

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.039

基于单片机嵌入的液压柔性机械臂振动滑模控制方法

刘永琦¹, 解向利²

(1. 北京科技职业大学, 北京 100176; 2. 武汉菱电汽车电控系统股份有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要:为实现液压柔性机械臂振动控制, 单片机集成输入整形器规划速度函数以减振, 设计振动滑模控制器。以位置误差定义滑模面并求其二阶导, 设计非线性干扰观测器估计外扰。设中间变量建立新滑模方程设计滑模控制器。控制指令经 CAN 总线等发至驱动器, 驱动机械臂按规划轨迹稳定运行。实验结果表明, 所提方法振动持续时间缩短约 30%, 在角度、角速度等指标上控制更平稳、波动减小, 振动控制精度高、稳定性好。

关键词: STM32 单片机; 输入整形器; 机械臂振动滑模控制; 滑模控制器

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)04-0200-07

Sliding Mode Control Method for Hydraulic Flexible Robotic Arm Vibration Based on Microcontroller Embedding

Liu Yongqi¹, Xie Xiangli²

(1. Beijing Polytechnic University, Beijing 100176, China;

2. Wuhan Lingdian Automotive Electronic Control System Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: In order to achieve vibration control of hydraulic flexible robotic arm, a single-chip microcontroller integrates an input shaper to plan the velocity function for vibration reduction, and a vibration sliding mode controller is designed. The sliding surface is defined based on position error, and its second derivative is calculated. A nonlinear disturbance observer is designed to estimate external disturbances. A new sliding mode equation is established by introducing intermediate variables to design the sliding mode controller. Control commands are sent to the driver via the CAN bus, etc., driving the robotic arm to operate stably according to the planned trajectory. Experimental results show that the proposed method reduces the vibration duration by approximately 30%, achieves smoother control and reduced fluctuations in indicators such as angle and angular velocity, and exhibits high vibration control accuracy and good stability.

Keywords: STM32 microcontroller; input shaper; sliding mode control of robotic arm vibration; sliding mode controller

0 引言

液压柔性机械臂^[1]因其灵活性强、操作精度高等特点, 在工业生产具有重要意义。然而, 液压柔性机械臂因其固有的柔性结构, 在运动时会不可避免地引发振动现象, 这种振动不仅降低了其运动过程中的准确性, 还对其应用领域构成了一定的局限性。为了解决上述问题, 将对其振动控制展开进一步研究。

李佩颖等^[2]构建液压柔性机械臂数学模型, 采用结合扰动观测器的动态转矩反馈控制策略, 调整转速变增益 PI 控制以抑制振动。该方法依赖单核控制器实现动态转矩反馈控制, 其计算能力和数据处理能力有限, 难以快速处理振动数据,

导致系统响应速度慢。在动态工况下, 单核控制器无法高效协同处理多项任务, 难以满足振动数据的快速交换需求, 影响控制效果。李小彭等^[3]采用模糊理论整定 PI 控制器参数, 建立考虑摩擦模型的液压柔性机械臂动力学方程, 分析非线性项影响, 通过极点配置确定 PI 参数范围, 依据模糊规则实时调整, 减小转速波动, 抑制机械臂振动。然而, 模糊规则的计算复杂度较高, 对控制器的计算能力要求较高。在单核控制器环境下, 模糊规则的计算会占用大量计算资源, 导致系统难以快速处理振动数据, 影响响应速度。Guan 等^[4]采用高阶轨迹规划与粒子群优化算法展开液压柔性机械臂最优轨迹规划, 以抑制残余振动。运用固定时间非奇异终端滑模控制方案, 确保机械臂

基金项目: 北京科技职业大学航空工程学院基金项目 (2023X004-KXY; 2022X007-KXY)

第一作者简介: 刘永琦 (1981—), 男, 湖南益阳人, 工程师, 硕士研究生, 研究方向为单片机嵌入式开发, wff123123123450@163.com。

能稳定跟踪优化轨迹,降低振动幅度。然而,高阶轨迹规划和粒子群优化算法需要大量计算资源,尤其是在多自由度系统中,计算复杂度显著增加。在单核控制器环境下,这些算法的运行会占用大量计算资源,导致系统难以快速处理振动数据,影响响应速度。Chen 等^[5]采用机器学习直接激励(DEML)策略,通过液压柔性机械臂施加微小激励并收集加速度响应,训练人工神经网络控制器。该控制器直接从响应数据生成控制力,实现振动控制。然而,DEML 策略需要大量传感器和数据处理能力,增加了系统复杂性。在单核控制器环境下,数据收集和处理的效率较低,难以快速完成数据交换和协同处理,影响系统响应速度。

上述方法均因依赖单核控制器,计算能力和数据处理能力有限,导致系统响应速度慢、控制精度不足和振动抑制效果不稳定。这难以满足工业应用中对高效振动抑制的需求。为此,提出一种基于单片机嵌入的液压柔性机械臂振动滑模控制方法。该方法集成输入整形器技术于单片机,通过精确调整输入信号的延迟和幅值优化机械臂运动轨迹以减少初始振动;同时设计振动滑模控制器,定义滑模面并求其二阶导数,设计非线性干扰观测器实时估计外部干扰,设定中间变量建立新滑模方程,分别设计不考虑和考虑外部干扰时的控制器,并在考虑干扰时引入积分滑模面和补偿器,实现液压柔性机械臂的振动滑模控制,有效地应对复杂动态环境下的振动干扰,确保机械臂稳定运行。

1 液压柔性机械臂振动滑模控制方法

设计基于单片机嵌入的液压柔性机械臂振动滑模控制方法,该方法通过设计嵌入单片机^[6-8]以及在单片机上引入相应的滑模控制器,实现液压柔性机械臂的振动滑模控制。总体框架如图 1 所示。

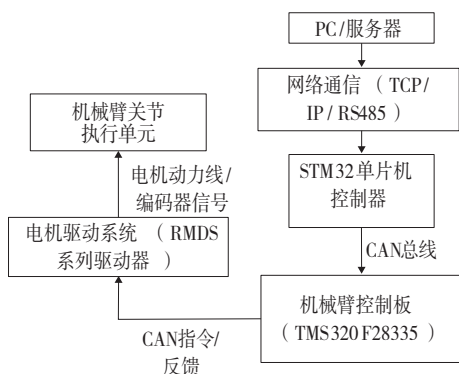


图 1 液压柔性机械臂振动滑模控制方法框架

1.1 基于单片机优化的液压柔性机械臂运行框架设计

液压柔性机械臂在工业应用中,由于其独特的结构灵活性和液压驱动方式,常常受到振动干扰的影响。而传统单核控制器由于处理能力的局限,难以满足液压柔性机械臂振动数据的快速交换与协同处理需求。因此,本文通过以 STM32F407IGT6 单片机为核心的主控制板、TMS320F28335 微处理器为核心的机械臂控制板、RMDS 系列电机驱动器与 maxon 电机搭配、E6B2 系列光电编码器作为检测装置,以及 24 V/20 Ah 锂电池供电方案实现机械臂稳定运行,从而满足液压柔性机械臂在复杂工作环境中的实际需求,为后续的振动抑制提供坚实的基础。

液压柔性机械臂融合液压驱动与柔性结构设计,它是先进机械装置。其液压系统依据帕斯卡定律,液压泵将机械能转为液压能,以液压油为介质,在封闭回路传递压力与流量,驱动液压缸实现关节运动。该机械臂^[9-10]系统控制结构分 3 层:上层负责任务规划与轨迹生成,依照作业任务算出末端执行器在笛卡儿空间的期望轨迹,并为此转为关节期望运动参数;中层将上层生成的关节期望参数转为液压系统控制信号,通过控制液压阀调节油液流量和压力,精准控制执行元件运动速度和力;底层主要是传感器反馈与信号处理,用传感器实时采集液压系统状态信息并反馈给中层控制器,以调整优化控制信号。其具体结构如图 2 所示。

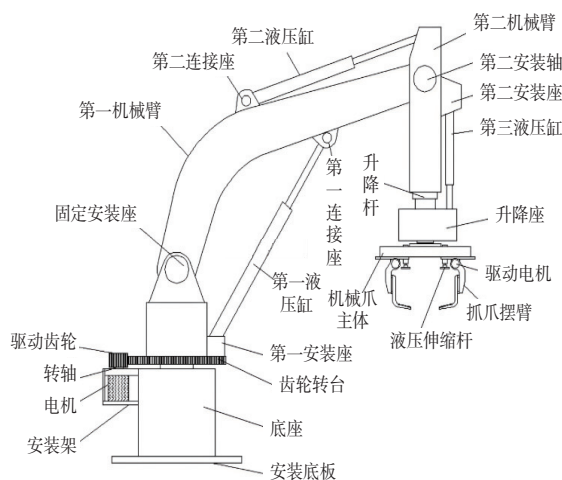


图 2 液压柔性机械臂结构图

1) 主控制板

主控制板的核心控制组件为 STM32F407IGT6

单片机,其系统频率高达 168 MHz,并配备了多外设接口。该单片机通过网络通信端口与 LAN8720 模块实现互联,与上位机进行数据互通,并设有两个传感器接口用于获取设备电流数据。电流测量环节采用 ACS712ELCTR-30A 电流传感器,并通过电阻分压电路和电压跟随器实现电气隔离后输入至 ADC 转换端口。此外,主控板还设计了独立的 DC-DC 转换电路,为主控板及机械臂控制板上的电子元件提供所需的 3.3 V 和 5 V 供电电压。

2) 机械臂控制板

机械臂控制板的核心为 TMS320F28335 微处理器,其主频高达 150 MHz,并配备了 16 个 ADC 通道和 2 路 CAN 通信接口^[11-13]等。该控制板通过 CAN 总线通信机制,采用 CTM8251T 收发器实现与电机驱动器的数据交互,该收发器具有 2 500 V 的 DC 隔离功能,确保了通信的稳定性和安全性。

3) 电机驱动与电机配置

选用 RMDS 系列电机驱动器,该系列兼容 CAN 通信标准。机械臂基座关节装配了 maxon EC45 电机与 RMDS-402 驱动组合,其余关节配置 maxon EC25 电机与 RMDS-201 驱动搭配。全部驱动器均经由 CAN 总线与机械臂主控制器实现连接。

4) 角度与速度检测装置

选用 E6B2 系列光电编码器作为机械臂关节的角度和速度检测装置。

5) 供电方案

液压柔性机械臂采用 24 V/20 Ah 锂电池作为供电电源。电源系统设计方案为锂电池外接多级电压转换模块,电机驱动器直连锂电池实现节能,同时优化了电源转换效率。

1.2 基于输入整形器的初始振动抑制

基于 1.1 节 5 个组成部分实现液压柔性机械臂控制过程中发现,初始振动的增加会显著影响机械臂的定位精度和操作稳定性,甚至会对其结构造成长期损害。为了有效降低初始振动,本文在主控制板的 STM32F407IGT6 单片机上引入了输入整形器技术。该技术通过精确调整输入信号的延迟和幅值,优化机械臂的运动轨迹,从而在机械臂工作前减少初始振动,为后续的振动滑模控制算法提供一个更平稳的起点。

输入整形器^[14-15]的处理步骤如下:

1) 确定输入整形器参数

a) 弹性结构模态数 q 决定输入整形器需要的

常数和延时量。

b) $2q$ 个整形器常数 $a_1, a_2, \dots, a_{2q}$, 根据机械臂的固有频率和模态阻尼设定。

c) 延时量 ΔT , 用于在输入信号中引入时间延迟。

d) 归一化常数 C , 确保整形后的信号幅值与原始信号相同, 计算公式为

$$C = \frac{1}{1+a_1+a_2+\dots+a_{2q}} \quad (1)$$

2) 规划速度函数并整形

依据机械臂末端起始点 p_0 和终止点 p_m 的位置信息^[16-17]规划速度变化曲线 $v(t)$ 。该曲线遵循经典的梯形速度模式, 包含初始的匀加速阶段、中间的匀速行进阶段以及最终的匀减速阶段。

应用输入整形技术, 对速度函数 $v(t)$ 展开整形, 得到新的速度函数 $v'(t)$ 。整形公式为

$$v'(t) = C[v(t) + a_1 v(t - \Delta T) + \dots + a_{2q} v(t - 2q\Delta T)] \quad (2)$$

3) 计算机机械臂末端笛卡儿坐标

通过运用数值积分, 根据经过调整(整形)后的速度函数 $v'(t)$ 来计算机械臂末端的笛卡儿空间位置 $\bar{p}_i$, 从而确保机械臂末端能够精确地抵达设定的目标终点, 标准值为 P 。这一过程涉及的积分运算公式为

$$\bar{p}_i = p_0 + P \int_0^{t_i} v'(t) dt \quad (3)$$

式中 t_i 为循环变量, $m(1+2q\Delta T/T)$ 为 t_i 的上限。

4) 求解关节转角函数

根据逆运动学^[18-19]的解析原理, 从已知的笛卡儿坐标系 $\bar{p}_i$ 中的位置信息, 反推出两个关节的转角函数, 分别记为 $\bar{\theta}_{1i}$ 和 $\bar{\theta}_{2i}$ 。

5) 验证整形效果

此时, 速度函数满足条件 $v(t) = 0$ 且 $t < 0$ 或者 $t > T$, 若整形器的常数满足式(3)的关系条件, 则可以证明, 通过对经过整形的速度函数展开积分所计算出的运行距离, 与未经过整形的速度函数直接积分得到的运行距离是完全一致的, 表达式为

$$\int_0^{T+2q\Delta T} v'(t) dt = \int_0^T v(t) dt \quad (4)$$

该整形过程确保了液压柔性机械臂末端能到达相同的终点, 同时减少了初始振动。

1.3 机械臂振动滑模控制器设计

尽管输入整形器技术能够显著降低初始振

动,但在复杂的动态工作环境下,机械臂可能会受到各种外部干扰和内部动态变化的影响,导致振动持续存在或重新产生。因此,引入液压柔性机械臂的振动滑模控制方法,该方法能够实时监测系统状态,并根据滑模面的变化动态调整控制量,从而更有效地应对这些动态变化,确保机械臂的稳定运行。控制器框图如图3所示。

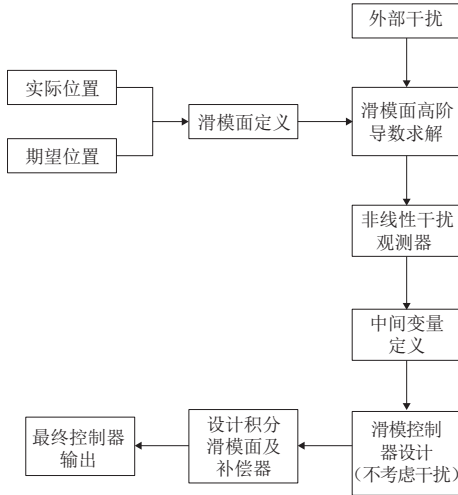


图3 滑模控制器框图

具体实现步骤如下:

1) 定义滑模面^[20-22]

定义滑模面 $\sigma = x_1 - x_{1f}$, 式中 x_1 为机械臂的实际位置, x_{1f} 为期望位置。

2) 求解滑模面的高阶导数

在机械臂系统中, 内部动态特性 g 描述了系统状态变量(位置、速度等)与控制输入 u 之间的动态关系, 它包含了系统的惯性、阻尼、耦合等非线性因素。其对滑模面 σ 求解二阶导数, 得到

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = g + hu + f - \dot{x}_{1f} \\ \ddot{\sigma} = \dot{g} + h\dot{u} + \dot{f} - \ddot{x}_{1f} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u 为控制输入; h 为 u 的状态依赖参数; f 为外部干扰。

3) 设计非线性干扰观测器

为了实时估计外部干扰 $\dot{g}$, 采用鲁棒微分器^[23-24]实施估计。鲁棒微分器能够在存在噪声和不确定性的情况下, 准确地估计信号的导数。本文采用基于滑模面的二阶导数形式, 设计非线性干扰观测器如下

$$\dot{g} = -\lambda \text{sign}(\varepsilon_0 - g), \quad \varepsilon_0 \in R^{2 \times 1} \quad (6)$$

式中: λ 为设计参数; 经过有限时间后, ε_0 为收敛得到 g 的估计值。

4) 定义新的中间变量

设定新的中间变量 $z_1 \in R^{2 \times 1}$, $z_2 \in R^{2 \times 1}$, $z_3 \in R^{2 \times 1}$, 以此建立新的滑模方程

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \dot{\sigma} = z_2 \\ \dot{z}_2 = \ddot{\sigma} = z_3 \\ \dot{z}_3 = \ddot{\sigma} = \dot{g} + h\dot{u} + \dot{f} - \ddot{x}_{1f} \end{cases} \quad (7)$$

5) 设计滑模控制器

在不考虑外部干扰的情况下, 即 $\dot{f} = 0$, 设计控制器 $\dot{v}(t')$ 如下

$$\begin{cases} \dot{v}(t') = h^{-1}[-\dot{g} + e(t') + \ddot{x}_{1f}] \\ e(t') = -l_1 |z_1|^{\alpha_1} \text{sign}(z_1) - l_2 |z_2|^{\alpha_2} \text{sign}(z_2) - l_3 |z_3|^{\alpha_3} \text{sign}(z_3) \end{cases} \quad (8)$$

式中: l_1, l_2, l_3 为设计参数, 用于设计 Hurwitz 多项式 $\lambda^3 + l_3 \lambda^2 + l_2 \lambda + l_1$; $e(t')$ 为待设计函数; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为设计参数, 范围为 $0 \sim 1$, 且满足 $\alpha_{j-1} = \frac{\alpha_j \alpha_{j+1}}{2\alpha_{j+1} - \alpha_j}$, 式中 $j = 2, 3, \alpha_4 = 1, \alpha_3 = \alpha_0$ 。

6) 设计积分滑模面及补偿器

在考虑外部干扰的情况下, 给定积分滑模面为

$$d(t') = z_3(t') - z_3(t'_0) - \int_{t'_0}^{t'} e(v) dv \quad (9)$$

式中 $z_3(t'_0)$ 为 $z_3(t')$ 的初始值, v 为一个积分变量。

为补偿干扰 $\dot{f}$ 对系统的影响, 在控制器 $\dot{v}(t')$ 中引入补偿项 $e_f(t') = -\beta d - \eta \text{sign}(d)$, 其中 $\beta = \text{diag}(b, b)$ 为正定对角函数。

因此, 考虑干扰存在的情况下, 控制器 $\dot{v}(t')$ 重新设计为

$$\dot{v}(t') = h^{-1}[-\dot{g} + e(t') + e_f(t') + \ddot{x}_{1f}] \quad (10)$$

7) 稳定性验证

定义 Lyapunov 函数 $V = \frac{d^T d}{2}$, 并对其求导, 得到

$$\dot{V} = d^T \dot{d} = b d^T - \eta |d| + d^T \dot{f} \quad (11)$$

由于 $r > \dot{f}$, 该不等式证明系统在有限时间内是稳定的。算法所得控制指令经 CAN 总线等通信发至电机驱动器, 以驱动液压柔性机械臂的电机, 使其按照规划的工作轨迹稳定移动, 以此实现液压柔性机械臂的振动滑模控制。

2 实验与分析

设计如图4所示的带有柔性关节的液压机械臂实验平台,柔性机械臂各参数如表1所示。

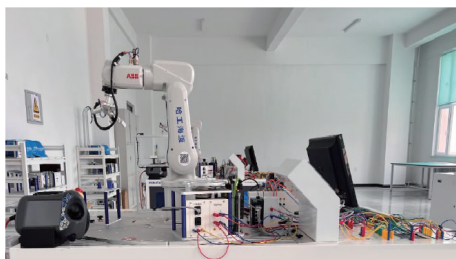


图4 实验平台

表1 液压柔性机械臂参数

参数	数值
长度/m	1.50
宽度/m	0.20
厚度/m	0.08
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2.81×10^3
末端质量/kg	4
弹性模量/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.73×10^{11}
转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	1

设置输入整形器参数,弹性结构模态数为2,整形器常数根据机械臂固有频率和模态阻尼计算得出,延时量设为0.05 s。规划速度函数并应用输入整形技术得到新速度函数,通过加速度传感器记录液压柔性机械臂在有无输入整形器作用下的振动加速度。实验采用相同起点和终点的运动轨迹,以此对比两种情况下的振动情况,结果如图5所示。

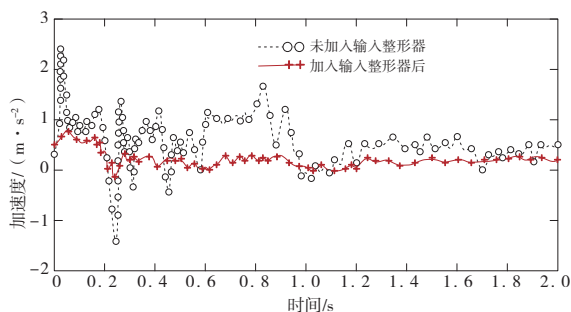
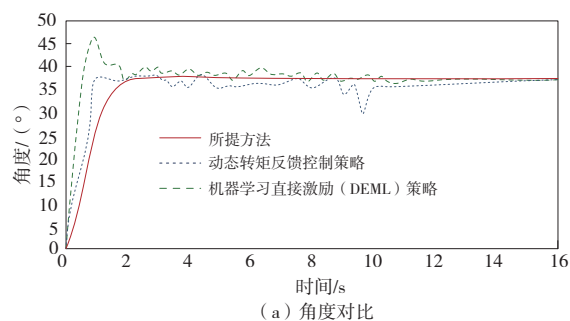


图5 输入整形的振动控制结果

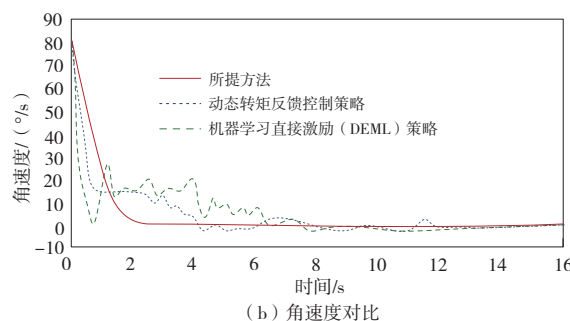
实验结果显示,在输入整形器作用下,机械臂的初始振动加速度峰值显著降低,振动衰减速度加快。通过对比有无输入整形器时机械臂振动加

速度随时间的变化曲线,精确测量了振动从开始到基本结束所经历的时间。经过多次实验和精确测量,振动持续时间缩短了约30%。这一结果表明,输入整形器有效减少了液压柔性机械臂的初始振动,为后续振动滑模控制提供了更好的初始条件,有助于提高机械臂的运动精度和稳定性。

对振动状态下的柔性机械臂分别采用振动滑模控制方法、动态转矩反馈控制策略和机器学习直接激励(DEML)策略实施振动控制。其中,振动滑模控制方法的滑模面偏差阈值设定为0.01 m;动态转矩反馈控制策略的反馈增益设定为5;DEML策略的激励信号幅值设为0.1 A,算法由单片机执行。基于上述参数,得到了3种控制方法在机械臂角度和角速度两个关键指标上的控制对比结果,如图6所示。



(a) 角度对比



(b) 角速度对比

图6 各方法振动指标控制结果

图6的实验结果表明,振动滑模控制方法在柔性机械臂的振动控制上表现优异。与动态转矩反馈控制策略和DEML策略相比,振动滑模控制方法在角度、角速度等指标上呈现出更平稳的控制效果,波动显著减小。动态转矩反馈控制策略和DEML策略在控制过程中存在明显的波动和收敛速度较慢的问题,而振动滑模控制方法能够快速且准确地调节机械臂的状态,实现更优的振动抑制效果。

预先规划液压柔性机械臂的运动轨迹作为标准控制轨迹,设定可靠的接触作业面。在此条件下使用上述3种方法展开机械臂振动控制,将3

种方法在不同接触作业面控制点的控制轨迹坐标与规划的标准控制轨迹坐标进行对比,得到的结果如图7所示。

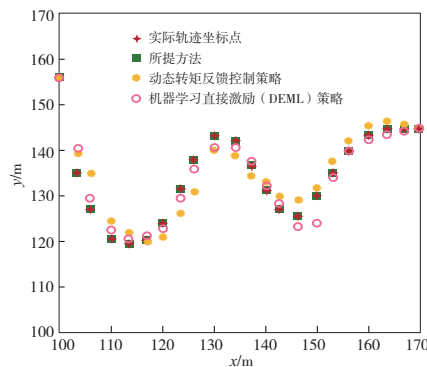


图7 各方法轨迹跟踪结果

图7给出的实验结果表明:振动滑模控制方法能够更精确地跟踪标准轨迹,波动小且收敛速度快。相比之下,动态转矩反馈控制策略在控制过程中的轨迹跟踪结果存在较大的波动;机器学习直接激励(DEML)策略的控制效果要好些,但仍不如所提的振动滑模控制方法精确稳定。振动滑模控制方法通过结合滑模控制理论和非线性干扰观测器,不仅实现了对机械臂振动的实时监测,还能够根据滑模面的变化动态调整控制量,从而在初始振动抑制的基础上进一步提高了振动抑制的精度和稳定性。因此,在轨迹跟踪和振动控制任务中,振动滑模控制方法展现出了优异的性能。

3 结语

针对液压柔性机械臂在动态工况下的时变振动问题,所提方法利用STM32F407IGT6单片机与TMS320F28335微控制器的协同机制,实现了振动数据的高速交换与处理。通过在单片机中集成输入整形器以优化机械臂的运动轨迹,抑制初始振动,并设计振动滑模控制器来实时监测并动态调整控制策略,有效应对机械臂运行过程中的振动问题。实验表明:所提方法使振动持续时间缩短约30%,同时在角度和角速度等关键指标上展现出更加平稳的控制效果,波动幅度也明显减小。此外,该方法能够更精确地跟踪标准轨迹,具有波动小且收敛速度快的特点,展现出高度的控制精度与稳定性,对推动机械臂控制技术的发展具有显著的实际应用价值和意义。

参考文献:

[1] 赵玉贝,杨静,王伟,等. 液压驱动型六轴机械臂运动

学研究[J]. 中国工程机械学报, 2024, 22(3): 315-320.

[2] 李佩颖,夏加宽,万成超. 基于动态转矩反馈的机械臂柔性系统振动抑制[J]. 电气传动, 2023, 53(4): 9-14.

[3] 李小彭,周赛男,刘佳琪,等. 模糊整定PI参数的双柔性机械臂振动抑制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 217-225.

[4] Guan Y, Wang Y, Yin R, et al. Vibration suppression and trajectory tracking control of flexible joint manipulator based on PSO algorithm and fixed-time control[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2024, 2024(1): 5510259.

[5] Chen P C, Chou C W, Wang W J. Rapid controller generation for vibration suppression of structures using direct excitation with machine learning[J]. Journal of Structural Engineering, 2024, 150(3): 04023237.

[6] 林法. 基于AT89S52单片机的液压传动控制系统设计[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(3): 46-49.

[7] 李珑,桓茜. 基于单片机技术的机器人机械臂运动控制研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(8): 243-246.

[8] 谢曼,王龙涛,陈中尹,等. 实-虚结合的机械臂与数字孪生体协调控制[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(11): 243-252.

[9] 姜龙云,高永强,王文成,等. 带电抢修机器人液压柔性关节多机械臂协同控制[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(10): 49-54.

[10] 丁心安,李美莹. 考虑动力变动关系的液压柔性机械臂末端定位控制方法[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(12): 47-50, 55.

[11] 李双圻,朱天启,冒建亮. 基于运动轨迹预测控制的机械臂目标捕捉策略[J]. 计算机仿真, 2024, 41(7): 479-483, 545.

[12] 王博,邓鹏程,刘国英,等. 基于CAN总线控制系统的航天特种机械臂设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(5): 114-119.

[13] 马晓春,沈梅,胡婷婷,等. 自驱动关节臂测量机多电机同步控制系统[J]. 机械设计与制造, 2024(9): 279-283.

[14] 邱泽昊,孙宁,刘卓清,等. 双桅杆式起重机的时变输入整形控制方法[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(8): 1509-1518.

[15] 张明,罗雷明,张凯,等. DCM 升压型 PFC 变换器的电流重整补偿策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(6): 181-188.

[16] 陈少南,赵桂生,刘蕾,等. 基于自适应阻抗控制的大负载液压机械臂柔顺控制[J]. 液压与气动, 2024, 48(4): 15-21.

[17] 王收军,李琛璋,刘楠. 基于ADAMS的重载液压机

- 收稿日期:2025-05-06

- [19] 李卫国,梁智豪.基于风机转子转速以及荷电状态的变系数风储联合系统参与一次调频控制策略[J].东北电力大学学报,2025,45(1):83-94.
- [20] 季湛洋,胡阳,孔令行,等.考虑多领域耦合特性的风电机组一次调频动态建模与仿真[J].中国电力,2025,58(4):56-67.
- [21] 奥博宇,陈磊,闵勇,等.提升变桨减载风电机组调频性能的模糊前馈控制[J].中国电机工程学报,2025,45(11):4230-4243.
- [22] 田春笋,王浚怡,蒋小亮,等.基于模糊控制与风速分区的风电机组一次调频控制策略研究[J].可再生能源,2025,43(1):124-133.
- [23] 杨婷婷,徐永强,李浩千,等.一种考虑频率二次跌落的风火联合调频控制策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(21):62-71.
- [24] 褚志杰,韩朋谊,郑立星,等.混合储能参与电网一次调频的综合控制策略研究[J].动力工程学报,2025,45(9):1511-1518,1535.
- [25] 赵熙临,姚业佩,何晶晶,等.考虑风机分组的风储联合辅助调频双目标预测优化方法[J].电网与清洁能源,2021,37(10):59-66.

收稿日期:2024-10-11