

复杂金属接缝焊接机器人双臂非线性 抖动控制方法研究

何余华¹, 李夫强², 周金龙³

(1. 北京科技大学, 北京 100000; 2. 中国海洋大学 土木工程学院, 山东 青岛 266000;

3. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 焊接机器人机械臂关节中的死区、间隙等非线性环节会导致系统的动态行为复杂化, 各个关节和执行器之间存在运动耦合关系, 导致关节在局部区域产生非线性抖动, 从而出现控制误差。为此, 提出复杂金属接缝焊接机器人双臂非线性抖动控制方法。构建焊接机器人运动坐标系, 得到终端机器人转换矩阵, 实现对双臂关节的复杂非线性运动耦合分析; 考虑关节运行中存在死区、间隙等非线性环节, 引入线性函数输出关节实际旋转角度; 将旋转角度作为径向基函数神经网络的输入, 并利用拉格朗日定律将转换矩阵转化为带有机臂角位移、角速度和角加速度, 并将其引入至非线性积分滑动模态控制方程中, 以补偿机械臂的摩擦力矩、离心力矩和重力, 以减小非线性抖动, 最终得到自适应控制结果, 从而减小控制误差。通过实验可知, 所提方法能够处理焊接过程中固有的不确定性、非线性和外部干扰, 提高焊接精度和稳定性, 有助于提升焊接质量和一致性。

关键词: 焊接机器人; 金属焊接; 运动学模型; 径向基函数神经网络算法

中图分类号: TP242

文章编号: 1000-0682(2024)06-0069-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.013

Research on nonlinear dual-arm jitter control of complex metal joint welding robot

HE Yuhua¹, LI Fuqiang², ZHOU Jinlong³

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100000, China; 2. College of Civil Engineering, Ocean University of China, Shandong Qingdao 266000, China; 3. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Liaoning Fuxin 123000, China)

Abstract: The nonlinear links such as dead zone and gap in the joints of the manipulator of the welding robot will complicate the dynamic behavior of the system. There is a motion coupling relationship between each joint and the actuator, which leads to nonlinear jitter of the joint in the local area, resulting in control errors. For this reason, a nonlinear dual-arm jitter control method for complex metal joint welding robot is proposed. The motion coordinate system of welding robot is constructed, the transformation matrix of terminal robot is obtained, and the complex nonlinear motion coupling analysis of both arms joint is realized. Considering the existence of nonlinear links such as dead zone and clearance in joint operation, a linear function is introduced to output the actual rotation angle of the joint. The rotation angle is taken as the input of the radial basis function neural network, and Lagrange's law is used to transform the conversion matrix into the angular displacement, angular velocity and angular acceleration of the robot arm, which are introduced into the nonlinear integral sliding mode governing equation to compensate the friction torque, centrifugal force matrix and gravity of the robot arm, so as to reduce the nonlinear jitter, and finally obtain the adaptive control result. Thus the control error is reduced. The experiment shows that the proposed method can deal with the inherent uncertainty, nonlinearity and external interference in the welding process, improve the welding accuracy and stability, and help to improve the welding quality and consistency.

Keywords: welding robot; metal welding; kinematic model; radial basis function neural network algorithm

收稿日期: 2024-07-19

第一作者: 何余华(1978—), 男(汉族), 湖北仙桃人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为超高层建筑等方面。

0 引言

复杂金属接缝通常指的是那些具有复杂几何形状、多层结构或者需要在狭小空间内进行焊接的接缝。这些接缝对焊接技术的要求极高,需要精确控制焊接参数和焊接路径,以确保焊缝的质量和强度。然而,焊接过程中的复杂性使得焊接机器人运动控制成为技术挑战。在机械臂的驱动器中,由于摩擦、滞后等现象,存在输入信号死区,即输入范围内,机械臂不会产生任何运动,导致控制系统在启动和停止时出现不稳定的抖动^[1];而机械传动部件之间的间隙会导致机械臂在运动过程中出现微小的位置误差,导致机械臂在局部区域产生非线性抖动,导致焊接机器人出现控制误差,这些误差会直接影响焊接质量^[2-3]。因此,研究复杂金属接缝焊接机器人双臂非线性抖动控制具有重要的实际意义。

目前,各位研究员通过开发有效的控制策略,以提高焊接机器人运动稳定性。吴超群等^[4]基于优化插补时间的原理,对焊接机器人轨迹分段,用三次不等长 B 样条插值插补轨迹,获得插补点;通过外导引动作模块,将插补点按 4 ms 的间隔顺序传送到机器人,从而实现对机器人的精确控制。但在曲面分段焊接中,由于需要频繁调整焊接设备和操作参数,以及曲面结构复杂、线型变化大,精度控制困难,效率低。张诚等^[5]采用激光传感技术测量焊接机器人的真实运动轨迹及姿态,利用激光视觉与 PLC 控制器相结合,调节焊接机器人的运动轨迹及姿态。但强烈的光线、烟雾、灰尘等影响,影响传感器的准确性和可靠性,导致控制精度低。Ting 等^[6]提出了一种高精度的直流脉冲方波电弧电压实时跟踪算法。引入二维与三段式模糊控制器,实现了对焊接过程的精确控制。但脉冲方波的使用增加焊接过程的非线性特性,使得控制算法的设计和实现更为复杂。Ha 等^[7]通过对轨迹生成算法的研究,利用六自由度协作机器人对焊接曲线进行跟踪控制。然而,但在实际应用中,由于各种因素的影响,如机器人的结构误差、传感器的精度、焊接过程中的热变形等,六自由度协作机器人模型都会导致焊接曲线的跟踪精度不够理想。

为了解决金属焊接过程中双臂机器人面临的抖动问题,提出复杂金属接缝焊接机器人双臂非线性

抖动控制方法。深入分析双臂机器人在焊接过程中产生的非线性动力学效应,通过径向基函数神经网络,确保焊接头在执行焊接任务时,其轨迹能够精确无误地按照预设的路径进行,从而减小非线性抖动,保证机器人双臂的高精度运动。

1 焊接机器人双臂关节运动分析

焊接机器人机械臂关节中的死区、间隙等非线性环节是导致系统动态行为复杂化的主要原因。焊接机器人坐标的转换矩阵用以描述机器人从基座到终端执行器位置和方向,包含终端执行器相对于基座的旋转角度。通过焊接机器人坐标的转换矩阵对关节运动的分析,可以深入理解这些非线性环节对机械臂的运动轨迹和动态响应的影响,从而为设计有效的抖动控制策略提供理论基础。

通过分析机器人运动协作^[8]过程中每一个关节与地表坐标之间的相对位姿关系,了解各个关节在空间中的具体位置与姿态,准确地推导出机器人在进行焊接复杂金属时,其终端执行器的精确位姿、运动速度以及加速度等关键状态信息。建立的焊接机器人坐标系如图 1 所示。

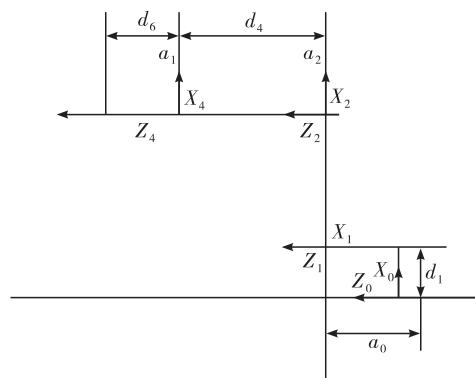


图 1 焊接机器人坐标系

图 1 中, a_i 和 d_i 分别是机器人邻近关节之间的长度和关节偏移距离。沿 $Z_0 - X_0$ 轴纵向偏移 d_1 , 移动后邻近关节间距离是 a_0 ; 沿 $Z_2 - X_2$ 轴横向偏移 d_4 , 移动后邻近关节间距离是 a_2 ; 沿 $Z_4 - X_4$ 轴横向偏移 d_6 , 移动后邻近关节间距离是 a_1 。

焊接机器人在工作时,关节长度、关节偏移距离以及邻近坐标之间的扭转角度是不变的,只有关节的旋转角度是变化的。因此,结合机器人关节角度,利用各关节与终端执行器之间的坐标转换,对终端执行器的位姿求解。用齐次转换矩阵 T_i^{i-1} ($i = 1, \dots, 6$) 来表示邻近的坐标系 $i-1$ 和 i :

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & a_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & a_1 \sin\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_1 & 0 & a_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & -\sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: θ_i 为机器人关节的旋转角度; α_i 为邻近坐标之间的扭转角度。

转换矩阵是机器人运动学模型的核心组成部分。利用六关节与邻近关节的齐次转换矩阵, 建立机器人关节角度与终端执行器位置和方向之间的关系, 特别是在存在死区、间隙等非线性环节的情况下, 分析非线性因素对机器人的非线性动态行为的影响。基于公式(1)~(6), 得到焊接机器人终端坐标和原点坐标之间的转换矩阵 T_6^0 :

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \quad (7)$$

2 考虑非线性抖动的旋转角度计算

焊接机器人的任务是沿着复杂路径实现焊接。为此, 机器人控制系统需要了解终端执行器在三维空间中的位置和方向。通过分析焊接机器人双臂关节运动的复杂性, 获取的转换矩阵 T_6^0 提供了从机器

人基座到终端执行器的坐标转换, 并结合关节的旋转角度, 可以确保终端执行器能够精确地到达预定的位置和方向。然而, 在存在死区、间隙等非线性环节的情况下, 会产生明显的迟滞效应, 严重的可引起系统极限环振荡, 甚至失稳, 即所谓的非线性抖动情况, 导致机械臂的实际旋转角度会与理论计算值有所偏差^[9]。通过精确计算关节产生非线性效应的旋转角度, 从而更准确地描述机械臂的实际运动状态。

在电压 u_i' 通过关节死区后, 会作为控制电压 u_i 被送到机器人电机的控制模块中。经过蜗杆输出端的间隙非线性环节后, 线性条件关节旋转角度 θ_i 转变为关节的实际旋转角度 θ_i' 。

采用线性函数 G_i , 与转换矩阵 T_6^0 关联形成维纳模型^[10], 将控制电压 u_i 作为输入值, 关节旋转角度 θ_i 作为输出值, 得到线性传递函数:

$$G_i = \frac{\theta_i d_i}{u_i a_i} \quad (8)$$

基于传递函数, 构建出非线性关节模型如图 2 所示。

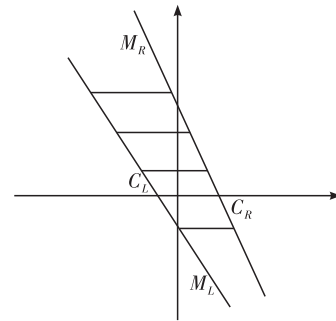


图 2 非线性关节模型

图 2 中, M_R, M_L 表示关节产生非线性抖动下允许的最大间隙与最小间隙; C_R 和 C_L 表示在控制系统中用来补偿由于间隙引起的误差的系数, 从而得到非线性关节的数学公式, 最终输出关节实际旋转角度 θ_i' :

$$\theta_i' = M_L(\theta_i + C_L)f_1(i) + M_R(\theta_i - C_R)f_2(i) + [1 - f_1(i)][1 - f_2(i)] \quad (9)$$

$$f_1(i) = h[(M_L\theta_i + M_L C_L - \theta_i)/M_L] \quad (10)$$

$$f_2(i) = h[(\theta_i - M_R\theta_i + M_R C_R)/M_R] \quad (11)$$

式中: $h(\cdot)$ 为机器人线性条件和非线性条件之间的切换函数; $f_1(i), f_2(i)$ 分别为关节死区、间隙的补偿值。

3 非线性抖动控制

复杂金属焊接过程中, 接缝的质量直接取决于

焊接机器人双臂的精确运动,通过计算关节的实际旋转角度,可以更精确地调整机械臂的运动轨迹,减少抖动对焊接结果的影响。径向基神经网络能够有效地实现非线性映射,对于处理机械臂关节中的死区、间隙等非线性环节以及运动耦合关系导致的非线性抖动问题至关重要,从而实现更精确的控制。因此,采用基于径向基函数的神经网络^[11],并与滑动模态控制函数相结合,将焊接机器人终端坐标和原点坐标之间的转换矩阵信息与最终输出关节实际旋转角度 θ'_i 作为网络输入层的输入,实现对非线性抖动控制的稳定性和鲁棒性。

在径向基函数神经网络中,输入层 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 接收原始数据,而输出层则通过径向基函数的非线性变换和加权组合,将输入信息映射到期望的输出空间。输出层表示为:

$$y(x) = W^T H \theta'_i + \varepsilon \quad (12)$$

式中: W 是优化权值; ε 是接近误差值最小值; H 是径向基系数。

通过第 1 小节对关节的动力学分析,精确地计算出了机械臂在执行焊接任务时所需的控制输入 T_6^0 。为实现对机械臂运动的精确控制,减少非线性抖动,基于拉格朗日定律,将转换矩阵 T_6^0 转化为带有机械臂角位移、角速度和角加速度的公式:

$$T_6^0 = g + F_N + C(p, p')p' + M(p, p'')\tau \quad (13)$$

式中: p 是机械臂各关节从某个基准位置开始转过的角度; p' 表示机械臂各关节随时间变化的角速度; p'' 是关节角速度的变化率; g 为重力对机械臂各关节动态的影响因子; F_N 是机械臂关节在运动过程中受到的阻碍运动的力矩; $C(p, p')$ 为与关节角度和角速度相关的矩阵; $M(p, p'')$ 是机械臂质量分布和几何形状的函数; τ 为非线性控制滑模控制器。

利用鲁棒控制律,当存在 $t \rightarrow \infty$ 的情况时,能够保证双臂控制误差接近 0。得到误差 e 和滑动模态控制函数 $s(t)$:

$$e = q - q' \quad (14)$$

$$s(t) = y(x) T_6^0 + \lambda e \quad (15)$$

式中: q 是实际机械臂的焊接路径; q' 是理论上的焊接路径; λ 是对角矩阵。

在 $s(t) = 0$ 的情况时,利用滑动模态控制原理^[12],滑模控制方程可转化为 $T_6^0 = -\lambda e$ 。在误差度量 $s(t)$ 越小时,整个机械臂控制稳定性越好。

为了降低控制稳态误差值,在公式(15)中增加一个积分项 μ ,得到一种非线性积分滑动模态控制

方程:

$$s'(t) = y(x) T_6^0 - \lambda e + \mu \int_0^t G_i dt \quad (16)$$

针对焊接机器人双臂运动学模型,模型的自适应控制公式为:

$$P = \mu s'(t) + \tau y(x) \quad (17)$$

通过公式(17)对机械臂的摩擦力力矩、离心力矩矩阵和重力效应进行补偿,以减少控制误差,抑制非线性抖动现象发生。

4 实验分析

为验证所提方法的有效性,设置以下实验。实验使用机器人型号 MH5LS II - DX200,机器人为六轴设计,垂直伸长度 1560 mm,水平伸长度 895 mm,重复定位精度 ± 0.03 m。实验使用钢、铝和不锈钢等多种类型的金属材料,以模拟不同的焊接条件。工件设计为具有不同复杂度的接缝,包括直线接缝、曲线接缝和多层焊接接缝,以测试控制方法在各种情况下的有效性。实验所用焊接机器人如图 3 所示。

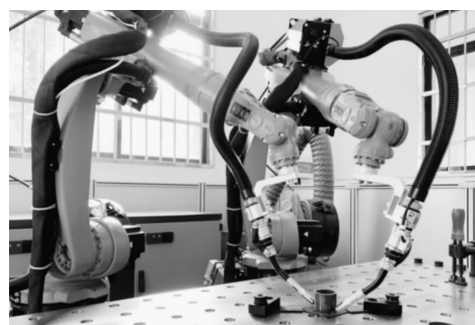
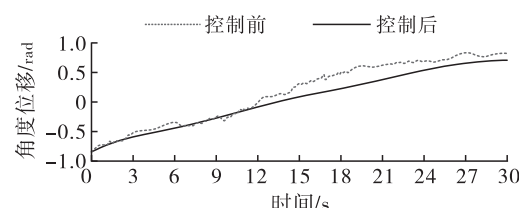


图3 实验环境

将隐藏层的神经元数量从 100 减少到 50,减少网络的复杂度,从而降低重复率。将学习率从 0.01 ~ 0.1 之间调整为 0.005 ~ 0.05。将正则化参数设置为 0.1。

以焊接机器人的关节角度位移座位评价指标,利用 MATLAB 软件模拟各个试验指标的结果曲线,在机器人的关节系统中引入死区、间隙,观测到各关节的运动特性如图 4 所示。



(a) 关节1

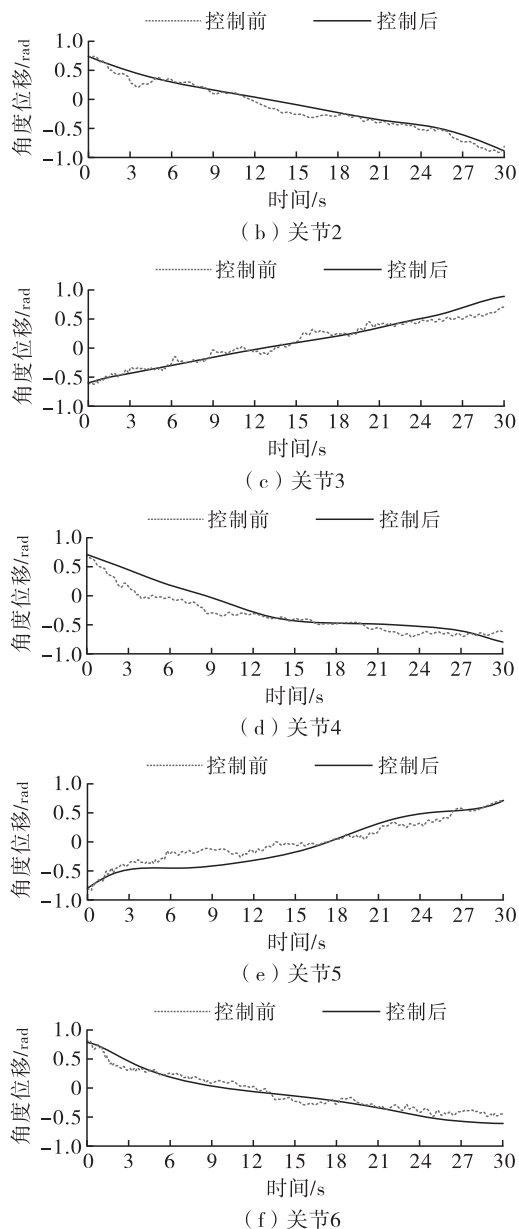


图4 机器人关节角度位移结果

由图4可以看出,控制前的关节运动曲线波动较多,说明出现非线性抖动的现象较多,但经过所提方法控制后的双臂关节运动曲线是平稳的,说明所提方法对双臂关节的控制效果好。这是由于径向基函数神经网络特别适合处理非线性问题,在控制非线性抖动的过程中,径向基函数神经网络能够有效捕捉这些非线性关系并进行补偿控制。

关节角速度和加速度反映了机器人在执行焊接任务时的动态响应特性。非线性抖动通常表现为关节运动的不规则变化,这些变化可以通过角速度和加速度的波动来捕捉。以机器人关节角速度和加速度为控制指标,利用所提方法控制非线性抖动情况如图5所示。

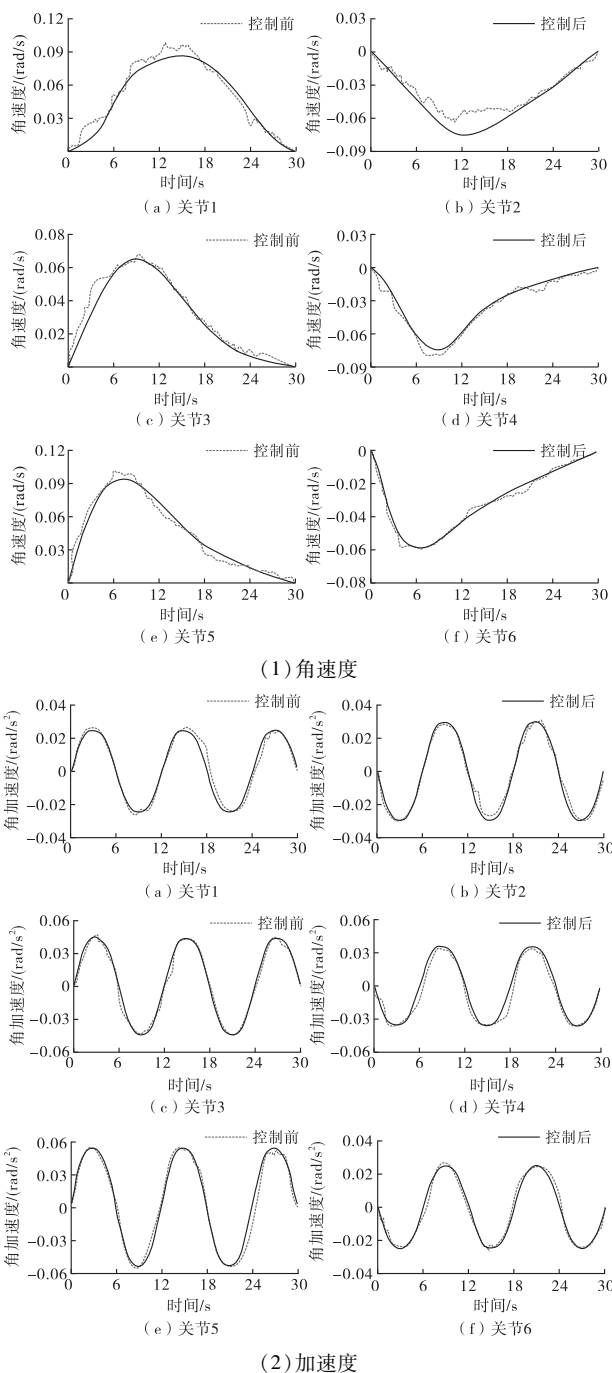


图5 关节角速度、加速度控制结果分析

由图5可以看出,在双臂机器人焊接工作过程中,使用所提方法控制后各个关节的角速度曲线、角加速度曲线均呈连续缓变的趋势,说明机器人的焊接过程双臂处于稳定状态,未出现非线性抖动情况。这是因为在焊接作业中,通过自适应调整网络,能够减少外部干扰和内部参数变化对控制效果的影响,从而保证焊接轨迹的稳定性和精确性。

5 结论

在实际工作过程中,机器人会出现非线性的抖

动问题,对焊接质量造成影响,令生产效率下降,严重时还会导致设备的损伤。为此,提出了复杂金属接缝焊接机器人双臂非线性抖动控制方法。研究双臂焊接机器人的运动学特征,构建非线性抖动数学模型;以径向基函数神经网络为基础,提出一种针对非线性抖动的控制方法。实验结果表明,所提方法可以有效地降低双臂焊接机得非线性抖动的发生,从而提高焊接的质量与效率,为复杂金属接缝焊接机器人的抖动控制提供了新的思路,并对其他同类机器人的抖动控制具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 李志文,程志江,杜一鸣,等. 基于 ROS 的清洁机器人运动控制研究[J]. 计算机仿真,2023,40(04):455 - 460.
- [2] 潘海鸿,何飞龙,贾丙琪,等. 焊接机器人空间轨迹段间位姿平滑过渡方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(11):65 - 68.
- [3] 贾爱亭,洪波,李湘文,等. 基于轨迹在线识别的 3D 折线焊缝机器人摆动 GMAW 实时跟踪方法[J]. 机械工程学报,2022,58(14):116 - 125.
- [4] 吴超群,赵松,雷艇. 曲线焊缝的机器人焊接轨迹规划与高频控制[J]. 中国机械工程,2023,34(14):1723 - 1728.
- [5] 张诚,袁慧铮,应之歌. 应用多传感器激光视觉的焊接机器人变质心补偿控制[J]. 激光杂志,2024,45(01):236 - 241.
- [6] LEI T, WU C, YU H. Electric arc length control of circular seam in welding robot based on arc voltage sensing[J]. IEEE sensors journal, 2022, 22(4):3326 - 3333.
- [7] Ngo H Q T, Nguyen T H, Nguyen H A, et al. Model and simulation of tracking motion for accurate welding using a universal Cobot[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2023,71(1):43 - 51.
- [8] 闵小翠,李鹏. 基于 D-H 法的农业采摘机器人运动协作控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2024,32(01):72 - 78 + 84.
- [9] 张泽鹏,茅云生,傅何琪,等. 基于混沌麻雀算法的船用焊接机器人轨迹优化[J]. 船舶工程,2022,44(05):134 - 140.
- [10] 张潇,宋威. 径向基函数神经网络指导的粒子群优化算法求解多峰优化问题[J]. 小型微型计算机系统,2023,44(11):2529 - 2537.
- [11] 苏赫朋,苗鸿宾,李梦虔,等. 双机器人不同约束下的协调运动轨迹规划方法的研究[J]. 制造技术与机床,2024(01):85 - 92.
- [12] 刘育强,魏庆生,李浩然,等. 基于径向基函数神经网络的空间漂浮机械臂装配控制[J]. 哈尔滨工程大学学报,2023,44(05):831 - 836.
- [13] 王博,张远,杨咏蓓. 基于模仿学习的决策树码率自适应算法研究[J]. 计算机工程,2023,49(5):206 - 214.
- [14] 叶晨,江昊,任娇蓉,等. 基于 CPS-PWM 的 MMC 环流抑制及数字控制实现[J]. 电力电子技术,2023,57(4):132 - 135.
- [15] 左姗姗,徐春雨,杨毅,等. 行波管高压电源数字控制技术[J]. 电气自动化,2023,45(1):78 - 80.
- [16] 朱铭基,张会林,马立新. 基于 Smith 预估模糊 PID 的氨法脱硫控制策略[J]. 电子科技,2023,36(5):80 - 87.
- [17] 樊康生,杨光永,吴大飞,等. 论域非原点对称的等效变论域模糊 PID 控制[J]. 制造技术与机床,2023(11):75 - 81.
- [18] 赵剑桥,严天一,桂永建,等. 基于模糊 PID 的半主动悬架控制策略研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2023,38(3):54 - 58.
- [19] 李钢. 基于模糊 PID 控制的恒压供水系统的研究[J]. 电子设计工程,2024,32(13):83 - 87.

(上接第 12 页)

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029-81871277
网址:<http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱:gyybbjb@126.com