

超磁致伸缩微致动器车削系统建模与控制*

袁惠群^{1,2}, 李莹², 李东¹, 梁明轩², 孟凡兴³

(1. 东北大学理学院 沈阳, 110819) (2. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳, 110819)

(3. 沈阳大学理学院 沈阳, 110044)

摘要 综合考虑温度、预应力及碟簧非线性的影响, 建立超磁致伸缩微致动器(giant magnetostrictive micro-actuator, 简称 GMA)车削加工系统非线性动力学微分方程。根据精确反馈线性化的滑模变结构控制方法设计控制器, 采用双曲正切函数代替符号函数, 并引进边界层, 减少了系统的抖振, 增加控制器的连续性。最后通过试验, 验证了该控制方法的有效性, 当系统存在外界干扰或是参数摄动时, 该文设计的控制方法都能取得较好的控制效果, 稳态误差达到纳米级。

关键词 超磁致伸缩微致动器; 精密车削加工; 精确反馈线性化; 滑模变结构控制; 抖振

中图分类号 TP391

引言

超磁致伸缩材料(GMM)制成的超磁致伸缩微致动器(GMA)具有大位移、强力、快速响应、高可靠性、小漂移量、低驱动电压等突出优点, 代替传统的伺服电机加滚珠丝杠式、电液伺服、金属靠模、压电陶瓷、电磁伺服和直线电机等伺服驱动装置, 成为现代精密加工、超精密加工领域的发展趋势。然而, 由于 GMA 在外激励电流与磁化强度之间、磁致伸缩应变与输出位移之间存在滞回, 特别是前者的滞回非线性机理比较复杂, 给 GMA 的建模与控制带来了困难与挑战。

由大量的实验^[1]可知, 外激励电流在 $[0, 10]$ A 内 GMA 的输出位移与外激励电流呈现很好的线性, 因此研究 GMA 车削系统在 GMA 线性工作区的模型与控制具有一定的实际意义。文献[2-3]建立了 GMA 系统的二阶微分方程, 分别采用了相位补偿与迟滞逆模型相结合、神经网络前馈逆控制与 PID 反馈相结合控制、P-模糊 PID 控制方法实现了 GMA 在线性工作区的控制。文献[4]将 GMA 系统简化为一阶惯性环节, 并分别采用自抗扰控制技术、单参数模糊自整定 PID 控制技术得到了较好的控制效果。文献[5-6]建立了 GMA 车削加工系统的动力学模型, 并利用所建立的理论模型, 通过反求

确定所需的系统输入电流, 但是存在较大的误差。以上文献无论是在单纯 GMA 建模与控制或是 GMA 车削加工系统的建模与控制都没有考虑温度及预应力的影响。

近年来, 由于滑模变结构控制具有强鲁棒性的突出优点, 受到控制界的青睐, 在实际工程问题中起到了重要的作用。滑模变结构控制已经成功应用在了电力驱动系统控制^[7]、机器人控制^[8]、压电陶瓷驱动器^[9-10]等系统的控制中。在非线形控制研究方法中, 基于精确线性化反馈的滑模变结构控制方法已经被证明是控制非线性系统的一种有效方法^[11]。

现以文献[5, 12]建模思想为根源, 参考文献[13], 考虑温度及应力的影响建立了 GMA 车削加工系统动力学模型。采用精确反馈线性化的滑模变结构控制方法设计了控制器, 用双曲正切函数代替符号函数, 并引进边界层的概念, 减少了系统的抖振, 增加控制器的连续性, 通过 Simulink 仿真验证了文中提出的控制方法的有效性。

1 GMA 车削加工系统动力学模型

GMA 等效力学系统模型如图 1 所示。在等效系统理论下, GMA 输出端可看作为等效集中质量、阻尼、弹簧系统。以 GMM 棒作为研究对象, 假设

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090042110003, 20120042120031)
收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2014-01-02

同一横截面上各点仅在 x 方向产生相等的位移。在棒中取一段微元 dx , 如图 2(a) 所示; 对其进行受力分析, 如图 2(b) 所示。

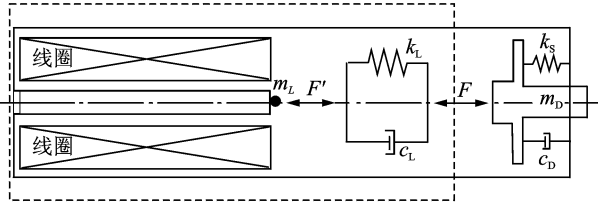
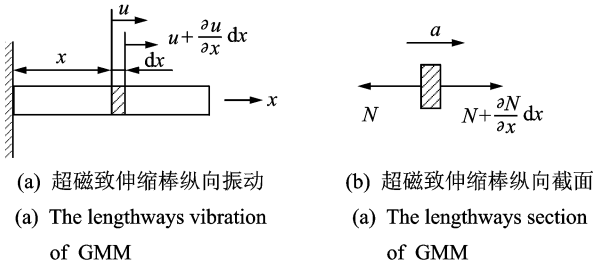


图1 等效力学模型

Fig. 1 Equivalent mechanical model



(a) 超磁致伸缩棒纵向振动
(a) The lengthways vibration of GMM

(b) 超磁致伸缩棒纵向截面
(a) The lengthways section of GMM

图2 超磁致伸缩棒振动图

Fig. 2 The lengthways vibration and section of GMM

图 2 中: 棒的轴向坐标为 x , 假设棒的左端固定 ($x=0$), 右端的输出部分可看作为阻尼系数为 c_L 和刚度为 k_L 的弹簧约束。由预压螺栓和弹簧对棒施加预压力 δ_c , 在 δ_c 作用下末端位移为 u_0 , 则 $u_0 = \delta_0 L/E_0$ 。 $u(t, x)$ 为 t 时刻距离棒左端位移为 x 处的纵向位移; $u(t, L)$ 为 t 时刻棒末端位移; N 为内力; N_{tot} 为 t 时刻棒左端输出轴力。根据应变的定义, 微元段上的应变可写为: $\epsilon = \partial u / \partial x$ 。

GMA 总是在受压状态工作, 考虑温度及应力的超磁致伸缩应变 ϵ 本构关系方程^[13]为

$$\epsilon = \sigma/E + \alpha \Delta T + \lambda_s \tanh(2\delta_0/\sigma_s) / 2 + \lambda \quad (1)$$

其中: λ 为磁致伸缩系数。

$$\lambda = (-\tilde{B}\Delta T + [2 - \tanh(2\sigma_0/\sigma_s)]\lambda) M^2/M_s^2$$

考虑其动态模型, 在线弹性小位移、Kelvin-Voigt 阻尼假设下, 当超磁致伸缩材料棒内的 $x(0 < x < L)$ 方向的总应力完全穿过棒时, 由式(1)得轴力为

$$N_{tot}(t, x) = EA \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + c_L A \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}(t, x) - \alpha EA \Delta T - \frac{\lambda_s EA}{2} \tanh\left(\frac{2\sigma_0}{\sigma_s}\right) - EA \lambda(t) \quad (2)$$

用于非圆型面车削加工的 GMA, 对输出顶杆进行受力分析(图 3)。

考虑到车削加工系统的切削力, 可将 GMA 内

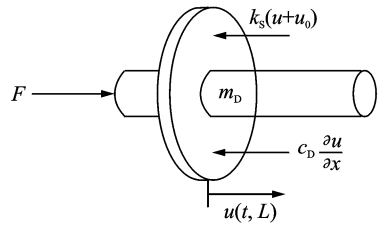


图3 输出顶杆受力分析

Fig. 3 Output mandril stress analysis

部看作一端固定, 一端既有冲击载荷、弹性支承又有惯性载荷的连续体纵向振动系统。

由牛顿第二定律得

$$F = m_D \frac{\partial^2 u(t, L)}{\partial t^2} + c_D \frac{\partial u(t, L)}{\partial t} + k_s [u(t, L) + u_0] + F_{QX} + \alpha_1 [u(t, L)]^2 + \alpha_2 [u(t, L)]^3 \quad (3)$$

其中: $F_{QX} = 366.44u(t, L)f^{0.75}$, f 为刀头进给量。

在超磁致伸缩棒的右端面 $x=L$ 处, 参照图 1, 由力平衡条件得

$$N_{tot}(t, L) = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(t, L) + c \frac{\partial u}{\partial t}(t, L) + ku(t, L) + k_s u_0 + F_{QX} + \alpha_1 [u(t, L)]^2 + \alpha_2 [u(t, L)]^3 \quad (4)$$

其中: $m = m_L + m_D$; $c = c_L + c_D$; $k = k_L + k_s$ 。

假设 GMM 棒与输出顶杆间为刚性联接, GMM 棒的输出端位移与刚性输出顶杆的位移一致, 因此有 GMM 棒在输出端的应变为 $\epsilon = u(t, L)/L$ 。

由文献[14]得, 考虑温度及预应力的理想滞回模型为

$$\begin{cases} dM/dH = g [1 - \coth^2(H_e/a) + (a/H_e)^2] / a \\ H_e = H + \bar{\eta} M \end{cases} \quad (5)$$

将基于偏置磁化强度 M_0 , 线性化磁化强度 $M(t, x)$, 并将式(5) Taylor 展开且忽略高次项, 根据线性化原理得

$$\lambda(t, x) = K_\lambda [2H(t, x)H_0 - H_0^2] \quad (6)$$

$$H = n\chi_r \ln\left(\frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (2l)^2}}{(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (2l)^2})} I(t) / (2(R_2 - R_1))\right) \quad (7)$$

参数 $a, g, \bar{\eta}$ 的表达式见文献[13], $K_\lambda = [-\tilde{B}\Delta T + [2 - \tanh(2\delta_0/\sigma_s)]\lambda_s] (g / (3a - M_s \bar{\eta})^2) / M_s^2$, 联立式(2)、式(4)、式(6), 得 GMA 车削加工系统动力学模型为

$$\ddot{X}(t) + (k_1 - k_2 X(t)) \dot{X}(t) + \omega^2 X(t) +$$

$$\frac{\alpha_1}{m}(X(t))^2 + \frac{\alpha_2}{m}(X(t))^3 + x_0 + k_3 I(t) = 0 \quad (8)$$

其中:系数 $k_1, k_2, k_3, \omega^2, x_0$ 可根据前述方程推导,由于篇幅原因不再给出。

涉及的参数物理意义及在后文的仿真取值为: $L(0.5 \text{ m}), E(6.0274 \text{ GPa})$ 分别为超磁致伸缩材料棒的长度和弹性模量; $\mu_0(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$ 为真空磁导率;饱和磁致伸缩系数为 $\lambda_s(1.005 \times 10^{-2} \text{ m})$;饱和磁化强度为 $M_s(7.65 \times 10^5 \text{ A/m})$;饱和应力为 $\delta_s(2 \times 10^8 \text{ Pa})$;预应力为 $\delta_0(-6.96 \times 10^6 \text{ Pa})$; λ 为磁致伸缩应变;初始磁化率为 $\chi_m(35)$;热膨胀系数为 $\alpha(12 \times 10^{-6})$;饱和磁致伸缩应变随温度变化的线性率为 $\tilde{B}(2.5 \times 10^{-6})$;材料的易轴转化温度为 $T_r(0 \text{ }^\circ\text{C})$;居里温度为 $T_c(383.3 \text{ }^\circ\text{C})$;饱和磁化随温度变化的放大系数为 $x(0.5)$; $\eta(0.02)$ 为分子场参数;钉扎系数为 $K(5000 \text{ A/m})$;外加磁场增加时 $\zeta=1$;外加磁场减小时 $\zeta=-1$; $c(0.18)$ 为正常磁化曲线和理想磁化曲线初始磁化率的比值; $\alpha_2(-2.22 \times 10^7), \alpha_2(2.56 \times 10^6)$ 为碟簧非线性系数; $R_1(0.015 \text{ m})$ 为绕阻内径; $R_2(0.0325 \text{ m})$ 为绕阻外径; $n(1500 \text{ 匝})$ 为线圈匝数;材料棒的质量 $m_D=0.5/3 \text{ kg}$;材料等效阻尼 $c_L=100 \text{ (N} \cdot \text{s)/m}^2$;外部等效阻尼 $c_D=c_L$;GMM 棒等效刚度为 k_L ,外部等效刚度为 $k_S, k_L=2k_S \times 10^7 \text{ N/m}$; $\Delta T=20 \text{ }^\circ\text{C}$;GMM 棒面积 $A=0.45239 \times 10^{-2} \text{ m}^2$;偏置磁场 $H_0=2 \times 10^4 \text{ A/m}$ 。

2 GMA 车削加工系统的精确反馈线性化

控制器设计的目的是设计控制电流使 GMA 的输出位移跟踪期望位移。

令 $x_1=x(t) + z_0, \dot{x}_1=\dot{x}(t) = x_2, z_0=x_0/\omega^2, \mathbf{X}=(x_1, x_2)^T, \mathbf{U}=(0, I)^T$, 则式(9)的状态方程写为矩阵形式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{g}(\mathbf{X})\mathbf{U} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -(k_1+k_2z_0)x_2 - \omega^2x_1 + k_2x_1x_2 - a_1(x_1-x_0)^2/m - a_2(x_1-x_0)^3/m \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{X}) = [0 \quad k_3k_1]^T, h(x(t)) = x_1$$

$$I(t) = -\frac{-(k_1+k_2z_0)x_2 - \omega^2x_1 + k_2x_1x_2 - \frac{\alpha_1}{m}(x_1-z_0)^2 - \frac{\alpha_2}{m}(x_1-z_0)^3}{k_3k_1} + \frac{1}{k_3k_1}v$$

$$v = \ddot{y}_d - \dot{c}\dot{e} - k \tanh(s/\Omega), k > 0$$

由于

$$L_g h(x) = [1 \quad 0] [0 \quad k_3k_1]^T = 0$$

$$L_f^2 h(x) = -(k_1+k_2z_0)x_2 - \omega^2x_1 + k_2x_1x_2 -$$

$$\frac{\alpha_1}{m}(x_1-z_0)^2 - \frac{\alpha_2}{m}(x_1-z_0)^3 \neq 0$$

则系统的相对阶为 2, 满足精确反馈线性化的条件。

非线性系统(10)的线性化标准形式为

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (10)$$

线性化反馈取

$$I(t) = -L_f^2 h(x)/L_g L_f h(x) + v/L_g L_f h(x) \quad (11)$$

其中: $L_g L_f h(x) = [0 \quad 1] [0 \quad k_3k_1]^T = k_3k_1$ 。

3 滑模控制器的设计

滑模变结构控制有两个显著的特点^[14]: a. 通过开关函数即滑模面的设计可以改善系统的动态性能; b. 闭环系统对不确定及外界干扰具有不变性。滑模变结构控制器的设计主要包括两个相对独立的部分: a. 设计切换函数, 即滑模面, 使它所确定的滑动模态渐进稳定且具有良好的动态品质; b. 设计滑动模态控制律, 使到达条件得到满足。

设系统的指令信号为 y_d , 则跟踪误差为 $e = y - y_d$; 误差的导数为 $\dot{e} = \dot{y} - \dot{y}_d$; 设计滑模面为 $s(x, t) = ce + \dot{e}$, 系统(10)的控制律设计为

$$v = \ddot{y}_d - \dot{c}\dot{e} - k \text{sgn}(s) \quad (k > 0) \quad (12)$$

定义 Lyapunov 函数

$$V = s^2/2 \quad (13)$$

$$\dot{V} = s\dot{s} = z(\dot{e} + c\dot{e}) = \quad (14)$$

$$s(f(x, t) + g(x, t)u - \ddot{x}_d + \dot{c}\dot{e}) =$$

$$s(-k \text{sgn}(s)) = -k|s| \leq 0$$

则系统稳定。

为了减弱系统的抖振及使系统达到指数稳定, 且保证系统具有对干扰具有不变性, 在滑模面附近引进边界层, 选择双曲正切函数代替符号函数^[15]

$$\text{sgn}(s) = \tanh(s/\Omega) \quad (15)$$

其中: Ω 为正常数, 为边界层的厚度。

则系统总的控制器设计为

$$v = \ddot{y}_d - \dot{c}\dot{e} - k \tanh(s/\Omega), k > 0 \quad (16)$$

4 精密位置控制试验

GMA 车削加工系统的试验台主要由 GMA、微型机、数控恒流源、位移传感器、控制装置等组成(见图 4),实验测量示意图见图 5。向数控电源中的单片机中写入控制算法;通过光电编码器和位移传感器确定当前 GMA 输出位移,并与期望位移进行对比;根据当前的运行状态,通过控制算法相应调节电流的大小。

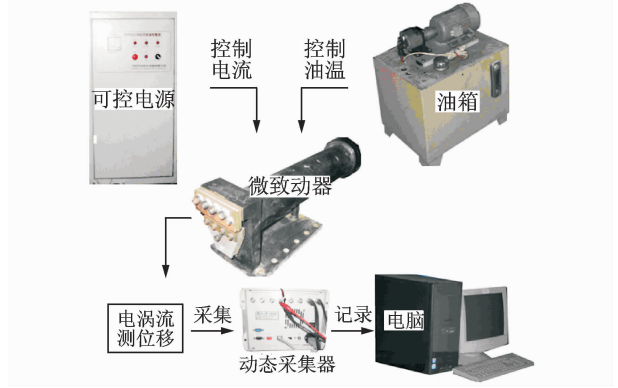


图 5 实验测量示意图

Fig. 5 The diagram of experiment's process

位移测量装置采用电流式电涡流位移传感器测量动态位移,测量的线性范围为:0.5~2.1 mm。数据采集装置采用江苏联能电子技术有限公司生产的 YE6263 型动态数据采集测试系统。通过设备中的采集卡,将电压信号采集并存储在电脑中。

在试验中,选择阶跃信号和正弦为参考信号作为试验。控制参数的选取 $k=1, c=500, \Omega=10^{-4}$ 。仿真结果如图 6,7 所示。

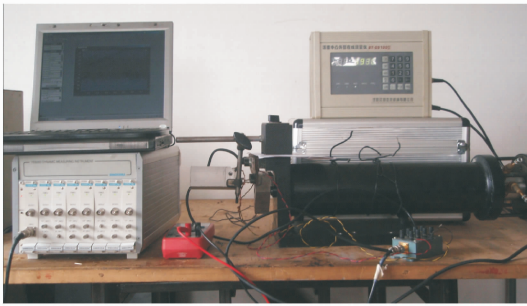


图 4 实验测量示意图

Fig. 4 The diagram of experiment's process

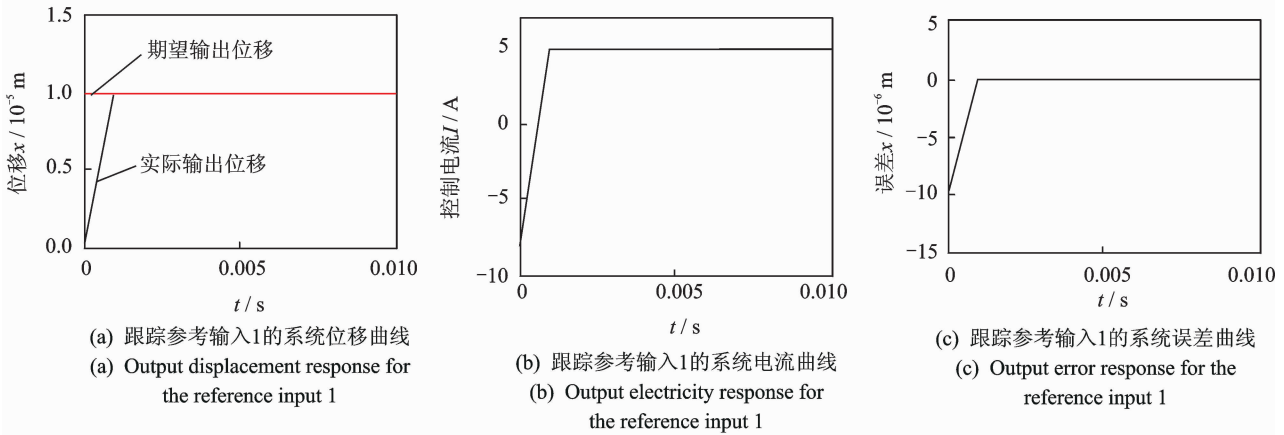


图 6 跟踪参考输入 1 系统位移、电流、误差曲线

Fig. 6 Output displacement, electricity, error response for the reference input 1

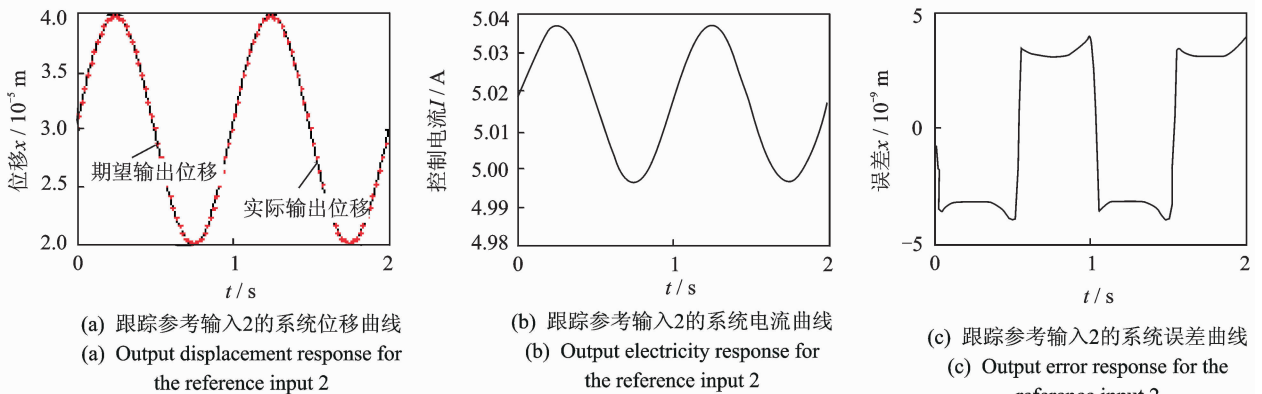


图 7 跟踪参考输入 2 的系统位移、电流、误差曲线

Fig. 7 Output displacement, electricity, error response for the reference input 2

参考输入方波信号 1: $y_d = 10 \mu\text{m}$; 参考输入 2: $y_d = 10 \sin(2\pi t) + 30 \mu\text{m}$ 的正弦信号。

图 6 和图 7 分别为系统跟踪参考输入 1 和参考输入 2 的 GMM 棒端输出位移曲线、控制电流曲线及误差曲线。由仿真图可知,系统在瞬间就很好地跟踪参考输入,稳态误差的绝对值达到纳米级。

5 结束语

笔者以文献建模思想及超磁致伸缩材料的机械-电-磁热-耦合本构关系为根源,根据扩展的 Jiles-Atherton 滞回模型、结合 Kelvin-Voigt 阻尼理论、二次畴转模型,将温度及应力的影响考虑在 GMA 耦合磁弹性本构模型中,建立了综合考虑温度及预应力影响的 GMA 车削加工系统动力学模型。根据精确反馈线性化的滑模变结构控制方法设计了控制器,采用双曲正切函数代替符号函数,引进边界层,减少了由于控制算法本身的抖振,增加控制器的连续性。通过试验验证了文中建模与控制方法有效性,满足工程精度要求。

参 考 文 献

- [1] 代志刚. GMA 磁滞非线性动力学理论与实验研究[D]. 沈阳:东北大学, 2010.
- [2] 王湘江, 王兴松. 超磁致伸缩驱动器建模及其迟滞补偿[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(5): 812-819.
Wang Xiangjiang, Wang Xingsong. Model building and hysteresis compensation for giant magnetostrictive actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(5): 812-819. (in Chinese)
- [3] 杨凌霄, 陶玉昆, 钟颖, 等. 超磁致伸缩执行器的 P-模糊 PID 控制[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1): 214-217.
Yang Lingxiao, Tao Yukun, Zhong Ying, et al. Control with P-fuzzy PID for giant magnetostrictive actuator in Chinese [J]. Computer Simulation, 2011, 28(1): 214-217. (in Chinese)
- [4] 曹淑瑛. 超磁致伸缩致动器的磁滞非线性动态模型与控制技术[D]. 天津:河北工业大学, 2004.
- [5] 孙华刚. 超磁致伸缩换能器耦合磁弹性理论及车削加工应用研究[D]. 沈阳:东北大学, 2008.
- [6] 袁惠群, 孙华刚, 李东, 等. 超磁致伸缩换能器的磁滞非线性动力学仿真[J]. 力学与实践, 2009, 31(3): 35-38.
- [7] Yuan Huiqun, Sun Huagang, Li Dong, et al. Nonlinear dynamic characteristic caused by hysteresis of the giant magnetostrictive transducer in Chinese [J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(3): 35-38. (in Chinese)
- [8] Wai R J, Lin C M, Hsu C F, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for electrical servo drive [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 143(2): 295-310.
- [9] Stepsnenko U, Yong Cao, Chun Yisu, et al. Variable structure control of robotic manipulator with pid sliding surfaces [J]. International Journal of Robust and Non-linear Control, 1998, 8(1): 79-90.
- [10] Li Yangmin, Xu Qingsong. Adaptive sliding mode control with perturbation estimation and PID sliding surface for motion tracking of a piezo-driven micromanipulator [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(4): 798-810.
- [11] Liaw H C, Shirinzadeh B, Smith J. Sliding-mode enhanced adaptive motion tracking control of piezoelectric actuation systems for micro/nano manipulation [J]. Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(4): 826-833.
- [12] Utkin V L. Sliding mode control design principles and applications to electric drives [J]. Transactions on Industrial Electronics, 1993(40): 23-26.
- [13] Dapinno M J, Smith R C, Flatau A A, et al. A structural strain model for magnetostrictive transducers [J]. Transaction on Magnetics, 2000, 36(3): 545-556.
- [14] Zheng Xiaojing, Le Sun. A one-dimension coupled hysteresis model for giant magnetostrictive materials [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 309(2): 263-271.
- [15] Ilyas Eker. Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an electromechanical plant [J]. Setting the Standard for Automation, 2006, 45(1): 109-118.
- [16] Hung J Y, Gao W, Hung J C, et al. Variable structure control: a survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 2-21.



第一作者简介:袁惠群,男,1954年7月生,教授、博士生导师。主要研究方向为工程非线性振动与控制,转子动力学与动力机械故障诊断等。曾发表《转子动力学基础》(北京:冶金工业出版社,2013年)等论著。

E-mail: yuan_hq@163.com