

动态环境下的自适应变阻抗控制方法*

刘 玉, 常志远, 李 珂, 楚红雨, 张晓强, 邵延华

(西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 针对机器人接触性作业存在环境建模不精确导致接触力跟踪波动的问题, 提出一种动态环境下的自适应变阻抗控制方法。所提出的控制方法根据接触力反馈信息建立惯性参数的自适应控制率, 并对阻尼更新率动态调节, 避免接触阶段的力超调, 同时减小稳态跟踪阶段的力跟踪误差。基于 Matlab/Simulink 搭建仿真模型, 与经典的定阻抗控制在平面、斜面及正弦曲面环境下进行对比实验, 实验结果表明该方法相对经典定阻抗控制, 在恒定期望力下力跟踪稳态误差至少减少 2.33 N, 超调量至少降低 97.9%, 期望力动态变化也具有更小的超调和稳态误差, 在刚度突变时振荡次数少, 能够很好地适应接触环境位置动态变化、刚度参数不准确、力动态变化的情况。

关键词: 机器人; 接触性作业; 自适应; 力跟踪; 阻抗控制

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.02.004



全文在线

Adaptive variable impedance control methods in dynamic environments

LIU Yu, CHANG Zhiyuan, LI Ke, CHU Hongyu, ZHANG Xiaoqiang, SHAO Yanhua

(College of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621000, CHN)

Abstract: Aiming at the problem of contact force tracking fluctuation caused by inaccurate environment modeling in robot contact operation, an adaptive variable impedance control method in dynamic environment was proposed. The proposed control method establishes the adaptive control rate of the inertial parameters according to the contact force feedback information and dynamically adjusts the damping update rate to avoid the force overshoot in the contact phase and reduce the force tracking error in the steady state tracking phase. The simulation model is built based on Matlab/Simulink and compared with the classical fixed impedance control in the plane, inclined plane and sinusoidal surface environment. The experimental results show that compared with the classical fixed impedance control, the proposed method can reduce the steady-state error of force tracking by at least 2.33 N and the overwork by at least 97.9% under constant expected force. The desired force dynamic changes also have smaller overshoot and steady-state errors, and fewer oscillation times when the stiffness changes abruptly, which can well adapt to the dynamic changes of the contact environment position, inaccurate stiffness parameters, and dynamic changes of the force.

Keywords: robot; contact work; adaptive; force tracking; impedance control

随着机器人技术的发展, 接触性作业成为机器人应用的重要领域, 典型的例子包括装配、抛光、去毛刺等^[1]。对于特定的应用场景, 仅依靠位置控制无法确保机器人在跟踪期望轨迹的同时, 执行器

末端与环境保持期望接触力。经典定阻抗控制通过建立机器人末端执行器与环境之间力与位置的关系, 并借助末端接触力反馈信息来调整末端位置, 在一定程度上解决了接触力控制问题^[2]。经典定阻

* 国家自然科学基金项目(62201479); 四川省科技计划资助项目(2023NSFSC1388); 教育部协同育人基金项目(24sjjg14)

抗控制在应对刚度固定、简单场景下效果显著^[3]。然而，当接触不同材质或者是位置信息多变的物体表面，由于不能实时准确获取环境信息，针对各种变化特征无法构建精确数学模型，因此无法严格控制力的精度和超调量，确保抛光过程的精确性和可靠性。

为了增强机器人适应不同的接触环境，ROVEDA L等^[4]采用扩展卡尔曼滤波器对刚度进行估计，并通过连续调整控制增益来达成力跟踪。SERAJI H等^[5]提出基于环境参数估计的参考轨迹自适应生成方法，构建间接自适应控制框架对接触力误差进行补偿。李振等^[6]利用环境参数估计的轨迹自适应生成方法，并用遗传算法来校正接触力误差。此类方法通过间接调整参考轨迹，由轨迹规划器输出参考轨迹。党选举等^[7]提出基于神经网络自学习调节阻尼参数实现打磨过程中的力控制。赵丕洋等^[8]采用粒子群算法对阻抗参数进行整定。郑帅等^[9]使用改进粒子群算法进行在线调整与离线优化结合的阻抗参数寻优。刘哲等^[10]使用实时优化的遗传算法进行阻抗参数的寻优。这些方法计算量大，训练过程复杂，无法实现参数在线整定。DUAN J J等^[11]设计基于力跟踪误差在线调整阻尼参数的自适应变阻抗控制用于刚度突变环境。史生坤等^[12]利用自适应变阻抗控制实现了对挡风玻璃研抛力的恒定控制。CAO H L等^[13]设计了一种动态自适应混合阻抗控制器用于时变刚度的接触力跟踪。学者们从多个维度对经典定阻抗控制进行优化，在力跟踪方面取得了诸多进展，但控制系统的动态性能和力的精度还有待进一步提高。

本文基于自适应变阻抗^[11]的研究思路，不对环境参数进行估计，并进行阻抗参数在线整定。利用接触力反馈信息自适应调整阻抗参数，自适应机制包括阻尼更新率的动态调节和惯性参数的实时自适应控制率，从而形成一种自适应阻抗控制策略。在机械臂上进行实验验证，结果表明，改进的自适应变阻抗方法能够显著提高力跟踪性能。

1 阻抗交互模型和系统分析

1.1 机器人与环境的交互模型

为了建立机器人与环境之间的接触力模型，可将机器人视为一个二阶的质量-弹簧-阻尼系统，环境由弹簧系统表示。机器人末端与环境接触的全过程可分为3个阶段：自由空间段、临界空间段和接

触空间段^[14]，具体如图1所示，其中 M 为惯性参数， B 为阻尼参数， K 为弹性参数， K_e 为环境刚度， F_c 为机器人与环境的实际接触力。临界空间段的力超调和接触空间段在稳态运动时的力跟踪误差是分析的重点。

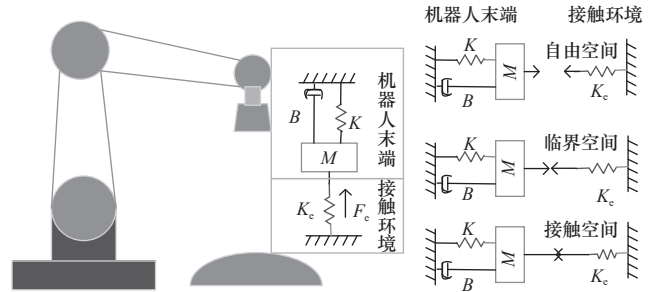


图1 机器人-环境交互模型

Fig. 1 Model of robot-environment interaction

将机器人视为一个刚性系统，为了使机器人与环境接触时能够表现出顺应性，需要设计利用力反馈信息构建的控制策略。为此，采用笛卡尔空间下的阻抗控制来实现对期望接触力的跟踪，如图2所示，其中 X_r 为机器人末端的参考位置； \dot{X}_r 和 \ddot{X}_r 为 X_r 的一阶导数和二阶导数； X_c 为发送给机器人的指令位置； \dot{X}_c 和 \ddot{X}_c 为 X_c 的一阶导数和二阶导数； X_e 为环境的初始实际位置信息； F_d 为机器人与环境期望接触力； ΔF 为实际接触力 F_c 与期望接触力 F_d 之间的力误差； J^T 为机械臂雅可比矩阵的转置，映射机械臂末端力与关节力矩 τ 的关系，通过电机驱动得到关节角度 θ ，再通过正运动学得到机器人末端运动位置 X_m 。在位置控制模式下通常满足 $X_c = X_m$ ，机器人末端运动位置 X_m 与参考位置 X_r 的误差 $E = X_m - X_r = X_c - X_r$ 。

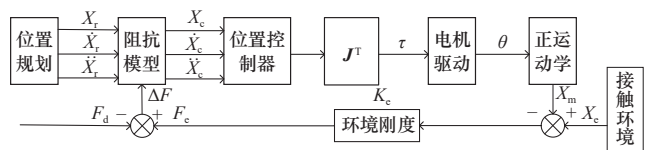


图2 笛卡尔空间下的阻抗控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of the impedance control system in Cartesian space

在建立机器人与环境的交互模型时，把环境看作是弹簧系统，并假设环境的刚度为 K_e ，那么机器人与环境的实际接触力 F_c 为

$$F_c = K_e(X_c - X_m) = K_e(X_c - X_r) \quad (1)$$

$$\Delta F = F_c - F_d \quad (2)$$

建立机器人末端工具与接触环境之间的阻抗模型，表达式为

$$M(\ddot{X}_c - \ddot{X}_r) + B(\dot{X}_c - \dot{X}_r) + K(X_c - X_r) = \Delta F \quad (3)$$

将力跟踪误差 ΔF 输入到阻抗模型, 输出为轨迹误差 E , 并对式(3)进行拉普拉斯变换得到传递函数 $H(s)$, 其中, $E(s)$ 、 $\Delta F(s)$ 为变换后的力跟踪误差、轨迹误差。

$$H(s) = \frac{E(s)}{\Delta F(s)} = \frac{1}{M(s^2 + Bs + K)} \quad (4)$$

化简可得

$$H(s) = \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

式中: s 为复频域中的拉普拉斯变换变量; ξ 为系统的阻尼比, $\xi = B/2\sqrt{KM}$; ω_n 为系统的固有频率, $\omega_n = \sqrt{K/M}$ 。

二阶系统的动态特性由阻尼比、固有频率决定, 当外部环境的参数发生变化时, 如环境刚度 K_e 发生变化, 系统的动态特性也会随之改变。为确保机器人末端与环境保持良好的动态交互性能, 阻抗参数(M 、 B 、 K)应能实时调整适应这些变化。惯性参数 M 决定系统的响应速度和稳定性, 影响系统抵抗速度变化和力跟踪能力。阻尼参数 B 的值影响系统振荡幅度, 过高的阻尼会导致系统响应变慢。弹性参数 K 决定了系统在受到外力时形变的程度, 并且也会影响系统响应速度。

1.2 阻抗控制稳态误差分析

在笛卡尔空间中, 假设机器人末端工具每个方向上的阻抗控制都是解耦的, 为了便于分析, 以一维为例, 变量均以小写表示。已知环境的精确初始位置 x_c 和环境刚度 k_e , 则可根据式(4)计算发送给机器人的指令位置 $x_c = x_r + e = x_r + \Delta f \cdot h(s)$ 。

力跟踪误差 Δf 可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta f &= f_e - f_d = k_e(x_c - x_e) - f_d \\ &= k_e x_e - k_e(x_r + \Delta f \cdot h(s)) - f_d \\ &= k_e(x_e - x_r) - f_d - k_e[\Delta f \cdot h(s)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $h(s)$ 为一维传递函数; e 为轨迹误差; x_c 为一维方向发送给机器人的指令位置; x_r 为一维方向机器人末端的参考位置; f_e 为一维方向的实际接触力; f_d 为一维方向的期望接触力。

将 $h(s) = 1/(ms^2 + bs + k)$ 代入式(6)可得

$$\Delta f(ms^2 + bs + k + k_e) = (ms^2 + bs + k)[k_e(x_e - x_r) - f_d] \quad (7)$$

当机器人末端工具与工件稳定接触时, 相对速度和加速度均为零, 这种情况下, 稳态误差与系统的惯性参数 m 和阻尼参数 b 无关, 因此可以得出稳态误差 Δf_{ss} , 即

$$\Delta f_{ss} = \frac{k}{k + k_e} [k_e(x_e - x_r) - f_d] \quad (8)$$

由式(8)可知, 当满足式(9)中任一条件, 即可使力跟踪误差 $\Delta f_{ss} = 0$

$$\begin{cases} k = 0 \\ x_r = x_e - \frac{f_d}{k_e} \end{cases} \quad (9)$$

如果已知环境的精确位置和刚度, 则可精确得到参考位置 x_r , 进而获得机器人的位置控制指令, 然而在大多数情况下, 环境的位置和刚度信息无法准确获取, 将始终存在力跟踪误差。

2 自适应阻抗控制力跟踪策略

2.1 自适应变阻抗模型

为满足稳态误差为0的条件, 文献[11]将弹性参数 k 设为0。因难以得到精确的参考轨迹 x_r , 使用实际环境位置 x_e 代替 x_r , 从而误差 $e = x_c - x_e$, \dot{e} 和 \ddot{e} 为 e 的一阶导数和二阶导数, 动态环境下一维方向上的力跟踪误差 Δf 可以改写为

$$\Delta f = m\ddot{e} + b\dot{e} \quad (10)$$

若环境是未知曲面时, 实际环境位置 x_e 时变, 因此需要对 x_e 进行预估。假设环境位置预估值 $\hat{x}_e = x_e - \delta x_e$, δx_e 为不确定因素造成的环境位置估计误差; 此时对应的轨迹误差 $\hat{e} = x_c - \hat{x}_e = e + \delta x_e$, $\dot{\hat{e}}$ 和 $\ddot{\hat{e}}$ 为 \hat{e} 的一阶导数和二阶导数, $\delta \dot{x}_e$ 和 $\delta \ddot{x}_e$ 为 δx_e 的一阶导数和二阶导数, 代入式(10)得

$$\Delta f = f_e - f_d = m\ddot{\hat{e}} + b\dot{\hat{e}} = m(\ddot{e} + \delta \ddot{x}_e) + b(\dot{e} + \delta \dot{x}_e) \quad (11)$$

将 $\Delta m(t)$ 补偿 $m\delta \ddot{x}_e$ 、 $\Delta b(t)$ 补偿 $b\delta \dot{x}_e$, 则可将式(11)改写为时变函数 $\Delta f(t)$, 得

$$\Delta f(t) = [m + \Delta m(t)]\ddot{\hat{e}}(t) + [b + \Delta b(t)]\dot{\hat{e}}(t) \quad (12)$$

式中: $\Delta m(t)$ 为惯性参数时变量; $\Delta b(t)$ 为阻尼参数时变量。

2.2 自适应惯性参数和动态更新率设计

首先, 根据接触力误差及其一阶微分, 动态调整阻抗模型惯性系数, 采用PD控制器思想建立惯性参数与接触力偏差的控制率使 $\Delta m(t)$ 的表达式为。

$$\Delta m(t) = -(k_p \cdot \Delta f + k_d \cdot \Delta \dot{f})[\ddot{x}_c(t) - \ddot{x}_r(t)] \quad (13)$$

式中: k_p 为接触力误差增益; k_d 为接触力误差一阶微分增益; $\Delta \dot{f}$ 为 Δf 的一阶导数; $\ddot{x}_c(t)$ 为发送给机器人的指令位置的二阶导数; $\ddot{x}_r(t)$ 为机器人末端参考位置的二阶导数。

其次, 根据前述的动态特性分析, 对阻尼参数进行调整, 一方面, 在力误差邻域外使 b 很小, 提

高响应速度，另一方面，根据文献 [9] 在误差邻域内加上 $\Delta b(t)$ ， $\Delta b(t)$ 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta b(t) = \frac{b}{\tilde{e}(t) + \varepsilon} \phi(t) \\ \phi(t) = \phi(t - \lambda) + \sigma \frac{f_e(t - \lambda) - f_a(t - \lambda)}{b} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\varepsilon=10^{-8}$ 用于防止式中分母为 0； λ 为采样率； σ 为更新率； $\phi(t)$ 为中间参数变量。

同时，通过文献 [13] 可知，若更新率较高，系统补偿作用明显，但是临界空间容易出现振荡现象，导致接触不稳定。反之，如果更新速率设置过低，补偿效果将不足。因此，保持更新速率不变并不是最佳选择，使更新率依据力误差变化进行迅速调节，更新率 σ 可以采用如下形式，其中， α 为标准差。

$$\sigma = \frac{1}{\alpha \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta f^2}{2\alpha^2}} \quad (15)$$

设置高斯分布的标准差 α 参数值，根据实时反馈的力信息得到力误差，从而对更新率 σ 进行实时调整，当接触力跟踪误差较大时，降低更新速率的值以减轻接触不稳定的现象。一旦接触稳定下来，可以提高更新速率的值以增强补偿效果。

综上，如式 (13) 和式 (14) 所示，根据自适应惯性参数和动态更新率给出参数更新方法，为方便实际工业机器人控制器的使用，将式 (12) 变阻抗模型离散化。

$$\begin{cases} \ddot{x}_c(t) = \ddot{x}_c(t) + \frac{1}{m + \Delta m} \{\Delta f(t) - b(t)[\dot{x}_c(t-1) - \dot{x}_c(t)]\} \\ \dot{x}_c(t) = \dot{x}_c(t-1) + \ddot{x}_c(t) \cdot T \\ x_c = x_c(t-1) + \dot{x}_c(t) \cdot T \end{cases} \quad (16)$$

式中： T 为在 Simulink 仿真时设置的采样时间。

算法的系统框图如图 3 所示，以一维为例，图中变量均以图 2 小写表示，将测量位置和速度信息以及力误差信息作为输入信号，实时计算出的阻抗参数传入阻抗控制器，进而计算出末端位置增量，通过位置到力的变换，实现对于力的控制。

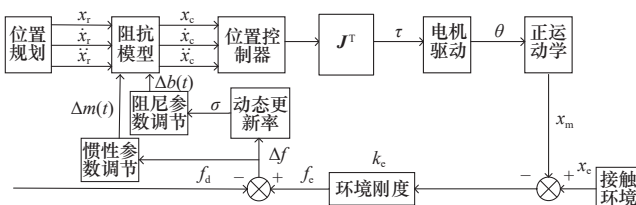


图 3 基于变惯性参数和动态更新率的阻抗控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of impedance control system based on variable inertia parameters and dynamic update rate

3 控制算法仿真实验与分析

3.1 恒力跟踪仿真实验

为了验证本文提出的自适应阻抗控制方法，在 Matlab/Simulink 平台搭建六轴机械臂仿真模型，对比分析经典定阻抗控制，自适应阻抗控制^[11]以及本文提出的控制算法在平面、斜面与正弦曲面的接触环境下的力跟踪效果，设置变刚度环境前 5 s 环境刚度 $k_e=2\ 000\ \text{N/m}$ ，后 5 s 环境刚度 $k_e=3\ 000\ \text{N/m}$ 。机器人初始状态时在环境之上未与环境接触，机器人运动过程中，工具坐标系 Z 轴方向施加 40 N 期望力，XY 方向不施加力，RPY 方向不施加外力矩。然后取惯性参数 $m=1$ ，阻尼参数 $b=200$ ，弹性参数 $k=0$ 。

3.1.1 平面接触运动

机器人初始状态未与环境接触，所以接触力初始时刻都为 0。平面接触开始时，定阻抗控制出现剧烈的震荡，后因刚度突变导致接触力瞬间增大而进行力调整。但改进后控制方法没有剧烈震荡且无超调，实验结果如图 4 所示。

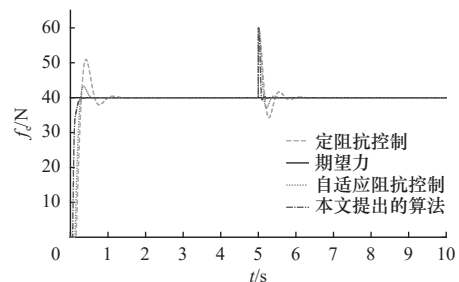


图 4 接触环境为平面时的力跟踪效果

Fig. 4 Force tracking effect when the contact environment is planar

3.1.2 斜面接触运动

当接触环境为斜面时，定阻抗控制、自适应阻抗控制都有超调，在稳定接触阶段，定阻抗控制接触力与期望力存在 1.5 N 的差距。改进后控制算法无超调，力跟踪误差为 0 N，刚度突变且无震荡，跟踪效果如图 5 所示。

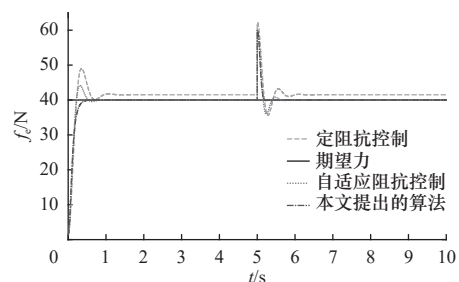


图 5 接触环境为斜面时的力跟踪效果

Fig. 5 Force tracking effect when the contact environment is inclined plane

3.1.3 正弦曲面接触运动

当接触环境为正弦曲面时，定阻抗控制、自适应阻抗控制超调过大，定阻抗控制在稳定接触阶段，有明显的稳态误差，自适应阻抗控制稳态误差为0.17 N。改进后控制算法开始阶段超调明显降低，跟踪误差为0.17 N，如图6所示。

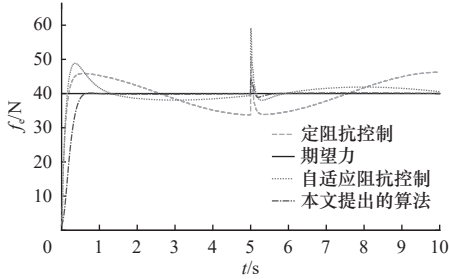


图6 接触环境为正弦曲面时的力跟踪效果

Fig. 6 Force tracking effect when the contact environment is a sinusoidal surface

由上面的3个实验可得出如下结论：对于平面而言，即使环境刚度变化，定阻抗控制也能够达到预期的力跟踪效果，但是对于斜面或是更为复杂的未知曲面，定阻抗控制无法实现预期的力跟踪效果，而自适应阻抗控制有较好的力跟踪能力，但超调过大。具体参数见表1。

表1 不同控制方法在不同接触环境下的力跟踪效果

Tab. 1 Force tracking effect of different control methods in different contact environments

环境	定阻抗控制		自适应阻抗控制		本文提出的方法	
	超调量/ (%)	稳态 误差/N	超调量/ (%)	稳态 误差/N	超调量/ (%)	稳态 误差/N
平面	27.5	0	8.3	0	0	0
斜面	22.6	1.5	10.4	0	0	0
正弦曲面	14.6	2.5	22.1	1.9	0.3	0.17

通过数值比较，改进后控制算法在平面、斜面环境下，稳态误差为0，且无超调量。在正弦曲面环境下，相较于定阻抗控制，超调量下降了97.9%，稳态误差减少了2.33 N，降低了93.2%。实验表明，改进的自适应阻抗控制在不同环境下相较于另外2种控制方法，稳态误差更小，超调量更低，在刚度突变时振荡次数更少，在不同接触环境下的力跟踪性能更为出色。

3.2 动态力跟踪仿真实验

同时，针对实际作业中出现的力变化情况，在接触环境为平面、环境刚度 $k_c=2\ 000\ \text{N/m}$ 的条件下进行期望力突变、期望力斜坡增长、期望力正弦变

化仿真实验。接触开始时，定阻抗控制出现不同程度震荡，改进后控制方法没有剧烈震荡且无超调，在稳定接触阶段稳态误差减小。各算法在动态期望力下的实验结果如图7~图9所示。

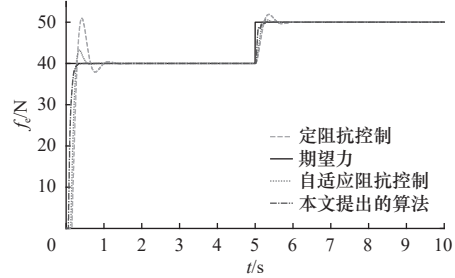


图7 期望力突变时的力跟踪效果

Fig. 7 Force tracking effect when the contact force changes abruptly

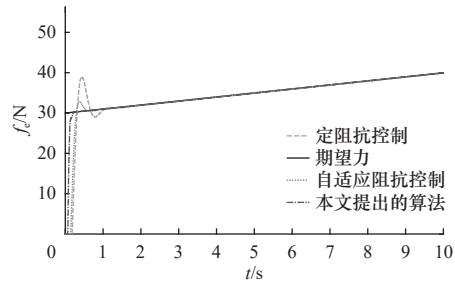


图8 期望力斜坡变化时的力跟踪效果

Fig. 8 Force tracking effect when the contact force slope changes

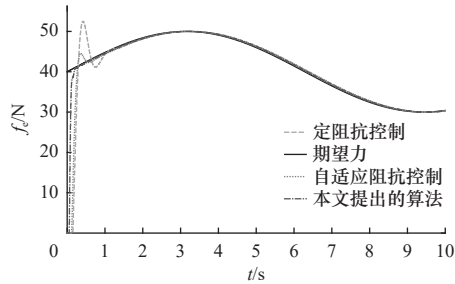


图9 期望力正弦变化时的力跟踪效果

Fig. 9 Force tracking effect when the contact force is sinusoidally varied

由上面的3个实验可得出如下结论：无论是定阻抗控制还是自适应阻抗控制，在动态响应过程中均出现了明显的超调，在稳态阶段存在一定的稳态误差，在力跟踪性能上均有所欠缺。相较之下，改进的自适应阻抗控制在超调量方面表现良好，且稳态误差几乎为零。具体的参数对比数据详见表2。

4 结语

为提高机器人进行接触性作业时力控制系统的动态性能和力跟踪精度，确保抛光过程的精确性和可靠性，提出一种改进后的自适应阻抗控制策略。根据接触力反馈信息建立惯性参数的自适应控制率，

以及对阻尼更新率动态调节。避免接触阶段的力超调,减小稳态跟踪阶段的力跟踪误差。仿真结果表明,本文方法相较于经典定阻抗控制而言,力稳态误差减少,超调量降低,在刚度突变时振荡次数少。该方法增强了系统对不同接触环境的力跟踪能力,为机器人接触性作业力控制提供一个解决思路。

表2 不同控制方法在动态期望力下的力跟踪效果

Tab. 2 Force tracking effect of different control methods under dynamic desired force

环境	定阻抗控制		自适应阻抗控制		本文提出的方法	
	超调量/ (%)	稳态 误差/N	超调量/ (%)	稳态 误差/N	超调量/ (%)	稳态 误差/N
期望力突变	4.10	0	1.2	0	0	0
期望力 斜坡增长	27.8	1	8.4	0.2	0	0.06
期望力 正弦变化	25.1	0.4	6.4	0.15	0	0.09

参 考 文 献

- [1] 葛吉民, 邓朝晖, 李尉, 等. 机器人磨抛力柔顺控制研究进展 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(18): 2217-2230, 2238.
- [2] 邓建新, 袁邦颐, 黄秋林, 等. 基于工业机器人的复杂曲面磨抛关键技术综述 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(7): 1-21.
- [3] 赖火生, 吴磊, 陈新度, 等. 机器人实现未知参数下的曲面跟踪和恒力控制的研究 [J]. 制造技术与机床, 2018(6): 21-25.
- [4] ROVEDA L, IANNACCI N, VICENTINI F, et al. Optimal impedance force-tracking control design with impact formulation for interaction tasks [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2015, 1(1): 130-136.
- [5] SERAJI H, COLBAUGH R. Force tracking in impedance control [J]. The International Journal of Robotics Research, 1997, 16(1): 97-117.

- [6] 李振, 赵欢, 王辉, 等. 机器人磨抛加工接触稳态自适应力跟踪研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(9): 200-209.
- [7] 党选举, 袁以坤. 基于神经网络参数自学习的阻抗控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(1): 123-126, 130.
- [8] 赵丕洋, 洪荣晶, 方成刚. 基于粒子群算法寻优的机器人自适应阻抗力控制 [J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(10): 284-289.
- [9] 郑帅, 国凯, 孙杰. 基于变参数阻抗控制的机器人恒力打磨研究 [J]. 制造技术与机床, 2024(3): 9-15.
- [10] 刘哲, 邹涛, 孙威, 等. 结合实时优化遗传算法的磨削机器人阻抗控制 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(12): 1788-1795.
- [11] DUAN J J, GAN Y H, CHEN M, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 102: 54-65.
- [12] 史生坤, 刁燕, 杨俊波, 等. 非金属曲面局部研抛修复机器人阻抗控制研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(8): 57-61.
- [13] CAO H L, CHEN X A, HE Y, et al. Dynamic adaptive hybrid impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environments [J]. IEEE Access, 2019, 7: 83162-83174.
- [14] WAHBALLA H, DUAN J J, DAI Z D. Constant force tracking using online stiffness and reverse damping force of variable impedance controller for robotic polishing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(9): 5855-5872.

第一作者: 刘玉, 女, 2000年生, 硕士研究生, 研究方向为机器人建模与控制。E-mail: liuhanqiang@mails.swust.edu.cn

通信作者: 常志远, 男, 1987年生, 博士, 讲师, 研究方向为机器人建模与控制、飞行控制系统设计, 发表论文10余篇。E-mail: changzy0510@swust.edu.cn

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2024-07-31)

论文推荐

毛晓博, 史建猛, 雷声, 等. 机床结构对流换热系数的参数化建模方法 [J]. 制造技术与机床, 2022(10): 177-182.



扫码获取全文

机床结构对流换热系数的参数化建模方法

毛晓博^① 史建猛^① 雷声^② 毛宽民^③

①中航西安飞机工业集团股份有限公司

②中南民族大学计算机科学学院

③华中科技大学机械科学与工程学院

摘要 热态特性分析是研究控制数控机床热误差的主要研究方法之一, 而对热分析结果有很大影响的对流换热系数计算却是一个难点问题。在量纲分析的基础上, 结合实验数据与多元线性回归分析, 提出一种考虑环境温度与温差变化的机床结构对流换热系数的参数化计算方法, 提高了对流换热系数和机床热分析计算的准确性与效率。以某机床滚珠丝杠进给系统为例, 通过仿真计算与实验对所提方法的有效性进行了验证。

关键词 数控机床; 热态特性分析; 参数化建模; 对流换热系数