

# 基于改进自抗扰控制的高空风机叶片打磨 机器人被动柔顺控制方法研究

李浩 刘欣荣\* 刘仪沁 范狄庆

上海工程技术大学机械与汽车工程学院,上海,201600

**摘要:**为了应对高空未知干扰,保持高空风机叶片修复机器人末端打磨接触力的恒定,提出了一种基于改进自抗扰控制(ADRC)的机器人被动柔顺控制算法。该算法结合死区补偿和重力补偿算法,充分考虑气动系统气体压缩性、电气比例阀死区特性、打磨过程中倾角变化以及高空作业时未知扰动等问题,采用跟踪微分器过渡输入信号,利用状态观测器观测系统扰动,通过状态误差反馈控制律进行补偿。通过建立控制系统的数学模型并进行仿真分析得出,相比传统比例积分微分(PID)算法,该控制算法在力控制性能和响应速度上均有提升;搭建实验平台进行多种工况实验,实验结果表明,该控制算法系统调节时间缩短44.6%~51.4%,最大误差绝对值减小45.4%~69.4%,误差均方值减小56.5%~91.2%。由此可得,所提算法具有更好的动态响应性能和力控制精度,具有较强的抗干扰能力和鲁棒性,为工程实际应用打下理论基础。

**关键词:**自抗扰控制;机器人打磨;柔顺控制;气动系统建模;风机叶片

**中图分类号:**TP273;TP242;TM315

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Passive Compliance Control Method of High Altitude Wind Turbine Blade Grinding Robots Based on Improved ADRC

LI Hao LIU Xinrong\* LIU Yiqin FAN Diqing

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, 201600

**Abstract:** To cope with unknown disturbances at high altitudes and maintain a constant contact forces at the end of a high-altitude wind turbine blade repair robots during polishing, a passive compliant control algorithm was proposed based on an improved ADRC approach. The algorithm combined dead-zone compensation and gravity compensation algorithms, fully considering issues such as gas compressibility in the pneumatic systems, characteristics of electrical proportional valve dead zones, changes in tilt angle during polishing processes, and unknown disturbances during high-altitude operations. A tracking differentiator was utilized for excessive input signals, a state observer was employed to monitor system disturbances, and compensated through a state error feedback control law. By establishing the mathematical model of the control systems and conducting simulation analysis, it is found that this control algorithm improves both force control performance and response speed compared to the traditional proportional-integral-derivative (PID) algorithm. An experimental platform was constructed to conduct experiments under various operating conditions. The experimental results show that the control algorithm systems achieve 44.6% to 51.4% reductions in settling time, a decrease in the absolute maximum error by 45.4% to 69.4%, and reductions in mean square error by 56.5% to 91.2%. Therefore, this algorithm demonstrates improved dynamic response performance and force control accuracy, along with strong disturbance rejection capabilities and robustness, providing a theoretical foundation for practical engineering applications.

**Key words:** active disturbance rejection control (ADRC); robot polishing; compliant control; pneumatic system modeling; wind turbine blade

### 0 引言

风能是一种可持续的绿色能源,随着全球新

能源产业的飞速发展,风电装机容量不断增加,风机设备的维护愈来愈重要<sup>[1]</sup>。当前高空风机叶片表面修复主要依靠人工,存在作业环境恶劣以及作业效率低、质量不稳定等问题<sup>[2]</sup>。机器人代替人工进行打磨修复风机叶片是一种新趋势,相比

人工修复高空叶片,机器人修复具有安全性高、效率高、精度高、可编程性强等优势<sup>[3-4]</sup>。机器人在打磨风机叶片时会受到未知风力扰动和机器人底座吸盘发生变形等因素的影响,使得末端执行器位置发生偏差,可能导致叶片过切,严重时还会损坏机器人本体,因此,需要提高机器人打磨的柔顺性。机器人柔顺控制策略主要分为两大类<sup>[5]</sup>:一是主动柔顺控制策略<sup>[6-15]</sup>;二是被动柔顺控制策略<sup>[16-21]</sup>。

关于机器人主动柔顺控制策略,国内外学者经过多年研究将其分为两大类。一是阻抗控制,包括基于末端的位置、速度、刚度和接触力之间的关系,通过调整反馈位置误差、速度误差、刚度误差来达到控制接触力的传统阻抗控制<sup>[6-7]</sup>;通过识别环境信息,加入估算的环境刚度和环境位置的自适应阻抗控制<sup>[8-11]</sup>方法;将智能控制理论与阻抗控制结合的其他控制方法<sup>[12]</sup>。二是力/位混合控制,包括传统的力/位混合控制<sup>[13]</sup>;基于自抗扰控制理论的恒力控制<sup>[14]</sup>;结合了关节力矩比例-积分(proportional integral, PI)控制和关节位置比例-微分(proportional derivative, PD)控制,采用强制力控制优于位置控制解决逻辑冲突的混合力位控制策略<sup>[15]</sup>。

被动柔顺装置相对于机器人是独立的,主要有四种实现形式:一是机械结构设计方式,采用对称结构避免偏心力引起的振动,进而调整抛磨力<sup>[16]</sup>;二是采用电磁驱动被动柔顺装置,设计两个新型涡流阻尼器,并将其集成到智能末端执行器中实现力的控制<sup>[17]</sup>;三是采用电机驱动被动柔顺装置,其中包括自适应抗饱和积分分离模糊PI控制器设计<sup>[18]</sup>,提出2-自由度(degrees of freedom, DOF)混合力位控制算法实现期望力的跟踪<sup>[19]</sup>,以及线性音圈电机控制执行器伸缩<sup>[20]</sup>;四是采用气缸或者液缸的方式实现被动柔顺装置的恒力打磨,设计一种气动被动柔顺装置,实现对机器人末端力控制和位置控制的解耦,提高其动态性能<sup>[21]</sup>。

综上所述,主动柔顺控制精度高,但存在控制难度大、实现困难等问题;被动柔顺控制实现简单,适用于工程实际运用,但存在控制精度较低的问题。根据自抗扰控制原理,本文提出了一种结合死区补偿算法和重力补偿算法的改进自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)算法,使得控制系统具有更好的动态响应性能和力控制精度,解决了传统被动柔顺控制精度差等问

题。通过仿真分析及实验验证得出该控制算法具有极强的抗干扰能力、动态响应性能和鲁棒性。

### 1 恒力控制装置系统建模

图1为机器人作业示意图,机器人通过真空吸盘吸附在高空风机叶片上,引导打磨装置进行修复作业。恒力控制装置一端固定在机器人末端,另一端与打磨装置相连,其主要零件如下:气源、气动二联件、两位五通电磁阀、电气比例阀、气缸、倾角传感器、力传感器、STM32单片机、上位机等。控制过程如下:通过压力传感器采集打磨接触力反馈给STM32单片机,经过控制算法运算输出控制信号给电气比例阀和两位五通电磁阀,进而调节气缸的拉伸与压缩来保持末端接触力的恒定。

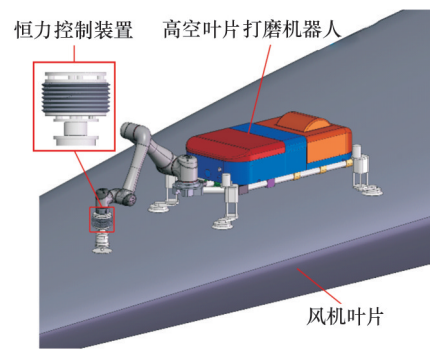


图1 机器人作业示意图

Fig.1 Schematic diagram of robot operation

#### 1.1 恒力控制装置力平衡分析

恒力控制装置受力简图见图2。根据牛顿第二定律,可得

$$p_a A_a - p_b A_b = m\ddot{s} + B\dot{s} + F_d + F_f \quad (1)$$

式中: $A_a$ 为气缸无杆腔活塞面积; $A_b$ 为气缸有杆腔活塞面积; $p_a$ 为气缸无杆腔压力; $p_b$ 为气缸有杆腔压力; $m$ 为气缸活塞和负载总质量; $\dot{s}$ 为气缸移动速度; $\ddot{s}$ 为气缸移动加速度; $B$ 为阻尼系数; $F_d$ 为恒力控制装置打磨接触力; $F_f$ 为气缸摩擦力。

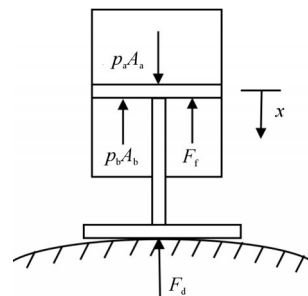


图2 恒力控制装置受力简图

Fig.2 Simplified force diagram of constant force control device

不考虑气缸推杆气缸摩擦力影响,可将式(1)简化为

$$p_a A_a - p_b A_b = m\ddot{s} + B\dot{s} + F_d \quad (2)$$

当末端执行器与风机叶片接触时,轴向作用力为  $F_d$ , 产生位移为  $y_1$ , 等效刚度模型系数为  $K_e$ , 可得

$$F_d = K_e y_1 \quad (3)$$

联立式(2)、式(3)可得

$$p_a A_a - p_b A_b = m\ddot{s} + B\dot{s} + K_e y_1 \quad (4)$$

### 1.2 恒力控制装置流量模型的建立

恒力控制装置的气体流量原理如图3所示。该系统输入为压力传感器采集值  $F_n$ , 输出为电气比例阀控制电压  $u$ 。STM32单片机微控制器通过力传感器的反馈实现对电气比例阀和两位五通电磁阀的控制。

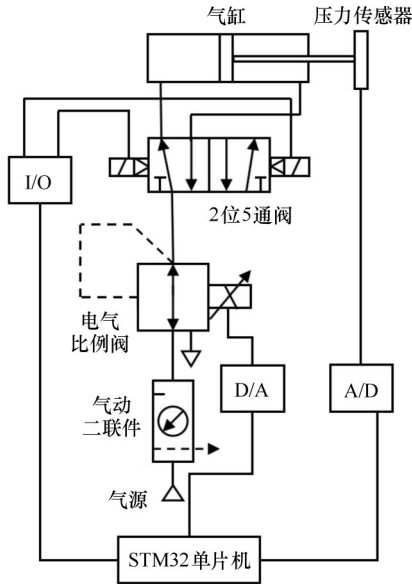


图3 恒力控制装置气体流量原理

Fig.3 Schematic of gas flow in constant force control device

#### 1.2.1 电气比例阀建模

电气比例阀通过阀口的流量与进气口压力、出气口压力和阀口流通面积有关,由 SANVILLE 气体流量公式可得

$$q = \begin{cases} \frac{C_q A_v p_0 H_0}{\sqrt{T_0}} \varphi\left(\frac{p_1}{p_0}\right) \frac{p_1}{p_0} & \frac{p_1}{p_0} > C_t \\ \frac{C_q A_v p_0 H_1}{\sqrt{T_0}} & \frac{p_1}{p_0} \leq C_t \end{cases} \quad (5)$$

$$A_v = W x_v \quad (6)$$

$$H_0 = \sqrt{\frac{2k}{R_0(k-1)}} \quad (7)$$

$$H_1 = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} \sqrt{\frac{2k}{R_0(k+1)}} \quad (8)$$

$$\varphi\left(\frac{p_1}{p_0}\right) = \sqrt{\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{k+1/k}} \quad (9)$$

$$C_t = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} \quad (10)$$

式中:  $q$  为伺服阀流入的气体流量;  $A_v$  为电气比例阀阀口有效面积;  $p_0$  为电气比例阀进气口压力;  $p_1$  为电气比例阀进气口压力;  $T_0$  为绝对温度;  $C_q$  为电气比例阀节流口流量参数;  $W$  为电气比例阀开口面积梯度;  $x_v$  为电气比例阀阀芯位移;  $k$  为绝热指数;  $R_0$  为理想气体常数;  $C_t$  为临界压力比。

气体流动有两种状态,当  $p_1/p_0 > C_t$  时,气体流动称为亚临界流动;当  $p_1/p_0 \leq C_t$  时,气体流动称为超临界流动,取  $k = 1.4$ , 则  $C_t = 0.528$ 。电气比例阀是以电驱动阀芯的方式实现对流量的连续控制,当供气口压力和阀内温度不变时,可以将电气比例阀阀芯位移和输入电压等效成比例环节,可得

$$x_v = e_v u_v \quad (11)$$

式中:  $e_v$  为电气比例阀阀芯位移;  $u_v$  为输入电压。

#### 1.2.2 气缸建模

电气比例阀流出的气体流量为气缸气体输入量,根据能量守恒定律,气缸腔内流入和流出的气体质量流量等于腔内气体质量变化率,可得

$$\left. \begin{aligned} q_{m_a} &= \frac{dm_a}{dt} = \frac{d(\rho V_a)}{dt} \\ q_{m_b} &= \frac{dm_b}{dt} = \frac{d(\rho V_b)}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中:  $q_{m_a}$  为气缸无杆腔气体质量变化率;  $q_{m_b}$  为气缸有杆腔气体质量变化率;  $t$  为时间;  $V_a$  为气缸无杆腔体积;  $V_b$  为气缸有杆腔体积; 取  $k = 1.4$ 。

假设气体为理想气体,满足理想气体公式:

$$p_d = \rho R_0 T \quad (13)$$

式中:  $p_d$  为气缸内气体压力;  $\rho$  为气缸内气体密度;  $T$  为气缸内气体温度。

将式(13)代入式(12),可得

$$\left. \begin{aligned} q_{m_a} &= \frac{1}{R_0 T} \left( p_a \frac{dV_a}{dt} + \frac{V_a}{k} \frac{dp_a}{dt} \right) \\ q_{m_b} &= \frac{1}{R_0 T} \left( p_b \frac{dV_b}{dt} + \frac{V_b}{k} \frac{dp_b}{dt} \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

假设比例阀阀芯推动气缸向下移动,设  $A_a$  为气缸无杆腔接触面积,  $A_b$  为气缸有杆腔接触面积,气缸行程为  $l$ , 位移量为  $x$ ,  $x \in (-l/2, l/2)$ 。整理式(14)可得

$$\left. \begin{aligned} q_{m_a} &= p_a \dot{x} \frac{A_a}{R_0 T} + \dot{p}_a \frac{0.5l + x}{k R_0 T} \\ q_{m_b} &= -p_b \dot{x} \frac{A_b}{R_0 T} + \dot{p}_b \frac{0.5l - x}{k R_0 T} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

#### 1.2.3 气管建模

气体在进入气缸之前需要通过一段长度的气

管,假设不考虑伺服阀与气管处的流量损失,进入气缸的气体流量与伺服阀出口气体流量相等,根据 Sanville 流量公式,可得

$$q_i = K_1(p_1 - p_2) \quad (16)$$

$$K_1 = \frac{\rho_v D^2 A}{32\mu L} \quad (17)$$

式中: $q_i$ 为气管的气体质量流量; $\rho_v$ 为系统气体平均密度; $D$ 为气管内径; $\mu$ 为系统气体黏度系数; $A$ 为气管截面积; $L$ 为气管长度。

联立式(5)、式(15)、式(16)可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{p}_a &= \frac{-kp_a \dot{x} A_a + kR_0 TC_q W x_v p_0 H_0 \varphi \frac{K_1 p_a}{K_1 p_1 - q}}{0.5l + x} \\ \dot{p}_b &= \frac{kp_b \dot{x} A_b - kR_0 TC_q W x_v p_0 H_0 \varphi \frac{K_1 p_b}{K_1 p_1 - q}}{0.5l - x} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

### 1.2.4 压力传感器建模

压力传感器响应频率较高,可将其等效为比例环节,即

$$u_i = K_i F \quad (19)$$

式中: $u_i$ 为输出电压; $K_i$ 为电压增益; $F$ 为检测压力。

考虑到压力传感器输入与输出具有良好的线性关系,将其进行线性化处理,可得

$$F = K_n x_f \quad (20)$$

式中: $K_n$ 为压力增益; $x_f$ 为输出信号。

为了实现对恒力控制装置的系统控制,综合式(4)、式(5)、式(18)、式(20),假设状态变量分别为  $F = x_1, \dot{F} = x_2, p_a = x_3, p_b = x_4, x_v = u$ , 则控制系统状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= K_n(A_a x_3 - A_b x_4 - B\dot{s} - K_e y) \\ \dot{x}_3 &= \dot{p}_a \\ \dot{x}_4 &= \dot{p}_b \\ y &= x_1 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

## 2 恒力控制策略

机器人在修复高空风机叶片时,由于外界环境十分复杂,高空中会有风力等干扰,给整个打磨作业增加了难度。机器人在打磨过程中对末端位置进行控制的同时使用恒力控制装置对末端接触力进行修正,实现交互过程中的力控制和位置控制的分解,使得整个打磨过程在受到外部环境干扰的情况下仍可进行有效作业,完成高空风机叶片修复工作。

### 2.1 控制器设计

由恒力控制装置系统建模可知该伺服系统为三阶系统,为了提高力控制的精准度,本文设计了一种带有死区补偿和重力补偿的改进 ADRC 控

制器。该控制器系统框图见图4,自抗扰控制器主要由跟踪微分器、扩张状态观测器和线性状态误差反馈控制律三个主要部分组成。先采用跟踪微分器对输入信号  $x_d$  进行平滑过渡处理,得到力信号  $r_1$ 、微分  $r_2$  和二阶微分  $r_3$ ;再通过线性状态误差反馈控制律将输入的力误差  $e_1$ 、力微分误差  $e_2$  和力二阶微分误差  $e_3$  进行线性组合,并获得控制量  $u_0$ ;扩张状态观测器对打磨模型输出和系统总扰动进行状态观测,得到  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4$ , 其中,  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$  为期望信号补偿,  $\hat{x}_4$  为控制量  $u_0$  的补偿;  $u$  为控制信号,  $y$  为输出信号,  $\omega$  为系统干扰信号。实现打磨过程中对末端接触力误差进行估计与补偿,该算法对模型的依赖性较低,具有更高的稳定性和较强的鲁棒性,能实现更加精准的控制。

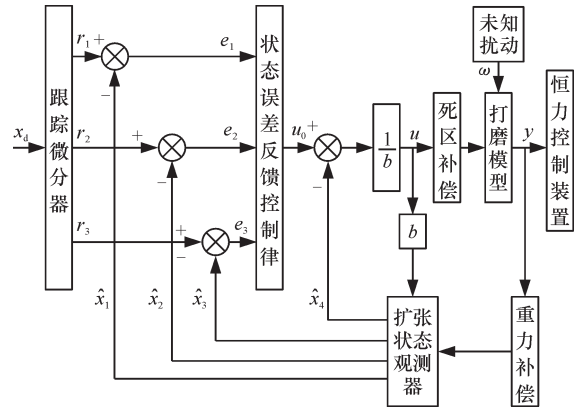


图4 控制系统框图

Fig.4 Control system block diagram

由状态方程式(21)可知该控制模型为三阶系统,为更进一步分析,将式(21)简化为一般状态方程:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 + b_1 u \\ \dot{x}_4 &= f(\eta_1 \dot{y}(t) + \eta_2 \ddot{y}(t) + \omega(t)) \\ y &= x_1 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中: $u$ 为控制系统输入; $y(t)$ 为控制系统输出; $f(\eta_1 \dot{y}(t) + \eta_2 \ddot{y}(t) + \omega(t))$ 为打磨系统总扰动; $\omega(t)$ 为打磨过程中的时变扰动; $\eta_1, \eta_2, b_1$ 为非零常数。

TD跟踪微分器的作用是对系统的期望输入进行过渡跟踪,在保证快速跟踪的前提下使输入信号的超调量更小,提高系统的稳定性。设计三阶跟踪微分器如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= r_2 \\ \dot{x}_2 &= r_3 \\ \dot{x}_3 &= -R^3 r_1 - 2R^2 r_2 - 3R r_3 + R^3 r(t) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中: $R$ 为跟踪速度因子; $R$ 值越大,跟踪输入信号的能力越强,但  $R$  值不能无限大,通常在一定区间内根据实际情况进行参数的调节,以满足跟踪性能要求。

扩张状态观测器是自抗扰算法的核心环节,根据控制量信号  $u$  和输出信号  $y$  得到期望信号的状态估计值  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$  和总扰动估计值  $\hat{x}_4$ 。由于本文被控制模型为三阶系统,故可建立以下四阶状态观测器:

$$\left. \begin{aligned} h &= \hat{x}_1 - y \\ \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + \beta_1 h \\ \dot{\hat{x}}_2 &= \hat{x}_3 + \beta_2 h \\ \dot{\hat{x}}_3 &= \hat{x}_4 + \beta_3 h + bu \\ \dot{\hat{x}}_4 &= \beta_4 h \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中:  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  分别为状态观测器的待整定增益参数;  $h$  为采样周期。

通过误差反馈控制律产生控制系统所需的控制量,对总扰动进行实时补偿,使用反馈线性化的方法将非线性系统转化为积分器串联型系统,其线性PD控制方程为

$$u_0 = \beta_5 e_1 + \beta_6 e_2 + \beta_7 e_3 \quad (25)$$

$$e_1 = r_1 - \hat{x}_1 \quad e_2 = r_2 - \hat{x}_2 \quad e_3 = r_3 - \hat{x}_3$$

式中:  $\beta_5, \beta_6, \beta_7$  为待整定的增益参数。

对于误差反馈控制律输出量  $u_0$ ,用扩张状态观测器给出的扰动估计值  $\hat{x}_4$  去补偿来确定最终的输出值:

$$u = u_0 - \hat{x}_4/b \quad (26)$$

式中:  $b$  为补偿扰动因子,为可调参数。

## 2.2 死区补偿器设计

死区补偿是为了使比例流量阀芯跳出中位死区从而快速进入控制区,根据不变性原理,若扰动能够被测出来,就有可能利用它来产生控制作用消除扰动。可将中位死区视为一种可以通过实验测得的扰动,则可设计死区补偿器如下:

$$u_f = \begin{cases} u + u_b & 0 < u \\ u & \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $u_f$  为被控对象输入电压;  $u_b$  为正向死区补偿电压。

## 2.3 重力补偿器

在机器人进行打磨工作时,空间姿态是实时变化的,受末端执行器的重力影响,力传感器采集到的打磨接触力有很大误差。因此,需设计重力补偿器,沿着力控制方向去消除末端执行器重力影响。末端执行器受力分析如图5所示,其中,  $mg$  为末端执行器的重力,  $F_d$  为力传感器所测的力,  $\theta$  为重力和力传感器所测的力之间的夹角。由受力分析可得

$$F_n = F_d + mg \cos \theta \quad (28)$$

式中:  $F_n$  为真实打磨接触力。

由式(28)可知,当机器人在打磨过程中  $F_d$  恒定但末端执行器倾角变化时,  $F_n$  是动态变化的,

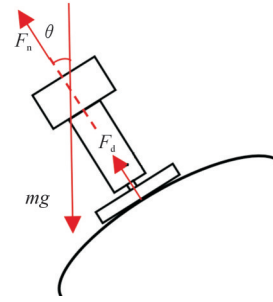


图5 末端执行器受力分析

Fig.5 Force analysis of end effector

所以需要系统进行实时的重力补偿以保持真实打磨接触力  $F_n$  的恒定。

## 2.4 参数整定

根据文献[22],  $R$  值通常在(10, 50)区间内根据实际情况进行调节,以满足跟踪性能要求。设  $\omega_0$  为扩张状态观测器带宽,  $\omega_c$  为控制器带宽,则根据极点配置法,有

$$(s + \omega_0)^4 = s^4 + \beta_1 s^3 + \beta_2 s^2 + \beta_3 s + \beta_4 \quad (29)$$

四阶线性状态观测器的参数可由观测器带宽表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= 4\omega_0 \\ \beta_2 &= 6\omega_0^2 \\ \beta_3 &= 4\omega_0^3 \\ \beta_4 &= \omega_0^4 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

LESF 参数整定办法如下:

$$\left. \begin{aligned} \beta_5 &= \omega_c^3 \\ \beta_6 &= 3\omega_c^2 \\ \beta_7 &= 3\omega_c \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

## 3 仿真分析

为了验证带有死区补偿和重力补偿的改进ADRC算法的有效性,通过MATLAB/SIMULINK进行仿真分析,与ADRC算法进行对比。系统中的主要参数分别为  $\omega_c = 12$ ,  $\omega_0 = 40$ ,  $b = 0.2785$ ,本文仿真采用正弦信号作为输入信号,末端执行器倾斜角度为  $20^\circ$ ,期望力  $F = 15 + 10\sin(1.257t)$ ,跟踪曲线和力跟踪误差曲线如图6所示。由图6可知,带有死区补偿和重力补偿的改进ADRC算法可以很好地跟踪输入信号和实时补偿末端执行器倾斜角度,而ADRC算法则会出现滞后现象,导致误差较大。因此,改进ADRC算法控制效果优于ADRC算法。

为了验证改进ADRC算法的力跟踪能力、动态响应能力和鲁棒性,与PID算法进行对比,为后续实验提供参考。考虑风机叶片的实际打磨需求,分别设置恒值加载、正弦波加载、三角波加载

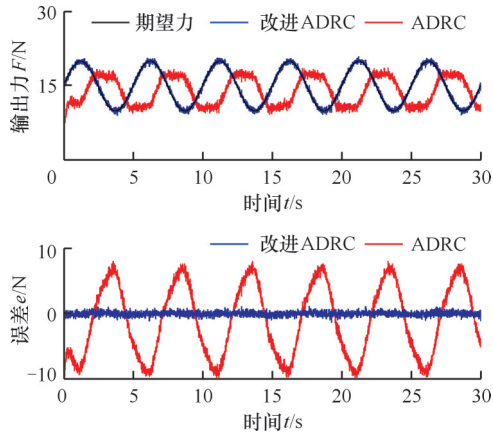


图6 改进ADRC算法对比

Fig.6 Comparison of improved ADRC algorithms

三组仿真分析,如图7所示。

图7的3个分图包含两部分:上半部分为输出力曲线,包括系统期望输出力曲线、PID控制输出力曲线和改进ADRC输出力曲线;下半部分为输出力误差曲线,包括在PID控制下与系统期望输出力差值曲线和在改进ADRC下与系统期望输出力差值曲线。为了更好地对两种控制方式进行量化对比,引入最大误差绝对值 $M_e$ 、误差均方值 $\mu_e$ 两组数据进行进一步的说明,计算公式如下:

$$M_e = \max_{i=1,2,\dots,N} \{|e(i)|\} \quad (32)$$

$$\mu_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [e(i)]^2 \quad (33)$$

式中: $e$ 为力跟踪误差; $N$ 为样本数量。

对上述数据进行整理,结果见表1。由表1仿真对比性能指标可得,改进ADRC算法在三组跟踪信号下最大误差绝对值和误差均方值均小于PID控制的相应值。因此,改进ADRC算法比PID算法有更好的同步控制精度和动态响应能力。

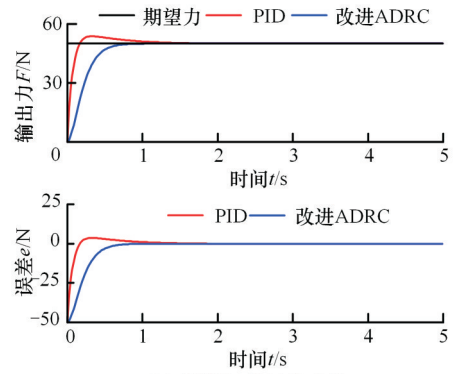
#### 4 实验验证

为了进一步验证改进ADRC算法在实际工作环境的应用,搭建试验台进行模拟工况实验,实验台如图8所示。高空风机叶片打磨机器人在打磨叶片过程中分两个步骤:一是对表面破损部位进行清理打磨,将表层破损物清理干净,方便后续喷涂专用修复材料;二是专用修复材料喷涂完成后对其进行表面处理。通过实验得出步骤一最佳

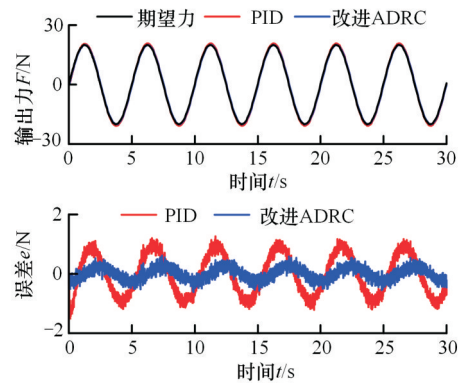
表1 仿真对比性能指标

Tab.1 Simulation comparison performance index

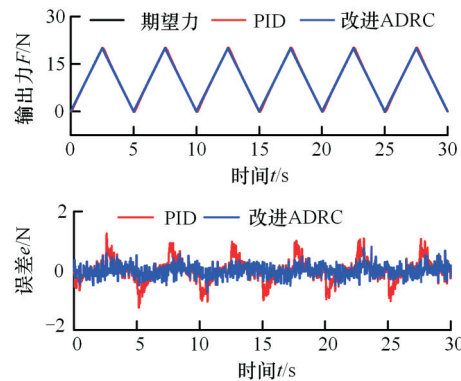
性能指标	PID			改进ADRC		
	恒值	正弦	三角	恒值	正弦	三角
最大误差绝对值 $M_e/N$	3.722	1.260	1.260	0.001	0.622	0.800
误差均方值 $\mu_e/N$	1.141	0.448	0.138	$6.498 \times 10^{-12}$	0.045	0.039



(a) 恒值加载对比曲线



(b) 正弦波加载对比曲线



(c) 三角波加载对比曲线

图7 仿真分析对比

Fig.7 Simulation analysis and comparison

接触力为50 N,步骤二最佳接触力为15 N,本文共设计以下4组实验:恒值加载、正弦波加载、三角波加载、恒值加载(干扰)。实验主要元器件与参数见表2。

恒值加载实验主要考验恒力控制装置在两种控制算法下的瞬态响应性能和调节时间,性能指标采用系统调节时间 $T_0$ (单位:s)、最大超调值 $M_p$ (单位:N)以及相对稳态后误差均方值 $\mu_e$ (单位:N)。

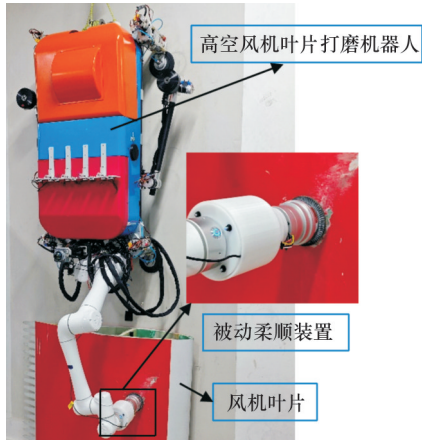


图8 试验台

Fig.8 Laboratory bench

表2 主要元器件与参数

Tab.2 Key components and parameters

元器件名称	参数
气源	最大输出压力:1.0 MPa
气动二联件	减压阀设置压力:0.9 MPa
电气比例阀	最高压力:0.9 MPa,精度:0.2%
气缸 倾角传感器	缸径:16 mm,行程:20 mm 量程:0~180°,分辨率:0.02°
压力传感器	量程:0~100 N,精度:0.1%

本实验根据步骤一和步骤二分别设定期望力  $F = 50\text{ N}$  和  $F = 15\text{ N}$ , 结果如图9所示, 数据整理见表3。在改进ADRC算法下, 步骤一系统调节时间由1.95 s下降到1.08 s, 缩短44.6%; 最大超调值由4.75 N减至0.12 N, 减小97.5%; 进入相对稳态后误差均方值由0.23 N下降到0.10 N, 减小56.5%。步骤二, 系统调节时间由1.05 s下降到0.51, 缩短51.4%; 最大超调值由3.5 N减至0.44 N, 减小87.4%; 进入相对稳态后误差均方值由0.38 N减至0.11 N, 减小71.1%。

正弦波加载实验检验的是控制系统的动态跟踪性能, 性能指标采用进入状态后最大误差绝对值  $M_e$  及误差均方值  $\mu_e$ , 本实验根据步骤一和步骤二分别设定期望力  $F = 50 + 10\sin(1.257t)$  和  $F = 15 + 5\sin(1.257t)$ , 结果如图10所示, 数据整理见表4。在改进ADRC算法下, 步骤一最大误差绝对值由4.05 N下降到1.24 N, 减小69.4%; 误差均方值由8.26 N下降到3.55 N, 减小57.0%。步骤二最大误差绝对值由1.96 N下降到1.07 N, 减小45.4%; 误差均方值由1.01 N下降到0.4 N, 减小60.4%。

三角波加载实验检验输入信号突变时控制系统的反应能力, 性能指标采用  $M_e$  及  $\mu_e$ , 本实验根据步骤一和步骤二分别设置三角波周期为5,

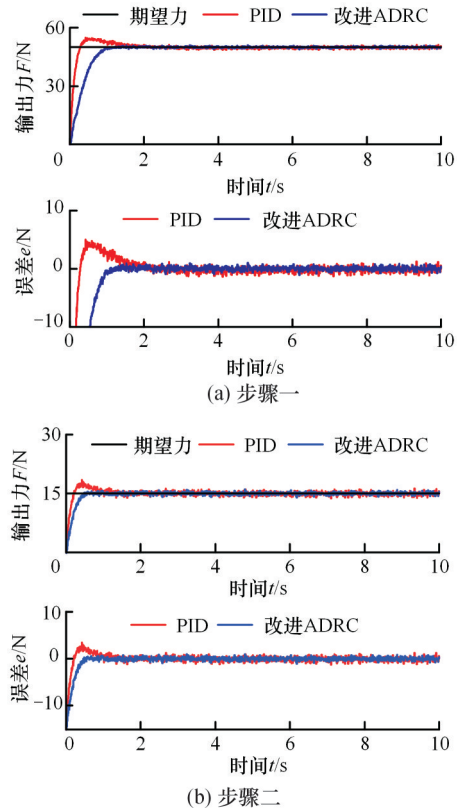


图9 恒力加载实验

Fig.9 Constant force load experiment

表3 恒力加载实验对比

Tab.3 Contrast of constant force load experiment

步骤	控制算法	$T_0/s$	$M_p/N$	$\mu_e/N$
步骤一	PID	1.95	4.75	0.23
	改进ADRC	1.08	0.12	0.10
步骤二	PID	1.05	3.50	0.38
	改进ADRC	0.51	0.44	0.11

振幅为20, 初值为40; 周期为5, 振幅为5, 初值为10, 结果如图11所示, 数据整理见表5。在改进ADRC算法下, 步骤一最大误差绝对值由3.56 N下降到1.16 N, 减小67.4%; 误差均方值由5.34 N下降到2.32 N, 减小56.6%。步骤二最大误差绝对值由1.91 N下降到1.03 N, 减小46.1%; 误差均方值由0.52 N下降到0.23 N, 减小55.8%。

恒值加载(干扰)实验模拟高空打磨叶片时风力扰动, 并进行两次完全反向的干扰加载, 主要目的是检验控制系统的抗干扰能力。性能指标采用系统调节时间  $T_1$ (单位:s)、 $M_e$  及  $\mu_e$ 。本实验根据步骤一和步骤二分别设定期望力为  $F = 50\text{ N}$  和  $F = 15\text{ N}$ , 结果如图12所示。步骤一数据整理见表6, 改进ADRC算法在干扰1下, 系统调节时间由0.68 s下降到0.54 s; 最大误差绝对值由5.58 N下降到1.89 N, 减小66.1%; 系统调节时间内的误

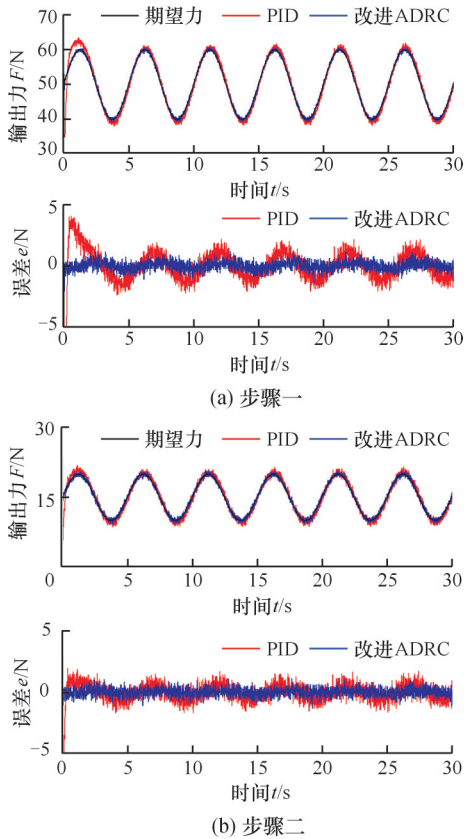


图 10 正弦波加载实验

Fig.10 Curve of sinusoidal load experiment

表 4 正弦波加载实验对比

Tab.4 Contrast of curve of sinusoidal load experiment

步骤	控制算法	$M_e/N$	$\mu_e/N$
步骤一	PID	4.05	8.26
	改进 ADRC	1.24	3.55
步骤二	PID	1.96	1.01
	改进 ADRC	1.07	0.40

差均方值由 9.94 N 下降到 1.05 N, 减小 89.4%。在干扰 2 下, 系统调节时间由 0.67 s 下降到 0.61 s; 最大误差绝对值由 5.33 N 下降到 1.69 N, 减小 68.3%; 系统调节时间内误差均方值由 9.85 N 下降到 0.87 N, 减小 91.2%。步骤二数据整理见表 7, 在干扰 1 下, 系统调节时间由 0.52 s 下降到 0.43 s;

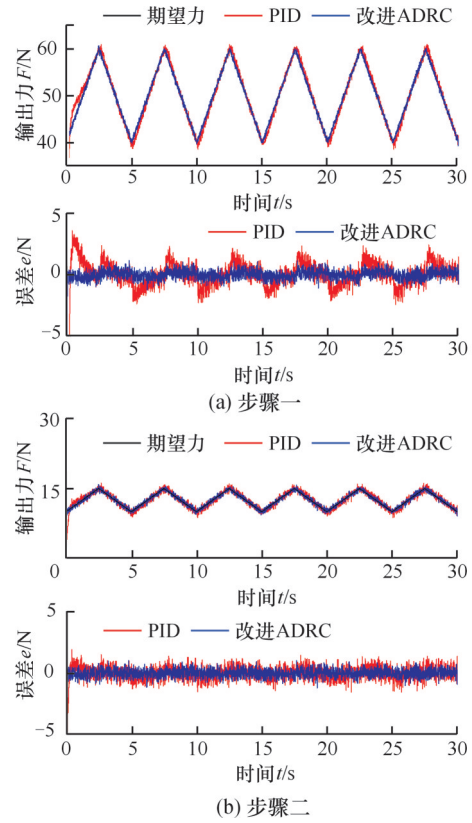


图 11 三角波加载实验

Fig.11 Curve of triangular load experiment

表 5 三角波加载实验对比

Tab.5 Contrast of curve of triangular load experiment

步骤	控制算法	$M_p/N$	$\mu_e/N$
步骤一	PID	3.56	5.34
	改进 ADRC	1.16	2.32
步骤二	PID	1.91	0.52
	改进 ADRC	1.03	0.23

最大误差绝对值由 2.92 N 下降到 1.07 N, 减小 63.4%; 系统调节时间内误差均方值由 1.84 N 下降到 0.6 N, 减小 67.4%。在干扰 2 下, 系统调节时间由 0.61 s 下降到 0.58 s; 最大误差绝对值由 2.45 N 下降到 1.21 N, 减小 50.6%; 系统调节时间内的误差均方值由 1.72 N 下降到 0.37 N, 减小 78.5%。

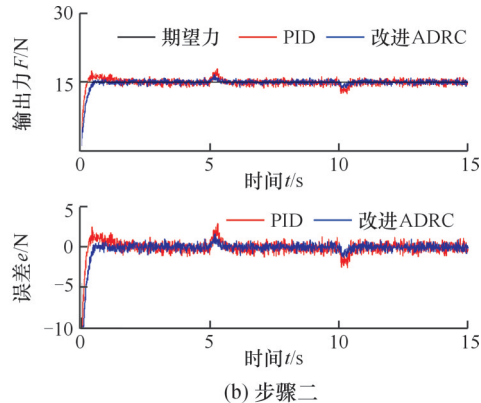
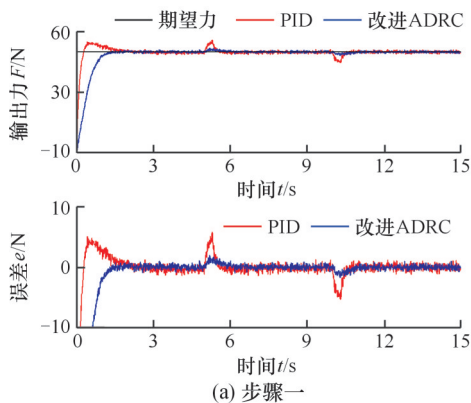


图 12 恒力加载实验(干扰)

Fig.12 Constant force load experiment(disturb)

表6 步骤一恒力加载实验对比

Tab.6 Step 1 contrast of constant force load experiment

	控制算法	$T_1/s$	$M_e/N$	$\mu_e/N$
干扰1	PID	0.68	5.58	9.94
	改进ADRC	0.54	1.89	1.05
干扰2	PID	0.67	5.33	9.85
	改进ADRC	0.61	1.69	0.87

表7 步骤二恒力加载实验对比

Tab.7 Step 2 contrast of constant force load experiment

	控制算法	$T_1/s$	$M_e/N$	$\mu_e/N$
干扰1	PID	0.52	2.92	1.84
	改进ADRC	0.43	1.07	0.60
干扰2	PID	0.61	2.45	1.72
	改进ADRC	0.58	1.21	0.37

分析上述针对打磨步骤一和步骤二分别进行的四组力加载实验结果可得,带有死区补偿和重力补偿的改进ADRC算法在系统调节时间、动态响应能力、抗干扰能力方面均优于PID控制算法,证明了该算法在高空风机叶片修复机器人末端打磨接触力控制时的有效性。

## 5 结语

本文针对机器人高空打磨风机叶片时会受未知风力扰动的问题,提出一种结合死区补偿算法和重力补偿算法改进ADRC算法的机器人被动柔顺控制算法。该算法充分融合死区补偿和重力补偿算法,不仅提高了控制系统的力跟踪性能,还具有极强的抗干扰能力,实现了高空风机叶片修复机器人末端打磨接触力的恒力控制。从实际工程应用角度出发,建立电气比例控制系统数学模型,对其进行恒值、正弦、三角形波三种力控制仿真,并在此基础上设计试验台进行进一步实验。仿真结果表明,改进ADRC算法较大程度地提高了被动柔顺装置的同步控制精度,改善了系统的动态响应性能。实验结果表明,改进ADRC算法在保持控制精度与动态响应能力的同时还具有极强的抗干扰能力和鲁棒性,为工程实际应用打下理论基础。

## 参考文献:

[1] 赵书强,吴博,李志伟,等. 风电-储能参与调频的高比例风电电力系统运行经济性分析[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 69-76.  
ZHAO Shuqiang, WU Bo, LI Zhiwei, et al. Operational Economic Analysis of High-proportion Wind Power System with Wind Power and Energy Storage Participating in Frequency Regulation[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 69-76.

[2] 汪泉,洪星,杨建忠,等. 低噪声风力机叶片气动外形优化设计[J]. 中国机械工程, 2018, 29(13): 1574-1579.  
WANG Quan, HONG Xing, YANG Jianzhong, et al. Aerodynamic Optimal Design of Low Noise Wind Turbine Blades[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(13): 1574-1579.

[3] 陶永,刘海涛,王田苗,等. 我国服务机器人技术研究进展与产业化发展趋势[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 56-74.  
TAO Yong, LIU Haitao, WANG Tianmiao, et al. Research Progress and Industrialization Development Trend of Chinese Service Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(18): 56-74.

[4] 张月,董雷,宦荣华,等. 风电叶片管道内窥履带机器人的设计与运动分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1884-1889.  
ZHANG Yue, DONG Lei, HUAN Ronghua, et al. Design and Kinematic Analysis of Crawler-type Pipeline Endoscope Robots for Wind Turbine Blades[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1884-1889.

[5] 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.

[6] 蒋再男,刘宏,黄剑斌,等. 基于阻抗内环的新型力外环控制策略[J]. 航空学报, 2009, 30(8): 1515-1520.  
JIANG Zainan, LIU Hong, HUANG Jianbin, et al. Novel Explicit Force Control Strategy Based on Impedance Inner Control[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(8): 1515-1520.

[7] 陈峰,费燕琼,赵锡芳. 机器人的阻抗控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005(12): 46-47.  
CHEN Feng, FEI Yanqiong, ZHAO Xifang. The Impedance Control Method for Robots[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2005(12): 46-47.

[8] 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.

[9] 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.
- [10] ZHANG Tie, YU Ye, ZOU Yanbiao. An Adaptive Sliding-mode Iterative Constant-force Control Method for Robotic Belt Grinding Based on a One-dimensional Force Sensor [J]. Sensors, 2019, 19(7): 1635.
- [11] DING Yufeng, MIN Xinpu, FU Weiwei, et al. Research and Application on Force Control of Industrial Robot Polishing Concave Curved Surfaces [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(6): 1674-1686.
- [12] 李小彭, 尚东阳, 陈仁桢, 等. 基于机械臂位姿变换的柔性负载伺服驱动系统控制策略 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(21): 56-69.
- LI Xiaopeng, SHANG Dongyang, CHEN Renzhen, et al. Control Strategy of Flexible Load Servo Drive System Based on Manipulator Position and Position Transformation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(21): 56-69.
- [13] 王品章, 田威, 曾致贤, 等. 叶片磨抛机器人力/位混合控制的设计与实现 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(11): 83-89.
- WANG Pinzhang, TIAN Wei, ZENG Zhixian, et al. Design and Implementation of Force/Position Hybrid Control for Blade Grinding and Polishing Robot [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(11): 83-89.
- [14] 张铁, 吴圣和, 蔡超. 基于浮动平台的机器人恒力控制研磨方法 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(5): 515-523.
- ZHANG Tie, WU Shenghe, CAI Chao. Constant Force Control Method for Robotic Disk Grinding Based on Floating Platform [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(5): 515-523.
- [15] XU Xiaohu, ZHU Dahu, ZHANG Haiyang, 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.
- [16] WEI Yuzhang, XU Qingsong. Design of a New Passive End-effector Based on Constant-force Mechanism for Robotic Polishing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 74: 102278.
- [17] CHEN Fan, ZHAO Huan, LI Dingwei, et al. Contact Force Control and Vibration Suppression in Robotic Polishing with a Smart End Effector [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57: 391-403.
- [18] DU Huapeng, SUN Yuwen, FENG Deyang, et al. Automatic Robotic Polishing on Titanium Alloy Parts with Compliant Force/Position Control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(7): 1180-1192.
- [19] 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.
- [20] MOHAMMAD A E K, HONG Jie, WANG Danwei. Design of a Force-controlled End-effector with Low-inertia Effect for Robotic Polishing Using Macro-mini Robot Approach [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 54-65.
- [21] 黄婷, 孙立宁, 王振华, 等. 基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法 [J]. 机器人, 2017, 39(6): 776-785.
- HUANG Ting, SUN Lining, WANG Zhenhua, et al. Hybrid Force/Position Control Method for Robotic Polishing Based on Passive Compliance Structure [J]. Robot, 2017, 39(6): 776-785.
- [22] 梁青, 王传榜, 潘金文, 等. 线性自抗扰控制参数  $b_0$  辨识及参数整定规律 [J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 1691-1695.
- LIANG Qing, WANG Chuanbang, PAN Jinwen, et al. Parameter Identification of  $b_0$  and Parameter Tuning Law in Linear Active Disturbance Rejection Control [J]. Control and Decision, 2015, 30(9): 1691-1695.

(编辑 陈勇)

作者简介: 李浩, 男, 1996年生, 硕士研究生。研究方向为特种装备机器人设计及动态性能。刘欣荣(通信作者), 男, 1987年生, 讲师。研究方向为特种装备机器人设计及动态性能、液压元件流固耦合特性、齿轮精密加工及动态性能。E-mail: lxr4849@126.com。

本文引用格式:

李浩, 刘欣荣, 刘仪沁, 等. 基于改进自抗扰控制的高空风机叶片打磨机器人被动柔顺控制方法研究 [J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1832-1841.

LI Hao, LIU Xinrong, LIU Yiqin, et al. Research on Passive Compliance Control Method of High Altitude Wind Turbine Blade Grinding Robots Based on Improved ADRC [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1832-1841.