

单连杆柔性机械臂连续转动控制系统设计

卢南方¹, 谢真强², 龙光涛¹, 张楠楠¹, 孙欣欣², 黄江²

(1. 贵州电子信息职业技术学院, 贵州 凯里 556000;

2. 中电科大数据研究院有限公司, 贵阳 550022)

摘要: 单连杆柔性机械臂在连续转动过程中, 由于其自身的柔性, 会产生弹性变形, 使得机械臂末端运行出现突兀转折曲线, 导致该控制系统下机械臂转角误差较大; 因此, 研究单连杆柔性机械臂连续转动控制系统; 在系统硬件部分, 针对位置传感器、主控电源和驱动电路进行设计; 在系统软件部分, 运用 Euler-Lagrange 方程构建单连杆柔性机械臂动力学模型; 基于动力学模型确定多个控制点的空间位置, 再采用 B 样条曲线拟合算法规划机械臂连续转动轨迹; 结合极点配置方法和模糊规则, 构造机械臂连续转动模糊 PI 控制器; 并引入一个以低通滤波器为核心的干扰观测器, 通过补偿干扰力矩优化转动控制结果; 测试结果表明: 该系统在不同工况下完成连续转动控制, 转角误差低于 10×10^{-3} rad, 更好地满足了柔性机械臂转动工作要求。

关键词: B 样条曲线拟合; 柔性机械臂; 连续转动; 运动轨迹; PI 控制器; 干扰观测器

Design of Continuous Rotation Control System for Single Link Flexible Robot Arm

LU Nanfang¹, XIE Zhenqiang², LONG Guangtao¹, ZHANG Nannan¹,

SUN Xinhuan², HUANG Jiang²

(1. Guizhou Vocational Technology College of Electronics & Information, Kaili 556000, China;

2. Big Data Research Institute Co., Ltd., CETC, Guiyang 550022, China)

Abstract: During the continuous rotation process of a single link flexible robotic arm, its own flexibility causes elastic deformation, resulting in abrupt turning curves at the end of the robotic arm and significant angular errors of the robotic arm. Therefore, this paper focuses on a continuous rotation control system with the single link flexible robotic arm. This system hardware is composed of an position sensor, main control power supply, and drive circuit. In the system software, the Euler Lagrange equation is used to construct a dynamic model for the single link flexible robotic arm. Based on this dynamic model, the spatial positions of multiple control points are determined, and then, the B-spline curve fitting algorithm is used to plan the continuous rotation trajectory of the robotic arm. A fuzzy PI controller with the continuous rotation of the robotic arm is constructed by combining pole placement method and fuzzy rules. A disturbance observer with low-pass filtering as the core is introduced to optimize rotation control results through the compensation of disturbance torque. Experimental results show that under different working conditions, the system achieves continuous rotation control, with a rotation angle error of less than 10×10^{-3} rad, which better meets the requirement of flexible robotic arm rotation.

Keywords: B-spline curve fitting; flexible robotic arm; continuous rotation; movement trajectory; PI controller; interference observer

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-01-20。

基金项目: 国家自然科学基金(U20B2069); 贵州省科技重大专项项目(黔科合重大专项字[2024]002)。

作者简介: 卢南方(1991-), 男, 硕士研究生, 讲师。

龙光涛(1965-), 男, 大学本科, 教授。

通讯作者: 谢真强(1990-), 男, 硕士研究生, 高级工程师。

引用格式: 卢南方, 谢真强, 龙光涛, 等. 单连杆柔性机械臂连续转动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(5): 176-184, 204.

0引言

在机械制造领域快速发展的背景下,柔性机械臂作为一种重要的执行机构,在航空航天、工业自动化以及精密制造等领域中得到了广泛应用^[1]。相较于传统的刚性机械臂,柔性机械臂具有低耗能、操作空间大、载荷自重比高等显著优点^[2]。然而,柔性机械臂在运动过程中,由于弹性体的弹性变形,会产生弹性振动^[3],这不仅会降低其定位精度,还可能影响整个系统的稳定性和可靠性。因此,对柔性机械臂的运动轨迹进行精确规划和控制,保证其完成高质量的连续转动工作,成为了当前研究的热点和难点。

文献[4]提出基于WOA-FOPID算法的控制方法,通过数值仿真分析了解机械臂运动原理,结合旋量理论建立机械臂工作输入—输出模型。再应用鲸鱼算法(WOA)优化分数阶(FO)PID控制器,构造具有参数自整定性能的控制架构,通过调整关节运动参数满足机械臂转动工作要求。但是,WOA-FOPID算法中的微分控制项容易受到噪声的影响,导致控制结果误差较大。文献[5]提出基于运动形式转化的控制系统,依托于平动—转动运动转化原理、能量守恒原理,建立基于转动惯量虚拟化平移质量的调谐质量阻尼器。将其与机械运动方程相结合,构造面向机械设备的运动控制架构,满足高质量运动控制要求。但是,在某些空间受限或质量要求严格的场合,该系统的应用可能会受到限制,整体适用性较差。文献[6]提出基于CODESYS平台的控制系统,应用参数坐标变换思想和关节角参数化解析法,分别建立机械臂运动学模型、逆运动学模型。通过反演跟踪获取机械臂实时运动参数,将其输入分布式点对点控制模块中,即可实现机械臂连续运动控制。但是,该控制系统涉及多个模块和组件的协同工作,计算过程复杂,导致系统存在实时性不足的问题。文献[7]提出基于模糊调整和RBF神经网络相结合的控制策略,应用拉格朗日原理和模态法建立机械臂运动学模型,筛选出非线性参数性。结合前馈PD控制器和模糊规则,制定机械臂转动控制策略。再引入的RBF神经网络,对具有不确定性的非线性参数进行补偿调整。但是,RBF神经网络的学习能力依赖于大量的训练数据,面对未知或变化较大的工况时,表现出的控制效果不佳。

在单连杆柔性机械臂的连续转动控制系统中,引入B样条曲线拟合算法实现运动轨迹规划,通过控制点插值扩展,生成既平滑又连续的轨迹,满足单连杆柔性机械臂对轨迹规划的高要求。再结合模糊PI控制器、干扰观测器,按照规划轨迹控制机械臂连续转动,实现柔性机械臂稳定运动。

1机械臂连续转动控制系统框架设计

机械臂在工业生产、医疗手术、航天航空等众多领域都有广泛应用,其操作的精度直接影响到任务的完成质量。通过设计连续转动控制系统框架,旨在精确控制机械臂在空间中的运动轨迹,使其能够按照预设的路径和姿态进行连续、平滑的转动,从而实现高精度的操作。

图1中,系统硬件部分分别包括位置传感器、主控电源、核心控制器和驱动电路等设计。系统软件部分引入了B样条曲线拟合算法,针对控制系统软件部分进行研究。

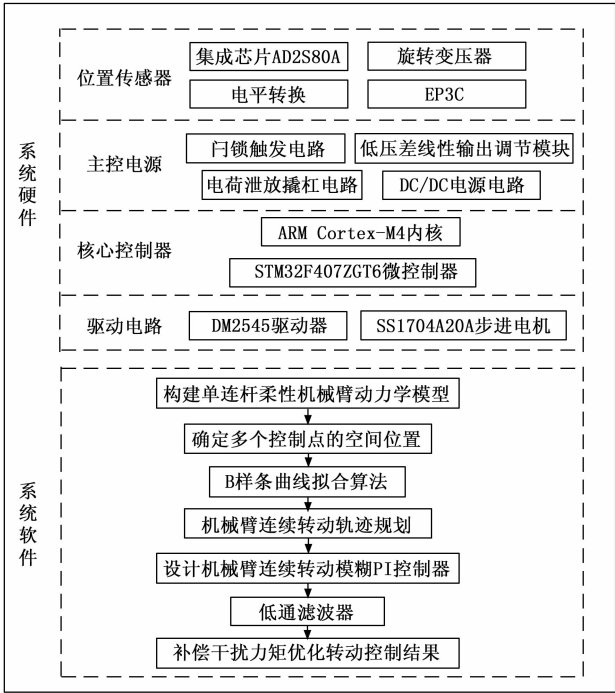


图1 控制系统总体框架设计

2机械臂连续转动控制系统硬件设计

以实现机械臂在复杂环境下的连续、平滑转动为目标,在控制系统硬件设计阶段,针对位置传感器、主控电源、核心控制器和驱动电路分别展开研究。

2.1 位置传感器设计

考虑到单连杆柔性机械臂的工作特殊性,在位置传感器设计过程中,需要兼顾精度和可靠性^[8]。因此,选用具备双绕组结构的旋转变压器作为核心设备,配合商用集成芯片AD2S80A,构造图2所示的机械臂关节输出端位置信息采集结构。

如图2所示,位置传感器信息采集结构中,双通道旋转变压器的粗通道、精通道均可以实现数据反馈^[9],将二者反馈信息融合起来,即可输出高达20位的输出端位置信息。这部分采集信号转移到旋变数字转换电路

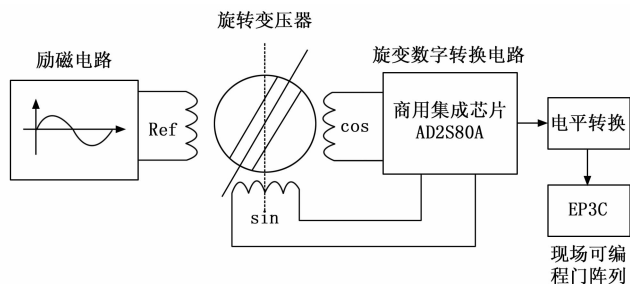


图 2 旋转变压器信息采集结构

中，通过商用集成芯片 AD2S80 完成数字化处理，即可得到 16 位数字信号，用以描述单连杆柔性机械臂关节的位置信息，为后续 B 样条曲线拟合和连续转动控制提供坚实基础。

2.2 主控电源设计

由于机械臂连续转动控制系统中主控电源硬件，承担着为各个部件提供稳定能源供应的责任^[10]。在硬件设计过程中，设置电源总线提供的输入电压为 28 V，通过滤波电路和变换电路将其转换为控制器工作要求电压。除此之外，以实现稳压输出、单粒子门锁保护等功能为目标^[11]，设计二次电源管理模块，最终形成图 3 所示的电源组成框图。

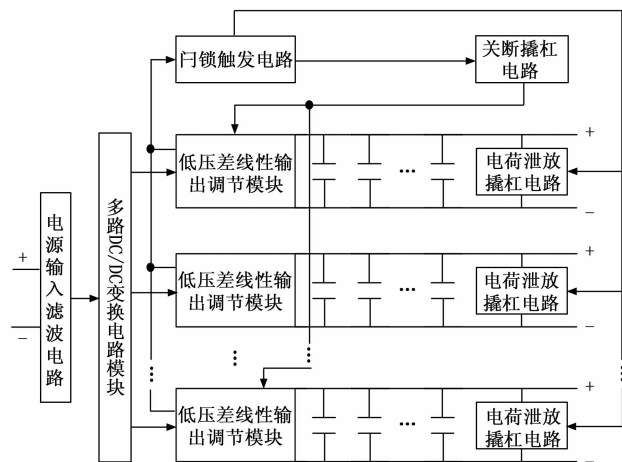


图 3 机械臂转动控制电源系统组成框图

如图 3 所示，当前设计的主控电源硬件组成模块中，多路 DC/DC 变换电路是核心部分，可以发挥电压转换、负载供电、电气隔离等功能。为了保证电源供电稳定性，从众多电路拓扑中选用单端正激变换结构，如图 4 所示。依靠其电压调整稳定性好、结构简单等优点，结合脉宽调制技术改变振荡电路中功率开关管导通时间^[12]，确保最终输出电压符合机械臂连续转动控制要求。

受到单端正激变换电路自身结构特点的影响，当功率开关管导通时间结束后，通过谐振操作转移变压器磁

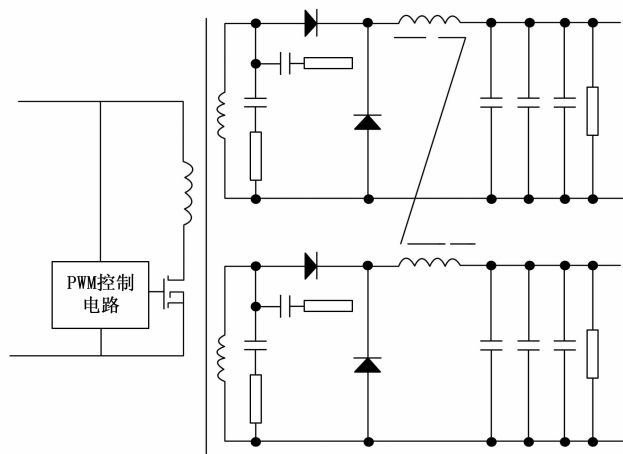


图 4 DC/DC 电源电路拓扑

化能量，使其表现在电容上，可以达到变压器去磁的目的^[13]。

将门锁触发电路和关断撬杠电路相连接，当受到单粒子门锁事件的影响发生负载过流问题时，LDO 芯片将会直接给出报警信号，并通过门锁保护电路执行引脚拉低操作，关闭电源输出，实现电路内负载残留电荷快速释放。最后，建立多个低压差线性稳压器^[14]，分别与多路 DC/DC 变换电路模块相连，依靠控制三极管的基极电流，可以实现对输出电压的闭环稳定性调节，为控制系统提供稳定、可靠的能源供应。

2.3 核心控制器

在单连杆柔性机械臂连续转动控制系统中，核心控制器起着至关重要的作用，它负责协调和控制各个部件的运行，确保机械臂能够按照预定的轨迹和要求进行精确的运动。本文选用了 STM32F407ZGT6 微控制器作为本系统的核心控制器。该控制器基于 ARM Cortex-M4 内核，运行频率高达 168 MHz，具备强大的运算能力和数据处理速度，能够满足机械臂连续转动控制系统对实时性和精度的要求。电路原理图如图 5 所示。

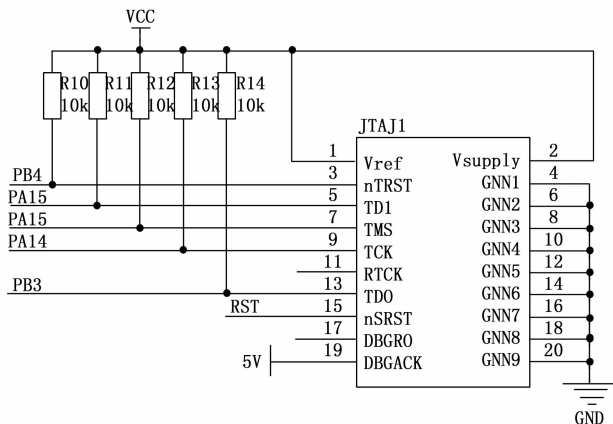


图 5 微控制器电路图

如图 5 所示, 电路中, V_{ref} 提供一个稳定的参考电压, V_{supply} 为微控制器提供工作所需的电源电压。GND1 - GND9 接地引脚为电路提供一个共同的参考电位, 有助于减少噪声和干扰, 保证信号的稳定性和准确性。DBGREQ (Debug Request) 调试请求引脚。用于向外部调试设备发送调试请求信号, 当需要进行调试操作时, 微控制器通过该引脚向调试设备表明其准备好接受调试指令。DBGACK (Debug Acknowledge) 调试确认引脚。用于接收外部调试设备的确认信号, 当调试设备接收到调试请求并准备好进行调试时, 通过该引脚向微控制器发送确认信号, 建立调试连接。这些引脚共同构成了 STM32F407ZGT6 微控制器的硬件接口, 通过合理的电路连接和软件配置, 可以实现微控制器与外部设备之间的通信和控制, 从而完成机械臂连续转动控制系统的各种功能。

2.4 驱动电路设计

在驱动电路硬件设计部分, 主要考虑了电机与驱动器的选择与匹配, 以及它们与单片机之间的信息交流与控制方式。在电机选择阶段, 先了解柔性机械臂弯曲变形的最大承载力, 结合驱动绳索转动轴半径和扭矩计算公式, 推理出电机所需的扭矩参数。再对比不同步进电机型号参数, 最终选用 SS1704A20A 型号的步进电机, 作为驱动电路的核心部分。而选择驱动器时, 从驱动电机型号、控制功能要求两方面入手, 以避免因驱动电流不合理出现电机烧毁为目标, 选择基于交流伺服原理设计的 DM2545 驱动器^[15], 其与 SS1704A20A 型号的步进电机具有很高的匹配性, 利用其本身的细分和电流功能, 可以调整电机转速和输出力矩, 进一步提升控制系统的灵活性。

在单片机与驱动器之间的信息交流与控制方面, 设计了图 6 所示的差分接线方式, 用其替换常规的共阳极和共阴极接线方式, 实现使能信号、方向信号、控制信号的准确发送与反馈^[16]。

通过合理选择电机与驱动器型号、优化接线方式等措施, 完成驱动电路硬件模块的整体设计, 应用其可以辅助控制系统稳定、准确地完成连续转动控制任务, 为柔性机械臂在复杂作业环境中的应用提供了有力支持。

3 机械臂连续转动控制系统软件设计

在完成位置传感器、主控电源、驱动器等系统硬件的设计后, 引入 B 样条曲线拟合算法, 针对控制系统软件部分进行研究。首先构建单连杆柔性机械臂动力学模型, 然后基于机械臂本体模型, 确定机械臂运动关键点, 并引入 B 样条曲线拟合算法展开插值扩展计算。以此规划连续转动轨迹。最后以规划轨迹作为基础, 采用模糊 PI 控制器实现机械臂连续转动控制。

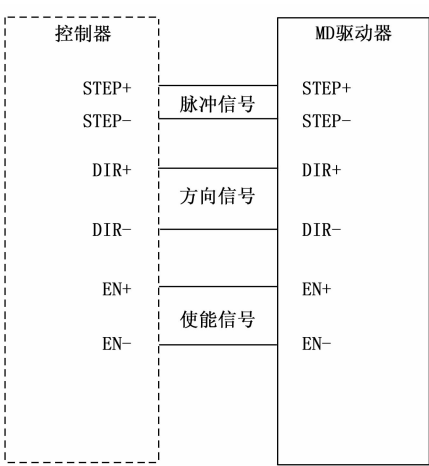


图 6 驱动器信号接线方式

3.1 建立单连杆柔性机械臂动力学模型

针对单连杆柔性机械臂关节运动原理进行分析, 结合 Euler-Lagrange (欧拉-拉格朗日) 建模方法, 定义机械臂动力学方程如下所示:

$$Q = M(q) + C(q, q')q'' + D(q) \tag{1}$$

式中, Q 表示柔性机械臂驱动转矩, M 表示惯量, C 表示机械臂运动产生的矢力与离心力之和, D 表示重力矩, q 、 q' 、 q'' 分别表示负载端的转角、角速度和角加速度。

考虑到机械臂的柔性特点, 在动力学模型中添加一个弹簧比例系数, 最终生成柔性机械臂动力学模型为:

$$M(q)q'' = C(q, q')q' + \partial D(q) + K(q - \hat{q}/\partial) \tag{2}$$

式中, W 表示电机输出转矩, $\hat{q}$ 、 $\hat{q}''$ 分别表示电机端的转角和角加速度, K 表示弹簧比例系数, ∂ 表示减速比。

结合参数线性化表示思想, 最终确定机械臂本体模型为:

$$M(q)q'' = Y(q, q', q'')v - C(q, q')q' - D(q) \tag{3}$$

式中, Y 表示动力学参数回归值, v 表示运动学参数。

3.2 基于 B 样条曲线拟合规划运动轨迹

基于上述单连杆柔性机械臂本体模型, 确定机械臂运动关键点, 并引入 B 样条曲线拟合算法展开插值扩展计算^[17], 规划出一条合理的连续转动轨迹, 作为系统控制的依据。由于机械臂运动轨迹可能具有复杂的形状, 而 B 样条曲线拟合原理是通过多个控制点和局部的曲线段组合来拟合。多个控制点能够更灵活地描述轨迹的形状。有效提高对复杂特征的捕捉能力, 解决多项式曲线拟合容易生成包含突兀转折的曲线的问题。其中, B 样条曲线拟合原理如图 7 所示。

图 5 中, A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 表示 4 个控制点, A'_1 、 A'_2 、 A'_3 、 A'_4 表示通过插值计算扩展出来的控制点, L_1 、 L_2 表示插值点连接线段的中点。

如图 7 所示, 将已知的 4 个控制点相连形成的规划轨迹曲线中存在突兀转折, 通过 B 样条曲线拟合分析,

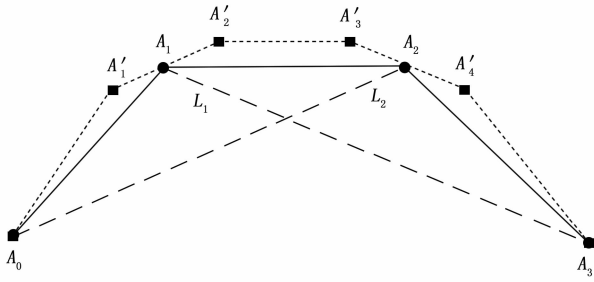


图 7 B 样条曲线拟合原理

在相邻控制点之间增加控制点, 只要将任意 4 个控制点连接起来, 即可形成一条较为平滑的 B 样条曲线^[18], 而 6 个控制点连接则可以得到 3 段 B 样条曲线。整体来看, 通过扩展控制点确定 B 样条曲线时, 扩展控制点主要包括两类, 如下所示:

$$A' = \begin{cases} A_i - s(A_{i+1} - A_{i-1})M(q)q'' \\ A_i + s(A_{i+1} - A_{i-1})M(q)q'' \end{cases} \quad (4)$$

式中, i 表示控制点编号, s 表示底边系数比例。

经过上述扩展处理, 三次 B 样条曲线方程可以表示为:

$$F(t) = \sum_{i=1}^l B_i(t)A_iA', i = 0, 1, 2, 3 \quad (5)$$

$$\begin{cases} B_0(t) = (1-t)^3/6 \\ B_1(t) = (3t^3 - 6t^2 + 4)/6 \\ B_2(t) = (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)/6 \\ B_3(t) = t^3/6 \end{cases} \quad (6)$$

式中, F 表示三次 B 样条曲线, t 表示变量, l 表示扩展后控制点数量, B 表示 B 样条曲线的样条基。

将公式 (5) 和公式 (6) 结合起来, 用矩阵的方式重新构造连续 3 段 B 样条曲线, 最终得到:

$$\begin{cases} R_{3i+1} = \frac{1}{6}F(t) \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/3 & -5/6 & 2/3 & -1/6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ A_{i+1} \\ A_{i+2} \\ A_{i+3} \end{bmatrix} \\ R_{3i+2} = \frac{1}{6}F(t) \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1/2 & 3/2 & -3/2 & 1/2 \\ 0 & -5/2 & 2 & -1/2 \\ -1 & -5/2 & 3 & -1/2 \\ -2/3 & 1/6 & 5/3 & -1/6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ A_{i+1} \\ A_{i+2} \\ A_{i+3} \end{bmatrix} \\ R_{3i+3} = \frac{1}{6}F(t) \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/6 & -2/3 & 5/6 & -1/3 \\ -1/2 & 2 & -5/2 & 1 \\ 1/2 & -3 & 5/2 & 0 \\ -1/6 & 1/6 & 1/6 & -2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ A_{i+1} \\ A_{i+2} \\ A_{i+3} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中, R 表示 B 样条曲线。

依托于上述 B 样条曲线拟合原理, 规划机械臂连续转动最优轨迹时, 以从起始点连续转动到达目标点的

时间最小化为目标^[19], 构建轨迹规划目标函数为:

$$\min T = \sum_{i=1}^l \alpha_i R_{3i+1} \quad (8)$$

式中, $\min$ 表示最小化取值函数, T 表示机械臂连续转动工作总耗时, α 表示从目标控制点开始到达下一控制点转动所需时间。

除此之外, 充分考虑机械臂工作需求、现场障碍物分布情况, 以及设备活动具体范围, 针对公式 (8) 给出的目标函数设置一系列约束条件。表达式为:

$$\begin{cases} \theta_{j, \min} < \theta_j(t) \leq \theta_{j, \max}, \forall j \\ |\omega_j(t)| \leq \omega_{j, \max} \\ |\alpha_j(t)| \leq \alpha_{j, \max} \end{cases} \quad (9)$$

式中, t 表示任意时刻, $\theta_{j, \min}$ 、 $\theta_{j, \max}$ 分别表示关节角度的最大值与最小值, $\theta_j(t)$ 表示关节角度, $\omega_j(t)$ 、 $\omega_{j, \max}$ 分别表示关节角速度与最大角速度, $\alpha_j(t)$ 、 $\alpha_{j, \max}$ 分别表示关节角加速度与最大关节角加速度。机械臂的每个关节角度、关键角速度与关节角加速度满足上述约束。

基于上述约束条件和规划目标函数, 应用人工蜂群算法模拟蜂群搜索最优蜜源的过程^[20], 求出最优连续转动轨迹规划方案。人工蜂群算法寻优的实现, 需要依靠引领蜂、跟随蜂、侦查蜂协同作用, 在确定初始种群和个体初始位置后, 由引领蜂开始, 采用交叉的方式更新蜜源 (最优解) 位置:

$$V'_{ou} = V_{ou} + (V_{ou} - V_{pu}) \times \beta_{pu} \min T \quad (10)$$

式中, o 、 p 分别表示初始个体和随机选择个体, u 表示维度, V 表示蜜源初始位置, V' 表示更新后蜜源位置, β 表示随机数。

跟随蜂根据引领蜂更新结果进一步观察蜜源浓度, 通过下式求出对引领蜂的选择概率:

$$\begin{cases} P_o = \frac{V'_{ou} \chi_o}{\sum_{o=1}^U \chi_o} \\ \chi_o = \frac{1}{\epsilon_o} \end{cases} \quad (11)$$

式中, P 表示跟随蜂选择引领蜂的概率, χ 表示适应度, U 表示引领蜂总数, ϵ 表示公式 (8) 对应的目标函数值^[21-22]。最后, 通过侦查蜂判断当前最优解迭代计算是否满足终止条件, 若不满足需要重新由引领蜂更新蜜源位置, 若满足则可以直接输出最优解, 由此确定机械臂连续转动轨迹最佳规划方案。

3.3 机械臂连续转动控制设计

以上述单连杆柔性机械臂连续转动轨迹最佳规划方案为依据, 明确空间内机械臂连续转动时主要变化参数。引入 PI 控制器和模糊规则对这些参数进行不断调整^[23], 以实现机械臂连续转动控制的核心。

对于柔性机械臂本身来说, 电机转速与驱动力矩之

间的传递函数可以表示为:

$$G(s) = \frac{P_o(s^2 + \omega^2)}{(r_1 - r_5^2)s^3 + r_1 s \omega^2} \tag{12}$$

式中, s 表示频率, G 表示传递函数, ω 表示电机转速, r_1 、 r_5 表示动力学特征相关参数 (质量、阻尼系数)。

将 PI 控制器应用到连续转动控制过程中, 定义公式 (12) 所示的闭环传递函数:

$$\hat{G}(s) = \frac{(\eta_1 + \eta_2/s)(\frac{s^2 + \omega^2}{(r_1 - r_5^2)s^3 + r_1 s \omega^2})}{1 + (\eta_1 + \eta_2/s)(\frac{s^2 + \omega^2}{(r_1 - r_5^2)s^3 + r_1 s \omega^2})} \tag{13}$$

式中, $\hat{G}$ 表示结合 PI 控制器的闭环传递函数, η_1 、 η_2 分别表示比例控制参数和积分控制参数。在机械臂运动空间内确定两对极点, 即可通过公式 (14) 计算出 PI 控制参数具体取值:

$$\begin{cases} \eta_1 = 2(r_1 - r_5^2)(\bar{\omega}_1 \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2 \bar{\omega}_2) \\ \eta_2 = (r_1 - r_5^2) \frac{\bar{\omega}_1^2 + \bar{\omega}_2^2}{\omega^2} \end{cases} \tag{14}$$

式中, φ_1 、 φ_2 表示极点阻尼系数, $\bar{\omega}_1$ 、 $\bar{\omega}_2$ 表示极点固有频率系数。

模糊规则用于表示控制误差 e 、控制误差变化率 e' 与比例因子 ρ_1 、积分因子 ρ_2 之间的模糊规则关系:

表 1 模糊规则

e/e'	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/PB	PB/PM	PM/PM	PM/PS	PS/PS	PS/Z	Z/Z
NM	PB/PM	PM/PM	PM/PS	PS/PS	PS/Z	Z/Z	NS/NS
NS	PM/PM	PM/PS	PS/PS	PS/Z	Z/Z	NS/NS	NS/NM
Z	PM/PS	PS/PS	PS/Z	Z/Z	NS/NS	NS/NM	NM/NM
PS	PS/PS	PS/Z	Z/Z	NS/NS	NS/NM	NM/NM	NM/NB
PM	PS/Z	Z/Z	NS/NS	NS/NM	NM/NM	NM/NB	NB/NB
PB	Z/Z	NS/NS	NS/NM	NM/NM	NM/NB	NB/NB	NB/NB

将上述模糊规则引入到机械臂连续转动控制过程中, 通过观察不同输入参数取值条件下控制误差、控制误差率变化^[24], 对控制参数进行合理调整, 最终得到:

$$\begin{cases} \eta'_1 = (\eta_1 + \rho_1) \\ \eta'_2 = (\eta_2 + \rho_2) \end{cases} \tag{15}$$

式中, η'_1 、 η'_2 表示模糊规则调整后的控制参数, ρ_1 、 ρ_2 表示模糊控制器输出的比例因子和积分因子。将调整后的控制参数输入至式 (13) 中。获取优化后的闭环传递函数。利用系统实现单连杆柔性机械臂连续转动控制时, 比例控制参数和积分控制参数的取值, 会对最终控制结果产生极大影响。因此, 系统运行过程中, 依托于模糊规则分析比例因子和积分因子取值误差分布情况, 得到图 8 所示的显示结果。

从图 7 可以看出, 比例因子取值越大, 误差率和误差值会减小, 而积分因子取值越大, 误差率和误差值则

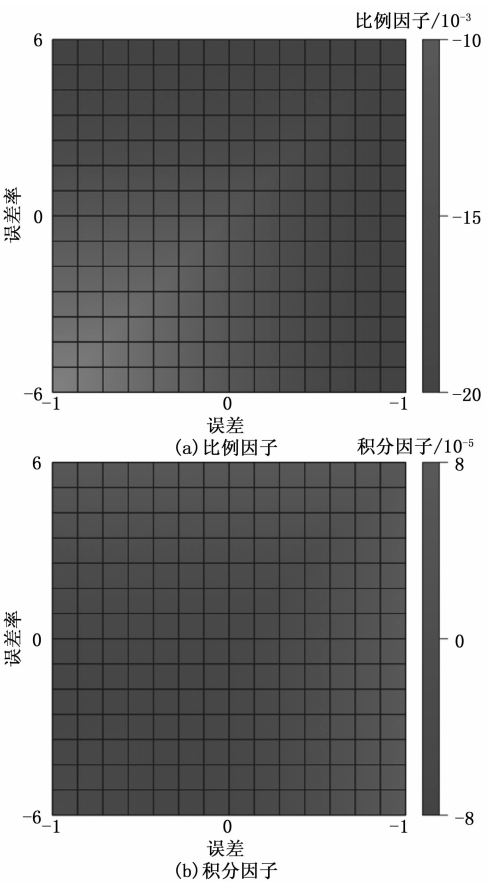


图 8 比例因子和积分因子取值误差分布

会增大。

在模糊 PI 控制器的作用下, 系统可以根据规划运动轨迹启动多个硬件模块, 实现机械臂连续转动基本控制。考虑到干扰力矩会对转动控制质量产生极大影响, 在系统软件设计的最后阶段, 设计基于名义传递函数和低通滤波器的干扰观测器^[25], 生成图 9 所示的改进控制框架。

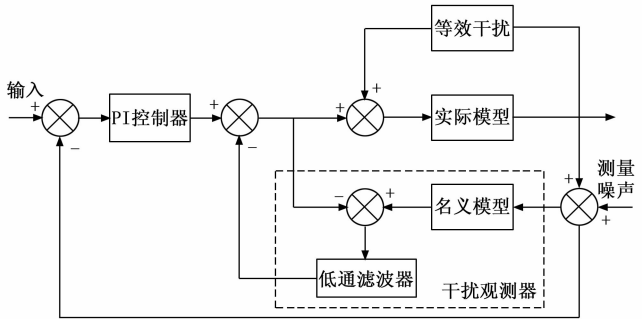


图 9 基于干扰观测器的连续转动控制框图

如图 9 所示, 通过干扰观测器对机械臂连续转动控制过程中产生的干扰力矩进行补偿, 确保实际传递函数和预期传递函数之间的关系满足公式 (16), 即可得到优化后的连续转动控制结果:

$$\phi(s)_{\infty} \leq \frac{1}{1 - \frac{\bar{G}(s)}{\zeta(s)_{\infty}}} \quad (16)$$

式中, ϕ 表示低通滤波器, ∞ 表示正无穷, ζ 表示预期传递函数。基于干扰观测器生成控制补偿优化方案后, 完成了控制系统软件部分的整体设计, 基于此可以极大提升单连杆柔性机械臂连续转动控制质量。针对上述名义传递函数和低通滤波器的干扰观测器的加入, 采用李雅普诺夫稳定性判断系统稳定性。通过定义一个李雅普诺夫函数, 并分析该函数及其导数的性质来判断系统的稳定性。首先将上述控制系统采用状态空间表示 $\bar{x}(t) = f[x(t), t]$, 其中, $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ 是系统的状态向量, $\bar{x}(t)$ 是状态向量对时间的导数, $f[x(t), t]$ 是关于状态向量 $x(t)$ 和时间 t 的非线性向量函数。李雅普诺夫函数是一个标量函数, 要求它是正定的, 即对于所有 $x \neq 0$, 有 $V(x) > 0$, 且 $V(0) = 0$ 。则李雅普诺夫函数形式为二次型函数:

$$V(x) = x^T P x \quad (17)$$

式中, P 表示正定对称矩阵。针对选取的李雅普诺夫函数 $V(x)$ 关于时间 t 求导, 对于非线性系统 $\bar{x}(t) = f[x(t), t]$, 根据复合函数求导法则, $\bar{V}(x)$ 为:

$$\bar{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \bar{x} = \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^T \cdot f(x, t) \quad (18)$$

最后根据 $\bar{V}(x)$ 判断系统稳定性。

1) 稳定性: 设系统初始状态 x_0 位于平衡状态 x_e 为球心、半径为 ρ 的闭球域 $S(\rho)$ 内。如果对于所有 $x \neq 0$, $\bar{V}(x) \leq 0$, 则状态方程的解 $x(t; x_0, t_0)$ 在 $t \geq t_0$ 的过程中, 都位于以 x_e 为球心, 半径为 $c (c \geq \rho)$ 的闭球域 $S(\rho)$ 内, 此时称系统在李雅普诺夫意义下是稳定的。

2) 渐近稳定性: 系统的平衡状态不仅具有李雅普诺夫意义下的稳定性, 且满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t; x_0, t_0) = x_e$, 称此平衡状态是渐近稳定的。这时, 从 $S(\rho)$ 出发的轨迹不仅不会超出 $S(c)$, 且当 $t \rightarrow \infty$ 时收敛于 x_e 或其附近。

3) 不稳定: 从 $S(\rho)$ 出发的轨迹不仅会超出 $S(c)$, 且系统状态会随着时间的远离原点。根据上述步骤进行稳定性分析测试。结果如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 系统的状态轨迹在给定的初始条件下, 始终保持一定的范围内, 并且随着时间的推移逐渐收敛于平衡状态。这与通过李雅普诺夫稳定性分析得到的理论结果完全相符, 进一步验证了系统的稳定性和渐近稳定性。

4 系统测试

4.1 测试环境

系统测试的核心对象是 UR16e 型柔性机械臂, 这

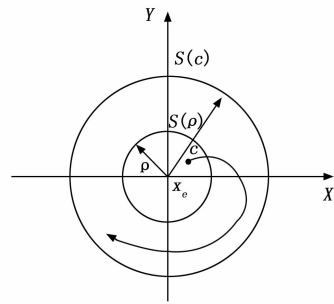


图 10 稳定性分析结果

款机械臂以其高度的灵活性和精确的控制能力著称, 非常适合用于复杂操控任务。主控设备选用了 ECB-MH84 主机, 这款主机以其强大的计算能力和稳定的运行性能, 为实验提供了坚实的硬件基础。将单连杆柔性机械臂连续转动控制系统软件部分看作一个控制程序, 输入到实验主机中, 再面向机械臂安装硬件装置, 确保控制系统能够顺利实施。实验环境如图 11 所示。

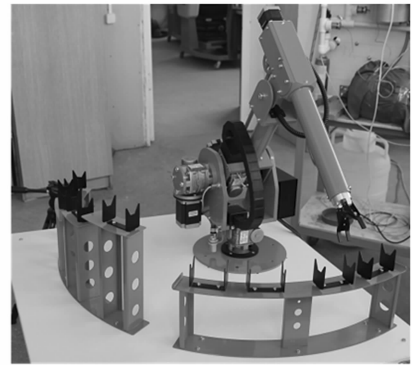


图 11 实验环境

应用 UR16e 型柔性机械臂、ECB-MH84 主机, 开发一个地面物理实验平台, 模拟两种不同工况, 各工况下机械臂实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

参数名称	设定值	
	工况 1	工况 2
机械臂长度/m	0.8	1.0
机械臂质量/kg	0.8	1.1
抗弯刚度(N·m ²)	400	400
库伦摩擦力矩(N·m)	0.28	0.28
静摩擦力矩(N·m)	0.34	0.34
低通滤波器参数 1	0.1	0.1
低通滤波器参数 2	0.1	0.1
低通滤波器参数 3	0.1	0.1

按照控制系统总体框架设计, 完成机械臂、位置传感器、主控电源、核心控制器和驱动电路等硬件设备的连接, 确保硬件连接正确且稳固。在核心控制器中安装并配置好相应的软件系统, 确保 B 样条曲线拟合算法、模糊 PI 控制器等软件模块能够正常运行。

首先,根据表2机械臂的物理结构和运动特性,在软件中构建单连杆柔性机械臂动力学模型。给机械臂施加已知的输入信号,如给定一个特定的关节角度变化指令,记录机械臂的实际运动响应数据,包括关节角度、角速度、角加速度等。

然后,根据机械臂的任务需求和工作空间限制,在软件界面中手动或通过预设程序确定机械臂运动的关键点。将确定的关键点信息输入到B样条曲线拟合算法模块中,软件自动根据算法进行插值扩展计算,生成连续、平滑的运动轨迹曲线。

最后,将规划好的轨迹作为期望输入信号发送给模糊PI控制器,启动机械臂按照规划轨迹进行连续转动。

控制系统测试应用之前,在平台上驱动柔性机械臂完成简单动作,获取三维空间内机械臂连续转动运动空间范围,如图12所示。

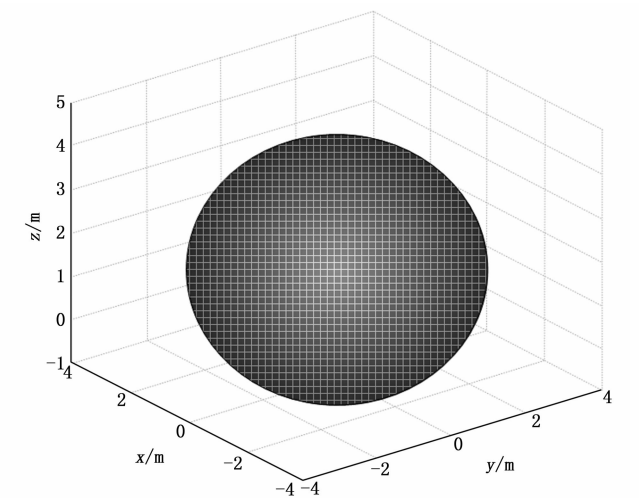


图 12 机械臂转动空间范围

从图12可以看出,机械臂转动空间属于一个近似球体的三维立体空间。在该范围内,设置6个相同高度的置物桩作为必经轨迹点,模拟单连杆柔性机械臂连续转动搬运任务,并将控制系统应用到搬运过程中,测试该系统具体应用效果。

4.2 系统控制结果

基于比例因子取值越大,误差率和误差值会减小,而积分因子取值越大,误差率和误差值则会增大的特点,最终确定模糊PI控制器中比例参数和积分参数取值结果如表3所示。

表 3 控制参数设置

工况	参数名称	设定值
工况 1	比例控制参数	20
	积分控制参数	5
工况 2	比例控制参数	20
	积分控制参数	5

将这一数值输入系统参数设置界面中,得到两种不同工况下系统控制输出的机械臂连续转动轨迹,如图13和图14所示。

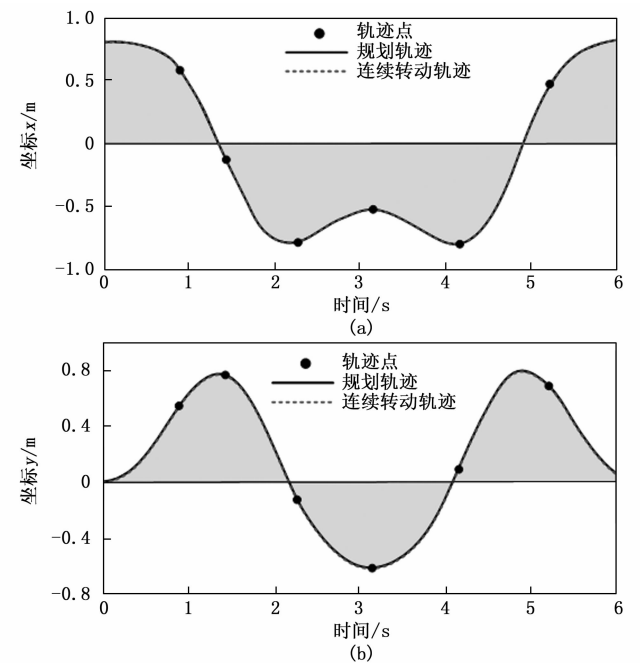


图 13 工况 1 下系统控制后连续转动轨迹

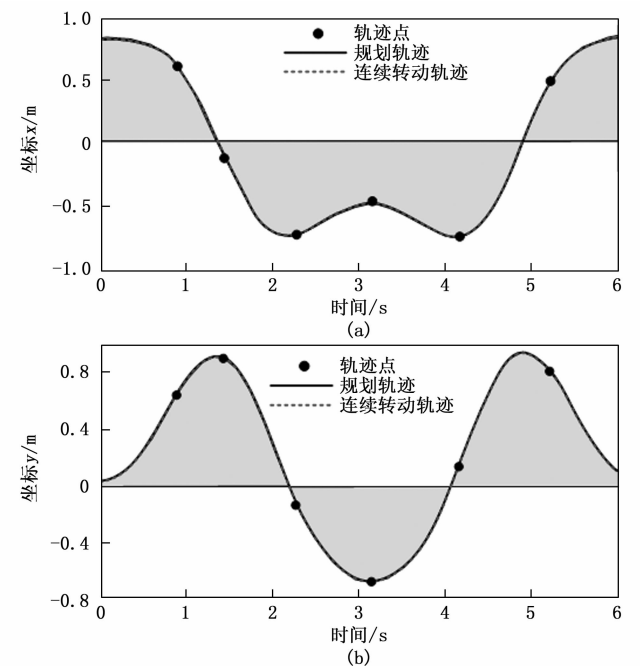


图 14 工况 2 下系统控制后连续转动轨迹

结合图13和图14可以看出,控制系统应用后,机械臂连续转动轨迹途径了6个必经轨迹点,很好地完成了机械臂搬运任务。而且最终输出轨迹与B样条曲线拟合规划轨迹完全相符,这表明了该控制系统具有可行性,满足基础控制要求。

4.3 系统性能分析

为了更好地验证控制系统应用性能，对两种工况下单连杆柔性机械臂连续转动过程中转角变化进行观察，对比期望要求计算出转角控制误差，绘制出图 15 所示的变化曲线。

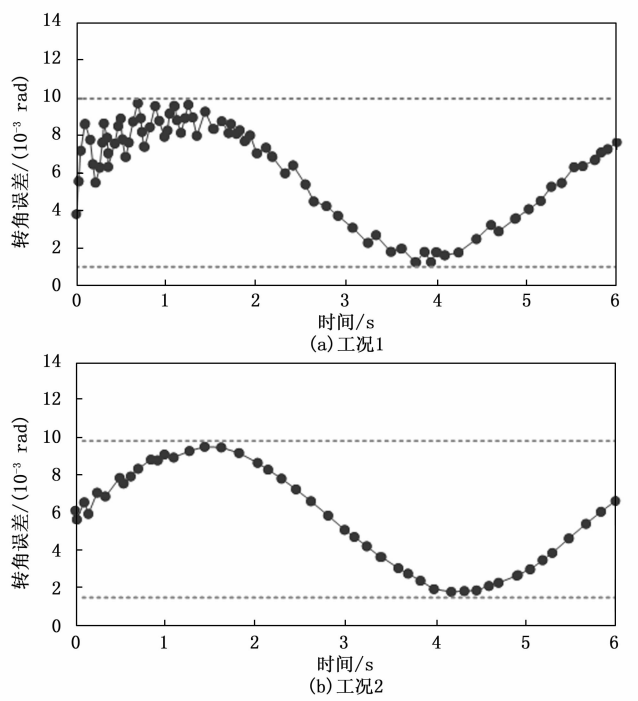


图 15 不同工况下系统控制结果转角误差

从图 15 可以看出，工况 1 条件下系统控制转角误差取值范围在 1×10^{-3} rad 到 10×10^{-3} rad 之间，而工况 2 下转角误差变化区间为 1.7×10^{-3} rad 到 9.9×10^{-3} rad。

综合来看，将新型控制系统，应用到单连杆柔性机械臂连续转动作业场景中，转角误差式中保持在 10×10^{-3} rad 以下，实现了柔性机械臂工作质量的提升，为未来的机械臂应用提供了有力的技术支持。

4.4 对比分析结果

为进一步验证设计方法的实用性，进行对比分析测试，选用文献 [4] 基于 WOA-FOPID 的控制方法与文献 [5] 基于运动形式转化控制方法作为对比方法进行控制误差测试分析，结果如表 4 所示。

从表 4 的数据可以看出，在不同的控制时长下，3 种控制方法的控制误差呈现出不同的变化趋势。基于 WOA-FOPID 的控制方法随着控制时长的增加，控制误差逐渐增大。到 10 小时时，误差增大到 10.2 m。基于运动形式转化控制方法控制误差在 10 小时时达到 11.98 m。与前两种方法相比，所提方法在整个控制过程中控制误差相对较小且增长较为平缓。从 1 小时的 0.08 m 逐渐增长到 10 小时的 0.39 m，表明该方法在长时间的控制过程中具有较好的稳定性和抗干扰能力，能够有效地保持较低的控制误差，实现较为精确的控制。

表 4 控制参数设置

控制时长/h	基于 WOA-FOPID 的控制方法/m	基于运动形式转化控制方法/m	所提方法/m
1	0.45	0.63	0.08
2	0.68	0.85	0.09
3	1.33	1.88	0.15
4	1.96	2.64	0.16
5	2.50	3.95	0.18
6	5.63	8.64	0.22
7	5.99	9.25	0.22
8	8.13	10.25	0.26
9	9.56	11.36	0.28
10	10.2	11.98	0.39

5 结束语

针对单连杆柔性机械臂连续转动控制系统进行深入探讨后，揭示了该系统在理论上的可行性与创新性，为复杂动态环境下机械臂连续转动控制提供了一种全新的解决思路。从实验结果来看，这一控制系统在不同工况下均能够稳定运行，智能规划处理连续转动轨迹，并通过模糊 PI 控制器和干扰观测器实现自适应转动控制处理，以应对更精细的作业需求，为未来多连杆、高精度机械臂的研发奠定了坚实的基础。

参考文献：

[1] 胡善明. 面向智能制造的多轴机械臂柔性控制与调度优化研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60 (9): 98 - 100.

[2] 汤小红, 龚永健. 考虑能耗与负载因素的抓取机械臂运动轨迹规划算法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2024, 54 (7): 1862 - 1868.

[3] 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.

[4] 张 君. 基于 WOA-FOPID 算法的钻锚机器人机械臂运动控制研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50 (6): 292 - 302.

[5] 张春巍, 石一峰, 湛 鑫, 等. 基于运动形式转化利用转动惯量虚拟平动惯性质量的 TMD 控制系统 [J]. 振动工程学报, 2024, 37 (8): 1377 - 1385.

[6] 徐建明, 陈显汉. 基于 CODESYS 平台的移动机械臂运动控制系统设计 [J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52 (3): 237 - 247.

[7] SHANG D, LI X, YIN M, et al. Rotation Angle Control Strategy for Telescopic Flexible Manipulator Based on a Combination of Fuzzy Adjustment and RBF Neural Network [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35 (1): 1 - 24.

(下转第 204 页)