

# 未知环境下机器人打磨自适应变阻抗恒力控制

郭万金<sup>1,2,3,4\*</sup> 田玉祥<sup>1</sup> 利乾辉<sup>1</sup> 曹雏清<sup>2,5</sup> 赵立军<sup>2,4</sup> 徐明坤<sup>1</sup>  
刘孝恒<sup>1</sup> 侯旭栋<sup>1</sup>

1. 长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 西安, 710064
2. 长三角哈特机器人产业技术研究院, 芜湖, 241007
3. 埃夫特智能装备股份有限公司, 芜湖, 241060
4. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨, 150001
5. 安徽工程大学计算机与信息学院, 芜湖, 241000

**摘要:**为解决未知环境下环境参数的不确定导致的机器人恒力打磨自适应调节能力不足的问题,提出一种未知环境参数实时估计的机器人自适应变阻抗恒力控制方法。该方法将自适应滑模控制作为内环控制,将环境参数估计与自适应变阻抗控制作为外环控制。机器人平台实验结果表明,所提方法能较好地实现期望打磨力跟踪,对未知环境工况机器人打磨作业具有较高的自适应性。

**关键词:**机器人打磨;恒力控制;自适应变阻抗;环境参数估计

**中图分类号:**TP242.2;TH39

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Adaptive Variable Impedance Constant Force Control of Robotic Grinding under Unknown Environments

GUO Wanjin<sup>1,2,3,4\*</sup> TIAN Yuxiang<sup>1</sup> LI Qianhui<sup>1</sup> CAO Chuqing<sup>2,5</sup> ZHAO Lijun<sup>2,4</sup> XU Mingkun<sup>1</sup>  
LIU Xiaoheng<sup>1</sup> HOU Xudong<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064
2. Yangtze River Delta HIT Robot Technology Research Institute, Wuhu, Anhui, 241007
3. EFORT Intelligent Equipment, Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 241060
4. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001
5. School of Computer and Information, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui, 241000

**Abstract:** To solve the problems of insufficient adaptive adjustment ability of robotic constant force grinding due to the uncertainty of environmental parameters under unknown environments, a robotic adaptive variable impedance constant force control method with real-time estimation of unknown environmental parameters was proposed. In the proposed method, the adaptive sliding mode control was used as the inner loop control, and the environmental parameter estimation and adaptive variable impedance control were used as the outer loop control. The robotic platform experimental results show that the proposed method may realize the tracking of the expected grinding forces, and has high adaptability to the robotic grinding operations under unknown environmental conditions.

**Key words:** robotic grinding; constant force control; adaptive variable impedance; environmental parameter estimation

### 0 引言

工业机器人广泛用于各个领域,已成为智能

制造系统的重要组成部分和关键生产装备<sup>[1]</sup>。工业机器人打磨具有灵活性、智能性和成本效益,是实现复杂环境或复杂构件高效加工的可选方案<sup>[2]</sup>,推动制造业的数字化转型和智能化升级<sup>[3-4]</sup>。

柔顺控制分为被动柔顺控制和主动柔顺控制<sup>[5]</sup>。被动柔顺控制不能实时调整控制力大小,且通用性较差,通常适用于控制精度要求不高的工况。主动柔顺控制具有实时的力反馈特性而成为机器人打磨恒力控制的热点研究方向<sup>[6]</sup>。

收稿日期:2024-11-06

基金项目:国家自然科学基金(52275005);陕西省自然科学基金(2025JC-QYXQ-027,2025JC-YBMS-619);中央高校基本科研业务费专项资金(300102253201);中国博士后科学基金(2024M760002);安徽省机器视觉检测与感知重点实验室开放基金(KLMVI-2025-HIT-06)

打磨恒力控制是机器人打磨的关键<sup>[7]</sup>,国内外学者对此进行了诸多研究。KANA等<sup>[8]</sup>提出一种基于阻抗控制的协作曲线跟踪控制方法,以完成人机协作的边缘倒角和打磨任务。甘亚辉等<sup>[9]</sup>针对力跟踪时环境刚度不确定、环境位置动态变化的未知性,提出非结构环境下基于自适应变阻抗的力跟踪控制策略。WANG等<sup>[10]</sup>提出的PD-自适应变阻抗控制方法通过调节阻尼项实现打磨工具近似垂直于加工表面的恒力控制。WAH-BALLA等<sup>[11]</sup>为跟踪期望力,提出一种基于在线刚度和反向阻尼力(online stiffness and reverse damping force, OSRDF)的阻抗控制器的恒力跟踪控制方案。陈满意等<sup>[12]</sup>提出一种能适应系统刚度变化的模糊自适应阻抗控制模型,以实现稳定的法向力控制和位置控制。李路骋等<sup>[13]</sup>为保证气囊抛光过程中的接触力恒定,设计了实时调节阻尼系数的模糊阻抗控制机器人气囊抛光恒力控制系统。ZHONG等<sup>[14]</sup>结合自适应阻抗控制与滑模控制来跟踪期望接触力和轨迹。严海堂等<sup>[15]</sup>针对打磨机器人在复杂环境中不能兼具磨削精度和顺应性的问题,提出一种基于算法优化的机器人打磨系统力控补偿方法,以提高机器人打磨系统的精度和稳定性。基于概率模型预测控制的前馈控制器和基于非参数学习方法的反馈控制器的组合控制方法<sup>[16]</sup>无需了解软机器人动力学和环境结构便可在在线更新以适应未知环境。自适应变阻抗、主动柔顺恒力控制方法<sup>[17-19]</sup>实现了机器人打磨作业的自适应主动柔顺恒力控制,无先验模型曲面的机器人打磨轨迹预测方法<sup>[20]</sup>实现了打磨轨迹的主动自适应在线预测。ZHOU等<sup>[21]</sup>针对交互任务的可重复性以及缺乏适用于多任务场景的广义力控制策略的问题,基于迭代学习参数整定机制,提出一种主动导纳控制的混合控制策略。HAMEDANI等<sup>[22]</sup>提出一种基于小波神经网络的自适应变阻抗方法,根据变化的环境自适应调节阻抗参数,以提高期望力与未知环境相互作用的效率。

机器人打磨作业通常是在未知环境或少信息环境下进行的,机器人的接触环境参数具有实变特征<sup>[23-25]</sup>。打磨属于减材制造,打磨力不能超调,过打磨会使工件表面变得粗糙,甚至损坏工件或打磨工具。上述机器人打磨恒力控制方法虽在阻抗参数整定、打磨力稳定性上有一定的效果,但在打磨不同刚度工件的接触柔顺性上存在不足,致使上述控制方法在不确定性打磨环境下的适应性存在不足。文献[21-22]采用的学习迭代类计算存在计算量大、数据更新慢、效率低的局限,在工

件机器人打磨作业的打磨力控制实时性和稳定性方面存在一定的不足。

为解决机器人打磨作业柔顺性低,以及环境参数不确定导致机器人恒力打磨自适应调节能力不足的问题,本文提出一种未知环境参数实时估计的机器人自适应变阻抗恒力控制方法,通过机器人打磨系统虚拟样机联合仿真实验、机器人平台实物实验,验证所提出方法的有效性。

## 1 机器人自适应变阻抗恒力控制

### 1.1 自适应滑模控制

本文结合滑模控制(sliding mode control, SMC)<sup>[26-27]</sup>与自适应控制来控制滑模函数系数 $c$ ,进而实现实际位置对参考位置的快速跟踪,提高抗干扰能力。

机器人力控末端执行器可看作一个质量-弹簧-阻尼系统<sup>[10, 13]</sup>,根据实际打磨力的大小控制音圈电机的伸缩位移量。该系统的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= \frac{u}{m} - \frac{d}{m} X_2 - \frac{k}{m} X_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $X_1=X_r$ 为打磨工具的实际位置(由位置传感器实时测量); $X_2$ 为 $X_1$ 的一阶导数; $u$ 为控制律; $m$ 为力控末端执行器运动部件的质量; $d$ 为系统阻尼; $k$ 为弹簧刚度。

选取滑模函数

$$s = ce + \dot{e} \quad c > 0 \quad (2)$$

式中: $e$ 为位置跟踪误差, $e = X_r - X_1$ ;  $X_r$ 为参考位置。

为自适应控制滑模函数系数 $c$ ,将式(2)改为

$$s = \hat{c}e + \dot{e} \quad \hat{c} > 0 \quad (3)$$

式中: $\hat{c}$ 为滑模函数系数 $c$ 的估计值。

则估计误差 $\tilde{c} = \hat{c} - c$ 。

为使系统快速且稳定地接近滑模面,选用指数趋近律:

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn} s - hs \quad (4)$$

式中: $\epsilon, h$ 为控制增益, $\epsilon > 0, h > 0$ 。

对式(3)求导并与式(1)、式(4)联立,求得控制律:

$$u = m[\epsilon \operatorname{sgn} s + hs + \hat{c}(\dot{X}_r - X_2) + \ddot{X}_r] + dX_2 + kX_1 \quad (5)$$

为确保系统的稳定性,采用Lyapunov第二方法设计滑模函数系数 $c$ 自适应律。选取Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\tilde{c}^2 \quad (6)$$

对式(6)求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \tilde{c}\dot{\tilde{c}} = s(c\dot{e} + \ddot{X}_r - \dot{X}_2) + \tilde{c}\dot{\tilde{c}} = \\ &= s\{c\dot{e} + \ddot{X}_r - [\epsilon \operatorname{sgn} s + hs + \hat{c}(\dot{X}_r - X_2) + \\ &\quad \ddot{X}_r + \frac{d}{m} X_2 + \frac{k}{m} X_1 - \frac{d}{m} X_2 - \frac{k}{m} X_1]\} + \tilde{c}\dot{\tilde{c}} = \end{aligned}$$

$$-s\tilde{c}\dot{e} - \epsilon \operatorname{sgn}s - hs + c\dot{\tilde{c}} \leq 0 \quad (7)$$

由式(7)可以看出,  $-\epsilon \operatorname{sgn}s - hs \leq 0$ , 当且仅当  $s=0$  时,  $-\epsilon \operatorname{sgn}s - hs = 0$  成立; 令  $-s\tilde{c}\dot{e} + c\dot{\tilde{c}} = 0$ , 解得  $\dot{\tilde{c}} = s\dot{e}$ ; 同时引入增益系数  $r_c$  和初值  $k_{c0}$ , 则滑模函数系数  $c$  的自适应律为

$$\dot{\tilde{c}} = r_c \int s\dot{e} dt + k_{c0} \quad (8)$$

### 1.2 环境参数估计

机器人打磨作业时, 打磨环境信息未知, 可能出现打磨工具碰撞打磨工件的现象。针对这一问题, 本文研究环境参数估计, 即根据实际打磨力与打磨工具实际位置的反馈, 实时估计工件表面位置与工件刚度, 并生成期望位置来实时修正参考位置, 使打磨工具的实际位置跟踪实时修正后的参考位置, 确保打磨工具较柔顺地接触工件表面, 实现稳定的打磨作业。

机器人打磨作业过程中, 打磨工具及接触环境如图1所示, 其中,  $X_e$  为工件未加工表面与打磨工具的轴向距离(环境位置),  $X_c$  为打磨工具的轴向位置(实际位置),  $X_r$  为控制器输出位置值的累加和(参考位置),  $X_d$  为实际打磨力到达期望打磨力时打磨工具的位置(期望位置)。

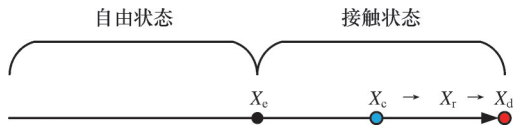


图1 各位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of each position

打磨机器人作业时, 力控末端执行器受其重力的影响, 力传感器测量到的力/力矩并不能真实反映实际打磨状态, 因此需消除末端执行器重力的影响, 实现精准控制<sup>[28]</sup>。力控末端执行器接触工件表面时, 如图2所示,  $F_c$  为力传感器直接测到的接触力,  $G$  为末端执行器的重力,  $G_1$ 、 $G_2$  均为  $G$  的分量,  $\theta$  为力控末端执行器轴线与竖直方向的夹角。

重力补偿后的实际打磨力为

$$F_m = F_c - G_2 = F_c - G \cos \theta \quad (9)$$

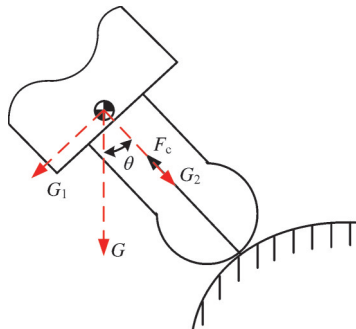


图2 重力补偿示意图

Fig.2 Gravity compensation diagram

基于位置的阻抗模型为

$$M_d(\ddot{X}_c - \ddot{X}_d) + B_d(\dot{X}_c - \dot{X}_d) + K_d(X_c - X_d) = F_d - F_m \quad (10)$$

式中:  $M_d$ 、 $B_d$ 、 $K_d$  分别为惯性系数、阻尼系数和刚度系数;  $X_c$ 、 $\dot{X}_c$ 、 $\ddot{X}_c$  分别为机器人力控末端执行器打磨工具的实际位置、速度和加速度;  $X_d$ 、 $\dot{X}_d$ 、 $\ddot{X}_d$  分别为机器人力控末端执行器打磨工具的期望位置、速度和加速度;  $F_d$  为期望打磨力。

对式(10)进行拉普拉斯变换, 得

$$\Delta X = \frac{e_F}{M_d s^2 + B_d s + K_d} = \frac{F_d - F_m}{M_d s^2 + B_d s + K_d} \quad (11)$$

式中:  $\Delta X$  为位置变化量;  $e_F$  为力误差。

阻抗控制中, 一般将环境模型简化为线性弹簧系统:

$$F_c = \begin{cases} K_e(X_c - X_e) & X_c \geq X_e \\ 0 & X_c < X_e \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $F_c$  为理论接触力(实际工况中, 由力传感器测得, 即用实际打磨力  $F_m$  表征);  $K_e$  为环境刚度。

打磨工具与工件表面接触时,  $X_c \geq X_e$ 。由式(12)可知, 此时打磨工具的实际位置为

$$X_c = F_c / K_e + X_e \quad (13)$$

机器人的打磨期望位置  $X_d$  一般为恒定值, 则有  $\ddot{X}_d = \dot{X}_d = 0$ 。将式(11)、式(13)代入式(10), 得到力误差的微分方程:

$$M_d \ddot{e}_F + B_d \dot{e}_F + (K_d + K_e) e_F = K_d F_d - K_d K_e (X_d - X_e) \quad (14)$$

期望打磨力  $F_d$  为恒定值时,  $\ddot{F}_d = \dot{F}_d = 0$ 。由式(14)得到系统的稳态力误差

$$e_{F_{\infty}} = -\frac{K_d K_e}{K_d + K_e} \left( \frac{F_d}{K_e} + X_e - X_d \right) \quad (15)$$

由式(15)可看出, 使系统稳态力误差  $e_{F_{\infty}} = 0$  的条件为

$$X_d = F_d / K_e + X_e \quad (16)$$

机器人打磨作业通常是在未知环境或少信息环境下进行的, 所接触的环境具有不确定性, 环境刚度  $K_e$  和环境位置  $X_e$  是实时变化的, 且环境刚度较大, 微小的位置偏差就可能产生很大的接触力波动, 导致机器人打磨恒力控制不稳定<sup>[29]</sup>。本文通过实时估计环境参数  $K_e$  和  $X_e$  来提高未知环境下机器人打磨恒力控制的稳定性。

对环境刚度  $K_e$  和环境位置  $X_e$  进行估计, 将式(16)改写为

$$X_d = F_d / \hat{K}_e + \hat{X}_e \quad (17)$$

式中:  $\hat{K}_e$  为环境刚度估计值;  $\hat{X}_e$  为环境位置估计值。

对式(12)进行修正, 则估计的理论接触力为

$$\hat{F}_c = \hat{K}_e (X_c - \hat{X}_e) \quad (18)$$

力的估计误差为

$$e_F = \hat{F}_c - F_c = (\hat{K}_e - K_e) X_c - (\hat{K}_e \hat{X}_e - K_e X_e) \quad (19)$$

令  $\varphi_1 = \hat{K}_e - K_e, \varphi_2 = \hat{K}_e \hat{X}_e - K_e X_e, \varphi = [\varphi_1 \ \varphi_2]^T$ , 则有

$$\varphi_F = [X_c \ -1] \varphi \quad (20)$$

根据力估计误差  $\varphi_F$  实时估计环境参数  $\hat{K}_e, \hat{X}_e$ , 时间  $t \rightarrow \infty$  时,  $\varphi_F \rightarrow 0$ 。

假设系统稳定, 采用 Lyapunov 第二方法推导出环境参数估计规则。选取 Lyapunov 函数为

$$V = \varphi^T R \varphi \quad (21)$$

式中:  $R$  为正定对称矩阵。

对式(21)求导, 并假设  $\dot{\varphi} = -\varphi_F R^{-1} \begin{bmatrix} X_c \\ -1 \end{bmatrix}$ , 得

$$\dot{V} = 2\varphi^T R \dot{\varphi} = -2\varphi^T \begin{bmatrix} X_c \\ -1 \end{bmatrix} \varphi_F = -2\varphi_F^2 < 0 \quad (22)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论, Lyapunov 函数正定且其导数小于 0 时, 则所描述的系统是渐进稳定的。根据上述假设及式(20)可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{K}}_e &= -\xi_1 X_c (\hat{F}_e - F_m) \\ \dot{\hat{X}}_e &= (\xi_1 X_c \hat{X}_e + \xi_2) (\hat{F}_e - F_m) / \hat{K}_e \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中:  $\xi_1, \xi_2$  为调整因子。

则由式(17)、式(18)、式(23)可得环境参数估计规则:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{K}}_e(t) &= \hat{K}_e(0) - \xi_1 \int_0^t X_c (\hat{F}_e - F_m) dt \\ \dot{\hat{X}}_e(t) &= \hat{X}_e(0) + \xi_2 \int_0^t \frac{\hat{F}_e - F_m}{\hat{K}_e} (\xi_1 X_c \hat{X}_e + 1) dt \\ \hat{F}_e &= \hat{K}_e (X_c - \hat{X}_e) \\ X_d &= F_d / \hat{K}_e + \hat{X}_e \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

根据式(24)可实时估计环境参数, 并根据环境参数的估计值生成期望位置, 以实时修正参考位置, 使打磨工具的实际位置跟踪实时修正后的参考位置, 从而减小打磨工具接触工件表面时的冲击与打磨力超调量, 在未知环境下实现打磨工具与工件表面的柔顺接触, 但上升时间和调节时间可能会变长。

### 1.3 自适应变阻抗控制

机器人打磨环境参数不确定或未知时, 采用传统的阻抗控制方法控制恒力易导致控制系统不稳定<sup>[30]</sup>。模型参考自适应控制(model reference adaptive control, MRAC)通过自适应律实时调节控制器参数, 使实际系统与参考模型的性能保持一致<sup>[31-33]</sup>。本文结合传统阻抗控制与MRAC研究自适应变阻抗控制, 即通过位置补偿量  $\delta x$  间接调整阻抗参数提高控制系统的自适应性和稳定性。

加入  $\delta x$  后, 自适应变阻抗控制器输出的位置修正量为

$$\Delta X' = \Delta X + \delta x \quad (25)$$

控制系统的参考位置为

$$X_r = X_d + \Delta X' \quad (26)$$

机器人打磨工具与工件表面接触后, 根据力传感器采集的反馈力, 可得

$$\delta x = g(t) + p(t)e_{\hat{F}}(t) + d(t)\dot{e}_{\hat{F}}(t) \quad (27)$$

式中:  $e_{\hat{F}}(t), \dot{e}_{\hat{F}}(t)$  分别为期望打磨力与估计理论接触力的估计力误差及其一阶导数;  $g(t)$  为与  $e_{\hat{F}}(t), \dot{e}_{\hat{F}}(t)$  相关的时变量项;  $p(t)$  为比例反馈时变系数;  $d(t)$  为微分反馈时变系数。

将式(26)、式(27)代入式(14), 得到新的力误差方程

$$\ddot{e}_F + a_p(t)\dot{e}_F + b_p(t)e_F = w_p(t) \quad (28)$$

$$a_p(t) = \frac{B_d + K_d \hat{K}_e d(t)}{M_d}$$

$$b_p(t) = \frac{K_d + \hat{K}_e + K_d \hat{K}_e p(t)}{M_d}$$

$$w_p(t) = K_d [\hat{K}_e (X_c - X_d - \Delta X - g(t)) + F_d] / M_d$$

采用 MRAC 方法, 将参考模型设计为理想的二阶系统:

$$\ddot{e}_m + a_m \dot{e}_m + b_m e_m = 0 \quad (29)$$

式中:  $e_m, \dot{e}_m, \ddot{e}_m$  分别为参考力误差及其一阶和二阶导数;  $a_m, b_m$  为相应系数。

参考模型与控制系统实际的力误差模型的误差方程为

$$\begin{aligned} \dot{E}_e &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_m & -a_m \end{bmatrix} E_e + \\ & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_p(t) - b_m & a_p(t) - a_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\hat{F}} \\ \dot{e}_{\hat{F}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -w_p(t) \end{bmatrix} \\ E_e &= \begin{bmatrix} e_m - e_{\hat{F}} \\ \dot{e}_m - \dot{e}_{\hat{F}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (30)$$

式中:  $E_e$  为误差状态方程的状态矩阵。

根据 Lyapunov 稳定性理论, 构造二次型形式的能量函数

$$V(E_e, t) = (E_e^T P E_e + Z^T R Z) / 2 = [E_e^T P E_e + \beta_0 (b_p(t) - b_m)^2 + \beta_1 (a_p(t) - a_m) + \beta_2 w_p^2(t)] / 2 \quad (31)$$

$$Z = \begin{bmatrix} b_p(t) - b_m \\ a_p(t) - a_m \\ w_p(t) \end{bmatrix}, R = \text{diag}(\beta_0, \beta_1, \beta_2), P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{bmatrix}$$

$$\beta_1, \beta_2, \beta_3 > 0$$

式中:  $P$  为非奇异正定矩阵。

式(31)定义的能量函数具有正定性, 根据 Lyapunov 稳定性理论, 存在一个正定的实对称方阵  $Q$  使  $A_m^T P + P A_m = -Q$  成立, 其中,  $A_m$  为系统矩阵。对式(31)求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(E_e, t) &= -E_e^T Q E_e / 2 + (b_p(t) - b_m)(\chi e_{\hat{F}} + \beta_0 \dot{b}_p(t)) + \\ & (a_p(t) - a_m)(\chi \dot{e}_{\hat{F}} + \beta_1 \dot{a}_p(t)) + (\beta_2 \dot{w}_p(t) - \chi) w_p(t) \end{aligned} \quad (32)$$

$$\chi = p_2 (e_m - e_{\hat{F}}) + p_3 (\dot{e}_m - \dot{e}_{\hat{F}})$$

由式(32)可看出,  $(b_p(t)-b_m)(\chi e_{\dot{f}} + \beta_0 \dot{b}_p(t)), (a_p(t)-a_m)(\chi e_{\dot{f}} + \beta_1 \dot{a}_p(t)), (\beta_2 \dot{w}_p(t) - \chi)w_p(t)$  为零时,  $\dot{V}(E_c, t)$  为负定, 系统达到渐进稳定状态, 于是有

$$\left. \begin{aligned} \dot{a}_p(t) &= -\chi e_{\dot{f}}/\beta_1 \\ \dot{b}_p(t) &= -\chi e_{\dot{f}}/\beta_0 \\ \dot{w}_p(t) &= \chi/\beta_2 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

令参考力误差  $e_m$  及其导数为零, 可逆向推导出  $\chi, g(t), p(t)$  和  $d(t)$  的调整规则。

实际应用中, 力的采集值需进行滤波处理后才能作为控制器的输入, 且通常不会将力的微分作为控制器的输入<sup>[34]</sup>。环境模型一般简化为线性弹簧系统  $e = F_d - F_c = -K_c(X_c - X_e)$ , 进一步可得  $\dot{e} = -K_c \dot{X}_c$ 。于是, 可用位置的微分来代替力的微分。为确保系统在未建模环境动态情况下的鲁棒性, 引入自适应增益  $\sigma$ , 得到调整规则:

$$\left. \begin{aligned} \chi &= -\lambda_p e_{\dot{f}}(t) + \lambda_v \dot{X}(t) \\ g(t) &= g_0 - \mu_1 \int_0^t \chi dt - \sigma_1 \int_0^t g(t) dt \\ p(t) &= p_0 - \mu_2 \int_0^t \chi e_{\dot{f}}(t) dt - \sigma_2 \int_0^t p(t) dt \\ d(t) &= d_0 - \mu_3 \int_0^t \chi \dot{X}(t) dt - \sigma_3 \int_0^t d(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

式中:  $\lambda_p, \lambda_v$  为加权因子 ( $\lambda_p, \lambda_v > 0$ );  $g_0, p_0, d_0$  分别为  $g(t), p(t), d(t)$  的初始值;  $\mu_1 \sim \mu_3$  为积分自适应增益 ( $\mu_1, \mu_2, \mu_3 > 0$ );  $\sigma_1 \sim \sigma_3$  为自适应增益 ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \geq 0$ )。

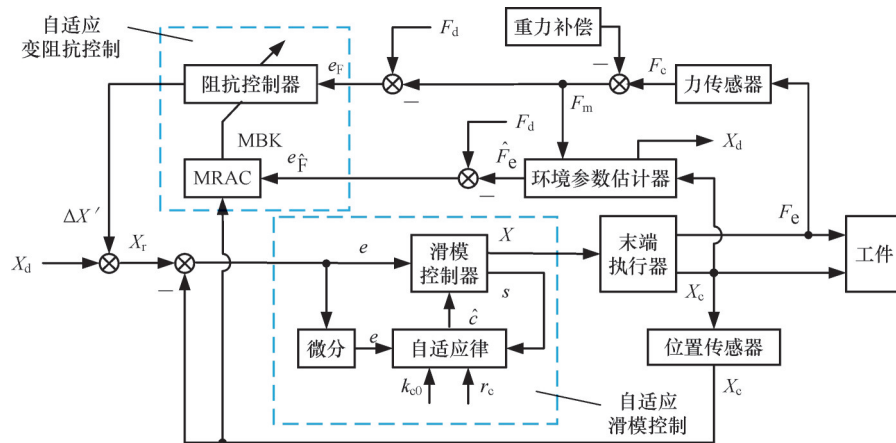


图3 未知环境参数实时估计的机器人自适应变阻抗恒力控制方法控制框图

Fig.3 Control block diagram of robotic adaptive variable impedance constant force control method with real-time estimation of unknown environmental parameters

### 2.1 机器人打磨系统虚拟样机构建

Adams 构建的机器人打磨系统虚拟样机主要由三自由度(2R1T)力控末端执行器、手腕偏置式六自由度磨抛机器人、工件组成。MATLAB/Simulink 仿真控制虚拟样机的输入(音圈电机控制位移量、机器人关节角度)与输出( $X_c$

将式(34)代入式(27)即可得到位置补偿量, 再根据式(25)可得到自适应变阻抗控制器输出的位置修正量, 从而间接调整阻抗参数。

### 1.4 机器人自适应恒力控制方法

为提高未知环境下机器人打磨自适应恒力控制的能力, 本文提出一种未知环境参数实时估计的机器人自适应变阻抗恒力控制方法。如图3所示, 内环控制采用自适应滑模控制器, 使实际位置跟踪参考位置, 提高抗干扰能力; 外环控制采用环境参数估计器与自适应变阻抗控制器, 用于环境参数估计, 并通过位置补偿量间接实时调整阻抗参数; 内外环控制构成闭环控制回路, 通过环境参数估计、自适应调节阻抗参数使机器人主动适应未知环境下的打磨工况, 实现机器人打磨作业的自适应恒力控制。

## 2 机器人打磨仿真实验

首先, 将所提出的未知环境参数实时估计的机器人自适应变阻抗恒力控制方法设计为一种机器人自适应控制器。其次, 通过所构建的机器人打磨系统虚拟样机联合仿真控制将机器人自适应控制器作用到机器人打磨系统。最后, 通过模糊阻抗控制方法和未知环境参数实时估计的机器人自适应变阻抗恒力控制方法进行仿真对比, 验证所提出控制方法的有效性。

和  $F_c$ )。

Simulink 仿真模块图见图4。设置阻抗参数初值  $M_d = 0.8 \text{ kg}, B_d = 100 \text{ N} \cdot \text{s}, K_d = 100 \text{ N/m}$ ; 自适应滑模控制器参数  $\epsilon = 10.8, h = 12.2, r_c = 0.2, k_{c0} = 3.5$ ; 环境参数估计器参数  $\xi_1 = 0.40, \xi_2 = 0.78$ ; 自适应变阻抗控制器参数  $\lambda_p = 0.5, \lambda_v = 0.1, \mu_1 =$

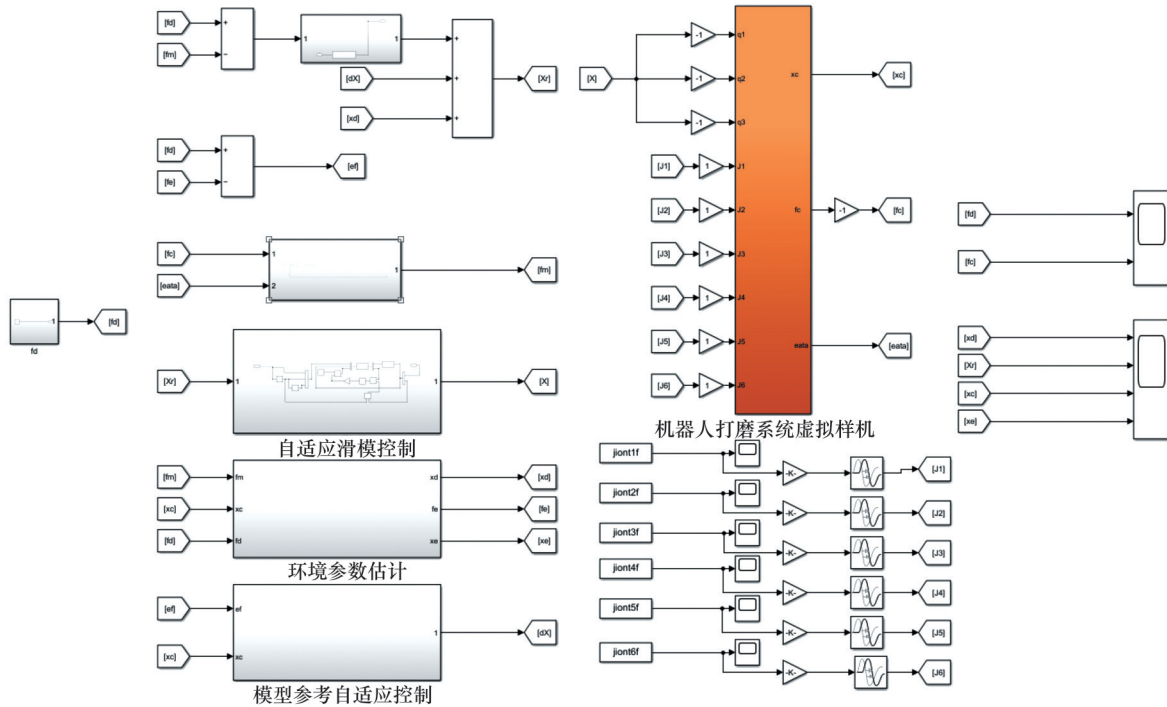


图5 Simulink 仿真模块图

Fig.5 Simulink simulation block diagram

2.1,  $\mu_2=1.2$ ,  $\mu_3=2.0$ ,  $\sigma_1=2.0$ ,  $\sigma_2=0.8$ ,  $\sigma_3=1.4$ ,  $g_0=p_0=d_0=0$ 。

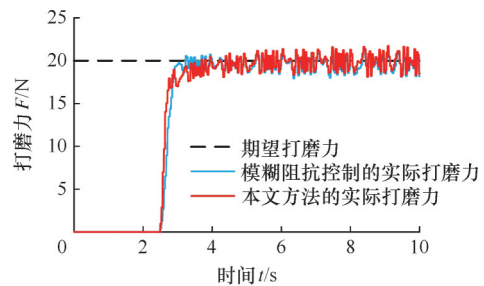
机器人打磨作业是在未知环境下进行的,环境刚度  $K_e$  和环境位置  $X_e$  未知。环境刚度较大,微小的位置偏差可能产生较大的接触力波动,进而导致机器人打磨恒力控制不稳定。为验证环境参数不确定或未知环境工况下本文方法具有良好的自适应性,设置  $K_e$  的估计初值为  $5 \text{ MN/m}$ ,  $X_e$  的估计初值为  $0$ ,并在机器人自适应控制器控制参数不变的情况下,通过仿真打磨刚度  $100$ 、 $150$ 、 $200 \text{ MN/m}$  的工件进行验证。

### 2.2 恒定期望打磨力仿真分析

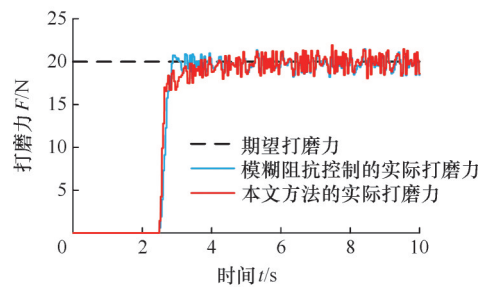
恒定期望打磨力为  $20 \text{ N}$  时,打磨力的跟踪曲线如图5所示。由图5可知,在期望打磨力不变的情况下,随着刚度的增大,模糊阻抗控制方法打磨力的超调量不断增大,易导致出现过打磨现象;本文方法的打磨力没有超调,可较为柔顺地接触工件表面,有效减小打磨工具对工件表面的冲击,避免出现出现过打磨,但上升时间和调节时间较长。

为比较本文方法与模糊阻抗控制方法,将期望打磨力设置为  $30 \text{ N}$ 。由图6可知,期望打磨力不变的情况下,随着刚度的增大,模糊阻抗控制方法的打磨力的超调量不断增大且更明显;本文方法的打磨力略有超调,且均能柔顺接触工件表面。

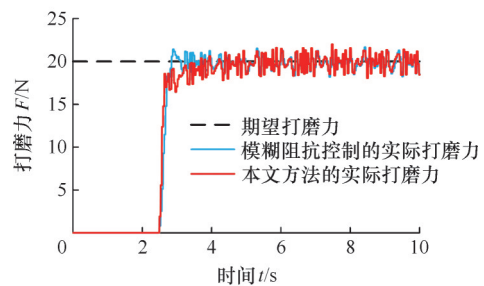
不同恒定期望打磨力工况下,模糊阻抗控制



(a) 刚度  $100 \text{ MN/m}$



(b) 刚度  $150 \text{ MN/m}$



(c) 刚度  $200 \text{ MN/m}$

图5 期望打磨力  $20 \text{ N}$  的力跟踪曲线

Fig.5 Force tracking curves with expected grinding force is as  $20 \text{ N}$

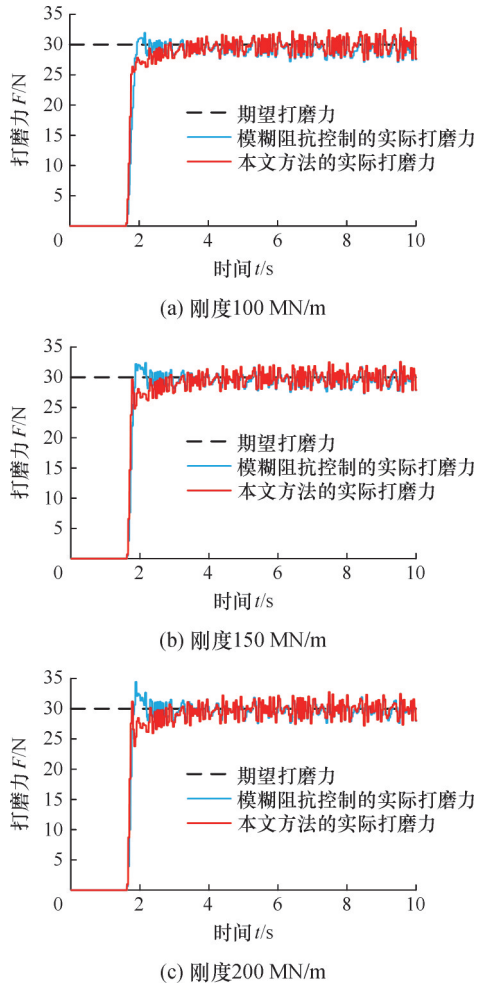


图6 期望打磨力为30 N不同刚度下的力跟踪曲线  
Fig.6 Force tracking curves with expected grinding force is as 30 N

方法和本文方法的仿真实验结果如表1所示,其中,  $t_r$  为上升时间,  $t_s$  为调整时间;  $\sigma_F$  为打磨工具接触工件表面的力超调量;进入稳定打磨阶段时,  $F_{max}$ 、 $F_{min}$ 、 $\bar{F}$ 、 $E_F$ 、 $F_b$  分别为打磨力的最大值、最小值、均值、平均误差和力波动量。打磨不同刚度的工件时,模糊阻抗控制方法的力超调明显且波动量较大;本文方法的力超调和力波动量均较小。由图5、图6、表1可知,期望打磨力30 N、打磨刚度200 MN/m的工件时,模糊阻抗控制方法的上升时间为0.22 s,打磨工具接触工件表面时的力超调量为14.81%,调整0.66 s后进入稳定阶段,对应力波动量为 $\pm 2.74$  N;本文方法的上升时间为0.13 s,打磨工具接触工件表面时的力超调量为3.93%,调整1.09 s后进入稳定阶段,对应力波动量为 $\pm 1.89$  N。仿真分析结果表明,本文方法能显著减小力超调量和力波动量,较好地实现未知环境下机器人自适应恒力打磨作业。

### 2.3 动态期望打磨力仿真分析

将打磨工件刚度设为150 MN/m,期望打磨

表1 不同恒定期望打磨力下机器人打磨力仿真实验结果

Tab.1 Simulation experiment results of robotic grinding force under different constant expected grinding forces

	期望打磨力 20 N, 环境刚度 150 MN/m		期望打磨力 30 N, 环境刚度 200 MN/m	
	模糊阻抗控制	本文方法	模糊阻抗控制	本文方法
$F_{max}/N$	21.49	21.41	32.49	31.89
$F_{min}/N$	18.19	18.54	27.26	28.17
$\bar{F}/N$	19.77	19.97	29.80	29.87
$E_F/N$	0.23	0.03	0.20	0.13
$F_b/N$	$\pm 1.81$	$\pm 1.46$	$\pm 2.74$	$\pm 1.89$
$\sigma_F/\%$	3.76	0	14.81	3.93
$t_r/s$	0.40	1.21	0.22	0.13
$t_s/s$	0.74	1.27	0.66	1.09

力设为斜坡信号、阶跃信号和正/余弦信号,其力跟踪曲线如图7~图9所示,可以看出,模糊阻抗控制方法的打磨力在跟踪响应过程中均出现力超调现象,且期望打磨力初值较大时,力超调更显著;本文方法的打磨力均能很好地跟踪动态期望

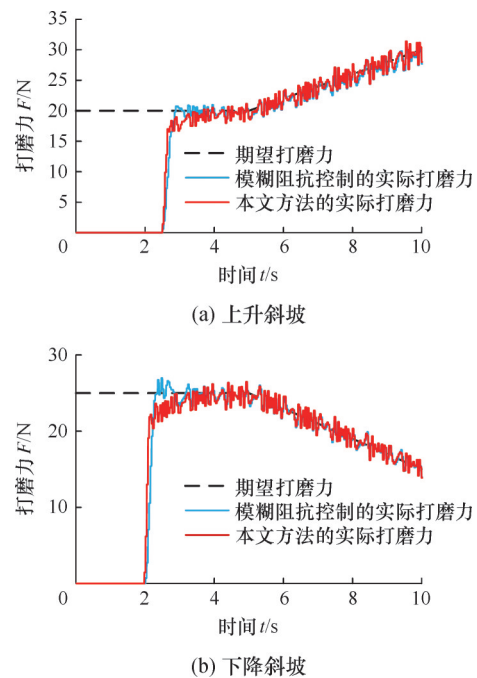


图7 斜坡信号的动态期望打磨力跟踪曲线  
Fig.7 Dynamic expected grinding force tracking curves of slope signal

打磨力,且没有出现力超调现象,但上升时间、调节时间较长。

在不同信号下,模糊阻抗控制方法和本文方法的仿真实验结果如表2所示,模糊阻抗控制方法的力超调量均为7.93%;本文方法不存在力超调量,且力波动量显著减小,但上升时间和调节时间较长。

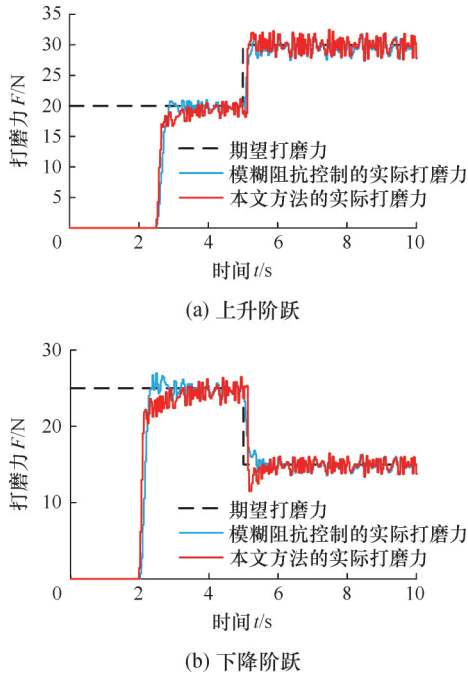


图8 阶跃信号的动态期望打磨力跟踪曲线

Fig.8 Dynamic expected grinding force tracking curves of step signal

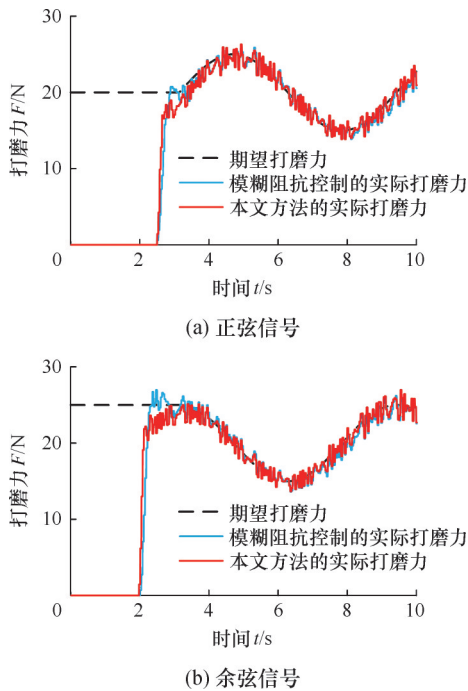


图9 正/余弦信号的动态期望打磨力跟踪曲线

Fig.9 Dynamic expected grinding force tracking curves of sine/cosine signal

2.4 位置仿真分析

为验证该环境参数估计器设计的有效性,本文通过不同期望打磨力打磨同一刚度工件进行仿真验证。工件刚度 150 MN/m、不同期望打磨力的位置跟踪曲线如图 10 所示。由图 11a、图 11b 可以看出,参考位置实时估计修正下,打磨工具的实际位置均能有效跟踪参考位置。由图 11c~图

表2 不同信号动态期望打磨力下机器人打磨力仿真实验结果

Tab.2 Simulation experiment results of robotic grinding force under different signal dynamic expected grinding force

打磨工况	控制方法	$E_f/N$	$F_b/N$	$\sigma_f/\%$	$t_r/s$	$t_s/s$
斜坡信号动态期望打磨力(下降斜坡)	模糊阻抗控制	0.08	$\pm 1.98$	7.93	0.35	1.46
	本文方法	0.05	$\pm 1.87$	0	1.23	1.51
阶跃信号动态期望打磨力(下降阶跃)	模糊阻抗控制	0.18	$\pm 2.06$	7.93	0.35	1.45
	本文方法	0.13	$\pm 1.87$	0	1.24	1.50
余弦信号动态期望打磨力	模糊阻抗控制	0.16	$\pm 1.98$	7.93	0.35	1.47
	本文方法	0.15	$\pm 1.64$	0	1.25	1.54

11e 可以看出,参考位置实时估计修正下,打磨工具的实际位置均能有效动态跟踪参考位置;达到稳定状态后,期望位置、参考位置、实际位置趋同,且与环境位置始终保持一定偏差值,符合胡克定律理论公式  $f=k\Delta x$ ,验证了所设计环境参数估计器的有效性。

在刚度一定、期望打磨力不同工况下,期望打磨力 20N 的位置平均误差为  $5.66 \times 10^{-5}$  mm,期望打磨力 30N 的位置平均误差为  $4.77 \times 10^{-5}$  mm,斜坡信号动态期望打磨力(上升斜坡)的位置平均误差为  $4.15 \times 10^{-5}$  mm,阶跃信号动态期望打磨力(上升阶跃)的位置平均误差为  $3.18 \times 10^{-4}$  mm,正弦信号动态期望打磨力的位置平均误差均在  $3.87 \times 10^{-5}$  mm 左右。由图 9a 可以看出,在期望打磨力阶跃的瞬间,参考位置略有超调,致使其平均误差偏大。由图 11 可以看出,在环境参数估计下,自适应滑模控制器均能以较小的位置跟踪误差有效控制位置,进一步验证了所设计环境参数估计器的有效性和自适应滑模控制器的良好控制性能。

上述仿真实验验证了本文方法的有效性和适用性。未知环境下,用恒力、动态期望打磨力打磨不同刚度的工件时,本文方法均能实现有效的跟踪控制,提高了机器人打磨的自适应调节能力,满足未知环境下、打磨初始阶段不允许力超调的自适应恒力控制需求。

3 机器人打磨实验

3.1 机器人实验平台

手腕偏置式六自由度磨抛机器人、三自由度(2R1T)力控末端执行器、载物台、工件构成的机器人实验平台如图 11a 所示。采用倍福 CX-

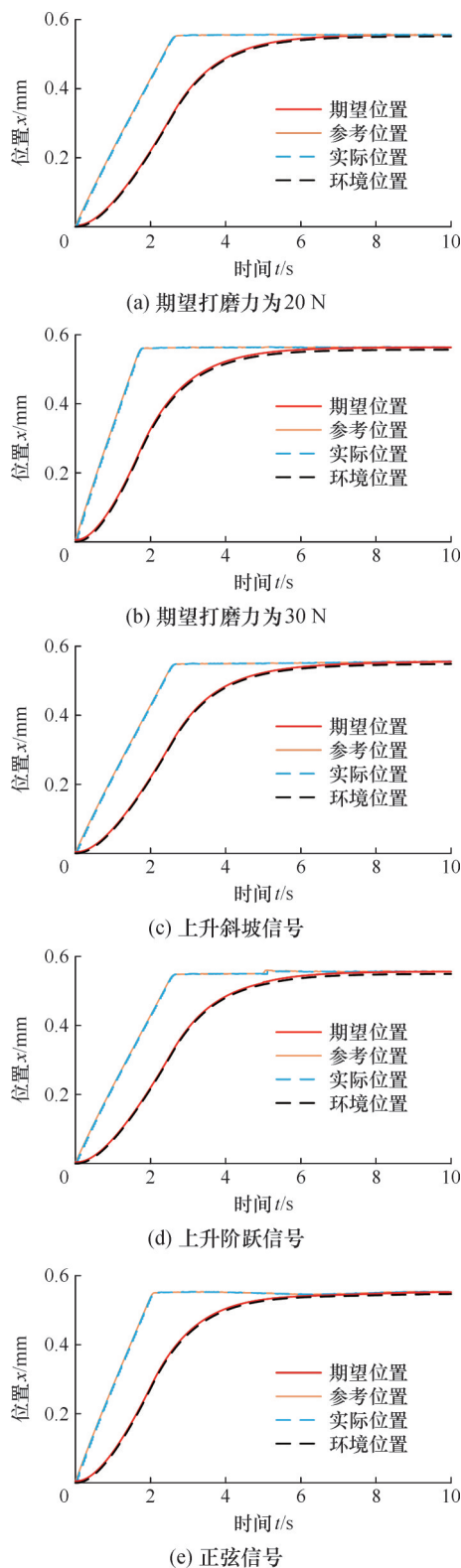


图10 不同期望打磨力下各位置跟踪曲线

Fig.10 The tracking curves of each position under different expected grinding forces

260354嵌入式控制器作为实验平台控制设备,上位机控制器采用基于PC的控制软件 Twin-CAT3,上位机控制器与机器人控制柜和传感器之间采用EtherCAT通信。

手腕偏置式六自由度磨抛机器人的侧端偏置

手腕关节的回转范围可达 $0^{\circ}\sim 720^{\circ}$ ,可磨抛加工曲率变化较大的工件表面<sup>[35]</sup>。如图11b所示,三自由度力控末端执行器的3条相同支链对称分布;每条支链均由音圈电机(voice coil motor, VCM)驱动的垂直主动棱柱关节、水平柔性棱柱关节、被动球关节组成。采用3-PPS并联机构实现 $2R1T(\theta_x-\theta_y-z)$ 的三自由度无奇异运动(工作空间为 $\pm 12^{\circ}\times \pm 12^{\circ}\times 25\text{ mm}$ )。机器人磨抛姿态/力混合控制<sup>[36]</sup>表明该三自由度力控末端执行器具有良好的姿态控制准确性与力跟踪性能。



Fig.11 Robotic experiment platform

### 3.2 机器人打磨实验对比

在机器人实验平台开展机器人打磨实验,如图12所示。期望打磨力设为5、10、20、30、40 N,打磨对象为铝板和铁板。

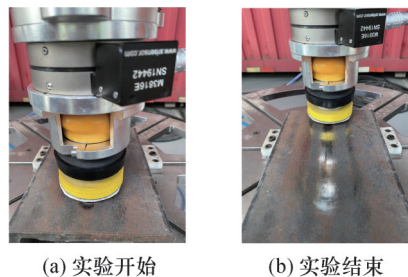


图12 机器人打磨实验

Fig.12 Robotic grinding experiment

期望打磨力为20 N时,实际打磨力的跟踪曲线如图13所示。由图13可知,模糊阻抗控制方法出现打磨力超调(图13a的5.1 s附近、图13b的

4.6 s附近),易导致过打磨。未接触阶段中,实际打磨力有气动马达旋转振动导致的微小波动。与之对比,本文方法的打磨力不存在超调量,可柔顺接触工件表面进行机器人打磨作业,避免出现过打磨,但上升时间和调节时间较长。

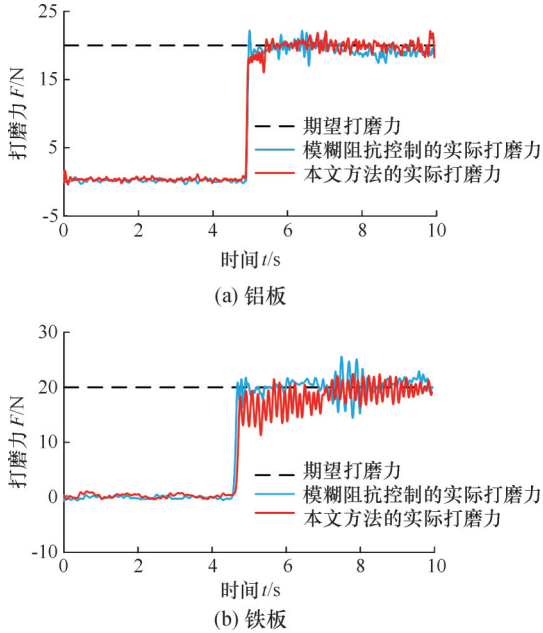


图13 期望打磨力为 20 N 的力跟踪曲线  
Fig.13 Force tracking curves with expected grinding force is as 20 N

期望打磨力为 30 N 的力跟踪曲线如图 14 所示。由图 14 可知,在期望打磨力不变的情况下,模糊阻抗控制方法的实际打磨力均有较大的超调量(图 14a 的 4.3 s 附近、图 14b 的 4.0 s 附近);工件刚度越大,对应超调量越大,自适应能力变差;接触

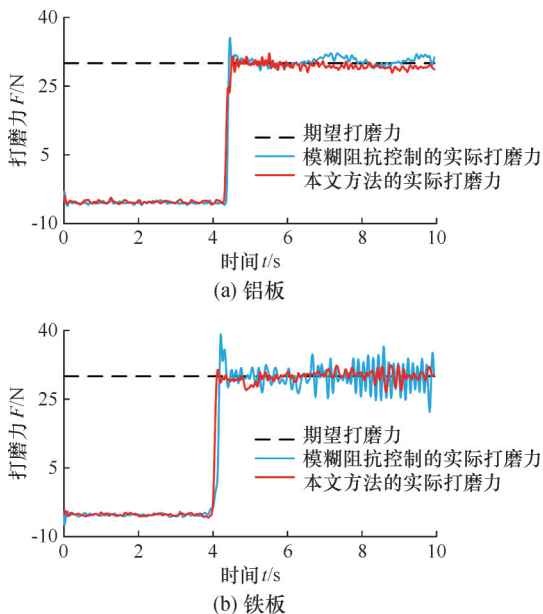


图14 期望打磨力为 30 N 的力跟踪曲线  
Fig.14 Force tracking curves with expected grinding force is as 30 N

后的实际打磨力波动较大,可能导致打磨作业不稳定。本文方法的实际打磨力略有超调,具有较好的自适应能力;接触后的实际打磨力波动较小,在未知环境下机器人较为柔顺地接触到工件表面并进行稳定的打磨作业,但上升时间和调节时间较长。对比图 13b、图 14b 可以看出,打磨铁板时,期望打磨力 20 N 比期望打磨力 30 N 的实际打磨力波动大。出现该现象的主要原因是,前者打磨的铁板是毛坯状态,有少量零星毛刺和铁锈等,属于第一次打磨,后者打磨的铁板表面较为平整,属于第二次打磨。对比模糊阻抗控制方法和本文方法时,相同期望打磨力的初始条件和打磨工况一致,不同期望打磨力的初始条件不一致且加工工况不同。

为验证模糊阻抗控制方法和本文方法的有效性,设定期望打磨力为 5、10、40 N,分别开展铝板和铁板打磨实验,对应的实际打磨力跟踪曲线如图 15~图 17 所示。由图 15~图 17 可知,随着期望打磨力的增大,模糊阻抗控制方法的实际打磨力超调越来越明显,且期望打磨力 40 N 的超调量最大;本文方法只在期望打磨力 40 N 时出现实际打磨力超调现象,但超调量小于模糊阻抗控制方法在相同期望打磨力时的超调量。

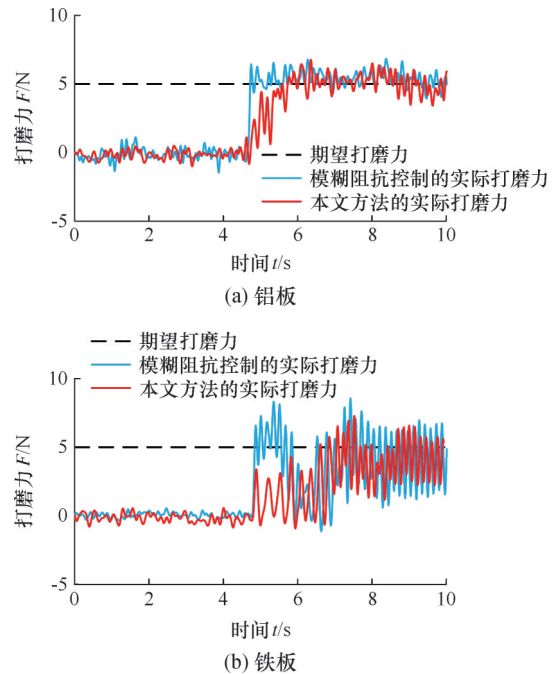
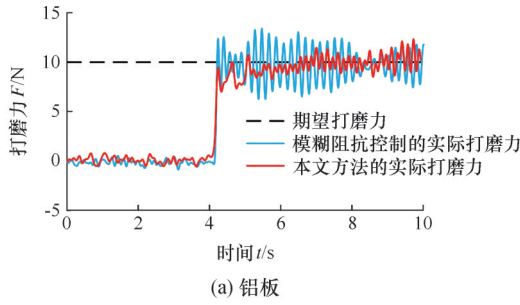
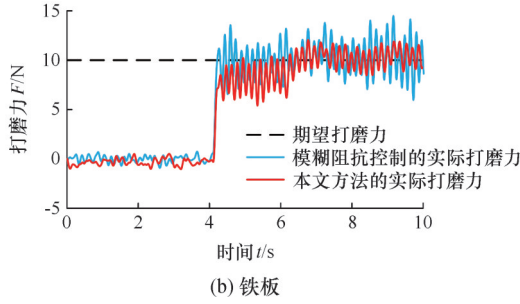


图15 期望打磨力为 5 N 的力跟踪曲线  
Fig.15 Force tracking curves with expected grinding force is as 5 N

在不同期望打磨力工况下,模糊阻抗控制方法和本文方法的实验结果如表 3 所示,对应的实验打磨效果如图 18 所示。由表 3 可知,期望打磨力 20 N 打磨铝板时,模糊阻抗控制方法的力超调



(a) 铝板

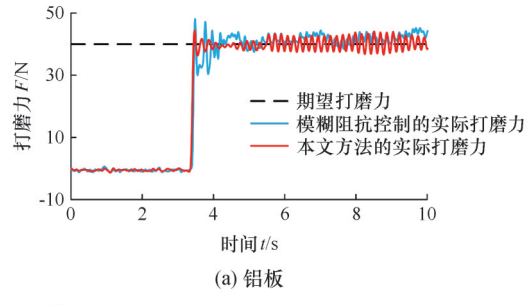


(b) 铁板

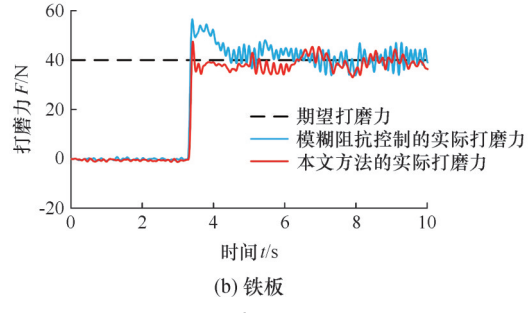
图16 期望打磨力为10 N的力跟踪曲线

Fig.16 Force tracking curves with expected grinding force is as 10 N

量为11.0%，进入稳定阶段后的力波动量为±2.99 N；本文方法未发生超调，进入稳定阶段后的力波动量为±2.13 N。期望打磨力30 N打磨铁板时，模糊阻抗控制方法的力超调量为30.63%，进入稳定阶段后的力波动量为±7.80



(a) 铝板



(b) 铁板

图17 期望打磨力为40 N的力跟踪曲线

Fig.17 Force tracking curves with expected grinding force is as 40 N

N；本文方法的力超调量为4.67%，进入稳定阶段后的力波动量为±3.42N。期望打磨力40 N打磨铝板和铁板时，模糊阻抗控制方法的力超调量分别为20.22%和41.25%，本文方法的力超调量为10.75%和18.50%。

表3 不同期望打磨力下机器人打磨力实验结果

Tab.4 Experimental results of robotic grinding force under different expected grinding forces

打磨工况	控制方法	$F_{max}/N$	$F_{min}/N$	$\bar{F}/N$	$E_f/N$	$F_b/N$	$\sigma_f/\%$	$t_r/s$	$t_s/s$
期望打磨力20 N, 铝板	模糊阻抗控制	22.17	17.01	19.37	0.63	±2.99	11.0	0.08	0.98
	本文方法	22.13	18.23	20.02	0.02	±2.13	0	0.56	0.66
期望打磨力30 N, 铁板	模糊阻抗控制	36.52	22.20	29.79	0.21	±7.80	30.63	0.32	0.82
	本文方法	32.43	26.58	30.01	0.01	±3.42	4.67	0.14	0.26
期望打磨力40 N, 铝板	模糊阻抗控制	45.23	38.43	41.66	1.66	±5.23	20.22	0.10	1.78
	本文方法	44.10	36.64	40.17	0.17	±4.10	10.75	0.11	1.52
期望打磨力40 N, 铁板	模糊阻抗控制	48.99	33.84	41.33	1.33	±8.99	41.25	0.06	1.97
	本文方法	45.36	33.13	38.96	1.04	±6.87	18.50	0.10	1.91

由图18可知，不同期望打磨力打磨不同材料工件时，模糊阻抗控制方法的工件表面均出现不同程度的过打磨现象(红色线框为打磨工具接触位置)，而本文方法的工件表面没出现明显的过打磨，且打磨质量较高。在打磨后工件表面均匀取点测量工件表面粗糙度，测量结果如图19所示。由图19a、图19c可知，期望打磨力20 N、40 N下，模糊阻抗控制方法的铝板表面粗糙度均值分别为1.044 μm和1.367 μm，本文方法的铝板表面粗糙度均值分别为0.903 μm和1.217 μm。由图19b、图19d可知，期望打磨力30 N和40 N下，模糊阻抗控制方法的铁板表面粗糙度均值分别为1.451

μm和1.751 μm，本文方法的铁板表面粗糙度均值分别为0.999 μm和1.392 μm。

上述实验对比表明，相比于模糊阻抗控制方法，本文方法能显著减小打磨工具接触工件表面的力超调量和稳定阶段后的力波动量，可在未知环境下较好实现机器人自适应恒力打磨作业。

#### 4 结论

1)将自适应滑模控制作为内环控制，将环境参数估计与自适应变阻抗控制作为外环控制，通过内外环控制构成闭环控制回路，可使机器人主动适应未知环境下的打磨工况，实现机器人打磨

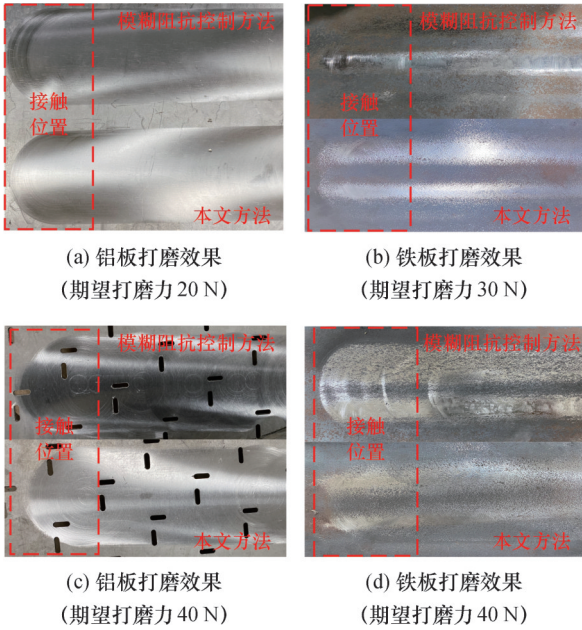


图 18 实验打磨效果

Fig.18 Experimental grinding effect

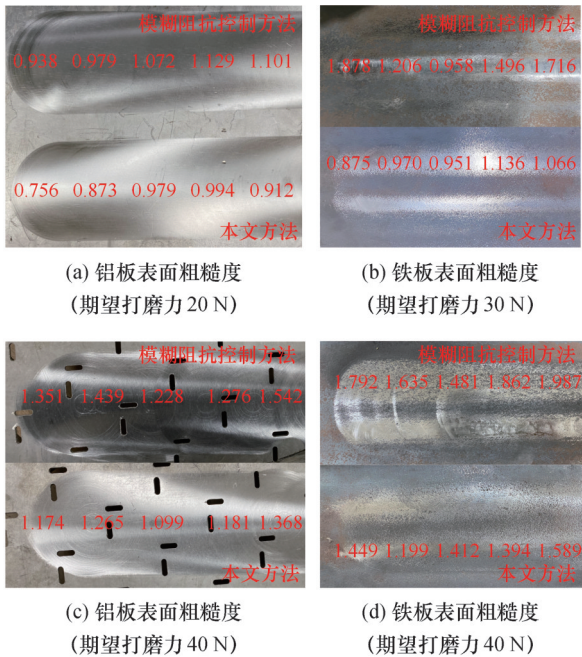


图 19 工件表面粗糙度测量结果(μm)

Fig.19 Results of roughness measurements for workpiece surface(μm)

作业的自适应恒力控制。

2)采用 Adams 和 MATLAB/Simulink 分别构建了机器人打磨系统虚拟样机和仿真控制系统,通过联合仿真实验开展了自适应恒力控制仿真。仿真结果表明,相比于模糊阻抗控制方法,本文方法在无力超调或较小力超调量的情况下具有良好的跟踪能力,有效减小了未知环境或少信息环境下打磨工具对工件表面的冲击,且力波动量也显著减小,在未知环境下实现了机器人打磨自适应恒力控制,但上升时间和调节时间较长。斜

坡、阶跃和正/余弦信号动态期望打磨力仿真验证了本文方法的有效性。

3)搭建机器人实验平台,在未知环境下开展了机器人打磨铝板和铁板的实验。采用期望打磨力打磨 20 N 铝板和 30 N 铁板的工件时,相比模糊阻抗控制方法,未知环境参数实时估计的机器人自适应阻抗恒力控制方法力超调量减小 11.0% 和 28.76%,力波动量分别减小 25.96% 和 56.15%。期望打磨力为 5N、10N 和 40N 的打磨实验验证了未知环境参数实时估计的机器人自适应阻抗恒力控制方法的有效性。

后续将开展机器人打磨作业姿态和柔顺恒力的协同控制研究,进一步提高机器人打磨作业自适应性和柔顺性并缩短上升时间和调节时间。

参考文献:

[1] 王田苗,陶永.我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J].机械工程学报,2014,50(9):1-13.  
WANG Tianmiao, TAO Yong. Research Status and Industrialization Development Strategy of Chinese Industrial Robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (9): 1-13.

[2] ZHU Dahu, FENG Xiaozhi, XU Xiaohu, et al. Robotic Grinding of Complex Components: a Step towards Efficient and Intelligent Machining—Challenges, Solutions, and Applications[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 65: 101908.

[3] WANG Qilong, WANG Wei, ZHENG Lianyu, et al. Force Control-based Vibration Suppression in Robotic Grinding of Large Thin-wall Shells [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 102031.

[4] LI Dingwei, YANG Jixiang, ZHAO Huan, et al. Contact Force Plan and Control of Robotic Grinding towards Ensuring Contour Accuracy of Curved Surfaces[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 227: 107449.

[5] 葛吉民,邓朝晖,王水仙,等.基于点云的机器人焊缝自动化磨削系统与方法[J].中国机械工程,2024,35(7):1253-1262.  
GE Jimin, DENG Zhaohui, WANG Shuixian, et al. Automated Grinding System and Method for Robotic Weld Seams Based on Point Cloud [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(7): 1253-1262.

[6] 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.  
GE Jimin, DENG Zhaohui, LI Wei, et al. Research Progresses of Robot Grinding and Polishing Force Compliance Controls [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32 (18): 2217-2230.

[7] ZENG Xi, ZHU Guangyi, GAO Zhuohan, et al. Surface Polishing by Industrial Robots: a Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(9): 3981-4012.

[8] KANA S, LAKSHMINARAYANAN S, MOHAN D M, et al. Impedance Controlled Human-robot Collaborative Tooling for Edge Chamfering and Polishing Applications [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 72: 102199.

[9] 甘亚辉,段晋军,戴先中.非结构环境下的机器人自适应阻抗力跟踪控制方法[J].控制与决策,2019,34(10):

- 2134-2142.  
GAN Yahui, DUAN Jinjun, DAI Xianzhong. Adaptive Variable Impedance Control for Robot Force Tracking in Unstructured Environment [J]. Control and Decision, 2019, 34(10): 2134-2142.
- [10] WANG Guilian, DENG Yuxin, ZHOU Haibo, et al. PD-adaptive Variable Impedance Constant Force Control of Macro-mini Robot for Compliant Grinding and Polishing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(7): 2149-2170.
- [11] WAHBALLA H, DUAN Jinjun, DAI Zhendong. 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.
- [12] 陈满意, 朱自文, 朱义虎, 等. 曲面抛光机器人的模糊自适应阻抗控制[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(6): 2090-2099.  
CHEN Manyi, ZHU Ziwen, ZHU Yihu, et al. Fuzzy Adaptive Impedance Control of Surface Polishing Robot [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(6): 2090-2099.
- [13] 李路骋, 王振忠, 黄雪鹏. 基于模糊阻抗控制的机器人气囊抛光恒力控制系统研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5): 1028-1034.  
LI Lucheng, WANG Zhenzhong, HUANG Xuepeng. Research on Constant Force Control System of Robot Bonnet Polishing Based on Fuzzy Impedance Control [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5): 1028-1034.
- [14] ZHONG Yichen, WANG Ting, PU Yanfeng, et al. An Adaptive Bilateral Impedance Control Based on Nonlinear Disturbance Observer for Different Flexible Targets Grasping [J]. Computers and Electrical Engineering, 2022, 103: 108388.
- [15] 严海堂, 钱牧云, 魏新园, 等. 机器人打磨系统力控补偿优化算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 272-281.  
YAN Haitang, QIAN Muyun, WEI Xinyuan, et al. Research on Force Control Compensation Optimization Algorithm for Robotic Grinding System [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 272-281.
- [16] TANG Zhiqiang, XIN Wenci, WANG Peiyi, et al. Learning-based Control for Soft Robot-environment Interaction with Force/Position Tracking Capability [J]. Soft Robotics, 2024, 11(5): 767-778.
- [17] 郭万金, 于苏扬, 赵伍端, 等. 机器人主动柔顺恒力打磨控制方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 89-99.  
GUO Wanjin, YU Suyang, ZHAO Wuduan, et al. Grinding Control Method of Robotic Active Compliance Constant-force [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44(1): 89-99.
- [18] 郭万金, 于苏扬, 田玉祥, 等. 机器人打磨自适应变阻抗主动柔顺恒力控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(12): 54-65.  
GUO Wanjin, YU Suyang, TIAN Yuxiang, et al. Active Compliance Constant Force Control with Adaptive Variable Impedance for Robotic Grinding [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(12): 54-65.
- [19] 郭万金, 赵伍端, 利乾辉, 等. 基于集成概率模型的变阻抗机器人打磨力控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(12): 2356-2366.  
GUO Wanjin, ZHAO Wuduan, LI Qianhui, et al. Ensemble Probabilistic Model Based Variable Impedance for Robotic Grinding Force Control [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(12): 2356-2366.
- [20] 郭万金, 赵伍端, 于苏扬, 等. 无先验模型曲面的机器人打磨主动自适应在线轨迹预测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(8): 1655-1666.  
GUO Wanjin, ZHAO Wuduan, YU Suyang, et al. Active Adaptive Online Trajectory Prediction for Robotic Grinding on Surface without Prior Model [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(8): 1655-1666.
- [21] ZHOU Bo, SUN Yuyao, LIU Wenbo, et al. Active Admittance Control with Iterative Learning for General-purpose Contact-rich Manipulation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(3): 2842-2851.
- [22] HAMEDANI M H, SADEGHIAN H, ZEKRI M, et al. Intelligent Impedance Control Using Wavelet Neural Network for Dynamic Contact Force Tracking in Unknown Varying Environments [J]. Control Engineering Practice, 2021, 113: 104840.
- [23] 陈鹏飞, 李祥飞, 何显铭, 等. 基于薄壁零件刚度仿真到真实迁移的力控制研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(17): 53-63.  
CHEN Pengfei, LI Xiangfei, HE Xianming, et al. Research on Force Control Based on Sim2Real Transfer for Stiffness of Thin-walled Parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(17): 53-63.
- [24] SHEN Yichao, LU Yan, ZHUANG Chungang. A Fuzzy-based Impedance Control for Force Tracking in Unknown Environment [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(10): 5231-5242.
- [25] 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.  
DENG Jianxin, YUAN Bangyi, HUANG Qiulin, et al. Review on the Key Technologies of Complex Surfaces Polishing Based on Robots [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(7): 1-21.
- [26] 陈满意, 朱义虎, 韩天勇, 等. 基于轨迹修正的曲面抛光机器人终端滑模导纳控制[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(2): 593-600.  
CHEN Manyi, ZHU Yihu, HAN Tianyong, et al. Terminal Sliding Mode Admittance Control of Surface Polishing Robot Based on Trajectory Correction [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(2): 593-600.
- [27] 吕播阳, 孟庆鑫, 肖怀, 等. 基于改进三元模型的波纹管型气动软体驱动器神经网络滑模控制[J]. 中国机械工程, 2024, 35(8): 1414-1425.  
Boyang LYU, MENG Qingxin, XIAO Huai, et al. Neural Network Sliding Mode Control of Bellows-type Pneumatic Soft Actuators Based on Improved Ternary Model [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(8): 1414-1425.
- [28] 罗睿, 赵英杰, 金辉, 等. 基于力柔顺性的航天对接半物理仿真[J]. 机器人, 2024, 46(3): 330-338.  
LUO Rui, ZHAO Yingjie, JIN Hui, et al. Semi-physical Simulation of Space Docking Based on Force Compliance [J]. Robot, 2024, 46(3): 330-338.
- [29] 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.  
LI Zhen, ZHAO Huan, WANG Hui, et al. Research on Contact Steady-state Adaptive Force Tracking of Robot Grinding and Polishing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9): 200-209.
- [30] REI C, WANG Q, CHEN L, et al. Constant Force Grinding Controller for Robots Based on SAC Optimal Parameter Finding Algorithm [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 14127.