

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210909

# 锥形薄壁筒内轮式加工机器人自适应运动控制\*

李特<sup>1,2</sup>,葛宇航<sup>1,2</sup>,艾靖超<sup>1,2</sup>,兰天<sup>1,2</sup>,王永青<sup>1,2</sup>

(1.大连理工大学高性能精密制造全国重点实验室 大连 116024; 2.大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

**摘要:**当轮式机器人在锥形薄壁深腔筒内运动时,减小机器人与筒体零件之间的同轴度误差对提升加工精度十分重要。然而,使用分布式气缸作为变径机构的轮式机器人系统具有非线性、时滞性和复杂的摩擦力特性,这导致同轴运动偏差精确调控极其困难。为此,本文提出了一种基于变论域模糊控制理论的自适应运动控制方法,以提高机器人运动变径位移精度和偏航、俯仰角度控制精度。首先,本文建立了轮式机器人行走机构的树状运动学模型,并提出了位姿解算方法;接着,提出了自适应运动控制方法,并构建了基于 Simulink 与 Adams 的联合仿真系统,验证了方法的有效性;最后,利用机器人样机进行了筒内运动控制试验。结果表明:本文提出的自适应运动控制方法能够减小机器人筒内运动偏差,保证机器人变径位移偏差 $\leq \pm 1$  mm,偏航和俯仰角度偏差 $\leq \pm 1^\circ$ 。

**关键词:**特种机器人;管内机器人;运动控制;模糊控制

**中图分类号:** TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

## Adaptive motion control of wheeled machining robot in conical thin-walled cylinder

Li Te<sup>1,2</sup>, Ge Yuhang<sup>1,2</sup>, Ai Jingchao<sup>1,2</sup>, Lan Tian<sup>1,2</sup>, Wang Yongqing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** When a wheeled robot moves inside a tapered thin-walled deep cavity cylinder, how to reduce the coaxial deviation between the robot and the cylinder parts is crucial for improving machining accuracy. However, the wheeled robot system using the distributed cylinders as the variable radius mechanism has nonlinear, time-varying, and complex frictional characteristics, which make precise control of coaxial motion deviation extremely difficult. Therefore, this article proposes an adaptive motion control method based on the variable domain fuzzy control theory to improve the precision of robot motion radial displacement and yaw and pitch angle control precision. Firstly, the tree-like kinematic model of the wheeled robot walking mechanism is formulated, and a pose calculation method is proposed. Then, the adaptive motion control method is proposed, and a joint simulation system based on Simulink and Adams is established to evaluate the effectiveness of the method. Finally, the cylinder internal motion control experiments are implemented by using a robot prototype. The results show that the proposed adaptive motion control method can reduce the internal motion deviation of the robot and ensure that the radial displacement deviation of the robot is  $\leq \pm 1$  mm and the yaw and pitch angle deviation are  $\leq \pm 1^\circ$ .

**Keywords:** specialized robot; pipeline robot; control of motion; fuzzy control

## 0 引言

管道和筒体在能源运输、城市管网、航空航天高端装备、核电站、化工装备等领域广泛应用。然而,在制造和服役过程中,这些零件存在着许多技术难题,如管道长期运行后的内部缺陷检测、管内异物清除、长管道和筒体的

高精度焊接、内焊缝打磨等。因此,吸引了国内外许多学者致力于研究相关的制造、检测和维护设备。由于作业空间狭小,机器人化特种设备成为管道和筒体内部作业的主要发展趋势,应用前景广阔。目前,国内外学者已提出了多种管内/筒内移动机器人,包括轮式、履带式、螺旋驱动式和蠕动式等,用于检测、清淤、焊接、打磨等应用场景。

考虑任务需求,为了获得良好的管内运动位姿,国内外学者从机构和控制两个方面开展了研究。Yabe等<sup>[1]</sup>开发了一种弹性支撑臂结构的串联式螺旋驱动式管内机器人,利用弹簧的被动伸缩以适应管径变化并保持机器人以相对稳定的位姿运动。Lee等<sup>[2]</sup>开发了具有方形臂机构和旋转手机构的管内检测机器人,该机器人利用螺旋驱动方式进行主动位姿调整,具有很高的灵活性,但其稳定性相对偏弱。Elankavi等<sup>[3]</sup>设计了一种轮式壁压式管道检测机器人,机器人以中心轴为核心,由两个棱柱关节连接6个驱动臂,利用较少的电机和巧妙的机构实现了管内运动位姿调整。Zhao等<sup>[4]</sup>设计了一种用于长输管道检测的履带式机器人,该机器人可独立调节速度和半径,通过控制履带速度和压力的方式调整机器人的姿态;谢同雨等<sup>[5]</sup>设计了一种多功能的模块化蛇形管内作业机器人,该机器人各模块通过万向节装置连接构成,并通过气缸与支撑爪结构保证工作时的位姿。季艳波等<sup>[6]</sup>设计了一种小型轮式管道检测机器人并提出了一种基于模糊控制算法的姿态控制方法,但该方法更适用于二维平面下的位姿控制。目前,多数管内/筒内移动机器人实现位姿保持主要依靠被动式、差动式、主动控制机构等方法,对于高精度位姿调整研究较为有限。而一些高端装备的零件加工精度要求更高,对机器人筒内作业提出了更高要求。为了解决锥形薄壁筒类零件内焊缝智能加工的问题,李特等<sup>[7]</sup>考虑到零件自重变形、大范围变径运动、支撑力可调可控等因素,发明了具有锥形变径能力的轮式加工移动机器人。研究发现,机器人在筒体内部运动位姿控制对焊缝形貌加工精度等具有重要影响。因此,本文重点关注影响加工精度的重要因素之一——机器人筒内运动位姿控制问题,提出了一种筒内轮式加工机器人自适应运动控制方法。

## 1 问题描述

锥形筒类零件具有大变径、大腔深、薄壁变形等特征,内焊缝距离端口较远。针对该类零件的内焊缝加工需求,设计了具有移动单元和高精度测量-加工单元的轮式加工机器人,如图1所示。移动单元包含机器人主承力壳体、欠驱动气动变径机构及轮式运动机构3部分。欠驱动气动变径机构由前后2组(6个)间隔120°周向分布的气缸和欠驱动铰接车板构成,实现了管内径和锥度的自适应调整,而且支撑力可调可控。由于采用气缸驱动,更容易适应筒件弱刚性变形和加工过程的应变,确保支撑力稳定和加工精度。

在机器人工艺准备和加工过程中,保持机器人轴线与筒件轴线的高同轴度十分重要。较差的位姿可能会带

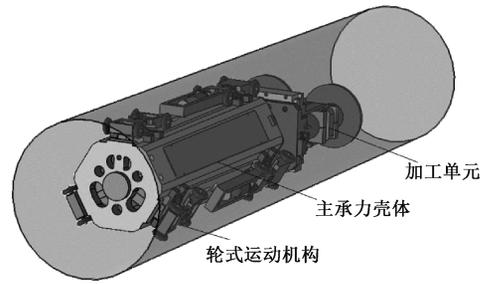


图1 机器人结构示意图

Fig. 1 Robot structure diagram

来如图2所示的多种负面影响:1) 极易引起滚轮支撑力不均或部分滚轮悬空,进而导致系统刚度降低;2) 增加加工轨迹规划和刀位补偿算法难度,引入不确定加工误差;3) 撞刀风险加大;4) 加工后,难以顺利连接退出机构。

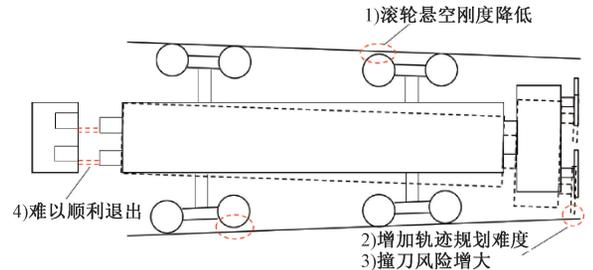


图2 机器人位姿对加工精度的影响

Fig. 2 The influence of robot attitude on machining accuracy

虽然欠驱动气动变径机构增强了对零件结构的适应性,但分布式气缸的控制解耦性让机器人系统存在非线性、时滞性及复杂的摩擦特性,这导致机器人运动位姿的解算控制十分困难。此外,筒件人工摆放位姿的不确定导致机器人的初始运动位姿是未知的,这进一步增加了位姿求解的复杂程度。因此,机器人在筒件内的运动位姿解算对于自适应控制是至关重要的一步。

## 2 筒内运动位姿解算

考虑人工装夹筒体位姿的随机性和系统复杂度,本文没有选择直接使用IMU传感器或多参量组合传感器方案,而是建立了机器人筒内运动模型,在现有位姿预测方法<sup>[8]</sup>不适用的条件下,仅利用气缸位移传感器反馈数据实现了机器人筒内运动位姿的高效率精确解算。

### 2.1 机器人正运动学建模

建立机器人系统坐标系,如图3所示,在锥筒端口中心建立基坐标系 $\{O_{ini}\}$ 。在机器人质心点,建立局部坐标系 $\{O_0\}$ 。在前后两组变径机构的中心位置建立局部坐标系 $\{O_A\}$ 与坐标系 $\{O_B\}$ 。然后分别在各个运动机构

与变径机构的铰接位置建立坐标系  $\{A_1\}$ 、 $\{A_2\}$ 、 $\{A_3\}$ 、 $\{B_1\}$ 、 $\{B_2\}$ 、 $\{B_3\}$ 。最后按照笛卡尔坐标系规则确定各坐标的  $X$ 、 $Y$  以及  $Z$  轴, 构建出树状结构运动学模型。

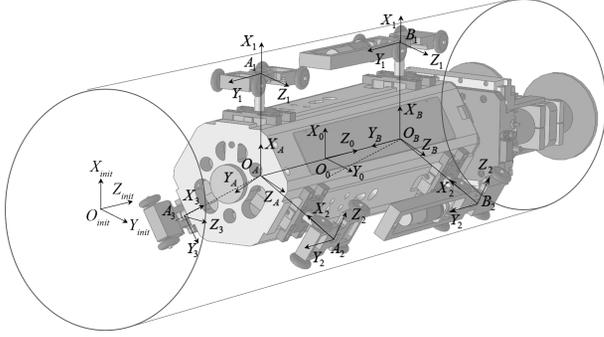


图3 运动学坐标系设定

Fig. 3 Kinematic coordinate system setting

$${}_{O_0}^{O_{mit}} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & X \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & Y \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

下面建立机器人各关节间的运动学关系。考虑机器人实际运动情况和运动学模型的复杂程度, 假设滚轮与筒内壁保持接触, 将4轮运动机构简化为2轮机构, 并在简化后的运动轮质心处建立坐标系  $\{A_{1a}\}$ 、 $\{A_{1b}\}$ 、 $\dots$ 、 $\{B_{3a}\}$ 、 $\{B_{3b}\}$ , 如图5所示。

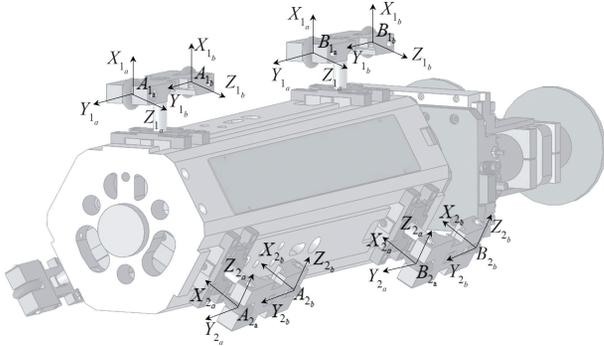


图5 简化运动学模型结构

Fig. 5 Simplified kinematic model structure

根据简化运动学模型基于 D-H 参数法确定各个坐标系间的 D-H 参数, 然后建立管道机器人质心坐标系

机器人在锥形筒内的运动位姿表示为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ , 如图4所示。

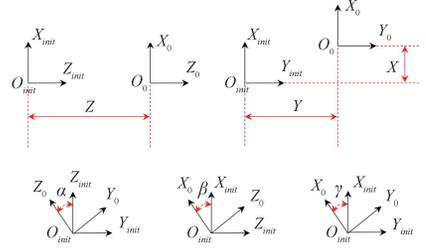


图4 机器人位姿示意图

Fig. 4 Robot pose diagram

质心坐标系  $\{O_0\}$  与基坐标系  $\{O_{mit}\}$  之间的齐次变换矩阵<sup>[9]</sup> 可表示为:

$\{O_0\}$  到各运动轮质心坐标系  $\{A_{1a}\}$ 、 $\{A_{1b}\}$ 、 $\dots$ 、 $\{B_{3a}\}$ 、 $\{B_{3b}\}$  的正运动学转换矩阵, 得到如下转换公式:

$${}_{A_{ij}}^{O_0} \mathbf{T} = {}_{O_A}^{O_0} \mathbf{T} {}_{O_{A_i}}^{O_A} \mathbf{T} {}_{A_{ij}}^{O_{A_i}} \mathbf{T} \quad (2)$$

$${}_{B_{ij}}^{O_0} \mathbf{T} = {}_{O_B}^{O_0} \mathbf{T} {}_{O_{B_i}}^{O_B} \mathbf{T} {}_{B_{ij}}^{O_{B_i}} \mathbf{T} \quad (3)$$

式中:  $A_i$ 、 $B_i$  为  $A$ 、 $B$  组第  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 个运动机构质心坐标系原点,  $O_{A_i}$ 、 $O_{B_i}$  为各组运动机构中间过渡坐标系原点,  $A_{ij}$ 、 $B_{ij}$  为第  $i$  个运动机构上对应编号为  $j$  ( $j=a, b$ ) 的滚轮坐标系原点。

将 D-H 参数带入式(3)和(4)得到正运动学变换矩阵<sup>[9]</sup>, 如下:

$${}_{X_{ij}}^{O_0} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{X_i} & 0 & \sin \theta_{X_i} & l + l_{X_i} + n \times d \times \sin \theta_{X_i} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{X_i} & 0 & \cos \theta_{X_i} & n \times d \times \cos \theta_{X_i} - d_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}_{X_{ij}}^{O_0} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta_{X_i}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sin \theta_{X_i}}{2} & \frac{n \times d \times \sin \theta_{X_i}}{2} - \frac{l_{X_i}}{2} - \frac{l}{2} \\ \frac{\sqrt{3} \times \cos \theta_{X_i}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3} \times \sin \theta_{X_i}}{2} & \frac{\sqrt{3} \times (l + l_{X_i})}{2} - \frac{n \times \sqrt{3} \times d \times \sin \theta_{X_i}}{2} \\ -\sin \theta_{X_i} & 0 & \cos \theta_{X_i} & n \times (d \times \cos \theta_{X_i} - d_x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $X_1$  为  $X(X=A, B)$  组第1个运动机构,  $X_i$  为  $X$  组第  $i(i=2, 3)$  个运动机构,  $X_{ij}$  为  $X$  组第  $i$  个运动机构上编号为  $j(j=a, b)$  的滚轮, 且当  $j=a$  时,  $n=1, j=b$  时,  $n=-1$ ;  $d_x$  中  $x=a, b$ , 其中  $d_a$  为坐标系  $\{O_0\}$  原点与坐标系  $\{O_A\}$  原点的距离,  $d_b$  为坐标系  $\{O_0\}$  原点与坐标系  $\{O_B\}$  原点的距离,  $d$  为铰接车板质心与滚轮质心的距离,  $l$  为变径机构在初始状态时坐标系  $\{O_A\}$  原点与坐标系  $\{A_1\}$ 、 $\{A_2\}$ 、 $\{A_3\}$  原点的距离;  $l_{A_1} \sim l_{A_3}$ 、 $l_{B_1} \sim l_{B_3}$  为各个变径机构中气缸位移值,  $\theta_{A_1} \sim \theta_{A_3}$ 、 $\theta_{B_1} \sim \theta_{B_3}$  为变径机构与运动机构铰接位置处的活动角度。上述参数中  $d_a$ 、 $d_b$ 、 $d$ 、 $l$  为常量, 其他则为变量, 随机器人在锥形筒内运动而发生改变。

当轮式运动机构与筒壁接触后, 假设滚轮与锥形筒内壁的接触为点接触, 设该接触点为  $P$ , 以滚轮  $A_{1a}$  为例, 接触状态如图6所示。

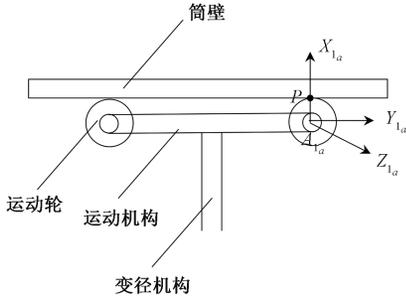


图6 运动机构筒内行走示意图

Fig. 6 Diagram of walking inside the cylinder of the motion mechanism

分析可知, 机器人运动的过程中, 滚轮坐标系  $\{A_{1a}\}$  各轴的方向始终不变, 因此接触点  $P$  始终在轴  $X_{1a}$  上, 则在坐标系  $\{A_{1a}\}$  中, 点  $P$  的位置坐标可以确定为:

$${}^{A_{1a}}P = \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $r$  为滚轮半径, 结合式(1)~(6), 可以将滚轮上点  $P$  的位置坐标从坐标系  $\{A_{1a}\}$  转换到基坐标系  $\{O_{init}\}$  中, 公式如下:

$${}^{O_{init}}P = {}_{O_0}^{O_{init}}T_{A_{1a}} {}^{A_{1a}}P = \begin{bmatrix} {}^{O_{init}}P_x \\ {}^{O_{init}}P_y \\ {}^{O_{init}}P_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过上式即可求得机器人各滚轮与锥形筒内壁任意接触点  $P$  在基坐标系  $\{O_{init}\}$  中的位置表达式。

## 2.2 位姿解算

在确定接触点  $P$  相对于基坐标系  $\{O_{init}\}$  的位置坐标后, 根据锥形筒的几何特性, 可以得到如下表达式:

$$P_x^2 + P_y^2 = \left(R - \frac{P_z}{k}\right)^2 \quad (8)$$

式中:  $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$  为接触点  $P$  在基坐标系  $\{O_{init}\}$  中的位置坐标,  $R$  为锥形筒的大端半径,  $k$  为锥形筒的锥度值。

结合式(7)和(8)即可得到包含机器人位姿参数的数学方程, 如下:

$$\begin{aligned} & (X + \cos\beta \times (l + l_{A_1}) + d \times (\cos\beta \times \sin\theta_{A_1} + \cos\theta_{A_1} \times \\ & \cos\gamma \times \sin\beta) + r \times (\cos\theta_{A_1} \times \cos\beta - \cos\gamma \times \sin\theta_{A_1} \times \sin\beta) - \\ & d_a \times \cos\gamma \times \sin\beta)^2 + (Y - d_a \times \sin\gamma + d \times \cos\theta_{A_1} \times \\ & \sin\gamma - r \times \sin\theta_{A_1} \times \sin\gamma)^2 = (R - (Z - \sin\beta \times (l + l_{A_1}) - \\ & d \times (\sin\theta_{A_1} \times \sin\beta - \cos\theta_{A_1} \times \cos\beta \times \cos\gamma) - \\ & r \times (\cos\theta_{A_1} \times \sin\beta + \cos\beta \times \cos\gamma \times \sin\theta_{A_1}) - \\ & d_a \times \cos\beta \times \cos\gamma) \div k)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

上式为滚轮  $A_{1a}$  所建立的位姿方程, 对于整个机器人, 12个滚轮可建立12个位姿方程, 联立12个位姿方程得到包含有18个变量( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $l_{A_1} \sim l_{B_3}$ 、 $\theta_{A_1} \sim \theta_{B_3}$ )的非线性方程组。在实际控制过程中, 通过变径机构上的位移传感器获取变量  $l_{A_1} \sim l_{B_3}$  的值, 将  $l_{A_1} \sim l_{B_3}$  作为一组输入参数带入非线性方程组中, 借助梯度算法与优化方法联立求解即可得到其余的12个输出变量值, 包括机器人位姿参数和铰接角度。结合实际随机给出一组输入参数, 求解得到的位姿参数如表1所示。

表1 位姿解算结果

Table 1 Attitude solution results

输入变量	数值	输出变量	数值
$l_{A_1}/\text{mm}$	50.609 3	$X/\text{mm}$	-0.491 5
$l_{A_2}/\text{mm}$	49.507 4	$Y/\text{mm}$	0.578 6
$l_{A_3}/\text{mm}$	51.403 6	$Z/\text{mm}$	934.4
$l_{B_1}/\text{mm}$	40.905 9	$\beta/(\circ)$	-0.045 7
$l_{B_2}/\text{mm}$	39.651 6	$\gamma/(\circ)$	-0.061 9
$l_{B_3}/\text{mm}$	40.396 5	$\alpha/(\circ)$	0

## 3 自适应运动控制方法

### 3.1 控制架构

考虑到机器人轮组与筒内内壁复杂的摩擦/支反作用力关系及气动驱动的非线性和时滞性, 本文提出基于变论域模糊理论<sup>[10]</sup>的机器人锥形筒内自适应运动控制方法。由于变径机构中气缸位移量及驱动轮速度是主动调控机器人在锥形筒内运动位姿的最主要控制量, 设计控制器结构框图如图7所示。

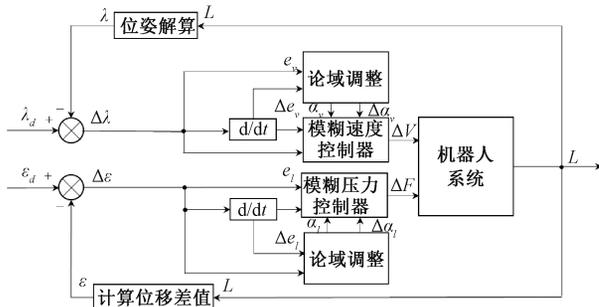


图7 自适应控制架构

Fig. 7 Principle of adaptive control

该自适应控制方法包括速度控制与压力控制两部分,其输入分别  $\lambda_d$  和  $\varepsilon_d$ , 经过计算得到偏差  $\Delta\lambda$  与  $\Delta\varepsilon$ , 并作为输入量分别传入模糊压力控制器与模糊速度控制器。模糊控制器将输出速度变化值  $\Delta V$  和压力变化值  $\Delta F$  传入机器人系统, 机器人系统输出气缸位移值  $L$  并经过一定处理反馈给控制器输入端实现自适应运动控制。

### 3.2 模糊控制器设计

基于上述控制架构本文设计了两种双输入单输出的模糊控制器。首先确定模糊压力控制器的输入输出以及相应论域, 由第2节可知  $A$ 、 $B$  两组变径机构的气缸位移值分别为  $l_{A_1} \sim l_{A_3}$ 、 $l_{B_1} \sim l_{B_3}$ , 定义  $A$  组变径机构气缸位移值的均值为  $l_{\text{average}_A}$ ,  $B$  组变径机构气缸位移值的均值为  $l_{\text{average}_B}$ , 由上述控制架构定义位移差值  $\varepsilon_d$ , 其计算公式为:

$$\varepsilon_j = l_j - l_{\text{average}_j} \quad (10)$$

式中:  $i$  ( $i=A, B$ ) 表示组别,  $j$  ( $j=1, 2, 3$ ) 对应各个变径机构, 然后定义模糊控制器输入为偏差  $e_{A_1}$ 、 $e_{A_2}$ 、 $e_{A_3}$  和  $e_{B_1}$ 、 $e_{B_2}$ 、 $e_{B_3}$ , 偏差变化率定义为  $\Delta e_{A_1}$ 、 $\Delta e_{A_2}$ 、 $\Delta e_{A_3}$  和  $\Delta e_{B_1}$ 、 $\Delta e_{B_2}$ 、 $\Delta e_{B_3}$ , 计算公式如下:

$$e_j = \Delta\varepsilon = \varepsilon_d - \varepsilon_j \quad (11)$$

$$\Delta e_j = \frac{de_j}{dt} \quad (12)$$

式中:  $i$  和  $j$  的含义同上。模糊控制器输出为气缸压力变化值  $\Delta F$ , 分别设为  $\Delta F_{A_1}$ 、 $\Delta F_{A_2}$ 、 $\Delta F_{A_3}$  和  $\Delta F_{B_1}$ 、 $\Delta F_{B_2}$ 、 $\Delta F_{B_3}$ 。根据气缸位移范围以及机器人在锥形筒内的实际情况, 偏差  $e_{ij}$  的论域范围首先通过大量的行走实验得到了前后两组位移传感器的变化范围大致在 40~50 mm 以及 45~55 mm 这两个区间, 而各个位移传感器运动中的偏差范围大致是 10 mm, 同时为了给控制器留有余量, 最终将偏差值范围定义为  $[-6 \text{ mm}, 6 \text{ mm}]$ , 设其量化等级为 7 级, 模糊集合<sup>[11]</sup>为  $\{NB, NM, NS, ZV, PS, PM, PB\}$ , 分别代表负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大; 确定偏差变化率

$\Delta e_{ij}$  的论域范围是  $[-0.6 \text{ mm/s}, 0.6 \text{ mm/s}]$ , 偏差变化率  $\Delta e_{ij}$  的模糊集合同上, 输出量  $\Delta F_{ij}$  的论域范围主要考虑气缸压力与位移值之间的变化关系, 经过大量实验确定为  $[-270 \text{ N}, 270 \text{ N}]$ , 模糊集合同上。

考虑模糊速度控制器的设计, 机器人的差速控制主要依靠  $B_2$ 、 $B_3$  两组滚轮进行控制, 所以控制器的输出量为滚轮速度变化  $\Delta V_2$  以及  $\Delta V_3$ 。结合位姿解算模型, 机器人两侧速度变化直接影响的是机器人偏航角  $\alpha$ , 次要影响为机器人俯仰角  $\beta$ , 上述控制架构中  $\lambda_d$  代表角度差值, 其计算公式如下:

$$\lambda_\alpha = \alpha - \alpha_0 \quad (13)$$

$$\lambda_\beta = \beta - \beta_0 \quad (14)$$

式中:  $\alpha$  为俯仰角与  $\beta$  为偏航角,  $\alpha_0$  与  $\beta_0$  分别为初始姿态值, 在本文控制中默认为 0, 经过计算得到偏差  $\Delta\lambda$  分别对应  $\Delta\lambda_\alpha$  和  $\Delta\lambda_\beta$ , 然后采集不同的气缸位移值数据代入位姿解算模型得到姿态偏差的大概范围, 最终确定  $\Delta\lambda_\alpha$  的论域范围是  $[-2.5^\circ, 2.5^\circ]$ ,  $\Delta\lambda_\beta$  的论域范围是  $[-2.0^\circ, 2.0^\circ]$ , 模糊集合设置同上。

第2步确定隶属度函数, 本文选取三角形隶属度函数, 然后根据模糊集合建立如表2所示。

表2 模糊规则表

Table 2 Fuzzy rule table

$\Delta e_{ij}$	$e_{ij}$						
	NB	NM	NS	ZV	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZV	ZV
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZV	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZV	NS	NS
ZV	PM	PM	PS	ZV	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZV	NS	NS	NM	NM
PM	PS	PS	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZV	ZV	NM	NM	NM	NB	NB

第3步使用加权平均法<sup>[12-13]</sup>对模糊推理的模糊输出量进行解模糊, 公式如下:

$$u = \frac{\sum_{m=1}^n \mu_{1m}(e_{ij}) \mu_{2m}(\Delta e_{ij}) u_m}{\sum_{m=1}^n \mu_{1m}(e_{ij}) \mu_{2m}(\Delta e_{ij})} \quad (15)$$

式中:  $\mu_{1m}(e_{ij})$ 、 $\mu_{2m}(\Delta e_{ij})$  为输入变量隶属度函数,  $u_m$  为第  $m$  个输出。

考虑到控制规律的复杂性, 为了能快速精确调整控制参数, 采用了变论域控制, 引入伸缩因子<sup>[14]</sup>来解决模糊控制中控制规则在零点附近的数量较少而导致控制精

度低下的问题。最后设计相应的伸缩因子,以模糊压力控制器为例,定义上述输入  $e_{ij}$  的模糊论域为:

$$X_{ij}(e) = [-E_{ij}, E_{ij}] \tag{16}$$

式中:  $i(i=A,B)$  表示组别,  $j(j=1,2,3)$  对应各个变径机构,引入伸缩因子后将对输入变量的初始论域进行伸缩调节变化,从而将初始论域变为:

$$X_{ij}(e) = [-\alpha(x_{ij})E_{ij}, \alpha(x_{ij})E_{ij}] \tag{17}$$

式中:  $\alpha(x_{ij})$  为输入变量  $x_{ij}$  的伸缩因子,其论域伸缩变化如图 8 所示。

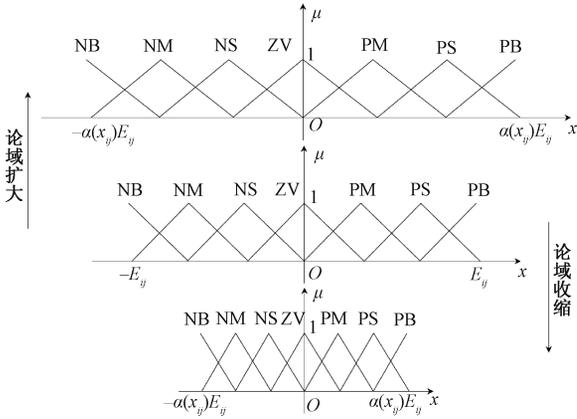


图 8 论域伸缩变化

Fig. 8 Theory of domain change by extension

伸缩因子要满足误差较大时,伸缩因子使模糊论域扩张,对应隶属度函数被拉伸,误差较小时,伸缩因子使模糊论域收缩,对应隶属度函数被压缩。本文采用基于比例函数的方法<sup>[13,15]</sup>设计伸缩因子,公式如下:

$$\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^\tau + \varepsilon \tag{18}$$

式中:  $x$  表示输入变量,  $\varepsilon$  为一个充分小的正数,  $\tau \in (0,1)$ ,其中  $\tau=0.5, \varepsilon=0.05$ 。

对于输出论域的伸缩因子选择,采用如下公式:

$$\beta(e, \Delta e) = \left[ \left(\frac{|e|}{E}\right)^\tau + \left(\frac{|\Delta e|}{EC}\right)^\tau \right] / 2 \tag{19}$$

式中:  $e$  和  $\Delta e$  分别为模糊控制的输入偏差和偏差变化率,  $E$  和  $EC$  分别为偏差和偏差变化率的论域。

### 4 仿真试验

#### 4.1 Simulink/Adams 联合仿真

为了验证本文所提出的自适应运动控制方法,基于 Simulink 搭建了上述自适应控制方法的仿真模型,如图 9 所示。在 Adams 中搭建了机器人模型,通过 Adams 与 Simulink 联合仿真对本文提出的自适应运动控制方法进行了验证。

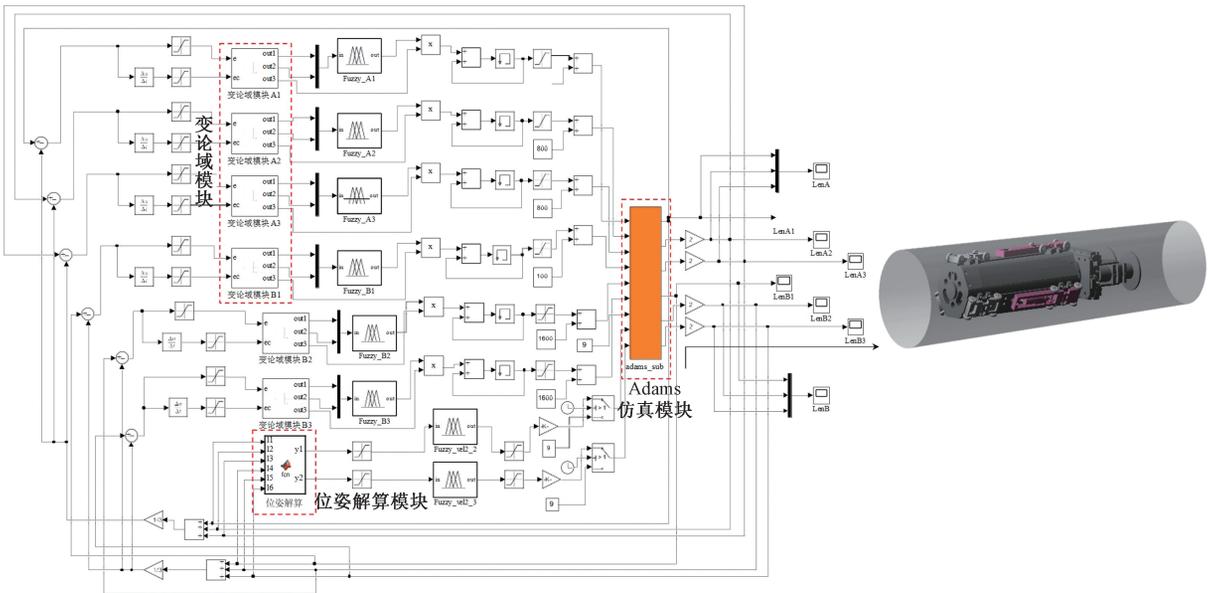
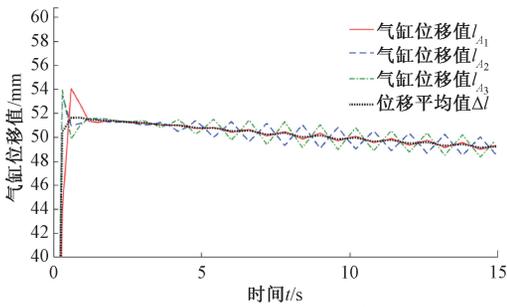


图 9 Simulink/Adams 联合仿真模型

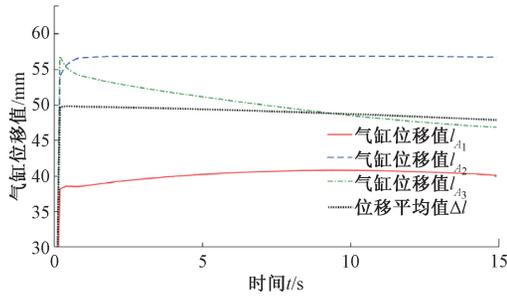
Fig. 9 Simulink/Adams co-simulation model

在 Adams 模型中设置相应参数,并在滚轮与锥形筒内壁处添加接触并设置摩擦系数,最后导出模型。然后在 Simulink 模型中,根据经验并结合机器人自身重力设置各个变径机构的初始压力值、驱动轮的初始速度、仿真时间和采样频率等参数,最后开始仿真。

当机器人各组气缸位移值与位移均值越接近时,代表此时机器人位姿越好。因此通过各组气缸位移值的变化曲线以及位姿变化曲线即可判断仿真过程中自适应控制方法对机器人的控制效果,气缸位移值变化曲线如图 10 和 11 所示。



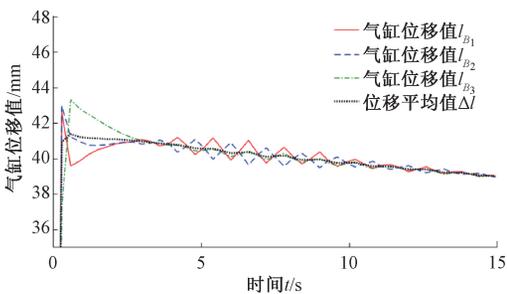
(a) 基于自适应控制算法  
(a) Based on adaptive control algorithm



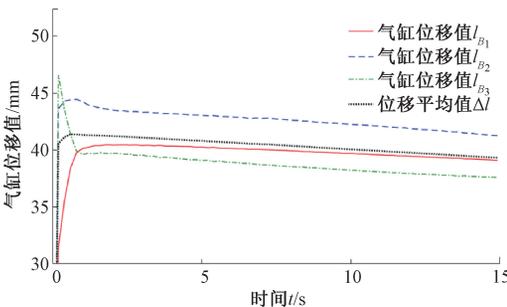
(b) 无自适应控制  
(b) No adaptive control

图 10 A 组气缸位移值变化曲线

Fig. 10 Group A cylinder displacement change curve



(a) 基于自适应控制算法  
(a) Based on adaptive control algorithm



(b) 无自适应控制  
(b) No adaptive control

图 11 B 组气缸位移值变化曲线

Fig. 11 Group B cylinder displacement change curve

从图 10 和 11 可以看出,若不采用控制算法调节,各气缸位移值与均值的位移偏差会逐渐变大,使得最终机器人同轴误差较大;采用本文所设计的自适应运动控制

算法后,机器人各气缸位移值将稳定在一个小范围内波动,符合预期要求。

机器人的位姿变化曲线如图 12 所示。从位姿变化曲线可以看到, $X$  方向偏移与俯仰角和偏航角迅速达到了稳定状态, $Y$  方向偏移在初期的较大波动后逐渐趋于平稳。最终  $X$ 、 $Y$  方向偏移在 0.15 mm 附近,俯仰角稳定在  $0.1^\circ$ ,偏航角稳定在  $-0.1^\circ$ ,回转角在本文中的影响微乎其微因此不做考虑。机器人最终位姿较为理想,验证了该自适应控制方法有良好的控制效果。

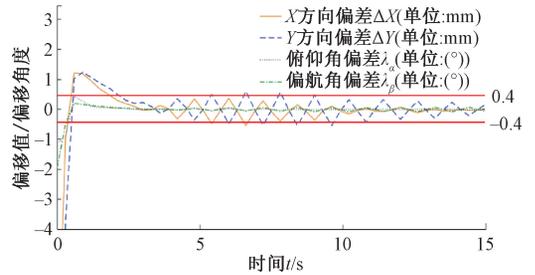


图 12 机器人位姿变化曲线

Fig. 12 Robot attitude change curve

本文所设计的控制算法的控制目标包括气缸位移值与机器人的俯仰、偏航等姿态参数。为了更好地表征机器人同轴度误差,本文以气缸位移传感器位移值和机器人俯仰角和偏航角作为控制算法的评价标准,并将各组位移值与平均值的最大偏差范围命名为变径位移偏差,以变径位移偏差和姿态偏差共同作为控制算法的评价指标。

表 3 和 4 所示为机器人运动停止后各气缸位移平均值以及对应的变径位移偏差值和机器人最终姿态偏差。

表 3 气缸位移偏差仿真结果

Table 3 Cylinder displacement deviation simulation results

mm				
组别	平均值	偏差 $\epsilon_1$	偏差 $\epsilon_2$	偏差 $\epsilon_3$
A	49.586 3	-0.216 4	-0.201 7	0.418 2
B	39.021 0	0.050 6	-0.061 9	0.011 3

表 4 机器人姿态偏差仿真结果

Table 4 Simulation results of robot attitude deviation

$(^\circ)$		
参数类型	$\lambda_\alpha$ (俯仰角)	$\lambda_\beta$ (偏航角)
数值	0.013 5	-0.077 20

从表 3 和 4 数据可以看出机器人气缸 A 组位移偏差范围是  $-0.22 \sim 0.42$  mm, B 组位移偏差范围是  $-0.06 \sim 0.05$  mm, 总体变径位移偏差在  $\pm 0.5$  mm 内, 机器人姿态偏差分别为  $0.01^\circ$  和  $-0.077^\circ$ , 总体姿态偏差在  $\pm 0.1^\circ$  内, 证明了该自适应控制算法具有期望的调节效果。

4.2 样机实验

机器人样机如图 13 所示,将机器人送入锥形筒内部,然后控制机器人在锥形筒内运动,如图 14 所示。通过图 15 所示界面监测机器人在锥形筒内的气缸位移值变化,从而判断机器人的位姿情况。



图 13 机器人样机

Fig. 13 Prototype robot



图 14 机器人管道内运动

Fig. 14 The robot moves inside the pipe

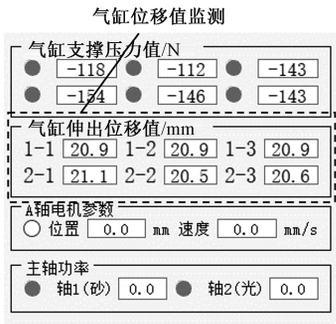


图 15 机器人状态监测界面

Fig. 15 Robot condition monitoring interface

轮式机器人气动变径机构气缸在锥形筒内刚伸出时位移值如图 16 所示。

气缸伸出位移值/mm					
1-1	49.6	1-2	54.8	1-3	51.5
2-1	42.6	2-2	51.4	2-3	48.4

图 16 机器人初始状态气缸位移值

Fig. 16 Cylinder displacement value in the initial state of the robot

机器人在无算法调节模式下筒内行走一段距离后各个气缸位移值如图 17 所示。

气缸伸出位移值/mm					
1-1	51.0	1-2	48.7	1-3	46.6
2-1	42.8	2-2	47.0	2-3	43.7

图 17 机器人无算法模式气缸位移值

Fig. 17 Cylinder displacement value in no algorithm mode of the robot

经自适应运动控制算法调节后机器人各个气缸位移值如图 18 所示。

气缸伸出位移值/mm					
1-1	48.6	1-2	48.9	1-3	47.3
2-1	44.6	2-2	44.4	2-3	43.1

图 18 自适应运动控制结束气缸位移值

Fig. 18 Cylinder displacement value when the adaptive motion control end

对比图 16~18 气缸位移值数据,机器人刚进入锥形筒时气缸位移值差距很大,机器人在无算法调节模式下筒内行走运动各气缸位移值偏差没有太大变化,在使用了自适应控制算法进行调节后,机器人气缸的变径位移偏差得到了明显的改善。机器人使用自适应控制算法前后变径位移偏差如表 5 所示,前后姿态变化如表 6 所示。

表 5 样机实验气缸位移偏差比较

Table 5 Comparison of cylinder displacement deviation in prototype test

组别	mm			
	平均值	偏差 $\varepsilon_1$	偏差 $\varepsilon_2$	偏差 $\varepsilon_3$
A(不使用算法)	48.77	2.23	-0.07	-2.17
A(使用算法)	48.27	0.33	0.63	-0.97
B(不使用算法)	44.50	-1.70	2.50	-0.80
B(使用算法)	44.03	0.57	0.37	-0.93

表 6 样机实验机器人姿态偏差比较

Table 6 Comparison of attitude deviation of prototype experimental robot

参数类型	$(^\circ)$	
	$\lambda_\alpha$ (俯仰角)	$\lambda_\beta$ (偏航角)
数值(不使用算法)	-0.63	-1.78
数值(使用算法)	-0.57	-1.03

分析上表数据可知,样机实验中不使用控制算法机器人 A 组变径位移偏差最大为 2.23 mm, B 组变径位移偏差最大为 2.5 mm,总体偏差范围在  $\pm 5$  mm 内,使用控制算法后 A 组变径位移偏差最大为 -0.97 mm, B 组变径

位移偏差最大为 $-0.93\text{ mm}$ , 总体偏差范围在 $\pm 1\text{ mm}$ 内; 姿态方面不使用控制算法俯仰角为 $-0.63^\circ$ , 偏航角为 $-1.78^\circ$ , 姿态角总体偏差在 $\pm 2^\circ$ 左右, 使用控制算法后俯仰角为 $-0.57^\circ$ , 偏航角为 $-1.03^\circ$ , 姿态角总体偏差在 $\pm 1^\circ$ 左右, 上述实验结果基本验证了所提算法的有效性。

通过大量样机实验发现当机器人变径位移偏差在 $\pm 1\text{ mm}$ 以内、姿态角度偏差在 $\pm 1^\circ$ 以内时可以保证机器人加工单元的精度要求。此外, 本算法对机器人与筒体的相对初始位姿变化、摩擦特性变化(打磨粉尘及油污)、筒体姿态变化(装夹角度偏差)等扰动都具有较为不错的适应能力。综上, 本文所设计的自适应运动控制方法具有较好的控制效果。

## 5 结 论

针对分布式独立驱动气缸作为变径机构的轮式机器人在锥形薄壁筒内运动时同轴运动偏差精度调控困难的问题, 本文提出了一种基于变论域模糊控制理论的自适应运动控制方法, 并通过仿真分析与样机实验证明了该方法对于初始位姿变化、筒体姿态/内径变化等扰动有很好的适应能力, 并将机器人变径位移偏差控制在 $\pm 1\text{ mm}$ 以内, 姿态角度偏差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] YABE S, MASUTA H, HUN-OK L. New in-pipe robot capable of coping with various diameters [ J ]. Control, 2012 12th International Conference on Automation and Systems (ICCAS), 2012, 17-21 (Oct): 151-156.
- [ 2 ] LEE D, PARK J, HYUN D, et al. Novel mechanisms and simple locomotion strategies for an in-pipe robot that can inspect various pipe types [ J ]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 56: 52-68.
- [ 3 ] ELANKAVI R S, DINAKARAN D, DOSS A S A, et al. Design and motion planning of a wheeled type pipeline inspection robot [ J ]. Journal of Robotics and Control (JRC), 2022, 3(4): 415-430.
- [ 4 ] ZHAO W, ZHANG L, KIM J. Design and analysis of independently adjustable large in-pipe robot for long-distance pipeline [ J ]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3637.
- [ 5 ] 谢同雨, 李清, 丁煜文, 等. 多模块蛇形管道打磨机器人的设计与分析 [ J ]. 机器人, 2020, 42(6): 672-685.  
XIE T Y, LI Q, DING Y W, et al. Design and analysis of multi-module snake pipe polishing robot [ J ]. Robot, 2020, 42(6): 672-685.
- [ 6 ] 季艳波. 轮式管道检测机器人控制系统的研发 [ D ].

哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

- JI Y B. Research and development of control system for wheeled pipeline inspection robot [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [ 7 ] 李特, 刘海波, 白承栋, 等. 一种变径壳体内焊缝随形磨抛加工机器人: CN202111071407. X [ P ]. 大连理工大学 [ 2021-12-14 ].  
LI T, LIU H B, BAI CH D, et al. The utility model relates to a robot for polishing and polishing internal welds of a variable diameter shell: CN202111071407. X [ P ]. Dalian University of Technology [ 2021-12-14 ].
- [ 8 ] 陶孟卫, 姚宇威, 元海文, 等. 无人机自主降落视觉标识设计及位姿测量方法 [ J ]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 155-164.  
TAO M W, YAO Y W, YUAN H W, et al. Visual target design and pose measurement method for UAV autonomous landing [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 155-164.
- [ 9 ] 张越. 机器人运动学参数辨识及冗余参数研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
ZHANG Y. Robot kinematic parameter identification and redundant parameter research [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [ 10 ] 冀常鹏, 孙巍. 变论域自适应模糊 PID 控制系统仿真与应用 [ J ]. 测控技术, 2018, 37(10): 119-123.  
JI CH P, SUN W. Simulation and application of variable universe adaptive fuzzy-PID control system [ J ]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(10): 119-123.
- [ 11 ] 周向阳, 舒通通, 吕子豪, 等. 基于模糊切换增益调节的惯性稳定平台滑模控制 [ J ]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 263-271.  
ZHOU X Y, SHU T T, LYU Z H, et al. Sliding mode control of inertially stabilized platform based on fuzzy switching gain adjustment [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 263-271.
- [ 12 ] 钱虹, 宋昊泽. 核电站稳压器压力自适应变论域模糊控制 [ J ]. 控制工程, 2023(3): 1-9, DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20210486.  
QIAN H, SONG H Z. Adaptive variable domain fuzzy control of pressurizer pressure in nuclear power plant [ J ]. Control Engineering, 2023(3): 1-9, DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20210486.
- [ 13 ] 王涛. 基于改进变论域模糊 PID 算法的结构半主动控制方法研究 [ D ]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
WANG T. Research on structural semi-active control method based on improved variable theory domain fuzzy

PID algorithm [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.

- [14] 邵诚,董希文,王晓芳. 变论域模糊控制器伸缩因子的选择方法[J]. 信息与控制, 2010(5): 26-31.

SHAO CH, DONG X W, WANG X F. Selection method of the contraction-expansion factor of variable universe fuzzy controller[J]. Information and Control, 2010(5): 26-31.

- [15] 杨丽. 变论域自适应模糊控制在机械手轨迹跟踪中的应用研究[D]. 成都:西南石油大学, 2016.

YANG L. Study on the application of variable domain adaptive fuzzy control in manipulator trajectory tracking[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

## 作者简介



**李特**, 2016年于中科院沈阳自动化研究所获得博士学位, 现为大连理工大学机械工程学院副教授、博士生导师, 主要研究方向为仿生机器人、特种加工机器人、机器人化智能制造等。

E-mail: teli@dlut.edu.cn

**Li Te** received his Ph. D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in Shenyang in 2016. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor in the School of Mechanical Engineering at Dalian University of Technology. His main research interests include bionic robots, special processing robots, robotized intelligent manufacturing, and so on.



**葛宇航**, 2020年于武汉理工大学获得学士学位, 现为大连理工大学在读研究生, 主要研究方向为机器人设计与开发。

E-mail: 939020591@qq.com

**Ge Yuhang** received his B. Sc. degree from

Wuhan University of Technology in 2020. He is currently a graduate student at Dalian University of Technology. His main research interests include robot design and development.



**艾靖超**, 2020年于大连理工大学获得学士学位, 现为大连理工大学在读研究生, 主要研究方向为机器人设计与开发。

E-mail: a346664694@163.com

**Ai Jingchao** received his B. Sc. degree from Dalian University of Technology in 2020. He is currently a graduate student at Dalian University of Technology. His main research interests include robot design and development.



**兰天**, 2021年于大连理工大学获得硕士学位, 现为大连理工大学在读博士, 特种移动机器人智能加工技术等。

E-mail: lantian123@mail.dlut.edu.cn

**Lan Tian** received his M. Sc. degree from Dalian University of Technology in 2021. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Dalian University of Technology. His research interests include intelligent machining technology for special mobile robots.



**王永青** (通信作者), 2002年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为测量-加工一体化制造理论与技术、装备在机测量理论与技术等。

E-mail: yqwang@dlut.edu.cn

**Wang Yongqing** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2002. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Dalian University of Technology. His main research interests include the theory and technology of integrated measurement-manufacturing, and machine measurement theory and technology for equipment.