

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905501

基于自抗扰重复控制的压电驱动器高精度跟踪控制*

刘瑞娟¹, 聂卓赞^{2,3}, 马亦婧^{2,3}, 郑义民^{2,3}

(1. 厦门理工学院应用数学学院 厦门 361024; 2. 华侨大学信息科学与工程学院 厦门 361021;
3. 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心 厦门 361021)

摘要:针对压电驱动器的高精度控制问题,提出一种自抗扰重复控制设计方法。首先,给出压电驱动系统的动力学模型;然后,在线性自抗扰控制(LADRC)中引入输出反馈积分控制器和一类插入式重复控制器,提出一种具有阶跃、斜坡和周期信号跟踪/抑制能力的自抗扰重复控制策略。进一步,结合小增益定理,分析闭环系统的稳定性及控制系统的设计方法。最后,将所提方法应用于一类压电驱动系统,实验结果表明该方法与LADRC相比,能显著提升控制效果,且高精度跟踪/抑制多种外部信号。

关键词:自抗扰;重复控制;压电驱动器;高精度跟踪

中图分类号: TP13 TH701 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8010

High precision tracking control for the piezoelectric actuator based on active disturbance rejection repetitive control

Liu Ruijuan¹, Nie Zhuoyun^{2,3}, Ma Yijing^{2,3}, Zheng Yimin^{2,3}

(1. School of Applied Mathematics, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. School of Information Science and Engineering, National Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule, Xiamen 361021, China)

Abstract: To enhance precision control of piezoelectric actuator, this paper proposes an active disturbance rejection repetitive control (ADRRRC) method. Firstly, the dynamic model of piezoelectric drive system is formulated. Then, an output feedback integral controller and a plug-in repetitive controller are merged into the linear active disturbance rejection control (LADRC). One kind of ADRRC strategy is proposed, which has capabilities of step, ramp and periodic signal tracking/suppression. Furthermore, the stability of the closed loop system and the design method of the control system are analyzed by using the small-gain theorem. Finally, the proposed method is applied to the piezoelectric actuator system. Experimental results show that the proposed method can achieve better control performance than LADRC method. In addition, the method can track and reject many kinds of external signals with high precision.

Keywords: active disturbance rejection control; repetitive control; piezoelectric actuator; high precision tracking

0 引言

随着科技技术发展,高精度定位技术在超精密加工、纳米技术、生微电子制造、精密仪器等方面广泛使用。压电驱动器是一类刚性好、出力大的执行器,是实现高精度定位的关键部件。然而,这类压电驱动器受到其工作机理的制约,输入输出之间存在较强的迟滞非线性,使控制

系统的驱动单元响应延迟,降低系统的控制精度^[1-2]。当压电驱动器用于执行扫描任务时,迟滞非线性对系统的影响可等效为一类周期扰动。此时,压电系统既要实现周期输入信号跟踪,还克服周期扰动影响^[3]。

压电系统的迟滞非线性建模和辨识在提升控制性能上具有重要作用。常用于描述迟滞非线性特性的模型包括 Bouc-Wen (BW) 模型^[4], Prandtle-Ishlinskii (PI) 模型^[5], Jiles-Atherton (JA) 模型^[6]等。BW 是一类基于微分

方程的迟滞模型,王代华等^[4]基于 BW 模型设计了一类压电执行器的前馈线性化控制器,并通过实验验证了其有效性;比例积分(proportional integral, PI)模型是一类算子模型,文献[5]提出一种 PI 逆模型辨识的方法,并结合前馈逆模型补偿消除迟滞非线性影响;JA 模型是一种模拟物理过程的迟滞模型,文献[6]针对一类超磁致伸缩驱动器,采用 JA 模型研究了的非线性参数辨识与迟滞非线性特性。

近年来,以自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[7]、干扰观测器^[8]为代表的主动抗扰控制方法,在压电驱动器高精度控制系统上得到应用。这类方法将系统存在的不确定性、迟滞非线性和外部扰动等当成系统总扰动,并进行实时估计和主动补偿,在跟踪控制上具有较好的效果^[9-10]。然而,压电驱动器用于执行扫描或往返行程的周期型任务时,要求具有较好的周期跟踪能力和周期扰动抑制能力。常规的抗扰控制策略无法满足这类要求。根据内模原理可知,在控制系统中引入重复控制是实现周期无静差跟踪的必要手段^[11-12]。

本文提出一种自抗扰重复控制设计方法,并用于压电驱动器的高精度跟踪控制。首先,在常规线性自抗扰控制(linear ADRC, LADRC)中增加输出反馈积分控制器,提出一种斜坡型自抗扰控制设计方法。进一步,在等效二自由度结构中引入重复控制器,改进 ADRC 系统的周期跟踪和抗扰能力;然后,采用小增益定理,分析自抗扰重复控制系统的闭环稳定性,并给出控制器的分离设计方法;最后,在压电驱动系统上开展实验研究,验证自抗扰重复控制策略的有效性。

1 压电驱动器

压电系统存在明显的非线性特性,其输入输出迟滞对压电系统位移精度影响较大。在慢变三角波输入条件下(忽略动态响应),图 1 所示给出了本文压电驱动器的实测位移输出和迟滞曲线。

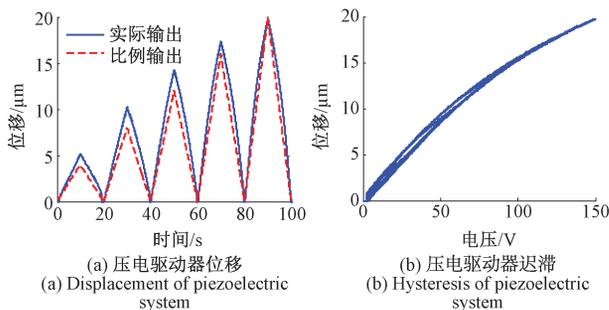


图 1 压电系统的迟滞非线性

Fig.1 Hysteresis in the piezoelectric system

压电系统可用一类 Hammerstein-like 模型描述,即非线性环节与线性环节串联。数学模型表示为^[13]:

$$\begin{cases} m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = k_m u_l \\ u_l = (u - u_h) \\ \dot{u}_h = \alpha \dot{u} - \beta | \dot{u} | u_h - \gamma \dot{u} | u_h | \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 为输入电压; u_l 为迟滞输出,在实际系统中一般难以测量; y 为位移输出; $m > 0$ 、 $b > 0$ 、 $k > 0$ 分别为质量系数、阻尼系数和刚度系数; α 、 β 、 γ 是迟滞参数,描述迟滞环大小和形状。

压电系统可描述成一类等效扰动模型,如图 2 所示。其中,迟滞非线性环节等效为一类与输入 u 相关的扰动 $-u_h$, 作用于线性环节的输入端。

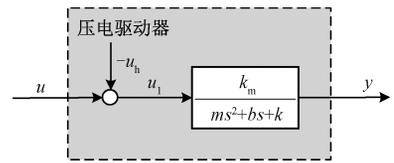


图 2 压电系统的等效扰动模型

Fig.2 Equivalent perturbation model of the piezoelectric system

压电驱动器常应用于执行周期扫描和快速响应的驱动平台,例如,快速扫描反射镜、高速高精度快速刀具进给系统等。当系统处于扫描状态时, u_h 也表现为一类周期型扰动。在图 2 所示的等效扰动模型下,本文结合 LADRC 与重复控制,提出一种斜坡型自抗扰重复控制方法,以适用于压电驱动器的高精度周期跟踪与扰动抑制。

2 自抗扰重复控制

2.1 控制结构

本文提出的斜坡型自抗扰重复控制结构如图 3 所示,包括被控对象 $G_p(s)$, 斜坡型 ADRC(包括扩张状态观测器(extended state observer, ESO)、状态反馈和积分控制器)和插入式重复控制器 $C_R(s)$, 其中用绿色模块表示斜坡型 ADRC,黄色模块表示重复控制器。本文以压电系统线性部分作为被控对象,有:

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k_m}{ms^2 + bs + k} \quad (2)$$

其中 $m > 0$ 、 $b > 0$ 、 $k > 0$ 。

若仅考虑输入 $r(t)$ 与扰动 $d(t)$ 两类外部信号,图 3 (a)所示可以等效成典型二自由度反馈控制结构,如图 3 (b)所示。该控制结构,具有对多种输入信号无静差跟踪和扰动抑制能力,包括阶跃、斜坡和周期信号。

2.2 斜坡型自抗扰控制

式(1)压电系统可写成 ADRC 中的典型二阶串联积

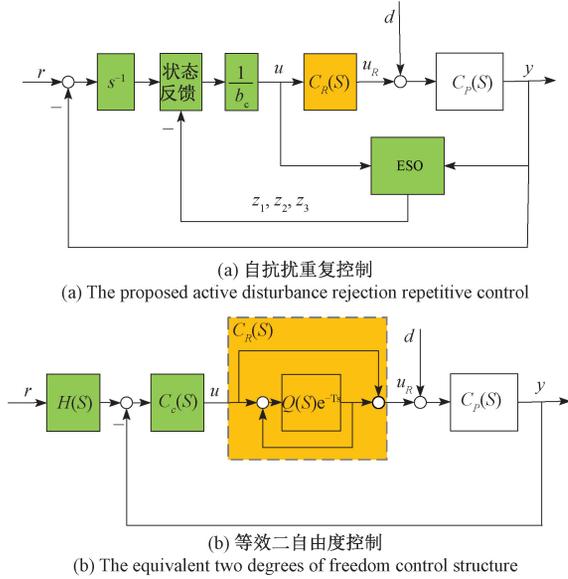


图 3 自抗扰重复控制结构

Fig.3 Control structure of active disturbance rejection repetitive control

分标准型^[7,14],有:

$$\ddot{y} = f + b_0 u \tag{3}$$

其中 $b_0 = k_m/m$, $f = (-b\dot{y} - ky - k_m u_h)/m + b_0 d$ 为系统的总扰动。针对式(3)建立系统的 ESO^[7,14],有:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + l_1(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + b_0 u + l_2(y - z_1) \\ \dot{z}_3 = l_3(y - z_1) \end{cases} \tag{4}$$

其中 $L = [l_1, l_2, l_3]^T = [3\omega_o, 3\omega_o^2, \omega_o^3]^T$ 观测增益向量, ω_o 为 ESO 的带宽参数。根据 ESO 工作原理可知,选取合适带宽参数 ω_o , ESO 能够较好地观测系统状态,有 $z_1 \rightarrow y, z_2 \rightarrow \dot{y}$ 和 $z_3 \rightarrow f$ 。

在常规 LADRC 设计中,结合 ESO 观测状态构建状态反馈^[7,14],有:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} = \frac{-k_1 z_1 - k_2 z_2 - z_3}{b_0} \tag{5}$$

此时 $[k_1, k_2]^T = [2\omega_c, \omega_c^2]^T$ 为反馈增益, ω_c 为闭环系统带宽参数,一般要求 $\omega_o > \omega_c$ 。闭环系统输入信号 $R(s)$ 与输出信号 $Y(s)$ 之间的传递函数近似为:

$$M(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right)^2 \tag{6}$$

文献[15]分析了 LADRC 的等效二自由度形式,如图 3(b)所示 ($C_R(s) = 1$)。此时, $H(s)$ 是一类非严重的传递函数,物理上不能实现;反馈控制器 $G_c(s)$ 中包含一个积分因子,能无静差跟踪/抑制阶跃型外部信号。

为提升控制性能,本文提出斜坡型 ADRC 控制策略。首先,在 LADRC 中引入输出反馈积分器,构建跟踪误差

状态^[16],有:

$$\dot{x}_r(t) = r(t) - y(t) \tag{7}$$

在 ESO 扰动反馈补偿 $u = (u_0 - z_3)/b_0$ 下,对象的输入输出关系近似为串联积分型,有 $\ddot{y} \approx u_0$ 。

进一步,结合 $x_r(t)$ 和 ESO 状态,进行极点配置设计 $u_0 = k_r x_r - k_1 z_1 - k_2 z_2$ 。最终,斜坡型 ADRC 控制率为:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} = \frac{k_r x_r - k_1 z_1 - k_2 z_2 - z_3}{b_0} \tag{8}$$

此时,式(8)中参数仍可采用参数带宽化^[14]方法进行整定,使得闭环系统传递函数近似为:

$$M_{\text{new}}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right)^3 \tag{9}$$

将闭环系统转化为图 3(b)所示二自由度控制结构,有:

$$H(s) = \omega_c^3 \frac{H_{n3}s^3 + H_{n2}s^2 + H_{n1}s + H_{n0}}{H_{d3}s^3 + H_{d2}s^2 + H_{d1}s + H_{d0}} \tag{10}$$

$$G_c(s) = \frac{1}{b_0} \frac{C_{n3}s^3 + C_{n2}s^2 + C_{n1}s + C_{n0}}{C_{d4}s^4 + C_{d3}s^3 + C_{d2}s^2 + C_{d1}s + C_{d0}} \tag{11}$$

式中: H_{ni}, H_{di}, C_{ni} 和 C_{di} 为控制系数,如表 1 所示。在合适的带宽参数条件下, $H(s)$ 是一类可物理实现的稳定前置滤波器,对闭环系统稳定性不产生影响;反馈控制器 $G_c(s)$ 起到镇定控制作用;由于 $C_{d1} = C_{d0} = 0$,反馈控制器 $G_c(s)$ 包含了双积分因子,能对斜坡信号实现无静差跟踪 ($H(s) = 1$ 时)/抑制。因此,该方案称为斜坡型 ADRC。

表 1 二自由度斜坡型 ADRC 系数

Table 1 Parameters of ramp ADRC in two degrees of freedom

系数	值	系数	值
C_{n3}	$\omega_o^3 + 9\omega_c\omega_o^2 + 9\omega_c^2\omega_o + \omega_c^3$	C_{d4}	1
C_{n2}	$3\omega_c\omega_o^3 + 9\omega_c^2\omega_o^2 + 3\omega_c^3\omega_o$	C_{d3}	$3\omega_o + 3\omega_c$
C_{n1}	$3\omega_c^2\omega_o^3 + 3\omega_c^3\omega_o^2$	C_{d2}	$3\omega_o^2 + 9\omega_c\omega_o + 3\omega_c^2$
C_{n0}	$\omega_c^3\omega_o^3$	C_{d1}	0
H_{n3}	1	C_{d0}	0
H_{n2}	$3\omega_o$	H_{d3}	C_{n3}
H_{n1}	$3\omega_o^2$	H_{d2}	C_{n2}
H_{n3}	ω_o^3	H_{d1}	C_{n1}
		H_{d0}	C_{n0}

例 1:考虑非线性对象 $G_p(s): \ddot{y} = \dot{y}^3 + y + u$ 。控制器参数选取为 $\omega_c = 4.5, \omega_o = 20$ 和 $b_0 = 1$ 。

控制系统在阶跃/斜坡扰动下的单位阶跃响应如图 4 所示。与常规 LADRC 相比较,在相同带宽参数条件下,斜坡型 ADRC 能无静差抑制阶跃扰动和斜坡扰动,而常规 LADRC 在斜坡扰动下始终存在静态误差。此外,由于斜坡型 ADRC 增加了输出反馈积分控制器,能够较好

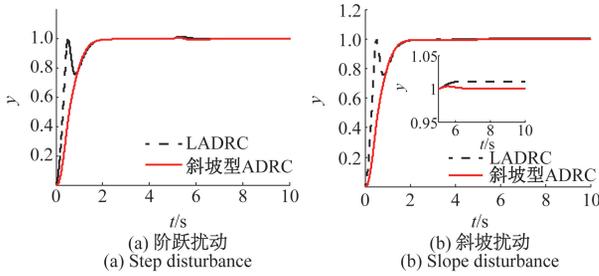


图4 斜坡型自抗扰控制

Fig.4 Ramp ADRC

克服非线性引起的震荡,提升跟踪控制性能。

2.3 重复控制设计

根据内模原理,在控制回路中构造周期信号模型 $1/(1 - e^{-Ts})$, 能实现周期为 T 的信号跟踪。本文采用 Hara 等^[17] 提出的 plug-in (插入式) 重复控制结构,如图 3(b) 所示。重复控制器 $C_R(s)$ 表示为:

$$C_R(s) = 1 + \frac{Q(s)e^{-Ts}}{1 - Q(s)e^{-Ts}} \quad (12)$$

$$Q(s) = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} \quad (13)$$

式中: $Q(s)$ 为低通滤波器,用于提升重复控制系统的稳定性; $\omega_f > 0$ 为滤波器带宽频率, ω_f 越大重复控制器越接近内模信号。在图 3 所示的控制结构中,重复控制器位于被控对象 $G_p(s)$ 之前,便于与二自由度 ADRC 结合。

控制系统中涉及到多个 $[\omega^*/(s + \omega^*)]^p$ 类型的带宽参数 ω^* , 其物理带宽频率 ω_B 与 ω^* 和 p 相关,表示为 $\omega_B(\omega^*, p)$ 。在物理带宽意义下,3 个带宽参数 $\omega_c, \omega_o, \omega_f$ 满足一定控制性能要求。

1) 周期输入信号跟踪。当输入信号 $r(t)$ 的频率(记作 ω_r) 在 ADRC 系统带宽以内时,即 $\omega_r < \omega_B(\omega_c, 3)$, ADRC 系统能够以较小的相位滞后跟踪 $r(t)$ 。此时,要求 $\omega_B(\omega_c, 3) \leq \omega_B(\omega_f, 1)$, 以提升周期信号跟踪效果。

2) 周期扰动信号抑制。当扰动信号 $d(t)$ 的频率(记作 ω_d) 在 ESO 带宽以内时,即 $\omega_d < \omega_B(\omega_o, 3)$ 。ESO 能够以较小相位滞后跟踪扰动 $d(t)$, 并通过反馈抑制。此时,要求 $\omega_B(\omega_o, 3) \leq \omega_B(\omega_f, 1)$, 以提升周期扰动的抑制效果。

结合参数带宽化调节^[14] 要求 $\omega_c < \omega_o$, 本文选取 ω_f 满足 $\omega_B(\omega_c, 3) < \omega_B(\omega_o, 3) \leq \omega_B(\omega_f, 1)$, 以发挥重复控制器的周期跟踪能力。

2.4 稳定性分析及设计

应用小增益定理,分析自抗扰重复控制系统的稳定性。

定理 1: 如果同时满足下述条件,则图 3(b) 所示的自抗扰重复控制系统稳定。

- 1) $H(s)$ 稳定;
- 2) $G_p(s)$ 与 $G_c(s)$ 之间无不稳定零极点对消;
- 3) $G_p(s)G_c(s) [1 + G_p(s)G_c(s)]^{-1}$ 稳定;
- 4) $\|Q(s) [1 + G_p(s)G_c(s)]^{-1}\|_\infty < 1$, 其中 $\|\cdot\|_\infty := \sup_{0 \leq \omega < \infty} \sigma_{\max}[\cdot(j\omega)]$ 。

证明: 以 $G_p(s)$ 为对象,考虑图 3(b) 所示闭环系统稳定性。条件 1) 确保输入滤波器稳定。由于 $G_p(s)$ 与 $G_c(s)$ 之间存在外部信号,需要考虑不稳定零极点对消的情况。由于 $G_p(s)$ 稳定,且反馈控制器 $G_c(s)$ 不会引入不稳定零点。因此,在控制系统中条件 1)、2) 自动满足。

进一步,推导等效闭环系统。令外部信号为 0, 有 $r(t) = d(t) = 0$, 闭环系统内部各信号可以表示为:

$$\begin{cases} E(s) = -Y(s) \\ Y(s) = G_p(s)U_R(s) \\ U_R(s) = G_c(s)E(s) + W(s) \\ W(s) = Q(s)e^{-Ts}(G_c(s)e(s) + W(s)) \end{cases} \quad (14)$$

构建虚拟误差信号 $E(s)$ 的表达式,有:

$$E(s) = \frac{Q(s)e^{-Ts}}{1 + G_p(s)G_c(s)}E(s) \quad (15)$$

式(15)给出了闭环系统的一种等效形式,如图 5 所示。系统分为两个部分, $(1 + G_p(s)G_c(s))^{-1}$ 和 $Q(s)e^{-Ts}$ 。

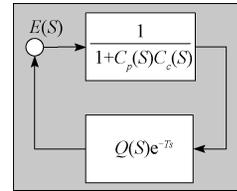


图5 自抗扰重复控制系统等效结构

Fig.5 Equivalent structure of ADRC-RC system

利用小增益定理分析系统的稳定性,需要独立讨论两个部分的稳定情况。由于

$$(1 + G_p(s)G_c(s))^{-1} = 1 - G_p(s)G_c(s) [1 + G_p(s)G_c(s)]^{-1}$$

条件 3) 保证了 $(1 + G_p(s)G_c(s))^{-1}$ 稳定; 第 2 部分 $Q(s)e^{-Ts}$ 在 $\omega_f > 0$ 的条件下也是稳定的。进一步,结合条件 4), 确保闭环系统满足小增益定理。证毕。

在等效反馈回路中 ADRC 与重复控制器相互影响,但仍可以对两个部分进行独立设计,其原因在于:先进行 ADRC 设计(即条件 3)满足),理论上总能找到合适的低通滤波器 $Q(s)$, 满足闭环系统稳定性条件。例如在极限条件下($\omega_f \rightarrow 0$), 有 $Q(s) \rightarrow 0$, 重复控制器 $C_R(s) \rightarrow 1$, 此时稳定性条件 4) 自动满足。

定理 1 同时给出了控制系统的设计要求。条件 3)

要求参数 ω_c, ω_o 能使 ADRC 系统稳定。可以采用文献 [18-19] 中的方法进行设计。条件 4) 可表示为:

$$|Q(j\omega)| < |1 + G_p(j\omega)G_c(j\omega)|, \omega \in [0, \infty)$$

表明: 在频谱范围内, 如果 $|Q(j\omega)|$ 位于 $|1 + G_p(j\omega)G_c(j\omega)|$ 之下, 则条件 4) 满足。

结合上述分析, 针对对象 $G_p(s)$ 的自抗扰重复控制器设计可以归纳为以下步骤:

- (1) 通过机理分析或系统辨识, 确定系统标称模型 $G_p(s)$, 并确定 b_0 参数;
- (2) 根据期望响应速度和参数带宽化设计准则, 选择参数 ω_c 和 ω_o 使 ADRC 系统稳定;
- (3) 设计低通滤波器 $Q(s)$ 。作频域 Bode 图 $|Q(j\omega)|$ 与 $|1 + G_p(j\omega)G_c(j\omega)|$, 选取 ω_f 使得: $|Q(j\omega)| < |1 + G_p(j\omega)G_c(j\omega)|$ 在 $\omega \in [0, \infty)$ 均成立。

3 实验验证

3.1 实验系统及模型辨识

本文以哈尔滨溶智纳芯公司型号为 Jmt2n10/s/1 的压电驱动器为研究对象, 驱动平台可在 x 轴向产生 0~20 μm 的位移, 输入驱动电压为 0~150 V。驱动控制系统包括: 压电驱动器、应变式传感器、驱动放大器、信号转换模块和 Arduino 控制器组成, 如图 6 所示。采集的信号可以由 Arduino 控制器直接传送到 MATLAB 上位机。实验中, 控制系统的采样控制周期为 2 ms。

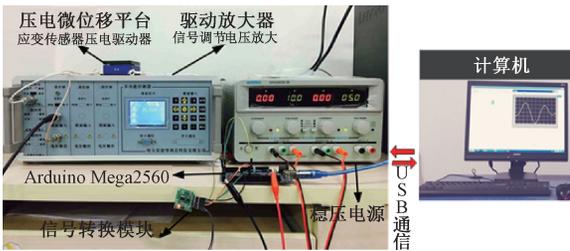


图 6 压电驱动器实验系统

Fig.6 Experimental system of the piezoelectric actuator

采集系统输入输出数据, 利用 MATLAB 工具箱将压电系统辨识为一类典型二阶系统, 得到:

$$G_p(s) = \frac{689.6}{s^2 + 209.3s + 4232} \quad (16)$$

图 7 所示给出了模型辨识效果, 所得模型 $G_p(s)$ 能够反应系统动态特性, 但存在一定偏差, 原因在于系统受到迟滞非线性和高阶模型误差影响。

3.2 控制器设计

针对标称模型 $G_p(s)$, 首先设计斜坡型 ADRC。需

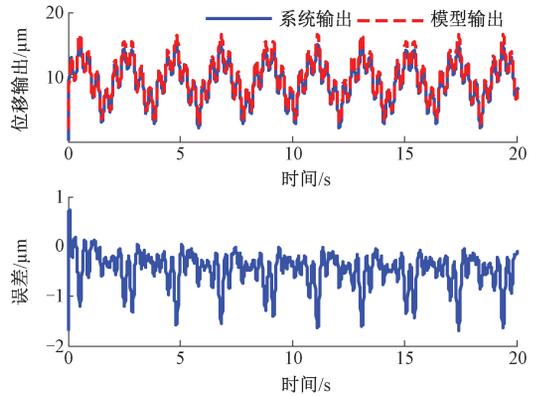


图 7 模型辨识结果

Fig.7 Results of model identification

要说明的是, 压电系统中存在迟滞非线性影响, b_0 参数需进行适当调整。本文选取 $b_0 = 147, \omega_c = 30, \omega_o = 72.7$ 。结合表 1 数据, 计算滤波器 $H(s)$ 和反馈控制器 $G_c(s)$, 斜坡型 ADRC 系统稳定。在实验测试中, 系统具有较好的控制性能, 并以这一组参数为基准进行重复控制器设计。

根据 2.4 节的步骤(3), 绘制 $|1 + G_p(j\omega)G_c(j\omega)|$ Bode 图, 并取 $\omega_f = 50, 100, 150, 200$ 绘制 $|Q(j\omega)|$ Bode 图。如图 8 所示, 当 $\omega_f < 150$ 时两条曲线完全分离, 满足定理 1 条件 4)。实际系统受到采样步长等物理条件限制, 为了保证系统的鲁棒性, 上述两条曲线应适当分离并保持足够距离。为此, 选取 $\omega_f = 40$ 进行实验研究。

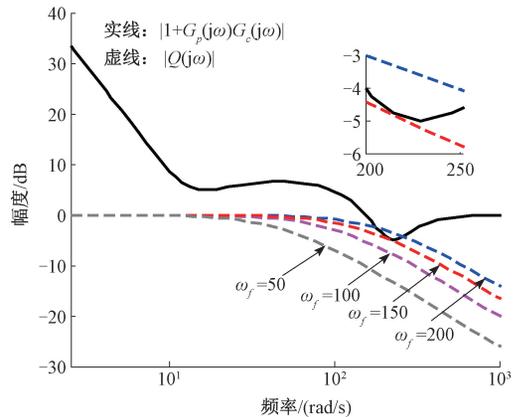


图 8 重复控制器设计

Fig.8 Design of the repetitive controller

下面进行周期跟踪控制和扰动抑制实验研究。

1) 给定周期输入信号 $r(t) = 6\sin\pi t + 8$ 。图 9 所示为周期输入信号跟踪控制实验结果。常规 LADRC 系统达到稳态后, 稳态误差为 $-2.1 \sim 2.3 \mu\text{m}$ 。可以看到, 周期跟踪误差较大。而斜坡型 ADRC 系统的稳态误差约为 $-0.33 \sim 0.52 \mu\text{m}$ 可以看到, 增加积分输出反馈控制器

后,跟踪性能得到了明显的提升;自抗扰重复控制系统的跟踪性能最好,跟踪误差在前几个周期明显递减,到达稳态后误差为 $-0.15\sim 0.05\ \mu\text{m}$ 。可见,本文提出的自抗扰重复控制实现了对周期输入信号的高精度跟踪。

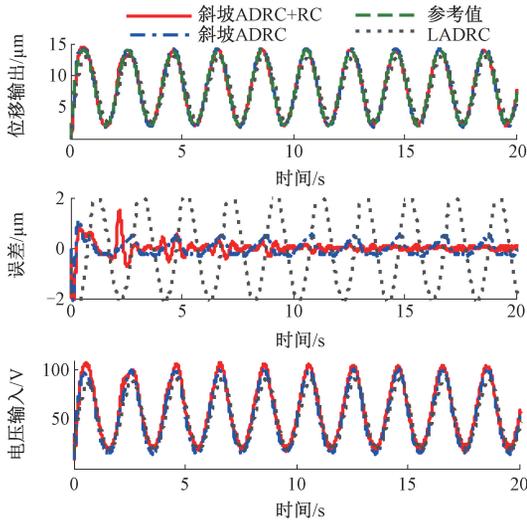


图9 周期输入的跟踪控制实验

Fig.9 Tracking control experiments with periodic input

2) 给定周期扰动信号 $d(t) = 20\sin\pi t$ (V), 扰动持续时间为 $t \in [5, 25]$ 。图10所示为周期扰动信号抑制的实验结果。可以看到,常规LADRC系统受到周期扰动时,输出波动约为 $\pm 1\ \mu\text{m}$;加入输出反馈积分控制器后,斜坡型ADRC的稳态误差约为 $\pm 0.13\ \mu\text{m}$;自抗扰重复控制器在第5个周期后,跟踪误差为 $\pm 0.01\ \mu\text{m}$ 。可见,本文提出的自抗扰重复控制实现了对周期扰动信号完全抑制。

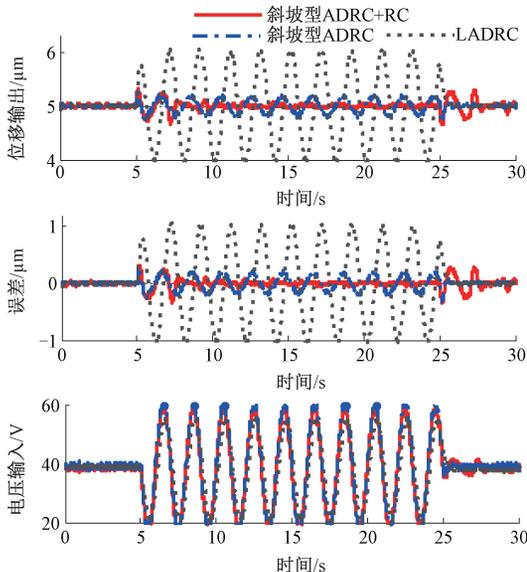


图10 周期扰动的抑制实验

Fig.10 Suppression experiment of periodic disturbance

4 结 论

本文以压电驱动器为对象,提出了一种二阶系统自抗扰重复控制设计方法。在LADRC基础上,增加输出反馈积分控制器,并构建一类能够无静差跟踪/抑制斜坡信号的ADRC控制系统。斜坡型ADRC仍采用参数带宽化整定方法,简单易用。

进一步,为实现压电驱动器的高精度周期跟踪控制,在ADRC反馈回路中引入插入式重复控制器。并在等效二自由度控制结构下,给出闭环系统的稳定性条件,为自抗扰重复控制器的设计提供了有效的分析方法。

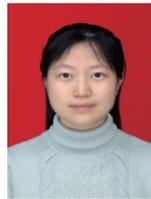
最后,通过压电驱动控制实验验证了所提方法的有效性。与常规LADRC方法相比,本文提出的自抗扰重复控制能获得更好的跟踪控制和扰动抑制效果。

参考文献

- [1] GU G Y, ZHU L M, SU C Y. Modeling and compensation of asymmetric hysteresis nonlinearity for piezoelectric actuators with a modified Prandtl-Ishlinskii model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1583-1595.
- [2] 王钰锋, 郭咏新, 毛剑琴. 压电作动器的率相关迟滞建模与跟踪控制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 616-625.
WANG Y F, GUO Y X, MAO J Q. Rate-dependent modeling and tracking control of piezoelectric actuators[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(3): 616-625.
- [3] LI L L, LI CH X, GU G Y, et al. Modified repetitive control based cross-coupling compensation approach for a piezoelectric tube scanner of atomic force microscopes [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(2): 666-676.
- [4] 王代华, 严松林, 朱炜. 基于Bouc-Wen模型的压电执行器的前馈线性化控制器[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1514-1521.
WANG D H, YAN S L, ZHU W. Bouc-Wen model based feedforward linearization controller for piezoceramic micro-actuators [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(7): 1514-1521.
- [5] KO Y R, HWANG Y, CHAE M, et al. Direct identification of generalized Prandtl-Ishlinskii model inversion for asymmetric hysteresis compensation[J]. ISA Transactions, 2017, 70: 209-218.
- [6] LIU Y, GAO X, LI Y. Giant magnetostrictive actuator nonlinear dynamic Jiles-Atherton model[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2016, 250: 7-14.

- [7] HAN J. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [8] WANG L, SU J. Disturbance rejection control for non-minimum phase systems with optimal disturbance observer[J]. ISA Trans, 2015, 57: 1-9.
- [9] NIE ZH Y, WANG Q G, SHE J H, et al. New results on the robust stability of control systems with a generalized disturbance observer[J]. Asian Journal of Control, 2019. DOI: 10.1002/asjc.2188
- [10] 刘瑞娟, 聂卓赞, 邵辉, 等. 基于扩张状态观测器的迟滞非线性系统辨识[J]. 仪器仪表学报, 2017(8): 1970-1977.
LIU R J, NIE ZH Y, SHAO H, et al. Identification for hysteresis nonlinear system based on extended state observer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017(8): 1970-1977.
- [11] MERRY R J E, KESSELS D J, HEEMELES W P M H, et al. Brief paper: Delay-varying repetitive control with application to a walking piezo actuator[J]. Automatica, 2011, 47(8): 1737-1743.
- [12] 张东纯, 曾鸣, 苏宝库. 高精度速率控制系统的有限维重复控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(s1): 412-414.
ZHANG D CH, ZENG M, SU B K. Finite-dimensional repetitive control method for high precision velocity control systems [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(s1): 412-414.
- [13] NIE ZH Y, LIU R J, WANG Q G, et al. Novel identification approach for nonlinear systems with hysteresis [J]. Nonlinear Dynamics, 2018: 1-14.
- [14] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]. American Control Conference, 2003: 4989-4996. DOI: 10.1109/ACC.2003.1242516.
- [15] JIN H Y, SONG J CH, LAN W Y, et al. On the characteristics of ADRC: A PID interpretation [J/OL]. Science China Information Sciences, 2019. <http://engine.Scichina.com/doi:/10.1007/s11432-018-9647-6>.
- [16] NIE ZH Y, MA Y J, WANG Q G, et al. Guaranteed-cost active disturbance rejection control for uncertain systems with an integral controller [J]. International Journal of Systems Science, 2018, 49(9): 2012-2024.
- [17] HARA S, YAMAMOTO Y, OMATO T, et al. Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33(7): 659-668.
- [18] 陈增强, 王永帅, 孙明玮, 等. 二阶非线性系统自抗扰控制的全局渐近稳定性 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 144-153.
CHEN Z Q, WANG Y SH, SUN M W, et al. Global and asymptotical stability of active disturbance rejection control for second-order nonlinear systems [J]. Control Theory and Applications, 2018, 35(11): 144-153.
- [19] 周蓉, 韩文杰, 谭文. 线性自抗扰控制的适用性及整定 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 111-119.
ZHOU R, HAN W J, TAN W. On applicability and tuning of linear active disturbance rejection control [J]. Control Theory and Applications, 2018, 35 (11): 111-119.

作者简介



刘瑞娟, 分别于 2004 年和 2008 年在长沙理工大学获得学士学位和硕士学位, 2014 年于中南大学获得博士学位, 现为厦门理工学院副教授, 主要研究方向为鲁棒控制、分数阶系统。

E-mail: liuruijuan0313@163.com

Liu Ruijuan received her B. Sc. and M. Sc. degree both from Changsha University of Science and Technology in 2004 and 2008, respectively, and received her Ph.D. degree from Central South University in 2014. She is currently an associate professor at Xiamen University of Technology. Her main research interests include robust control and fractional-order system.



聂卓赞(通信作者), 分别于 2006 年和 2012 年在中南大学获得学士学位和博士学位, 现为华侨大学副教授, 主要研究方向为鲁棒控制、系统建模与辨识。

E-mail: yezhuyun2004@sina.com

Nie Zhuoyun received his B. Sc. degree and Ph.D degree both from Central South University in 2006 and 2012, respectively. He is currently an associate professor at National Huaqiao University. His main research interests include robust control, system modeling and identification.