文章编号:1004-2474(2019)01-0130-05

压电陶瓷作动器的率相关迟滞建模与内模控制

贾高欣,王贞艳

(太原科技大学 电子信息工程学院,山西 太原 030024)

摘 要:针对压电陶瓷作动器的率相关迟滞特性,建立了基于广义 Bouc-Wen 模型的 Hammerstein 率相关迟滞 非线性模型,分别以广义 Bouc-Wen 模型和自回归历遍模型来代表 Hammerstein 模型中的静态非线性部分和线性 动态部分,并辨识模型参数。在此基础上,得到 Hammerstein 模型的逆模型,通过构造其正、逆模型设计了内模控 制方案,最后在试验平台上对控制方案进行了验证。实验结果表明,对 100 Hz 以内期望信号的跟踪控制相对误差 均小于 9%,证明了所提出的模型和内模控制策略的有效性。

关键词:压电陶瓷作动器;率相关迟滞非线性;Hammerstein 模型;广义 Bouc-Wen 模型;内模控制 **中图分类号:**TP173;TN384 **文献标识码:**A **DOI**:10.11977/j. issn. 1004-2474. 2019. 01. 030

Modeling of Rate-dependent Hysteresis and Internal Model Control of Piezoelectric Ceramic Actuators

JIA Gaoxin, WANG Zhenyan

(school of Electronical and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Shanxi 030024, Chain)

Abstract: Aiming at the rate-dependent hysteresis characteristics of piezoelectric ceramic actuators, a Hammerstein rate-dependent hysteresis nonlinear model based on the generalized Bouc-Wen model is established. The generalized Bouc-Wen model and the autoregressive exogenous model are used to represent the static nonlinear part and the linear dynamic part in the Hammerstein model respectively, and the model parameters are identified. On this basis, the inverse model of Hammerstein model is obtained, and the internal model control scheme is designed by constructing its forward and inverse models. Finally, the control scheme is verified on the experimental platform. The experimental results show that the relative error of tracking control for the desired signal in the range of 100 Hz is less than 9%, which proves the effectiveness of the proposed model and internal model control strategy.

Key words: piezoelectric ceramic actuator; rate-dependent hysteresis; Hammerstein model; generalized Bouc-Wen model; internal model control

0 引言

压电陶瓷作动器具有能量密度大,响应速度快, 位移分辨率高等优点,在快速控制反射镜^[1],扫描隧 道显微镜,精密定位等方面得到了广泛的应用。然 而压电陶瓷作动器的率相关迟滞性直接降低了控制 系统的定位精度,甚至导致系统不稳定,严重影响了 压电陶瓷作动器在工程领域的应用。

传统迟滞非线性系统建模方法有 Preisach 模型^[2]、Prandtl-Ishlinskii (PI)模型^[3]等算子模型及 Jile-Atherton(JA)模型^[4]、Duhem 模型^[5]等物理模型,都是率无关的模型,不能够精确描述率相关的迟滞非线性。因此,国内外学者对率相关迟滞性的建模做了大量的研究:

1)通过对传统静态迟滞模型的改进得到可以 描述率相关性的 Preisach 模型^[6]、PI 模型^[7]、BoucWen 模型^[8]等。

2) 将系统的静态迟滞性与率相关性分别由不同的模型表达,如 Hammerstein 模型^[9]、三明治模型^[10]、Wiener 模型等。

在迟滞非线性控制方面,主要是采用逆补偿控制结合比例、积分、微分(PID)控制^[11]、滑模控制^[12]、鲁棒控制^[13]及智能控制^[14]的复合控制方法。 通过迟滞逆模型补偿系统的迟滞非线性,将系统近 似作为线性系统,再结合其他控制方法实现对系统 的精密跟踪控制。

本文提出了一种基于广义 Bouc-Wen 模型的 Hammerstein 率相关迟滞非线性模型,分别用广义 Bouc-Wen 模型和自回归历遍模型(ARX)来表示模 型的静态迟滞部分和线性动态部分。在所建模型的 基础上设计内模控制策略,实现对给定频率范围内

收稿日期:2018-01-13

基金项目:山西省青年科技研究基金资助项目(No. 201701D221108);山西省研究生教育改革基金资助项目(No. 2017JG77)

作者简介:贾高欣(1990-),女,河北石家庄人,硕士生,主要从事迟滞非线性系统的建模及控制方面的研究。通信作者:王贞艳(1981-), 女,山西运城人,副教授,主要从事非线性系统、先进控制、智能控制等方面的研究。

单频率和复合频率信号的跟踪控制。

1 压电陶瓷作动器的率相关迟滞模型

压电陶瓷材料具有率相关迟滞非线性(见图 1),即迟滞系统的输出不仅与现在的输入及其历史 状态有关,还与输入信号的频率有关。



1.1 Hammerstein 率相关迟滞模型

Hammerstein 模型是一种基于块连接的非线 性模型,由一个静态非线性模块后接一个线性动态 模块构成^[15]。对于压电陶瓷作动器,当输入信号频 率较低时,迟滞环曲线几乎不发生变化,可以近似认 为是率无关的,即静态迟滞系统,可以由静态迟滞模 型来表示。当输入信号频率较高时,压电陶瓷作动 器将表现出率相关性,用一个高阶微分方程表征。 为了描述压电陶瓷作动器的率相关迟滞非线性,本 文提出一种基于广义 Bouc-Wen 模型的 Hammerstein 率相关迟滞非线性模型。由广义 Bouc-Wen 模型来描述 Hammerstein 模型的静态非线性部分, 由 ARX 模型来描述线性动态部分,模型结构如图 2 所示。图中, $N(\cdot)$ 为模型的静态非线性部分, G(z) 为线性动态部分, u(t), y(t) 分别为系统的 输入与输出, x(t) 为不可测的中间变量。



图 2 压电陶瓷作动器的 Hammerstein 模型

1.2 广义 Bouc-Wen 模型

广义 Bouc-Wen 模型是由 Song 和 Kigureghian 提出的一种改进的模型以描述非对称的迟滞曲线, 属于静态迟滞模型。用以描述压电陶瓷作动器 Hammerstein模型静态迟滞部分的广义 Bouc-Wen 模型是由一个线性位移分量和一个迟滞位移分量组 成的,其表达式为

$$\begin{cases} x = du - z \\ \dot{z} = \dot{u} \{ \alpha - |z|^n \psi \} \\ \psi = \beta_1 \operatorname{sgn}(\dot{u}z) + \beta_2 \operatorname{sgn}(\dot{u}i) + \beta_3 \operatorname{sgn}(uz) + \\ \beta_4 \operatorname{sgn}(\dot{u}) + \beta_5 \operatorname{sgn}(z) + \beta_5 \operatorname{sgn}(u) \end{cases}$$
(1)

式中:x 为作动器的输出位移;z 和u 分别为z 和u 分别为z 和u 对时间的导数;z 为迟滞位移分量;u 为输入电压; α

为模型参数,控制迟滞环的大小;n为从弹性部分到 塑型部分过渡的平滑程度;d为位移输出与输入电 压的比例;β₁,…,β₆为固定参数;ψ为形状控制函 数,其在6个阶段的值均不相同,故在对非对称迟滞 环的形状控制上有足够的灵活性,可以更好地描述 系统的非对称迟滞性。但其属于静态模型,不能准 确地描述率相关迟滞非线性。

1.3 ARX 模型

本文用 ARX 模型来描述压电陶瓷作动器的线 性动态特性。

ARX 表达式为

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + \varepsilon(t)$$
(2)

其中

$$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}$$
(3)

$$B(z) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}$$
(4)

式中: $\varepsilon(t)$ 为误差项; z^{-1} 为单位延迟算子。

ARX 模型写为传递函数形式为

$$G(z) = \frac{B(z)}{A(z)} \tag{5}$$

2 模型的辨识与检验

2.1 模型辨识

基于广义 Bouc-Wen 的 Hammerstein 率相关 迟滞非线性模型参数辨识,需要两步来完成,即

1) 广义 Bouc-Wen 模型辨识。多次实验结果 表明,当输入电压频率小于1 Hz 时,作动器的迟滞 环曲线几乎不发生变化。所以,这里采用在1 Hz 信 号激励下的压电陶瓷作动器输入数据 u(t)、输出数 据 y(t),通过差分进化算法来辨识广义 Bouc-Wen 模型。定义性能指标为

$$RE = \sqrt{\sum_{i=1}^{L} (y_{exp}^{i} - y^{i})^{2} / \sum_{i=1}^{L} (y_{exp}^{i})^{2}}$$
(6)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{L} (y_{exp}^{i} - y^{i})^{2}/L}$$
(7)

式中:RMSE 和 RE 分别为作动器实际输出和模型 输出的均方根误差和相对误差;L 为数据长度; y_{exp}ⁱ 为第 i 个采样时刻作动器的实际输出; yⁱ 为第 i 个 采样时刻模型的输出。

基于差分进化算法得到广义 Bouc-Wen 模型参数为: $\alpha = 41$. 329 4 μ m/V, $\beta_1 = 33$ V⁻¹, $\beta_2 = -17.9593$ V⁻¹, $\beta_3 = -5.6427$ V⁻¹, $\beta_4 = -13.0791$ V⁻¹, $\beta_5 = 16.6311$ V⁻¹, $\beta_6 = -6.7072$ V⁻¹, n=1, $d=90.6133 \mu$ m/V, 建模的 RMSE 和 RE 分别为 0.4071 μ m 和 0.0145.

2) ARX 模型辨识。辨识得到广义 Bouc-Wen 模型后,采用 MATLAB 系统辨识工具箱中系统辨 识输入信号函数 idinput(•)生成包含 0~100 Hz 频率特性信息的正弦扫描信号 u(t) 来激励压电陶 瓷作动器,采集得到作动器输出 y(t)。由输入的 正弦扫描信号 u(t),基于辨识得到的广义 Bouc-Wen 模型,估计出中间变量 x(t),最后由 ARX 模 型的输入、输出数据 x(t),y(t)辨识出线性动态 部分。

$$G(z) = \frac{1.0653(z-0.9282)}{(z-0.9417)(z+0.3077)}$$
(8)

2.2 模型检验

为了验证所建 Hammerstein 模型的有效性,对 压电陶瓷作动器输入频率为1~100 Hz 的单一频率 和复合频率的正弦电压信号,测得压电陶瓷作动器 的输出数据,与相同输入下所建率相关 Hammerstein 模型的输出数据相比较,通过 RMSE 和 RE 来 检验模型的拟合程度。作动器实际输出与模型输出 迟滞曲线如图 3 所示,图中,10/30/50/70/90 Hz 和 10/20/…/100 Hz 均为复合频率。表 1 为不同频率 信号下的建模误差。



由图 3 和表 1 可知,所建 Hammerstein 模型可

以有效地描述1~100 Hz内的单一频率及复合频率 下的迟滞曲线。

3 控制器设计

关于压电陶瓷作动器控制器的设计,本文在所 建率相关 Hammerstein 模型的基础上,设计了内模 控制器。内模控制器是基于过程数学模型的新型控 制策略,结构简单,控制性能好,实验过程中所需调 节参数少,与 PID 控制器需要调节3个参数相比, 内模控制器只需调节1个滤波器参数,设计更简便, 更易于应用到工程实践中。

3.1 基于 Hammerstein 模型的内模控制器设计

得到 Hammerstein 模型后,首先求得其逆模型,再设计一个基于广义 Bouc-Wen 的 Hammerstein 模型的内模控制器,如图 4 所示。图中, $M(\cdot),Q(\cdot)$ 和 $F(\cdot)$ 分别为辨识模型、内模控制器和滤波器,r为参考输入信号,y为压电陶瓷作动器的输出。



图 4 基于 Hammerstein 模型的内模控制器原理图

3.2 Hammerstein 迟滞逆模型

基于广义 Bouc-Wen 的 Hammerstein 模型由 静态迟滞部分 $N(\cdot)$ 和线性动态部分 G(z)串联组 成(见图 4 中的 $M(\cdot)$),其逆模型也分别由 $N^{-1}(\cdot)$ 和 W(z)两部分串联组成。由 3.1 节辨识 出静态迟滞广义 Bouc-Wen 模型后,不需要额外的 计算便可得到其逆模型,这也是建立基于广义 Bouc-Wen 的 Hammerstein 模型来描述压电陶瓷作 动器率相关迟滞非线性的优势之一。下面分别来求 取两部分的逆模型。

由作动器的输出位移与输入电压的关系式(1), 即 x = du - z或写为 $u = \frac{1}{d}(x+z)$,根据图5静态 迟滞部分的迟滞补偿原理,参考输入信号 x_r 经过中 间环节 $N^{-1}(\cdot)$ 及 $N(\cdot)$ 后,理论上 $x = x_r$ 。所以求 得广义 Bouc-Wen 模型的解析逆模型表达式为 $u = \frac{1}{d}(x_r+z)$,其静态迟滞补偿 $N^{-1}(\cdot)$ 结构图如图 6 所示。图中, x_r 为参考输入位移。





对于线性 ARX 模型部分 G(z)的逆模型 W(z) 可直接获得,即

$$G(z) = \frac{0.9387(z-0.9417)(z+0.3077)}{z(z-0.9282)}$$
(9)

W(z)比G⁻¹(z)滞后1/z,但因为采样频率为10kHz,所以W(z)和G⁻¹(z)非常接近。

3.3 滤波器设计

模型存在误差时,有可能导致闭环系统不稳定, 为了使系统具有足够的鲁棒性,在反馈通道中加入 滤波器 F(•),通过调整滤波器的结构和参数来稳 定系统,并有效地抑制输出振荡,获得预期的动态特 性和鲁棒性^[16]。

实际控制中,滤波器的选择为

$$F(z^{-1}) = \frac{1 - \alpha_{\rm F}}{(1 - \alpha_{\rm F} z^{-1})^{N}}$$
(9)

式中 $\alpha_{\rm F}$ (0 < $\alpha_{\rm F}$ < 1)和 N 分别为滤波器系数和 阶数。

4 实时跟踪控制实验

4.1 实验系统构建

压电陶瓷作动器的数据采集实验及跟踪控制实 验设备如图 7 所示。实验采样频率为 10 kHz。实 验设备包括:压电陶瓷作动器、功率放大器、电涡流 传感器(分辨率为 8 mV/μm)、控制系统 dSPACE DS1103。信号由 Simulink 仿真图下载到 dSPACE 系统中,经过 D/A 转换后作用于功率放大器,进而 驱动压电陶瓷作动器,电涡流传感器将采集到的作 动器输出位移由 A/D 转换后再反馈到 dSPACE 系 统中。





4.2 跟踪控制实验结果

基于第 3 节设计的内模控制器,选择滤波器 $F(\cdot)$ 的 N=1,在线整定得到 $\alpha_{\rm F}=0.03$ 。实时跟踪 幅值为 20 μm,1~100 Hz 内的单频率信号和复合 频率信号。图 8 为不同单频率及复合频率(10/30/ 50/70/90 Hz 和 10/20/…/100 Hz)时的参考输入 和作动器的实际输出曲线。表 2 为参考输入与作动 器实际输出之间的 RMSE 和 RE。



图 8 单一频率及复合频率跟踪控制曲线

表 2 跟踪控制误差		
频率/Hz	$RMSE/\mu m$	RE
10	0.682 0	0.027 8
30	1.446 4	0.059 6
60	1.985 0	0.080 9
80	2.087 1	0.085 2
10/30/50/70/90	1.466 0	0.067 3
10/20//100	1.035 4	0.049 7

由图 8 及表 2 可知,在提出的内模控制策略下, 压电陶瓷作动器不仅可以很好地跟踪 1~100 Hz内的单频率信号,对复合频率信号也能实现良好的跟踪。

5 结束语

针对压电陶瓷作动器的率相关迟滞特性,本文 提出了基于广义 Bouc-Wen 的 Hammerstein 模型, 由广义 Bouc-Wen 模型表示静态迟滞部分,ARX 模 型表示线性动态部分。对 $1\sim100$ Hz 内的单一频率 信号及复合频率信号均具有良好的泛化能力。在所 建 Hammerstein 模型的基础上,设计了内模控制策 略。不仅设计简单,控制参数少,且跟踪性能好,鲁 棒性强。对幅值为 20 μ m, $1\sim100$ Hz 内的单频率 信号和复合频率信号,均能实现良好的跟踪控制效 果,具有工程应用价值。

参考文献:

- [1] 于志亮,王岩,曹开锐,等. 压电陶瓷执行器迟滞补偿及 复合控制[J].光学精密工程,2017,25(8):2113-2120.
 YU Zhiliang, WANG Yan, CAO Kairui, et al. Hysteresis compensation and composite control for piezoelectric actuator[J]. Opt Precision Eng,2017,25(8):2113-2120.
- [2] LI Zhi, ZHANG Xiuyu, SU Chunyi, et al. Nonlinear control of systems preceded by Preisach hysteresis description: a prescribed adaptive control approach[J].
 IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(2):451-460.
- [3] 翟鹏,肖博涵,贺凯,等. 超磁致伸缩致动器的复合反馈 控制及其在变椭圆销孔精密加工中的应用[J]. 光学精 密工程,2016,24(6):1389-1398.
 ZHAI Peng, XIAO Bohan, HE Kai, et al. Composite backward control for GMA and its application in high precision machining of variable ellipse pinhole[J]. Opt Precision Eng,2016,24(6):1389-1398.
- [4] RONG Ce, HE Zhongbo, LI Dongwei, et al. Online parameter identification of giant magnetostrictive actuator based on dynamic Jiles-Atherton model [J]. Rsc Advances, 2016, 6:113-115.
- LIN C,LIN P. Tracking control of a biaxial pieo-actuated positioning stageusing generalized Duhem model
 [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 64(5):766-787.

- [6] FENG Ying, KUMKONGKAEW W, DU Juan, et al. Hysteresis modeling for IPMC actuators with rate-dependent Preisach model[C]//S. l. : Intelligent Control and Automation. IEEE, 2015:1549-1554.
- [7] LIU Zichao, PAN Wei, LU Changhou. A new rate-dependent Prandtl-Ishlinskii model for piezoelectric actuators[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 651/ 653:598-602.
- [8] LI Wei, CHEN Xuedong, LI Zilong. Inverse compensation for hysteresis in piezoelectric actuator using an asymmetric rate-dependent model[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(11):115003.
- [9] 范家华,马磊,周攀,等.基于径向基神经网络的压电作 动器建模与控[J].控制理论与应用,2016,33(7): 856-862.

FAN Jiahua, MA Lei, ZHOU Pan, et al. Modeling and control of piezoelectric actuator based on radial basis function neural network[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(7): 856-862.

 [10] 谢扬球,谭永红. 压电陶瓷执行器的非光滑三明治模型 辨识与内模控制[J]. 控制理论与应用,2013,30(5): 567-576.
 XIE Yangqiu, TAN Yonghong, Identification and con-

Trol piezoceramic actuator using nonsmooth sandwich model[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30 (5):567-576.

- [11] 刘长利,胡守柱,郭海林,等. 叠堆式压电陶瓷驱动器的 复合控制[J]. 光学精密工程,2016,24(9):2248-2254.
 LIU Changli, HU SHouzhu, GUO Hailin, et al. Feedforward control of stack piezoelectric actuator[J]. Opt Precision Eng,2016,24(9):2248-2254.
- [12] GAN M, ZHI Q, LI Yanlong. Sliding mode control with perturbation estimation and hysteresis compensator based on Bouc-Wen model in tackling fast-varying sinusoidal position control of a piezoelectric actuator [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2016, 29(2):367-381.
- [13] 郭咏新,张臻,毛剑琴,等. 超磁致伸缩作动器的率相关 Hammerstein 模型与 H∞鲁棒跟踪控制[J]. 自动化学 报, 2014, 40(2):197-207. GUO Y X,ZHANG Z,MAO J Q,et al. Rate-dependent Hammerstein model and H∞ robust tracking control of giant magnetostrictive actuators[J]. Acta Automatica Sinica,2014,40(2):197-207.
- [14] 孟爱华,刘成龙,陈文艺,等. 超磁致伸缩致动器的小脑 神经网络前馈逆补偿-模糊 PID 控制[J]. 光学精密工 程, 2015, 23(3):753-759.
 MENG Aihua, LIU Chenglong, CHEN Wenyi, et al. CMAC feedforward inverse compensation-fuzzy PID control for giant magnetostrictive actuator[J]. Opt Precision Eng, 2015, 23(3):753-759.
- [15] 朱豫才. 过程控制的多变量系统辨识[M]. 长沙:国防 科技大学出版社,2005.
- [16] 赵志诚,文新宇.内模控制及其应用[M].北京:电子工 业出版社,2012.