

# 基于模糊前馈控制的关节型机器人 振动抑制算法\*

甘亚辉<sup>1,2</sup>, 徐升<sup>1</sup>, 韩早<sup>3</sup>, 李昂<sup>3</sup>, 徐杰威<sup>1</sup>

1. 东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096
2. 东南大学南通海洋高等研究院, 江苏 南通 226010
3. 英特尔边缘计算研究所, 江苏 南京 211135

**摘要:**提出了一种基于前馈补偿与模糊控制的混合控制策略。该方法基于精确动力学模型进行前馈控制,同时引入模糊逻辑以提升控制器的性能。首先,对机器人运行中产生振动的主要因素进行分析,并选定ISO9283标准中的估计准确度作为性能评估指标,用于量化轨迹跟踪误差与振动抑制的效果。文中将提出的模糊前馈控制算法与传统PD控制、结合前馈补偿的PD控制进行了对比。仿真结果表明,该方法在轨迹跟踪精度和振动抑制效果方面均表现出显著提升,验证了方法的有效性与优越性。

**关键词:**关节型机器人;动力学模型;前馈控制;模糊控制;振动抑制

**中图分类号:**TP241.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0137(2026)01-0043-09

## Vibration suppression for articulated robot by fuzzy feedforward control

GAN Yahui<sup>1,2</sup>, XU Sheng<sup>1</sup>, HAN Zao<sup>3</sup>, LI Ang<sup>3</sup>, XU Jiwei<sup>1</sup>

1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China
2. Advanced Ocean Institute of Southeast University, Nantong 226010, China
3. Intel Intelligent Edge Computing Joint Research Institute, Nanjing 211135, China

**Abstract:** This paper presents a hybrid control strategy combining feedforward compensation and fuzzy control. The approach leverages an accurate dynamic model for feedforward control and incorporates fuzzy logic to enhance overall controller performance. Key vibration sources during robot operation are analyzed, and trajectory accuracy, as defined by ISO9283, is adopted as the evaluation metric. The proposed fuzzy feedforward controller is compared with traditional PD control and feedforward-compensated PD control. Simulation results demonstrate that the proposed method significantly improves trajectory tracking accuracy and vibration suppression, validating its effectiveness.

**Key words:** articulated robot; dynamic model; feedforward control; fuzzy control; vibration suppression

关节型机器人主要用于替代或辅助人类完成繁重、危险或高精度的作业任务。作为一种具有多自由度、垂直串联多关节的机械系统,关节型机器

人普遍具有非线性、强耦合和时变等复杂特性,给其控制策略的设计、动力学建模等带来了极大的挑战(Han et al., 2025)。因此,需要采取有效的控制

\* 收稿日期:2025-05-20

录用日期:2025-06-03

网络首发日期:2025-09-23

基金项目:国家自然科学基金(61873308)

作者简介:甘亚辉(1985年生),男;研究方向:机器人控制;E-mail:ganyahui@seu.edu.cn

全文阅读



ZR20250087

策略,以提升关节型机器人的运动稳定性与控制精度。振动抑制则是指通过多种手段减小或消除机械系统中的振动,以提升机器人运动的精度、稳定性及其结构的耐久性(Xi et al., 2025)。

国内外学者提出了多种振动抑制技术,这些方法可归类为主动控制和被动控制两大类,包括滑模控制、PID控制、反馈控制、模糊控制以及前馈控制等。模糊控制是一种基于模糊逻辑理论的智能控制策略,主要用于应对具有不确定性、非线性及模型不精确等特性的系统。与传统控制方法依赖精确数学模型不同,模糊控制通过构建一系列语言规则和隶属函数,实现对系统状态与控制行为之间关系的模糊映射,从而模拟人类的模糊推理过程。在机器人应用中,尤其是在负载变化频繁或系统建模误差较大的情况下,模糊控制器能够实时、自适应地调整控制参数,有效抑制非期望振荡,提高系统的运动稳定性。通过对模糊或不完整输入信息的处理,模糊控制在振动抑制方面表现出较强的鲁棒性与灵活性。已有研究表明,模糊控制因其不依赖精确模型而在应对系统非线性与不确定性方面表现出良好鲁棒性与自适应性,在机器人振动控制中被经常采用(Ju et al., 2018; Liu et al., 2022)。

前馈控制常与动力学模型相结合,以实现高精度控制。机器人动力学模型用于描述关节与末端执行器之间的相互关系,通常包括惯性、阻尼以及弹性等因素。通过建立精确的动力学模型,前馈控制可在机器人运动过程中预测外部扰动,并提前施加相应补偿,从而提升系统响应的主动性与准确性。比如,Li et al.(2022)提出了一种将前馈补偿与反馈控制相结合的方法,以提升关节型机器人的定位精度。该研究采用双闭环控制策略,在有效降低轨迹误差的同时,增强了系统运行的稳定性。力矩前馈控制是一种常用的前馈控制方法,其通过提前施加力矩补偿,有效降低机器人末端执行器的振动。Shao et al.(2020)提出了一种基于机器人动力学参数辨识的前馈控制方法。该方法通过建立高精度的动力学模型,并引入力矩前馈控制策略,在提升轨迹跟踪精度的同时,增强了机器人系统的动态响应性能。Ge et al.(2017)针对码垛机器人残余振动特性进行了分析,采用傅里叶级数对轨迹点进行拟合,并通过遗传算法对轨迹拟合模型进行优化,有效降低了前馈驱动力矩中的高频谐波成分。

输入整形是一种与前馈控制结合使用的控制

方法,在抑制高频振动方面具有显著效果。该方法通过对输入信号的波形进行整形,消除系统中的振动成分,有效减少振动的产生。欧美国家的研究主要集中在前馈控制与输入整形技术方面。Newman et al.(2021)提出了一种基于输入整形与学习型结构动力学模型的振动规避方法,旨在提升轨迹跟踪精度并最小化运动过程中的振动。Chan(2013)基于关节末端位置信息与逆动力学模型,应用输入整形技术对输入信号进行重构,有效实现振动抑制。随着人工智能的发展,欧美学者逐步将深度学习与强化学习应用于机器人振动预测与控制。Ye et al.(2022)提出了一种基于人工神经网络的振动预测与补偿方法,能够实时预测关节型机器人刚度变形并提供动态补偿,从而提升轨迹跟踪精度。

日本作为全球机器人技术的重要引领者,在精密控制与振动抑制方面具有显著优势。Ueno与Tachiya(Ueno et al., 2023)提出了一种启发式算法,通过调整加减速轨迹以降低搬运过程中的残余振动,从而提升作业精度。Tajima et al.(2023)研究了六自由度机器人在加工过程中的姿态优化方法,利用冗余自由度降低振动影响,提升机器人定位精度。我国在机器人振动抑制方面的研究起步相对较晚,但近年来相关研究取得了显著进展。其中,将前馈控制与传统反馈控制相结合以提升系统稳定性的研究逐渐成为热点方向。Wang et al.(2024)针对重载机器人臂的轨迹精度优化问题,提出了一种结合前馈控制与运动学标定的方法。该方法引入蚁群优化算法对参数进行精细调整,有效提升了系统的轨迹跟踪能力与动态稳定性。蒲明辉等(2022)则提出了一种融合前馈控制与模糊控制的方法,用于减小初始关节角误差。该方法通过将模糊控制获得的关节力矩补偿系数与前馈关节力矩相结合,有效补偿了系统的不确定性。姚祥(2018)对重载机器人参数辨识与力矩前馈控制进行了深入研究,为提升机器人动力学建模的精度提供了理论支持。

目前,我国大多数研究仍处于仿真或实验阶段,尚未大规模应用。为解决机械臂操作过程中存在的振动问题,本文在传统PID控制的基础上,提出一种基于动态模型的混合控制方法。通过理论分析,论证了该策略在稳定性方面的可行性。最后,通过仿真实验结果验证了该策略在减小系统振动方面的有效性。

## 1 控制器设计

### 1.1 动力学前馈控制器

在复杂的应用场景中,特别是对机器人提出高速高精度运动要求时,传统的PD控制往往难以满足系统性能需求。其主要局限性在于,控制中的反馈增益 $K_p$ 和 $K_d$ 通常为固定值,难以根据机器人在高速或变速状态下的实际动态特性进行实时调整,从而限制了其在高动态场景中的应用范围。此外,由于伺服系统的控制周期较短,当机器人关节处于极限位置且惯性变化显著时,系统可能需要较大的偏差信号来实现补偿,这种补偿行为极易引发振荡,从而进一步放大振动,最终影响整体控制精度。

通过精确地建模,机器人动力学模型能够准确描述各关节在运动过程中的力矩变化规律。基于该模型实施前馈控制,可在理论上增强系统的动态响应能力,有效抑制由于惯性变化引起的系统振动问题。

将给定的状态变量代入所建立的精确动力学模型后,可将该模型用于力矩前馈控制。其控制律定义为

$$\tau = K_p e + K_d \dot{e} + \tau_D, \quad (1)$$

式中 $\tau_D$ 为根据建模部分得到的精确模型计算出的前馈补偿项。

$$\tau_D = M(q_D)\ddot{q}_D + C(q_D, \dot{q}_D)\dot{q}_D. \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得

$$\tau = M(q_D)\ddot{q}_D + C(q_D, \dot{q}_D)\dot{q}_D + \{K_p e + K_d \dot{e}\}.$$

将控制律代入机器人动力学模型,得

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} \\ &= M(q_D)\ddot{q}_D + C(q_D, \dot{q}_D)\dot{q}_D + \{K_p e + K_d \dot{e}\}. \end{aligned}$$

考虑误差变量

$$\dot{e} = \dot{q}_D - \dot{q}, \quad \ddot{e} = \ddot{q}_D - \ddot{q}.$$

在理想前馈补偿下,假设期望值与实际值足够接近,使得 $M(q_D)\ddot{q}_D$ 和 $C(q_D, \dot{q}_D)\dot{q}_D$ 近似于实际模型,从而有

$$M(q)(\ddot{q}_D - \ddot{e}) + C(q, \dot{q})\dot{q} = K_p e + K_d \dot{e} + \tau_D.$$

假设实际值与期望值之间的差很小,有

$$\tau_D \approx M(q)\ddot{q}_D + C(q, \dot{q})\dot{q}_D.$$

因此, $M(q)\ddot{e} + C(q, \dot{q})\dot{e} + K_p e + K_d \dot{e} = 0$ .

选取Lyapunov函数为

$$V(e, \dot{e}) = \frac{1}{2} \dot{e}^T M(q) \dot{e} + \frac{1}{2} e^T K_p e.$$

由于 $K_p$ 和 $M(q)$ 是正定的,所以 $V \geq 0$ 。仅当 $e = 0$ 且 $\dot{e} = 0$ 时, $V = 0$ 。对 $V$ 求导,得

$$\dot{V}(e, \dot{e}) = \frac{1}{2} \dot{e}^T \dot{M}(q) \dot{e} + \dot{e}^T M(q) \ddot{e} + \dot{e}^T K_p e.$$

进一步,可得

$$\dot{V}(e, \dot{e}) = \frac{1}{2} \dot{e}^T \dot{M}(q) \dot{e} - \dot{e}^T [C(q, \dot{q})\dot{e} + K_d \dot{e}].$$

利用 $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ 的反对称性,有

$$\dot{e}^T \left[ \frac{1}{2} \dot{M}(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{e} = 0. \quad (3)$$

式(3)进一步简化为 $\dot{V} = -\dot{e}^T K_d \dot{e}$ 。

由于 $K_d$ 正定,可以得出 $\dot{V} \leq 0$ 且仅当 $\dot{e} = 0$ 时 $\dot{V} = 0$ 。由于 $V$ 是正定函数, $\dot{V}$ 是半负定,我们可以得出结论,该系统在李雅普诺夫意义下是稳定的。利用LaSalle的不变性原理(Wang et al., 2024),可以证明所有的运动轨迹都收敛于集合 $\{\dot{e} = 0\}$ 。通过对闭环误差动力学的分析,得出 $e$ 和 $\dot{e}$ 均趋近于零,表明系统是渐近稳定的。

### 1.2 复合控制器

前馈控制通过提前补偿已知扰动,可有效提升机器人系统的动态响应能力,但通常需与比例-微分(PD)控制协同使用,以修正残余误差。然而,传统的PD控制器采用固定增益参数,在负载变化、关节非线性行为或工况动态变化等复杂环境下,适应性有限,难以满足系统对精度与鲁棒性的双重需求。针对上述不足,本文提出了一种融合前馈控制与模糊控制的复合控制策略。该方法以模糊控制器替代传统PD控制中的固定增益模块,依据当前误差及误差变化率实时调整控制动作,从而实现自适应调节。该策略显著增强了系统应对不确定性与外部扰动的能力,在复杂和时变环境中可有效提升机器人振动抑制能力与轨迹跟踪精度。

模糊控制器的输入变量为关节位置误差 $e$ 及其变化率 $\dot{e}$ ,输出变量为控制信号 $u_{fuzzy}$ ,该信号用于驱动各关节趋近于目标角度。在模糊控制系统中,采用三角隶属函数对输入与输出变量进行模糊化处理。每个变量划分为五个模糊子集,分别为:负大(NB)、负小(NS)、零(ZE)、正小(PS)和正大(PL)。模糊控制器旨在刻画关节位置误差及其变化率与力矩补偿系数之间的非线性关系。根据经验与实

际控制需求,构建了一套完整的模糊推理规则,用于指导控制信号的生成,相关规则如表1所示。

表1 模糊规则库  
Table1 Fuzzy rule base

$e\dot{e}$	NB	NS	ZE	PS	PL
NB	PL	PL	PS	ZE	ZE
NS	PL	PS	ZE	NS	NS
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	ZE	NS	ZE	NS	NB
PL	ZE	NS	PS	PL	NB

模糊控制器的输出采用零阶 Sugeno 模型,在该模型中,每条模糊规则对应一个常值输出。设控制输出为  $u_{fuzzy}$ ,用于替代传统的比例-微分控制器组件,实现对系统的精细调节。在实际应用中,该输出通常可近似表达为

$$u_{fuzzy} = K_p e + K_d \dot{e} + \delta(e, \dot{e}),$$

其中  $0 < \epsilon < \lambda_{\min}(K_d)$ ,逼近误差  $\delta(e, \dot{e})$  满足  $\|\delta(e, \dot{e})\| \leq \epsilon \|\dot{e}\|$ 。完整的控制律为

$$\tau_D = M(q_D) \ddot{q}_D + C(q_D, \dot{q}_D) \dot{q}_D + u_{fuzzy}.$$

将控制律代入系统动力学,采用前馈补偿近似消除期望轨迹项,可得到闭环误差动力学方程

$$M(q) \ddot{e} + C(q, \dot{q}) \dot{e} + u_{fuzzy} = 0.$$

因此,  $M(q) \ddot{e} + C(q, \dot{q}) \dot{e} + K_p e + K_d \dot{e} + \delta(e, \dot{e}) = 0$ 。

选取 Lyapunov 函数

$$V(e, \dot{e}) = \frac{1}{2} \dot{e}^T M(q) \dot{e} + \frac{1}{2} e^T K_p e.$$

由于  $M(q)$  和  $K_p$  正定,  $V(e, \dot{e})$  是正定的。仅当  $e = 0, \dot{e} = 0, V(e, \dot{e}) = 0$ 。对  $V(e, \dot{e})$  求导,得

$$\dot{V}(e, \dot{e}) = \frac{1}{2} \dot{e}^T \dot{M}(q) \dot{e} + \dot{e}^T M(q) \ddot{e} + \dot{e}^T K_p e.$$

由于  $\dot{e}^T K_p e - \dot{e}^T K_p e = 0$ ,利用  $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$  的反对称性可得

$$\dot{V}(e, \dot{e}) = -\dot{e}^T [K_d \dot{e} + \delta(e, \dot{e})].$$

利用  $\|\delta(e, \dot{e})\| \leq \epsilon \|\dot{e}\|$ ,得

$$-\dot{e}^T \delta(e, \dot{e}) \leq \|\dot{e}\| \cdot \|\delta(e, \dot{e})\| \leq \epsilon \|\dot{e}\|^2.$$

因此,  $\dot{V}(e, \dot{e}) \leq -\lambda_{\min}(K_d) \|\dot{e}\|^2 + \epsilon \|\dot{e}\|^2$ 。

由  $\epsilon < \lambda_{\min}(K_d)$  可得

$$\dot{V}(e, \dot{e}) \leq -\eta \|\dot{e}\|^2,$$

其中  $\eta = \lambda_{\min}(K_d) - \epsilon > 0$ ,这表明  $\dot{V}$  是半负定的,只有当  $\dot{e} = 0$  时取 0。由李雅普诺夫直接法可知,闭环系统在误差状态  $(e, \dot{e})$  下是稳定的;进一步利用 LaSalle 不变原理,可证明系统所有轨迹最终收敛到

集合  $\{\dot{e} = 0\}$ ,即系统实现渐近跟踪。

## 2 振动抑制评价指标

关节型机器人在运行过程中产生振动是多种因素综合作用的结果,主要包括机械结构特性、外部扰动、控制系统局限性以及制造误差等方面的影响。从机械特性角度来看,材料刚度不足、关节间隙以及质量分布不均等因素均可能在运动过程中引发弹性振动。在外部扰动方面,环境振动、负载变化及空气阻力等因素会显著影响机械臂的动态响应性能。控制系统方面,由于建模不准确、控制滞后以及反馈信号延迟等问题,会进一步加剧运动过程中的振动现象。此外,加工误差与装配精度不足等制造环节中的偏差也可能导致轨迹偏移,诱发额外的结构振动。特别是在高速运动过程中,惯性效应的放大,以及路径切换时的瞬时动态变化,均是机械臂振动的重要来源。振动对机器人末端执行器的影响主要表现为轨迹精度下降,其典型表现如图1所示。

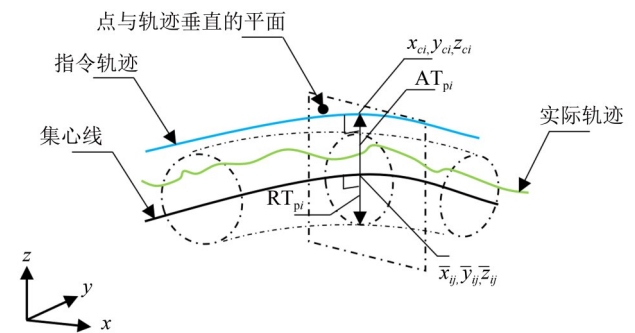


图1 机器人运动轨迹中的振动特性

Fig. 1 Vibration characteristics in robotic motion trajectory

图1中黑实线代表机器人多次执行相同指令后末端运动轨迹的平均路径。其中,  $x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}$  表示指令轨迹上第  $i$  个点的坐标;  $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$  表示第  $j$  条末端轨迹与第  $i$  个正交平面交点的坐标。

位置轨迹准确度  $AT_p$  是评价关节型机器人或数控机床在执行轨迹规划任务时实际运动轨迹与理论指令轨迹之间偏差的关键指标。该指标通常用于衡量机器人在轨迹跟踪过程中所能达到的最大精度,是轨迹规划和运动控制系统优化的重要参数。定义

$$AT_p = \max \sqrt{(x_{ci} - \bar{x}_{ij})^2 + (y_{ci} - \bar{y}_{ij})^2 + (z_{ci} - \bar{z}_{ij})^2},$$

$$i = 1, 2, \dots, m.$$

$q_{\text{actual}}$  和  $q_{\text{goal}}$  分别表示机器人运动过程中的关节角度和指令角度, 机器人各关节实际轨迹与指令轨迹之间的偏差  $\Delta q$  为

$$\Delta q = |q_{\text{actual}} - q_{\text{goal}}|.$$

各关节实际轨迹与指令轨迹之间的偏差可以通过计算角度跟踪误差的均方根值  $\Delta q_{\text{RMS}}$  和最大绝对值  $\Delta q_{\text{max}}$  来量化。记

$$\Delta q_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta q^2},$$

$$\Delta q_{\text{max}} = \max(|\Delta q|),$$

其中  $N$  是角度采样点的个数。当  $\Delta q_{\text{RMS}}$  和  $\Delta q_{\text{max}}$  值较高时, 说明机器人各关节的实际角度与指令角度之间的差异加大, 进而导致跟踪误差增大, 并反映出振动对各关节的影响更加显著。

在机器人执行任务时, 振动干扰会导致其实际运动轨迹与预先设定的指令产生偏差, 这正是关节型机器人难以达到高精度的主要障碍。本文通过  $AT_p$ ,  $\Delta q_{\text{RMS}}$  和  $\Delta q_{\text{max}}$  来量化关节型机器人末端的振动情况。

### 3 仿真验证与分析

为验证所提出控制算法的有效性, 本文基于 MATLAB/Simulink 平台构建了仿真模型, 开展了对比实验。实验对比了传统比例-微分(PD)控制、结合前馈控制的PD控制, 以及本文提出的前馈-模糊复合控制策略, 并评估了三种控制策略的性能表现。选取摩卡 MR07S-930 型关节型机器人作为仿

真对象, 其结构图2所示。机器人各关节的惯性参数如表2所示。



图2 MR07S-930 机器人

Fig. 2 MR07S-930 robot

根据前述提出的控制方案, 构建了如图3所示的仿真系统。该系统主要包括轨迹规划、PD控制、模糊控制、动态前馈、采样处理以及逆动力学等功能模块。在已知笛卡尔空间轨迹的前提下, 轨迹规划模块采用五次多项式插值算法, 在给定起始点与终止点之间生成完整的时间序列轨迹。动态前馈模块根据关节状态序列计算期望力矩值, 并将其作为前馈补偿信号引入伺服驱动器的电流环路中。初始关节位置设定为  $[\pi/3 \ \pi/3 \ \pi/3 \ \pi/3 \ \pi/3 \ \pi/3]$ , 终止位置设定为  $[-\pi/3 \ -\pi/3 \ -\pi/3 \ -\pi/3 \ -\pi/3 \ -\pi/3]$ , 仿真轨迹如图4。轨迹执行总时长为 10 s, 采样时间步长为 1 ms。仿真模型输出了六个关节在整个过程中随时间变化的位置、角速度和角加速度序列。

表2 机器人仿真参数

Table 2 Robot simulation parameters

机器人参数	关节1	关节2	关节3	关节4	关节5	关节6
$I_{xx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.524	0.308	0.147	0.048	0.006	0.300
$I_{yy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.903	0.246	0.019	0.047	0.004	0.300
$I_{zz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.504	0.498	0.152	0.005	0.003	0.800
$I_{xy}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.013 90	0.138 81	-0.012 02	-0.000 04	-0.000 10	0.080 00
$I_{yz}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.566 27	-0.030 89	-0.002 82	-0.000 24	-0.000 02	0.080 00
$I_{zx}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 47	-0.046 97	-0.046 97	-0.000 65	0.001 36	0.080 00
$m/\text{kg}$	8.724	13.520	7.880	4.530	4.020	2.800

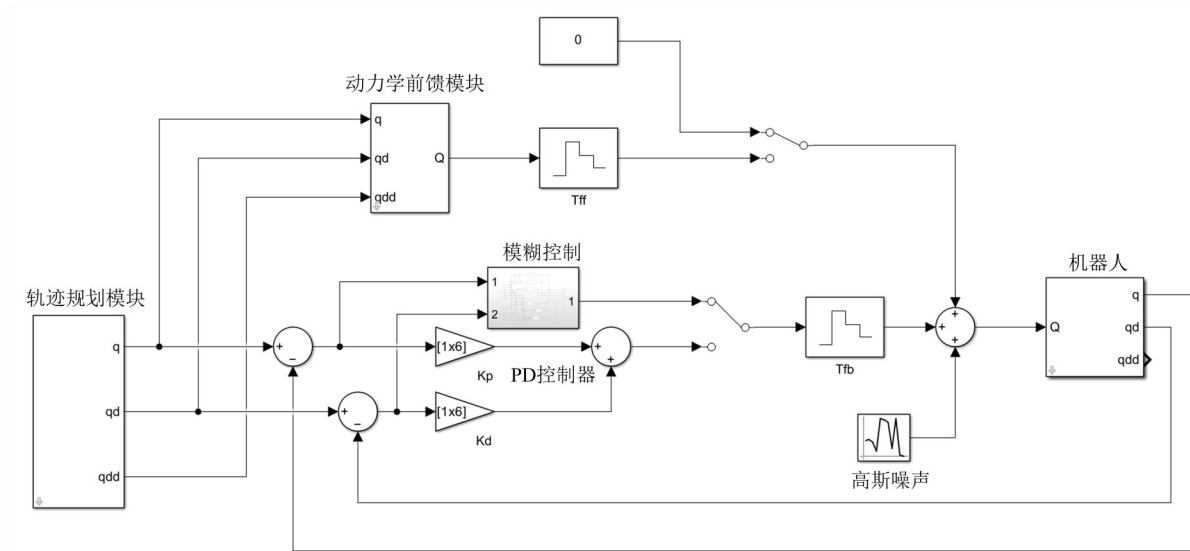


图 3 基于 Simulink 的控制系统

Fig. 3 Control system based on Simulink

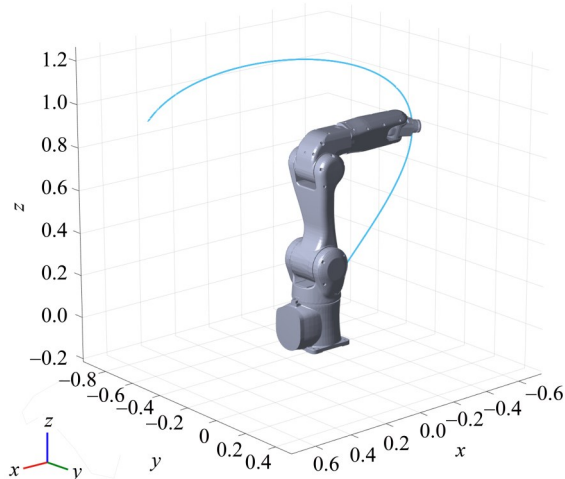


图 4 机器人运动仿真

Fig. 4 Robot motion simulation

在前馈控制通道中,零阶保持器的采样周期设定为 1 ms。该模型集成了两个独立的开关机制:第一个用于控制是否启用前馈力矩补偿,第二个用于在 PD 控制器与模糊控制器之间进行切换。在 PD 控制模块中,增益参数  $K_p$  与  $K_d$  分别代表伺服控制系统中的比例增益与微分增益。结合实际工程中常用的增益取值,本文在仿真系统中设定  $K_p = [250 \ 250 \ 250 \ 80 \ 80 \ 80]$ ,  $K_d = [10 \ 10 \ 10 \ 5 \ 5 \ 5]$ 。仿真得到关节角度图与误差图,如图 5-6 所示。

通过对图中数据的分析,可以观察到前馈模块与模糊控制模块对轨迹跟踪精度的提升效果。当仅采用传统 PD 控制时,关节振动较为明显,导致跟

踪误差较大。尽管伺服驱动器内置的 PD 控制在一定程度上提升了系统的动态响应能力,但由于其增益调节能力受限,难以有效抑制关节振动,满足高精度控制需求。引入前馈控制模块后,各关节的跟踪误差明显减小,运动轨迹也更加平滑,说明前馈控制在补偿系统动态误差方面具有显著效果,有助于提升机器人轨迹跟踪的精度与运动稳定性。当传统 PD 控制器被模糊控制器替代后,系统的轨迹跟踪性能进一步提升。模糊控制器能够根据系统当前误差及其变化率动态调整控制输出,增强了对非线性特性和外部扰动的适应能力,从而实现更有效的振动抑制,轨迹精度显著提高。

基于上述的关节数据,通过正动力学模型求得机器人末端位置,关节型机器人在笛卡尔空间的轨迹如图 7。图中的蓝、红与粉线分别代表 PD 控制、PD 控制结合前馈控制和模糊控制结合前馈控制的末端轨迹。图 8 展示了机器人在 3 种不同控制策略下实际轨迹与给定轨迹在各个方向上的误差以及绝对误差。从图中的对比结果可以看出,在采用融合前馈控制与模糊控制的策略后,末端执行器的实际轨迹更贴近预设路径,跟踪误差显著降低。

由表 3-4 可见,与其他控制策略相比,融合模糊控制的前馈控制方案在关节角偏差的均方根值与峰值,以及末端执行器轨迹的跟踪精度方面均表现出显著优势。仿真结果表明,无论是在关节角误

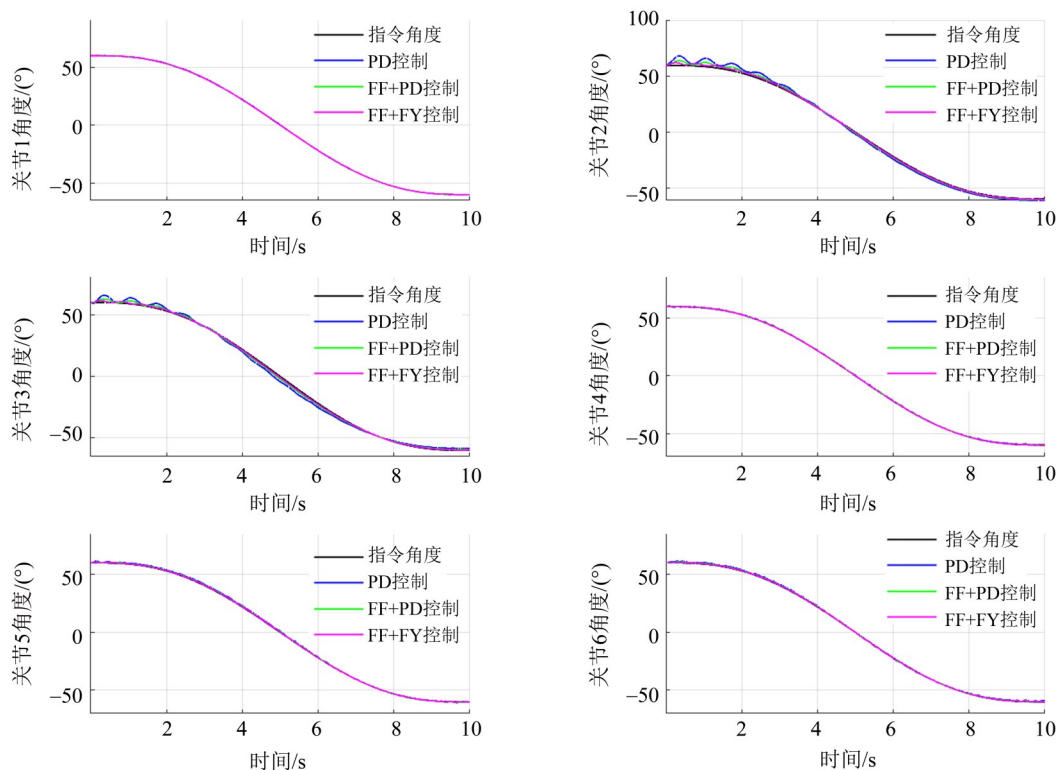


图 5 仿真实验的关节角度跟随图

Fig. 5 Joint angle tracking plot in the simulation experiments

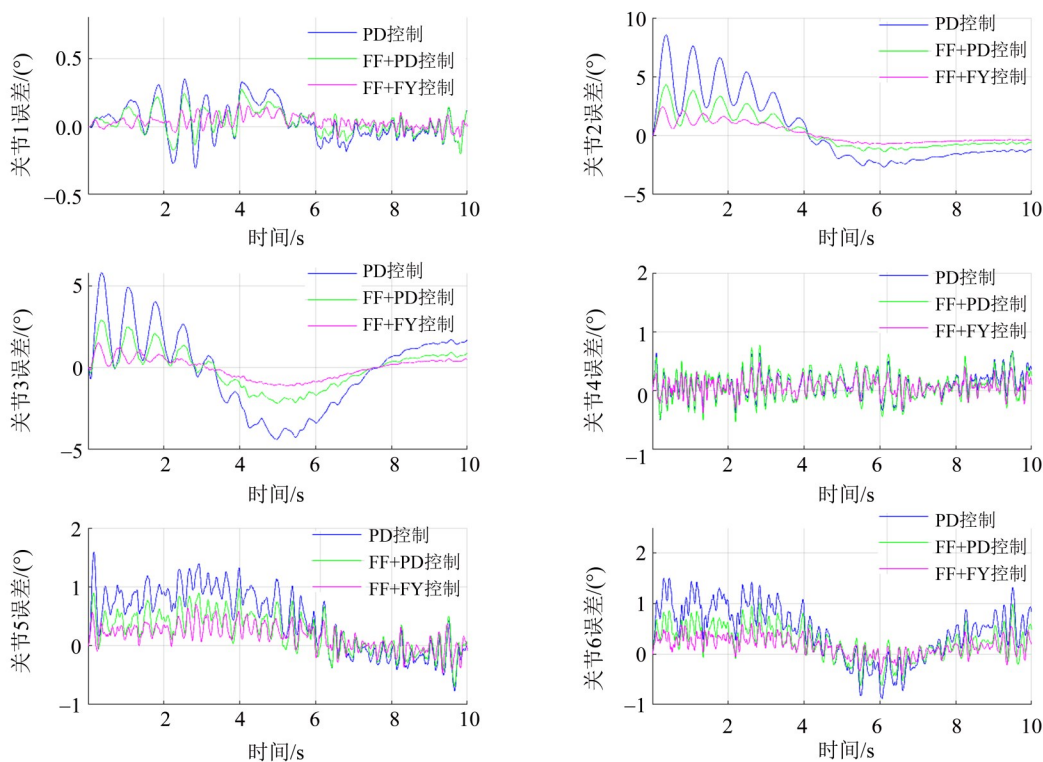


图 6 仿真实验的关节角度跟随误差图

Fig. 6 Tracking error plot of joint angles in the simulation experiments

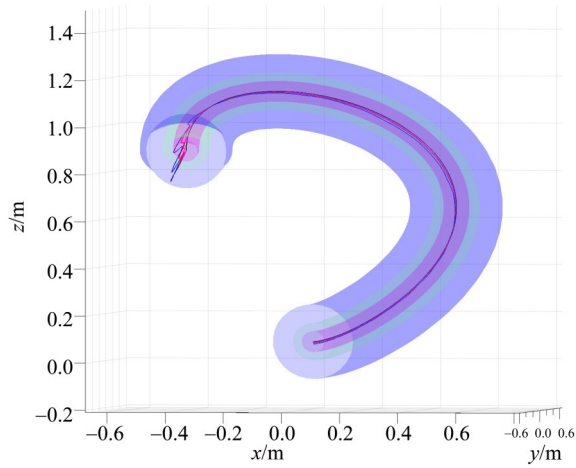


图7 仿真实验的末端轨迹及其包络线

Fig. 7 End-effector trajectory and envelope profile in the simulation experiments

差的均方根值(RMS)、关节跟踪误差的峰值,还是在末端执行器轨迹的跟踪精度方面,所提出的结合模糊控制与前馈控制的控制策略均表现出最佳性能,优于传统PD控制和仅带前馈补偿的PD控制方法。该控制策略在系统动态响应能力、轨迹跟踪精度以及振动抑制效果方面均实现了提升,进一步验证了其在复杂控制场景下的适应性与有效性。

### 4 结 语

本文提出了一种能够有效抑制关节型机器人振动的基于模糊前馈控制的算法。在MATLAB/Simulink平台上,针对基于关节型机器人的动力学

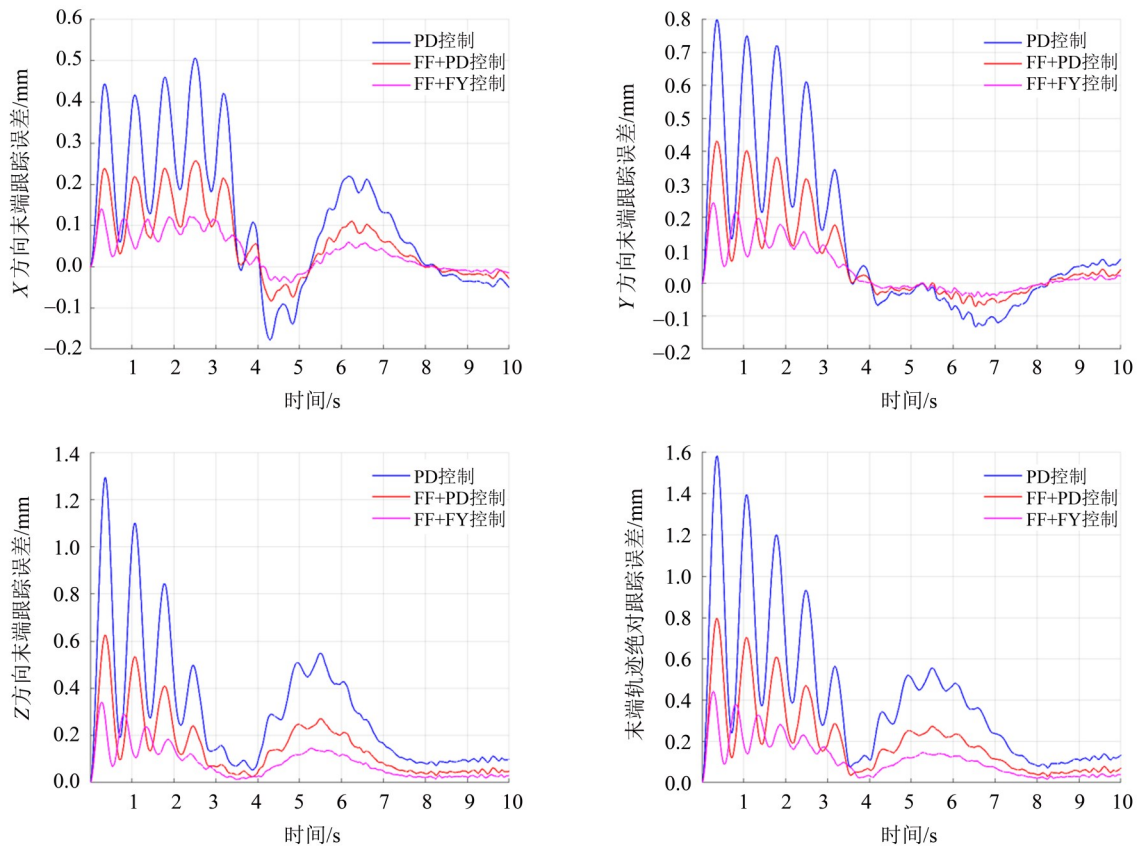


图8 仿真实验X, Y, Z方向的误差与轨迹绝对误差

Fig. 8 Positional errors in cartesian axes X, Y, Z and absolute trajectory error in the simulation experiments

表3 仿真实验的  $AT_p$

Table 3  $AT_p$  in the simulation experiments mm

参数	PD控制	PD+FF控制	FY+FF控制
$AT_p$	1.583 658	0.795 934	0.442 464

模型进行了控制策略的仿真实验。仿真结果表明,该控制方案能够提升机器人系统的动态响应性能,有效抑制运动过程中产生的振动,并提高了轨迹跟踪的精度。

表4 仿真实验的关节角度跟随误差

Table 4 Joint angle tracking errors in the simulation experiments

(°)

误差	关节1	关节2	关节3	关节4	关节5	关节6
PD控制 $\Delta q_{\max}$	0.349 2	8.550 8	5.775 9	0.849 5	1.587 4	1.506 2
PD+FF控制 $\Delta q_{\max}$	0.273 4	4.308 4	2.894 3	0.775 1	0.969 2	1.022 2
FF+FY控制 $\Delta q_{\max}$	0.177 7	2.440 9	1.510 4	0.484 5	0.702 9	0.633 5
PD控制 $\Delta q_{\text{RMS}}$	0.138 2	3.032 5	2.444 2	0.225 8	0.683 6	0.696 7
PD+FF控制 $\Delta q_{\text{RMS}}$	0.096 2	1.520 8	1.215 4	0.238 3	0.400 2	0.400 3
FF+FY控制 $\Delta q_{\text{RMS}}$	0.058 1	0.868 7	0.627 9	0.147 9	0.265 2	0.247 3

在实际应用中,为保证前馈补偿策略的有效性,需对关节型机器人进行动力学模型参数辨识,因此辨识精度将直接影响前馈控制的补偿效果。

所以,必须设计合理的动态参数辨识策略,并选取适当的模型评估指标,以实现机器人动力学模型的精确建模与振动抑制的前馈补偿。

#### 参考文献:

- 蒲明辉,赵倩倩,陈琳,等,2022.前馈控制加模糊补偿的机器人关节角度追踪[J].机械设计与制造,6(1):241-244.
- 姚祥,2018.重载机器人刚柔耦合动力学建模与补偿控制方法研究[D].南京:东南大学.
- CHAN M, 2013. Controller synthesis and vibration suppression techniques for industrial robotic manipulators with joint flexibilities[D]. California, USA: University of California.
- GE L Z, CHEN J, LI R F, 2017. Feedforward control based on Fourier series trajectory fitting method for industrial robot [C]// The 29th Chinese Control and Decision Conference. Chongqing, China: 1751-1756.
- HAN X, WU K, HUI N, 2025. Co-optimization of vibration suppression and data efficiency in robotic manipulator dynamic modeling [J]. Appl Sci, 15(14):7679.
- JU J, ZHAO Y, ZHANG C, et al, 2018. Vibration suppression of a flexible-joint robot based on parameter identification and fuzzy PID control [J]. Algorithms, 11(11):189.
- LI B, ZHANG W, LI Y F, et al, 2022. Positional accuracy improvement of an industrial robot using feedforward compensation and feedback control [J]. ASME J Dyn Syst Meas Control, 144(7): 071003.
- LIU Y, ZHAO W, YAO X, 2022. Adaptive fuzzy containment and vibration control for multiple flexible manipulators with model uncertainties [J]. IEEE Trans Fuzzy Syst, 30(6):2328-2342.
- NEWMAN M, LU K Y, KHOSHDARREGI M, 2021. Suppression of robot vibrations using input shaping and learning-based structural models [J]. J Intell Mater Syst Struct, 32(4):438-451.
- SHAO X M, WANG S J, YANG L S, et al, 2020. Research on feedforward control based on robot dynamics parameters identification [C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Beijing, China:345-350.
- TAJIMA S, IWAMOTO S, YOSHIOKA H, 2023. Posture optimization in robot machining with kinematic redundancy for high-precision positioning [J]. Int J Autom Technol, 17(5):494-502.
- UENO Y, TACHIYA H, 2023. Suppressing residual vibration caused in objects carried by robots using a heuristic algorithm[J]. Precis Eng, 83:12-20.
- WANG X P, XIE L B, JIANG M, et al, 2024. Kinematic calibration and feedforward control of a heavy-load manipulator using parameters optimization by an ant colony algorithm[J]. Robotica, 42:728-756.
- XI H, CHEN B, TIAN J, et al, 2025. Dual-observer-based composite robust vibration control for a rigid-flexible hybrid space robot-target combination [J]. Nonlinear Dyn, 112(2):427-446.
- YE C C, YANG J X, DING H, 2022. High-accuracy prediction and compensation of industrial robot stiffness deformation[J]. Int J Mech Sci, 226:107340.

(责任编辑 王海蓉)