文章编号：1006-1355(2014)05-0016-06

巨磁致伸缩自适应精密驱动和振动控制

孙晓芬，杨斌堂，赵 龙

（上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室，上海 200240）

摘 要：针对巨磁致伸缩系统的自适应精密驱动和微振动控制系统，结合受控自回归滑动平均模型(CARMA)与递推增广最小二乘法（RELS）相结合对巨磁致伸缩驱动器（GMA）实现在线模型辨识；分别用不同类型的信号作为输入，辨识模型能精确描述GMA输出位移，辨识误差达0.23 %；将改进的广义预测控制算法（MGPC）应用于GMA的闭环位移控制，与最小方差自适应控制（MVSTR）相比，MGPC具有更好的实时性和更高的控制精度，在0～10 μm给定位移下，其驱动控制误差达0.143 μm。最后基于上述CARMA模型和MGPC算法对GMA隔振系统进行微振动控制实验，抑制效果达到20 dB。该研究结果对精密工程及航天振动控制应用具有一定的价值。

关键词：振动与波；CARMA模型；巨磁致伸缩驱动器；在线辨识；自适应控制；振动控制

中图分类号：TH113.1；TB535；TP273 **文献标识码**：A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2014.05.004

Adaptive High-precision Driving and Vibration Control Based on Giant Magnetostrictive Actuators

SUN Xiao-fen , YANG Bin-tang , ZHAO Long

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract : The adaptive high precision displacement driving and micro vibration control based on giant magnetostrictive actuators (GMA) are studied. The controlled auto regressive moving average (CARMA) model and recursive extended least squares (RELS) algorithm are used to perform the online identification of the GMA system. The identification model can accurately represent the GMA displacement output with different input current signals, and the error is below 0.23 %. Then, the modified generalized prediction control (MGPC) algorithm is applied to the high precision displacement control of the actuator. Experiment results show that the MGPC method has a better real-time performance and higher control precision than the minimum variance self-tuning regulator (MVSTR) does. The error of the driving control displacement of the MGPC method is only 0.143 um for the given 0 - 10 μm reference displacement. Finally, the experiment of micro vibration control for a GMA isolation system is done based on the CARMA model and the MGPC algorithm. The results of the experiment show that the vibration attenuation effect can reach 20 dB. This work may have great application significance in precision equipment engineering and vibration control engineering.

Key words : vibration and wave ; CARMA model ; giant magnetostrictive actuator ; online identification ; adaptive control ; vibration control

近年来，智能材料在精密驱动和振动控制方面的应用研究是一个热点。目前，在智能材料驱动和振动控制方面，应用较多的是磁致伸缩材料和压电材料。与压电材料相比，巨磁致伸缩材料(GMM）具有伸缩应变大、输出应力和功率大、能量转换率高、工作频率和工作温度范围宽等优势，在超精密加工、检测等领域具有广阔的应用前景[1, 2]。但是，巨磁致伸缩材料存在磁滞非线性特性，严重限制巨磁致伸缩系统的应用[3]。为了解决在磁致伸缩驱动中存在的非线性问题，许多学者对巨磁致伸缩驱动器（GMA）进行了主动控制研究。徐彭有等基于J-A模型，采用PID控制器和前馈补偿结合的方法实现对GMA系统的闭环位移控制，其控制精度可达0.09

收稿日期：2014-01-24

项目基金：国家自然科学基金项目(11172169)，上海航天基金项目(USCAST2012-02，USCAST2013-10)

作者简介：孙晓芬（1990- ），女，山西运城人，研究生，主要研究方向：精密驱动和振动主动控制。

通信作者：杨斌堂，男，博士生导师。
E-mail: btyang@sjtu.edu.cn

um，但由于控制模型离线实现，其未考虑外界环境的随机扰动[4, 5]；杨斌堂、赵寅等通过构建GMA的Prandtl-Ishlinskii滞回模型，采用在线辨识、求逆和输入信号控制的自适应算法对GMA系统进行非线性补偿控制，精度达到0.309 μm，但其存在计算量大，调整时间长的缺陷[6, 7]。本文提出一种自适应控制算法，既可对系统的非线性特性进行精确辨识和描述，又可对其进行线性补偿控制从而保证有效的精密驱动并用于实现微振动自适应控制。

自适应控制与传统的控制方法不同，自适应控制能在被控系统的数学模型未知或时变的情况下，使系统面向最优或次优的状态自动调整和运行。目前，国内关于自适应控制在磁致伸缩驱动器驱动和振动控制方面的应用研究比较少，特别是针对其非线性和主动控制研究及应用方面，尚处于初步阶段[8]。面向精密工程及航天振动控制领域，对GMA系统的非线性特性建模、精密位移驱动以及微振动控制的深入研究具有重要意义。

1　GMA结构及工作原理

实验室研制的永磁偏置GMA基本结构[4-5]如图1所示，主要组成部件包括端盖、线圈、GMM棒、永磁铁环套筒、碟簧、输出杆等。其中，套筒与端盖采用螺纹连接，通过端盖、输出杆、碟簧组成的预压力组件给GMM棒施加轴向预应力，同时调节其旋紧程度来设定最佳预应力。当向线圈中输入电流时，会在GMM棒体方向产生驱动磁场，推动输出杆运动。棒体的伸长或收缩取决于驱动磁场与永磁铁环引起偏置磁场的方向是否相同，如果相同，输出杆伸长，否则输出杆收缩。这类驱动器的好处在于很小的驱动电流也可以使GMA在线性区内工作。

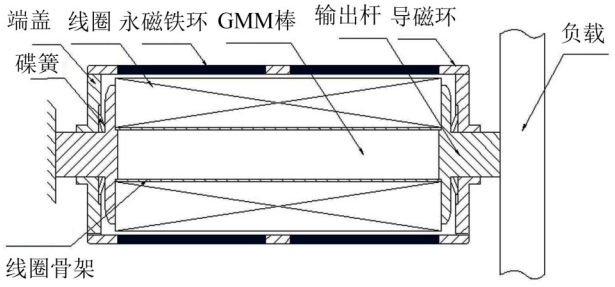


图1　GMA基本结构

2　基于CARMA模型在线辨识方法

由于GMM具有磁滞回非线性特性，要实现GMA的精密驱动和高精度振动控制，首先要建立GMA的模型描述和精确位移辨识。描述辨识一个系统，主要包括两个步骤，一是系统模型结构的确定，二是系统模型参数的辨识。受控自回归滑动平均模型（CARMA）是一种基于输入输出的黑箱模型，旨在描述被辨识系统的外部特性而不深入到系统的内部，即只强调模型的功能而不是模型的结构本身，可以用来广泛描述智能材料的非线性系统特性，具有模型简单，且计算量小等优点。

2.1　CARMA模型

CARMA模型是一类利用有限参数描述的系统模型。该模型引入随机扰动信号，并且其参数在辨识和控制过程中不断更新调整，故可以描述具有非线性和时变特性的GMA系统的输出位移。将被控系统用CARMA模型描述

$$O(z^{-1})y(k)=z^{-d}P(z^{-1})u(k)+R(z^{-1})\xi(k) \tag{1}$$

$$O(z^{-1})=1+o_1z^{-1}+o_2z^{-2}+\ldots+o_{n_0}z^{-n_0}$$

$$P(z^{-1})=p_0+p_1z^{-1}+p_2z^{-2}+\ldots+p_{n_p}z^{-n_p}(p_0\neq 0)$$

$$R(z^{-1})=1+r_1z^{-1}+r_2z^{-2}+\ldots+r_{n_r}z^{-n_r}$$

式中 $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别为系统的输入和输出；$\xi(k)$ 为系统随机扰动；z^{-1} 为滞后一步算子，即 $z^{-1}y(k)=y(k-1)$；O、P、R 分别为系统的输出、输入和扰动系数；k 为采集点；d 为系统的纯延时[8]。

其结构如图2所示，将式改写为最小二乘格式，即

$$y(k)=\varphi^{\mathrm{T}}(k)\theta \tag{2}$$

$$\varphi^{\mathrm{T}}(k)=[-y(k-1),\cdots,-y(k-n_0),u(k-d),\cdots,u(k-d-n_p),\xi(k-1),\cdots,\xi(k-n_r)]^{\mathrm{T}}$$

$$\theta=[o_1,\cdots,o_{n_o},p_0,\cdots,p_{n_p},r_1,\cdots,r_{n_r}]^{\mathrm{T}}$$

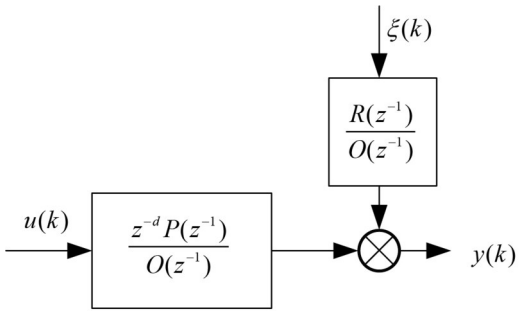


图2　随机模型基本结构

2.2　模型在线辨识

用CARMA模型对系统进行建模后首先需要辨识系统参数，由于辨识算法的稳定性和精度将影响到最终的控制结果，本文采用递推增广最小二乘法（RELS）[9]计算CARMA模型最优参数向量，RELS算法计算简单且稳定性好，辨识的基本原理为：在控制的当前时刻，基于上一控制时刻的系统各项参数估计值 $\hat{\theta}(k-1)$，以及当前和历史的系统输入电流信号、输出位移数据 $\varphi(k)$，计算出当前时刻的系统输出辨识值

$$\hat{y}(k)=\varphi^{\mathrm{T}}(k)\hat{\theta}(k-1) \tag{3}$$

同时计算出辨识误差

$$e(k)=y(k)-\hat{y}(k) \tag{4}$$

然后将输出辨识误差 $e(k)$ 反馈到辨识算法中，以均方差为性能指标，利用递推增广最小二乘准则计算使性能指标取极小值时系统在该时刻的参数估计值 $\hat{\theta}(k)$，从而更新系统的各项模型参数，具体的计算过程如下

$$\begin{aligned}\hat{\theta}(k)&=\hat{\theta}(k-1)+\frac{P(k-1)\hat{\varphi}(k)}{1+\hat{\varphi}^{\mathrm{T}}(k)P(k-1)\hat{\varphi}(k)}e(k)\\ P(k)&=[1-\frac{P(k-1)\hat{\varphi}(k)}{1+\hat{\varphi}^{\mathrm{T}}(k)P(k-1)\hat{\varphi}(k)}\hat{\varphi}^{\mathrm{T}}(k)]P(k-1)\end{aligned} \tag{5}$$

式中 $P(j)\,(j=1,\cdots,k)$ 为递推参数向量，向量元素由系统的输入输出数据 $\varphi(1)$、…、$\varphi(j)$ 等组成。

2.3 GMA系统辨识

为了验证CARMA模型对GMA系统非线性特性建模的有效性，分别给GMA加载频率为1 Hz，幅值为1-4A的正弦信号和三角波信号作为输入，同时用激光位移传感器实时采集GMA的输出位移，根据对应的输入、输出信号对GMA系统进行模型辨识实验。实验结果如图3、图4所示。

从实验结果可以得到，通过RELS算法建立的CARMA模型可以精确描述GMA的非线性特性，且基本不需要调整时间，经过计算其对正弦波作为输入的GMA实际输出位移实现辨识的均方误差为0.142 μm，辨识误差达0.23 %；对三角波作为输入的GMA实际输出位移实现辨识的均方误差为0.173 μm，辨识误差达0.29 %。

3 GMA精密位移驱动控制

在对GMA系统进行模型辨识后，为了实现基于GMA的精密闭环控制，本文对自适应控制中的改进的广义预测自校正控制[9—11]进行了研究。改进的广义预测算法是在广义预测算法的基础上发展起来的一种自适应控制算法，在实际的工程应用中，除了保留广义预测控制算法的多步预测模型、滚动优化和在线反馈校正等特征，还具有不受外界干扰稳定的限制、算法简单、计算量较小、较好的稳定性和鲁棒性等优点。而一些如最小方差自适应控制[12]的控制算法是单步预测，并不能实现平稳可靠的控制。

3.1 改进的广义预测控制算法

广义预测自适应控制（GPC）的控制过程如图7所示[11]，与最小方差自适应控制（MVSTR)类似，在每一个“目前采样时刻”，根据在线辨识并构建的CARMA模型预测被控对象在未来时刻的位移输出。不同的是，MVSTR是利用过去和当前的系统输入输出数据做出单步预测，而GPC是在此基础上引入了将来的控制输入序列信息进行多步预测，即对被控对象将来一段时间里的输出信号序列做出预测，如图5中的 $[y(k+1),\cdots,y(k+N)]$。

与MVSTR相比，GPC的优越性也体现在：控制目标被设定为在未来某一段时间内，系统输出位移序列可以成功跟踪预先设定的期望目标序列，即将两者的方差最小化，同时也使整个系统的输入控制信号的总能量最小，如下式

$$J=E\{(Y-Y_r)^{\mathrm{T}}(Y-Y_r)+\Delta U^{\mathrm{T}}\Gamma\Delta U\} \tag{6}$$

式中

$$\begin{aligned}Y&=[y(k+1),y(k+2),\cdots,y(k+N)]^{\mathrm{T}}\\ Y_r&=[y_r(k+1),y_r(k+2),\cdots,y_r(k+N)]^{\mathrm{T}}\\ \Delta U&=[\Delta u(k),\Delta u(k+1),\cdots,\Delta u(k+N_u-1)]^{\mathrm{T}}\\ \Gamma&=\mathrm{diag}(r_1,r_2,\cdots,r_{N_u})\end{aligned}$$

$y(k+j)$ 和 $y_r(k+j)$ 为被控对象在 $k+j$ 时刻的预测输出及期望位移；N 为系统的位移输出长度；N_u

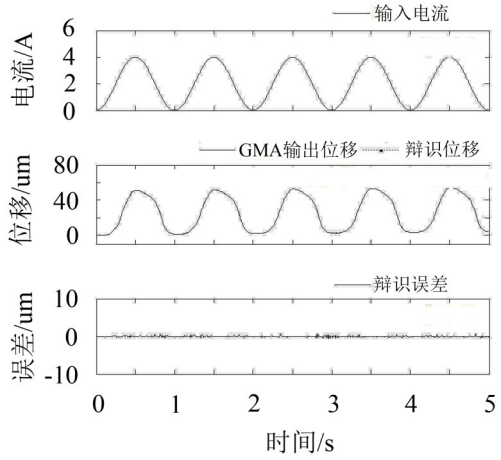


图3 基于CARMA模型的正弦输入辨识结果

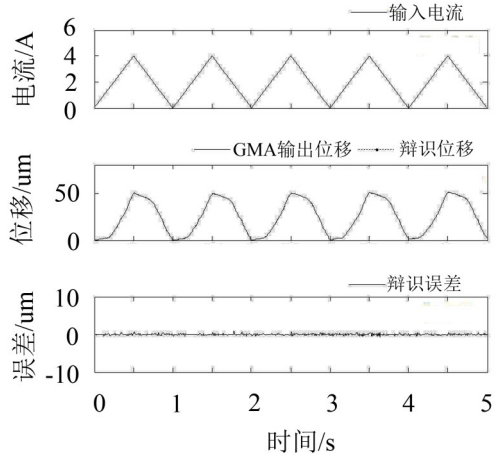


图4 基于CARMA模型的三角波输入辨识结果

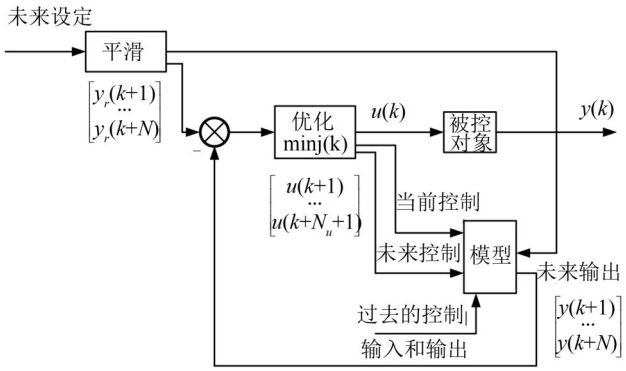


图 5　广义预测控制的控制框图

是系统的控制信号序列长度；$\Delta u(k+j)$ 为 $k+j$ 时刻的控制增量；r_j 为控制信号的加权系数。

这就使得闭环控制的优化不再是MVSTR中的对于单步性能指标求最优，而改为对系统某一段时域内的性能指标滚动求优。通过优化式的性能指标，可获得 $\{u(k+j)\}$ $(j=0,1,\cdots,N_u-1)$ N_u 个未来控制输入，但在当前时刻 k，仅对GMA系统输入当前时刻的控制作用 $u(k)$。这样，到下一个控制时刻，系统的性能指标随着时域的推移而发生更新，同时利用新的输入输出数据计算新的控制序列。

针对GPC算法计算量大、复杂，未考虑系统时滞，且在实际应用中受到随机扰动系数 R 稳定的限制等缺陷，金元郁等人采用矩阵元素建立被控对象的CARMA模型，提出一种改进的广义预测控制算法(MGPC) [11]。

根据改进后的广义预测控制律，可得当前时刻的控制量为

$$u(k)=u(k-1)+[1\quad 0\quad \cdots\quad 0](\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}+\boldsymbol{\Gamma})^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}(Y_r-Y_m)) \quad (7)$$

式中 Y_m 完全由系统过去的输入输出确定，$\boldsymbol{G}$ 为控制矩阵，d 为系统的延时。

3.2　GMA系统位移控制

GMA位移驱动系统控制原理如图6所示，首先通过递推增广最小二乘估计器在线辨识构建的CARMA模型参数 O,P,R，在线设计控制器求解控制矩阵 G，然后利用得到的辨识模型对未来某段时域内的输出序列做出预测，根据预测输出序列和系统给定的参考位移序列获取控制信号并通过电源输入GMA系统，最终获得满意的系统输出位移。

以频率为1 Hz，幅值为0～10 μm的正弦波作为期望位移进行控制实验，实验结果如图7、图8、图9所示。

图7为基于CARMA模型的MVSTR算法下，GMA系统的实际控制位移与期望位移对比、控制误差及相对应的控制电流。图8为基于CARMA模型的MGPC算法下系统的实验结果图。图9为相对应

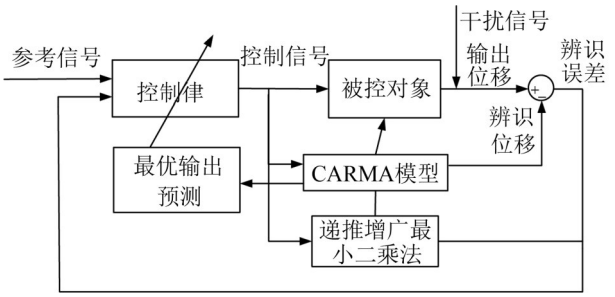


图 6　GMA位移驱动系统控制框图

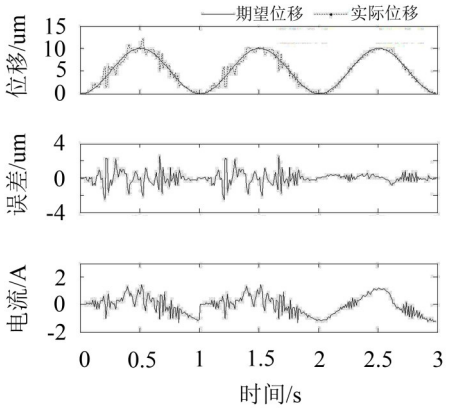


图 7　最小方差自适应控制结果

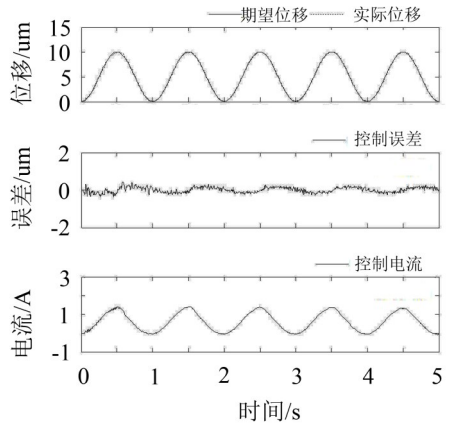


图 8　改进的广义预测自适应控制结果

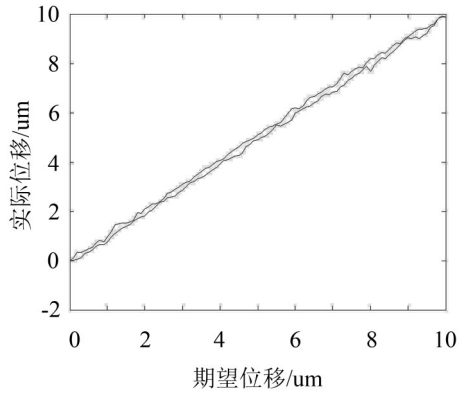


图 9　GMA系统的线性补偿控制输出

的系统线性补偿位移控制示意图。通过计算可知，图7中的控制最大误差为2.609 μm，均方误差为0.759 μm，误差行程比为7.59 %；图8中的最大误差

为0.446 μm，均方误差为0.143 μm，误差行程比为1.43 %。

比较图7和图8的实验结果可以得到，在一定时间后，两种算法均能实现对GMA系统的有效控制。但是MVSTR算法的调整时间长，控制信号波动大导致输出不平稳；而MGPC算法基本不需要调整时间且均方误差降低为前者的1/5。故本研究所引入的MGPC在对GMA系统的控制中具有更好的实时性和控制精度。分析其原因，一方面，不同于最小方差的模型单步预测，改进的广义预测控制算法具有多步预测和滚动优化的优势；另一方面，该控制算法通过对控制作用加权并在性能指标中最小化输入信号总能量，使得控制作用较为平稳。最终使得系统的输出在较短时间内，以很小的控制误差平稳地逼近参考位移。

4 GMA微振动控制实验

通过以上对GMA系统的非线性特性建模和精密位移驱动控制，被控系统的辨识误差和位移驱动精度分别达0.23 %和1.43 %，进而为GMA隔振系统的微振动控制研究提供了基础。应用所建立系统的在线辨识模型及自适应控制器，本文对图10中的质量块进行微振动控制实验研究。

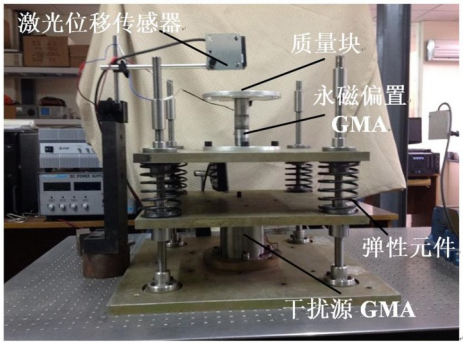


图10 GMA微振动控制实验布置

图中，主要包括分别作为干扰源和主动控制的GMA、Keyence激光位移传感器(LK-G30)、NF程控电源、弹性元件、质量块、控制计算机等。实际工作中，弹性元件作为被动隔振器，永磁偏置GMA作为主动隔振器，外界干扰被加载在下部干扰源GMA上，设控制器中的参考信号为零，即系统的输出位移不断跟踪零信号序列，通过自适应控制器在线设计输出永磁偏置GMA的控制信号使外界干扰得到有效抑制。

图11和图12分别为控制实验测试结果。在图11中，外界干扰为系统底部GMA产生的激振，通过加载电流信号使其输出幅值最大为20 μm，频率为1 Hz的正弦干扰信号；在图12中，外界干扰源为

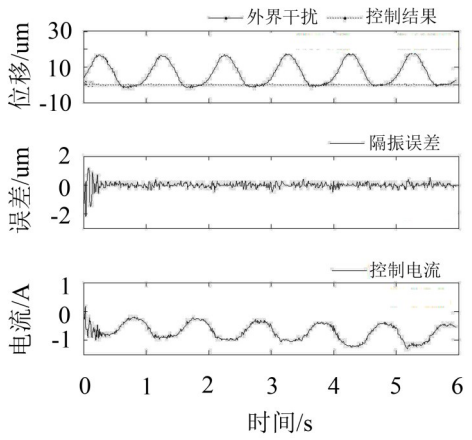


图11 GMA系统的正弦干扰控制实验结果

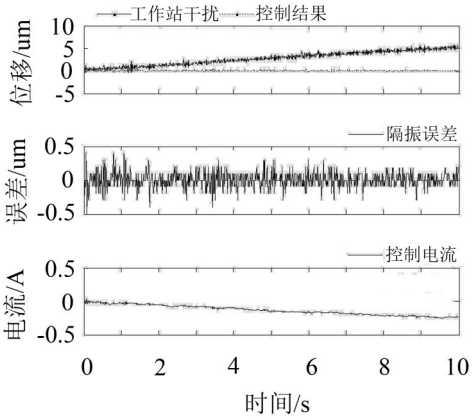


图12 GMA系统的随机干扰控制实验结果

实验室的某一计算机工作站所产生的振动噪声干扰，由于采集内存有限，本文只对一段时间内工作站引起的随机干扰信号进行了主动控制。其中，实线为在外界干扰下，无控制器时质量块的输出位移，虚线为在控制作用下质量块的输出位移。

从实验结果可知，无论是对于低频的确定性周期干扰信号还是对于频率幅值不断变化的随机性干扰信号，经过控制后，质量块的振幅抑制效果都高达90 %以上，即振动衰减达到20 dB。这一结果表明，本研究所采用的基于CARMA模型的MGPC方法是一种在线求最优或接近最优控制状态的算法，且其被用于磁致伸缩系统的振动抑制研究具有明显的控制效果及重要的工程应用价值。

5 结 语

（1）采用基于CARMA模型的递推增广最小二乘法对巨磁致伸缩驱动系统进行在线辨识研究，结果表明，该模型能够精确描述巨磁致伸缩驱动器的非线性特性，辨识误差低至0.23 %；

(2) 在模型辨识的基础上，引入改进了的广义预测自适应控制算法进行位移闭环控制实验。通过与最小方差自适应结果比较可知，该控制算法的控制

效果更优，其控制系统具有更好的实时性和更高的控制精度；

(3) 应用以上模型和自适应控制算法对GMA隔振系统进行微振动控制实验研究，实验结果表明，本研究的控制方法可实现对低频周期信号和随机扰动等干扰的振幅抑制效果达到90 %（20 dB）以上。该研究结果对精密工程以及航天振动控制领域具有实际的应用价值。

参考文献：

[1] 李松涛，孟凡斌，刘何燕，等. 超磁致伸缩材料及其应用研究[J]. **物理**，2004，33(10)：748-752.

[2] ZHOU H M，ZHENG X J，et al. Active vibration control of nonlinear giant magnetostrictive actuators[J]. **Smart Materials and Structures**，2006，15(3)：792-798.

[3] Chakrabarti S，Dapino M. A dynamic model for a displacement amplified magnetostrictive driver for active mounts[J]. **Smart Materials and Structures,** 2010, 19(5):1-8.

[4] 徐彭有. 超磁致伸缩驱动器精密位移驱动控制研究[D]. 上海：上海交通大学，2010.

[5] 杨斌堂，徐彭有，孟光，等. 大行程精密定位超磁致伸缩驱动器的设计与控制[J]. **机械工程学报**，2012，48(1)：26-31.

[6] 杨斌堂，赵寅，彭志科，等. 基于Prandtl-Ishlinskii模型的超磁致伸缩驱动器实时磁滞补偿控制研究[J]. **光学精密工程**，2013，21(1)：124-130.

[7] 赵寅，杨斌堂，彭志科，等. 超磁致伸缩驱动器自适应精密驱动控制研究[J]. **噪声与振动控制**，2013，33(6)：1-4.

[8] 王社良，纪庆波，代建波，等. 基于超磁致伸缩作动杆的结构振动主动控制研究[J]. **噪声与振动控制**，2010，30(006)：23-26.

[9] 庞中华，崔红. 系统辨识与自适应控制[M]. 北京：北京航天航空大学出版社，2009.

[10] 王伟. 广义预测控制理论及其应用[M]. 北京：科学出版社，1998.

[11] 金元郁，顾兴源. 改进的广义预测控制算法[J]. **信息与控制**，1990，19 (3)：8-14.

[12] ZHANG T, YANG B T, LI H G, et al. Dynamic modeling and adaptive vibration control study for giant magnetostrictive actuators[J]. **Sensors and Actuators, A: Physical,** 2013 190: 96-105.

(上接第5页)

参考文献：

[1] Elliott S J, Johnson M E. Radiation modes and the active control of sound power[J]. **J. Acoust. Soc. Am**., 1995, 94 (4): 2194-2204.

[2] Borgiotti G V. The power radiated by a vibrating body in an acoustic fluid and its determination from boundary measurements[J]. **J. Acoust. Soc. Am**., 1990, 88(4): 1884-1893.

[3] Chanpheng T, Yamada H, Miyata T, et al. Application of radiation modes to the problem of low- frequency noise from a highway bridge[J]. **Applied Acoustics**, 2004, 65: 109-123.

[4] Sarkissian A. Reconstruction of the surface acoustic field on radiating structures[J]. **J. Acoust. Soc. Am**., 1990, 90 (2): 825-830.

[5] Naghshineh K, Koopmann G H, Belegundu A D. Material tailoring of structures to achieve a minimum radiation condition[J]. **J. Acoust. Soc. Am**., 1992, 92(2): 841-855.

[6] 吴卫国. 简支板辐射噪声的结构优化控制与仿真[J]. **噪声与振动控制**，2009，29(5)：126-130.

[7] Berkhoff A P. Sensor scheme design for active structural acoustic control[J]. **J. Acoust. Soc. Am**., 2000, 108 (3): 1037-1035.

[8] Yamaguchi Z, Bolton J S, Sakagami K. Reduction of sound radiation by using force radiation modes[J]. **Applied Acoutics**, 2011, 72: 420-427.

[9] 姜哲. 声辐射问题中的模态分析：I理论[J]. **声学学报**，2004，29(4)：373-378.

[10] Peters H, Kessissoglou N. Enforcing reciprocity in numerical analysis of acoustic radiation modes and sound power evaluation[J]. **Journal of Computational Acoustics**, 2012, 20(3):5-33.

[11] 沈火明，张波，支伟. 基于非协调边界元法的声辐射模态分析[J]. **噪声与振动控制**，2011，31(6)：104-108.

[12] Williams E G. Sound radiation and nearfield acoustical holograph[M]. London: Academic Press, 2001. 267-271.

[13] Song L M. Koopmann G h, Fahnline J B. Active control of the acoustic radiation of a vibration structrure using a superposition formulation[J]. **J. Acoust. Soc. Am**., 1991, 89(6): 2786-2792.

[14] Cunefare K A, Currey M N, Johnson M E, et al. The radiation efficiency grouping of free- space acoustic radiation modes[J]. **J. Acoust. Soc. Am**., 2001, 109(1): 203-215.