

自由曲面打磨机器人非奇异终端滑模阻抗控制^{*}

贾林^{1,2} 王耀南^{1,2} 何静³ 袁小芳^{1,2} 唐永鹏^{1,2} 刘晨^{1,2}

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院 长沙 410082; 2. 机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室 长沙 410082; 3. 湖南工业大学 电气与信息工程学院 株洲 421000)

摘要:针对传统控制方法难以实现对复杂曲面高精度打磨问题,在笛卡尔坐标系下设计了基于非奇异终端滑模的复杂曲面打磨机器人阻抗控制方法。该方法首先根据系统的阻抗模型参数,将设定的打磨轨迹转化为机器人末端可执行的阻抗轨迹,然后设计了基于非奇异终端滑模的控制方法对该阻抗轨迹进行跟踪。对于滑模控制的抖振问题,采用指数趋近律对其进行削弱。基于Lyapunov理论对系统的稳定性进行了证明,仿真和缸体打磨实验结果显示,该方法能够在有限的时间内达到收敛状态且避免了控制奇异的现象,提高了控制系统的鲁棒性和精度。

关键词:自由曲面;打磨机器人;非奇异终端滑模;阻抗控制

中图分类号: TP241.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8050

Non-singular terminal sliding mode impedance control of free-form surface grinding robot

Jia Lin^{1,2} Wang Yaonan^{1,2} He Jing³ Yuan Xiaofang^{1,2} Tang Yongpeng^{1,2} Liu Chen^{1,2}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 421000, China)

Abstract: In order to solve the problem that traditional control method is difficult to achieve high-precision grinding of complex surfaces, this paper designs the impedance control method of complex surface grinding robot based on nonsingular terminal sliding mode in Cartesian coordinate system. Firstly, according to the impedance model parameters of the system, the set grinding trajectory is transformed into the executable impedance trajectory at the end of the robot. Then a control method based on nonsingular terminal sliding mode is designed to track the impedance trajectory. For the chattering problem of sliding mode control, the exponential approach law is used to weaken it. The stability of the system is proved based on Lyapunov theory. Simulation and cylinder grinding experiment results show that the method can achieve convergence in a limited time and avoid the control singularity, and improve the robustness and accuracy of the control system.

Keywords: free-form surface; grinding robot; non-singular terminal sliding mode; impedance control

0 引言

高端装备的部件中具有各类自由曲面,如飞机引擎叶片、舰船螺旋桨、高铁转向架、汽车发动机等,此类曲面的高精度加工对装备的性能至关重要[1-2]。由于结构

较为复杂,在加工现场,一部分工序仍然需要工人参与,单品的加工质量和不同批次产品之间的一致性难以保证。此外现场的巨大噪声、粉尘是操作工人身体健康的巨大威胁^[3]。打磨机器人能够以较高的精度实现设定的打磨轨迹,从而在一定程度上提高加工质量。由于其能够连续工作,因此加工的效率也能够得到提升。基于以

上因素,打磨机器人在多种场景中得到广泛的应用^[4-8]。

根据对部件打磨车间的走访,在人工打磨中,影响打磨质量的因素如下:1)工件的形状和材质;2)打磨末端与工件的接触力;3)打磨过程中磨具与被磨工件表面的运动情况。考虑到这些因素,为了实现高质量的打磨,要求打磨机器人具有高精度,高柔顺性,高灵活性的特点,与传统的工业机械手相比,对控制系统提出了更高要求^[9],国内外学者从不同的角度对此进行了大量的研究。数字制造装备与技术国家重点实验室针对航空发动机叶片打磨机器人设计了力位混合和 PI/PD 相结合的控制方法,保证了磨削过程中力的稳定性和可靠性^[9]。智能技术与系统国家重点实验室对打磨动态过程进行了分析,建立自适应磨削过程模型,提出一种在线轨迹生成方法,缩短了控制过渡过程,提高了磨削质量^[10]。加拿大魁北克水电研究院针对需要保养的大坝闸门设计了水下打磨机器人并取得了系列成果,文献[11]采用多目标遗传优化方法,在提高打磨机器人动态刚度的情况下,有效抑制了扰动。

对于以打磨为代表的一类与环境存在接触的作业场景来说,机器人末端的打磨装置微小的位置偏差,可能带来不必要的接触,由此产生的接触力可能会损坏工件表面,甚至损坏打磨装置和机器人,因此对接触力进行控制是必要的^[12]。Hongan 首次提出阻抗控制的方法,通过控制机器人末端的位置实现对力的控制^[13]。相比于力位混合控制,该方法避免了控制模式的切换可能导致不稳定的响应问题,近年来得到了广泛的研究。文献[14]针对飞行机械臂设计了阻抗控制方法,对空中操作中的接触力进行辨识和控制,并进行了验证。文献[15]针对空间站灵巧机械臂设计了阻抗匹配方案,在不需要接触力动力学建模的情况下,使用于仿真的机械臂的接触力和冲击动力学能够准确跟踪参考的机械臂。文献[16]针对双臂飞行机械手设计了基于图像的视觉阻抗控制律,实现了带有相机的飞行机械臂与其它物体的交互。

在系统参数确定的情况下,阻抗控制要求位置内环具有良好的跟踪性能使得机器人的运行轨迹能够准确跟踪阻抗轨迹^[16],滑模控制由于其结构的特点使其具有了更强的鲁棒性,在机器人、电机等非线性系统的控制中取得了一定的效果,得到了认可^[17-19]。对于滑模控制来说,滑模面的选取至关重要。线性滑模面可以使系统渐近收敛于稳定状态,但其误差是按照指数规律收敛的^[20],通过设计合适的非线性滑模面可以解决收敛时间的问题^[21]。但是对于终端滑模面这种非线性滑模面来说,奇异问题也是需要加以考虑和解决的^[22],非奇异终端滑模面为这一问题的解决提供了新方案^[23],同时也在一定程度上削弱了抖振现象。因此本文采用非奇异终端滑模(NTSMC)控制以提高打磨机器人阻抗控制系统的性能。

1 任务空间中打磨机器人的动力学描述

图 1 所示为基于 Solidworks 设计的打磨机器人三维模型图。考虑到外部扰动和建模不确定性,根据文献[24-25],建立基于末端位置的动力学模型为:

$$M_p(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{p}} + C_p(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{p}} + G_p(\mathbf{q}) + \mathbf{F}_{cr} + \Delta f_p = \mathbf{F}_p \quad (1)$$

式中: \mathbf{p} 为机器人在笛卡尔空间中末端的位置向量, \mathbf{q} 是关节角度向量, $J(\mathbf{q})$ 是机器人 Jacobian 矩阵。



图 1 自由曲面打磨机器人模型示意图

Fig. 1 Sketch of free-form surface grinding robot model

$$\begin{aligned} M_p(\mathbf{q}) &= J^{-T}(\mathbf{q}) M(\mathbf{q}) J^{-1}(\mathbf{q}), \quad G_p(\mathbf{q}) = J^{-T}(\mathbf{q}) G(\mathbf{q}), \\ C_p(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= J^{-T}(\mathbf{q}) (C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - M(\mathbf{q}) J^{-1}(\mathbf{q}) \dot{J}(\mathbf{q})) J^{-1}(\mathbf{q}) \\ \Delta f_p &= J^{-T}(\mathbf{q}) \Delta f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \end{aligned}$$

\mathbf{F}_{cr} 是打磨机器人末端与工件的接触阻力,满足^[25]:

$$\mathbf{F}_{cr} = \mathbf{L}_m(\mathbf{p}_r - \mathbf{p}) + \mathbf{L}_d(\dot{\mathbf{p}}_r - \dot{\mathbf{p}}) + \mathbf{L}_s(\ddot{\mathbf{p}}_r - \ddot{\mathbf{p}})$$

式中: \mathbf{p}_r 为期望的末端轨迹; \mathbf{p} 为实际的末端轨迹; \mathbf{L}_m 、 \mathbf{L}_d 、 \mathbf{L}_s 分别为惯量、阻尼和刚度矩阵。

结合打磨作业要求,考虑到控制器设计的需求,参考现有文献,对机器人动力学做如下假设^[26]:

1) 假设 1,惯性矩阵 $M_p(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是对称正定矩阵且一致有界连续,且其逆矩阵 $M_p^{-1}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 存在:

$$m_1 \parallel \mathbf{x} \parallel^2 \leq \mathbf{x}^T M_p(\mathbf{q}) \mathbf{x} \leq m_2 \parallel \mathbf{x} \parallel^2, \forall \mathbf{x} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$$

2) 假设 2, $M_p(\mathbf{q}) - 2C_p(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 是斜对称矩阵,即对于任意向量 \mathbf{q} ,存在如下关系:

$$\mathbf{q}^T [M_p(\mathbf{q}) - 2C_p(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})] \mathbf{q} = 0$$

3) 假设 3^[27], $\parallel \Delta f_p(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \parallel \leq \mu_1 + \mu_2 \parallel \mathbf{q} \parallel + \mu_3 \parallel \mathbf{q} \parallel^2$, 其中 μ_1, μ_2, μ_3 均为正数。

控制目标,在实际的打磨作业过程中,期望末端轨迹 p_r 可能存在不可到达的情形,因此阻抗控制的目标是设计合适的控制律使实际末端轨迹 p 跟踪期望阻抗轨迹 p_d 。

2 非奇异终端滑模阻抗控制器设计

图 2 所示为本文设计控制方法的整体框图。定义笛卡尔坐标系下打磨机器人末端位置误差状态变量^[28]:

$$e = p_d - p$$

(2)

式中: p_d 是期望阻抗轨迹; p 是实际末端轨迹。

则有:

$$\dot{e} = \dot{p}_d - \dot{p} = \dot{p}_d - M_p^{-1} (F_p - C_p \dot{p} - G_p - F_{cr} - \Delta f_p)$$

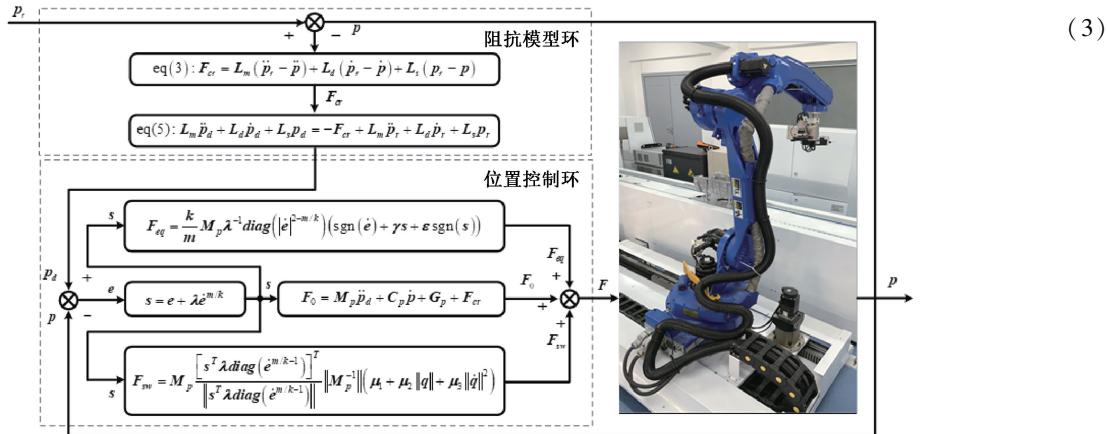


图 2 控制系统整体框图

Fig. 2 Overall block diagram of control system

定义非奇异终端滑模面^[29]:

$$s = e + \lambda \dot{e}^{m/k} \quad (4)$$

式中: $s = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$; λ 为待设计的正矩阵, 是滑模面的斜率, $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, $\lambda_i > 0$, $i = 1, 2, \dots, n$; $\dot{e}^{m/k} = [e_1^{m/k}, e_2^{m/k}, \dots, e_n^{m/k}]^T$, m, k 均为待设计的正奇数, 且 $k < m < 2k$ 。

选取指数趋近律为^[30]:

$$\dot{s} = -\gamma s - \varepsilon \text{sgn}(s) \quad (5)$$

根据文献[27], 设计控制律为:

$$F_p = F_0 + F_{eq} + F_{sw} \quad (6)$$

其中:

$$F_0 = M_p \ddot{p}_d + C_p \dot{p} + G_p + F_{cr}$$

$$F_{eq} = \frac{k}{m} M_p \lambda^{-1} \text{diag}(|\dot{e}|^{2-m/k}) (\text{sgn}(\dot{e}) + \gamma s + \varepsilon \text{sgn}(s))$$

$$F_{sw} = M_p \frac{[s^T \lambda \text{diag}(\dot{e}^{m/k-1})]^T}{\|s^T \lambda \text{diag}(\dot{e}^{m/k-1})\|} \|M_p^{-1}\| (\mu_1 + \mu_2 \|q\| + \mu_3 \|\dot{q}\|^2)$$

($\mu_1 + \mu_2 \|q\| + \mu_3 \|\dot{q}\|^2$)

证明:

定义 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^T s \quad (7)$$

对式(7)进行求导, 并将式(3)、(6)代入式(7)可得:

$$\dot{V} = s^T \dot{s} =$$

$$-s^T \text{diag}(|\dot{e}|) (\gamma s + \varepsilon \text{sgn}(s)) - \frac{m}{k} \|s^T \lambda \text{diag}(\dot{e}^{m/k-1})\| \|M_p^{-1}\| (\mu_1 + \mu_2 \|q\| + \mu_3 \|\dot{q}\|^2) + s^T \frac{m}{k} \lambda \text{diag}(\dot{e}^{m/k-1}) M_p^{-1} \Delta f_p \leq$$

$$- \text{diag}(|\dot{e}|) (\gamma \|s\|^2 + \varepsilon \|s\|) - \frac{m}{k} \|s^T \lambda \text{diag}(\dot{e}^{m/k-1})\|$$

$$\|M_p^{-1}\| (\mu_1 + \mu_2 \|q\| + \mu_3 \|\dot{q}\|^2 - \Delta f_p) \quad (8)$$

由于 $\gamma, \varepsilon, m, k$ 均为正数, 且根据假设 3, 有 $\mu_1 + \mu_2 \|q\| + \mu_3 \|\dot{q}\|^2 \geq \Delta f_p$, 因此:

$$\dot{V} \leq -\varphi \|s\| \leq 0$$

当且仅当 $s=0$ 时, $\dot{V}=0$, 根据 LaSalle 不变集原理, 闭环控制系统渐进稳定^[25], 由此得证。同时, 通过调节合适的 γ 和 ε , 可以提高系统趋近滑模面的速度, 减小在滑动模态上运动的速度, 从而达到改善抖振的目的。

3 仿真分析

本节通过仿真对控制器的效果进行验证, 图 3 所示为打磨机器人两关节简化模型。仿真基于 MATLAB R2016a 平台开展, 打磨机器人的系统参数为^[19]:

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11}(q_2) & M_{12}(q_2) \\ M_{21}(q_2) & M_{22}(q_2) \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11}(q_2) & C_{12}(q_2) \\ C_{21}(q_2) & C_{22}(q_2) \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_1(q_1, q_2) \\ G_2(q_1, q_2) \end{bmatrix}$$

$$M_{11}(q_2) = (m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos(q_2)$$

$$M_{12}(q_2) = M_{21} = m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos(q_2)$$

$$M_{22}(q_2) = m_2 l_2^2$$

$$C_{11}(q_2) = -m_2 l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_2$$

$$C_{12}(q_2) = -m_2 l_1 l_2 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$$

$$C_{21}(q_2) = m_2 l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_1, C_{22}(q_2) = 0$$

$$G_1(q_1, q_2) = (m_1 + m_2) l_1 g \cos(q_2) + m_2 l_2 g \cos(q_1 + q_2)$$

$$G_2(q_1, q_2) = m_2 l_2 g \cos(q_1 + q_2)$$

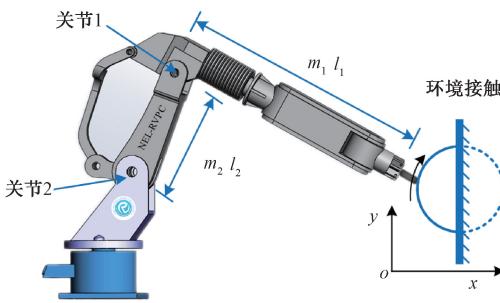


图 3 自由曲面打磨机器人作业仿真情景简化示意图
Fig. 3 Simplified schematic diagram of operation simulation of free-form surface grinding robot

关节 1 和关节 2 的质量用 m_1 和 m_2 表示, 关节 1 和关节 2 的长度用 l_1 和 l_2 表示, g 代表重力加速度。 $m_1 = 4 \text{ kg}$, $m_2 = 2.5 \text{ kg}$, $l_1 = 1.2 \text{ m}$, $l_2 = 1 \text{ m}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。笛卡尔坐标下机器人末端的初始状态为 $[0.6 \ 1.1]^T$, 取 $\Delta f_p(q, \dot{q}, \ddot{q}) = [\cos t \ \sin t]^T$, 给定理想的末端轨迹 $p_r = 1 - 0.2 \cos \pi t, p_{r2} = 1 + 0.2 \sin \pi t$ 。机器人期望阻抗位置和期望末端位置初始状态设定为 $p_r(0) = p_d(0), \dot{p}_r(0) = \dot{p}_d(0)$, 期望阻抗的仿真初始条件设定为 $p_d(0) = [0.6 \ 0.6]^T, \dot{p}_d(0) = [0.1 \ 0.1]^T$ 。阻尼参数中, 惯量矩阵 $\mathbf{L}_m = \text{diag}[1]$, 阻尼矩阵 $\mathbf{L}_d = \text{diag}[10]$, 刚度矩阵 $\mathbf{L}_s = \text{diag}[50]$ 。

采用对比仿真以说明所设计的非奇异终端滑模方法的有效性, 其他两种方法分别是线性滑模阻抗方法 (SMC) 和终端滑模阻抗方法 (TSMC)。

线性滑模方法的滑模面设计为 $s_1 = \lambda_1 e + \dot{e}$, 控制律设计为^[31]:

$$\mathbf{F}_{\text{SMC}} = \mathbf{M}_p \ddot{\mathbf{p}}_d + \mathbf{C}_p \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{G}_p + \mathbf{F}_{\text{cr}} + \mathbf{M}_p \boldsymbol{\lambda}_1 e + \gamma_1 \mathbf{M}_p s_1 + \frac{[\mathbf{s}_1^T \mathbf{M}_p^{-1}]^T \|\mathbf{s}_1\| \|\mathbf{M}_p^{-1}\|}{\| \mathbf{s}_1^T \mathbf{M}_p^{-1} \|^2} (\mu_1 + \mu_2 \|\mathbf{q}\| + \mu_3 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2) - \frac{[\mathbf{s}_1^T \mathbf{M}_p^{-1}]^T \|\mathbf{s}_1\| \|\mathbf{M}_p^{-1}\|}{\| \mathbf{s}_1^T \mathbf{M}_p^{-1} \|^2}$$
(9)

终端滑模方法滑模面设计为 $s_2 = \lambda_2 e^{y/z} + \dot{e}$, 控制律设计为^[22]:

$$\mathbf{F}_{\text{TSMC}} = \mathbf{M}_p \ddot{\mathbf{p}}_d + \mathbf{C}_p \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{G}_p + \mathbf{F}_{\text{cr}} + \frac{y}{z} \mathbf{M}_p \lambda_2 \text{diag}(e^{y/z-1}) \dot{e} + \gamma_2 \mathbf{M}_p s_2 + \frac{[\mathbf{s}_2^T \mathbf{M}_p^{-1}]^T \|\mathbf{s}_2\| \|\mathbf{M}_p^{-1}\|}{\| \mathbf{s}_2^T \mathbf{M}_p^{-1} \|^2} (\mu_1 + \mu_2 \|\mathbf{q}\| + \mu_3 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2) - \frac{[\mathbf{s}_2^T \mathbf{M}_p^{-1}]^T \|\mathbf{s}_2\| \|\mathbf{M}_p^{-1}\|}{\| \mathbf{s}_2^T \mathbf{M}_p^{-1} \|^2}$$
(10)

线性滑模控制器的参数为 $\lambda_1 = 20, \gamma_1 = 100$, 终端滑模控制器的参数为 $\lambda_2 = 20, \gamma_2 = 85, y/z = 7/5$, 非奇异终端滑模控制器的参数为 $\lambda = 20, \gamma = 10, \varepsilon = 55, m/k = 5/3$ 。系统不确定性的边界参数设定为 $\mu_1 = 10, \mu_2 = 2, \mu_3 = 4$ 。仿真分析中提到的 3 个轨迹分别是期望轨迹 p_r , 阻抗轨迹 p_d , 实际轨迹 p , 均是指在笛卡尔坐标系下。

为了验证阻抗控制方法的效果, 在 $p_{rx} = 1$ 的位置设计障碍物。当 $p_{rx} < 1$ 时, 打磨机器人末端与环境不存在接触, 接触力为 0。当 $p_{rx} > 1$ 时机器人末端与障碍物存在持续接触, 接触面为 $p_{rx} = 1$ 。

实际末端轨迹 p 对期望末端轨迹 p_r 的跟踪情况如图 4 所示。 p_r 是笛卡尔坐标系下给定的圆形轨迹, 由于障碍物的阻挡机器人无法完全到达。当 $p_{rx} > 1$ 时, 3 种控制方法都能够控制机器人在一定的时间内使其脱离无法到达的轨迹。当 $p_{rx} < 1$ 时, 机器人在空间中自由运动, 与环境没有发生接触, 机器人的实际轨迹应该能够达到设定的 p_r 。仿真结果可以看到, 3 种方法都能在这一区间实现对给定轨迹的跟踪, 通过动态过程的局部放大图可知, 对于 p_{rx} 的跟踪, 3 种方法的收敛时间分别是 0.35 s (NTSMC)、0.4 s (TSMC)、0.5 s (SMC), 对于 p_{ry} 的跟踪, 3 种方法的收敛时间分别是 0.3 s (NTSMC)、0.35 s (TSMC)、0.45 s (SMC)。

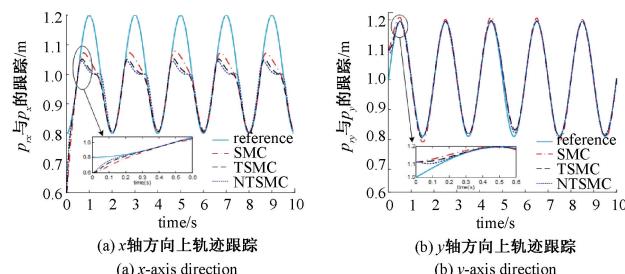


图 4 期望轨迹与实际轨迹的跟踪情况
Fig. 4 Tracking of expected trajectory and actual trajectory

x 轴方向上实际末端轨迹 p_x 对阻抗轨迹 p_{dx} 的跟踪情况如图 5 所示。阻抗控制律的控制目标是实际末端轨迹 p 能够实现对期望阻抗轨迹 p_d 的准确跟踪。由图 5 (a) ~ (c) 可知, 3 种控制方法都能够实现对期望阻抗轨迹的跟踪。由于控制方法不同, 动态计算得到的 p_{dx} 有所不同, 因此图 5 将 3 种方法的跟踪情况分别进行了列举。从图 5 (a) ~ (c) 的局部放大图可知, 3 种方法的收敛时间分别为 0.35 s (NTSMC)、0.45 s (TSMC)、0.5 s (SMC), 由图 5 (d) 可知, 稳态误差的幅值分别是 0.009 m (NTSMC)、0.02 m (TSMC)、0.05 m (SMC)。 y 轴方向上的仿真有类似的结果。

在笛卡尔坐标平面内, NTSMC 控制律作用下机器人末端位置跟踪情况如图 6 所示。图 6 (a) 表示当与环境

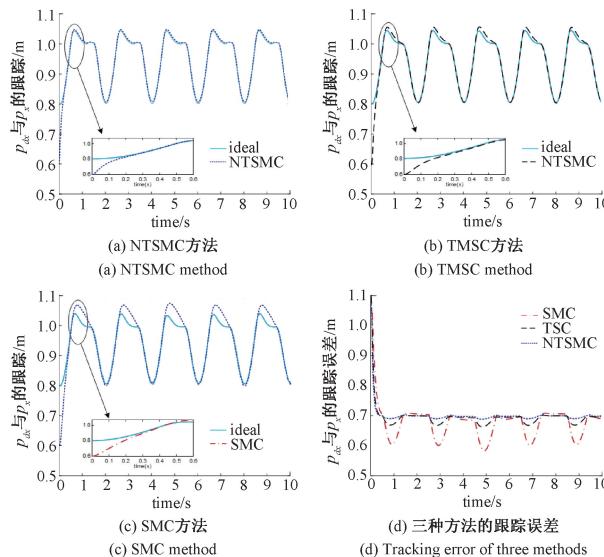


图 5 x 轴方向上阻抗轨迹与实际轨迹的跟踪情况

Fig. 5 Tracking of impedance trajectory and actual trajectory in x -axis

没有发生接触时 ($p_x < 1$)，机器人的实际位置能够实现对期望位置的准确跟踪。当末端到达障碍物接触面时 ($p_x \geq 1$)，在 NTSMC 阻抗控制的作用下，机器人的末端能够脱离给定轨迹 p_r ，避开故障，同时沿着接触面运动，直到 p_x 再次小于 1 时，继续实现对给定轨迹 p_r 的跟踪。图 6(b) 表示笛卡尔坐标系下机器人的实际位置能够达到计算得到的阻抗位置，因此图 6(b) 直观的展示了所设计的 NTSMC 阻抗控制器的有效性。

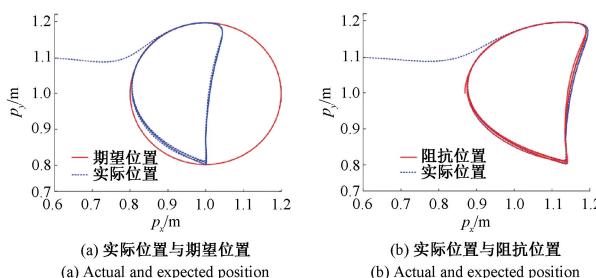


图 6 笛卡尔坐标系下机器人末端位置的跟踪情况

Fig. 6 Tracking of robot end position in Cartesian coordinate

图 7 所示为 NTSMC 阻抗控制作用下，机器人与环境之间的接触力。由图 7(a) 可知，当机器人末端与环境的相对位移为 0 时，两者之间的接触作用在短时间内变大，可能对工件和末端带来损坏，在阻抗控制律的作用下，通过调节末端位置，可以减小接触力，避免损坏工件。

4 实验验证

为了进一步验证所设计的阻抗控制方法的有效性，

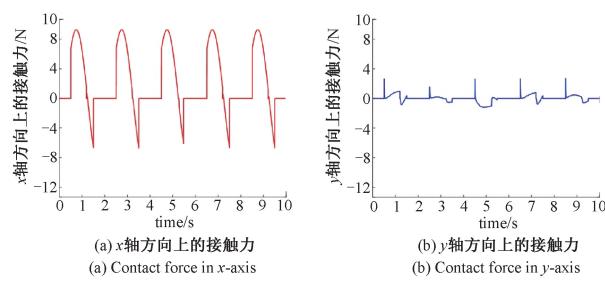


图 7 打磨机器人与环境之间的接触力

Fig. 7 Contact force between grinding robot and environment

本节进行了实验验证和分析。图 8 所示为课题组所在的机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室自主研发的高端装备自由曲面自动化打磨机器人系统，它由机器人及其控制系统、打磨装置、3D 视觉检测装置和隔离护栏组成，课题组自主设计了打磨装置安装于安川机械手上。打磨实验的对象是汽车发动机缸体，设定的任务是在 10 s 的时间里沿 U 形轨迹打磨工件外表面 480 mm，三段的长度分别是 150、180、150 mm。采用 PD 和 NTSMC 两种控制方法进行对比实验，实验结果如图 9 所示。

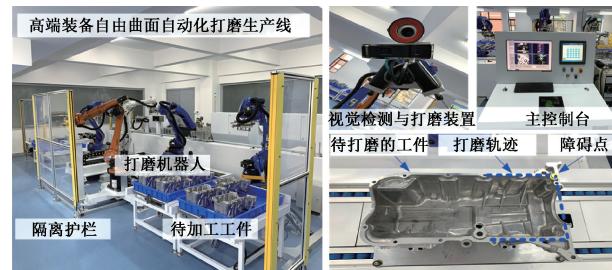


图 8 自由曲面打磨机器人和发动机缸体磨削实验装置

Fig. 8 Grinding robot for free form surface and grinding experimental device for engine cylinder block

由图 9 可知，在 SMC 和 NTSMC 的作用下，6 个关节都能达到稳定状态，关节位置的实际值可以跟踪参考值。从 6 个节点的数据可以看出，在稳态误差方面，基于 NTSMC 的方法比基于 SMC 的方法小。以关节 2 为例，基于 SMC 的最大稳态误差为 2.99° ，NTSMC 为 2.66° ，降低了 11%。另外 5 个关节具有相似的实验结果，因此采用 NTSMC 可以提高系统的性能。在整个打磨过程中，关节 5 的位移很小，其变化范围为 $46.1^\circ \sim 46.8^\circ$ ，保证了打磨装置始终保持垂直与被打磨工件表面。同时，由于与打磨装置直接接触，因此关节 6 出现了一定的波动。

5 结 论

本文在笛卡尔坐标系下，针对传统控制方法难以实现对复杂曲面高精度打磨问题设计了基于非奇异终端滑

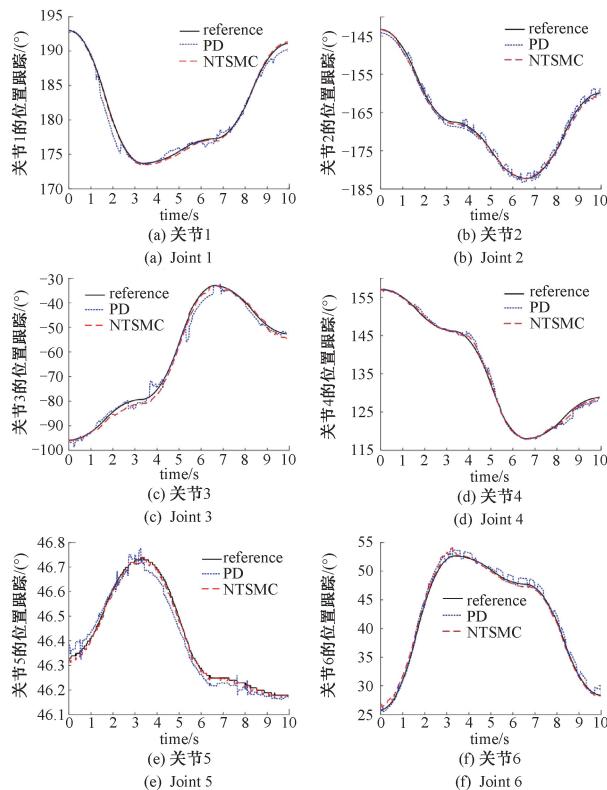


图 9 发动机缸体表面磨削机器人阻抗控制六关节位置跟踪

Fig. 9 Six joint position tracking based on impedance control of grinding robot for engine block surface

模的阻抗控制方法。首先根据系统的阻抗模型参数 L_d 和 L_s , 将系统的给定轨迹 p , 转化为机器人可执行的阻抗轨迹 p_d 。然后设计了基于 NTSMC 的阻抗控制方法对阻抗轨迹进行跟踪, 该方法能够在有限的时间内达到收敛状态且避免了控制奇异的现象。同时采用了指数趋近律以削弱滑模控制的抖振现象。利用 Lyapunov 稳定性理论证明了控制系统的稳定性。实际轨迹 p 对阻抗轨迹 p_d 的准确跟踪是控制方案的目标, 仿真和实验显示, 基于 NTSMC 的阻抗控制方法对扰动具有良好的鲁棒性, 能够提高收敛时间, 减小稳态误差, 提高系统的控制精度。

参考文献

- [1] 王永俊, 贾建芳. 航天器自适应滑模变结构姿态控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 9-15.
WANG Y G, JIA J F. Based on the research of UAV emergency parachute drop loss avoidance and landing position system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 9-15.
- [2] 高峰, 曲建岭, 袁涛, 等. 基于改进差分时域特征和深度学习优化的航空发动机剩余寿命预测算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(3): 21-28.
GAO F, QU J L, YUAN T, et al. Optimized algorithm

for aero-engine life prediction based on improved differential time-domain features and deep learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(3): 21-28.

- [3] GRACIA L, SOLANES J E, MUÑOZ-BENAVENT P, et al. Adaptive sliding mode control for robotic surface treatment using force feedback [J]. Mechatronics, 2018, 52: 102-118.
- [4] DIAO SH P, CHEN X D, WU L. Calibration method of vision measurement system for ceramic billet grinding robot [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(7): 4656-4666.
- [5] 王贵程, 吴国新, 左云波, 等. 基于改进蚁群算法包装机器人轨迹规划研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 94-100.
WANG G CH, WU G X, ZUO Y B, et al. Research on trajectory planning of packaging robot based on improved ant colony algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 94-100.
- [6] 罗坚铭, 陈新度, 吴磊. 移动机器人高精度上下料的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 187-193.
LUO J M, CHEN X D, WU L. Research on high precision loading and unloading of mobile robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 187-193.
- [7] 马啸川, 李庆武, 刘静, 钱荣. 变电站机器人自动巡检中的刀闸开合状态分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(6): 64-71.
MA X CH, LI Q W, LIU J, et al. Analysis of isolator status based on robot automatic detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(6): 64-71.
- [8] 刘彩霞, 方建军, 刘艳霞, 等. 基于多类特征融合的极限学习在四足机器人野外地形识别中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 97-105.
LIU C X, FANG J J, LIU Y X, et al. Application of extreme learning based on multi-class feature fusion in field terrain recognition of quadruped robots [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 97-105.
- [9] XU X H, ZHU D H, ZHANG H, et al. Application of novel force control strategies to enhance robotic abrasive belt grinding quality of aero-engine blades [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(10): 2368-2382.
- [10] SONG Y X, YANG H J, LV H B. Intelligent control for a robot belt grinding system [J]. IEEE transactions on control systems technology, 2013, 21(3): 716-724.
- [11] HAMELIN P, BIGRAS P, BEAUDRY J, et al.

- Multiobjective optimization of an observer-based controller: Theory and experiments on an underwater grinding robot [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(5): 1875-1882.
- [12] ZHU D H, XU X H, YANG Z Y, et al. Analysis and assessment of robotic belt grinding mechanisms by force modeling and force control experiments [J]. *Tribology International*, 2018, 120: 93-98.
- [13] BA K X, YU B, ZHU Q X, et al. The position-based impedance control combined with compliance-eliminated and feedforward compensation for HDU of legged robot [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(16): 9232-9253.
- [14] SUAREZ A, HEREDIA G, OLLERO A. Physical-virtual impedance control in ultralightweight and compliant dual-arm aerial manipulators [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(3): 2553-2560.
- [15] AGHILI F. Robust impedance-matching of manipulators interacting with uncertain environments: application to task verification of the space station's dexterous manipulator [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(4): 1565-1576.
- [16] LIPPIELLO V, FONTANELLI G A, RUGGIERO F. Image-based visual-impedance control of a dual-arm aerial manipulator [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(3): 1856-1863.
- [17] 凌颤,王国慧,易波,等.基于FNTFSMC的国产腹腔镜手术机器人轨迹控制[J].*仪器仪表学报*,2019,40(5):179-186.
- LING H, WANG G H, YI B, et al. Trajectory control of domestic laparoscopic surgery robot based on FNTFSMC[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(05):179-186.
- [18] 何静,何云国,张昌凡,等.EKF在机车最优黏着控制中的应用[J].*电子测量与仪器学报*,2019,33(2):25-31.
- HE J, HE Y G, ZHANG C F, et al. Application of EKF in locomotive optimal adhesion control [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(2): 25-31.
- [19] PHAM V C, WANG Y N. Adaptive trajectory tracking neural network control with robust compensator for robot manipulators [J]. *Neural Computing and Applications*, 2015, 2016, 27(2): 525-536.
- [20] 王艳敏.柔性机械手非奇异终端滑模控制方法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- WANG Y M. Research on nonsingular terminal sliding mode control method for flexible manipulator [D].
- Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [21] VIJAY M, JENA D. Backstepping terminal sliding mode control of robot manipulator using radial basis functional neural networks [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2018, 67: 690-707.
- [22] 胡盛斌.非线性多关节机器人系统滑模控制[M].北京:国防工业出版社,2015.
- HU SH B. *Sliding mode control for nonlinear multi joint robot system* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [23] CHEN G, JIN B, CHEN Y. Accurate and robust body position trajectory tracking of six-legged walking robots with nonsingular terminal sliding mode control method [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 77: 1348-1372.
- [24] LEE J, CHANG P H, JIN M. Adaptive integral sliding mode control with time-delay estimation for robot manipulators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(8): 6796-6804.
- [25] 刘金琨.机器人控制系统的概念与MATLAB仿真:基本设计方法[M].北京:清华大学出版社,2016.
- LIU J K. *Robot Control System Design and MATLAB Simulation: The Basic Design Method* [M]. Tsinghua University Press, Beijing, 2017.
- [26] WANG H L. Adaptive control of robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62 (2): 948-954.
- [27] 余荣荣,姚乐.基于遗传算法优化的机器人非奇异终端滑模控制[J].*青岛科技大学学报(自然科学版)*,2014,35(4):422-426.
- YU R R, YAO L. Nonsingular terminal sliding mode control of robot based on the genetic algorithm optimization [J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 35(4): 422-426.
- [28] 刘金琨,孙富春.滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J].*控制理论与应用*,2007,24(3):407-418.
- LIU J K, SUN F CH. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. *Control Theory and Applications*, 2007, 24 (3): 407-418.
- [29] JIN M, LEE J, CHANG P H, et al. Practical nonsingular terminal sliding-mode control of robot manipulators for high-accuracy tracking control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(9): 3593-3601.
- [30] ZHANG J J, LIU W D, GAO L, et al. The master

- adaptive impedance control and slave adaptive neural network control in underwater manipulator uncertainty teleoperation [J]. Ocean Engineering, 2018, 165: 465-479.
- [31] YANG L, YANG J Y. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21 (16) : 1865-1879.

作者简介



贾林,2014 年于湖南工业大学获得硕士学位,现为湖南大学博士研究生,主要研究方向为智能控制与工业机器人。

E-mail:jialin@hnu.edu.cn

Jia Lin received his M. Sc. degree from Hunan University of Technology in 2014. Now he is a Ph. D. candidate at Hunan University. His main research

interests include intelligent control and industrial robot.



王耀南(通信作者),1981 年东华理工大学获得学士学位 1990 年和 1994 年于湖南大学获得硕士学位和博士学位,现为中国工程院院士,湖南大学教授,主要研究方向为智能控制,机器人技术及应用,计算机视觉。

E-mail:yaonan@hnu.edu.cn

Wang Yaonan (Corresponding author) received B. Sc. from the East China University of Technology, in 1981, M. Sc. and Ph. D. from Hunan University, Changsha, China, in 1990 and 1994, respectively. Now he is an academician of Chinese Academy of Engineering and a professor in Hunan University. His current research interests include intelligent control, robotics and applications, computer vision.