90 ~ 100 mm)、检测效率、障碍物、机器人几何结构和材料特性等因素,确定机器人质量、速度和承载比作为机器人主要设计参数,依据文献[20-21,28]确定机器人质量小于 250 g、速度大于 0.25 bl/s 和承载比大于 3。机器人主要由软体躯干和柔性足部组成,两套 V 形柔性足分别套装于软体躯干的头尾处。为保证运动平稳和受力均衡,每套足包含 6 个柔性足,且呈中心对称分布,运动时足部与管壁均匀接触,在机器人前端设有导向环和视觉传感单元,以保持前行方向并在快速行进中探查管道内部环境。探查作业时,机器人先预压入管道,令柔性足与管壁始终接触,充泄压下柔性足随躯干伸缩交替收拢舒张。机器人采用单一气路控制,仅通过开关控制,即可实现管道内快速移动。

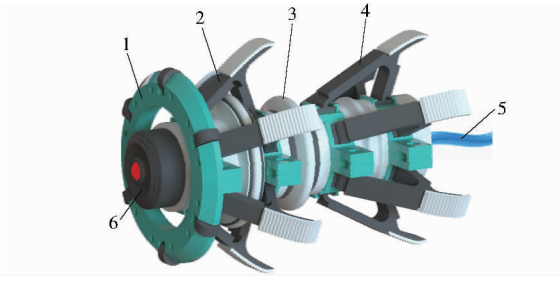


图 2 机器人整体结构图

Fig. 2 Overall structure of robot

1. 导向环 2. 前柔性足 3. 躯干 4. 后柔性足 5. 视觉传感单元 6. 气管

机器人采用机械连接方式,通过快插卡槽和安装槽孔实现柔性足与环形骨架、骨架与躯体等部件的快速接卸,如图 3 所示。装配前,约束环预先套装于躯体气室外侧的卡槽内,柔性足依次插于环形骨架卡槽中。装配时,柔性足连同骨架组件套装于软体躯干外侧骨架槽处,导向环直接穿插于前足骨架

槽孔内。为了增强足与管壁摩擦各向异性，柔性足末端外侧贴有锯齿状摩擦软垫，磨损后可更换。

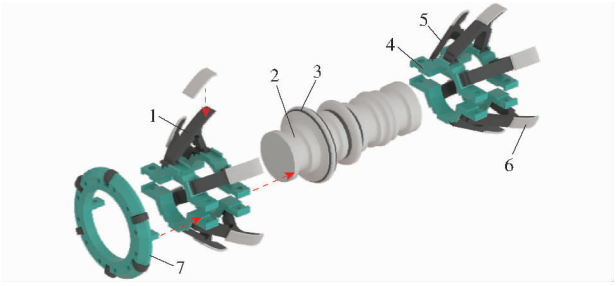


图 3　机器人连接方式

Fig. 3　Connection mechanism of robot

1. 柔性前足　2. 躯体　3. 约束环　4. 环形骨架　5. 柔性后足　6. 摩擦软垫　7. 导向环

1.2　柔性足设计

柔性足采用可变形态 V 形柔杆设计（图 4），柔杆结构在拉伸后可弹性恢复，分为刚性段和变形区。行进时，V 形杆顶端与管壁接触支撑本体。为导引变形，在 V 形杆顶点处开设扇形槽或圆弧过渡，两侧连杆为刚性段，起运动和支撑作用，分为牵引杆和支撑杆（图 4a）。为增加足部管壁的接触，自足顶端沿牵引杆方向设计了一小段扁平而细长的柔性延伸段即足部末端，其随足部舒张和收拢变形（见图 4b）。可在机器人躯干伸展和回弹过程中，减小前行和回弹阻力，在足部支撑过程中提升锚固力。

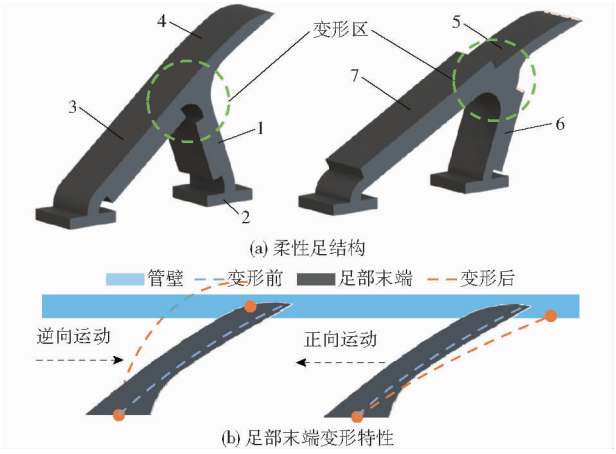


图 4　柔性足设计

Fig. 4　Flexible foot design

1. 前足支撑杆　2. 足跟　3. 前足牵引杆　4. 前足部末端　5. 后足部末端　6. 后足支撑杆　7. 后足牵引杆

为满足蠕行需求，前足和后足分别设计为锐角和钝角三角形 V 形杆，见图 5。图中三角形顶点为足尖，随三角形形态的改变，前后足尖呈高低起伏交替变化。当躯干伸展时，前足随锐角三角形的变形而内收，后足随钝角三角形的变形而外展；随躯干回缩，前足外展、后足内收。充泄压下，前后足将交替舒张与收拢。

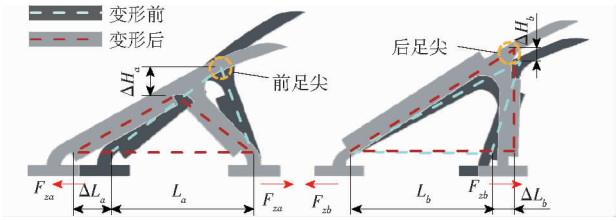


图 5　柔性足受力变形

Fig. 5　Deformation of flexible foot under force

首先参照目标管道尺寸，设计柔性足足高、足宽与各杆长。为防止柔性足受压失稳，其足高 H_z 与足宽 b_z 比值应满足

$$\lambda = 2\sqrt{3}\mu H_z / b_z \leqslant \lambda_p \tag{1}$$

式中　λ、λ_p——压杆柔度、压杆许用柔度

μ——压杆长度因数

柔性足选用 TPU 材料，其许用柔度为 8.6。根据目标管径范围，考虑致动器尺寸，极限足高度应约占管径 25%，其范围为 22.5 ~ 25 mm，经式（1）计算得足宽度应为 9 ~ 10 mm，取最大足宽为 10 mm。

连接骨架采用正六边形设计，依据设计足宽、安装尺寸与装配空间、管径几何条件等（图 6），可获得六边形内切圆半径 r，则足高设计值 H_z 为

$$H_z = D/2 - r - w_t - w_d \tag{2}$$

式中　w_t、w_d——足部末端厚度、摩擦软垫厚度

D——管径

前、后足足部末端设计长度 L_{ta}、L_{tb} 分别为 8、7 mm，根据连接件结构尺寸，代入式（1）、（2）求得足高为 26 mm。

假设未变形前柔性足与管壁完全接触，见图 6。以前足为例，由图中所示几何关系，可得牵引杆长 L_{ab} 和支撑杆的杆长 L_{ac} 分别为

$$\begin{cases} L_{ab} = (H_z - H_{za} - w_t)/\sin\beta_a \\ L_{ac} = (H_z - H_{za} - w_t)/\sin\alpha_a \end{cases} \tag{3}$$

式中　H_{za}、α_a、β_a——前足的足跟高度、牵引角、支撑角

前后足设计要求：前足未变形，足部末端完全接触管壁，在前足腔驱动下变形后足部末端恰好脱离管壁，见图 6；后足未变形前，足部末端恰好接触管壁，在后足腔驱动下变形后，后足支撑杆与管壁垂直且足部末端完全接触管壁。由所述的设计要求和几何约束条件，取前足牵引角和支撑角设计值分别为 44°和 68°，由式（3）计算求得牵引杆长度和支撑杆长度分别为 30.2 mm 和 22.6 mm。

同理，后足牵引角和支撑角分别设计为 28°、117°，其牵引杆长度和支撑杆长度分别为 46.9 mm 和 24.7 mm。

变形后柔性足末端恢复变形恰与管壁保持接

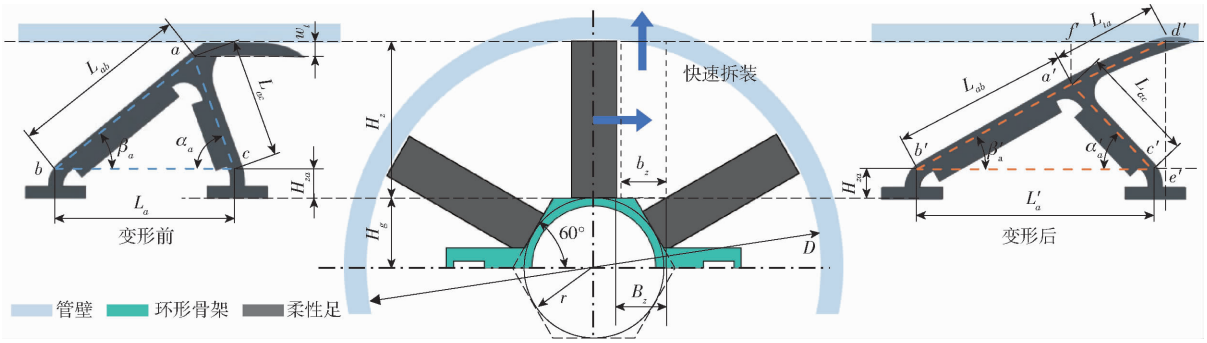


图 6 柔性足及关键尺寸

Fig. 6 Flexible feet and key dimensions

触,由图 6 中△$a'd'f'$与△$d'b'e'$的相似关系,可得足尖的径向位移量 ΔH_a 为

$$\Delta H_a = (H_z - H_{za} - w_t)\frac{L_{ta}}{L_{ab} + L_{ta}} \tag{4}$$

根据三角形几何关系,足尖径向位移量 ΔH_a 与足跟开合量 ΔL_a 的关系为

$$\Delta L_a = \delta_a \Delta H_a \tag{5}$$

式中 δ_a——柔性前足变形比例系数

将计算求得的牵引杆长度代入式(5)可求解得前足足尖所需移动距离为 4.4 mm。由变形前后三角形的几何关系可得,柔性足根部所需开合量为 7.3 mm。同理,后足足尖所需移动距离为 2.9 mm,柔性足根部所需开合量为 4.1 mm。

1.3 躯体设计

为满足与躯干变形需求,躯体分为头、尾和躯干,三段一体相连。各段设计要求前、中、后腔室在伸长变形中轴向变形量 Δl 与气压 p 关系适当,能提供足够的输出力 F_d 且变形恢复过程中产生较大的回弹力 F_l。

根据柔性足设计需求,前足腔气压下的变形量 Δl_a、输出力 F_{da} 和回弹力 F_{la} 应满足

$$\begin{cases} \Delta l_a \geqslant \Delta L_a \\ F_{da} \geqslant \sum F_{za} \\ F_{la} \geqslant F_{la\min} \end{cases} \tag{6}$$

式中 F_{za}——驱动单个柔性前足所需拉力

$F_{la\min}$——前足锚固时腔室所需最小牵拉力

躯干腔气压下的变形量 Δl_c、输出力 F_{dc} 和回弹力 F_{lc} 应满足

$$\begin{cases} \Delta l_c \geqslant \rho L \\ F_{dc} \geqslant F_{fa} \\ F_{lc} \geqslant F_{fb} \end{cases} \tag{7}$$

式中 ρ、L——机器人伸长比、整机长度

F_{fa}、F_{fb}——前、后足摩擦阻力

后足腔气压下变形量 Δl_b 和输出力 F_{db} 应满足

$$\begin{cases} \Delta l_b \geqslant \Delta L_b \\ F_{db} \geqslant \sum F_{zb} \end{cases} \tag{8}$$

式中 ΔL_b——后足足跟开合量

F_{zb}——驱动单个柔性后足所需拉力

针对这一需求,本研究设计一种“充压伸长、泄压回缩”的三段式波纹状软体致动器,内含 3 个锥饼状气腔(图 7),分别对应前足、躯干和后足,各腔室由单个气道贯穿连通,随气压同步变形,可满足前足、躯干和后足的协同变形要求,实现机器人蠕动前行。

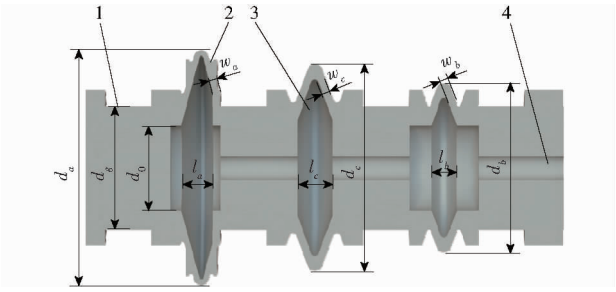


图 7 三腔室气动软体致动器结构图

Fig. 7 Three-chamber pneumatic soft actuator structure

1. 骨架槽 2. 约束环槽 3. 腔室 4. 气道

依据环形骨架的结构和外形尺寸,骨架槽直径设计值 d_g 取 24 mm。受前后足两柔杆之间空间限制,前、后足腔宽度 l_a、l_b 最大设计值均为 18 mm,前、后足腔外径 d_a、d_b 最大设计值分别为 60、50 mm。躯干腔室设计可由单腔扩展至多腔。

所设计致动器在实际应用中,存在需要优化的问题:①欲使柔性足发生所需变形,需有足够的腔室面积以提供大驱动力,而柔性足套装于腔室外侧,限制了腔室设计尺寸。因此,在适配空间内,存在最优腔室设计参数。②针对柔性后足,过大的变形量会导致其三角形“由钝变锐”,后足失去支撑,致使机器人滑移。设计时需控制其变形量适中,避免后足锚固失效。③躯干变形与刚度存在矛盾,欲发生大变形,需增加腔室数目、增加腔室横截面积或减小腔室壁厚以提升柔性,而柔性的增加致使躯干刚度减

弱，将无法提供足够的驱动力和牵拉力以克服摩擦力推或拉躯体前行。针对足部变形需求和机器人蠕行条件，需合理设计躯体各腔室的几何尺寸。

基于以上分析，根据柔性足的变形需求，采用仿真分析与试验方法优化躯体各腔室设计参数，分别设计了腔室直径范围为 52 ~ 68 mm、40 ~ 48 mm，壁厚范围为 1 ~ 3 mm 下 25 组前足腔和后足腔三维模型，制作了 3 个躯体样机。优化后的躯体各腔室设计参数为：前足腔外径 d_a = 60 mm，躯干腔直径 d_c = 52 mm，后足腔外径 d_b = 44 mm，腔室内径 d_0 = 22 mm，前足腔变形层壁厚 w_a = 1.5 mm，躯干腔变形层壁厚 w_c = 3 mm、后足腔变形层壁厚 w_b = 2 mm。

2　机器人建模

2.1　柔性足

以前足为研究对象，研究轴向拉力 F_z 作用下足部形态变化（图 8）。如图 8 所示，柔性足可简化为两个刚性直线段和一个可变形圆弧段，其中圆弧段弧心角为 γ_a（$\gamma_a = \alpha_a + \beta_a$）。两个直线段底端间距为足跟跨距，由图中所示几何关系，可得足跟跨距 L_a 为

$$L_a = L_{ac}\cos\alpha_a + r'_a\sin\alpha_a + L_{ab}\cos\beta_a + r'_a\sin\beta_a \tag{9}$$

式中　r'_a——前足足尖圆弧区半径

对式（9）中设计变量 L_a 和 α_a、β_a 分别求导，可得

$$\Delta L_a = \Delta\alpha_a(L_{ac}\sin\alpha_a - r'_a\cos\alpha_a) + \Delta\beta_a(L_{ab}\sin\beta_a - r'_a\cos\beta_a) \tag{10}$$

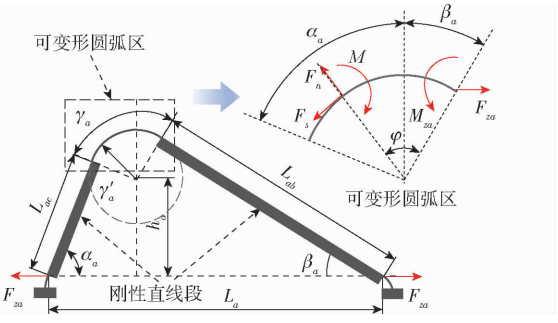


图 8　柔性足力与变形分析

Fig. 8　Force-deformation analysis of flexible foot

由图 8 所示几何关系可知，前足圆弧区中心高 $h_a = L_{ac}\sin\alpha_a - r'_a\cos\alpha_a = L_{ab}\sin\beta_a - r'_a\cos\beta_a$，代入式（10），则足跟跨距变化量 ΔL_a 与圆弧段弧心角变化量 $\Delta\gamma_a$ 关系可表达为

$$\Delta L_a = |h_a\Delta(\alpha_a + \beta_a)| = |h_a\Delta\gamma_a| \tag{11}$$

弧心角变化量 $\Delta\gamma_a$ 可由卡式定理求得为

$$\Delta\gamma_a = \left|\frac{\partial V_\varepsilon}{\partial M_{za}}\right| \tag{12}$$

式中　V_ε——变形后圆弧区的应变能

M_{za}——轴向拉力平移产生的附加力矩

假设圆弧区变形均匀，截取任一圆弧段，由截面处切向力、法向力与力矩分析可得应变能为

$$V_\varepsilon = \int_0^{\alpha_a+\beta_a}\left(\frac{M^2}{2E_zI_z} + \frac{F_n^2}{2E_zA_z} + \frac{3}{5}\frac{F_s^2}{2G_zA_z}\right)r'_a\mathrm{d}\varphi \tag{13}$$

其中

$$\begin{cases} M = -M_{za} - F_{za}r'_a(\cos(\beta_a - \varphi) - \cos\beta_a) \\ F_s = F_{za}r'_a\cos\left(\dfrac{\pi}{2} + \varphi - \beta_a\right) \\ F_n = F_{za}r'_a\cos(\varphi - \beta_a) \\ M_{za} = F_{za}L_{ab}\sin\beta_a \end{cases} \tag{14}$$

式中　A_z——足尖圆弧区横截面积

F_s——切向力　　F_n——法向力

φ——圆弧微元段圆心角

E_z、G_z——TPU 材料的弹性模量、剪切模量

I_z——足尖圆弧区惯性矩

联立式（12）~（14）解得 F_{za} 作用下的弧心角变化量为

$$\Delta\gamma_a = F_{za}/k_{\gamma a} \tag{15}$$

其中

$$k_{\gamma a} = \frac{E_zI_z}{r'_a[r'_a(\sin\alpha_a + \sin\beta_a) + h_a(\alpha_a + \beta_a)]} \tag{16}$$

将式（11）代入式（15）可得，在轴向拉力作用下，柔性足拉伸量为

$$\Delta L_a = h_aF_{za}/k_{\gamma a} \tag{17}$$

将式（5）代入式（17），轴向拉力作用下足尖高度变化为

$$\Delta H_a = \frac{h_aF_{za}}{\delta_ak_{\gamma a}} \tag{18}$$

2.2　躯体致动器

躯体致动器包含多个腔室，其结构相似、变形机理相同。以前足腔为例，研究致动器在伸长变形过程中的轴向伸长量 Δl_a、驱动力 F_{pa}、阻抗力 F_{Ra} 以及回弹力 F_{la}。

充压时，气压 p 作用在腔室端部产生驱动力 F_{pa}，驱使腔室发生轴向变形。在变形过程中，腔室弹性结构产生相应的轴向应变，阻碍其伸长并产生阻抗力 F_{Ra}。由静力平衡可知，变形完成后阻抗力与驱动力相等。泄压后，因腔室弹性变形恢复而产生回弹力 F_{la}。

其中，驱动力、阻抗力及回弹力分别为

$$\begin{cases} F_{pa} = pS_a = \dfrac{1}{8}pc_{sa}\pi(d_a^2 + d_0^2) \\ F_{Ra} = k_{Ra}\Delta l_a \\ F_{la} = c_{la}k_{Ra}\Delta l_a \end{cases} \tag{19}$$

式中　S_a、c_{sa}——前足腔的腔室截面积和面积修正系数

k_{Ra}、c_{la}——前足腔的刚度和刚度修正系数

由卡式定理求得，波纹状软体致动器腔室变形后轴向伸长量 Δl_a 与端部驱动力 F_{pa} 的关系[30]为

$$\Delta l_a = F_{pa}/k_{Ra} \tag{20}$$

其中

$$k_{Ra} = \frac{\pi E w_a^2 b_2}{2b_0 b_1 \theta_a + (w_a + 2r_a) b_0 \sin\theta_a} \tag{21}$$

$$\begin{cases} b_0 = l_{ta}\sin\theta_a - r_a\cos\theta_a \\ b_1 = b_0 + \dfrac{d_0}{2} \\ b_2 = b_0 + r_a \end{cases} \tag{22}$$

式中 E——硅胶弹性模量

θ_a——波纹锥角

r_a、l_{ta}——前足腔的锥顶圆弧半径、侧壁长度

致动器为变腔室的波纹状结构，其腔室尺寸不一，则其总驱动力 F_p 和轴向总伸长量 ΔL_q 可分别表达为

$$\begin{cases} F_p = c_p F_{pa} \\ \Delta L_q = c_q n_q \Delta l_a \end{cases} \tag{23}$$

式中 c_p、c_q、n_q——致动器的驱动力修正系数、变形修正系数、腔室总数目

2.3 机器人

由图 9 所示机器人管内受力分析可知，机器人蠕行必要条件为

$$\begin{cases} F_{Mb} \geqslant F_{dc} \geqslant F_{fa} \\ F_{Ma} \geqslant F_{lc} \geqslant F_{fb} \end{cases} \tag{24}$$

式中 F_{Ma}、F_{Mb}——前、后足锚固力

F_{fa}、F_{fb}——前、后足摩擦力

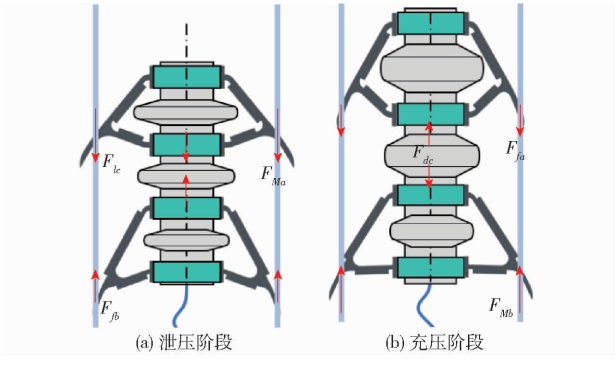


图 9 机器人受力分析

Fig. 9 Force analysis of robots

(1)锚固力与摩擦阻力

机器人在管内蠕行过程中，前后足交替舒张收拢接触管壁产生锚固力和摩擦阻力。

以前足为研究对象，前足舒张后与管壁接触锚固本体，此时后足脱开随躯干回缩。前足产生的最大锚固力 F_{Ma} 为

$$F_{Ma} = \mu_{Ma} N_a \tag{25}$$

式中 μ_{Ma}——前足锚固摩擦因数，可由实验测得

N_a——前足锚固过程中的正压力

而后足舒张锚固本体时，前足收拢，其末端轻微接触管壁并随躯干前伸产生的摩擦阻力 F_{fa} 为

$$F_{fa} = \mu_{fa} N'_a \tag{26}$$

式中 μ_{fa}——前足滑动摩擦因数，可由实验测得

N'_a——前足松开过程中的正压力

N_a 与 N'_a 分别为足部收拢和舒张过程中与管壁产生的正压力 N，与足部伸长量 ΔL_a 有关。

将足部末端视为弹性杆，基于弹性材料的胡克定律，假设接触正压力与足部末端变形量 ΔR_a 线性相关，则正压力为

$$N = k_{Na}\Delta R_a \tag{27}$$

式中 k_{Na}——前足足部末端刚度，可由实验测得

其中，足部末端变形量 ΔR_a 为前足自由舒张时的整体足高 R_a 与管道半径的差值，可描述为

$$\Delta R_a = R_a - D/2 \tag{28}$$

其中

$$R_a = H_g + (H_z - H_{za} - w_t)\frac{L_{ab} + L_{ta}}{L_{ab}} + w_d + \Delta H_a \tag{29}$$

随着 ΔL_a 的增加或减小，足部末端变形量相应变化，正压力也随之改变。由式(27)~(29)结合式(5)得正压力 N 与柔性足拉伸量 ΔL_a 的关系为

$$N = k_{Na}(C_a + \delta_a \Delta L_a) \tag{30}$$

其中

$$C_a = H_g + (H_z - H_{za} - w_t)\frac{\beta_{ab} + L_{ta}}{\beta_{ab}} + w_d - \frac{D}{2} \tag{31}$$

将机器人放入管道后，由于管壁约束，柔性足受压，其正压力 N 沿足两侧杆传递至足跟处分解成沿轴向的分力 F_{xa}；当致动器充压后膨胀变形，在足跟处产生输出力 F_{da}；如图 10 所示，柔性足在轴向力作用下，克服自身阻抗产生伸长变形 ΔL_a。

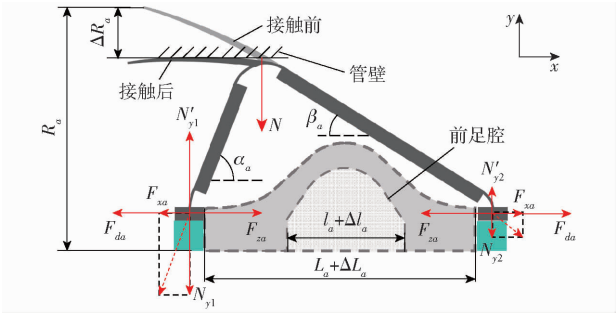


图 10 管壁约束下的前足受力分析

Fig. 10 Force analysis of front foot under pipe wall constraints

根据柔性足轴向静力平衡方程与变形条件得

$$\begin{cases} F_{da} + \sum F_{xa} = \sum F_{za} \\ \Delta l_a = \Delta L_a \end{cases} \tag{32}$$

致动器克服自身阻抗产生的输出力 F_{da} 为

$$F_{da} = F_{pa} - F_{Ra} \tag{33}$$

由图 10 中几何关系，由 N 分解得轴向力 F_{xa} 为

$$F_{xa} = N/(\tan\alpha_a + \tan\beta_a) \tag{34}$$

将式(17)、(19)、(33)、(34)代入式(32)求得，管道内机器人前足的足跟跨距变化量 ΔL_a 与气压 p 关系为

$$\Delta L_a = \frac{\frac{1}{8}c_{sa}\pi p(d_a^2 + d_0^2) + \sum \frac{C_a k_{Na}}{\tan\alpha_a + \tan\beta_a}}{c_{la}k_{Ra} + \sum \frac{k_{\gamma a}}{h_a} - \sum \frac{k_{Na}\delta_a}{\tan\alpha_a + \tan\beta_a}} \tag{35}$$

将式(35)代入式(30)可得正压力 N_a 与气压 p 的关系为

$$N_a = N_{a0} + \xi_a p \tag{36}$$

其中

$$\begin{cases} N_{a0} = \dfrac{k_{Na}C_a\left(c_{la}k_{Ra} + \sum \dfrac{k_{\gamma a}}{h_a}\right)}{c_{la}k_{Ra} + \sum \dfrac{k_{\gamma a}}{h_a} - \sum \dfrac{k_{Na}\delta_a}{\tan\alpha_a + \tan\beta_a}} \\ \xi_a = \dfrac{\frac{1}{8}k_{Na}\delta_a c_{sa}\pi(d_a^2 + d_0^2)}{c_{la}k_{Ra} + \sum \dfrac{k_{\gamma a}}{h_a} - \sum \dfrac{k_{Na}\delta_a}{\tan\alpha_a + \tan\beta_a}} \end{cases} \tag{37}$$

式中　N_{a0}、ξ_a——前足预压力、前足正压力系数

将求解的正压力 N 分别代入式(25)、(26)可求得前柔性足在锚固与松开过程中锚固力与摩擦力随气压的变化；同理可求得后足锚固力、摩擦力与气压的关系。由上述分析可知，机器人在管道内行进过程中，可通过控制充泄压力调整锚固力大小。

(2)前推力与牵拉力

机器人前行分为两个阶段，即前推和后拉；在前推过程中，要求躯干输出力 F_{dc} 需克服前足前行阻力 F_{fa} 推动头部前伸；在牵拉过程中，当躯干回缩时，需要克服后足牵拉阻力 F_{fb}，拉动尾部前移。此过程中前推力 F_T 和牵拉力 F_L 可分别描述为

$$\begin{cases} F_T = F_{dc} - \sum F_{fa} \\ F_L = F_{Rc} - \sum F_{fb} \end{cases} \tag{38}$$

其中

$$\begin{cases} F_{dc} = \dfrac{1}{8}c_{pc}\pi p(d_c^2 + d_0^2) - \dfrac{k_{Rc}\Delta l_c}{n} \\ F_{Rc} = c_{lc}k_{Rc}\Delta l_c \end{cases} \tag{39}$$

式中　c_{pc}、c_{lc}、n——躯干腔的驱动力修正系数、刚度修正系数、腔室数目

F_{dc}、F_{Rc}——躯干输出力、躯干腔阻抗力

(3)前行步距

步距为充、泄压阶段躯干腔室伸长量之差，即

$$\Delta s = \Delta l_c - \Delta l_c' \tag{40}$$

式中　Δs——步距

$\Delta l_c'$——躯干泄压完成后的轴向变形量

当躯干伸长和收缩变形完成，前推力和牵拉力减小至零，则式(38)可表达为

$$\begin{cases} F_{dc} = \sum F_{fa} \\ F_{Rc} = \sum F_{fb} \end{cases} \tag{41}$$

将式(25)、(26)、(39)代入式(41)，求得充压后躯干伸长量 Δl_c、泄压后躯干伸长量 $\Delta l_c'$ 分别为

$$\begin{cases} \Delta l_c = \dfrac{n}{k_{Rc}}\left[\dfrac{1}{8}c_{sc}\pi p(t_1)(d_c^2 + d_0^2) - \sum \mu_{fa}(N_{a0} + \xi_a p(t_1))\right] \\ \Delta l_c' = \dfrac{n}{c_{lc}k_{Rc}}\sum \mu_{fb}(N_{b0} + \xi_a p(t_2)) \end{cases} \tag{42}$$

式中　c_{sc}、k_{Rc}——躯干腔的阻抗力、刚度

μ_{fb}——后足滑动摩擦因数

N_{b0}——后足预压力

充泄压过程中，躯干内气压压力分别为

$$\begin{cases} p(t_1) = p\xi_1(1 - e^{-\eta_1 t_1}) \\ p(t_2) = p(t_1)\xi_2(e^{-\eta_2 t_2} - \xi_3) \end{cases} \tag{43}$$

式中，t_1 和 t_2 分别为充泄压时间，ξ_1、ξ_2、ξ_3、η_1、η_2 分别为拟合系数，可由实验数据拟合获得。

将式(42)代入式(40)可得机器人蠕行步距。

3　运动特性分析

该机器人采用单一气路，仅通过简单的开关控制，即可实现快速移动。其步态规划如图 11 所示，充压时($t < t_1$)，随躯体伸展，后足持续锚固、前足逐渐松开，直至充压完成(机器人运动状态 $a \rightarrow b \rightarrow c$)；泄压后($t_1 < t < t_2$)，随躯体回缩，前足开始锚固、后足逐渐松开(机器人运动状态 $c \rightarrow d \rightarrow e$)；此时完成一个运动循环，机器人前行位移为 Δs。该步态步数少，仅为两步，移动效率高，步态转换快。

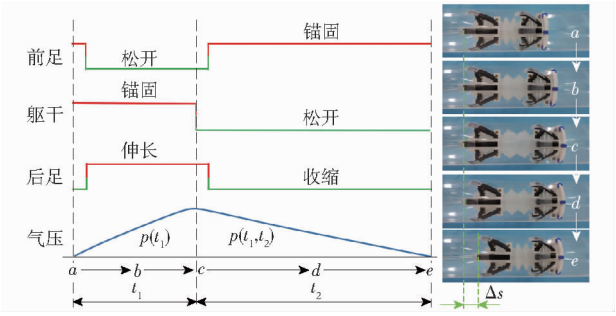


图 11　步态规划时序图

Fig. 11　Gait planning sequence diagram

根据规划步态,机器人速度可表示为

$$v = f\Delta s \tag{44}$$

式中 f——步频

步频取决于充、泄压时间 t_1、t_2,即

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} \tag{45}$$

将式(40)、(42)、(44)代入式(43)得机器人速度为

$$v = \frac{a_1 p(1 - \mathrm{e}^{-\eta_1 t_1}) + a_2 p(1 - \mathrm{e}^{-\eta_1 t_1})\mathrm{e}^{-\eta_2 t_2} + a_3}{t_1 + t_2} \tag{46}$$

其中

$$\begin{cases} a_1 = \dfrac{n}{k_{Rc}} \dfrac{1}{8} c_{sc} \pi \xi_1 (d_c^2 + d_0^2) - \dfrac{n}{k_{Rc}} \sum \mu_{fa} \xi_a \xi_1 + \\ \qquad \dfrac{n}{c_{lc} k_{Rc}} \sum \mu_{fb} \xi_b \xi_1 \xi_2 \xi_3 \\ a_2 = -\dfrac{n}{c_{lc} k_{Rc}} \sum \mu_{fb} \xi_b \xi_1 \xi_2 \\ a_3 = -\dfrac{n}{k_{Rc}} \sum \mu_{fa} (N_{a0}) - \dfrac{n}{c_{lc} k_{Rc}} \sum \mu_{fb} N_{b0} \end{cases} \tag{47}$$

式中 N_{b0}、ξ_b——后足预压力、后足正压力系数

由式(44)可知,机器人速度取决于步距 Δs 和步频 f。步频表示步态变化快慢,由充泄压时间控制,步距则由气压和躯干变形决定。步频表示步态变化快慢,由充泄压时间控制(t_1 和 t_2),步距则由气压下躯干变形决定,与充压阶段 t_1 时刻内躯干内充入气体压力 $p(t_1)$ 和 t_2 时刻后泄压完成和剩余气压力 $p(t_2)$ 有关。机器人速度将随步频和步距的增加而增加,但过快的步频将会令躯干变形不完全,致使步距减小,影响机器人行进速度,因此步频与步距存在最佳匹配关系。

步频与步距匹配关系可描述为控制参数气压 p 与充泄压时间 t_1 和 t_2 之间的匹配关系,控制参数最佳匹配关系下可获得最快爬行速度。为了确保充气阶段内躯干能达到足够的伸长量,机器人充泄压控制方式选择:预设充压时间 t_1,通过改变泄压时间 t_2 来调整机器人步频。式(46)两端分别对 t_2 求导,令 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t_2 = 0$,可得最大爬行速度下,控制参数气压 p 与充泄压时间 t_1 和 t_2 之间的精确最佳匹配关系为

$$p = \frac{-a_3}{\{a_2[\eta_2(t_2 + t_1) + 1]\mathrm{e}^{-\eta_2 t_2} + a_1\}(1 - \mathrm{e}^{-\eta_1 t_1})} \tag{48}$$

4 试验

搭建静力学和运动学实验平台,分别测试了机器人足与躯干的力与变形性能,制作样机并进行了管道环境内机器人的运动特性、负载特性以及环境适应性测试及管道探查试验。

4.1 柔性足

图 12 为在足跟处轴向拉力作用下,前后柔性足足跟跨距和足尖高度变化量。测试时,分别将前后柔性足放置于可相对移动滑台上,支撑杆固接于定滑台上,牵引杆连接于动滑台上,使用测力计沿滑轨拉伸柔性足,由激光测距仪记录足跟间距和足尖高度变化。由图 12 可见,施加轴向拉力后,柔性足被拉伸其几何形态随之改变,足跟跨距随拉力增大呈线性递增(图 12a),前足足尖高度变化量随之减小,而后足高度变化量随之增加(图 12b)。足跟间距每增加 1 mm,前、后足所需拉力需分别增加 1.25、0.42 N,前、后足尖径向位移量分别减少 0.6 mm、增加 0.7 mm。

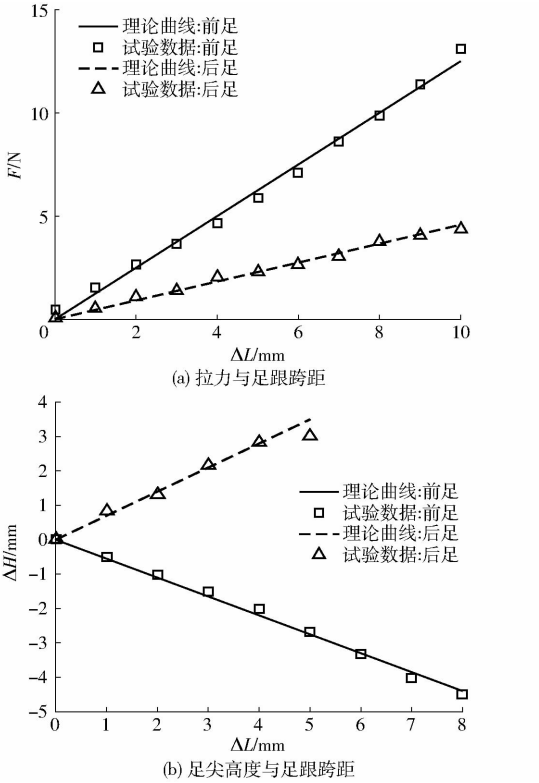


图 12 足跟跨距、足尖高度与拉力三者的关系曲线

Fig. 12 Relationship among heel span, tip height and tensile force

结果表明,柔性足变形可控,前后足尖高度交替变化,满足机器人柔性足交替舒张和收拢设计需求。欲满足柔性足足跟跨距和足尖高度变化量设计需求,前、后柔性足所需轴向拉力分别为 $F_{za} = 9.1$ N、$F_{zb} = 1.7$ N。

4.2 躯体致动器

(1)足腔

将躯体致动器设计参数代入式(19)、(20)可得躯体各腔室驱动力、轴向变形量与气压的关系,如图 13 所示,其试验数据分别由测力计和激光测位仪

获得。图 13 中各腔室的输出力和轴向变形量均随气压增大而增大且呈线性，理论结果与试验数据吻合较好，能较真实地反映气压下躯体各腔室力与变形量。每增加 Δp（Δp = 5 kPa），前、中、后腔室输出力分别增大 6.6、6.3、2.6 N，变形量分别增加 1.0、0.9、0.7 mm。这表明：躯体致动器充压伸长、泄压回缩，前、后、中腔在变形过程中输出力与伸长量线性可控，适合作为柔性足和躯干致动器。

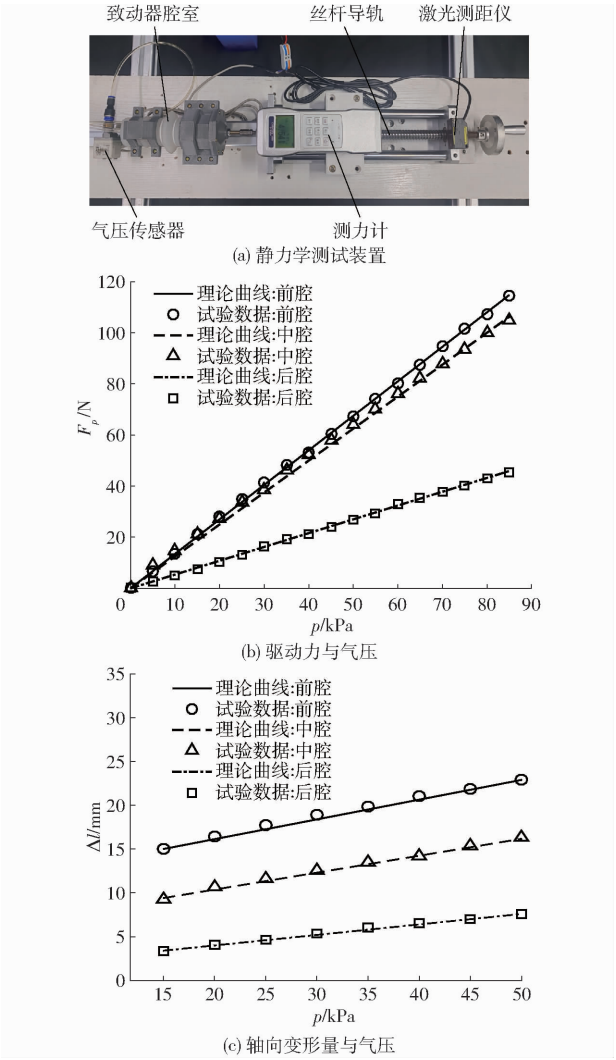


图 13　各腔室力、变形量与气压的关系曲线

Fig. 13　Chamber force and deformation versus air pressure

由图 13 可知，在气压 50 ~ 80 kPa 范围内，前、后足腔输出力分别达到 63.0、26.0 N，满足柔性足所需推力，分别为 54.6、10.2 N；同时前、后足腔变形量分别达到 10.0、7.0 mm，大于柔性足所需变形量 7.3、4.1 mm；根据式（6）~（8）所示条件，所设计的前、后足腔满足机器人设计要求。

（2）躯干

图 14 为腔室壁厚和腔室数量对躯干变形和回弹力的影响。测试时，躯干一端固定，另一端与测力计连接；测力计放置于可相对移动滑台上，激光测距仪安装于滑台固定端上。施加气压后，由激光测距仪测得伸长量，此时连接断开。牵拉力测试过程中，先令躯干腔室充压伸长抵住测力计，然后通过滑台调整测力计沿滑台反向移动直至显示值为 0 时停止，泄压后躯干回缩，此时可测得牵拉力。相同气压下躯干轴向变形量，薄壁腔室优于厚壁腔室，双腔室优于单腔腔室，三者中厚壁双腔室设计最优（图 14a）；在相同伸长量下躯干回弹力，厚壁躯干最大，薄壁躯干次之，双腔躯干最小。

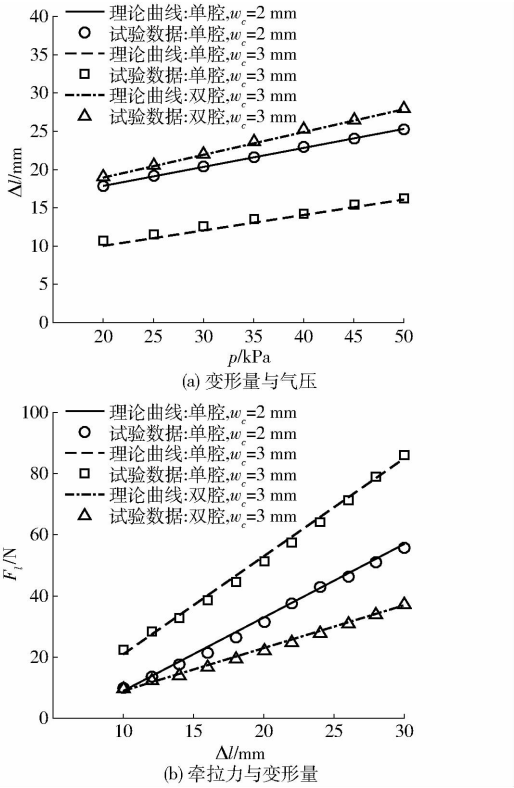


图 14　躯干变形量与气压、牵拉力变化曲线

Fig. 14　Trunk deformation and traction force

由试验可知，为获得躯干高伸长量，可选择减小壁厚或增加腔室数目。若选择薄壁腔室设计，将会减弱躯干刚度和并降低耐压性。在满足牵拉条件下，优选双腔式设计。

4.3　机器人静态测试

机器人前行过程分为前推和牵拉两个阶段，在此过程中，前后足锚固力、摩擦力与气压的关系如图 15 所示。试验中，单独组装机器人前足与后足，分别置于内径 90 mm 的管道中，充泄压足部变形后，采用测力计沿管道轴线正反两个方向拖拽，分别测得摩擦阻力与锚固力（图 15a、15b）。由图中可见，充压阶段，前足收拢，后足舒张，前足摩擦阻力随气压的增加而减小，后足锚固力随之增大；反之，泄压阶段前足舒张，后足收拢，此时随着气压的减小，前足锚固力随之增大，后足摩擦阻力随之减小，其前后足锚固力均可由气压调节控制。

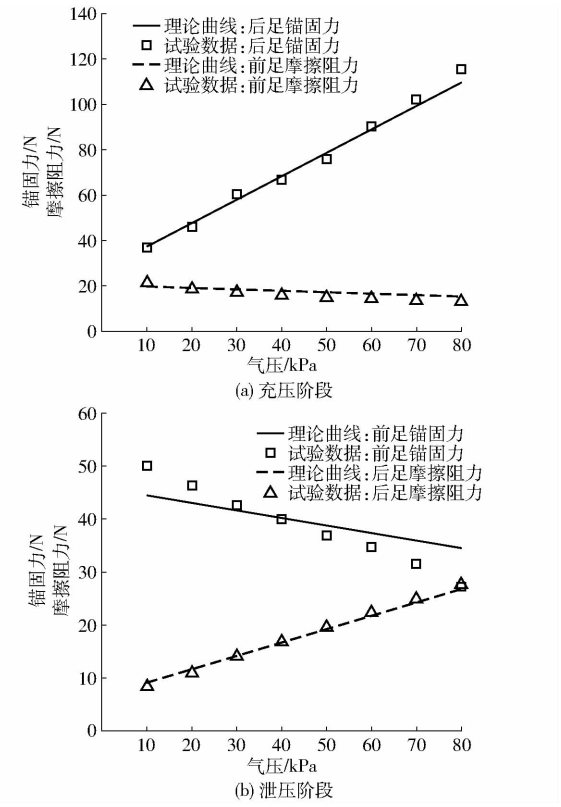


图 15 摩擦力、锚固力与气压的关系曲线

Fig. 15 Relationship between friction, anchoring force and air pressure

在前推阶段,后足与管壁之间的锚固力始终大于前足摩擦阻力,所选的工作气压(50 ~ 80 kPa)内,躯干输出力为 63 ~ 101 N(图 13a),大于机器人前足摩擦阻力且小于后足锚固力;在牵拉阶段,前足锚固力始终大于后足摩擦力,随躯干回缩回弹力为 9 ~ 37 N(图 14),大于机器人后足摩擦阻力且小于前足锚固力,满足式(24)所示机器人蠕行必要条件。

4.4 管道爬行测试

图 16 为搭建的机器人综合运动试验平台,利用 3D 运动捕捉系统(NDI 公司,加拿大)测试其在多环境、多工况下的爬行速度。

实验中选用 3 mm 壁厚的双腔式躯干管道机器人样机,其总长为 147 mm、质量 236.5 g,适配管径范围为 84 ~ 100 mm。所使用管道为 PMMA 材质的透明有机玻璃管,模拟了水、油污、沙土等作业环境,并利用机器人头部携带的视觉传感模块进行管道探查测试。具体试验条件和控制参数如表 1 所示。

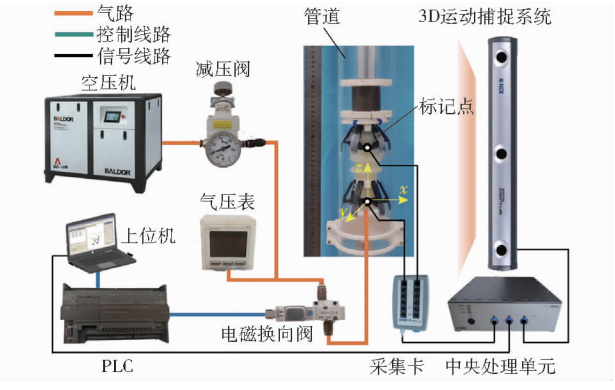


图 16 综合运动试验平台

Fig. 16 Comprehensive experiment platform for locomotion

表 1 试验条件和控制参数

Tab. 1 Experimental conditions and control parameters

参数	数值
管径 D/mm	84、86、88、90
气压 p/MPa	0.05 ~ 0.35
充压时间 t_1/s	0.2
泄压时间 t_2/s	0.3 ~ 0.9
重物质量 m/kg	0.5、1
过弯角度 η/(°)	45、90
环形骨架高度 H/mm	15.0 ~ 18.0
采样频率 f_c/Hz	100

图 17 为采用直管和弯头搭建的农业灌溉地下主管道模拟场景。为模拟地形地势变化,所铺设的管系设置了水平段、倾斜段、竖直段和转弯段,其转弯段为 45°与 90°弯头。

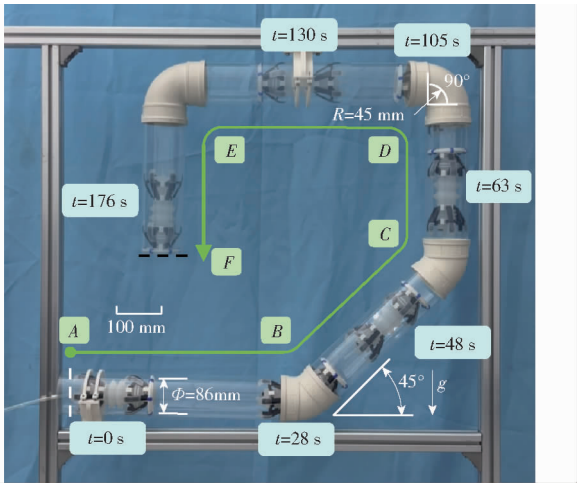


图 17 复杂管系测试

Fig. 17 Complex piping system testing

测试过程中机器人将由直线段进入,依次经过倾斜段、垂直段、转弯段($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$,图 17),全程平均速度约 12.5 mm/s。这表明所设计的管道机器人可实现复杂管系的爬行作业,满足农业灌溉管道探测机器人设计需求。

(1)速度特性

依据 3D 运动捕捉系统采集机器人头、尾标识点的位置信息,获得机器人前行位移随时间变化,见图 18。由图中可见,依据前行步态规划,随着循环次数的增加,机器人前行位移随之递增。因机器人蠕行特点,其理论计算与实际前行位移存在一定差异,较理论位移曲线机器人前行位移呈阶梯状,其整体爬行速度约为 30 mm/s。

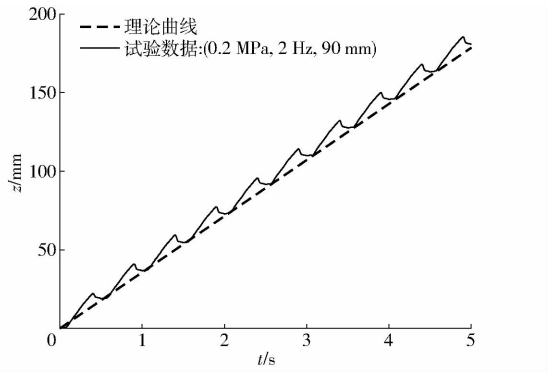


图 18　机器人位移随时间变化曲线

Fig. 18　Robot displacement as function of time

由不同控制参数下水平段的机器人爬行试验分析获得气压和通气频率对机器人爬行速度的影响，如图 19 所示。

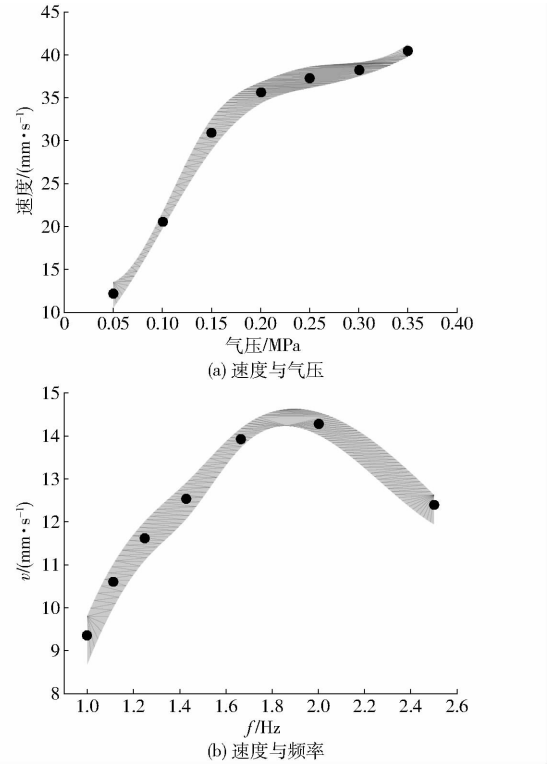


图 19　气压、频率对速度的影响

Fig. 19　Influence of air pressure and frequency on speed

图 19a 为机器人前行速度随气压的变化。当 $p \leqslant 0.2$ MPa 时，由于机器人前行步距随躯干腔室内充入气体压力的增加而增大，其前行速度随之呈线性递增；当 $p > 0.2$ MPa 时，由于接近耐压极限(0.4 MPa)，躯体致动器径向约束失效，随气压增加速度无明显增加。可见，气压是影响机器人前进速度的关键因素，机器人的最佳工作气压范围为 0.2 ~ 0.3 MPa。

图 19b 为机器人前行速度随通气频率的变化。由图中可见，随着通气频率的增加，步频随之增加，机器人速度先增加后减小。步频对机器人行进速度影响复杂，其快慢将会影响腔室内实际气压大小，进而影响步距。在高步频(2 Hz 以上)下，由于充泄压时间减短，机器人变形不完全，致使前行步距减小，前进速度下降。结果表明，在预设工作气压 0.1 MPa 下，步频为 2 Hz 时，达到最佳前行速度，为 14.5 mm/s。

(2)负载特性

图 20 为竖直段机器人负载能力测试，负载 500 g 和 1 000 g 时机器人爬行速度分别为 13.2 mm/s 和 8 mm/s，最大承载比为 4.2。这表明机器人工作气压下具备较强的负载能力，可以携带探测设备和清障工具，完成管道探查与清障作业。

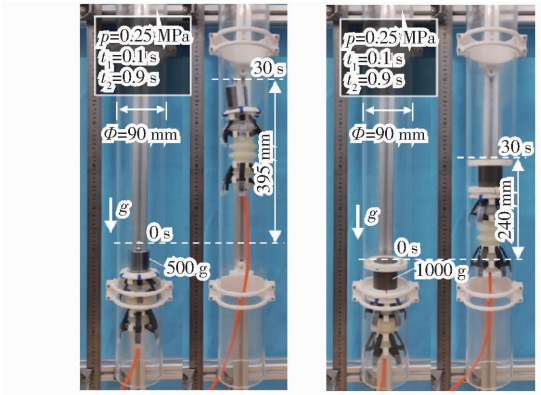


图 20　负载能力测试

Fig. 20　Load capacity tests

(3)管径与管道环境

不同管径下机器人的爬行测试结果见图 21。试验中，机器人通过更换不同高度的环形骨架来适应不同管径的管道，适配的骨架高度可以有效提升机器人爬行速度。经测试，机器人可爬行管径尺寸范围为 84 ~ 110 mm，满足目标管道。在内径为 90 mm 管道内，适配骨架高度为 16 mm，气压为 0.25 MPa、步频为 2 Hz 时，机器人爬行速度可达 40 mm/s。

农业灌溉主管道埋于地下，管道内时常存有枝叶、沙土、纸屑、布条等阻塞物堵塞管道；同时水肥一体化灌溉作业使管道内残留水和油性肥液等，因而

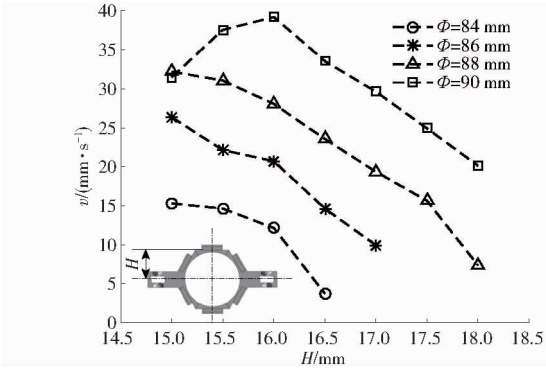
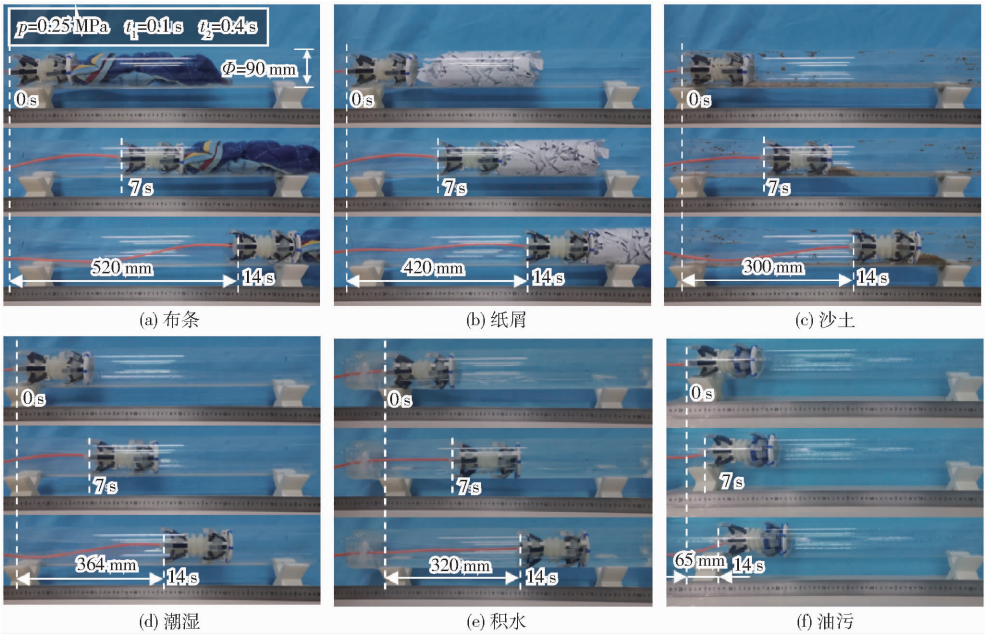


图 21　不同管径 Φ 下爬行速度随骨架高度变化曲线

Fig. 21　Crawling speed varied with height of skeleton under different pipe diameters

管道环境多存在潮湿、积水、油污等,此类环境下机器人爬行测试见图 22。图 22a、22b、22c 分别模拟了布条、纸屑、沙土阻塞物的清理作业过程;而在潮湿、积水、油污的管道环境下机器人爬行测试,见图 22d、22e、22f。经测试,机器人可应对灌溉主管道内多种环境并实现障碍物清除作业。



(a) 布条 (b) 纸屑 (c) 沙土

(d) 潮湿 (e) 积水 (f) 油污

图 22 管道环境

Fig. 22 Pipeline environment

在农业灌溉管道检查作业时,机器人将会面对管道内流体冲击,见图 23。试验中,管道持续灌入 0.6 L/s 的水流模拟管道破裂后在线作业场景。机器人分列式排布的柔性足和流线型躯干具有很好的低流阻性,可有效减轻水流冲击,测试过程中爬行平稳,速度约为 12.9 mm/s。

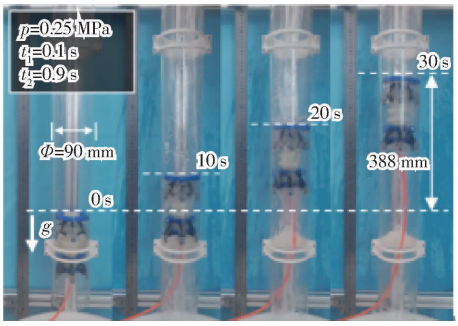


图 23 机器人水流冲击测试

Fig. 23 Robot performance under water flow impact conditions

(4)管道探查试验

图 24 为管系内机器人探查试验,包括直管段和转弯段。试验中,在弯头入口处和出口处分别贴有标记点 A、B,直管段终点处放置圆环标记物 C。利用机器人前端的视觉传感单元完成管道内部环境探查作业。探查作业时,机器人先由直管段进入第 1 段弯管内(90°弯头),接近弯管后,视觉传感单元捕捉到标记点 A,点 A 随机器人前行逐步拉近增大直至消失;16 s 后机器人爬出弯道,捕捉到标记点 B;



(a) 转弯段

(b) 直管段

图 24 管道探查试验

Fig. 24 Pipeline inspection experiments

当机器人穿过第 2 段弯管后，可清晰地观察到直管段末端的圆环标记物。

结果表明，干净管道动态探查过程中，机器人在直管段和过弯段内行进平稳且捕捉影像清晰，机器人具有管道探查作业能力。垂直段探查速度为 30.1 mm/s，45°和 90°弯管内探查速度分别为 15.2 mm/s 和 10.4 mm/s。

5　结论

（1）设计了一种应用于农业灌溉主管道探查的单驱动快速移动软体管道机器人，前后柔性足采用分列式均布在软体躯干外侧，通过单一气路通断控制实现快速前行。机器人长为 147 mm，质量为 236.5 g，适配管道管径范围为 84 ~ 110 mm，最大爬行速度为 40 mm/s，承载能力为 1 kg，可携带视觉传感单元实现复杂管系的探查作业。

（2）进行了柔性足和躯体致动器结构设计，并建立了二者力与变形模型，分别获得了轴向拉力作用下足部“三角形态”即足跟跨距和足尖高度变化规律和气压下躯体致动器的变形与力学特性，并进行试验验证。结果表明，所设计的前后足尖径向位移交替变化，躯体的力与伸缩变形可调可控满足机器人设计要求。

（3）建立了机器人前行过程中锚固力、摩擦阻力、前推力、牵拉力及步距的模型，并进行了管道内机器人的力学特性测试，验证了机器人蠕行的力学条件。

（4）规划机器人行进步态，建立了其速度模型，并进行了机器人运动学试验，结果表明，气压和通气频率是影响机器人行进速度的关键因素。随着气压的增加，机器人前进速度随之增加，但接近极限气压后行进速度变化趋于平缓，机器人的最佳工作气压范围为 0.2 ~ 0.3 MPa，在预设工作气压下选择相匹配的步频可达到最佳前行速度。

（5）搭建模拟农业灌溉主管道管系，进行了机器人垂直段负载特性、管径尺寸和管道环境爬行测试，测试了潮湿、油污和水流等多个作业环境，经测试能够应对复杂农业灌溉管道环境，具备一定清障和在线作业能力。

（6）利用机器人前端的视觉传感单元进行了管道内部环境探查作业。结果表明，机器人具有管道探查作业能力，干净管道动态探查作业过程中行进平稳且捕捉影像清晰。垂直段探查速度为 30.1 mm/s，45° 和 90° 弯管内探查速度分别为 15.2 mm/s 和10.4 mm/s。

参　考　文　献

[1] WANG H, WANG N, QUAN H, et al. Yield and water productivity of crops, vegetables and fruits under subsurface drip irrigation: a global meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2022, 269:107645.

[2] YANG P, BAI J, YANG M, et al. Negative pressure irrigation for greenhouse crops in China: a review[J]. Agricultural Water Management, 2022, 264:107497.

[3] 鲁旭涛, 张丽娜, 刘昊, 等. 智慧农业水田作物网络化精准灌溉系统设计[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 71 - 81.
LU Xutao, ZHANG Lina, LIU Hao, et al. Design of the networked precision irrigation system for paddy field crops in intelligent agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 71 - 81. (in Chinese)

[4] 袁寿其,李红,汤玲迪,等. 高效精准灌溉装备与技术创新及应用[J]. 农业机械学报,2025,56(9):312 - 325.
YUAN Shouqi, LI Hong, TANG Lingdi, et al. Innovation and application of high-efficiency precision irrigation equipment and technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(9):312 - 325. (in Chinese)

[5] LUO X, ZHAO Y, LI M, et al. Underground pipeline inspection and monitoring in mountainous areas: a state-of-the-art review and future perspectives[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2025, 164:106783.

[6] WANG W, WANG X, ZHENG G, et al. A modular soft pipe-climbing robot with high maneuverability[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024, 29(6): 4734 - 4743.

[7] LIU Qianwen, LI Canlin, WANG Guangfei, et al. Development of a pipeline-cleaning robot for heat-exchanger tubes[J]. Electronics, 2025, 14(12): 2321.

[8] CHAN C P Y, QU Z, SHIU K H, et al. In-pipe maintenance robot using spray-in-place pipe technique for long-distance and complex pipe environment[J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42(4):1226 - 1243.

[9] 张月,董雷,宦荣华,等. 风电叶片管道内窥履带机器人的设计与运动分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1884 - 1889.
ZHANG Yue, DONG Lei, HUAN Ronghua, et al. Design and kinematic analysis of crawler-type pipeline endoscope robots for wind turbine blades[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1884 - 1889. (in Chinese)

[10] 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. Research on the passability of tracked pipeline robot in bending pipes[J]. Robot, 2025, 47(5): 657 - 667. (in Chinese)

[11] CHEN H, JIANG Q, ZHANG Z, et al. Structural design and optimization of adaptive soft adhesion bionic climbing robot[J].

Automation in Construction, 2025, 171:105975.
[12] HE Z, ZHANG Q, BI Z,et al. A multimodal metameric earthworm-like robot for locomotion in multiterrain environments[J/OL]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2024. DOI:10.1109/TMECH.2024.3490795.
[13] 张春燕,朱锦翊,卢晨晖. 可折展管道蠕动并联机构设计与运动仿真[J]. 农业机械学报,2021,52(3):410-417.
ZHANG Chunyan, ZHU Jinyi, LU Chenhui. Design and motion simulation of wriggling parallel mechanism for collapsible pipeline[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):410-417. (in Chinese)
[14] 刘洪斌,冀楠. 蠕动式管道机器人结构设计与运动特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(8):1169-1177.
LIU Hongbin,JI Nan. Structural design and motion characteristics analysis of peristaltic pipeline robots[J]. Journal of Harbin Engineering University,2022,43(8):1169-1177. (in Chinese)
[15] YIN J, LIU X, RUI M, et al. Design and motion analysis of a simple screw driven in-pipe inspection robot base on adaptive variable pitch[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2025, 194: 105148.
[16] 张行, 富宽, 陈铭浩, 等. 压差式多节串联管道机器人越障时动力学演化规律及减振分析[J]. 机械工程学报, 2024, 60(8): 348-359.
ZHANG Hang, FU Kuan, CHEN Minghao, et al. Dynamic evolution and vibration reduction analysis of multi-section serial in-pipe inspection robot when crossing obstacles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(8): 348-359. (in Chinese)
[17] GUO D, WANG Y, KANG Z. A hollow shell-lattice soft robot in flexible pipelines with flowing fluids[J]. Advanced Science, 2025, 12(21): 2414882.
[18] LIN Y, XU Y X, JUANG J Y. Single-actuator soft robot for in-pipe crawling[J]. Soft Robotics, 2023, 10(1): 174-186.
[19] CHEN R, WANG H, WANG H, et al. A motion-sensing integrated soft robot with triboelectric nanogenerator for pipeline inspection[J]. Advanced Intelligent Systems, 2025, 7(6): 2400643.
[20] LIU J, MA G, ZHANG T, et al. Untethered soft crawling robot based on origami inspired soft-rigid hybrid actuator[J]. Journal of Bionic Engineering, 2025, 22(3): 1071-1084.
[21] VERMA M S, AINLA A, YANG D, et al. A soft tube-climbing robot[J]. Soft Robotics, 2018, 5(2): 133-137.
[22] KARIPOTH P, CHRISTOU A, PULLANCHIYODAN A, et al. Bioinspired inchworm-and earthworm-like soft robots with intrinsic strain sensing[J]. Advanced Intelligent Systems, 2022, 4(2): 2100092.
[23] LUNA G A A V, ASAARI M S M, SEMAN M T A, et al. A review on soft in-pipe navigation robot from the perspective of material, structure, locomotion strategy, and actuation technique[J]. Robotica, 2025, 43(1): 387-413.
[24] TANG C, DU B, JIANG S, et al. A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the sub-centimeter scale [J]. Science Robotics, 2022, 7(66): eabm8597.
[25] DU Y, ZHAO F, CAO C, et al. A single chamber Minibot with elastic hinges for adapting various diameter pipelines[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025,1(31):162-172.
[26] ZHANG B, FAN Y, YANG P, et al. Worm-like soft robot for complicated tubular environments[J]. Soft Robotics, 2019, 6(3): 399-413.
[27] LI M, WANG G, WANG J, et al. Development of an inchworm-like soft pipe robot for detection[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 253: 108392.
[28] TAO W, CHEN F, XU Y, et al. Bistable inflatable fabric actuators to amplify force and energy output for in-pipe soft robots [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025,30(6):5201-5212.
[29] ZHAO Y, HUANG H, YUAN W, et al. Worm-inspired, untethered, soft crawling robots for pipe inspections[J]. Soft Robotics, 2024, 11(4): 639-649.
[30] LIU X, SONG M, FANG Y, et al. Worm-inspired soft robots enable adaptable pipeline and tunnel inspection[J]. Advanced Intelligent Systems, 2022, 4(1): 2100128.