用于超磁致伸缩作动器的一种改进的控制方法

刘红军，刘 洁，叶 芳

（哈尔滨工业大学 深圳研究生院，518055 广东 深圳）

摘 要： 为提高对超磁致伸缩作动器的控制精度，在基于 Preisach 模型前馈补偿的 PID 控制基础上，提出了一种基于 Preisach 模型前馈补偿的模糊 PID 控制方法. 采用 dSpace 实时仿真系统搭建超磁致伸缩作动器的实时控制实验平台. 利用研制的超磁致伸缩作动器测试了基于 Preisach 模型前馈补偿的模糊 PID 控制与 PID 控制方法下对方波信号和混合信号的轨迹追踪能力. 两种控制方法下的实时控制效果对比分析表明，基于 Preisach 模型前馈补偿的模糊 PID 控制比常规 PID 控制具有更好的控制效果，从而验证了该方法的有效性.

关键词： 超磁致伸缩作动器；PID 控制；模糊 PID 控制；前馈补偿；实时系统

中图分类号： TM571.6 + 1 **文献标志码：** A **文章编号：** 0367 - 6234(2012)09 - 0091 - 05

An improved control method for the giant magnetostrictive actuator

LIU Hong-jun, LIU Jie, YE Fang

(Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 518055 Guangdong, Shenzhen, China)

Abstract: To improve control accuracy for the Giant Magnetostrictive Actuator (GMA), the fuzzy PID control method is proposed by the PID control method based on Preisach model. The dSpace real-time simulation system is used to build the real-time control experimental platform of GMA. The designed GMA tests for the PID control method based on the Preisach model and the fuzzy PID control method in the square-wave signal and mixed-signal tracking were carried out. The effect of real-time control of two control methods was compared and analyzed, and the results show that the fuzzy PID control method is better than PID control method.

Key words: giant magnetostrictive actuator; pid control; fuzzy pid control; feedforward compensation; real-time systems

超磁致伸缩作动器(Giant Magnetostrictive Actuator，简称 GMA)主要利用超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material，简称 GMM)的稳定、驱动力较大以及具有微米级的控制精度等特性而制作的[1]，常用于主动微振动的控制[2-5].

然而超磁致伸缩材料的磁滞性使得 GMA 具有较大的非线性，从一定程度上制约了其发展，因此许多学者对非线性补偿作了大量研究. 开环逆控制是很多学者进行非线性补偿常采用的方法. 通过以不同的方式求逆来实现逆控制. 文献[6]采用了磁滞线性化控制通过对模型求逆，来将非线性环节抵消为单输入单输出的伪线性环节. 文献[7]提出了将主迟滞回线和一阶折返曲线的输入输出进行对调，从而求出逆模型. 文献[8]提出了一种基于模型的近似线性化的方法以避免求逆. 卢全国[9]提出了以当前位置点为基准的输入校正迭代算法. 唐志峰等[10-11]提出了 Preisach 模型与二次函数模型相比较的方法来求解逆模型. 为了进一步提高控制系统的稳定性，在对模型求逆的开环控制的同时，唐志峰[11]将前馈反馈控制用于超磁致伸缩作动器的控制研究. 因此在建立逆模型前馈补偿的基础上进一步建立了基于 Preisach 模型前馈补偿的 PID 控制方法，并取得了较好的控制效果. 也有不少学者采用智能控制方法进行控制，例如神经网络控制[12]，模糊控制等，杨凌霄等[13]对超磁致伸缩作动器进行了 P-模糊

收稿日期： 2011 - 06 - 08.

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51078119)；深圳市科技计划项目(JC200903120209A).

作者简介： 刘红军(1968—)，男，教授，博士生导师.

通信作者： 刘红军，liuhongjun@hit.edu.cn.

PID 控制仿真研究取得了较好的控制效果.

本文改进了唐志峰[11]建立的基于 Preisach 模型前馈补偿的 PID 控制方法,提出了基于 Preisach 模型模糊 PID 前馈补偿控制方法. 在新方法的设计中,选用的 Preisach 模型的逆补偿的方法与唐志峰等人选用的方法不同,通过对各种方法的优缺点进行对比,选用了卢全国[14]提出的以当前位置点为基准的输入校正迭代算法,对 GMA 的非线性特性进行补偿. 同时基于该前馈补偿改进控制方法对其采用模糊 PID 控制替代传统的 PID 控制. 采用改进的控制方法与基于 Preisach 模型 PID 前馈补偿的控制方法分别进行控制实验,验证模糊 PID 前馈补偿控制方法的有效性,从而提高对 GMA 的控制精度,为超磁致伸缩作动器在工程中推广应用提供一定的参考.

1 控制系统的组成

控制系统通过计算机发出命令信号,经过 dSpace 实时控制系统进行处理. 命令信号经过 dSpace 的接口板,进行数字信号与模拟信号的转换,发出控制信号通过功率放大器,输出电流信号驱动超磁致伸缩作动器,用激光位移传感器量测输出的位移,将采集到的位移信号通过 dSpace 的接口板,进行模拟信号与数字信号的转换,对采集到的信号进行记录与命令信号进行实时对比,以期达到预期位移.

本文实验所使用的超磁致伸缩作动器相关参数参见参考文献[15].

2 Preisach 模型的逆补偿

通过对各种方法的优缺点进行对比,选用了卢全国提出的逆补偿算法[14],对 GMA 的非线性特性进行补偿.

根据实验系统设计的作动器性能,以及建立 Preisach 模型的需要,共测试了 27 条一阶折返曲线和主迟滞回线,选取 $0 \leqslant \alpha \leqslant 2.7$ A, $0 \leqslant \beta \leqslant 2.7$ A,α_0 初值为 2.7,β_0 初值为零. 0.1 A 为等分测试点,结果如图 1 所示.

根据量测到的如图 1 所示的曲线上的数据点,建立 Preisach 模型如下所示:

$$y = \sum_{k=1}^{n} [f(\alpha_k, \beta_k) - f(\alpha_k, \beta_{k-1})]. \quad (1)$$

实现逆补偿模型首先建立如下输入矩阵:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_n & \cdots & \alpha_m \\ \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 & \cdots & \beta_n & \cdots & \beta_m \end{bmatrix}.$$

令初始位置点 $y = 0$,输入矩阵计数器 $n = 1$;基本实现流程参见文献[14].

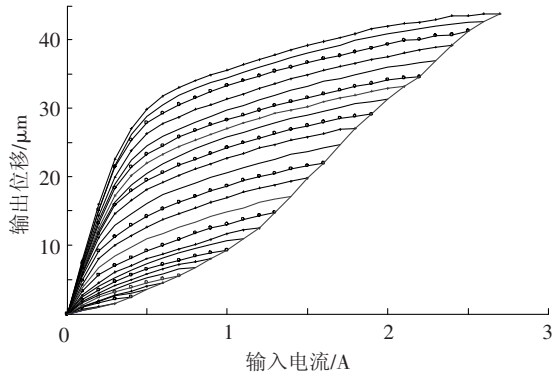


图 1 主迟滞曲线和一阶折返曲线

3 基于 Preisach 模型 PID 前馈补偿法的实验

首先对唐志峰等[11]建立的基于 Preisach 模型前馈补偿的 PID 控制方法进行试验研究,为后文与基于 Preisach 模型前馈补偿的模糊 PID 控制方法进行对比提供研究基础. 基于 Preisach 模型前馈补偿 PID 控制流程图如图 2 所示.

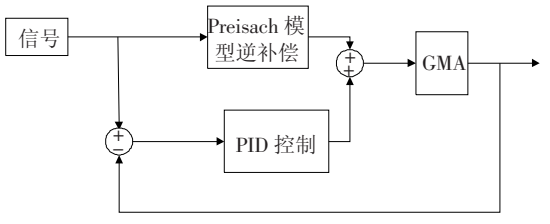


图 2 基于 preisach 模型 PID 前馈补偿的控制器

3.1 PID 参数调节

对于 PID 控制器设计,首先分别采用 Ziegler-Nichols法和 Haalman 法进行仿真分析,两种不同的方法得出的控制器的参数分别为 $K_{z_p} = 1.33$,$K_{z_i} = 966$,$K_{z_d} = 0.456 \times 10^{-3}$ 以及 $K_{H_P} = 0.738$,$K_{H_i} = 42.9$,$K_{H_d} = 0.001$. 然后通过实验调节,并对 GMA 的 PID 控制参数进行测试[16],控制参数 K_d 最终选为 0.0015,K_p 最终选为 0.8,K_i 最终选为 10.

3.2 方波信号测试

首先将调整好的 PID 控制参数应用于唐志峰提出的基于 Preisach 模型的 PID 控制. 鉴于方波信号可以较好的显示系统的稳态和瞬态特性,且频域范围较宽. 因此先采用方波信号测试其特性,并用激光位移传感器测得的目标位移追踪曲线,如图 3 所示. 由图 3 可见,在基于 Preisach 模型 PID 控制下,方波信号在上升和下降段超调量较大,约有 10% 左右. PID 控制的调整时间可以达到 250 ms. 当处于稳态时,对预期轨迹追踪效果较

好，误差大约在 0.5 μm，方波下降之后的稳态区段，误差基本不明显. 因此，在稳态（静态或者准静态）时，该控制方法有较好的表现.

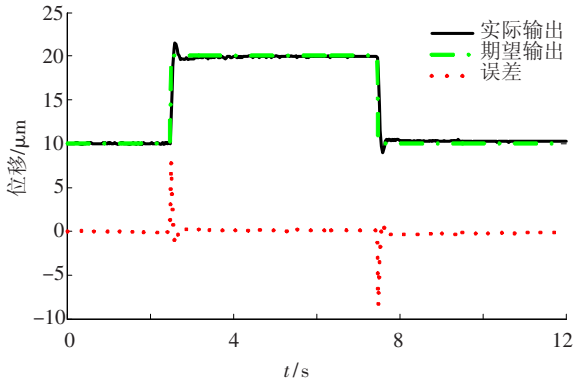


图 3　方波信号 PID 控制下的追踪曲线

3.3　正弦叠加混合信号测试

采用同样的控制系统，这次采用正弦叠加混合信号对这种系统进行测试，该信号是将不同正弦信号通过叠加混合而构成的. 该控制系统对这种目标曲线的追踪曲线，如图 4 所示. 从图 4 可见，在波峰波谷处，轨迹追踪出现明显误差，轨迹形状出现改变. 从整体来看，对该混合信号的追踪效果不理想，误差较大，相差明显. 出现相差的原因有多种，硬件设备的传输时滞，所设计的控制器在积分环节也会带来一定的时滞，以及其它的一些因素所引起的. 因此，当该信号发生突变时，在 PID 控制下出现明显畸形，对模型变动适应的鲁棒性不佳，而且在整个信号追踪的过程中有相差.

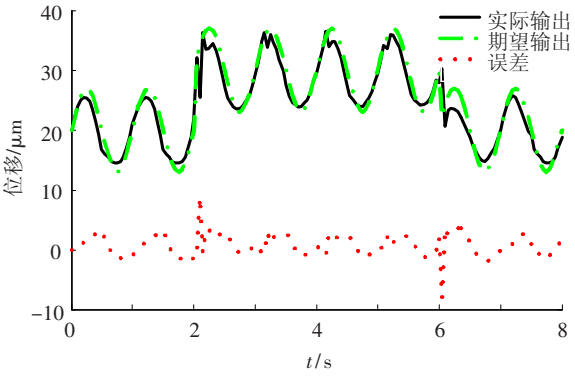


图 4　正弦叠加混合信号 PID 控制下的追踪曲线

4　基于 Preisach 模型模糊 PID 前馈补偿法的实验

基于传统的 PID 控制，模糊 PID 控制是利用模糊集来表示控制规则的条件和操作，通过模糊控制规则进行推理，对 PID 控制的 3 个参数进行优化设计. 模糊 PID 控制方法，已有不少学者从不同角度进行了研究[17-18].

反映误差的模糊集合 e 和误差变化的模糊集合 e_c 作为模糊控制器的二维输入，来适应模糊控制器在任意时刻对 PID 参数的调整，反映控制变量变化的模糊集合 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 是模糊控制器的三维输出.

在控制实验中采用相同的硬件装置，控制器更换为基于 Preisach 模型前馈补偿模糊 PID 控制，如图 5 所示. 对超磁致伸缩作动器进行控制实验.

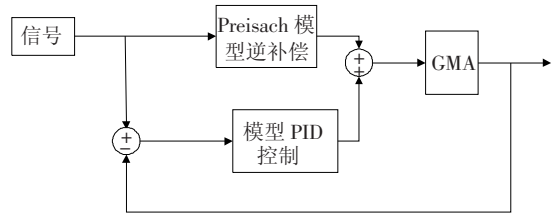


图 5　基于 Preisach 模型模糊 PID 前馈补偿的控制器

4.1　模糊控制器设计

在模糊 PID 控制器设计中，分别模糊化处理 e、e_c、ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 这几个参数值，得到对应的模糊集合 e、e_c、ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 是由参数值 PB，PM，PS，ZO，NS，NM，NB 构成，这些参数值分别表示正大，正中，正小，零以及负小，负中，负大这几个模糊意义. 误差和误差变化模糊集合 e 和 e_c 输入范围分别是 [- 1，1] 以及 [- 453.6，453.6]. 模糊控制器所使用的控制规则表如表 1 ~ 3 所示.

表 1　ΔK_p 模糊规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2　ΔK_i 模糊规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_d 模糊规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

根据各模糊变量的模糊控制规则表运用 Mamdani 推理法，并运用重心法进行反模糊化计算，通过实验多次调试，测得的模糊 PID 控制参数分别为：ΔK_i 的参数范围是[- 11.7, 11.7]；ΔK_p 的参数范围是[- 1.085, 1.085]；ΔK_d 的参数范围是[- 0.001 8, 0.001 8].

4.2 方波信号测试

首先对基于 Preisach 模型模糊 PID 前馈补偿的控制方法进行方波信号追踪轨迹实验，目标轨迹与追踪信号实验结果如图 6 所示. 基于 Preisach 模型模糊 PID 控制下，系统的超调量较少，几乎看不到，而基于 Preisach 模型 PID 控制下超调量较大，约有 10% 左右. 从上升的时间来看，模糊 PID 约有 100 ms 的调整时间，PID 控制的调整时间可以达到 250 ms，相当于模糊 PID 的调整时间比 PID 控制下降了 60% 左右，模糊 PID 追踪曲线看起来显得比较平稳，而模糊 PID 几乎没有超调. 从这点来看基于 Preisach 模糊 PID 控制表现出了较大的优越性. 但是在目标曲线上下却出现了幅值大约为 0.2 μm 高频小幅振荡，出现这种现象有可能来自于系统无法消除的噪声，实验中离散采样时间以及该控制器很难使其控制量正好达到零点. 因此会出现高频小幅振荡. 整体来说，追踪目标曲线的效果还是较好的，因此对于稳态信号，控制效果还是较为理想的.

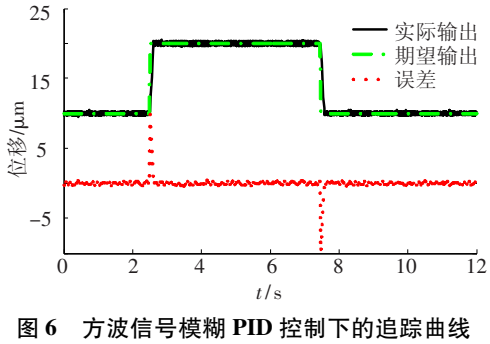


图 6 方波信号模糊 PID 控制下的追踪曲线

4.3 正弦叠加混合信号测试

同样对改进的控制方法再进行混合信号追踪轨迹实验，目标轨迹与追踪信号实验结果如图 7 所示. 从改进的控制方法追踪曲线图上可以看出，当该信号发生突变时，模糊 PID 控制可以使系统快速收敛达到目标输出结果，体现出了该控制方法良好的适应能力. 而该追踪信号在 PID 控制下则出现相差较大，有较大的时滞. 模糊 PID 对该信号的轨迹追踪能力较强，但在该信号波形的峰、谷值处波形出现轻微改变. 而在 PID 控制下波形在其峰、谷值处出现明显变形，从而说明改进的控制器在复杂环境下对于系统出现的不确定性具有良好的鲁棒性.

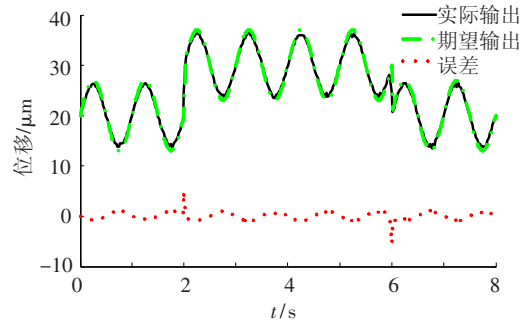


图 7 正弦叠加混合信号模糊 PID 控制下的追踪曲线

5 两种控制系统对比

为了更深入地了解两种控制器控制效果的差别，将两种控制器的实验测得的结果输出在一张结果图中，选取混合信号的测试结果中的一小段信号进行局部放大，如图 8 所示，从图中可以更加清晰的看到，在模糊 PID 控制下，对目标信号的轨迹追踪的较好，没有明显的时滞；而在 PID 控制下，出现了明显的相差，有较大的时滞. 但是由于系统及控制器等因素的影响，使模糊 PID 控制下轨迹不可避免的出现了小幅振荡，但是从对整个信号的控制来说，该小幅振荡影响较小，且波峰波谷处未见明显变形. 而 PID 控制下，其追踪轨迹较为平滑，但是波峰处可以看到轨迹出现明显的变形.

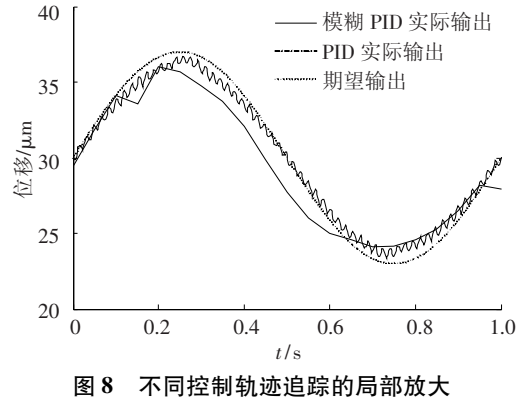


图 8 不同控制轨迹追踪的局部放大

从前文分析的方波轨迹可以看出，它还具有响应迅速、超调量小等优点. 因此从整体来看，模糊 PID 控制的时滞小、响应快、低超调量、鲁棒性

良好、追踪精度较高、整体控制效果较好等优点. 其小幅振荡的缺陷同整体控制效果相比，影响较小. 而且改进的控制方法在复杂环境下对系统存在的不确定性有较好的适应性和控制效果，更适合于对控制精度有较高要求的场合.

从理论上来讲，由于模糊 PID 可以根据系统的变化，自动调整 PID 参数，来适应实际的系统，因此有很好的鲁棒性，而超磁致伸缩作动器具有明显的磁滞和时滞特性，在实验过程中系统会存在一些不确定性，因此基于 Preisach 模型的模糊 PID 从理论上来讲更为适合超磁致伸缩作动器，而上文分析的实验结果再一次验证了基于 Preisach 模型的模糊 PID 控制的优势.

6　结　论

本文对基于 Preisach 模型 PID 控制前馈补偿的方法进行了改进，提出了一种新的基于 Preisach 模型模糊 PID 控制前馈补偿的方法. 首先建立了实时控制 GMA 的实验系统，并利用该实验系统对这两种控制方法选用不同类的目标信号（方波信号和混合信号）对 GMA 进行追踪控制，并进行实验对比.

从两种不同信号的追踪实验结果表明，对于方波这种稳态（静态，准静态）信号，基于 Preisach 模型 PID 控制前馈补偿的方法可以有较好的追踪，但是在信号的上升和下降段，其信号的超调量较大，响应时间较长. 改进的控制方法在追踪轨迹上出现小幅振荡，但是具有较小的超调量和较短的响应时间. 对于混合信号，PID 控制在轨迹追踪上出现明显相差，时滞较大，且波形在波峰波谷处出现了明显变形，但是轨迹较为平滑. 而改进的控制方法在轨迹追踪上相差较小，波峰波谷处没有明显的变形，但是轨迹仍然出现小幅振荡. 小幅振荡是由于硬件以及控制器本身的因素引起的，无法避免，同整体控制效果相比，影响较小. 但是在控制精度方面比 PID 控制要高的多.

总体上，改进的控制方法具有时滞小、响应快、低超调量、鲁棒性良好、追踪精度较高、整体控制效果较好等优点. 更加适合于超磁致伸缩作动器由于较强的磁滞和时滞特性而存在不确定性的实验系统. 因此基于 Preisach 模型前馈补偿的模糊 PID 控制对超磁致伸缩作动器有较好的适应性及有效性.

参考文献：

[1] 李碚，伍虹. 国外稀土超磁致伸缩材料的研究状况[J]. 稀土，1990，11(6)：52 – 59.

[2] GRUNWALD A，OLABI A G. Design of a magnetostrictive (MS) actuator[J]. Sensors and Actuators A：Physical，2008，144(1)：161 – 175.

[3] LOVISOLO A，ROCCATO P E，ZUCCA M. Analysis of a magnetostrictive actuator equipped for the electromagnetic and mechanical dynamic characterization [J]. Journal of magnetism and magnetic materials，2008，320(20)：e915 – e919.

[4] 贾振元，王晓煜，王福吉. 超磁致伸缩执行器动力学模型及数值模拟[J]. 大连理工大学学报，2008，48(3)：368 – 372.

[5] 王晓煜. 超磁致伸缩微位移执行器的系统建模与控制方法研究[D]. 大连：大连理工大学，2007.

[6] TAN X，VENKATARAMAN R，KRISHNAPRASAD P S. Control of hysteresis：theory and experimental results [R]. Manyland：University of Maryland，College Park，2001，4326：101 – 112.

[7] 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.

[8] 张磊，付永领，刘永光，等. 磁致伸缩作动器的建模与控制研究[J]. 压电与声光，2005，27(5)：503 – 506.

[9] 卢全国，陈定方，陈昆，等. 基于 Preisach 修正模型的 GMA 前馈补偿研究[J]. 武汉理工大学学报，2007，29(1)：48 – 51.

[10] 唐志峰，吕福在，项占琴. 超磁致伸缩微位移驱动器的非线性迟滞建模及控制方法[J]. 机械工程学报，2007，43(006)：55 – 61.

[11] 唐志峰. 超磁致伸缩执行器的基础理论与实验研究[D]. 杭州：浙江大学，2005.

[12] 赵章荣，邬义杰，顾新建，等. 用神经网络结构实现超磁致伸缩智能构件滑模控制[J]. 光学精密工程，2009，17(004)：778 – 786.

[13] 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(001)：214 – 217.

[14] 卢全国. 基于 GMM 的微致动研究及应用[D]. 武汉：武汉理工大学，2007.

[15] 刘洁，刘红军，叶芳. 微振动控制中超磁致伸缩作动器的设计与分析[J]. 广西大学学报：自然科学版，2011，36(5)：746 – 750.

[16] 金奇，邓志杰. PID 控制原理及参数整定方法[J]. 重庆工学院学报：自然科学版，2008，22(5)：91 – 94.

[17] 郑美茹. 模糊 PID 控制器的仿真研究[J]. 装备制造技术，2011(4)：74 – 76.

[18] 常满波，胡鹏飞. 基于 MATLAB 的模糊 PID 控制器设计与仿真研究[J]. 机车电传动，2002(5)：34 – 36.

（编辑　张　宏）