

## 改进自抗扰控制器在 X-Y 平台恒力控制中的应用<sup>①</sup>

刘福才<sup>②\*</sup> 韩录<sup>\*\*</sup> 杜浩森<sup>\*\*\*</sup>

(\* 燕山大学智能控制系统与智能装备教育部工程研究中心 秦皇岛 066004)

(\*\* 燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

(\*\*\* 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

**摘要** 针对 X-Y 平台中模型误差和扰动未知等问题,本文以夹胶玻璃自动切膜为应用背景,设计自动切膜恒力控制系统,并对系统中的交互力进行分析与建模。提出了一种改进线性自抗扰(linear active disturbance rejection controller, LADRC)力控制器,将滑模控制嵌入到基于预报的线性跟踪微分器(tracking differentiator, TD)中,平衡滤波与相位滞后间的矛盾,利用分数阶比例微分(fractional order proportion differentiation, FOPD)快速响应跟踪力误差,并通过 Lyapunov 函数对改进线性跟踪微分器进行稳定性证明。通过与线性自抗扰进行比较,对所设计的控制器进行了仿真分析与实验验证。实验结果表明,当玻璃位置等参数发生变化时,基于改进跟踪微分器的线性自抗扰控制系统仍能较好地实现对切刀的交互力控制,有效保证切膜效果,证明了提出方法的有效性与实用性。

**关键词** 自动切膜; 线性自抗扰; 跟踪微分器; X-Y 平台; 恒力跟踪; 鲁棒性

作为智能制造系统中的重要组成部分, X-Y 平台一般包括伺服控制系统和机械传动结构, 在二维定位中应用广泛<sup>[1]</sup>。学者针对 X-Y 平台的高精度定位课题提出了大量控制策略<sup>[2-3]</sup>, 但基于受限 X-Y 平台的力控制策略研究较少。在切削等应用场景中, X-Y 平台与环境接触时产生的力会影响加工质量。在实现二维定位的同时, 需要保证工件所受的力在一定范围内。因此设计力控制器和运动控制模块相结合的伺服控制系统是提高加工质量的有效方案。

为实现接触力控制, Whitney<sup>[4]</sup> 提出了 2 种主要的方法, 即被动柔顺控制和主动柔顺控制。被动柔顺控制只能在小范围内保持低精度的接触力, 因此主动柔顺控制是主要研究趋势。Yan 等人<sup>[5]</sup> 提出了一种带低通滤波器的比例-微分(proportion differentiation, PD)型变增益开闭环迭代学习控制, 并通过

实验验证了这种控制策略可以减小系统的跟踪误差。侯伯杰等人<sup>[6]</sup> 针对 X-Y 工作台的力控制提出自适应模糊比例-积分-微分(proportion integration differentiation, PID)控制算法, 实时整定 PID 参数, 模糊控制顺应性强, 优化了跟踪精度和响应速度, 但未考虑扰动等不确定性因素。金鸿雁和赵希梅<sup>[7]</sup> 针对直驱 X-Y 平台伺服系统中的不确定性因素, 将互补滑模控制器与变增益交叉耦合控制器相结合, 提高了系统的鲁棒性。Xu 和 Sun<sup>[8]</sup> 通过引入评价交互性能的函数来平衡位置误差和力误差, 并基于迭代学习跟踪参考轨迹。An 等人<sup>[9]</sup> 设计的自适应阻抗控制器利用神经网络, 直接在线优化参数, 无需数据收集和训练。上述研究大部分需要实时调整 PID 参数, 对硬件算力要求较高, 工程应用受限。

韩京清<sup>[10]</sup> 提出的自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)降低了对被控对象

① 国家自然科学基金联合基金(U22A2050), 河北省自然科学基金(F2022203043)和省级重点实验室绩效补助经费项目(22567612H)资助。

② 男, 1966 年生, 博士, 教授; 研究方向: 空间机构运动特性分析与控制; 联系人, E-mail: lfc@ysu.edu.cn。  
(收稿日期: 2024-04-30)

数学模型的依赖,对扰动等具有鲁棒性。吴艳等人<sup>[11]</sup>将终端滑模控制与自抗扰控制相结合,利用非奇异终端滑模来设计非线性误差反馈律。ADRC 的稳定性研究主要采用 Lyapunov 方法,但 ADRC 与 Lyapunov 方法在问题设定上存在差异,导致处理外扰时遇到困难。而线性自抗扰(linear active disturbance rejection controller, LADRC)系统的稳定性与对象的参数有关,与内扰、外扰是否有界无关<sup>[12-14]</sup>。本文提出一种改进 LADRC,以夹胶玻璃自动切膜为应用背景,设计切膜伺服系统,进行 X-Y 平台的恒力控制方法研究。

## 1 系统描述与建模

### 1.1 自动切膜系统结构

自动切膜系统结构设计如图 1 所示,夹胶玻璃置于顶升旋转机构上,由切刀、夹具和 X-Y 运动系统组成。在夹具与切刀的接触面内嵌入力传感器,测量刀柄处承受的压力。X-Y 平台包括机械进给系统和驱动装置。X-Y 运动系统由伺服电机驱动,机械传动结构采用丝杠。由于薄膜硬度受环境温度影响较大,为了保证自动切膜精度及一致性,切膜过程中切刀与玻璃边缘之间压力必须基本稳定,因此基于 X-Y 平台的自动切膜系统恒力控制是保障切膜质量的重要环节。

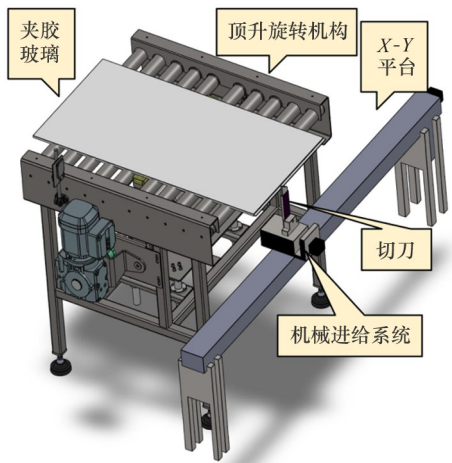


图 1 自动切膜系统结构设计

### 1.2 系统模型

#### 1.2.1 X-Y 运动系统模型

针对受限 X-Y 平台,充分考虑系统运行时的不

确定因素,建立自动切膜系统的动力学模型如下:

$$J\ddot{q} + B\dot{q} + F(\dot{q}) = \tau + f \quad (1)$$

式中: $\dot{q}, \ddot{q} \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$  分别表示速度、加速度矢量, $\mathbf{R}$  代表实数集; $\tau \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$  表示控制输入矢量; $J, B \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$  表示对角线性惯量矩阵和阻尼矩阵; $F(\dot{q}) \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$  表示非线性摩擦力矢量; $f \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$  表示不确定因素的非线性作用,如建模误差等。

由于机械进给系统是自动切膜系统的重要组成部分,选取  $x_1 = q_1$ , 根据式(1)建立机械进给系统的动力学模型,则机械进给系统的状态方程可由式(2)给出。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{f_1}{J_1} - \frac{b}{J_1}x_2 - \frac{F_1(x_2)}{J_1} + \frac{\tau_1}{J_1} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $J_1, b, f_1$  分别表示机械进给系统的惯量、阻尼系数和不确定因素的非线性作用, $\tau_1$  表示控制输入量, $\dot{x}_1$  和  $\dot{x}_2$  分别为状态变量  $x_1$  和  $x_2$  变化率, $y$  为系统的输出量。

#### 1.2.2 切刀模型

由于切刀的刀片具有弹性,刀片切膜时被玻璃边缘挤压,受到压力  $F_3$ 。刀片前进过程中需要克服摩擦力  $F_1$  以及薄膜对刀刃的阻力  $F_2$ , 如图 2 所示。

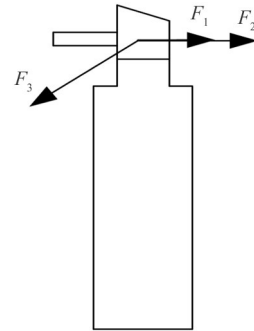


图 2 切刀受力分析

恒值力  $F_3$  的控制精度决定自动切膜系统的切膜效果,忽略摩擦力和阻力,将切刀等效为弹簧,玻璃通过切刀间接挤压力传感器,力传感器采集切刀的交互力  $F_3$ , 则交互力可由式(3)简化表达。

$$F_3 = k \times (x - x_e) \quad (3)$$

式中: $k$  为等效刚性系数, $x$  表示进给运动距离, $x_e$  表示切刀开始接触玻璃瞬间的进给运动距离。

由式(3)可知,切刀的模型函数为线性函数,保持切膜伺服系统运行轨迹不变,改变玻璃边缘与刀片的相对倾斜角度,使相对进给运动距离随着刀片前进而线性减小。通过实验验证了模型的合理性,实验结果如图 3 所示。

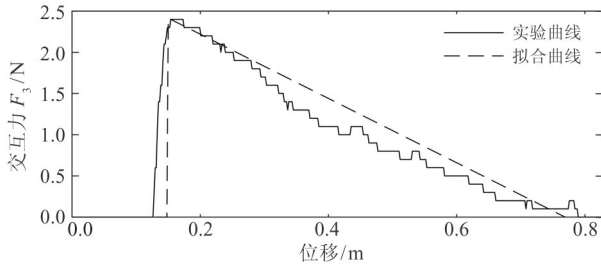


图 3 切刀模型拟合

图 3 中的实验曲线为切刀所受的交互力曲线。当玻璃边缘倾斜时,随着切刀前进,即切刀位移增大,相对进给运动距离线性递减,实验曲线近似恒定负斜率的直线,呈递减趋势,与拟合曲线的误差保持在合理范围内。因此,对切刀建模时,采用线性函数是合理的。

## 2 改进线性自抗扰控制器设计

在伺服电机驱动的 X-Y 平台加装力传感器,与外界环境进行信息交互。在阻抗控制的基础上,基于 LADRC 设计控制策略,并通过线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)对扰动进行补偿,控制系统框图如图 4 所示。

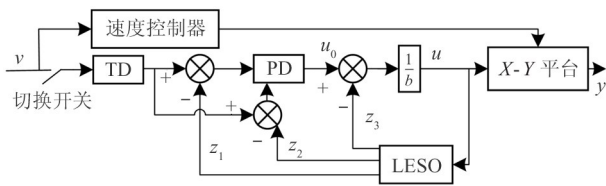


图 4 自动切膜系统控制框图

初始进给运动距离  $x_0$  的不确定性导致 LADRC 系统的初始误差值不确定,影响控制效果。本文采取分阶段控制策略,当切刀的压力值未达到阈值时,通过速度控制器使切刀以恒定速度靠近玻璃边缘。当切刀的压力值达到阈值时,基于改进 LADRC 的

力控制器开始作用。利用系统的简化状态方程设计力控制器,而简化状态方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = h - \frac{b}{m}x_2 + \frac{\tau_1}{m} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $h$  表示总扰动,  $m$  表示机械进给系统质量。

### 2.1 跟踪微分器设计

若提高观测器带宽,观测精度也会提高,扩张状态观测器(extended state observer, ESO)的收敛速度加快。提高控制器带宽,系统响应速度也会加快。但较高的观测器和控制器带宽值会增加系统对噪声的敏感性。降低输入信号的噪声污染是很有必要的。跟踪微分器(tracking differentiator, TD)可以对输入信号进行滤波,降低输入信号的噪声污染。同时,跟踪微分器安排系统的过渡过程。但 TD 会引起相位滞后,降低系统闭环控制带宽<sup>[15]</sup>。为了补偿滤波造成的损失,本文设计了基于预报思想的跟踪微分器。

线性跟踪微分器本质是一种双极点滤波器,不仅能对输入信号进行滤波,还能同时提取滤波信号的微分信号。双极点滤波器的阻尼比越低,低频时的相位滞后越小,超调越大。传统滤波器阻尼比等于 1,只关注滤波信号的平滑会引起较大相位滞后。传统线性跟踪微分器状态、方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = -2rx_2(t) - r^2(x_1(t) - v) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $r$  为线性跟踪微分器的关键设计参数,  $v$  为外部输入信号。

两步迭代“预报”方法的线性跟踪微分器设计思路是将滤波前一步的信号加上微分信号与预报步长的乘积作为对当前步跟踪微分器输入信号的逼近,再利用微分信号向前预报,逼近当前滤波器输出信号。其状态方程如式(6)所示。

$$\begin{cases} \bar{x}_1(t) = x_1(t) + k_1x_2(t) \\ \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = -2rx_2(t) - r^2(\bar{x}_1(t) - v) \\ y = x_1(t) + k_2x_2(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $k_1, k_2$  表示预报步长,  $\bar{x}_1(t)$  表示当前步跟踪

微分器输入信号的逼近值。相位延迟可以通过优化  $k_1, k_2$  得到补偿。

滑模控制响应速度快、抗扰动能力强。在满足切膜伺服系统滤波要求的前提下,为了进一步提高响应速度,本文将预报思想和滑模控制引入线性跟踪微分器。具体步骤可分为滑模面选取、控制律设计和稳定性证明。为满足滑模面条件:  $s = \dot{s} = 0$ , 选取如式(7)所示的滑模面。

$$s = c \times (\bar{x}_1(t) - v) + x_2(t) \quad (7)$$

式中:  $c > 0$  表示可调参数,  $s$  表示滑模面。

指数趋近律是常用的滑模趋近律,故基于如式(8)所示的指数趋近律设计本文的趋近律。

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - k \times s \quad (8)$$

符号函数  $\operatorname{sgn}(s)$  的不连续会引起抖振,为了消除抖振,采用  $\arctan(s/\varepsilon)$  代替符号函数。改进趋近律如式(9)所示。

$$\dot{s} = -a_1 \times \arctan(s/\varepsilon) - a_2 \times s \quad (9)$$

式中:  $a_1, a_2$  表示可调参数。

计算控制律,先将式(7)求导,得到式(10)。

$$\dot{s} = c \times x_2(t) + (c \times k_1 + 1)\dot{x}_2(t) \quad (10)$$

联立式(9)和(10)得到式(11)。

$$\dot{x}_2(t) = (-a_1 \arctan(s/\varepsilon) - a_2 s - c x_2(t)) / (c k_1 + 1) \quad (11)$$

联合式(6)和(11),可得到本文设计的跟踪微分器的表达式,如式(12)所示。

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1(t) = x_1(t) + k_1 x_2(t) \\ \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = (-a_1 \times \arctan(s/\varepsilon) - a_2 \times s - \\ \quad c \times x_2(t)) / (c \times k_1 + 1) \\ y = x_1(t) + k_2 x_2(t) \end{cases} \quad (12)$$

为了证明改进线性跟踪微分器的稳定性,选取常用的 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (13)$$

由式(13)求导得:

$$\dot{V} = s \dot{s} \quad (14)$$

将式(9)代入(14),得:

$$\dot{V} = -a_1 s \arctan(s/\varepsilon) - a_2 \times s^2 \quad (15)$$

由上式可知,  $V > 0, \dot{V} < 0$ , 因此本文设计的跟踪微分器的稳定性证明成立。

## 2.2 设计扩张状态观测器

作为自抗扰控制器核心的扩张状态观测器 ESO,影响着控制器的响应速度。同时,扩张状态观测器对扰动的估计能力制约着控制器的控制精度。扩张状态观测器如式(16)所示。

$$\begin{cases} e = y - z_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2 e + bu \\ \dot{z}_3 = \beta_3 e \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $z_1$  为 X-Y 平台输出信号的跟踪值;  $z_2$  为输出微分信号的观测值;  $z_3$  为总扰动的估计值;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  为可调增益参数,  $e$  为误差估计值;  $b$  为控制增益;  $u$  为控制器输出。

## 2.3 设计控制律

为了消除扰动,将改进线性跟踪微分器输出的滤波值  $y$  和微分信号  $x_2(t)$  分别与观测器的观测值  $z_1, z_2$  求差。线性状态误差反馈控制律 (linear state error feedback control law, LSEF) 将差值进行线性组合,如式(17)所示。

$$\begin{cases} u_0 = k_p (y - z_1) + k_d (x_2(t) - z_2) \\ u = u_0 - z_3 / b_0 \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $k_p, k_d$  为控制器参数,  $u$  为控制器输出,  $b_0$  为系统增益的估计值。

相较于传统 PID, 分数阶 PID (fractional order PID, FOPID) 灵活度高, 参数调节范围大, 响应速度快<sup>[16-17]</sup>, 因此本文引入分数阶 PD (fractional order proportion differentiation, FOPD)。分数阶微积分的算子  $D_t^a$  定义如式(18)所示。

$$D_t^a = \begin{cases} \frac{d^a}{dt^a} R_e(a) > 0 \\ 1 R_e(a) = 0 \\ \int_a^t (d\tau) (-a) R_e(a) > 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $R_e(a)$  表示分数阶微积分算子阶次  $a$  的实部。

基于分数阶 PD <sup>$\mu$</sup>  的控制器为

$$u(t) = k_p e_1(t) + k_d D_t^\mu e_2(t) \quad (19)$$

式中:  $e_1(t)$  为误差信号,  $e_2(t)$  为误差微分信号。

$$\begin{cases} u_0 = k_p(y - z_1) + k_d D^u(x_2(t) - z_2) \\ u = u_0 - z_3/b_0 \end{cases} \quad (20)$$

为了提高控制器对误差的灵敏度,选取误差平方差,由式(20)可得式(21)。

$$u_0 = k_p(y^2 - z_1^2) + k_d D^u(x_2(t) - z_2) \quad (21)$$

式中:  $y^2 - z_1^2 = (y + z_1)(y - z_1)$ , 当  $z_1$  较大时,超调增大,为了抑制超调,引入权重系数  $\gamma$ , 当  $y$  到达阈值后,权重系数开始作用,如式(22)所示。

$$u_0 = \begin{cases} k_p(y - z_1)(y + \gamma z_1) + \\ k_d D^u(x_2(t) - z_2) z_1 > c \\ k_p(y - z_1)(y + z_1) + \\ k_d D^u(x_2(t) - z_2) z_1 \leq c \end{cases} \quad (22)$$

式中:阈值  $c$  为定值常数。

针对本文设计的自动切膜系统,采用有限记忆数字实现法<sup>[18]</sup>。记忆长度越长,近似效果越好。利用 Grunwald-Liouvilier 进行离散,如式(23)~(25)所示。

$$u(k) = k_p e(k) + k_d h^{-u} \sum_{j=0}^{N(t)} q_{u,j} e(m-k) \quad (23)$$

$$N(t) = \min\left\{\left\lceil \frac{L}{h} \right\rceil, \left\lceil \frac{t}{h} \right\rceil\right\} \quad (24)$$

$$q_{u,j} = (-1)^j \left(1 - \frac{1+u}{j}\right) q_{u,j-1} \quad (25)$$

式中:  $h$  为采样时间,  $q_{u,0} = 1$ ,  $N(t)$  表示计算步数,  $L$  表示记忆长度。

在确保近似效果的前提下,为了减少计算量,选取小于  $t$  的记忆长度。扫描周期的不确定性等因素无法始终保证  $L \leq t$ , 将记忆长度设为变量,误差值更新时,记忆长度更新,如式(26)所示。

$$L_k = L_{k-1} + 1, k = 1, 2, 3 \dots \quad (26)$$

### 3 仿真与实验研究

#### 3.1 仿真研究

##### 3.1.1 跟踪微分器仿真研究

为了检验本文设计的改进线性跟踪微分器的性能,本文在 Matlab/Simulink 中将改进线性跟踪微分器与传统线性跟踪微分器对比研究。输入信号为阶跃信号,阶跃值设为 8。传统线性跟踪微分器参数为:  $r = 40$ , 为减小参数差异对实验结果的影响,改

进线性跟踪微分器的参数:  $c = a_1 = a_2 = 40, k_1 = 0.0015, k_2 = 0.0300$ 。仿真结果如图 5 所示。

不同跟踪微分器的输出情况如图 5 所示,其中,改进 TD 作用下的输出信号跟踪上期望值需要 0.10 s 左右,TD 的输出值跟踪上期望值需要 0.15 s 左右。因此改进 TD 响应速度更快,可以补偿滤波带来的损失。

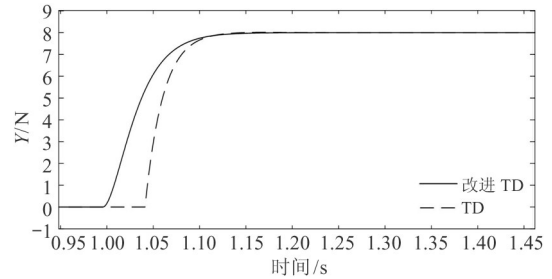


图 5 改进 TD 和 TD 对比

为了测试本文跟踪微分器的滤波效果,引入白噪声,噪声的能量值设为 0.1,采样时间设为 0.01 s,种子为 [1 2 2 2 1]。期望信号为阶跃信号,期望值为 8,仿真实验结果如图 6 所示,实验结果表明改进 TD 的滤波效果满足切膜伺服系统的控制要求。

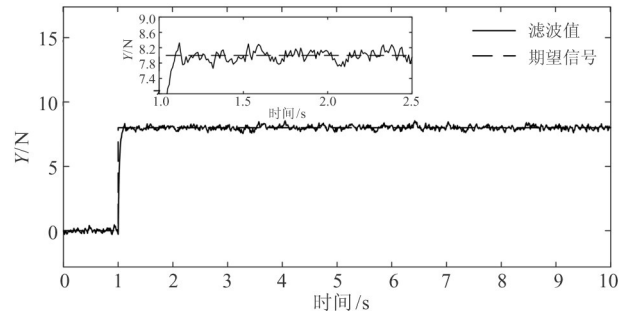


图 6 改进 TD 滤波效果图

##### 3.1.2 控制方法仿真研究

为了验证本文控制方法的力控制效果,在 Matlab/Simulink 中搭建了 2 种控制模型:(1)基于 LADRC 的 X-Y 平台的力控制系统;(2)基于改进 LADRC 的 X-Y 平台的力控制系统。利用分数阶工具箱实现改进 LADRC 中的分数阶控制律,仿真模型结构框图如图 7 所示,平台位置和速度的修正量分别为  $u_p, u_v$ , 以  $\tau_f$  作为力控制器的输出。以  $X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d$  分别作为平台的期望位置、期望速度、期望加

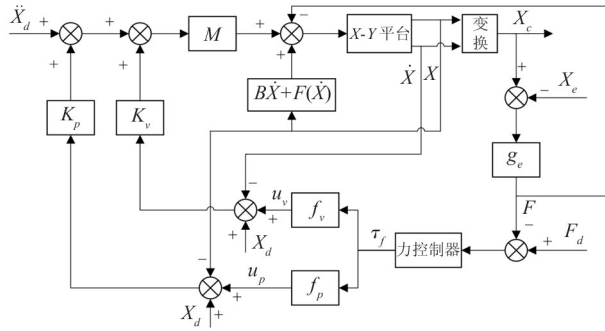


图 7 仿真框架图

速度,  $F_d$ 、 $F$  分别表示期望力、实际力。

仿真时,假设未知非线性作用  $f = 0.5\sin(x_2)$ , 非线性摩擦力  $F_1 = 2\cos(x_2) + \sin(x_2)$ 。位置环的  $k_p$  和  $k_v$  分别设计为 1 和 20。X-Y 平台模型参数如表 1 所示。基于仿真模型结构框图,在 Matlab/Simulink 中利用 S 函数搭建仿真模型,并设计 2 种力控制器,分别为 LADRC 控制器和改进 LADRC 控制器。LADRC 控制器的控制器带宽  $w_c = 40$ , 观测器带宽  $w_0 = 160$ , 观测器增益矩阵  $L = [3w_0 \quad 3w_0^2 \quad w_0^3]$ , 补偿系数  $b_0 = 1000$ , TD 的速度因子  $r = 14$ 。针对改进 LADRC,改进 TD 参数为:  $c = a_1 = a_2 = 14$ ,  $k_1 = 0.025, k_2 = 0.030$ ; 改进控制律的参数为:微分阶次  $u = 0.25$ , 阈值  $c = 2.50$ , 权重系数  $\gamma = 0.08$ , 比例增益  $k_p = 160$ , 其余参数和 LADRC 的参数相同。为了检验改进 LADRC 控制器的恒力跟踪效果,将改进 LADRC 和 LADRC 进行仿真实验。

表 1 X-Y 平台模型参数

质量 $m$	阻尼系数 $b$	环境等效刚度 $ge$
8 kg	$0.5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$80 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

两种控制器的恒力跟踪效果如图 8 所示,其中,基于 LADRC 的仿真系统在 1.4 s 左右达到平衡,基于改进 LADRC 复合控制策略的仿真系统在 1.3 s 左右达到平衡。因此基于改进 LADRC 的控制策略对误差更灵敏。

为了验证基于改进 LADRC 复合控制算法抗干扰能力,在  $t = 7 \sim 8$  s 时,引入负载扰动,扰动信号为方波信号,幅值设为 15.0 N,仿真结果如图 9 所示。由图 9 可以看出,当系统受到干扰时,不同力控制器

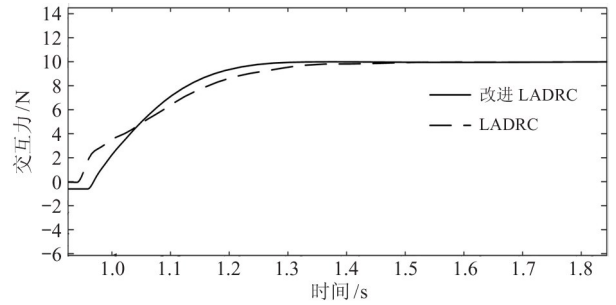


图 8 力控制器恒力跟踪

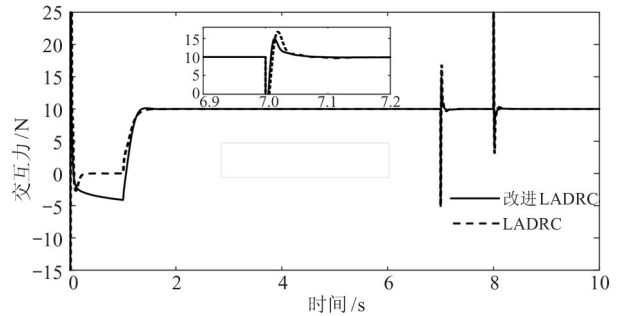


图 9 扰动下的力控制器对比

作用下的 2 个系统重新达到稳定状态所需的时间几乎相同,但基于 LADRC 的力跟踪曲线的最大值与最小值的误差为 21.8 N,而基于改进 LADRC 的力跟踪曲线的最大值与最小值的误差为 20.0 N。由仿真结果可知,相较于传统 LADRC,基于改进 LADRC 的力控制器能有效补偿滤波引起的相位延迟,具有较强的抗干扰能力。

### 3.2 实验验证

基于 X-Y 平台的自动切膜系统核心控制器采用汇川可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) H5U,通过 EtherCAT 通信协议控制驱动装置和机械进给系统。编程软件采用汇川 PLC 编程软件 Autoshop,该软件支持多种编程语言。触摸屏 IT7000 作为上位机,实时监控系统运行参数,通过 EtherNET 与控制器通信。数字变送器采用 RS485 协议,将力传感器测得的数值传送到 PLC。

实验时,在 Autoshop 中实现控制算法。本文基于阻抗控制策略,通过位置轴控指令控制位置,根据切刀模型,间接控制切刀的交互力。上位机可以实时显示交互力曲线。实验平台如图 10 所示。经大量实验发现,当切刀的交互力大于等于 18.0 N 时,切膜效果达到工艺要求。由于仿真模型与切膜系统

的实际模型存在差异等因素, Autoshop 中的控制算法的参数与仿真参数并不完全相同。控制器的参数如表 2 所示。切膜力控实验过程分为 2 个阶段, 第 1 阶段为切刀和玻璃直接接触, 切刀未接触薄膜; 第 2 阶段为切刀沿着玻璃边缘切割薄膜。

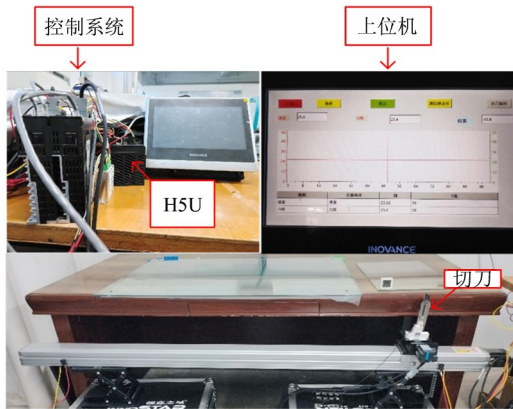


图 10 自动切膜实验平台

表 2 控制器参数

LADRC		改进 LADRC	
TD	$r = 40$	改进 TD	$c = a_1 = a_2 = 40$
			$k_1 = 0.008$
			$k_2 = 0.008$
LESO	$w_0 = 30$	LESO	$w_0 = 30$
	$\beta_1 = 3$		$\beta_1 = 3$
	$B_2 = 3$		$B_2 = 3$
	$B_3 = 1$		$B_3 = 1$
LSEF	$b_0 = 5$	改进 LSEF	$u = 0.001$
	$k_p = 16$		$c = 25$
	$k_d = 3.2$		$t = 0.01$
			$k_p = 0.04$
			$k_d = 4$

为了验证恒力控制应用于夹胶玻璃切膜的合理性, 探索人工切膜时的交互力。由图 11 可知, 人工切膜时, 切刀所受压力保持在一定范围内, 可近似认为恒定。

设置 a、b、c、d 这 4 组实验, a 组实验验证 2 种力控制器空载时的性能, 即玻璃中间不放置薄膜。其余 3 组实验检验不同控制器切膜时的力控效果, 但这 3 组实验的工况并不完全相同。为检验玻璃位置发生改变时力控制器的稳定性, b、c、d 这 3 组切膜实验中的玻璃相对于 X-Y 平台 X 轴的倾斜方向分

别为平行、内倾和外倾。实验结果如图 12 所示。

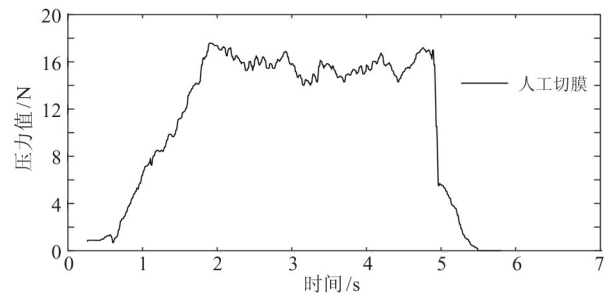
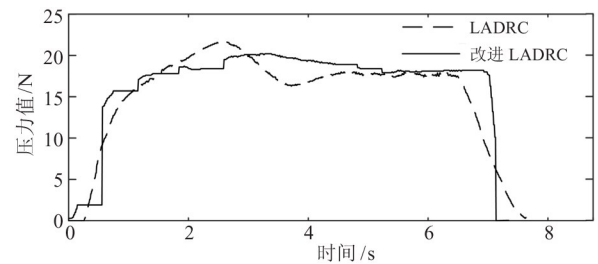
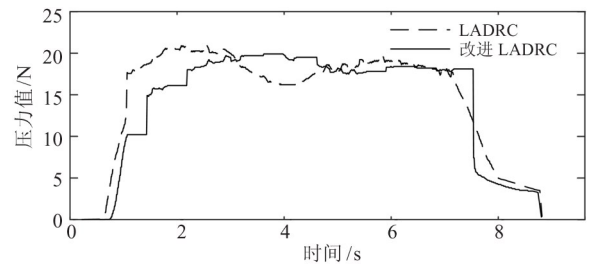


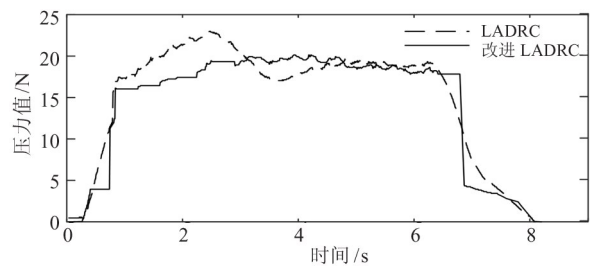
图 11 人工切膜力监测曲线



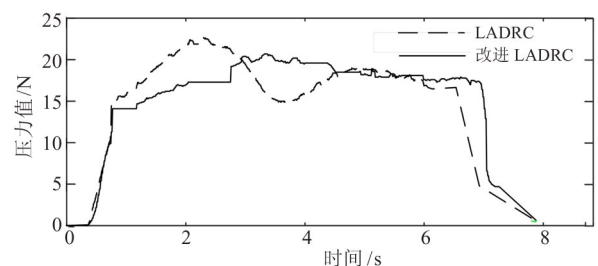
(a) 玻璃水平时空载



(b) 玻璃水平时切膜



(c) 玻璃内倾时切膜



(d) 玻璃外倾时切膜

图 12 两种力控制器的力响应曲线

图 12 中实验数据为 AutoShop 中导出的 Trace 数据,由于力传感器误差等因素影响,实验曲线和仿真曲线存在一定差异,但其变化趋势与仿真结果基本相符。当切刀的交互力远小于 18 N 时,切膜效果无法保证,而交互力过大会导致刀刃磨损。因此,当交互力的值为 17 ~ 21 N 时,切膜伺服系统达到稳定状态。由图 12 可知,在 LADRC 控制器作用下的切膜系统的调节时间为 0.5 s 左右,而在改进 LADRC 作用下的系统的调节时间为 0.1 s 左右。切膜初始阶段时 2 种工况的切换会给系统带来较大扰动。为了定量分析不同控制器的抗扰动能力,定义 2 个参数  $P_1$  和  $P_2$  分别表示 LADRC 和改进 LADRC 实验曲线的第 1 个波峰值与第 1 个波谷值的差值(若没有明显波谷,则视第 1 个大于 17 N 的数值为波谷值)。求取 b、c、d 这 3 组实验曲线的  $P_1$  和  $P_2$  值,如表 3 所示。

表 3 干扰指标对比

实验组	$P_1/N$	$P_2/N$
b	4.7	2.4
c	5.7	3.9
d	7.6	3.3

由表 3 可知,随着玻璃边缘相对于 X-Y 平台相对位置的改变,  $P_1$  和  $P_2$  也发生改变,3 组实验中,b 组实验的  $P_1$  和  $P_2$  最小,说明针对异形玻璃,设计鲁棒性强的控制算法是很有必要的。但 3 组实验的  $P_2$  始终小于  $P_1$ ,说明相较于 LADRC 控制算法,改进 LADRC 控制算法具有较好的鲁棒性。因此,通过实验验证了改进 LADRC 控制算法在复杂工况中的优越性。

## 4 结论

针对基于 X-Y 平台的自动切膜系统存在不确定性因素及外部扰动、传统线性跟踪微分器的滞后及线性自抗扰控制器抗干扰能力有限的问题,本文提出了一种改进 LADRC 力控制器,将滑模控制嵌入到基于预报的线性跟踪微分器,平衡滤波与相位滞后间的矛盾,利用分数阶 PD 快速响应跟踪力误差。

为了验证提出的控制策略的有效性与实用性,设计了夹胶玻璃自动切膜实验平台,并对切膜系统的交互力进行建模,通过仿真和实验验证所设计控制器的性能,本文研究的结论如下。

(1) 针对切膜伺服系统的切刀,利用胡克定律对切刀模型进行线性化是合理的。

(2) 对传统线性跟踪微分器 TD 的相位损失和控制器比例增益固定的问题进行了改进,通过 Lyapunov 函数检验改进线性跟踪微分器的稳定性,改进力控制器对误差反应更灵敏。

(3) 基于改进 LADRC 的力控制器可以抑制 X-Y 平台系统工况变化等不确定因素带来的干扰,从而增强系统的鲁棒性。

## 参考文献

- [1] 周书华, 张文辉, 季晓明, 等. 不确定性 X-Y 定位平台自学习控制研究[J]. 机械设计与制造, 2013(11): 95-97.
- [2] IWASAKI M, NAGAI Y, KAWAFUKU M, et al. GA-based practical auto tuning for fast and precise positioning controller[J]. IEEJ Transactions on Industry Applications, 2005, 125(6): 608-615.
- [3] DU Q, XIONG Q, LIU W, et al. Contour error control of X-Y motion platform based on robust predictive [C] // 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications. Wuhan, China: IEEE, 2021: 1-6.
- [4] WHITNEY D E. Historical perspective and state of the art in robot force control[J]. International Journal of Robotics Research, 1987, 6(1): 3-14.
- [5] YAN H, JIA D P, ZHANG T, et al. Application of iterative learning control in X-Y precision planar motion Platform [C] // 2021 China Automation Congress. Beijing, China: IEEE, 2021: 2761-2766.
- [6] 侯伯杰, 张五臣, 高一鸣. X-Y 平台的模糊 PID 力/位置混合控制[J]. 机械设计与制造, 2020(6): 163-165.
- [7] 金鸿雁, 赵希梅. 直驱 XY 平台变增益交叉耦合互补滑模轮廓控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 42-47.
- [8] XU Q, SUN X. Adaptive impedance control of robots with reference trajectory learning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 104967-104976.
- [9] AN H, YE C, YIN Z, et al. Neural adaptive impedance

- control for force tracking in uncertain environment [J]. *Electronics*, 2023,12(3):640.
- [10] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. *控制与决策*, 1998,13(1):19-23.
- [11] 吴艳, 王丽芳, 李芳. 基于滑模自抗扰的智能车路径跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2019,34(10):2150-2156.
- [12] 金辉宇, 朱子毅, 兰维瑶. 二阶线性自抗扰控制系统的内部稳定性[J]. *控制与信息技术*, 2020,(2):8-11.
- [13] ALI B, HAERI M. Linear active disturbance rejection control from the practical aspects [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018,23(6):2909-2919.
- [14] HUANG Y, XUE W. Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis [J]. *ISA Transactions*, 2014,53(4):963-976.
- [15] 张敏捷, 杨雷, 侯砚泽, 等. 线性自抗扰控制器的噪声抑制改进研究[J]. *宇航学报*, 2019,40(7):803-810.
- [16] BUSHRA H, INAM-UL-HASSAN S, AHSAN A. Fractional-order PID controller (FOPID)-based iterative learning control for a nonlinear boiler system[J]. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 2019,38(4):885-900.
- [17] JAN A Z, KEDZIA K, ABBASS M J. Iterative learning control based fractional order PID controller for Magnetic Levitation System [J]. *Energies*, 2023,16(3):1045-1045.
- [18] VARGA B, TAR J K, HORVÁTH R. Fractional order inspired iterative adaptive control[J]. *Robotica*, 2024,42(2):482-509.

## Application of improved active disturbance rejection controller in constant force control of X-Y platform

LIU Fucui<sup>\*\*</sup>, HAN Lu<sup>\*\*</sup>, DU Haosen<sup>\*\*\*</sup>

(\* Yanshan University Intelligent Control System and Intelligent Equipment Engineering Research Center of the Ministry of Education, Qinhuangdao 066004)

(\*\* Hebei Provincial Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(\*\*\* School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

### Abstract

In the context of automatic film cutting for laminated glass on the X-Y platform, where issues such as model errors and unknown disturbances exist, this paper designs the automatic film cutting constant force control system and analyzes and models the interaction force in the system. An improved linear active disturbance rejection controller (LADRC) is proposed, which integrates sliding mode control into the prediction-based linear tracking differentiator (TD). This approach balances the conflict between filtering and phase lag, employs fractional order proportion differentiation (FOPD) for rapid response to tracking force errors, and proves the stability of the improved linear TD using the Lyapunov. Finally, through simulation analysis and experimental verification, and compared with the traditional LADRC, it is demonstrated that the control system based on the improved TD can effectively manage the interaction force on the cutter even when parameters such as the glass position change, ensuring a good film cutting effect. This confirms the effectiveness and practicality of the proposed method.

**Key words:** automatic film cutting, linear active disturbance rejection, tracking differentiator, X-Y platform, constant force tracking, robustness