

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.044

改进模糊自适应 PID 的巷道清洗机器人冲洗机械臂运动控制

杜伟¹,程超辉¹,王江龙¹,杜磊²,董璇²

(1. 陕西小保当矿业有限公司,陕西 神木 719302; 2. 陕西航泰电气股份有限公司,陕西 西安 710119)

摘要:巷道清洗机器人冲洗机械臂的运动控制易受到复杂的地质条件影响,导致运动不稳定。为解决此问题,提出基于改进模糊自适应 PID 的巷道清洗机器人冲洗机械臂运动控制方法。基于巷道清洗机器人冲洗机械臂的运动关系,在笛卡儿坐标系下建模,用三次多项式确定控制参数;建立模糊 PID 控制器,并用 Lyapunov 函数改进增益矩阵;通过输入运动学模型和控制参数,实现冲洗机械臂的运动控制。实验结果显示:所提方法在控制平稳度方面表现出色,机械臂运动振幅小,在巷道清洗机器人冲洗机械臂的运动控制实践中具有良好的应用前景。

关键词:机械臂控制;运动控制;改进模糊自适应 PID;巷道清洗机器人

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)01-0236-04

Motion Control of Rinsing Robot Arm for Tunnel Cleaning Based on Improved Fuzzy Adaptive PID

DU Wei¹, CHENG Chaohui¹, WANG Jianglong¹, DU Lei², DONG Xuan²

(1. Shaanxi Xiaobaodang Mining Co., Ltd., Shenmu 719302, China; 2. Shaanxi Hangtai Electric Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: A motion control method for the flushing robotic arm of a tunnel cleaning robot based on improved fuzzy adaptive PID is proposed to solve the motion uncertainty of the washing arm control of tunnel cleaning robot easily affected by complicated geological conditions. Based on the motion relationship of the washing robotic arm of the tunnel cleaning robot, the model is conducted in Cartesian coordinate system and its control parameters are determined using cubic polynomials. A fuzzy PID controller is determined and the gain matrix is improved using Lyapunov function. By inputting the kinematic model and control parameters, the motion control of the flushing robotic arm is achieved. The experimental results show that the proposed method performs well in controlling smoothness with small motion amplitude of the robotic arm, and has good application prospects in the motion control practice of the washing robotic arm of the tunnel cleaning robot.

Keywords: robotic arm control; motion control; improve fuzzy adaptive PID; tunnel cleaning robot

0 引言

复杂恶劣的巷道环境使得人工清洗难度大、效率低,而清洗机器人则能自动作业,提高效率与安全性。因此,对机器人机械臂的精准控制显得至关重要。为此,很多研究人员提出了机械臂运动控制方法。何嘉懿等^[1]提出了基于多物理域混合的机械臂运动控制方法,利用流体动力学模型计算误差反馈,结合执行器映射建立控制模型。但该方法易受环境如磁场、热场影响,降低了其控制精度和稳定性。陆子霖等^[2]提出了基于多模态人机接口的机械臂运动控制方法,通过将语音、头部姿态等信号转换为二维指令,实现多角度控制。但该方法需集成多种传感器,增加了控制的复杂性和维护难度。赵玮^[3]提出了考虑外部干扰的机

械臂运动控制方法,用超螺旋归零神经网络优化全局稳定性。但该方法对非线性干扰的预测补偿能力有限,复杂干扰下效果不佳。李林安等^[4]提出了基于流量连续方程的机械臂运动控制方法,解析结构耦合关系并建立方程,通过执行器驱动模型实现控制。但该方法在复杂环境中适用性差,影响其控制精度。鉴于上述方法控制效果不佳,本研究提出了一种基于改进模糊自适应 PID 的巷道清洗机器人冲洗机械臂运动控制方法,通过构建改进的模糊自适应 PID 控制器实现稳定控制。

1 巷道清洗机器人冲洗机械臂运动控制方法设计

1.1 巷道清洗机器人冲洗机械臂运动学建模

机械臂连杆坐标系间的运动关系,是巷道清

基金项目:陕西省科技厅项目(S2024-YD-QCYK-0291)

第一作者简介:杜伟(1988—)男,陕西神木人,工程师,硕士,研究方向为煤矿通风管理,wsr199719@163.com。

洗机器人冲洗臂控制的基础^[5-6]。建立笛卡儿坐标系对机械臂的工作空间进行表示。在此基础上,采用D-H法进行运动学建模,根据坐标变换理论,得到如式(1)所示的矩阵形式^[7-8]。

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i \cos\gamma_i & \sin\alpha_i \sin\gamma_i & \gamma_i \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \cos\gamma_i & -\cos\alpha_i \sin\gamma_i & \gamma_i \sin\alpha_i \\ 0 & \sin\gamma_i & \cos\gamma_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: T 为齐次变换矩阵; i 为机器人的机械臂关节; γ_i 为轴向平移矩阵; d_i 为机械臂关节沿 z 轴的平移距离; α_i 为机械臂关节沿 x 轴的平移距离^[9-10]。

将机械臂在运动过程中的姿态信息转换为四元数的形式,以此进行机械臂的运动学建模。四元数的计算如式(2)所示。

$$q = \frac{1}{2\sqrt{1+\tau \cdot {}^{i-1}_i T}} (R - R^s) \quad (2)$$

式中: q 为机械臂运动信息的四元数; τ 为齐次变换矩阵的迹。

在四元数的表达中添加机械臂运动的角速度信息,如式(3)所示^[11-12]。

$$\dot{q} = \frac{1}{2} E(q) \omega \quad (3)$$

式中: $\dot{q}$ 为四元数导数; ω 为机械臂运动的角速度; $E(q)$ 为四元数的雅可比矩阵。

由此得出机器人机械臂的运动学方程,如式(4)所示。

$$X = f(\dot{q}) \quad (4)$$

式中: X 为机械臂的运动信息方程; f 为四元数导数在笛卡儿空间中的映射函数。

通过上述步骤,完成巷道清洗机器人冲洗机械臂的运动学建模^[13-14]。

1.2 确定机械臂运动控制参数

为了使得机械臂的运动过程更为平稳,减少抖动和振动,本研究利用多项式方程进行冲洗机械臂运动参数的约束分析。

建立三次多项式方程以及相应的1阶导数形式,表达式如式(5)一式(6)所示^[15-16]。

$$\theta(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 \quad (5)$$

$$\dot{\theta}(t) = c_1 + 2c_2 t + 3c_3 t^2 \quad (6)$$

式中: $\theta(t)$ 为 t 时刻下机器人机械臂的关节角度; c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 均为待定参数; $\dot{\theta}(t)$ 为相应的1阶导数形式。

根据机器人冲洗机械臂运动的起始点位及终止点位,确定机械臂运动的约束方程,如式(7)所示^[17]。

$$\begin{cases} \theta(t_0) = \theta_0 \\ \theta(t_f) = \theta_f \\ \dot{\theta}(t_0) = 0 \\ \dot{\theta}(t_f) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: t_0 为机械臂运动的初始时刻; θ_0 为起始关节角度; t_f 为终止时刻; θ_f 为相应的关节角度。

由此计算多项式中的待定参数,如式(8)所示。

$$\begin{cases} c_0 = \theta_0 \\ c_1 = 0 \\ c_2 = \frac{3(\theta_f - \theta_0)}{t_f^2} \\ c_3 = \frac{-2(\theta_f - \theta_0)}{t_f^3} \end{cases} \quad (8)$$

基于式(8)对4个待定参数的确定,得到三次多项式方程的最终表达式。在多项式方程的约束下,对机械臂运动的控制参数进行确定^[18-19]。

1.3 基于改进模糊自适应PID的冲洗机械臂运动控制

结合巷道清洗机器人冲洗机械臂的运动学建模方程,根据确定的运动控制参数,本研究引入模糊自适应的PID控制器并进行改进,以实现机械臂的运动控制。

建立初始的PID控制器,其表达式为

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d(t)}{dt} \right] \quad (9)$$

式中: $u(t)$ 为PID控制器的输出值; k_p 、 T_i 、 T_d 分别为控制器的比例系数以及积分、微分时间常数; $e(t)$ 为控制偏差。

在PID控制器中引入模糊规则,将输入PID控制器的控制信号进行自适应模糊化处理,使其离散到某一区间内的实数值^[20]。这一过程的表达式为

$$u(t) = \frac{(m+n)[w(t) - (m+n)/2]}{m-n} \quad (10)$$

式中: m 和 n 为模糊化的区间边界; $w(t)$ 为PID控制器的输入值,即多项式确定的机械臂运动控制参数。

考虑到当前的模糊自适应PID控制器容易出

现复杂性爆炸问题,本研究对其进行改进。在当前的PID控制器中Lyapunov函数建立增益矩阵,如式(11)所示。

$$W(t) = \kappa \cdot e(t) + L(u(t) - g) \quad (11)$$

式中: $W(t)$ 为PID控制器增益矩阵; κ 为非线性反馈增益; L 为Lyapunov函数; g 表示扰动观测值。

结合改进后的模糊自适应PID控制器,对巷道清洗机器人的机械臂进行运动控制。在控制器中引入机械臂的运动学建模方程,建立控制参数的闭环传递函数,如式(12)所示^[21]。

$$G(t) = H \left(\frac{\omega_i^2}{2X \cdot u(t)} \right)^2 \quad (12)$$

式中: $G(t)$ 为闭环传递函数; H 为传递函数因子。

由此生成机械臂运动控制的改进模糊自适应PID控制器结构。

2 应用测试

2.1 巷道清洗机器人

为测试巷道清洗机器人冲洗机械臂的运动控制效果,选用Denso VP-6242G机器人进行实验。该机器人6自由度,重复定位精度 ± 0.02 mm,用绝对编码器检测位置,防护等级为IP30,自质量15 kg,负载2.5 kg。机械臂最大工作值430 mm,各关节性能参数包括:旋转轴最大速度为 $250(^{\circ})/s$,范围为 $-165^{\circ} \sim +165^{\circ}$;手臂轴最大速度为 $250(^{\circ})/s$,范围为 $-110^{\circ} \sim +110^{\circ}$;手腕轴最大速度为 $320(^{\circ})/s$,范围为 $-160^{\circ} \sim +160^{\circ}$;弯曲轴最大速度为 $320(^{\circ})/s$,范围为 $-120^{\circ} \sim +120^{\circ}$;翻转轴最大速度为 $420(^{\circ})/s$,范围为 $-400^{\circ} \sim +400^{\circ}$ 。巷道清洗机器人如图1所示。



图1 巷道清洗机器人

利用上述参数的巷道清洗机器人,开展本次冲洗机械臂运动控制实验。

2.2 机械臂运动控制

在改进的模糊自适应PID控制器的应用下,

对巷道清洗机器人的冲洗机械臂进行控制。经过反复比较和验证后,采用经验试凑法确定控制器的3个参数。通过计算与验证,得到本次测试中的控制参数如表1所示。

表1 机械臂运动控制参数

序号	参数	确定值
1	k_p	2.56
2	T_i	0.12
3	T_d	14.40
4	c_0	0.000 0
5	c_1	0.000 0
6	c_2	2.356 2
7	c_3	1.570 8

在上述参数下,对巷道清洗机器人的冲洗机械臂进行运动控制。

将计算好的参数输入到改进的模糊PID控制器中,经过机器人芯片的解读后,实现机械臂的运动控制。经统计,得到如图2所示的控制结果。

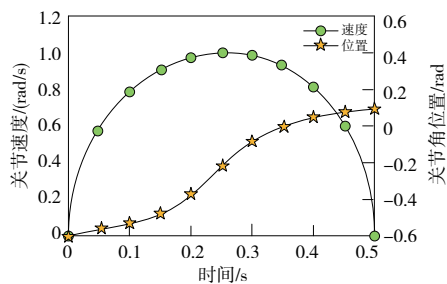


图2 机械臂运动控制结果

从图2可以看出,在本文方法的控制下,巷道清洗机器人的冲洗机械臂初始速度和终止速度均为0,以此为初始条件,对机械臂运动控制的参数进行计算后,所得出的机械臂位置呈现出连续且平稳的运动状态,运动速度也满足预期的需求。

2.3 控制效果评价

为了进一步验证本文方法对于巷道清洗机器人冲洗机械臂的运动控制性能,采用对比分析的方法对其控制效果进行评价。分别采用文献[1]基于闭链级混联式的机械臂运动控制方法、文献[2]基于可穿戴式多模态机械臂运动控制方法以及文献[3]基于外部干扰的机械臂运动控制方法作为本次测试的对比方法。经过测试,得到不同方法下机械臂运动控制对比结果如图3所示。

本次对比测试对巷道清洗机器人机械臂的运动平稳度控制效果进行了对比分析。由图3所示

的对比测试结果分析可知,在多种控制方法中,仅本文方法控制下的机械臂表现出了较小的振幅,而其他3种机械臂运动控制方法的振幅均比较大,与本文方法有着较大的差距。由这一测试结果可见,本文方法在实践应用中,能够更好地控制巷道清洗机器人的冲洗机械臂运动过程,实现较为平稳的运动。

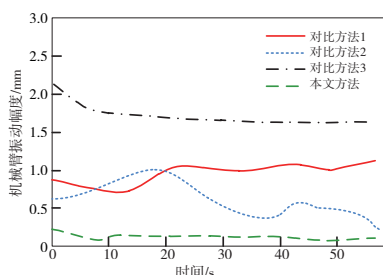


图3 机械臂运动控制效果对比

2.4 实际应用分析

为进一步验证本文设计方法的控制性能,进行巷道清洗实际场地测试,结果如图4所示。

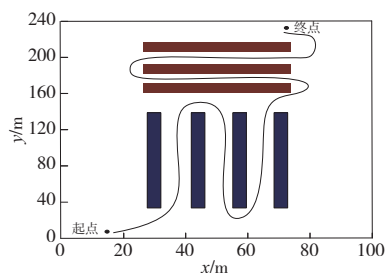


图4 实际场地测试结果

由图4可以看出,设计控制方法在实际场地测试中展现出了良好的清洗效果。清洗设备在巷道内稳定前行。且在测试过程中,清洗设备未出现碰撞和绕路现象,这充分验证了设计控制方法在路径规划与控制方面的性能。设备能够准确地识别巷道的形状和宽度,并根据实际情况调整行驶速度,确保清洗过程的安全性和效率。

3 结语

本文面向巷道清洗机器人在实际生活中的应用需求,提出了基于改进模糊自适应PID的巷道清洗机器人冲洗机械臂运动控制方法的研究。该方法通过对巷道清洗机器人机械臂运动学特性的分析,利用PID控制器的改进设计,实现了自适应的机械臂运动控制。在实践测试中,本文方法控制下的巷道清洗机器人有着更好的运动平稳度,

不仅能够自主地完成目标清洗任务,还能够大幅度提高清洗的效率与质量,适应各种复杂环境的清洗作业需求,助力巷道清洗工作的顺利开展。

参考文献:

- [1] 何嘉懿,张道德,王君明. 闭环级混联式液压机械臂运动控制方法[J]. 机电工程, 2024, 41(9): 1540-1553.
- [2] 陆子霖,周亚军,黄骐云,等. 基于可穿戴式多模态人机接口的机械臂运动控制方法[J]. 机器人, 2024, 46(1): 68-80.
- [3] 赵玮. 考虑外部干扰的超螺旋ZNN多机械臂协调运动控制[J]. 机械设计与制造, 2023(8): 139-147.
- [4] 李林安,程敏,丁孺琦,等. 面向混联液压机械臂的高精度运动控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(6): 95-104.
- [5] 羊波,王琨,马祥祥,等. 多智能体强化学习的机械臂运动控制决策研究[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(6): 318-325.
- [6] 王海红,季祥,翟天嵩. 多自由度机械臂的饱和输出反馈有限时间同步位置控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(6): 1079-1088.
- [7] 阳雨妍,宋爱国,沈书馨,等. 基于CNN-GRU的遥操作机器人操作者识别与自适应速度控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 123-131.
- [8] 王旭升,王荣博,李洋,等. 基于位置控制的多自由度机械臂非线性比例-微分阻抗控制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(24): 10410-10418.
- [9] 刘力维. 采摘机器人机械臂运动控制与目标抓取研究——基于嵌入式和机器视觉技术[J]. 农机化研究, 2024, 46(4): 68-72.
- [10] 张政,董振乐,周志刚,等. 多自由度电动静液驱动机械臂轨迹跟踪控制[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(8): 208-216.
- [11] 丁卫,郑云,钟宋义,等. 基于循环神经网络的2-DOF软体机械臂运动建模与控制[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2024, 30(3): 522-531.
- [12] 江峰,苏麒. 多自由度柔性机械臂非线性连续时变反馈控制方法[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(2): 193-197.
- [13] 房付熠,李汶柏,魏星宇,等. 面向太空垃圾捕获的自生长柔性变刚度机械臂设计与控制策略研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2024, 54(6): 94-105.
- [14] 关静丽,侯明,柏森. 基于二维码识别的分拣机械臂控制系统设计[J]. 机床与液压, 2025, 53(3): 60-65.
- [15] 马琰. 基于计算机视觉的采摘机械臂控制系统设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(12): 208-212.
- [16] 刘向磊,郑侃,董松,等. 基于地面实验平台的空间机械臂控制方案[J]. 南京理工大学学报, 2024, 48(5): 596-606, 614.
- [17] 张宇豪,庞辰骅,宋子韩,等. 基于OpenMV的五自由度机械臂控制方法研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(5): 1-7.

(下转第298页)

5 结语

综上所述,所提的基于机器学习的汽车发动机故障诊断方法,通过采用 WOA 改进的 VMD 算法分解发动机信号,采用奇异谱熵表征信号,最后利用 CS 优化的 SVM 算法分类识别故障类型,实现了汽车发动机故障类型的识别与诊断,且具有较高的诊断准确性。相较于标准 SVM 和 PSO 算法改进的 SVM,所提 CS 优化的 SVM 算法对汽车发动机故障的诊断准确率更高,对缸内压力信号诊断的准确率达到 98.45%,对缸盖振动信号诊断的准确率达到 99.21%,同时在运行时间上具有一定优势,运行时间分别为 21.01 s 和 12.56 s,降低了汽车发动机故障诊断的时间成本,可用于实际汽车发动机故障诊断中。本研究虽取得一定成果,但在对发动机故障进行识别时,仅分析了特征向量时域上的模态分量,未从时频域角度进行分析,可能会影响识别结果。因此,后续可从时频域等多角度对特征向量进行分析,以提高识别结果的准确性。

参考文献:

- [1] 孙浩,贾连辉,魏晓龙,等. 基于机器学习的常压刀盘盾构滚刀故障诊断方法研究[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(增刊1):550-557.
- [2] 张健,张朋,宫铭辰,等. 基于机器学习算法的高压断路器故障诊断研究[J]. 东北电力技术,2022,43(11):12-16.
- [3] 吴斯琪,曹颜玉,张秀林,等. 基于机器学习的海洋平台往复压缩机故障诊断方法[J]. 流体机械,2022,50(9):76-84.
- [4] 严孝强,张振京,宋业栋,等. 基于优化 VMD 和 SVM 的柴油机故障诊断算法[J]. 机电工程技术,2022,51(10):279-283.
- [5] 穆晨宇,薛文斌,穆羨琰,等. 基于 VMD-LSTM-Attention 模型的短期负荷预测研究[J]. 现代电子技术,2023,46(17):174-178.
- [6] 李宏扬,高丙朋. 基于改进 VMD 和 SNS-Attention-GRU 的短期光伏发电功率预测[J]. 太阳能学报,2023,44(8):292-300.

- [7] 吉哲,吕飞,王冕. 基于优化 VMD 和深度卷积神经网络的柴油发电机组故障诊断[J]. 机械与电子,2023,41(8):8-13.
- [8] 杨文斌,王志成,马怀祥,等. 基于参数优化 VMD 和峭度准则的齿轮故障诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(8):13-16,21.
- [9] 方娜,李新新,马森源,等. 基于 VMD-BiLSTM-Attention 的抽水蓄能机组性能劣化趋势预测[J]. 中国农村水利水电,2023(8):272-278,287.
- [10] 冯顺利,饶美丽,姜凌丽. 基于 SVM 的无刷同步发电机故障检测研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):203-205.
- [11] 臧旭,龚正朋,俞文帅,等. 基于小波包奇异谱熵和 WOA-SVM 的 GIS 放电故障诊断[J]. 电机与控制应用,2024,51(9):60-69.
- [12] 谢锋云,刘慧,胡旺,等. 基于自适应 TQWT 与小波包奇异谱熵的滚动轴承早期故障诊断[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(2):714-722.
- [13] 兰添贺,曲大义,陈昆,等. 基于 CS 算法优化的 SVM 短时交通流预测模型[J]. 青岛理工大学学报,2024,45(1):134-140.
- [14] 付桐林,杨明霞. 基于 CEEMDAN 和 CS 算法优化 SVM 的混合风速预测[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版),2023,49(1):41-49.
- [15] 苏娟,方舒,邢广进,等. 考虑需求价格弹性的 CS-SVM 短期负荷预测方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2022,43(3):319-324.
- [16] 梁迪,郭启航,姜廷霖. 布谷鸟搜索算法优化支持向量机的停车位预测[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2021,33(3):234-239,266.
- [17] 付桐林,杨明霞. 鲸鱼算法优化变分模态分解和支持向量机的日蒸发量预测模型[J]. 陇东学院学报,2025,36(2):1-9.
- [18] 刘晓悦,崔宏远. 基于 PCA 和 WOA-SVM 的磨煤机故障诊断[J]. 制造业自动化,2025,47(2):68-74.
- [19] 胡伟钧,李道全,胡继军,等. 基于数模联合驱动的航空发动机转子系统滚动轴承故障诊断[J]. 兵器装备工程学报,2025,46(2):285-293.
- [20] 毕凤荣,郭明智,毕晓阳,等. 数据不平衡情况下的柴油机故障诊断方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(8):810-820.

收稿日期:2023-11-29

(上接第 239 页)

- [18] 李俊菽,王甲一,孔德肖,等. 结合 YOLOv5 与双目视觉定位的摘果机械臂控制研究[J]. 农机化研究,2024,46(7):38-43.
- [19] 丁亚琼,贾寒光,万凯. 基于自适应机器学习的视觉机械臂控制方法[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2024,56(3):50-57.
- [20] 常凤筠,李佳昌,王平江. 具有双插补避障功能的七

- 关节机械臂控制系统研究[J]. 控制工程,2023,30(10):1834-1845.
- [21] 韩团军,张晶,黄朝军,等. 基于 sEMG 信号和 BPNN 算法的机械臂控制系统设计[J]. 机床与液压,2023,51(19):106-111.

收稿日期:2024-10-22