超磁致伸缩作动器的率相关建模与跟踪控制

郭咏新 毛剑琴

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 利用 Hammerstein 模型对超磁致伸缩作动器(GMA, Giant Magnetostrictive Actuators)进行建模, 分别以改进的 Prandtl-Ishlinskii(MPI, Modified Prandtl-Ishlinskii)模型和外因输入自回归模型(ARX, Autoregressive model with exogenous input)代表 Hammerstein 模型中的静态非线性部分和线性动态部分,并给出了模型的辨识方法. 此模型能在 1 ~ 100 Hz 频率范围内较好地描述 GMA 的率相关迟滞非线性特性. 提出了前馈逆补偿和比例-微分-积分(PID, Proportional-Integral-Derivative)反馈相结合的复合控制策略. 实时跟踪幅值为 16 μm 的单一频率和复合频率正弦参考输入信号, 均方根误差小于 1 μm, 相对误差小于 10%, 证明了控制策略的有效性.

关 键 词: 超磁致伸缩作动器; 率相关迟滞非线性; Hammerstein 模型; MPI 模型; 跟踪控制

中图分类号: TP 29

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1360-06

Rate-dependent modeling and tracking control of giant magnetostrictive actuators

Guo Yongxin Mao Jianqin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A Hammerstein model was proposed to model giant magnetostrictive actuators (GMA). A modified Prandtl-Ishlinskii(MPI) model and an autoregressive model with exogenous input (ARX) were used to represent the static nonlinear part and the linear dynamic part of the Hammerstein model respectively. Model identification method was also given. The proposed model can describe the rate-dependent hysteresis of GMA from 1 Hz to 100 Hz well. A compound controller containing inverse compensator and proportional-integral-derivative (PID) feedback was designed for tracking control. Real time trajectory tracking of single frequency and composite frequency sinusoidal reference inputs with the amplitude of 16 μm was conducted. The root-mean-square error was less than 1 μm and the relative error was less than 10%, which verify the effectiveness of the control strategy.

Key words: giant magnetostrictive actuators; rate-dependent hysteresis; Hammerstein model; modified Prandtl-Ishlinskii(MPI) model; tracking control

超磁致伸缩作动器(GMA, Giant Magnetostrictive Actuators)以其响应迅速、推力大、分辨率高、可靠性好等优点,在精密定位、跟踪和主动振动控制领域获得了广泛的应用. 但是 GMA 在输入输出关系上存在迟滞非线性,而且这种迟滞非线性是率相关的,即 GMA 的输出还随着输入信号的频率的变化而变化. 这种率相关迟滞非线性不仅会降低系统的控制精度,还可能会导致系统

收稿日期: 2012-12-13; **网络出版时间**: 2013-10-17 08:37

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20131017.0837.003.html

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91016006, 91116002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介: 郭咏新(1979-),男,河北唐山人,博士生,guoyongxin1979@126.com.

不稳定,从而给 GMA 的建模和控制带来一定的难度.

在迟滞非线性建模方面,目前主要的模型可以分为物理模型和唯象模型. 物理模型的基础是产生迟滞非线性的物理机制,主要的代表有 Jiles-Atherton 模型[1]和 Duhem 模型[2]等. 唯象模型不需要深入研究复杂的物理机制,只根据系统的输入输出数据进行建模,模型参数没有明确的物理意义. 唯象模型的代表有 Preisach 模型[3]、Krasnoselskii-Pokrovskii (KP) 模型[4]、Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型[5]等. 在上述模型的基础上,率相关迟滞非线性建模也获得了一定的进展[6-9]. 值得关注的是智能计算方法目前也已经用于迟滞非线性的建模,如人工神经元网络[10-11]、支持向量机[12]、模糊树[13]等.

在迟滞非线性的控制方面,最直接的办法是逆补偿控制,即通过构建迟滞模型的逆来消除迟滞非线性[14]. 另外,比例-微分-积分(PID,Proportional-Integral-Derivative)反馈控制[15]、自适应控制[16-18]、滑模控制[19]、鲁棒控制[20-21]等方法也被研究者所采用.

本文提出了一种能够描述 GMA 率相关迟滞非线性的 Hammerstein 模型. 相对于其他基于算子的率相关模型,本文所提出的模型是纯唯象的,不需要任何物理参数,而且模型简单,易于辨识. 此模型能够较好地描述 1 ~ 100 Hz 内的单一频率信号和复合频率信号.

在所建 Hammerstein 模型的基础上,本文提出了基于前馈逆补偿和 PID 反馈的复合控制策略,并进行了实时跟踪控制实验. 实验结果表明所提控制策略是有效的.

1　GMA 的 Hammerstein 模型

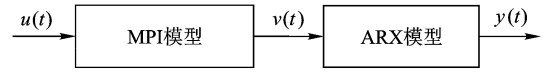
Hammerstein 模型是一种基于模块连接结构的模型,由一个静态非线性函数部分和一个线性动态系统部分串联组成. Hammerstein 模型已经被证明可以描述多种非线性系统,如化学过程、热微系统、生理系统、粘性控制阀、固体氧化物燃料电池、磁流变阻尼器等. 在 Hammerstein 模型中,静态非线性函数部分可以是多项式函数、分段线性函数、样条函数、神经网络、最小二乘支持向量机、模糊模型等[22].

为了能够使用 Hammerstein 模型来描述 GMA 的率相关迟滞非线性,避免深入研究复杂的物理机制,首先需要做如下假设:

假设 1　GMA 的迟滞非线性由两部分组成,即静态迟滞非线性部分和线性动态部分.

假设 2　GMA 的率相关性完全是由其线性动态部分决定的.

在上述假设的基础上,本文提出了 GMA 的 Hammerstein 模型,以改进的 Prandtl-Ishlinskii (MPI,Modified Prandtl-Ishlinskii)模型表示静态非线性函数部分,以外因输入自回归模型(ARX,Autoregressive model with exogenous input)表示线性动态系统部分,如图 1 所示.



$u(t)$,$y(t)$—GMA 的输入与输出;$v(t)$—不可测的中间变量.

图 1　GMA 的 Hammerstein 模型

下面分别介绍 MPI 模型和 ARX 模型.

1.1　MPI 模型

MPI 模型[5]是建立在 PI 模型基础之上的,在 GMA 的 Hammerstein 模型中用来表示静态迟滞非线性部分.

PI 模型由有限个具有不同阈值的 Play 算子加权叠加组成,用来描述迟滞非线性. Play 算子如图 2 所示,定义如下:

$$y(t)=\max\{x(t)-r_{\mathrm{h}},\min\{x((t)+r_{\mathrm{h}},y(t_i)\}\} \tag{1}$$

其中,$x(t)$为单调区间 $t_0\leqslant t_1\leqslant\cdots\leqslant t_i\leqslant t\leqslant t_{i+1}\leqslant\cdots\leqslant t_N$ 中的分段单调输入信号;$r_{\mathrm{h}}\in\mathbf{R}^+$为算子的阈值;$y_0$ 为独立的算子初始值.

PI 模型表达式如下:

$$y(t)=\boldsymbol{w}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{r}_{\mathrm{h}}}[x,\boldsymbol{y}_0](t) \tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{w}_{\mathrm{h}}=[w_{\mathrm{h}0},w_{\mathrm{h}1},\cdots,w_{\mathrm{h}n}]^{\mathrm{T}}$ 为权值向量;$\boldsymbol{r}_{\mathrm{h}}=[r_{\mathrm{h}0},r_{\mathrm{h}1},\cdots,r_{\mathrm{h}n}]^{\mathrm{T}}$ 为阈值向量;$\boldsymbol{y}_0=[y_{01},y_{02},\cdots,y_{0n}]^{\mathrm{T}}$ 为 Play 算子初始值向量.

为了使 PI 模型具有非凸和非奇对称等性质,从而更好地描述大多数智能作动器的迟滞环,可以在 PI 模型的基础上串联单边死区算(one sided dead-zone operator),如图 3 所示,定义如下:

$$S(x(t),r_{\mathrm{s}})=\begin{cases}\max\{x(t)-r_{\mathrm{s}},0\} & r_{\mathrm{s}}>0\\ x(t) & r_{\mathrm{s}}=0\\ \min\{x(t)-r_{\mathrm{s}},0\} & r_{\mathrm{s}}<0\end{cases} \tag{3}$$

其中,$r_{\mathrm{s}}\in\mathbf{R}$ 为单边死区算子的阈值.

不同阈值的单边死区算子的加权叠加为

$$S[x](t)=\boldsymbol{w}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}}}[x](t) \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}=(r_{\mathrm{s}-l},\cdots,r_{\mathrm{s}0},\cdots,r_{\mathrm{s}l})$ 为阈值向量,并且

$-\infty<r_{s-l}<\cdots<r_{s0}=0<\cdots<r_{sl}<+\infty$；$\boldsymbol{w}_s^{\mathrm{T}}=(w_{s-l},\cdots,w_{s0},\cdots,w_{sl})$ 为权值向量；$\boldsymbol{S}_{r_s}[x](t)=(S_{r_{s-l}},\cdots,S_{r_{s0}},\cdots,S_{r_{sl}})$ 为单边死区算子向量.

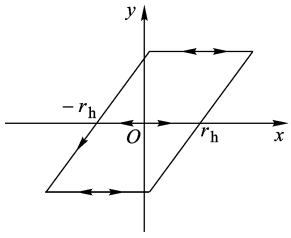


图 2 Play 算子

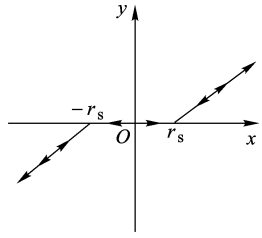


图 3 单边死区算子

将 PI 模型与单边死区算子的加权叠加相串联，就得到了 MPI 模型：

$$y(t)=\boldsymbol{w}_s^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{S}_{r_s}[\boldsymbol{w}_h^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{H}_{r_h}[x,\boldsymbol{y}_0]](t) \quad (5)$$

MPI 模型的参数辨识方法可见文献[5].

1.2 ARX 模型

ARX 模型是一种有理传递函数模型[23]，在 GMA 的 Hammerstein 模型中用来表示线性动态部分. ARX 模型的表达式如下：

$$A(z)y(t)=B(z)u(t)+\varepsilon(t) \quad (6)$$

其中，$\varepsilon(t)$ 为误差项；$A(z)=1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}+\cdots+a_nz^{-n}$；$B(z)=1+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}+\cdots+b_mz^{-m}$，$z^{-1}$ 为单位延迟算子.

ARX 模型写为传递函数形式为

$$G(z)=\frac{B(z)}{A(z)} \quad (7)$$

2 Hammerstein 模型辨识与检验

2.1 辨识方法

GMA 的 Hammerstein 模型辨识可按如下步骤进行：

步骤 1 辨识 MPI 模型. 在某一较低频率(如 1 Hz)下，给 GMA 正弦输入 $u(t)$，测量输出 $y(t)$. 经采样后得到离散化输入输出序列 $\{u(i)\}_{i=1}^N$ 和 $\{y(i)\}_{i=1}^N$. 然后辨识 MPI 模型的参数，并以此 MPI 模型作为 Hammerstein 模型的静态迟滞非线性部分.

步骤 2 辨识 ARX 模型的阶次和参数. 首先以包含丰富频率信息的正弦扫描信号激励 GMA，经采样后得到离散化序列 $\{u(i)\}_{i=1}^N$ 和 $\{y(i)\}_{i=1}^N$. 然后根据输入序列 $\{u(i)\}_{i=1}^N$ 和步骤 1 辨识得到的 MPI 模型，计算中间变量序列 $\{v(i)\}_{i=1}^N$. 最后根据 $\{v(i)\}_{i=1}^N$ 和 $\{y(i)\}_{i=1}^N$，利用最小二乘法辨识 ARX 模型的阶次和参数.

2.2 模型辨识与检验

模型辨识与检验的精度以均方根误差(RMSE, Root Mean Square Error)和相对误差(RE, Relative Error)为标准，定义如下：

$$E_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(\hat{y}(i)-y(i))^2/N} \quad (8)$$

$$E_{\mathrm{RE}}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(\hat{y}(i)-y(i))^2\Big/\sum_{i=1}^{N}(y(i))^2} \quad (9)$$

其中，$\hat{y}(i)$ 为模型输出；$y(i)$ 为 GMA 输出.

模型辨识与检验数据均来自实验. 1 Hz 下的 MPI 模型输出和 GMA 输出如图 4 所示，模型辨识误差 RMSE 和 RE 分别为 0.4931 和 0.0238，可知 MPI 模型能够较好地描述 GMA 单一频率下的迟滞非线性.

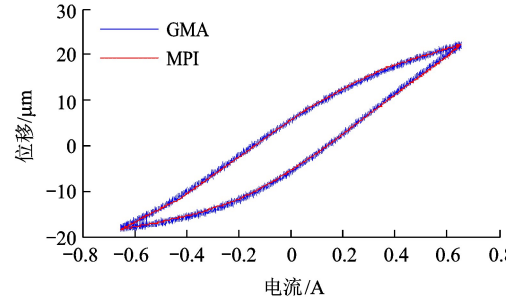


图 4 MPI 模型输出和 GMA 输出

用于辨识 ARX 模型的正弦扫描信号由 matlab 函数“idinput”生成，包含频率范围为 1 ~ 100 Hz的信号，辨识得到的 ARX 模型为

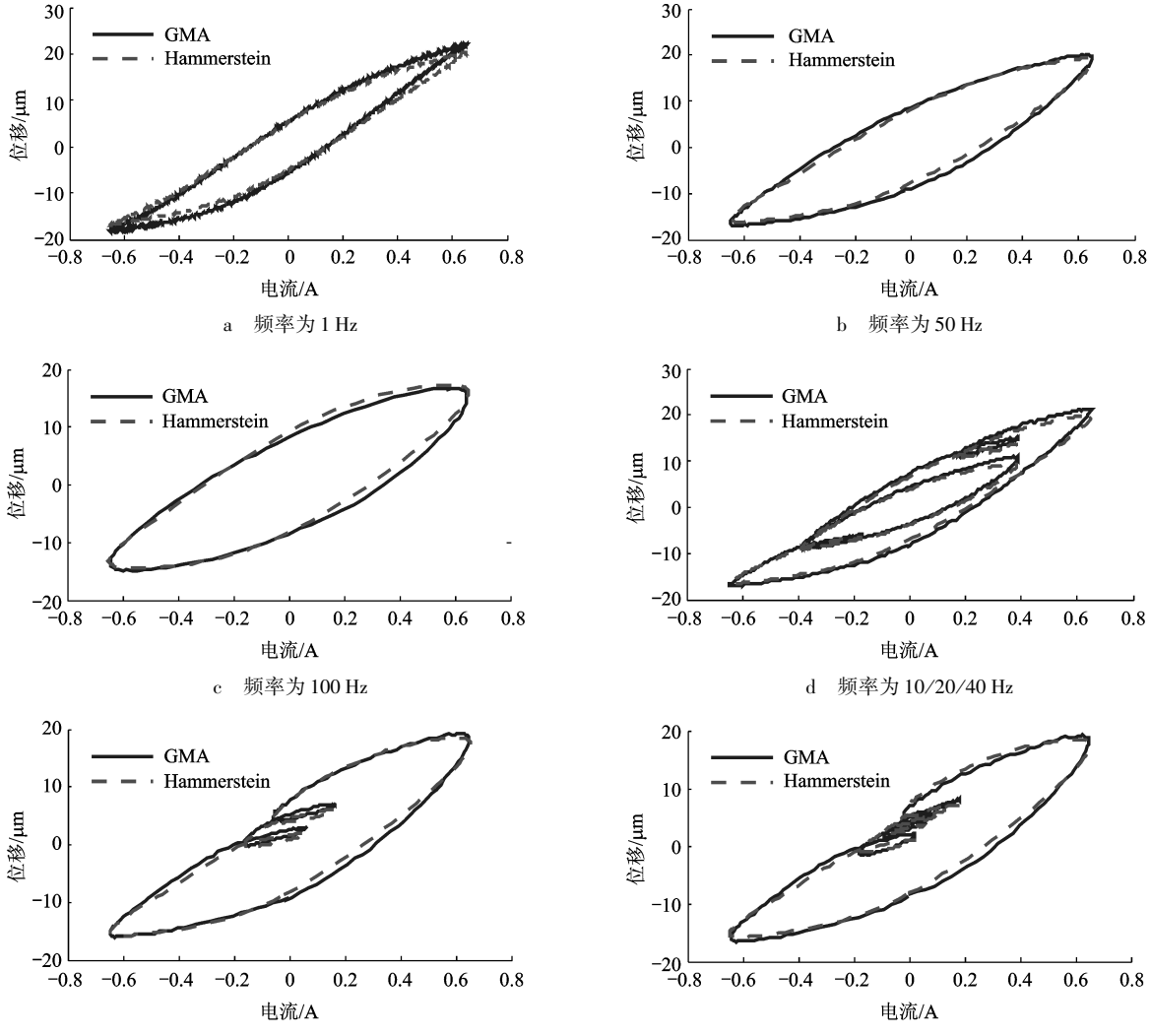
$$G(z)=\frac{1.0108(z-0.8712)}{(z-0.9251)(z+0.8897)} \quad (10)$$

图 5 给出了部分在单一频率和复合频率输入下 Hammerstein 模型输出和 GMA 输出的对比，表 1 详细给出了在不同频率下的模型检验误差.

表 1 模型检验 E_{RMSE} 和 E_{RE}

频率/Hz	E_{RMSE}/μm	E_{RE}	频率/Hz	E_{RMSE}/μm	E_{RE}
1	1.3036	0.0858	80	0.9592	0.0772
5	1.2797	0.0846	90	1.1756	0.0979
10	1.2412	0.0825	100	0.9652	0.0828
20	1.1228	0.0759	10/20/…/100	0.5880	0.0870
30	1.0306	0.0714	10/20/40	0.8333	0.0727
40	0.9703	0.0690	30/60/90	0.7914	0.0836
50	0.9261	0.0678	5/25/55/75/95	0.7498	0.0922
60	0.9339	0.0704	10/30/50/70/90	0.7108	0.0734
70	1.0549	0.0821	20/40/60/80/100	0.7522	0.0934

由图 5 和表 1 可知，所建 Hammerstein 模型能够在 1 ~ 100 Hz 范围内描述 GMA 的迟滞非线性，具有较好的频率泛化能力. 此种建模方法所需数据量少，只需要一个频率下的输入输出数据和一段频率范围内的正弦扫描数据；而且模型简单，易于辨识和实现. 这种建模方法为率相关迟滞非线性建模提供了一种新的思路.



a　频率为 1 Hz　　b　频率为 50 Hz

c　频率为 100 Hz　　d　频率为 10/20/40 Hz

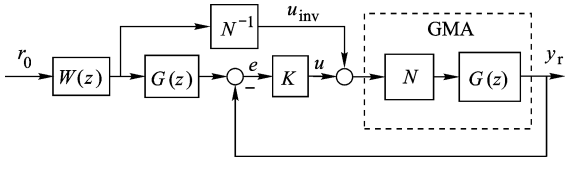
e　频率为 30/60/90 Hz　　f　频率为 20/40/60/80/100 Hz

图 5　Hammerstein 模型输出和 GMA 输出

3　控制器设计及跟踪控制

3.1　控制器设计

在所建 Hammerstein 模型基础上,本文提出了前馈逆补偿和 PID 反馈相结合的复合控制策略,如图 6 所示.



r_0—参考输入信号;y_r—GMA 输出;$W(z)$—ARX 模型的逆;N—MPI 模型;N^{-1}—MPI 模型的逆,用来消除 GMA 的静态迟滞非线性;K—控制器.

图 6　跟踪控制结构

3.1.1　ARX 模型的逆

如果 $W(z)=G^{-1}(z)$,则 $y_r=r_0$,GMA 的输出能够跟踪参考输入 r_0. 然而由模型辨识结果可知,$G(z)$是一个严格正则的系统,因此 $W(z)$不可取为 $G^{-1}(z)$. 若

$$W(z)=\frac{1}{z\cdot G(z)} \tag{11}$$

若系统采样频率足够大,则 $W(z)$近似于 $G^{-1}(z)$.

3.1.2　MPI 模型的逆

当 MPI 模型中的参数满足一定的约束关系时,MPI 模型具有解析逆[5],其表达式如下:

$$x(t)=\boldsymbol{w}'^{\mathrm{T}}_{\mathrm{h}}\cdot\boldsymbol{H}'_{\boldsymbol{r}_{\mathrm{h}}}[\boldsymbol{w}'^{\mathrm{T}}_{\mathrm{s}}\cdot\boldsymbol{S}'_{\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}}}[y,\boldsymbol{y}'_0]](t) \tag{12}$$

其中,$\boldsymbol{w}'_{\mathrm{h}}$和 $\boldsymbol{r}'_{\mathrm{h}}$为逆模型中 Play 算子的权值向量和阈值向量;$\boldsymbol{w}'_{\mathrm{s}}$和 $\boldsymbol{r}'_{\mathrm{s}}$为逆模型中单边死区算子的权值向量和阈值向量;$\boldsymbol{y}'_0$为逆模型中 Play 算子的初始值向量. 参数辨识方法具体可见文献[5].

3.1.3　控制器的设计

K 设计为增量式 PID 控制器,若系统跟踪存在误差,则控制器产生控制输出,使误差减小. 它的输出 u 的表达式为

$$u(k)=K_{\mathrm{P}}[e(k)-e(k-1)]+K_{\mathrm{I}}e(k)+K_{\mathrm{D}}[e(k)-2e(k-1)+$$

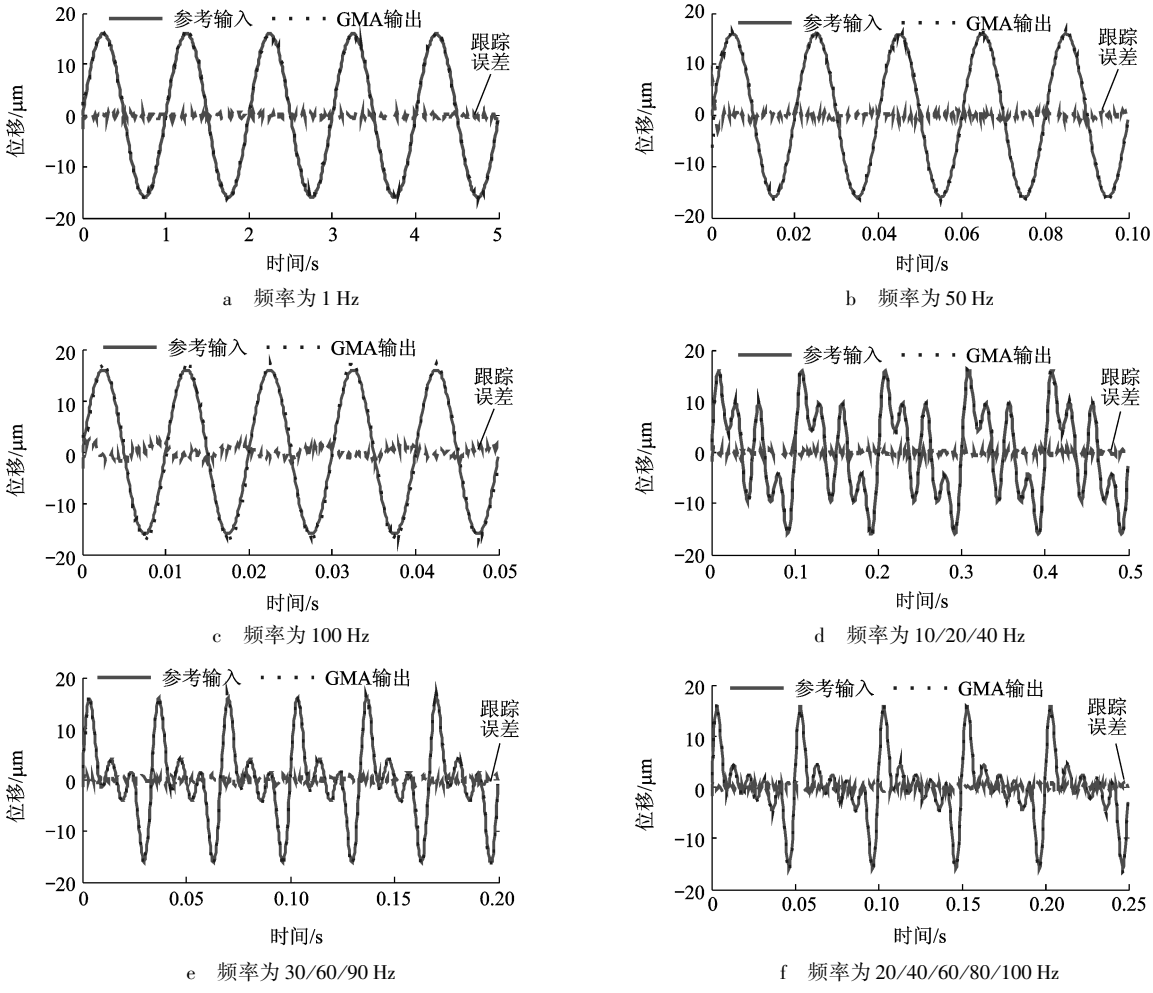
$$e(k-2)] + u(k-1) \qquad (13)$$

3.2 跟踪控制

根据前文所提出的控制策略,进行了实时跟踪实验. 参考输入幅值为 16 μm,频率范围在 1 ~ 100 Hz 内的单一频率和复合频率信号. 在控制器的作用下,使 GMA 的输出实时跟踪参考输入信号. PID 控制器参数设计为 $K_P = 1.1$, $K_I = 0.5$, $K_D = 0.00001$.

实验设备包括 GMA、功率放大器 GF-20、电涡流传感器、控制系统 dSPACE DS1103、工控机. 按照图 6 所示信号流程,由控制系统 dSPACE 产生参考输入信号,GMA 的位移输出由电涡流传感器测量. 根据参考输入和 GMA 真实输出的误差,控制器输出控制信号,经过工作于电流模式的功率放大器放大后驱动 GMA.

图 7 给出了部分频率下参考输入和 GMA 输出的对比,表 2 详细给出了在不同频率下的跟踪误差.



a 频率为 1 Hz　b 频率为 50 Hz

c 频率为 100 Hz　d 频率为 10/20/40 Hz

e 频率为 30/60/90 Hz　f 频率为 20/40/60/80/100 Hz

图 7 跟踪控制

表 2 跟踪控制误差

频率/Hz	E_{RMSE}/μm	E_{RE}	频率/Hz	E_{RMSE}/μm	E_{RE}
1	0.3960	0.0350	80	0.7787	0.0688
5	0.3974	0.0351	90	0.9158	0.0898
10	0.4041	0.0357	100	0.8954	0.0792
20	0.4256	0.0376	10 ~ 100	0.4682	0.0997
30	0.4616	0.0408	10/20/40	0.4285	0.0488
40	0.4948	0.0437	30/60/90	0.5083	0.0649
50	0.6691	0.0592	5/25/55/75/95	0.4946	0.0765
60	0.6348	0.0561	10/30/50/70/90	0.4877	0.0709
70	0.7102	0.0628	20/40/60/80/100	0.5061	0.0794

由图 7 和表 2 可以看出,在 1 ~ 100 Hz 的频率范围内,GMA 均能够有效地跟踪单一频率和复合频率的参考信号. 由此可知,由于本文所建 Hammerstein 模型较好地描述了 GMA 的率相关迟滞非线性,使得在此基础上所提出的控制策略基本抵消了 GMA 的率相关迟滞非线性,因此 GMA 能够有效地跟踪不同频率的参考输入.

4 结 束 语

本文提出了一种能够描述 GMA 率相关迟滞非线性特性的 Hammerstein 模型. 模型中静态非线性函数部分由 1 Hz 下的 MPI 模型表示,线性动态系统部分由 ARX 模型表示. 此 Hammerstein 模型是纯唯象的,不需要任何物理参数,而且模型简单,易于辨识,它对 1 ~ 100 Hz 频率范围内的单一

频率和复合频率信号均具有较好的泛化能力. 在所建 Hammerstein 模型的基础上,本文提出了基于前馈逆补偿和 PID 反馈的复合控制策略,实时跟踪控制实验结果验证了控制策略的有效性.

参考文献(References)

[1] Jiles D C, Atherton D L. Theory of ferromagnetic hysteresis [J]. Journal of Magnetism and Materials, 1986, 61: 48-60

[2] Brokate M, Sprekels J. Hysteresis and phase transitions [M]. Berlin: Springer Verlag, 1996

[3] Mayergoyz I D. Dynamic preisach model of hysteresis [J]. IEEE Trans Magn, 1988, 24(6): 2925-2927

[4] Webb G V, Lagoudas D C, Kurdila A J. Hysteresis modeling of SMA actuators for control application [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1998, 9(6): 432-448

[5] Kuhnen Klaus. Modeling, identification and compensation of complex hysteresis nonlinearities, a modified Prandtl-Ishlinskii approach [J]. European Journal of Control, 2003, 9(4): 407-418

[6] Venkataraman R. Modeling and adaptive control of magnetostrictive actuator [D]. College Park: Center for Dynamics and Control of Smart Structures, University of Maryland, 1999

[7] Slaughter J C, Dapino M J, Smith R C, et al. Modeling of a Terfenol-D ultrasonic transducer[C]//Proceedings of Smart Structures and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems. Newport Beach, USA: SPIE, 2000: 366-377

[8] Tan X B, Baras J S. Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators [J]. Automatica, 2004, 40: 1469-1480

[9] Janaideh M Al, Su C Y, Rakheja S. Development of the rate-dependent Prandtl-Ishlinskii model for smart actuators [J]. Smart Mater Struct, 2008, 17(3): 035026. 1-035026. 11

[10] Dong R, Tan Y, Chen H, et al. A neural network based model for rate-dependent hysteresis for piezoceramic actuators [J]. Sensor Actuat A—Phys, 2008, 143(3): 370-376

[11] Deng L, Tan Y. Diagonal recurrent neural network with modified backlash operators for modeling of rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators [J]. Sensor Actuat A—Phys, 2008, 148(1): 259-270

[12] Lei W, Mao J Q, Ma Y H. A new modeling method for nonlinear rate-dependent hysteresis system based on LS-SVM [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Hanoi, Vietnam: IEEE, 2008: 1442-1446

[13] Mao J Q, Ding H S. Intelligent modeling and control for nonlinear systems with rate-dependent hysteresis [J]. Science in China Press, 2009, 52(4): 547-722

[14] Iyer R V, Tan X B, Krishnaprasad P S. Approximate inversion of the preisach hysteresis operator with application to control of smart actuators [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(6): 798-810

[15] Cavallo A, Natale C, Pirozzi S, et al. Effects of hysteresis compensation in feedback control systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1389-1392

[16] Tao G, Kokotovic P V. Adaptive control of systems with actuator and sensor nonlinearities [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 1996

[17] Webb G V, Kurdila A J. Identification and adaptive control for a class of hysteresis operators [R]. AIAA 97-1208, 1997

[18] Zhang Z, Chen Q W, Mao J Q. A generalized stress-dependent Prandtl-Ishlinskii model and its adaptive inverse compensation with model reference for GMA [C]//Proceedings of 8th Asian Control Conference. Kaohsiung, Taiwan: IEEE, 2011: 535-540

[19] Liaw H C, Shirinzadeh B, Smith J. Enhanced sliding mode motion tracking control of piezoelectric actuator [J]. Sensors and Actuators A, 2007, 138: 194-202

[20] Nealis J M, 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

[21] Tan X B, Baras J S. A robust control framework for smart actuators[C]//Proceedings of the American Control Conference. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2003: 4645-4650

[22] Giri F, Bai E W. Block-oriented nonlinear systems identification [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 4-6

[23] Zhu Y C. Multivariable system identification for process control [M]. Netherlands: Elsevier Science Ltd, 2001: 73-82

(编　辑:赵海容)