

# 超磁致伸缩微致动器车削加工系统模糊自适应精密位移控制

李莹<sup>1,3</sup>, 袁惠群<sup>2†</sup>, 梁明轩<sup>1</sup>

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

3. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 考虑温度及弹簧非线性的影响, 基于非线性压磁理论、扩展的J-A模型及动力学分析, 建立超磁致伸缩微致动器车削加工系统非线性动力学模型; 研究了前馈径向基函数(RBF)逆控制与多模自适应反馈控制方法. 提出了以系统运行时间为开关的多模切换控制方案, 在系统初始运行时刻采用PD反馈控制器, 当时间达到规定的切换时刻采用自适应模糊滑模反馈控制器, 使系统全局具有较高的跟踪精度.

**关键词:** 超磁致伸缩微致动器; 车削加工系统; J-A模型; 径向基函数; 自适应模糊滑模控制; 多模切换控制

中图分类号: TM153 文献标识码: A

## Chaotic adaptive precision-displacement control for giant magnetostrictive actuator cutting systems

LI Ying<sup>1,3</sup>, YUAN Hui-qun<sup>2†</sup>, LIANG Ming-xuan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automatization, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;

2. School of Science, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China;

3. School of Mechanical Engineering and Automatization, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui 232001)

**Abstract:** Considering temperature and nonlinear effects of saucer reed, based on the nonlinear pressure magnetic theory, the expansion of J-A model and dynamic analysis, the nonlinear dynamic model of a giant magnetostrictive actuator cutting system is established. A control method using the radial basis function (RBF) neural network and the multiple model adaptive feedback is developed. In the initial operation time, a PD controller is adopted; then, the adaptive fuzzy sliding mode controller is employed. The system has a high precision in displacement tracking during the whole process of cutting.

**Key words:** giant magnetostrictive actuator; cutting system; J-A model; radial basis function (RBF); adaptive fuzzy sliding model control; multiple mode switch control

### 1 引言(Introduction)

以Terfenol-D为代表的稀土超磁致伸缩材料(GMM)作为一种新型高效磁(电)-机械(声)转换材料,性能远优于压电陶瓷等传统材料<sup>[1]</sup>. 以这种材料为驱动元件的电-机械转换装置——超磁致伸缩微致动器(GMA),具有大应变、结构简单紧凑、重复精度高和快速响应等优点,将它作为数控车削加工中刀具的驱动伺服系统既可实现自动控制高精密加工,克服传统零件加工方法的缺点,又适用于复杂型线或硬质基体的加工. 因此, GMA作为数控车床的刀架进给伺服系统将给精密及超精密数控车床加工带来巨大变革. 然而, GMM具有固有的滞回特性<sup>[2-4]</sup>,它的存在给系统的建模与控制带来很大的挑战,严重影响了GMA的应用.

针对GMA控制,在低场应用中,通过给GMA加偏置磁场、预应力和输入小电流,将GMA系统简化为一阶或二阶惯性环节加延迟环节的系统,并采用线性控制方法<sup>[5-9]</sup>取得较好的控制效果,但是只适合在低场中.

目前,对GMA滞回非线性控制主流的方法是前馈逆控制与反馈控制相结合的方法. 文献[9]基于Priesach滞回模型研究了GMA的前馈逆控制与PID控制相结合的方法<sup>[10]</sup>,文献[11-12]基于P-I模型研究了滞回补偿控制方案;文献[13]直接基于J-A模型建立了GMA的逆动态模型,研究了自适应反馈控制;文献[14-15]基于J-A模型研究了GMA的神经网络逆控制与PID的控制方法.

然而,一方面以上GMA的建模过程中都没有考虑

温度的影响,大量实验证明,GMM存在 $\Delta E$ 效应<sup>[16]</sup>,温度的影响不能被忽视;另一方面,以上文献的反馈控制器都采用了传统的PID控制,固定参数的PID参数缺乏自适应能力。

本文考虑温度及碟簧非线性的影响,基于扩展的J-A滞回模型、非线性压磁方程及动力学分析,建立了较精确的GMA车削系统动力学模型,并采用径向基函数(radial basis function, RBF)前馈多模反馈控制方法设计了控制器,较单纯的模糊滑模自适应控制方法,此方法全局跟踪精度较高。

## 2 GMA车削加工系统动力学模型(The model of GMA cutting system)

### 2.1 模型建立(Established model)

建立GMA车削系统模型目的是确定外激励电流 $I(t)$ 与输出位移 $x(t)$ 之间的关系。在整个运动过程中,GMM棒一端位移为0,另一端始终与负载有相同的位移 $x$ 、速度 $\dot{x}$ 和加速度 $\ddot{x}$ 。基于文献[7]的假设,将GMA车削加工系统的动力学过程简化为等效单自由度力学模型如图1所示。其中: $l, A, \rho, E, c_D$ 分别为GMM棒的长度、横截面积、密度、杨氏模量和内部阻尼系数。 $K_r, M_r, c_r$ 分别为GMM棒的等效刚度系数、等效阻尼系数、等效质量;设 $K_l, M_l, c_l$ 分别为负载的等效刚度、等效质量和等效阻尼; $F, x(t), \sigma_0$ 分别为GMM棒的输出力、位移和受到的预应力, $F_1$ 为负载对棒的作用力, $F_{车削}$ 为车削力。

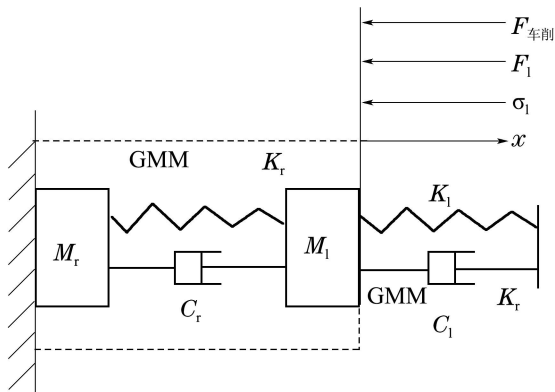


图1 GMA车削系统受力简图

Fig. 1 Forced diagram of GMA cutting system

考虑温度及应力影响的GMM棒的质量与阻尼的GMM的本构关系模型为

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{E} + \frac{\lambda_s}{\sigma_s}\right)\sigma + \alpha\Delta T + \lambda - (c_D/E)\dot{\varepsilon} - \frac{\rho l^2}{3E}\ddot{\varepsilon}, \quad (1)$$

其中: $\varepsilon$ 为GMM棒总应变,饱和磁致伸缩系数 $\lambda_s$ ,饱和磁化 $M_s$ ,饱和应力 $\sigma_s$ ,应力 $\sigma$ , $\Delta T$ 为温度的变化量, $\alpha$ 为热膨胀系数。

考虑弹簧的非线性,可知负载对GMM棒的作用力

为

$$F_1 = M_l\ddot{x} + c_l\dot{x} + K_lx + \alpha_1x^2 + \alpha_2x^3. \quad (2)$$

考虑到GMM棒受到预紧螺栓和弹簧垫圈的预应力 $\sigma_0$ ,根据牛顿第二定律及应力应变关系,得GMM棒的输出力

$$F = -(F_1 + \sigma_0A) = \sigma A. \quad (3)$$

则联立式(1)–(3),得GMA车削系统动力学模型为

$$\begin{aligned} & \left(\frac{E'A\rho l}{3E} + M_l\right)\ddot{x} + \left(\frac{E'A c_D}{El} + c_l\right)\dot{x} + \\ & \left(\frac{E'A}{l} + K_l\right)x + \alpha_1x^2 + \alpha_2x^3 - \\ & \alpha E'A\Delta T - E'A\lambda + \sigma_0A + F_{车削} = 0, \quad (4) \end{aligned}$$

其中: $E' = 1/(1/E + \lambda_s/\sigma_s)$ ,主切削力模型力<sup>[17]</sup>为 $F_{车削} = 366.44f^{0.75}x(t)$ 。

由文献[18]有,考虑温度及预应力影响的磁致伸缩应变模型及J-A滞回模型为

$$\lambda = \frac{-\tilde{B}\Delta TM^2}{M_s^2} + \frac{[2 - \tanh(2\sigma_0/\sigma_s)]\lambda_s M^2}{M_s^2}, \quad (5)$$

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M + \zeta K c d M_{an} / (dH_e)}{(\zeta K - \bar{\eta}(M_{an} - M + \zeta K c d M_{an} / (dH_e)))}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} H_e = H + \bar{\eta}M, \\ \bar{\eta} = \eta - \frac{2\tilde{B}\Delta T\sigma}{\mu_0 M_s^2} + \frac{4\sigma - \sigma_s \ln[\cosh(2\sigma/\sigma_s)]}{2\mu_0 M_s^2} \lambda_s, \end{cases} \quad (7)$$

其中参数的意义及公式推导见文献[19]。

由文献[20]知

$$H(t) = \frac{n\chi I(t)}{2(R_2 - R_1)} \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + l^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + l^2}}, \quad (8)$$

其中:真空磁导率 $\mu_0$ ,饱和磁致伸缩应变随温度变化的线性率 $\tilde{B}$ ,钉扎系数 $K$ ,外加磁场增加时 $\zeta = 1$ ,外加磁场减小时 $\zeta = -1$ ;  $c$ 为正常磁化曲线和理想磁化曲线初始磁化率的比值;有效磁场 $H_e$ , $R_1, R_2$ 为线圈绕阻内、外径, $n$ 为线圈的匝数, $\chi$ 为修正系数,令 $u(t) = I(t)$ 为控制电流,即为所设计控制器的总输出。

### 2.2 模型验证(Model validation)

为了验证本文所建模型的正确性,分别对频率为100 Hz, 500 Hz, 800 Hz, 1000 Hz, 1250 Hz及1500 Hz的情况下通过数值求解做出了外激励磁场–输出位移关系图,见图2所示,并与实验测量图进行了比较知<sup>[20]</sup>,根据本文所建立模型计算结果与实验测量得到的结果图形,在变化趋势上完全一致,并且对应的频率也相同,各个频率对应的结果图形也有很好的相似度,验证了该模型的正确性。

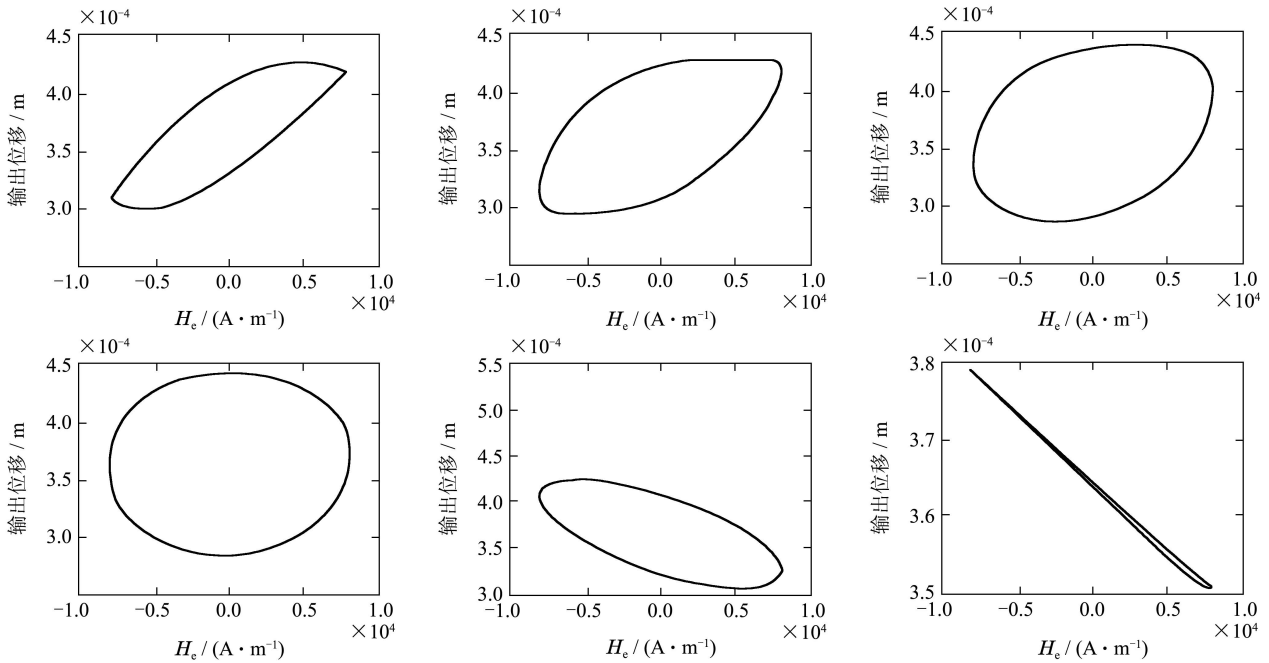


图2 输出位移随外激励磁场的变化曲线

Fig. 2 The curve of  $H_c$  and  $x$  with different frequency

### 2.3 温度影响分析(The impact analysis of temperature)

图3为温度为常数变化(0°C, 20°C, 40°C, 80°C)时输出位移随外激励磁场的变化曲线. 由图3知, 随着温度的升高, 输出位移的平衡位置随之升高, 输出位移随之增大, 但输出位移的变化量随之降低.

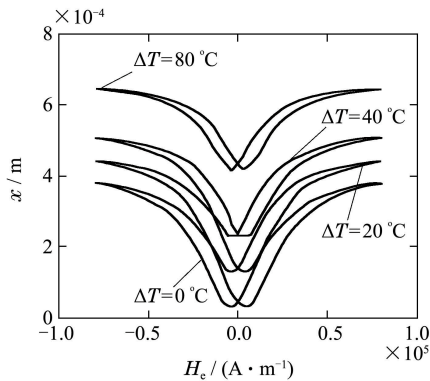


图3 不同温度的响应曲线

Fig. 3 Response curves of different temperatures

### 3 控制器的设计(The controller design)

#### 3.1 控制思想(The control idea)

由式(5)及式(6)知, GMA系统具有滞回及倍频的性质. 一方面采用RBF网络建立GMA系统的动态逆模型, 补偿GMA的滞回的影响. 另一方面由于系统的建模误差及神经网络逼近存在一定的误差, 为提高GMA的控制精度, 提出了反馈方法. 由于滑模控制器对参数扰动及系统的不确定具有不变性的突出优点, 本文采用滑模控制器作为反馈控制器, 并将模糊自适应方法引入到模糊变结构的设计中, 消除了滑模控制器本身所具有的抖振缺点, 进一步以系统运行时间为切换开关, 选择PD控制或自适应模糊滑模控制作为反馈控制器, 解决了模糊滑模自适应控制由于初始时刻信息量少而导致的控制精度不高的缺点, 使GMA系统具有全局较高的跟踪精度. GMA车削系统控制结构如图4所示.

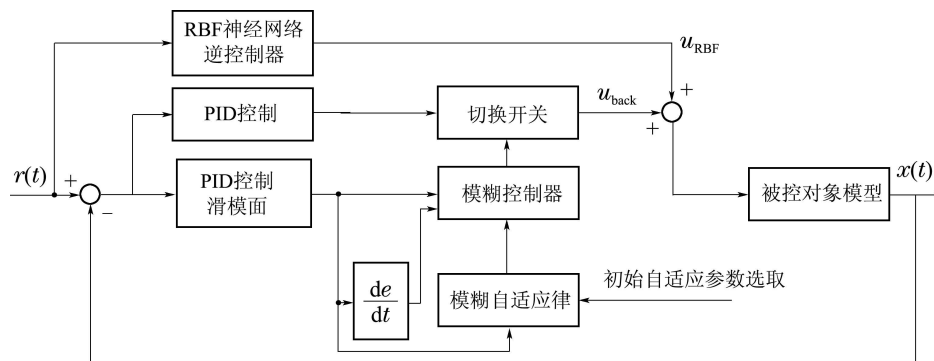


图4 GMA车削系统控制结构图

Fig. 4 The control structure of GMA cutting system

其中:  $r(t)$  为参考输入,  $x(t)$  为实际输出,  $u_{\text{RBF}}$  为神经网络控制器的输出;  $u_{\text{back}}$  为根据切换指标选取 PID 控制或模糊控制器。

总控制器  $u$  为

$$u(t) = u_{\text{RBF}} + u_{\text{back}}. \quad (9)$$

### 3.2 RBF神经网络前馈逆控制器设计(Inverse controller of RBF)

RBF网络是一种3层前向网络,其结构采用2-5-1结构,如图5所示,输出为系统控制器的输出 $u_{\text{RBF}}$ 。

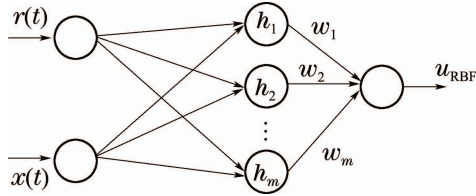


图 5 RBF神经网络结构

Fig. 5 The structure of RBF

在RBF网络结构中,  $\mathbf{X} = (x_1, x_2)$ , 其中 $x_1$ 为期望位移 $r$ ,  $x_2$ 为实际输出位移 $x(t)$ 。设RBF网络的基向量  $H = (h_1, h_2, \dots, h_5)^T$ , 其中 $h_j (j = 1, 2, 3, 4, 5)$  为高斯基函数。

$$h(\cdot) = \exp[-\|\mathbf{X} - c_i\|^2 / 2b_i^2], \quad (10)$$

其中:  $c_i$  为第 $i$ 个隐节点的中心,  $b_i (i = 1, 2, \dots, 5)$  为基宽。

则RBF输出为

$$u_{\text{RBF}} = \sum_{j=1}^5 w_j h_j, \quad (11)$$

其中 $w_{ki} (k = 1, 2)$  为隐层到输出层的连接权。

定义目标函数

$$J = \frac{1}{2} \|r(t) - x(t)\|^2. \quad (12)$$

根据梯度下降法, 输出权、节点中心及节点基宽参数的迭代算法如下:

$$\begin{cases} w(t) = w(t-1) + \eta[y(t) - y_m(t)]h_j + \alpha[w(t-1) - w(t-2)], \\ \Delta b = [y(t) - y_m(t)]wh\|X - c\|^2/b^3, \\ b(t) = b(t-1) + \eta\Delta b + \alpha[b(t-1) - b(t-2)], \\ \Delta c = [y(t) - y_m(t)]w(x - c)/b^2, \\ c(t) = c(t-1) + \eta\Delta c + \alpha[c(t-1) - c(t-2)], \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $\eta$  为学习速率,  $\alpha$  为动量因子。

### 3.3 多模自适应反馈控制器设计(Multiple model adaptive feedback controller)

#### 3.3.1 PD控制器的设计(Controller of PD)

位移跟踪误差:  $e(k) = r(k) - x(k)$ ,  $k_p$ ,  $k_d$  分别为比例增益和微分增益。

$$u_{\text{PID}} = k_p e(k) + k_d [e(k) - e(k-1)]. \quad (14)$$

#### 3.3.2 自适应模糊滑模控制器设计(The design of adaptive fuzzy sliding mode controller)

##### 1) 滑模面的设计。

由于PID具有良好的动态品质, 采用PID形式设计滑模面为

$$s(t) = k_1 e(t) + k_2 \int_0^t e(\tau) d\tau + k_3 \frac{de(t)}{dt}, \quad (15)$$

其中 $k_1, k_2, k_3$  是比例、积分、微分系数。

滑模控制器设计的目的是使误差  $e(t)$  通过滑模面经过滑模运动到达原点  $e(t) = 0, \dot{e}(t) = 0$  即  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 。

由式(15)得

$$\dot{s}(t) = k_1 \dot{e}(t) + k_2 e(t) + k_3 \ddot{e}(t). \quad (16)$$

##### 2) 自适应模糊控制器设计。

设计自适应模糊滑模控制律为

$$u_c = u_D((s, \dot{s})|\theta), \quad (17)$$

其中:  $u_D$  是一个模糊系统,  $\theta$  为可调参数集合。

自适应模糊系统设计如下:

① 采用二维模糊控制器, 通过模糊控制规律直接设计滑模控制量 $u_f$ 。设模糊控制器的输入变量是 $s$ 和 $\dot{s}$ , 对变量 $s_1 = s, s_2 = \dot{s}$  定义 $m_i = 7 (i = 1, 2)$  个模糊集合 $A_i^{l_i} (l_i = 1, 2)$ 。

② 采用if-then结构的 $\prod_{i=1}^2 m_i$  条模糊规则来构造模糊系统 $u_D((s, \dot{s})|\theta)$ , 即

$$\text{If } s \text{ is } A_1^{l_1}, \text{ and } \dot{s} \text{ is } A_1^{l_2}, \text{ Then } u_D = S^{l_1 l_2}. \quad (18)$$

采用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器来设计模糊控制器, 即

$$\begin{aligned} u_D((s_1, s_2)|\theta) &= \theta^T \varepsilon(s_1, s_2), \\ \begin{cases} \mu_{A_i^1}^1(s_i) = \frac{1}{(1 + e^{5(s_i+2)})}, \\ \mu_{A_i^7}^1(s_i) = \frac{1}{(1 + e^{-5(s_i-2)})}, \\ \mu_{A_i^j}^j(s_i) = \frac{1}{(1 + e^{-(s_i+1.5-(i-2))^2})}, \\ i = 2, \dots, 6, \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

其中:  $\theta \in \mathbb{R}^{\prod_{i=1}^2 m_i}$ ,  $\varepsilon(s_1, s_2)$  为 $\prod_{i=1}^2 m_i$  维向量,

$$\varepsilon_{i_1, i_2} = \prod_{i=1}^2 \mu_{A_i}^{l_i}(s_i) / \sum_{i=1}^2 \sum_{i=1}^2 (\prod_{i=1}^2 \mu_{A_i}^{l_i}(s_i)). \quad (21)$$

参数调节的自适应律为

$$\dot{\theta} = k_{\theta} \varepsilon(s_1, s_2). \quad (22)$$

当跟踪误差 $e(t) = 0$ 或满足精度要求时,自适应模糊控制器的参数调节结束.

### 3.3.3 切换条件的性能指标(Performance of the switching condition)

多模自适应切换控制的思想是:采用时间开关来确定切换条件.首先只采用RBF前馈的模糊滑模控制(RDFSLM)的方法运行系统,离线训练样本,通过仿真确定系统控制趋于稳定(主要是误差在一定范围内)的时间 $t_s$ ,然后在系统运行时间 $t \leq t_s$ 时选择PD控制.当 $t > t_s$ 时,将控制模式从PD模式切换到自适应模糊滑模控制,在整个系统的运行过程中,始终运行自适应模糊滑模控制器.

### 3.3.4 算法步骤(Algorithm steps)

GMA车削加工系统的“RBF神经网络+多模自适应模糊滑模”控制算法具体步骤如下:

**步骤1** 确定采样周期为 $T_s = 0.001$  s,仿真时间为 $T_f = 2$  s; RBF学习率 $\eta = 0.2$ ,  $\alpha = 0.01$ ,神经网络的初始权值为 $c = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$ ,  $b =$

$[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ ,  $w = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ , DFSLM的自适应律初始参数 $\theta = [0]_{49 \times 49}$ , PID型滑模面的参数为 $P = 1 + e3$ ,  $I = 1$ ,  $D = 1$ ,  $t_s = 0.015$ .

**步骤2** 采样得到当前时刻的期望轨迹值 $r(k)$ ,根据式(10)–(11)计算得到RBF神经网络控制器的输出 $u_{RBF}(k)$ .

**步骤3** 根据式(15)–(16)计算 $s(k)$ 和 $\dot{s}(k)$ .

**步骤4**  $k \leq t_f/T_s$ , 根据式(14)和式(9)求出 $u(k)$ ;  $k > t_f/T_s$ , 根据式(21)和式(9)求出 $u(k)$ .

**步骤5** 根据式(4)–(8)计算GMA车削系统输出的位移 $x(k)$ .

**步骤6** 由式(13)对RBF网络权值进行更新得 $c(k)$ ,  $b(k)$ ,  $w(k)$ , 由式(22)对模糊自适应律进行更新 $\theta(k)$ .

**步骤7** 置 $k = k + 1$ , 若 $k < T_f/T_s$ 返回步骤2, 否则结束.

## 4 仿真分析(Simulation analysis)

为了验证控制方法的有效性,选用了两个不同的参考输入 $r_1, r_2$ 进行仿真.  $r_1 = 0.21766 \sin(2\pi t) + 0.47431$  mm,  $r_2 = 0.11766 \sin(2\pi t) + 0.1 \sin(4\pi t) + 0.47431$  mm. 图6–7为系统跟踪参考输入1、2的仿真曲线.

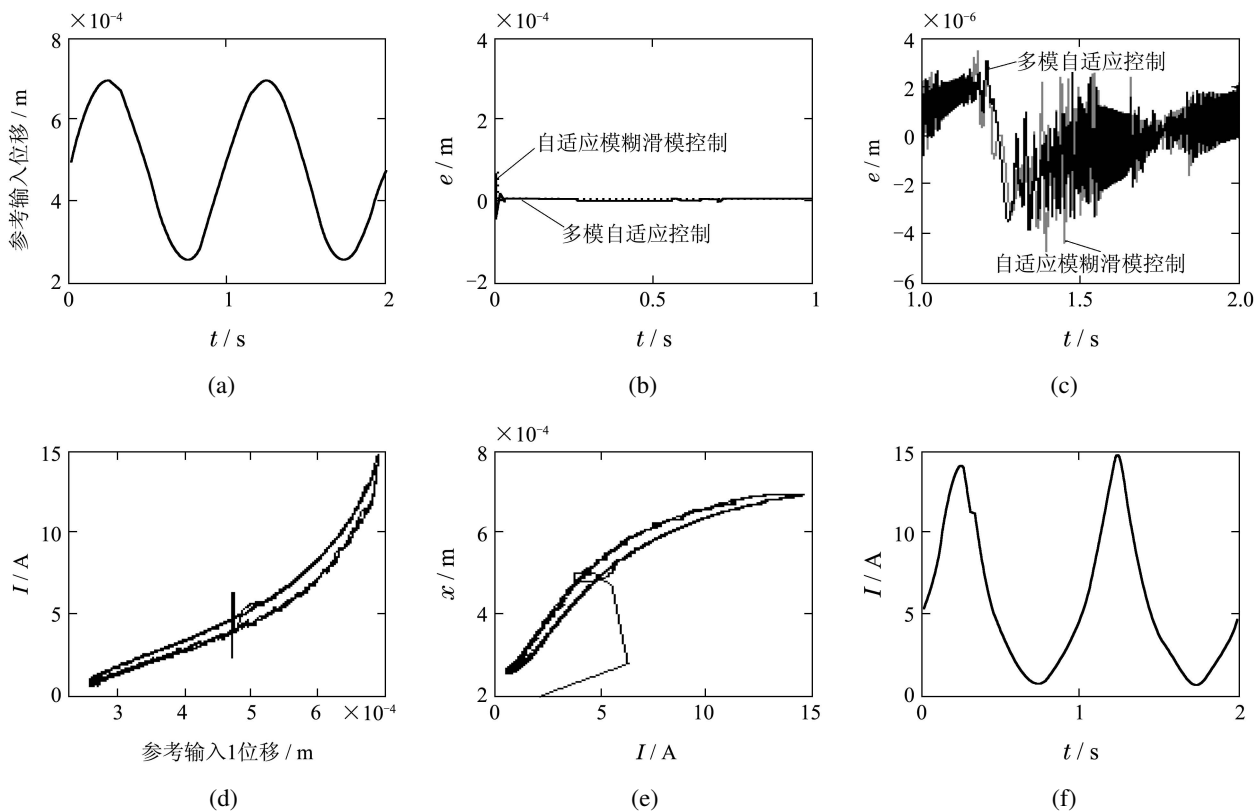


图6 系统跟踪参考输入1的响应图

Fig. 6 Response curves of tracking expect input 1

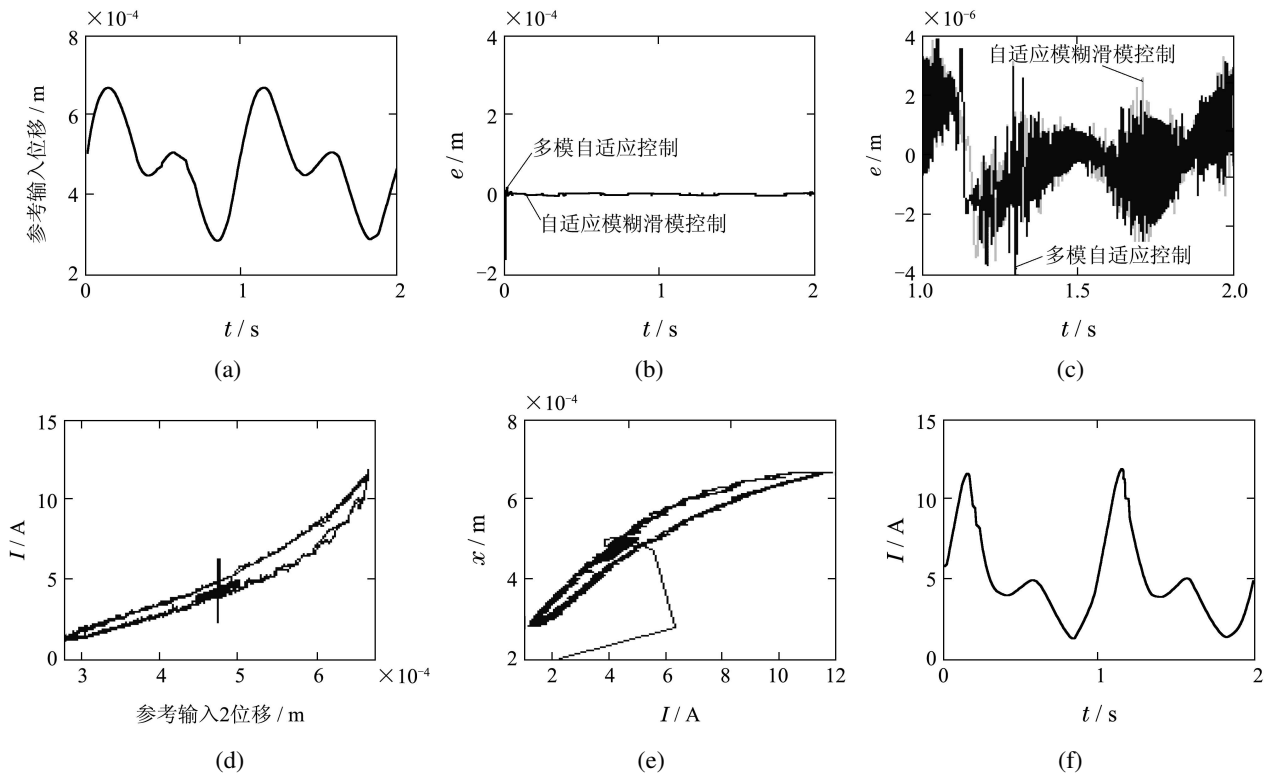


图7 系统跟踪参考输入2的响应图

Fig. 7 Response curves of tracking expect input 2

图6(b)和图7(b)为采用RDFSLM与RMDC的误差曲线图,可以看出采用RMDC相对RDFSLM具有更好的过渡过程,弥补了在初始时刻存在控制器波动较大,误差较大的缺点;由图6(c)和图7(c)细化的误差曲线得,在稳态时,两种方法误差的绝对值在 $5\mu\text{m}$ 以内,满足精度要求;图6(d)–(e)及图7(d)–(e)为系统跟踪参考输入的动态过程,控制器的设计与原被控对象模型组成一个逆系统,直观地看到系统在RMDC下的跟踪过程。

## 5 结论与展望(Conclusion and prospect)

本文考虑温度及碟簧非线性的影响,基于扩展的J–A模型、非线性压磁方程及动力学分析,建立了较精确的GMA车削系统动力学模型,为GMA车削系统动力学特性研究及控制器的选取及设计奠定了基础.采用RBF前馈逆模型多模反馈控制方法设计了控制器,较传统的PID反馈控制方法具有较强的适应性和较高的位移跟踪精度。

由于神经网络及模糊控制方法在稳定性理论证明的方法上还未完善,本文只是通过仿真验证了方法的有效性,因此进一步仍需研究其稳定性的理论证明。

## 参考文献(References):

[1] CLARK A E, CROWDER D H. High temperature magnetostriction of TbFe<sub>2</sub> and Tb<sub>0.27</sub>Dy<sub>0.73</sub>Fe<sub>2</sub> [J]. *IEEE Transactions on Magnet-*

*ics*, 1985, 21(5): 1945 – 1947.

- [2] 袁惠群, 孙华刚. 超磁致伸缩材料磁滞回非线性特性分析 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(2): 180 – 184.  
(YUAN Huiqun, SUN Huagang. Nonlinear characteristic analysis of hysteresis loop for giant magnetostrictive materials [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 180 – 184.)
- [3] 袁惠群, 孙华刚. 超磁致伸缩材料内部磁场特性及材料参数对其影响分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(30): 119 – 124.  
(YUAN Huiqun, SUN Huagang. Inner magnetic field characteristic of ggaint magnetostrictive materials and effects of the materials parameters on the characteristic [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(30): 119 – 124.)
- [4] 曹淑瑛, 王博文, 闫荣格, 等. 超磁致伸缩致动器的磁滞非线性动态模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(11): 145 – 149.  
(CAO Shuying, WANG Bowen, YAN Rongge, et al. Dynamic model with hystertic nonlinear for a gaint magnetostrictive actuator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(11): 145 – 149.)
- [5] 杨凌霄, 陶玉昆, 钟颖. 超磁致伸缩执行器的P-模糊PID控制 [J]. *计算机仿真*, 2011(28): 214 – 217.  
(YANG Lingxiao, TAO Yukun, ZHONG Ying. Control with P-fuzzy PID for gaint magnetostrictive actuator [J]. *Computer Simulation*, 2011(28): 214 – 217.)
- [6] 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): 812 – 819.  
(WANG Xiangjiang, WANG Xingsong. Model buliding and hysteresis compensation for giant magnetostrictive actuator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007(28): 812 – 819.)
- [7] 王湘江, 王兴松. 超磁致伸缩驱动器迟滞系统逆模补偿控制 [J]. *中国机械工程*, 2007, (10): 1151 – 1156.  
(WANG Xiangjiang, WANG Xingsong. Inverse compensation control for giant magnetostrictive actuator [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, (10): 1151 – 1156.)
- [8] 胡世峰, 朱石坚, 楼京俊, 等. 基于CMAC小脑神经网络的超磁致伸缩作动器高精度控制的仿真研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(3): 69 –

72.  
(HU Shifeng, ZHU Shijian, LOU Jingjun, et al. High-precision control of giant magnetostrictive actuator based on CMAC neural network [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(3): 69 – 72.)
- [9] 舒亮, 陈定方, 卢全国, 等. 超磁致伸缩致动器中的时滞建模与Smith控制策略 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(10): 3017 – 3021.  
(SHU Liang, CHEN Dingfang, LU Quanguo, et al. Modeling of time-delay in giant magnetostrictive actuator and Smith strategy [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(10): 3017 – 3021.)
- [10] 贾振元, 王福吉, 张菊, 等. 超磁致伸缩执行器磁滞非线性建模与控制 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 131 – 135.  
(JIA Zhenyuan, WANG Fu ji, Zhangju, et al. Hysteresis nonlinearity modeling and control of giant magnetostrictive actuator [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(7): 131 – 135.)
- [11] 李致富, 袁鹏, 胡跃明. 给予未知Prandtl-Ishlinskii回滞的一类不确定非线性系统自适应逆控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(6): 723 – 729.  
(LI Zhifu, YUAN Peng, HU Yueming. Adaptive inverse control of a class of uncertain nonlinear systems with unknown Prandtl-Ishlinskii hysteresis [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(6): 723 – 729.)
- [12] 杜鹃, 冯颖, 胡跃明. 给予形状记忆合金驱动器的微纳定位系统鲁棒自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(4): 479 – 484.  
(DU Juan, FENG Ying, HU Yueming. Robust adaptive control for nanopositioning system based on shape-memory alloy actuators [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(4): 479 – 484.)
- [13] 李欣欣, 王文, 陈戡恒, 等. Jiles-Atherton模型的超磁致伸缩驱动器磁滞补偿控制 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1558 – 1563.  
(LI Xinxin, WANG Wen, CHEN Jianheng, et al. Hysteresis compensation of giant magnetostrictive actuator based on Jiles-Atherton model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(10): 1558 – 1563.)
- [14] 曹淑瑛, 郑加驹, 王博文, 等. 基于动态递归神经网络的超磁致伸缩驱动器精密位移控制 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 106 – 111.  
(CAO Shuying, ZHENG Jiaju, WANG Bowen, et al. Dynamic model with hysteretic nonlinearity for a giant magnetostrictive actuator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(3): 106 – 111.)
- [15] 孙英. 超磁致伸缩致动器的神经网络控制与动态模型及实验研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2007.  
(SUN Ying. *Neural network control and dynamic model as well as experiment for giant magnetostrictive actuator* [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007.)
- [16] SAVAGE H T, CLARK A E, POWERS J M. Magnetomechanical coupling and  $\Delta E$  effect in highly magnetostrictive rare earth-Fe<sub>2</sub> compounds [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1975, 11(5): 1355 – 1357.
- [17] 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, 2009.  
(SUN Huagang. *Coupled magneto-elastic theory of giant magnetostrictive transducer and application in cutting machining* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.)
- [18] 孙乐. 超磁致伸缩材料的本构理论研究 [D]. 甘肃: 兰州大学, 2007.  
(SUN Le. *The study of constitutive theory for giant magnetostrictive materials* [D]. Gansu: Lanzhou University, 2007.)
- [19] 李东. 超磁致伸缩微致动器若干基础理论及实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.  
(LI Dong. *The fundamental theory and experiments study on giant magnetostrictive actuator* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.)
- [20] FAIDLEY L E, LUND B J, FLATAU A B. Terfenol-D elastomagnetic properties under varied operating conditions using hysteresis loop analysis [J]. *SPIE Symposium on Smart Structure*, 1998, 3329(92): 1 – 10.

#### 作者简介:

**李莹** (1982–), 女, 博士研究生, 目前研究方向是非线性系统建模、动力学特性分析及控制, E-mail: liying1982ren@163.com;

**袁惠群** (1954–), 男, 博士生导师, 目前研究方向大型旋转机械动力学建模与分析、非线性振动建模及控制, E-mail: yuan.hq@163.com;

**梁明轩** (1985–), 男, 博士研究生, 目前研究方向大转子动力学、非线性系统建模, E-mail: mingliangxuan@yahoo.com.cn.