

黎万波, 周靖, 丁丽, 等. 工业机器人力控制模型设计与仿真分析[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(3): 67-72. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 25081805

工业机器人力控制模型设计与仿真分析

黎万波¹, 周靖¹, 丁丽¹, 张家友², 贾颖¹

(1 贵州装备制造职业学院 汽车工程系, 贵阳 550000; 2 中车贵阳车辆有限公司 弹簧事业部, 贵阳 550000)

摘要: 为提升六自由度工业机器人在打磨、装配等复杂接触任务中的力控制精度与系统鲁棒性, 本文提出一种基于阻抗模型的末端输出力控制方法。以 ABB-IRB4600-60 型机器人为例, 构建包括阻抗模型、逆运动学及控制律在内的完整控制模型, 采用拉格朗日法建立动力学模型, 并引入虚拟质量-阻尼-刚度结构实现力-位移动态映射。控制策略融合 PD 反馈、动力学前馈与 RBF 神经网络, 实现系统对未建模动态与扰动的在线补偿。通过 SolidWorks 估算连杆质量参数, 结合 Matlab 进行轨迹仿真与力响应分析。结果表明, 系统在扰动区段内输出力估计误差控制在 ± 0.3 N, 各关节力矩平稳, 机器人轨迹跟踪性能良好, 验证了所提出方法的有效性和工程适用性。

关键词: 工业机器人; 阻抗控制; 动力学建模; 力控制; 轨迹跟踪

中图分类号: TP249

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)03-0067-06

Design and simulation analysis of force control model for industrial robots

LI Wanbo¹, ZHOU Jing¹, DING Li¹, ZHANG Jiayou², JIA Ying¹

(1 Department of Automotive Engineering, Guizhou Equipment Manufacturing Polytechnic, Guiyang 550000, China;

2 Spring Department, CRRC Guiyang Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: To improve the force control accuracy and robustness of six-degree-of-freedom industrial robots in complex contact tasks such as grinding and assembly, this paper proposes an end-effector force control method based on an impedance model. Using the ABB-IRB4600-60 robot as a case study, a comprehensive control framework is developed, incorporating impedance modeling, inverse kinematics, and control law design. The robot dynamics are formulated via the Lagrangian method, with a virtual mass-damper-spring system introduced to map the relationship between external force and end-effector displacement. The control strategy integrates PD feedback, dynamic feedforward compensation, and a Radial Basis Function (RBF) neural network to adaptively compensate for unmodeled dynamics and external disturbances. Link mass parameters are estimated through SolidWorks, and dynamic simulations are conducted in Matlab. Results demonstrate that the system maintains force estimation errors within ± 0.3 N under external disturbances, with stable joint torques and accurate trajectory tracking. These findings confirm the effectiveness and practical applicability of the proposed control approach.

Key words: industrial robot; impedance control; dynamic modeling; force control; trajectory tracking

0 引言

随着智能制造和人机协作技术的发展, 工业机器人在执行复杂任务(如打磨、装配和协作搬运)时需要根据工况调节机器人的末端输出力。传统的刚性轨迹控制难以应对动态环境下的接触力变化, 因此需要引入柔顺控制策略以提升系统的鲁棒性和安全性^[1]。阻抗控制作为一种典型的柔顺控制策略,

通过引入期望的质量、阻尼和刚度特性^[2], 在力和位移之间建立期望动态关系, 广泛应用于机器人末端力控制和交互任务中。魁崇伟等学者^[3]提出了一种基于模糊 PID 控制律的阻抗控制方法, 通过实验证明了该方法能有效地改善打磨工件的表面质量。高培阳^[4]利用抗干扰控制对阻抗模型进行改进, 解决了机器人工作过程中力冲击问题。许家忠等学者^[5]在传统的阻抗控制方法上构建了力跟踪误差分析数学模型, 提升了机器人末端的到达精度。

基金项目: 2025 年度贵州省科协“新质黔沿”引领项目(2025XZQYXM-01-14); 贵州装备制造职业学院 2024 年度院级科研项目(ZBKY2024-Z001); 贵州装备制造职业学院 2025 年度院级教研教改项目(ZBJY2025-Y002)。

作者简介: 黎万波(1998—), 男, 硕士, 助教, 主要研究方向: 工业机器人开发与应用。Email: liwanbo2020@163.com。

收稿日期: 2025-08-18

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

杨丽红等学者^[6]提出了一种自适应阻抗参数的机器人末端控制方法,采用饱和函数替代滑模控制,提高了机器人运行过程的稳定性。浦秋爽等学者^[7]提出了一种自适应力的机器人跟踪阻抗控制方法,可自动对阻抗控制中的更新率进行调节,以提升机器人辅助加工质量。Du 等学者^[8]在位移控制的基础上,结合开发的 CAM/CAD 软件和自适应模糊 PI 控制器,在钛合金工件磨削加工中取得了良好的加工效果。Domroes 等学者^[9]在与文献[6]同等的工艺条件下进行实验,得到了基于力控制的控制方式更加适用于打磨过程的结论。Fu 等学者^[10]提出了一种非线性 PI 位置控制器,对加工过程中干扰产生的影响做出了补偿,增强了机器人运行稳定性。Pedrocchi 等学者^[11]提出了一种带有模糊控制的力控制模型,提升了机器人打磨作业的稳定性。Bilal 等学者^[12]在自适应阻抗控制中设置了固定的更新律,在不确定刚度环境下的多轴力跟踪情景中,很好地实现了力跟踪。

本研究基于 ABB 六轴工业机器人,构建完整的机器人力控制模型,结合正逆运动学、拉格朗日动力学建模、期望力输入和反馈控制律设计,实现末端受控轨迹的输出力控制。机器人力控制模型由阻抗模型模块、逆运动学模块和控制律模块组成。本文采用基于拉格朗日法建立的动力学模型,以末端点沿预设的空间轨迹运动为目标,当某一区间施加期望恒力时,通过阻抗模型生成末端响应位移,逆解出对应关节角并通过 PD 结合前馈控制律驱动机器人跟踪该修正轨迹,最终实现机器人输出力与期望恒力的实时匹配,实现控制机器人输出力的目标。

1 动力学模型建立

1.1 拉格朗日方程建立

为了简化工业机器人在应用过程中动力学分析的复杂性,方便对机器人动力学方程的分析和求解^[13],本文采用拉格朗日能量法^[14]建立机器人理论动力学模型。拉格朗日能量法的基本原理是利用系统的动能和势能差,在忽略其他条件的前提下,分析系统的动力学状态。

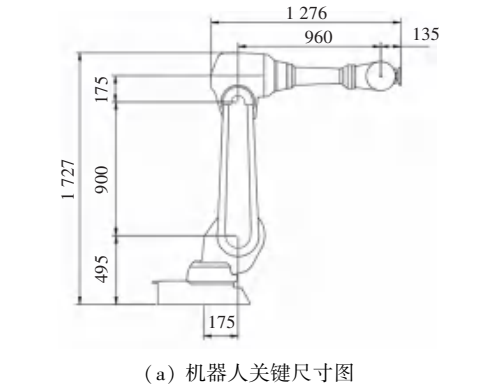
建立拉格朗日函数的前提是求解系统的动能和势能,再逐步求解得到系统的动力学方程。根据拉格朗日函数可以求出系统关节变量和运动时间的偏导数^[15]。数学公式为:

$$L = K - P \quad (1)$$

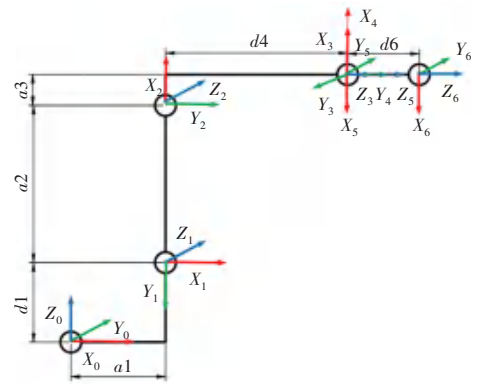
其中, L 表示拉格朗日函数, K 和 P 分别表示系

统的动能和势能。

系统的总动能可以通过单个连杆的动能之和计算。单个连杆的动能可以看作该连杆质心的平移动能和旋转动能的和。为了表示单个连杆的动能,需要在机器人基座建立广义笛卡尔坐标系,并在坐标系中表示出每个连杆质心的空间坐标。本文以 ABB 公司的 IRB4600-60 型工业机器人为例,运用 D-H 方法^[16]建立连杆坐标系,如图 1 所示。



(a) 机器人关键尺寸图



(b) 机器人坐标系

图 1 机器人连杆坐标系

Fig. 1 Link coordinate system of the robot

根据标准 D-H 参数法建立坐标系结合机器人的几何尺寸得出对应的 D-H 参数表,见表 1。

表 1 机器人 D-H 参数表

Table 1 D-H parameters of the robot

连杆序号 i	关节距离 d_i / mm	连杆长度 a_i / mm	连杆扭角 α_i / rad	连杆转角 θ_i / rad
1	495	175	$-\pi/2$	θ_1
2	0	900	0	$\theta_2 - \pi/2$
3	0	175	$-\pi/2$	θ_3
4	960	0	$\pi/2$	θ_4
5	0	0	$\pi/2$	$\theta_5 - \pi$
6	135	0	0	θ_6

机器人的关节变量可用连杆转角表示为: $\theta =$

$[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]$;各连杆的驱动力矩可表示为: $T = [T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6]$ 。机器人的连杆总动能 K 是各个连杆动能之和,可表示为^[17]:

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace}(U_{ij} J_i U_{ik}^T) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_i \dot{\theta}_i^2 \quad (2)$$

其中, U_{ij}, U_{ik} 表示变换矩阵关于关节变量的导数; J_i, J_j 表示伪惯量矩阵和驱动器的转动惯量。

机器人的连杆总势能 P 是各个连杆的势能之和,可表示为:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i = \sum_{i=1}^n [-m_i g^T \cdot ({}^0T_i r_i)] \quad (3)$$

其中, m 表示连杆质量; g^T 表示连杆重力加速度在 X, Y, Z 方向投影组成的矩阵; 0T_i 表示连杆坐标系 i 对于基坐标系的变换; r_i 表示连杆质心在坐标系 i 中的位置。

综上所述,根据式(1),该机器人的拉格朗日方程可表示为:

$$L = K - P = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace}(U_{ij} J_i U_{ik}^T) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_i \dot{\theta}_i^2 - \sum_{i=1}^n [-m_i g^T \cdot ({}^0T_i r_i)] \quad (4)$$

1.2 机器人动力学方程建立

机器人各连杆的驱动力矩方程为:

$$T_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \quad (5)$$

联立式(2)~式(5),求解驱动力矩方程为:

$$T_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = H(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + I_i \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (6)$$

其中, $\sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j$ 表示广义角加速度所产生的惯性力对动力系统的影响; $I_i \ddot{q}_i$ 表示机器人驱动装置产生的惯量项; $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k$ 表示科氏力和向心力项; D_i 表示重力项。

式(6)展开得:

$$T_i = D_{i1} \ddot{\theta}_1 + D_{i2} \ddot{\theta}_2 + D_{i3} \ddot{\theta}_3 + D_{i4} \ddot{\theta}_4 + D_{i5} \ddot{\theta}_5 + D_{i6} \ddot{\theta}_6 + I_i \ddot{\theta}_i + D_{i11} \dot{\theta}_1^2 + D_{i22} \dot{\theta}_2^2 + D_{i33} \dot{\theta}_3^2 + D_{i44} \dot{\theta}_4^2 + D_{i55} \dot{\theta}_5^2 + D_{i66} \dot{\theta}_6^2 + D_{i12} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + D_{i13} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + D_{i14} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + D_{i15} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_5 + D_{i16} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_6 + D_{i21} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + D_{i23} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + D_{i24} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + D_{i25} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_5 +$$

$$D_{i26} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_6 + D_{i31} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1 + D_{i32} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_2 + D_{i34} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 + D_{i35} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_5 + D_{i36} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_6 + D_{i41} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_1 + D_{i42} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_2 + D_{i43} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_3 + D_{i45} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_5 + D_{i46} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_6 + D_{i51} \dot{\theta}_5 \dot{\theta}_1 + D_{i52} \dot{\theta}_5 \dot{\theta}_2 + D_{i53} \dot{\theta}_5 \dot{\theta}_3 + D_{i54} \dot{\theta}_5 \dot{\theta}_4 + D_{i56} \dot{\theta}_5 \dot{\theta}_6 + D_{i61} \dot{\theta}_6 \dot{\theta}_1 + D_{i62} \dot{\theta}_6 \dot{\theta}_2 + D_{i63} \dot{\theta}_6 \dot{\theta}_3 + D_{i64} \dot{\theta}_6 \dot{\theta}_4 + D_{i65} \dot{\theta}_6 \dot{\theta}_5 + D_i \quad (7)$$

由式(6)可知,角加速度的惯量项和重力项对机器人的动态稳定性影响较大,科氏力和向心力则会在机器人运动速度较快时产生较大的影响。本文所研究的机器人欲用于加工工件表面的打磨,需要机器人末端输出的力矩变化小,有较好的稳定性和可控制性。

2 机器人力控制模型设计

2.1 机器人力控制逻辑设计

工业机器人在打磨、装配、抛光等复杂接触任务中,不仅要求轨迹精确,还需要实现稳定力控制,以避免损伤工件或机器人本体。为此,引入阻抗控制,将机器人与环境的交互建模为“质量-阻尼-弹簧系统”,模拟期望的机械响应行为。同时,考虑环境不确定性和模型误差,引入 RBF 神经网络^[18] 实现在线逼近与自适应调节,机器人力控制逻辑如图2所示。

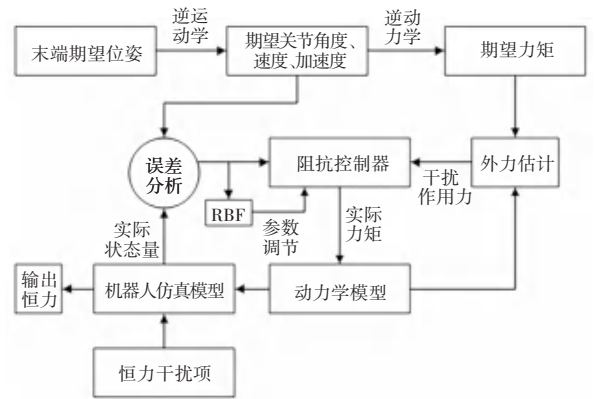


图2 机器人力控制模型运行逻辑设计

Fig. 2 Operational logic design of the robot force control model

2.2 阻抗模型设计

阻抗控制的基本思想是在期望轨迹点与实际轨迹点之间引入一个虚拟的质量-阻尼-弹簧系统^[19],建立位置偏差与外力之间的映射关系,阻抗模型如下:

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d(x - x_d) = f_{ext} \quad (8)$$

其中, $x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$ 分别表示期望位置、速度和加

速度; \mathbf{x} 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 $\ddot{\mathbf{x}}$ 分别表示当前末端位置、速度和加速度; \mathbf{M}_d 表示阻抗质量矩阵; \mathbf{B}_d 表示阻抗阻尼矩阵; \mathbf{K}_d 表示阻抗刚度矩阵; f_{ext} 表示外部作用力。

2.3 控制律设计

为了使机器人精确地跟踪由阻抗模型修正后的期望末端轨迹,本文采用 PD 反馈^[20]与动力学前馈相结合并融合 RBF 神经网络的控制策略。控制律形式如下:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \hat{\Delta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (9)$$

其中, \mathbf{q}_d 、 $\dot{\mathbf{q}}_d$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}_d$ 分别表示目标关节角、角速度、角加速度; \mathbf{q} 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 分别表示当前关节角、角速度; \mathbf{K}_p 、 \mathbf{K}_d 分别表示比例与微分增益矩阵; $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 分别表示机器人动力学的质量、科氏力项和重力项; $\hat{\Delta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 表示由 RBF 神经网络近似的未建模动态和扰动项; $\boldsymbol{\tau}$ 表示输出力矩。

RBF 神经网络结构对应的公式为:

$$\hat{\Delta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{W}^T \cdot \boldsymbol{\phi}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (10)$$

其中, $\boldsymbol{\phi}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 表示径向基函数输出, \mathbf{W}^T 表示神经网络权重。

基于上述控制策略,本文设计的力控制模型的计算过程可分为几步:根据末端阻抗输出轨迹,利用逆运动学求解出关目标值 \mathbf{q}_d , 并由差分得到 $\dot{\mathbf{q}}_d$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}_d$; 实时估算当前系统状态 \mathbf{q} 、 $\dot{\mathbf{q}}$, 计算角度误差与速度误差; 构建 PD 反馈项: \mathbf{K}_p 、 \mathbf{K}_d ; 加入动力学补偿前馈项 $\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{G}(\mathbf{q})$ 与神经网络估计项 $\hat{\Delta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, 增强系统对非线性与外部干扰的鲁棒性; 施加饱和和限制防止力矩过大导致系统不稳定。

3 机器人力控制模型仿真分析

为验证文中提出的基于阻抗的力控制模型的有效性,在 Matlab 平台上编写了力控制程序。基于该程序,对力控制模型进行受力响应性能的模拟分析。主要包括 2 方面实验内容:机器人动力学模型仿真和力反馈精度验证。

3.1 机器人动力学模型仿真

根据表 1 中的 D-H 参数,结合 Matlab 中机器人工具箱的相关功能,建立机器人运动学仿真模型,如图 3 所示。

基于运动学模型建立动力学仿真模型还需机器人的各连杆质量和转动惯量矩阵等参数,这些参数

涉及机器人的设计数据,通常情况下机器人厂商不会公布。本文采用的 ABB 公司的 IRB4600-60 型机器人广泛应用于打磨、焊接等场景,但根据官方提供的技术文档中只有机器人的总质量为 445 kg(包含底座),末端负载 60 kg,难以直接获取各连杆的质量和转动惯量矩阵。

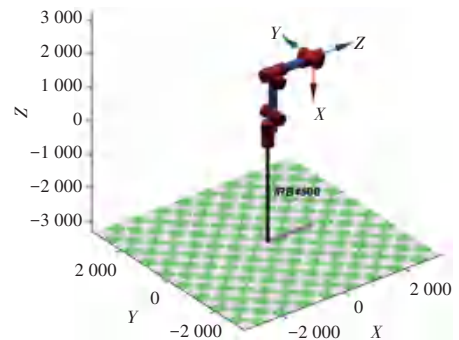


图3 机器人运动学仿真模型

Fig. 3 Kinematic simulation model of the robot

针对数据难以获取的问题,本文采用 SolidWorks 三维设计软件间接估算相关数据,具体过程如下。首先,在 ABB 公司官网下载该机器人的三维模型,导入 SolidWorks 三维设计软件;其次,在软件中将该模型的质量设置为 445 kg,让软件计算出密度数据。最后,剔除底座部分的模型,逐个给各连杆赋予密度数据,软件可以根据密度数据计算出各连杆的质量数据和转动惯量矩阵。SolidWorks 三维设计软件计算得出的机器人各连杆质量数据见表 2。

表2 各连杆质量参数

Table 2 Mass parameters of each robot link

连杆序号 i	连杆质量 m/kg	连杆质心坐标 $(X, Y, Z)/\text{mm}$
1	114.500	(77.66, 24.81, 400.09)
2	76.076	(175.09, -170.59, 891.69)
3	137.761	(215.50, 49.38, 1514.29)
4	30.060	(907.62, -2.10, 1567.15)
5	3.285	(1132.62, -4.37, 1570.20)
6	1.400	(1192.50, 0.00, 1569.95)

获取了机器人的连杆质量数据和转动惯量矩阵数据后,在 Matlab 中赋值给 D-H 参数模型结合前文建立的机器人动力学方程,可求解机器人动力学参数,即建立了机器人动力学仿真模型。

3.2 力反馈验证仿真实验

在力反馈仿真中,预设的目标末端轨迹为长度 100 mm 的直线路径。机器人运动时间设置为 5 s,以 0.01 s 时间间隔进行数据采集,在 200~270 步之

间施加恒定扰动力 $F = [30, 30, 30]$ 后,系统响应如下:

(1) 机器人末端轨迹跟踪情况。机器人末端轨

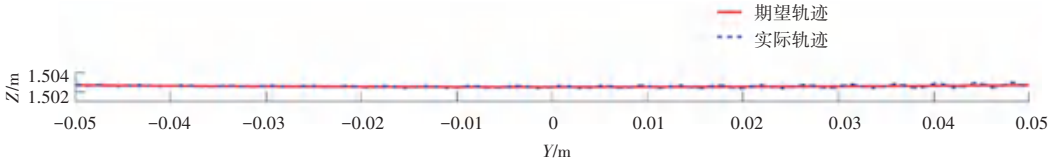


图4 机器人末端轨迹跟踪图

Fig. 4 End-effector trajectory tracking of the robot

从图4可知,机器人的实际轨迹与理论期望轨迹有较好的跟踪效果,实际基本能和理论轨迹贴合,说明文中的阻抗模型调节后的输出轨迹能达到目标轨迹。

(2) 机器人关节力矩控制情况。本研究的目的

迹跟踪情况如图4所示,其中红色实线表示理论期望轨迹(长100 mm的直线),蓝色虚线表示在文中的阻抗算法控制下的机器人实际轨迹。

是控制机器人在复杂的工作环境中,受到外部干扰的情况下,机器人末端能保持运动准确性和输出力矩的稳定性。在上述仿真条件下,统计了机器人各关节控制力矩的变化情况以及末端输出力受外力的影响情况,如图5所示。

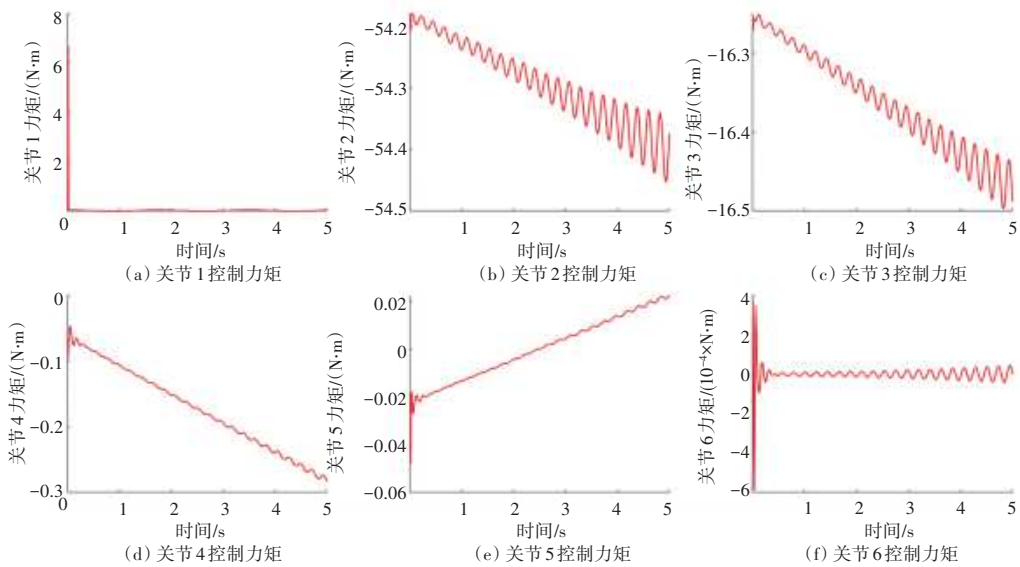


图5 机器人各关节控制力矩变化情况

Fig. 5 Changes in control torque of each joint of the robot

由图5可知,关节1在启动初期出现较大瞬态力矩(约为 $7 \text{ N} \cdot \text{m}$),随后迅速收敛,表明控制器具备良好的动态响应能力;关节2与3的力矩呈线性下降叠加高频振荡,反映出系统在实现跟踪控制的同时仍具柔顺性;关节4~6的力矩幅值较小(最大约为 $0.02 \text{ N} \cdot \text{m}$),振荡频率低,控制器输出平稳,说明负载分配合理、控制能耗低;所有关节在扰动段并未出现明显异常峰值,系统始终保持稳定运行状态。

机器人末端 X 、 Y 、 Z 方向输出力矩跟踪情况如图6所示。从图6分析可知,在扰动段内(约 $2.0 \sim 2.7 \text{ s}$),系统估计力(蓝色实线)与期望外力(红色虚线)在3个方向上均表现出良好的拟合趋势,力估计值基本能够紧密跟踪期望外力,误差幅度保持在 $\pm 0.3 \text{ N}$ 以内,验证了所设计阻抗控制器在该段内

具备较强的动态响应能力与抗扰动性能。非干扰时段内,力估计值保持近零,进一步体现了控制系统的稳定性与非干扰敏感性。

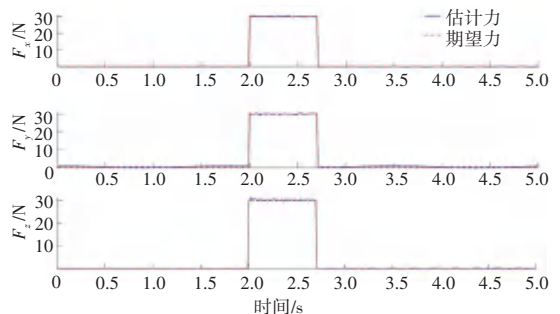


图6 机器人末端 X 、 Y 、 Z 方向输出力矩跟踪情况

Fig. 6 Torque tracking of the robot in the X 、 Y 、 Z directions at the end-effector

4 结束语

本文围绕六自由度工业机器人在复杂接触任务中的力控制问题,设计并实现了一种基于阻抗模型的末端柔顺控制方法。通过建立精确的动力学模型与阻抗映射关系,构建了末端力与位移之间的耦合控制框架,利用逆运动学解算目标轨迹,并结合PD反馈控制与动力学前馈补偿策略,有效增强系统的稳定性与控制精度。为提高系统鲁棒性,进一步引入RBF神经网络以在线补偿建模误差和外部干扰。

通过仿真验证了,机器人在预设轨迹中段施加期望恒力干扰的情况下,所设计系统能够实现对外力扰动的快速、稳定响应,末端出力估计精度优于 $\pm 0.3\text{ N}$,各关节力矩响应平稳,未出现震荡或不稳定行为,验证了该控制模型在实际应用中具备良好的工程可行性。未来将进一步结合物理机器人平台开展实物测试,探索更高精度与强扰动环境下的柔顺控制性能表现。

参考文献

[1] 王砚麟, 安宗文, 黄华, 等. 绳索驱动航天员下肢训练机器人柔顺性控制策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(3):567-580.

[2] 王雪, 王殊轶, 马邦峰, 等. 基于坐位调膝法的仿生推拿机器人结构设计及实验研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(3):39-47.

[3] 魁崇伟, 张跃飞, 郭森现. 基于模糊-阻抗控制的机器人磨抛恒力控制研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(12):1-6.

[4] 高培阳. 基于力传感器的工业机器人恒力磨抛系统研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.

[5] 许家忠, 郑学海, 周洵. 复合材料打磨机器人的主动柔顺控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12):151-158.

[6] 杨丽红, 汪泽锴, 孙太任, 等. 基于最优阻抗选取的机器人自适应鲁棒纳导控制[J]. 控制理论与应用, 2025, 42(1):181-188.

[7] 蒲秋爽, 刘桂萍. 动态环境下磨抛机器人PD-模糊自适应力跟踪阻抗控制[J]. 现代制造工程, 2025(4):61-68.

[8] DU H, SUN Y, FENG D, et al. Automatic robotic polishing on titanium alloy parts with compliant force/position control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, PartB: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(7):1180-1192.

[9] DOMROES F, KREWET C, KUHNENKOTTER B. Application and analysis of force control strategies to deburring and grinding[J]. Modern Mechanical Engineering, 2013, 3(2):11-18.

[10] FU Yongling, HAN Xu, SEPEHRI N, et al. Design and performance analysis of position-based impedance control for an electro-hydrostatic actuation system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(3):584-596.

[11] PEDROCCHI N, VILLAGROSSI E, CENATI C, et al. Design of fuzzy logic controller of industrial robot for roughing the uppers of fashion shoes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5-8):939-953.

[12] BILAL M, AKRAM M N, RIZWAN M. Adaptive variable impedance control for multi-axis force tracking in uncertain environment stiffness with redundancy exploitation [J]. Control Engineering and Applied Informatics, 2022, 24(2):35-45.

[13] 杨琦, 杨芳艳, 袁野, 等. 基于多层次语音情绪识别网络的机器人表情控制[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10):41-49.

[14] 董慧芬, 姚勤燃, 王俊峰. 基于动力学参数辨识的两轮机器人平衡控制[J]. 控制工程, 2025, 32(2):345-353.

[15] 赵涛, 丁晓军, 赵虎, 等. 索杆夹角可变的3自由度欠约束并联机器人的运动学控制[J]. 机械传动, 2022, 46(12):73-78.

[16] 黎万波, 廖益龙, 徐坤财, 等. 六自由度机器人运动学模型建立及分析[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(2):68-70.

[17] 田海波, 芦茂林, 王奥. 变结构井下救援机器人动力学建模与轨迹跟踪控制[J]. 机械传动, 2024, 48(10):96-104.

[18] 杨迪, 刘思源, 王鹏, 等. 基于多策略粒子群优化RBF的云资源预测模型[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(4):1073-1080.

[19] 李书进, 高扬, 柳宇轩. 近海风机基于碰撞式磁流变弹性体质量阻尼器的半主动控制研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(4):1-9.

[20] 王晶, 周楠, 王森, 等. 随机变批次长度的反馈辅助PD型量化迭代学习控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(10):2569-2576.