

文章编号 1004-924X(2010)02-0412-08

超磁致伸缩致动器的广义预测-多模 PID 控制

李欣欣¹, 王 文², 陈子辰²

- (1. 广西民族大学 物理与电子工程学院, 广西 南宁 530006;
2. 浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了克服超磁致伸缩致动器的磁滞现象对精密驱动定位精度的影响, 在进行磁滞补偿的前提下, 研究了自校正 PID 控制方法, 提出了基于广义预测控制的广义预测-多模 PID 控制方法。介绍了广义预测控制的主要思想, 并由此导出 PID 参数与被控对象待估参数的关系, 实现了广义预测 PID 控制; 针对起动阶段控制效果不平稳的问题, 提出了多模 PID 控制模式转换条件; 最后, 根据 PID 参数变化情况, 建立致动器的多模 PID 控制方法, 实现广义预测 PID 与常规 PID 的在线控制模式转换与控制。实验结果表明, 采用广义预测-多模 PID 控制器, 虽然单次平均运算时间比广义最小方差-模糊 PID 控制器长 7 ms, 但跟踪误差均方差减少了 0.066 μm ; 同时改善了起动平稳性。提出的控制方法能有效消除由扰动带来的影响, 提高跟踪精度, 改善起动平稳性, 适用于对实时性、控制精度要求较高的精密定位领域。

关键词: 超磁致伸缩致动器; 精密定位; 广义预测控制; 多模控制

中图分类号: TP273; TP211.53 **文献标识码:** A

Generalized predictive-multimode PID control for giant magnetostrictive actuators

LI Xin-xin¹, WANG Wen², CHEN Zi-chen²

- (1. College of Physics and Electrical Engineering,
Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China;
2. Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to overcome the significant impact of hysteresis on positioning precision when Giant Magnetostrictive Material Actuators (GMAs) are applied to fine positioning, an adaptive PID control method is studied and a multimode PID control method based on Generalized Predictive Control (GPC) principle is established under the condition of the hysteresis compensation. Firstly, the relation between the parameters of PID controller and the parameters to be estimated is derived from GPC principle, and GPC-PID control is realized. Then, for the quibble problem at the beginning stage, the control mode switch condition of multimode PID control is put forward. Finally, a multimode PID controller for the actuator is setup to switch the control modes from the regular PID to the GPC-PID in real time based on PID parameter variability. Experimental results indicate that although the GPC-multimode PID controller extends the consuming time of each execution step slightly by 7 ms, the

收稿日期: 2009-07-22; 修订日期: 2009-10-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50875241); 广西教育厅科研项目经费资助项目 (No. 200911MS65); 广西民族大学科研启动资助项目 (2010 年)

RMS of tracking error is reduced by $0.066 \mu\text{m}$ as compared with a Generalized Minimum Variability-Fuzzy PID (GMV-Fuzzy PID) controller, and at the same time, it improves the stability of the beginning stage. These results show that the multimode PID controller can overcome the impact of system disturbance, smooth the beginning status and can be suitable for the precision positioning with high accuracy and real time.

Key words: giant magnetostrictive actuator; precision positioning; generalized predictive control; multimodel control

1 引言

基于超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, GMM)的致动器(GMM Actuator, GMA)具有伸缩系数大、输出力大、响应速度快、准确度高等特点,可实现快速、准确定位,提高输出功率,在精密工程领域具有独特的应用前景。

在实际应用中,致动器输入电流与输出位移呈现显著的非线性以及由材料固有特性所决定的滞回性。为了消除这些非线性因素给定位系统带来的影响,可采用多种描述磁滞与饱和非线性模型的逆模型作为前馈环节进行补偿控制^[1-3]和线性化处理,以最大限度地抵消非线性因素的影响,提高系统的跟踪性能。但由于目前的磁滞模型尚不能完全准确地反映磁滞现象,因此在补偿的同时,还需要增加线性系统的控制器来保证 GMA 能够精确跟踪给定的信号。文献[3]采用最优控制对磁滞补偿后的 GMA 进行跟踪控制;文献[4]采用 LQR 控制器对磁滞补偿后的 GMA 进行跟踪控制;文献[5]采用模糊 PID 控制器控制 GMA,并将其应用于隔振系统;文献[6]采用广义最小方差-模糊 PID(GMV-Fuzzy PID)控制器实现 GMA 的精密定位控制。这些方法中以 PID 控制方法最为简单有效,但当被控对象模型参数发生改变时, PID 控制系统的性能可能会变差,甚至不稳定。因此,在 GMA 的控制中,需要针对磁滞模型或系统辨识模型存在模型不够准确等不确定因素,采用自适应方法,使 PID 控制器参数能根据实际状况进行动态调整。

Clark 在以广义最小方差为基础的自适应控制中,引入了预测控制中的多步预测机制和滚动优化策略,提出了广义预测控制(Generalized Predictive Control, GPC)思想和基本方法^[7]。广

义预测控制基于参数模型,主要有预测模型、滚动优化和反馈校正 3 个基本特征,具有较强的鲁棒性,适用于非最小相位系统;参数数目较少,易于在线估计参数,实现自适应控制。

本文在已完成 GMA 磁滞前馈补偿^[8]及广义最小方差-模糊 PID 控制方法研究^[6]的基础上,进行 GMA 的广义预测-多模 PID 控制方法研究。首先,利用广义预测控制方法推导出 PID 自校正控制器各参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的表达式。然后,针对起动阶段广义预测 PID 控制输出不稳定问题,采用多模控制^[9-10]方法,即起动时,多模控制器采用常规 PID 控制方法,同时进行广义预测 PID 控制参数的在线估计;当参数估计值满足一定条件时,多模控制器切换至广义预测 PID 控制方法。通过上述方法,可以综合常规 PID 控制及广义预测 PID 控制的特点,并能有效消除起动阶段控制输出不稳定的现象。

2 基于广义预测控制方法设计的自适应 PID 控制器

PID 控制已广泛应用于实际控制中,但是要取得好的控制效果,必须离线或在线整定 PID 调节器的参数,使之获得适合的数值,以满足控制要求。结合 GPC 与 PID 控制进行 GMA 的自适应控制可以综合两者的长处,得到较好的控制效果。

在大多数应用中,噪声或扰动往往不止一个,可假设被控对象模型为

$$A(z^{-1})\Delta y(k) = B(z^{-1})\Delta u(k-1) + \sum_{i=1}^n C_i(z^{-1})\epsilon_i(k), \quad (1)$$

其中 $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 是后移算子 z^{-1} 的多项式,通常取 $C(z^{-1})=1$, $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别

为被控对象的输入和输出, $\varepsilon(k)$ 为随机变量序列, $\Delta = 1 - z^{-1}$ 表示差分算子。

扰动是 n 个扰动分量的总合, 其方差一般并非非常值, 因此很难准确估计多项式 $C(z^{-1})$ 。因此可事先设计一个滤波器多项式, 使得

$$C(z^{-1}) = T(z^{-1}) = 1 + t_1 z^{-1} + \dots + t_{n_i} z^{-n_i}, \quad (2)$$

取控制性能指标函数

$$J = E \left\{ \sum_{j=N_0}^{N_i} [y(k+j) - y_r(k+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} [\Delta u(k+j-1)]^2 \right\}, \quad (3)$$

式中, N_0 是最小预测时域, N_i 是最大预测时域, N_u 是控制时域, λ 是控制加权序列, $y_r(k)$ 是参考输出。

如果能在不需要辨识被控对象模型参数值的情况下, 直接辨识广义预测控制器的参数, 则可省去 GPC 间接算法中 Diophantine 方程所要求的递推求解和矩阵求逆运算, 从而降低在线计算量。特别地, 当控制时域 $N_u = 1$ 时, 所有矩阵运算转化为代数运算, 可进一步减少控制算法的在线计算量。

此时, GPC 直接算法的控制输出增量为^[7]

$$\Delta u(k) = \mathbf{X}(k+N)^T \boldsymbol{\theta} - v(k+N), \quad (4)$$

其中, 当控制时域 $N_u = 1$ 时, 输出向量 \mathbf{X} 及待估计参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 有

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k+N) &= [y_r(k+N), \dots, y_r(k+1), \\ &\lambda \Delta u(k), -y_f(k), \dots, -y_f(k-n), \\ &-\Delta u_f(k-1), \dots, -\Delta u_f(k-m)]^T, \end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\theta} = [p_n, \dots, p_1, q_1, \alpha_0, \dots, \alpha_{n_a}, \beta_0, \dots, \beta_{n_b-1}]^T, \quad (5)$$

式中, 输出向量 \mathbf{X} 中的 y_f 、 Δu_f 分别为被控对象输出 y 与其控制输入增量 Δu 的滤波输出

$$y_f(k) = \frac{y(k)}{T(z^{-1})}, \Delta u_f(k) = \frac{\Delta u(k)}{T(z^{-1})}. \quad (6)$$

待估计参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 中的 p, q, α, β 各项分别为参考输出 y_r , 当前控制输出增量 $\Delta u(k)$, y_f 以及 Δu_f 的系数。

即使被控对象参数未知, 也可使用式(4)作为控制器参数估计方程, 通过递推最小二乘法计算 $\boldsymbol{\theta}$ 中各参量的值。

设 PID 控制器结构为

$$u(t) = u(t-1) + K_I y_r(t) - [K_P + K_I + K_D - (K_P + 2K_D)z^{-1} + K_D z^{-2}] y_f, \quad (7)$$

其中 K_P, K_I, K_D 分别为 PID 控制的比例、积分与微分各环节参数。由式(4)、(5), 可得

$$\Delta u(k) = p_j(z^{-1}) y_r(k+N) - \alpha_i(z^{-1}) y_f(k) - \beta_i(z^{-1}) \Delta u_f(k-1), \quad (8)$$

比较式(7)与式(8)的同类项, 可得到 K_P, K_I, K_D 的值

$$\begin{aligned} K_P &= -\frac{1}{T}(\alpha_1 + 2\alpha_2), \quad K_I = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^N p_j, \\ K_D &= \frac{1}{T} \alpha_2. \end{aligned} \quad (9)$$

综上, GPC-PID 控制器在线调整 PID 参数的步骤如下:

(1) 设定被控制对象阶次为 n_a, n_b , 预测时域为 N , 控制时域为 N_u 和性能指标加权多项式为 Q_1 和 $Q_j, j=2, 3, \dots, N_1$;

(2) 对式(4)采用递推最小二乘法估计控制输出的参数向量;

(3) 由式(9)求解 K_P, K_I, K_D ;

(4) 由式(7)计算控制 $u(k)$;

(5) $k=k+1$, 返回第 1 步。

GPC-PID 控制系统如图 1 所示。

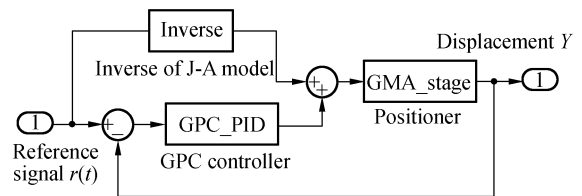


图 1 GMA 的 GPC-PID 控制系统原理图

Fig. 1 Scheme of GPC-PID control system

3 基于 GPC 的多模 PID 自适应控制

GPC-PID 自适应控制方法虽然具有较好的实时性、控制精度及鲁棒性, 可以满足 GMA 精密控制的要求, 但在起始阶段, 由于控制器所获信息量少, 自适应控制器还无法平稳工作, GPC-PID 控制输出会出现较大波动。只有当 GPC-PID 控制器能稳定地进行自适应计算后, 才能够得到较好且平稳的控制效果。

为了实现在使用 GPC-PID 控制器进行 GMA 控制的初始阶段,自适应控制部分就已获得足够的信息量并稳定地进行自适应的计算,本文提出基于 GPC 的 GMA 多模 PID 自适应控制方法:在起始阶段采用常规 PID 控制;当 GPC-PID 控制器输出达到平稳阶段后,通过控制模式切换进入 GPC-PID 控制模式,以改善自适应控制器在运行起始阶段跟踪性能不平稳的现象,同时又能保持 GPC-PID 在平稳阶段所具有的较好控制效果。

3.1 多模 PID 自适应控制系统基本构成与工作原理

设计的多模 PID 自适应控制系统主要由 PID 控制器、GPC-PID 控制器、模式切换控制器以及 GMA 定位平台等 4 个模块构成,其组成结构如图 2 所示。

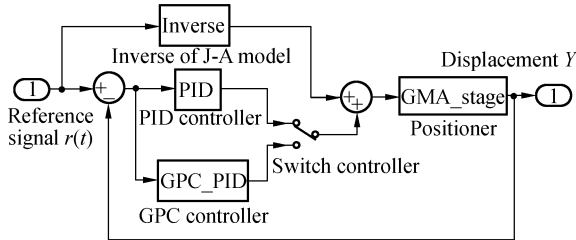


图 2 GMA 的多模 PID 自适应控制系统原理图

Fig. 2 Scheme of multimodel PID control system

多模 PID 自适应控制系统的工作原理如下:

(1) 利用常规 PID 控制器启动系统,维持系统稳定运行,产生 GPC-PID 自适应控制器参数辨识所必须的输入/输出数据;

(2) GPC-PID 控制器根据输入/输出数据开始运行,产生自适应控制信号,但此时的自适应控制信号并不作为被控对象的控制输入信号;

(3) 当 GPC-PID 控制器运行平稳并达到模式切换条件后,系统将通过模式切换控制器由常规 PID 控制模式切换到 GPC-PID 自适应控制模式,实现 GMA 的自适应控制。

3.2 控制模式切换条件

在多模 PID 自适应控制系统中,模式切换控制器的作用是根据一定的切换条件,确定在实际

控制过程中使用常规 PID 模式还是 GPC-PID 模式。

对于判断自适应控制器运行是否平稳,没有统一的标准。由于 GPC-PID 控制的主要目的是在线调整 PID 参数,因此当在线调整的 PID 参数只在一定的范围内变化时,就可以认定 GPC-PID 自适应控制器已基本运行平稳,可以将控制模式从常规 PID 模式切换到 GPC-PID 模式。

模式切换控制器的切换条件为

(1) 当 GPC-PID 控制调整的 PID 参数连续 5 次输出均满足

$$\left(\frac{|K_P(t+1) - K_P(t)|}{|K_P(t)|} \leq 0.05 \right)$$

$$\text{且} \left(\frac{|K_I(t+1) - K_I(t)|}{|K_I(t)|} \leq 0.05 \right)$$

$$\text{且} \left(\frac{|K_D(t+1) - K_D(t)|}{|K_D(t)|} \leq 0.05 \right), \quad (10)$$

则说明 GPC-PID 控制器已平稳运行,系统可由常规 PID 控制模式切换到 GPC-PID 模式。

(2) 当 GPC-PID 控制调整的 PID 参数连续 5 次输出及输出误差 e 满足

$$\left(\frac{|K_P(t+1) - K_P(t)|}{|K_P(t)|} > 0.10 \right)$$

$$\text{且} \left(\frac{|K_I(t+1) - K_I(t)|}{|K_I(t)|} > 0.10 \right)$$

$$\text{且} \left(\frac{|K_D(t+1) - K_D(t)|}{|K_D(t)|} > 0.10 \right)$$

$$\text{或} \left(\frac{|e(t+1) - e(t)|}{|e(t)|} > 0.10 \right), \quad (11)$$

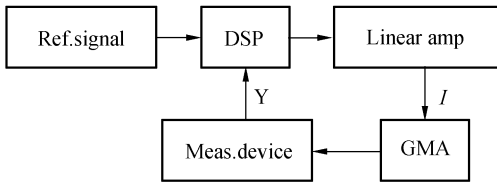
则说明 GPC-PID 控制器控制效果不佳,应由 GPC-PID 模式切换到常规 PID 控制模式。在多模 PID 自适应控制中,常规 PID 控制器负责在自适应控制器启动时的控制任务,以解决 GPC-PID 控制器在起始阶段时运行不平稳问题;在 GPC-PID 控制器控制效果不理想时,可由 GPC-PID 模式切换到常规 PID 控制模式,提高 GMA 控制过程的平稳性。

4 实验验证

4.1 实验系统构建

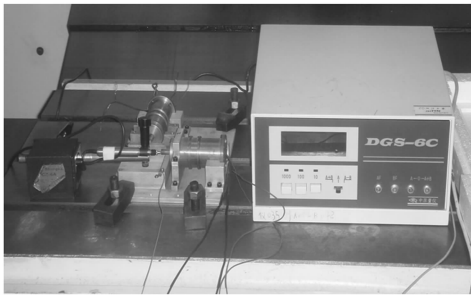
使用自行设计的 GMA 致动器及其定位平台进行实验验证,实验系统组成部分原理框图及实验平台如图 3 所示。其中 DSP 处理器主要功能

为:与上位机通讯、位移信号采集、信号滤波、磁滞补偿计算、各种 PID 控制算法实现及其控制信号输出、控制模式切换等。线性放大器则是利用 DSP 输出的控制信号驱动 GMA 致动器。



(a) 原理框图

(a) Schematic diagram



(b) 实验平台

(b) Experimental platform

图 3 GMA 磁滞补偿控制系统原理框图及实验平台
Fig. 3 Schematic diagram and experimental platform of GMA control system

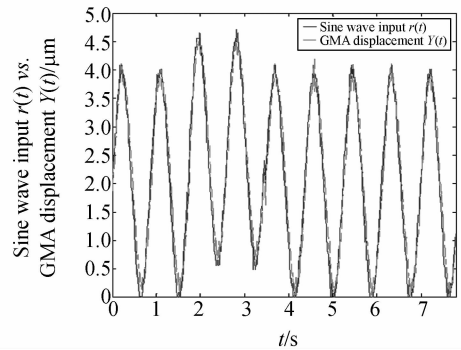
4.2 实验结果与分析

对常规 PID 控制、GMV-Fuzzy PID 及 GPC-PID 三种控制方法进行对比实验分析。为了得到三个控制器的实时运算时间,本文的正弦参考信号及控制信号均由 DSP 处理器的 D/A 端口输出。设定每个正弦参考信号周期有 50 个点,对应 50 个已知值。只有当控制器完成一次运算,并将控制信号由 D/A 端口向 GMA 输出完毕后,再取下一个参考信号值。这样就可以根据 GMA 位移输出的周期计算出单次从控制运算开始到控制电压输出完成再到 GMA 位移输出完成所需要的实际平均时间(这一时间以下简称为单次平均运算及输出时间)。

给定的 50 个正弦参考输入信号值由: $r(t) = 2.1 + 2.1 * \sin(2\pi * f * t)$ (μm) (其中的频率 $f = 1 \text{ Hz}$) 预先计算得到,并存入 DSP 数据存储空间。另外,为了观察扰动对控制器的影响,在第三

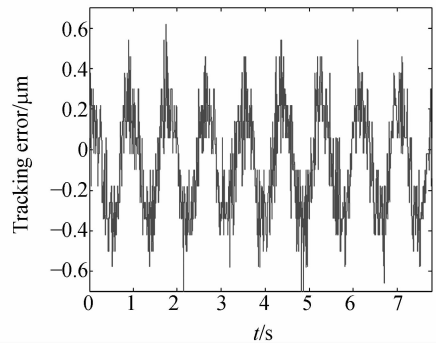
个周期开始至第四个周期结束时,预设的正弦参考信号均增加 $0.6 \mu\text{m}$ 的扰动;然后,再恢复到原来的预设值。

采用常规 PID 控制器、GMV-Fuzzy PID 控制器及 GPC-PID 控制器的跟踪效果如图 4~6 所示。根据图 4(a)~6(a) 中正弦输出的周期,可以计算出三个控制器的单次平均运算及输出所需要的时间,如表 1 所示。由图 4(b)~图 6(b) 的跟踪误差数据可以计算出加入扰动前后平均误差及其均方差值的变化,如表 2、表 3 所示。



(a) 正弦跟踪轨迹

(a) Sine tracking



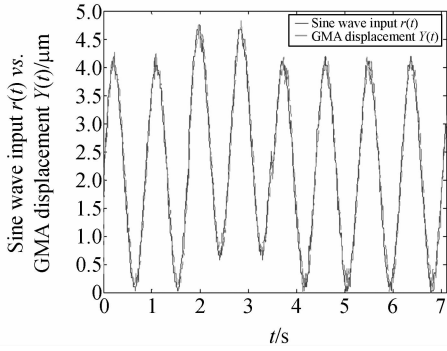
(b) 正弦跟踪误差

(b) Sine tracking error

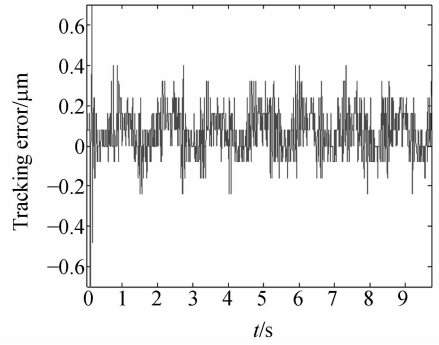
图 4 基于常规 PID 控制的 GMA 正弦跟踪
Fig. 4 Sine tracking and error with regular PID

表 1 3 个控制器的单次平均运算及输出用时
Tab. 1 Average single consuming time for computation and output

控制器类型	单次平均运算及输出用时/ms
PID	17.0
GMV-Fuzzy PID	18.6
GPC-PID	25.6



(a) 正弦跟踪轨迹
(a) Sine tracking



(b) 正弦跟踪误差

(b) Sine tracking error

图 6 基于 GPC-PID 控制的 GMA 正弦跟踪
Fig. 6 Sine tracking and error with GPC-PID

表 2 3 个控制器加入扰动前后的平均误差

Tab. 2 Average errors before and after adding disturbance (μm)

控制器类型	加入扰动前	加入扰动后
PID	-0.072	-0.088
GMV-Fuzzy PID	-0.046	-0.053
GPC-PID	+0.054	+0.056

表 3 3 个控制器加入扰动前后的误差均方差

Tab. 3 RMSs before and after adding disturbance (μm)

控制器类型	加入扰动前	加入扰动后
PID	0.244	0.245
GMV-Fuzzy PID	0.191	0.172
GPC-PID	0.103	0.106

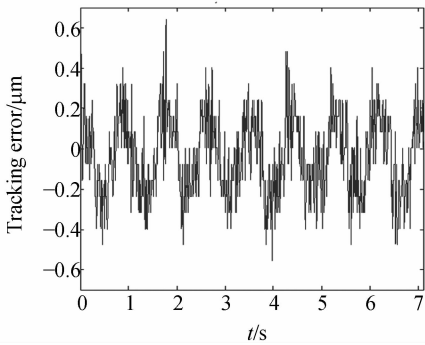
实验结果表明:

(1) 在实时性方面,常规 PID 控制器用时最少;GMV-Fuzzy PID 与 PID 相差不大;而 GPC-PID 用时稍多。因此,常规 PID、GMV-Fuzzy PID、GPC-PID 控制器均可适用于对实时性要求较高的场合。

(2) 在控制精度方面,在扰动加入前后,GPC-PID 的误差均方差在三者中是最小的。因此,GPC-PID 比 GMV-Fuzzy PID、常规 PID 控制器更适用于对精度要求较高的场合。

(3) 在鲁棒性方面,比较扰动加入前后,GPC-PID 的跟踪误差及误差均方差基本上没有受到什么影响,表现出较强的鲁棒性。

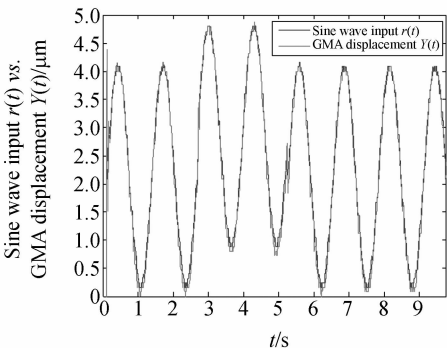
综上,GPC-PID 自适应控制方法具有较好的



(b) 正弦跟踪误差

(b) Sine tracking error

图 5 基于 GMV-Fuzzy PID 控制的 GMA 正弦跟踪
Fig. 5 Sine tracking and error with GMV-Fuzzy PID



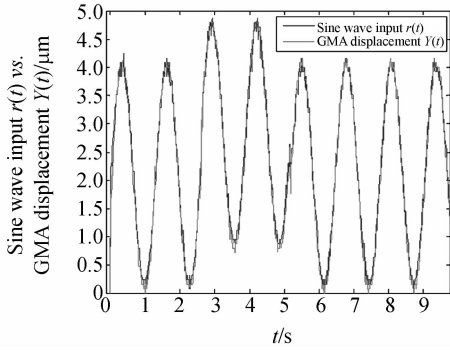
(a) 正弦跟踪

(a) Sine tracking

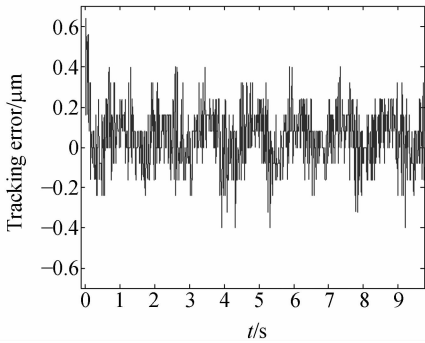
实时性、控制精度及鲁棒性,可以满足 GMA 精密控制的要求。但由图 6 可知,在起始阶段, GPC-PID 控制输出出现了较大波动。

4.3 多模 PID 自适应控制实验

对 GMA 多模 PID 自适应控制方法进行实验分析,其实验结果如图 7 所示。



(a) 正弦跟踪
(a) Sine tracking



(b) 正弦跟踪误差
(b) Sine tracking error

图 7 GMA 多模 PID 自适应控制器的正弦跟踪
Fig. 7 Sine tracking and error with multimode PID

比较图 7(a)与图 6(a)可以看出,在起动阶段,由于常规 PID 控制的作用,控制输出没有出现振荡的问题;比较图 7(b)与图 6(b),可以发现约在时刻 $t \approx 0.23$ s 时, GPC-PID 控制器已平稳工作,模式切换控制器完成切换,多模控制器已从常规 PID 控制切换为 GPC-PID 控制。

5 结 论

为了满足超磁致伸缩致动器用于精密定位时对实时性与高精度的要求,在进行磁滞补偿的前提下,导出了基于广义预测控制的自校正控制器参数与 PID 参数的关系;并在上述关系的基础上,为解决控制器起动时的不平稳现象,建立了基于常规 PID 与广义预测 PID 控制(GPC-PID)的多模 PID 控制方法。实验结果表明:采用多模 PID 控制器中的 GPC-PID 控制模式,虽然单次平均运算时间比 GMV-Fuzzy PID 控制器增加(本次实验为 7 ms),但跟踪误差均方差比 GMV-Fuzzy PID 减少(本次实验为 $0.066 \mu\text{m}$ (加扰动后)),因此,有效消除了由扰动带来的影响,提高了跟踪精度;并采用多模 PID 控制器中的常规 PID 控制模式改善了起动时的不平稳现象。因此,多模 PID 控制在对实时性、控制精度要求较高的精密定位领域,有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] DAPINO M J, SMITH R C, FLATAU A B. Structural magnetic strain model for magnetostrictive transducers [J]. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2000, 36(3): 545-556.
- [2] TAN X B, JOHN S B. Control of hysteresis in smart actuators [R]. *Technical Research Report*, CDCCSS TR 2002-8, 2002.
- [3] NEALIS J, SMITH R C. Model-Based robust control design for magnetostrictive transducers operating in hysteretic and nonlinear regimes [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(1): 22-39.
- [4] SMITH R C. Inverse compensation for hysteresis in magnetostrictive transducers [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2001, 33: 285-298.
- [5] 梅德庆, 陈子辰. 微制造平台的精密隔振系统研究 [J]. *光学精密工程*, 2001, 9(6): 506-510.
- [6] MEI D Q, CHEN Z CH. Research on isolation system of micro manufacturing platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6): 506-510. (in Chinese)
- [6] 李欣欣, 王文, 陈戢恒, 等. 超磁致伸缩致动器的广义最小方差-模糊 PID 控制方法研究 [J]. *光学精密*

工程,2008,16(4):78-86.

LI X X, WANG W, CHEN J H, *et al.*. Study on generalized minimum variance - fuzzy PID control method for giant magnetostrictive actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(4):78-86. (in Chinese)

- [7] 王伟. 广义预测控制理论及应用[M]. 北京:科学出版社,1998.

WANG W. *Generalized Predictive Control Theory and Application* [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)

- [8] 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 X X, WANG W, CHEN J H, *et al.*. Hysteresis compensation of giant magnetostrictive actuator

based on Jiles-Atherton model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(10):1558-1563. (in Chinese)

- [9] 林金星,沈炯,李益国. 基于多模型切换的过热汽温自适应预测控制[J]. 东南大学学报(自然科学版),2008,38(1):69-74.

LIN J X, SHEN J, LI Y G. Adaptive predictive control for superheated steam temperature based on multiple models switching [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2008,38(1):69-74. (in Chinese)

- [10] LIU B, JIANG ZH, FANG K L. Multi-model generalized predictive control for temperature control system[C]. *The Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2008,3:594-598.

作者简介:



李欣欣(1975-),男,广西梧州人,博士,讲师,2000年于广西大学获得硕士学位,2008年于浙江大学获得博士学位,主要从事微位移致动器与精密测量的研究。E-mail: lxxnn221@sohu.com



陈子辰(1950-),男,福建福州人,博士,教授,博士生导师,1989年于浙江大学获得博士学位,主要从事精密工程、微机电系统、数控技术的研究。E-mail:chenzc@zju.edu.cn

通讯作者:



王文(1968-),男,湖北大冶人,博士,副教授,硕士生导师,1996年于浙江大学获得博士学位,主要从事精密工程、微纳测量与数字控制技术的研究。E-mail:wangwn@zju.edu.cn