

文章编号 1004-924X(2024)16-2504-09

压电平台高精度自适应分数阶滑模跟踪控制

孙明超¹, 彭佳琦², 宋悦铭^{1*}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 动态光学成像与测量全国重点实验室,
吉林 长春, 130033;
2. 陆军装备部, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了实现压电平台高精度指令跟踪控制, 针对其存在的严重迟滞问题, 本文提出了一种自适应分数阶滑模跟踪控制方法。首先, 根据 Duhem 模型结构将分数阶算子和自适应律引入到滑模面的设计过程中, 增加滑模面的自由度可变性并实现了滑模面参数的自适应调节; 其次, 利用不确定和干扰估计方法代替传统的滑模控制器切换项, 解决了滑模控制器存在的抖振问题并提高了控制器的鲁棒性。最后, 通过压电平台指令跟踪控制实验结果表明: 相较于 PID 和传统的滑模控制方法, 提出的自适应分数阶滑模控制器的指令跟踪误差减小了 80% 以上, 在 50 Hz 参考指令信号下自适应分数阶滑模控制器将压电平台的平均跟踪误差降低到 0.41 μm 。因此, 自适应分数阶滑模控制方法具有更加优越的跟踪性能。

关键词: 压电平台; 迟滞非线性; 自适应控制; 分数阶; 滑模控制

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243216.2504

High-precision adaptive fractional order sliding mode tracking control for piezoelectric platform

SUN Mingchao¹, PENG Jiaqi², SONG Yueming^{1*}

- (1. State Key Laboratory of Dynamic Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Army Armaments Department, Changchun 130022, China)
* Corresponding author, E-mail: songym525@sina.com

Abstract: To realize the high-precision command tracking control of the piezoelectric platform, an adaptive fractional order sliding mode tracking control method was proposed in this paper to address the serious hysteresis problems. At first, the fractional order operator and adaptive law based on the Duhem model were introduced into the design of the sliding mode surface. It increased the degree of freedom variability of the sliding mode surface and achieved the adaptive adjustment of parameters. Next, an uncertainty and disturbance estimation technique was proposed to replace the traditional switching term of the sliding mode controller, which solved the chattering problem of the sliding mode controller and improved its robustness. Finally, the experimental results of the command tracking control of the piezoelectric platform show that compared with traditional PID and sliding mode control method, the tracking error of the adaptive frac-

收稿日期: 2024-04-26; 修订日期: 2024-06-28.

基金项目: 吉林省与中国科学院科技合作高新技术产业化专项项目 (No. 2024SYHZ0009)

tional order sliding mode controller has decreased by more than 80%, and the root mean square tracking error of the piezoelectric platform based on adaptive fractional order sliding mode controller is reduced to 0.41 μm under the reference command signal at 50 Hz. Therefore, the adaptive fractional order sliding mode controller has more superior tracking performance.

Key words: piezoelectric platform; hysteresis nonlinear; adaptive control; fractional order; sliding mode control

1 引 言

压电平台具有响应速度快、惯量小、体积小、可靠性强等优点,在航空成像、微纳定位及生物医学等领域具有广泛应用^[1-2]。然而,压电陶瓷材料本身存在严重的迟滞非线性,导致以压电陶瓷材料为核心部件的压电平台的控制精度受到严重的损害,为此要实现高精度的压电平台控制,需要克服迟滞非线性特性对平台性能的影响。为此,国内外研究学者对压电平台的迟滞建模和控制方法展开了深入的研究。

目前,常用的迟滞模型主要包括:Bouc-Wen模型^[3]、Duhem模型^[4]、Prandtl-Ishlinskii (PI)模型^[5-6]、Krasnosel'ski-Pokrovskii (KP)模型^[7]等。由于PI、KP等算子类建模方法存在计算量大的问题,在实际工程中应用较少。Duhem模型因其函数表达式明确、计算量少、建模精度较高被广泛用来描述压电执行器的迟滞特性。目前工程中最常用的是PID控制以及一些改进PID算法。此外,很多学者针对压电平台的迟滞问题提出了一些有效的非线性控制方法,例如:滑模控制、鲁棒控制、自适应控制、自抗扰控制和智能控制等^[8-11]。

文献[12]提出了一种鲁棒自适应控制方法,有效地解决了控制器的参数设计和鲁棒性问题。但是该方法设计过程复杂。文献[13]结合自抗扰控制的思想,针对压电执行器的迟滞问题,将其作为系统的扩张状态,提出了一种自抗扰控制方法,实现了对压电执行器的高精度控制。文献[14]基于Bouc-Wen模型提出一种带干扰估计的滑模控制方法,实现了对压电微定位平台的高精度控制。但是该方法滑模面的参数需要反复地试验,滑模面的设计自由度缺乏灵活性。文献[15]设计了一种相位超前PI反馈控制结合滑模

前馈控制的复合控制器,提高了全簧片式空间大行程并联柔性微定位平台的定位精度。

近年来滑模控制和自适应控制结合的研究在压电平台中取得了较大的进展。文献[16]提出了一种有限时间收敛的自适应滑模控制方法,在提高压电平台的跟踪精度上取得了显著的效果。文献[17]提出了一种与系统初始状态无关的固定时间收敛的自适应滑模控制方法,解决了系统初始状态影响跟踪性能的问题。文献[18]提出一种结合分数阶滑模面和新型双幂次趋近律的分数阶滑模跟踪控制方法,在不同负载下实现了压电定位平台的高精度跟踪控制。可见分数阶的滑模设计方法比传统滑模具有更广泛的调节空间。

综上所述,滑模控制对于压电平台的非线性迟滞问题具有较好的抑制效果,此外,自适应控制的动态调节能力特别适用于抑制迟滞非线性补偿的残余影响。因此,本文针对滑模控制中滑模面参数和自由度问题,结合自适应理论和分数阶理论展开研究,设计适用于工程应用的控制器。具体地,本文基于Duhem模型提出了一种自适应分数阶滑模控制(Adaptive Fractional Order Sliding Mode Control, AFOSMC)方法实现对压电平台的高精度指令跟踪。首先根据Duhem模型结构提出一种自适应分数阶滑模面,提高系统状态在滑模面上的收敛性。由于压电平台存在严重的迟滞率相关特性,为了提高控制器的鲁棒性,基于不确定和干扰估计(Uncertainty and Disturbance Estimation, UDE)思想提出一种滑模鲁棒项,该方法不仅能够补偿非线性迟滞的影响,还能够有效地解决滑模控制的抖振问题。最后,通过不同频率的压电平台的指令跟踪实验证明了提出的控制策略的优良性能。

2 压电平台建模

由于 Duhem 模型的数学描述形式明确, 计算

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = a_0 x(t) + a_1 v(t) + a_2 H(v(t)) + d(t) \\ \dot{H}(v(t)) = \alpha |\dot{v}(t)| [y(v(t)) - H(v(t))] + \dot{v}(t) k(v(t)) \end{cases} \quad (1)$$

其中: a_0, a_1 和 a_2 表示系统模型的参数; $x(t), v(t)$ 和 $H(t)$ 分别代表 Duhem 模型的输出位移、输入电压及静态迟滞输出; $\dot{x}(t), \dot{v}(t)$ 和 $\dot{H}(t)$ 分别是它们对时间的导数; $y(\cdot)$ 和 $k(\cdot)$ 表示多项式, 用来逼近迟滞非线性部分, 其形式如下:

$$\begin{cases} y(v) \cong y_0 + y_1 v + y_2 v^2 + \dots + y_p v^p = \sum_{i=0}^p y_i v^i \\ k(v) \cong k_0 + k_1 v + k_2 v^2 + \dots + k_q v^q = \sum_{j=0}^q k_j v^j \end{cases} \quad (2)$$

其中: p 和 q 分别为连续函数 $y(\cdot)$ 和 $k(\cdot)$ 一致性逼近多项式的阶次; y_i 和 k_j 分别是多项式的常参数。

由式(2)可得, Duhem 模型可改写为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = a_0 x(t) + a_1 v(t) + a_2 H(v(t)) + d(t) \\ \dot{H}(v(t)) = \alpha |\dot{v}(t)| \left[\sum_{i=0}^p y_i v^i(t) - H(v(t)) \right] + \\ \dot{v}(t) \sum_{j=0}^q k_j v^j(t). \end{cases} \quad (3)$$

其中, m 是一个整数。

接下来, 对分数阶滑模面(5)关于时间 t 求导数, 得:

$$\dot{\sigma}(t) = \dot{e}(t) + \hat{c}(t) {}_0D_t^r e(t) + \hat{c}(t) {}_0D_t^{r+1} e(t). \quad (8)$$

随后, 将式(4)求导并代入式(8)可得:

$$\dot{\sigma}(t) = \dot{x}_d(t) - \dot{x}(t) + \hat{c}(t) {}_0D_t^r e(t) + \hat{c}(t) {}_0D_t^{r+1} e(t). \quad (9)$$

在不考虑外部扰动 $d(t)$ 的前提下, 将式(1)代入式(9)中, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}(t) = & \dot{x}_d(t) - (a_0 x(t) + a_1 v(t) + a_2 H(t)) + \\ & \hat{c}(t) {}_0D_t^r e(t) + \hat{c}(t) {}_0D_t^{r+1} e(t). \end{aligned} \quad (10)$$

量相对较少, 且具有一定的建模精度, 广泛地被用来描述迟滞非线性特性的输入和输出之间关系^[19], 它的基本数学表达式如式(1)所示:

3 自适应分数阶滑模控制器设计

滑模控制方法被广泛地用来处理非线性系统的控制问题。在本文中, AFOSMC 方法的设计目标是使压电平台的输出位移与期望指令信号保持一致, 实现对压电平台的高精度指令跟踪控制。

3.1 自适应分数阶滑模面设计

首先, 定义指令跟踪误差 $e(t)$ 的数学表达式为:

$$e(t) = x_d(t) - x(t), \quad (4)$$

其中, $x_d(t)$ 和 $x(t)$ 分别代表期望的指令信号和压电平台的实际输出位移。在此基础上, 设定的分数阶滑模面为:

$$\sigma(t) = e(t) + \hat{c}(t) {}_0D_t^r e(t), \quad (5)$$

其中, $\hat{c}(t)$ 代表自适应增益, 它的自适应更新律数学表达式为:

$$\dot{\hat{c}}(t) = -k\sigma(t) {}_0D_t^r e(t), \quad (6)$$

其中: k 是一个正实数; ${}_0D_t^r(\cdot)$ 是分数阶运算, r 满足 $0 < r < 1$ 。本文采用 Caputo 导数完成分数阶运算, 具体如式(7)所示:

$${}_0D_t^r f(\cdot) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(m-r)} f_{t_0}' \frac{f^m(\tau)}{(t-\tau)^{r-m+1}} d\tau, & m-1 < r < m \\ \frac{d^m}{dt^m} f(t) & r = m \end{cases}, \quad (7)$$

通过忽略自适应参数误差, 即: $\dot{\hat{c}}(t) = 0$, 令 $\dot{\sigma}(t) = 0$ 则等效控制律为:

$$\begin{aligned} v_{eq}(t) = & \frac{1}{a_1} [\dot{x}_d(t) - a_0 x(t) - a_2 H(t) + \\ & \hat{c}(t) {}_0D_t^{r+1} e(t)]. \end{aligned} \quad (11)$$

3.2 滑模鲁棒项设计

为了消除外部扰动对压电平台指令跟踪控制系统的影响, 本文采用文献[20-21]中的 UDE 方法设计滑模鲁棒项, 使系统状态保持在分数阶滑模面上, 具体鲁棒控制项如式(12)所示:

$$v_{rb}(t) = -\frac{1}{a_1} [\hat{d}(t) - \gamma\sigma(t)]. \quad (12)$$

结合式(11),本文提出的 AFOSMC 方法的表达式为:

$$v(t) = v_{rb}(t) + v_{eq}(t). \quad (13)$$

对于总的扰动 $d(t)$,将控制量 $v(t)$ 代入公式(9)能得到:

$$\sigma(t) = \hat{d}(t) - d(t) - \gamma\sigma(t). \quad (14)$$

本文采用 UDE 方法对未建模及外部扰动进行估计,则:

$$\hat{d}(t) = [\hat{d}(t) - \gamma\sigma(t) - \dot{\sigma}(t)] * g(t), \quad (15)$$

其中:“*”代表卷积运算, $g(t)$ 是一个滤波函数 $G(s)$ 的脉冲响应,它的数学表达式为:

$$g(t) = L^{-1}\{G(s)\}, \quad (16)$$

其中,“ $L^{-1}\{\cdot\}$ ”是拉普拉斯反变换。在本文中,采用一阶滤波器表示 $G(s)$,它的数学表达式为:

$$G(s) = \frac{1}{1 + \kappa s}, \quad (17)$$

其中, κ 是一个时间常数。

进一步化简公式(15)可得:

$$\hat{d}(t) = [-\gamma\sigma(t) - \dot{\sigma}(t)] * \frac{g(t)}{1 - g(t)}. \quad (18)$$

则有鲁棒控制项为:

$$v_{rb}(t) = \frac{\gamma}{\kappa a_1} \int_0^t \sigma(\tau) d\tau + \frac{1}{\kappa a_1} \sigma(t). \quad (19)$$

因此,根据式(13)可得,本文设计的自适应分数阶滑模控制律为:

$$v(t) = \frac{1}{a_1} \left[\dot{x}_d(t) - a_0 x(t) - a_2 H(t) + \hat{c}(t) {}_0 D_t^{\gamma+1} e(t) + \frac{\gamma}{\kappa} \int_0^t \sigma(\tau) d\tau + \frac{1}{\kappa} \sigma(t) \right]. \quad (20)$$

根据上述分析,本文提出的 AFOSMC 方法的结构原理如图 1 所示。

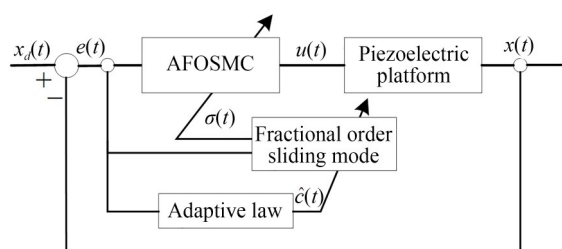


图 1 自适应分数阶滑模控制器结构框图

Fig. 1 Block diagram of adaptive fraction order sliding mode controller

3.3 控制器稳定性分析

为了证明 AFOSMC 系统的稳定性,设定如式(21)所示的李雅普诺夫函数:

$$V(t) = \frac{1}{2} \sigma^2(t). \quad (21)$$

然后,对式(22)求时间的导数可得:

$$\dot{V}(t) = \sigma(t) \dot{\sigma}(t). \quad (22)$$

将式(10)和式(20)代入式(22),可得:

$$\dot{V}(t) = \sigma(t) \dot{\hat{c}}(t) {}_0 D_t^{\gamma} e(t) + \sigma(t) (\hat{d}(t) - d(t) - \gamma\sigma(t)). \quad (23)$$

将式(6)代入式(23)可得:

$$\dot{V}(t) = -k\sigma^2(t) ({}_0 D_t^{\gamma} e(t))^2 + \sigma(t) (\hat{d}(t) - d(t) - \gamma\sigma(t)). \quad (24)$$

根据式(15),可得:

$$\hat{d}(t) - d(t) = g(t) * d(t) - d(t). \quad (25)$$

对式(25)进行拉普拉斯变换可得:

$$\hat{D}(s) - D(s) = G(s)D(s) - D(s) = (G(s) - 1)D(s). \quad (26)$$

由于 $G(s)$ 是一阶低通滤波函数,它将产生单位增益和零相位响应,则干扰估计误差可视为零。

因此,式(22)满足:

$$\dot{V}(t) = -k\sigma^2(t) ({}_0 D_t^{\gamma} e(t))^2 - \gamma\sigma^2(t) \leq 0. \quad (27)$$

根据李雅普诺夫稳定性定理可得 AFOSMC 系统是稳定的。

4 实验验证结果

4.1 实验装置

为了验证本文提出的 AFOSMC 方法,搭建了如图 2 所示的嵌入式实验平台,该实验平台主要包括:压电平台、压电功率放大器、直流电源、嵌入式控制电路板、串行数据线和在线仿真计算机。

实验中选用的压电平台是上海纳动公司的 PK2L60 型号,该平台的行程为 $60 \mu\text{m}$,分辨率 10 nm ,空载谐振频率 500 Hz ,外形尺寸为 $60 \times 60 \times 20 \text{ mm}$,最大推力 15 N 。压电平台内部采用压电陶瓷堆叠结合柔性铰链导向结构,两组执行器构成推拉结构实现位移放大。压电平台基于惠斯通全桥形式在平台铰链处粘贴了电阻式应变片,经过信号放大和滤波等处理后输出,可作为压电平台反馈的位移量。

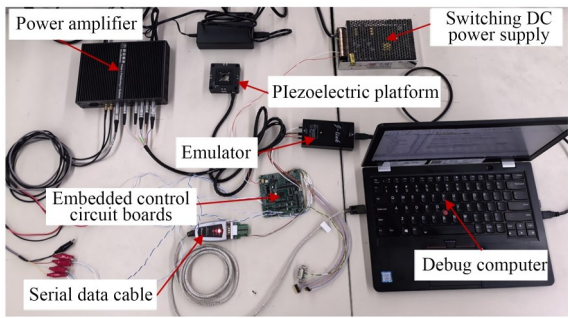


图2 自适应分数阶滑模控制算法验证平台

Fig.2 Verification platform for adaptive fractional order sliding mode control

嵌入式实验平台主要包括 ARM(STM32F407)、模数转换器(AD7606)和数模转换器(DAC8822)。STM32F407 是一款基于 ARM Cortex-M4 内核的浮点微控制器,为嵌入式和实时应用提供了广泛的功能。ARM 通过 DAC 输出压电平台的控制信号到功率放大器,它可以提供高电压信号,驱动压电平台运动;通过 ADC 采集压电平台应变片传感器反馈的位移量,进行闭环控制。所提算法在仿真计算机中编程实现,控制和数据采集的周期都是 1 ms,并使用 J-Link 仿真器实时在线调试,完成参数整定。实验数据通过 RS422 串行数据线以 1 ms 周期发送到仿真计算机中,用于后续处理。

4.2 实验验证

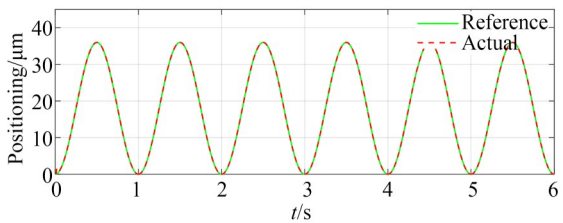
本文中,采用文献[14]中 Duhem 模型参数对压电平台的迟滞特性进行描述,完成压电平台的指令跟踪实验,实现对 AFOSMC 方法的性能进行验证。实验过程中控制器的参数设置如表 1 所示,且控制器参数值在实验过程中保持不变。

表 1 自适应分数阶滑模控制方法的参数

Tab.1 Parameters of AFOSMC method

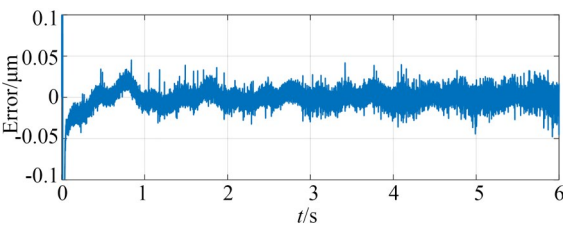
参数名称	参数值
κ	0.000 1
k	98 000
r	0.7
γ	600

选择频率为 1 Hz,幅值为 36 μm (满行程的 60%)无偏置的正弦波信号作为跟踪实验的参考指令,进行压电平台的指令跟踪实验,具体的实验结果如图 3 所示。



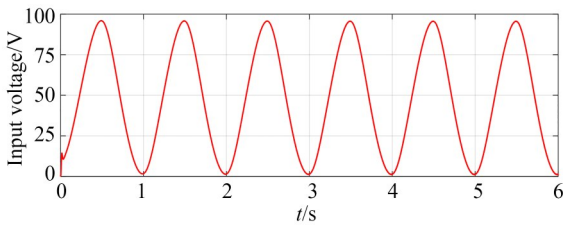
(a) 1 Hz正弦实验的指令和响应曲线

(a) Command and response curves for 1 Hz sinusoidal experiments



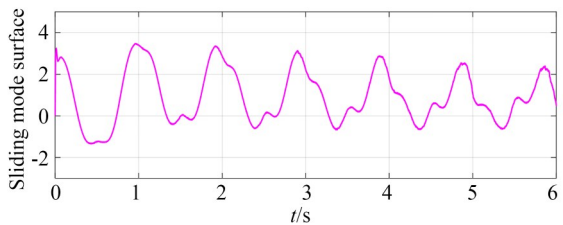
(b) 1 Hz正弦实验的指令跟踪误差曲线

(b) Command tracking error curve for 1 Hz sinusoidal experiments



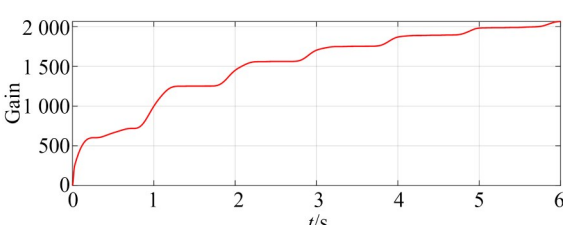
(c) 1 Hz正弦实验的控制输入曲线

(c) Control input curve for 1 Hz sinusoidal experiments



(d) 1 Hz正弦实验的滑模面

(d) Sliding mode surface for 1 Hz sinusoidal experiments

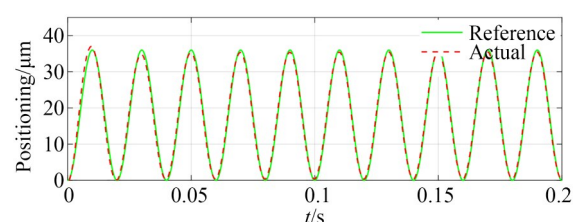


(e) 1 Hz正弦实验的自适应增益曲线

(e) Adaptive gain curve for 1 Hz sinusoidal experiments

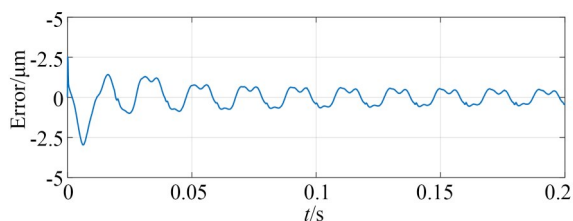
图3 1 Hz正弦参考信号压电平台跟踪实验结果

Fig.3 Tracking experimental results of the piezoelectric drive platform with the sinusoidal reference signal at 1 Hz



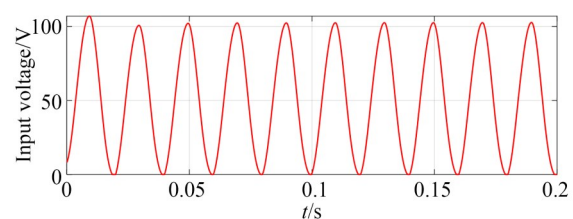
(a) 50 Hz正弦实验的指令和响应曲线

(a) Command and response curves for 50 Hz sinusoidal experiments



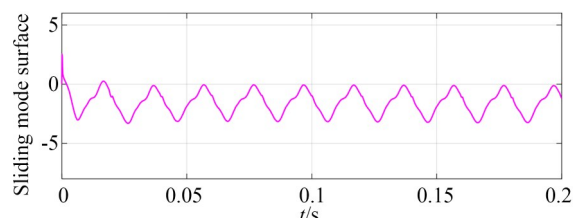
(b) 50 Hz正弦实验的指令跟踪误差曲线

(b) Command tracking error curve for 50 Hz sinusoidal experiments



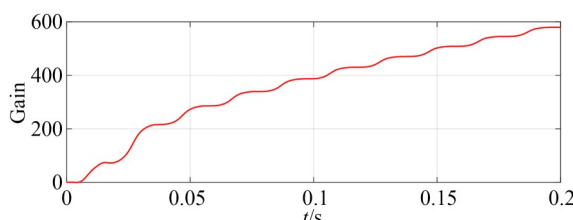
(c) 50 Hz正弦实验的控制输入曲线

(c) Control input curve for 50 Hz sinusoidal experiments



(d) 50 Hz正弦实验的滑模面

(d) Sliding mode surface for 50 Hz sinusoidal experiments



(e) 50 Hz正弦实验的自适应增益曲线

(e) Adaptive gain curve for 50 Hz sinusoidal experiments

图 4 50 Hz 正弦参考信号压电平台跟踪实验结果

Fig. 4 Tracking experimental results of the piezoelectric drive platform with the sinusoidal reference signal at 50 Hz

由图 3(a)可得,压电平台的实际输出位移与参考指令信号保持一致;由图 3(b)可见,稳定后,误差的峰峰值不超过 $\pm 0.05 \mu\text{m}$,经计算最大跟踪误差率仅为 0.13%;根据图 3(c)看出控制器的输出电压信号不存在抖振现象,可以得出 AFOSMC 方法有效地解决了滑模控制的抖振问题;从图 3(d)可以看出,分数阶滑模面是稳定的;由图 3(e)可以看出,提出的自适应律能够实时地调节分数阶滑模面的参数,并且数值趋向于恒定,可见系统是收敛的。

为了进一步验证提出的 AFOSMC 方法的优越性,采用频率为 50 Hz,幅值为 $36 \mu\text{m}$ (满行程的 60%)无偏置的正弦波进行压电平台的指令跟踪实验,实验结果如图 4 所示。跟踪曲线如图 4(a)所示,跟踪误差如图 4(b)所示,控制器输出电压信号如图 4(c)所示,滑模面的变化曲线如图 4(d)所示,自适应增益曲线如图 4(e)所示。从实验结果上看,基于 AFOSMC 的压电平台能够实现对高频参考指令的有效跟踪,即使参考信号达到 50 Hz,提出的控制方法依然保持了良好的跟踪效果。

为进一步验证算法在指令突变情况下的跟踪效果,选择更加复杂的复合三角波进行压电平台的指令跟踪实验。复合的三角波幅值变化范围从 0~ $36 \mu\text{m}$,每隔 0.5 s 改变一次指令方向,实验结果如图 5 所示。

跟踪曲线如图 5(a)所示,跟踪误差如图 5(b)所示,控制器输出电压信号如图 5(c)所示。从实验结果上看,基于 AFOSMC 的压电平台能够实现对复合三角波参考指令的有效跟踪,即使参考信号出现迅速反向,提出的控制方法依然保持了较高的跟踪精度。

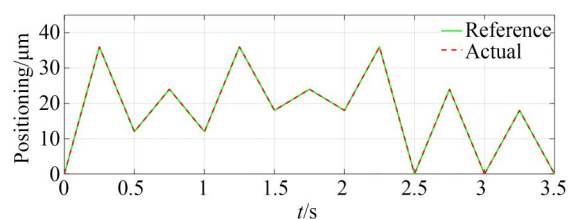
最后,将 AFOSMC 方法与经典的 PID 控制、传统的滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)方法进行对比实验,具体实验结果如表 2 所示。

由表中数据可以得到,当参考指令信号为 1 Hz 的正弦信号时,与传统的 PID 控制及经典的 SMC 方法相比,基于 AFOSMC 方法的最大误差比率分别减小了 95.08%,87.85%;相应的均方根误差分别减小了 97.92%,93.33%。当参考指令信号为 50 Hz 的正弦波时,提出的 AFOSMC 方法最大跟踪误差比率为 1.69%,相应地均方根误

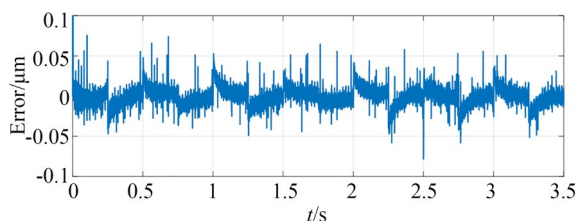
表 2 PID, SMC 和 AFOSMC 算法的对比实验结果

Tab. 2 Comparative experimental results of PID, SMC and AFOSMC

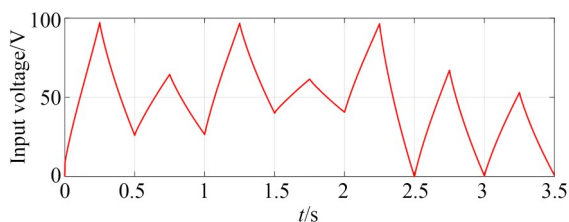
参考指令	PID 控制的 MAXR/RMS (%, μm)	SMC 的 MAXR/RMS (%, μm)	AFOSMC 的 MAXR/RMS (%, μm)
Sin-1 Hz	2.64/0.48	1.07/0.15	0.13/0.01
Sin-50 Hz	4.46/0.91	3.34/0.71	1.69/0.41
Tri	4.19/0.78	2.85/0.45	0.21/0.03



(a) 复合三角波实验的指令和响应曲线
(a) Command and response curves for compound triangular wave experiments



(b) 复合三角波实验的指令跟踪误差曲线
(b) Command tracking error curve for the compound triangular wave experiment



(c) 复合三角波实验的控制输入曲线
(b) Control input curve for the compound triangular wave experiment

图 5 复合三角参考信号压电平台跟踪实验结果

Fig. 5 Tracking experimental results of the piezoelectric drive platform with the compound Triangular reference signal

差为 $0.41 \mu\text{m}$ 。当参考指令信号为复合三角波时,基于 AFOSMC 方法的最大误差比率分别减小了 94.99%, 92.63%; 相应的均方根误差分别减小了 96.15%, 93.33%, 进一步验证了提出的控制方法的优越性能。

由此可见,所提出的算法无论是在正弦还是复合三角波信号激励下,都能够获得较好的跟踪性能。基于 UDE 方法设计的滑模鲁棒项,有效地解决了滑模控制的抖振问题。通过 50 Hz 的正弦信号响应验证了算法跟踪性能已经能够满足绝大多数场合的应用,如果再提高输入信号的频率,控制系统运行的噪音问题就较严重,影响压电平台在实际系统中的应用。

5 结 论

本文针对压电平台的迟滞问题,提出了一种 AFOSMC 方法,实现了平台的高精度指令跟踪控制。在不同参考指令的情况下,对提出的控制方法的有效性进行验证。实验结果表明,当参考指令分别为 1 Hz 和 50 Hz 的正弦波信号和复合三角波信号时,提出的控制方法都能够实现高精度跟踪控制,提出的 AFOSMC 方法的控制输出电压曲线比较光滑,具体的,在 50 Hz 参考指令信号下自适应分数阶滑模控制器将压电平台的平均跟踪误差降低到 $0.41 \mu\text{m}$ 。可见,该方法有效地解决了传统滑模控制器的抖振问题对滑模控制在压电驱动定位控制中的应用具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 姜世平. 基于两自由度压电驱动快反镜的星光跟踪控制[J]. 压电与声光, 2019, 41(6): 877-879.
JIANG S P. Star tracking control system based on

- two-degree-of-freedom piezo-actuated fast steering mirror[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2019, 41(6): 877-879. (in Chinese)
[2] HABIBULLAH H, POTA H R, PETERSEN I R. A novel control approach for high-precision posi-

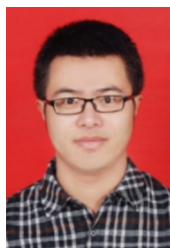
- tioning of a piezoelectric tube scanner [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 14(1): 325-336.
- [3] RASAIENIA A, ASNAASHARI M, HEMMATI M. A robust controller design for piezoelectric positioning stage with Bouc-Wen hysteresis compensator [J]. *Signal Processing and Renewable Energy*, 2019, 3(3): 45-58.
- [4] 徐子睿, 许素安, 富雅琼, 等. 基于 Duhem 前馈逆补偿的压电陶瓷迟滞非线性自适应滑模控制[J]. 传感技术学报, 2019, 32(8): 1209-1214.
- XU Z R, XU S A, FU Y Q, *et al.* Piezoelectric ceramic hysteresis nonlinear adaptive sliding mode control based on duhem feedforward inverse compensation[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(8): 1209-1214. (in Chinese)
- [5] 于志亮, 刘杨, 王岩, 等. 基于改进 PI 模型的压电陶瓷迟滞特性补偿控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 129-135.
- YU Z L, LIU Y, WANG Y, *et al.* Hysteresis compensation and control of piezoelectric actuator based on an improved PI model [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1): 129-135. (in Chinese)
- [6] STEFANSKI F, MINOROWICZ B, PERSSON J, *et al.* Non-linear control of a hydraulic piezo-valve using a generalised Prandtl-Ishlinskii hysteresis model[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 82: 412-431.
- [7] XU R, TIAN D P, WANG Z S. Adaptive tracking control for the piezoelectric actuated stage using the krasnosel'skii-pokrovskii operator [J]. *Micromachines*, 2020, 11(5): 537.
- [8] 潘云凤, 潘海鹏, 赵新龙. 压电陶瓷执行器的动态迟滞非线性特性建模[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(9): 38-42.
- PAN Y F, PAN H P, ZHAO X L. Dynamic hysteresis nonlinearity characteristics modeling of piezoceramic actuator [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(9): 38-42. (in Chinese)
- [9] 刘鑫, 李新阳, 杜睿. 压电陶瓷驱动器迟滞非线性建模及逆补偿控制[J]. 光电工程, 2019, 46(8): 180328.
- LIU X, LI X Y, DU R. Hysteresis nonlinear modeling and inverse compensation of piezoelectric actuators [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(8): 180328. (in Chinese)
- [10] 王贞艳, 贾高欣. 压电陶瓷作动器非对称迟滞建模与内模控制[J]. 光学精密工程, 2018, 26(10): 2484-2492.
- WANG Z Y, JIA G X. Asymmetric hysteresis modeling and internal model control of piezoceramic actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2484-2492. (in Chinese)
- [11] 王舟, 陈远晟, 王浩, 等. 压电陶瓷驱动器迟滞建模与自适应控制[J]. 压电与声光, 2020, 42(4): 523-528.
- WANG Z, CHEN Y S, WANG H, *et al.* Hysteresis modelling and adaptive control of piezoelectric actuators [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2020, 42(4): 523-528. (in Chinese)
- [12] 康升征, 吴洪涛, 杨小龙, 等. 压电微定位系统自适应鲁棒有限时间跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 403-410.
- KANG S Z, WU H T, YANG X L, *et al.* Adaptive robust finite-time tracking control for piezoelectric micropositioning systems [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 403-410. (in Chinese)
- [13] 魏伟, 夏鹏飞, 左敏. 压电驱动纳米定位台的线性自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1577-1590.
- WEI W, XIA P F, ZUO M. Linear active disturbance rejection control of piezoelectric nanopositioning stage [J]. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(11): 1577-1590. (in Chinese)
- [14] XU R, ZHANG X Y, GUO H Y, *et al.* Sliding mode tracking control with perturbation estimation for hysteresis nonlinearity of piezo-actuated stages [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 30617-30629.
- [15] 陈云壮, 赖磊捷, 李朋志, 等. 全簧片式空间大行程并联柔性微定位平台及其轨迹控制[J]. 光学精密工程, 2023, 31(18): 2675-2686.
- CHEN Y Z, LAI L J, LI P Z, *et al.* Full leaf-spring type spatial large-stroke parallel flexure micro-positioning stage and trajectory control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(18): 2675-2686. (in Chinese)
- [16] WANG Z S, XU R, WANG L N, *et al.* Finite-time adaptive sliding mode control for high-precision tracking of piezo-actuated stages [J]. *ISA Transactions*, 2022, 129: 436-445.
- [17] XU R, TIAN D P, WANG Z S. Adaptive distur-

- bance observer-based local fixed-time sliding mode control with an improved approach law for motion tracking of piezo-driven microscanning system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(10): 12824-12834.
- [18] XU R, WANG Z S, ZHOU M L, *et al.* A robust fractional-order sliding mode control technique for piezoelectric nanopositioning stages in trajectory-tracking applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 363: 114711.
- [19] XU R, PAN W, WANG Z S, *et al.* High-precision tracking control of a piezoelectric micro-nano platform using sliding mode control with the fractional-order operator [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(12): 2277-2286.
- [20] REN B B, ZHONG Q C, DAI J G. Asymptotic reference tracking and disturbance rejection of UDE-based robust control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64 (4) : 3166-3176.
- [21] XU Q S. Precision motion control of piezoelectric nanopositioning stage with chattering-free adaptive sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 14 (1): 238-248.

作者简介:



孙明超(1982—),男,吉林长春人,博士,研究员,2005年于吉林大学获得学士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空光学成像与测量技术方面的研究。E-mail: sunmingchao@ciomp.ac.cn



宋悦铭(1981—),男,吉林长春人,研究员,主要从事航空光电装备总体论证和系统设计方面的研究。E-mail: songym525@sina.com