

压电作动器的动态迟滞建模与 H_∞ 鲁棒控制

王贞艳^{1,2†}, 张臻¹, 周克敏^{3,4}, 毛剑琴¹

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 2. 太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024;
3. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 4. 路易斯安那州立大学 电气工程与计算机科学系, 巴吞鲁日 70803, 美国)

摘要: 压电作动器具有率相关动态迟滞非线性特性, 给传统建模和控制技术提出了挑战. 本文针对压电作动器, 提出了一种基于Bouc-Wen的Hammerstein率相关迟滞非线性模型, 其中Bouc-Wen模型和线性动态模块分别用于描述系统的静态迟滞非线性特性和率相关特性. 同时, 构造了一个基于Bouc-Wen模型的迟滞补偿器, 将迟滞补偿器与被控对象串联使系统线性化; 并建立了不确定性系统模型, 提出了一种 H_∞ 鲁棒跟踪控制方案, 可以实现给定频率范围内单频率和复合频率参考信号的良好跟踪. 实验结果表明, 所建动态模型具有良好的泛化能力, 跟踪控制相对误差小于8%, 证明了所提出方法的有效性.

关键词: 压电作动器; 迟滞非线性; 建模; Bouc-Wen模型; 鲁棒控制
中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

Dynamic hysteresis modeling and H-infinity robust control of piezoelectric actuators

WANG Zhen-yan^{1,2†}, ZHANG Zhen¹, ZHOU Ke-min^{3,4}, MAO Jian-qin¹

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. School of Electronical and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China;
3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;
4. School of Electrical Engineering and Computer Science, Louisiana State University, Baton Rouge 70803, USA)

Abstract: Piezoelectric actuators (PEAs) have rate-dependent hysteretic nonlinearities, which pose challenges to the traditional modeling and control techniques. A Hammerstein-based rate-dependent hysteresis model with a Bouc-Wen nonlinearity is proposed in this paper for the piezoelectric actuators. The Bouc-Wen model and a linear dynamic block are used to describe the static hysteresis nonlinearity and rate-dependent properties, respectively. Further, a hysteretic compensator based on the Bouc-Wen model is constructed and connected in cascade with the plant to linearize the system. Next, an uncertainty system model is built and a H-infinity robust control scheme is proposed to track the reference signals with either single frequencies or compound frequencies in the given frequency range. Experimental results show that the dynamic model proposed has good generalization ability and the encouraging tracking performances have been achieved with the relative error less than 8%.

Key words: piezoelectric actuator; hysteresis nonlinearity; modeling; Bouc-Wen model; robust control

1 引言(Introduction)

压电作动器(piezoelectric actuators, PEA)因具有控制精度高、响应速度快、功耗低、输出力大等优点, 而广泛应用于精密定位、微机械操作以及振动主动控制等各种场合. 但是, 压电作动器存在着明显的不足, 在电场作用下将产生迟滞非线性^[1], 并且这种迟滞非线性是具有多值映射性、记忆性以及率相关特性的, 严重影响了控制精度. 因此, 如何减少压电作动器所固有的迟滞特性带来的非线性影响, 保证它在微位移跟踪控制中的精度具有重要科学意义和实用价值.

为了消除迟滞特性的影响, 提高压电作动器的定位精度, 国内外学者进行了大量研究, 提出了很多迟滞模型和控制方案. 压电作动器的迟滞非线性模型有 Maxwell 滑动模型^[2]、Duhem 模型^[3]、Preisach 模型^[4]、Prandtl-Ishlinskii模型^[5-6]、支持向量机模型^[7]等. 目前迟滞补偿策略主要分为两类. 一类是电荷控制: 基于压电作动器的输出位移同作用在其上的电荷呈线性关系的特性, 用电荷控制压电作动器的微位移, 从而消除迟滞^[8]. 但是该方法在实现时会受到很多限制, 它会带来漂移和饱和问题, 降低作动器的有效控

收稿日期: 2013-01-16; 录用日期: 2013-06-26.

†通信作者. E-mail: w9851@126.com; Tel: +86 10-82317943.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(91016006, 91116002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30420111109, 30420120305, SWJTU11ZT06); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题资助项目(LAPS13019).

制范围^[9]. 另一类是基于逆补偿的控制: 建立迟滞非线性系统的逆模型, 逆模型作为前馈补偿器进行开环控制, 实现线性化控制^[6, 12-15]; 或者把逆模型用做闭环控制系统中的前馈控制, 在生成跟踪误差之前预测得到期望的控制信号. 这是一种具有前馈补偿的闭环跟踪控制策略^[7, 16], 前馈控制主要用于定位跟踪, 反馈控制用于补偿建模误差和外部扰动. 因此, 这类方法对高频信号也能实现很好跟踪. 本文提出了一种基于Bouc-Wen的Hammerstein率相关迟滞非线性模型, 同时设计了Bouc-Wen迟滞补偿器, 提出一种 H_∞ 鲁棒跟踪控制方案, 可以保证给定频率范围内对单频率和复合频率参考信号的精密跟踪.

2 压电作动器的率相关迟滞模型(Rate-dependent hysteresis model of PEA)

率无关迟滞系统, 又称静态迟滞系统, 是指系统的输出信号只与系统现在的输入以及输入信号的历史状态有关, 而与现在及过去输入信号的变化率无关. 而率相关迟滞意味着系统的输出信号不仅与现在的输入和输入信号的历史状态有关, 还与现在的输入信号变化速率以及输入信号变化速率的历史有关^[17].

2.1 Bouc-Wen模型(Bouc-Wen model)

Bouc-Wen模型是一种典型的半物理迟滞模型^[18-19], 最初是由Bouc在1967年提出来的, 后来在1976年经过学者Wen推广改进了该模型, 故定义为Bouc-Wen模型. Bouc-Wen模型可用一阶非线性微分描述如下:

$$\dot{z} = \alpha \dot{V} - \beta |\dot{V}| z |z|^{(n-1)} - \gamma \dot{V} |z|^n, \quad (1)$$

其中: z 代表迟滞非线性项, \dot{z} 是 z 关于 t 的微分, V 是输入信号. α 控制迟滞环幅值, β 和 λ 控制迟滞环的形状, n 控制从弹性段到塑性段的光滑度. 通过合理选择参数, Bouc-Wen模型可以模拟不同类型、不同性能的非线性迟滞特性.

针对实际物理系统, Bouc-Wen迟滞模型可以由一个线性项和一个迟滞非线性项组成. 不失一般性, 可以令 $n = 1$, 则系统可以描述为^[20-21]

$$\begin{cases} \dot{x} = dV - z, \\ \dot{z} = \alpha \dot{V} - \beta |\dot{V}| z - \gamma \dot{V} |z|, \end{cases} \quad (2)$$

其中: V 是输入电压, x 是作动器输出位移, d 为作动器因子. Bouc-Wen模型作为一种参数化模型, 本身模型简单, 可以用相对少的参数描述很多不同类型的迟滞环, 因此受到了很多学者的关注^[22-24]. 但它对具有率相关特性的迟滞系统无能为力^[21], 仅可用于静态迟滞建模.

2.2 Hammerstein率相关迟滞模型(Hammerstein-based rate-dependent hysteresis model)

传统Hammerstein模型是一种块连接的非线性模型, 它是由一个静态非线性函数模块串联一个线性动

态模块构成, 且静态非线性环节通常采用多项式描述, 也可采用神经网络^[25]、线性样条函数^[26]、最小二乘支持向量机^[27]等结构描述.

为了描述具有率相关迟滞非线性特性的压电作动器, 本文提出一种基于Bouc-Wen的Hammerstein率相关迟滞非线性模型, 结构如图1所示. 输入 V 经过迟滞非线性环节得到中间变量 x , 并将该信号传递给一个动态线性模块 $G(z)$. 用Bouc-Wen描述系统的静态迟滞非线性特性, 动态线性环节描述系统的率相关特性. x 既是线性环节的输入又是非线性环节的输出, 实际过程中是不可测量的. ξ 是噪声. 且 $G(z)$ 可以用自回归结构描述为

$$A(z^{-1})y_k = B(z^{-1})x_k + \xi_k, \quad (3)$$

其中: z^{-1} 为滞后算子, $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$, $B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}$.

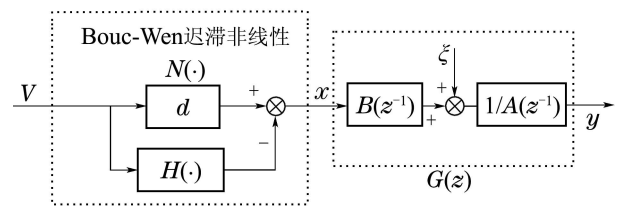


图1 Hammerstein率相关迟滞模型

Fig. 1 A Hammerstein-based rate-dependent hysteresis model

2.3 参数辨识(Parameter identification)

实验表明, 压电作动器工作在低频段时迟滞环几乎没有变化, 即在低频段压电作动器可以近似为静态迟滞系统. 因此根据低频段的输入/输出实验数据, 即可辨识得到Bouc-Wen静态迟滞模型参数 α , β , γ 和 d . 当静态迟滞模型确定后, 可以估计得到中间变量 x , 用含有丰富频率特性信息的输入/输出数据对动态线性部分进行参数辨识. 因此, 基于Bouc-Wen的Hammerstein率相关迟滞非线性模型的参数辨识可以分为两步进行:

首先, 基于压电作动器低频近似静态迟滞的特性, 通过微粒群优化(particle swarm optimization, PSO)算法辨识得到Bouc-Wen模型参数, 实现对系统静态迟滞非线性环节的建模.

PSO算法作为一种进化计算技术, 采用速度-位置搜索模型, 将每个个体看作搜索空间中无质量无体积的微粒, 而每个微粒代表解空间的一个候选解, 在搜索空间中以一定的速度飞行. 设微粒群体规模为 N , 搜索空间的维数为 D , 则微粒 i ($i = 1 \sim N$)在 D 维空间中的位置 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD})$, 速度 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})$ 和经历过的最优位置 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}, \dots, p_{iD})$. 其中微粒 i 的速度定义为每次迭代中微粒移动的距离, 因此, 微粒 i 在第 d ($d = 1 \sim D$)维子空间中的飞行速度 v_{id} 以

及自身的位置调整规则为

$$\begin{cases} v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}(t)) + \\ \quad c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}(t)), \\ x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1), \end{cases} \quad (4)$$

其中: ω 为惯性权重, c_1 和 c_2 为加速常数, r_1 和 r_2 均为在 $[0, 1]$ 范围内变化的随机函数, p_{id} 为当前微粒的历史最优位置, p_{gd} 为整个微粒群的历史最优位置. 定义性能指标

$$RE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (X_{\text{exp}}^i - X_{\text{BW}}^i)^2}{\sum_{i=1}^L (X_{\text{exp}}^i)^2}}, \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (X_{\text{exp}}^i - X_{\text{BW}}^i)^2}{L}}, \quad (6)$$

其中: RE和RMSE分别是作动器实际输出和模型输出的相对误差和均方根误差, L 是数据的长度, X_{exp}^i 是第 i 个采样时刻的实验数据, X_{BW}^i 是第 i 个采样时刻基于Bouc-Wen模型的估计输出. 因此, Bouc-Wen模型的参数优化问题转化为最小化性能指标(5)或(6), 使得式(2)成立.

其次, 基于所建的Bouc-Wen模型, 根据系统在给定频率范围的具有丰富频率信息的输入/输出实验数据, 辨识得到动态线性模型的参数, 实现系统在给定频率范围内的率相关迟滞非线性建模.

引入参数向量

$$\begin{aligned} \theta &= (a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m)^T, \\ \varphi_k &= (-y_{k-1}, \dots, -y_{k-n}, x_k, x_{k-1}, \dots, \\ &\quad x_{k-m})^T, \end{aligned}$$

则原系统(3)可以描述为

$$y_k = \varphi_k^T \theta + \xi_k. \quad (7)$$

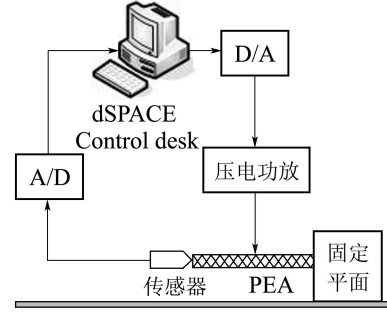
定义极小化准则函数

$$J_\theta = \sum_{k=1}^M [y_k - \varphi_k^T \theta]^2, \quad (8)$$

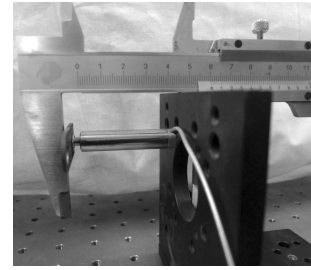
则线性动态模块辨识的目的就是在给定输入/输出的情况下估计参数向量 θ , 使 J_θ 最小.

2.4 模型检验(Model validation)

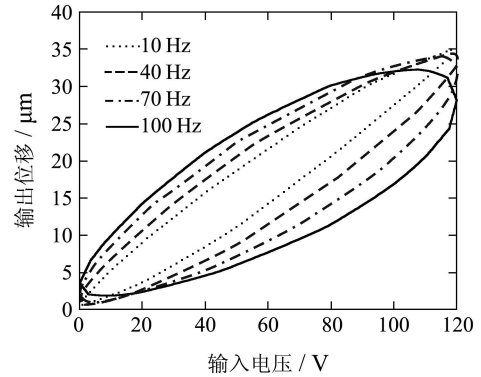
为了验证所提出Hammerstein率相关迟滞模型的有效性, 对一个压电作动器在 $1 \sim 100$ Hz内的动态特性进行了率相关建模. 压电作动器数据采集系统结构原理如图2(a)所示. 输入电压经D/A变换后作用于功率放大器, 进而激励如图2(b)所示直径为10 mm的压电作动器, 采用电涡流传感器($8 \text{ mV}/\mu\text{m}$)测得其输出位移, 并通过A/D变换后在dSPACE中保存数据. 实验采样频率为10 kHz. 图2(c)是该压电作动器在不同频率下的迟滞环曲线, 可以看出, 它具有率相关性迟滞特性.



(a) 实验原理图



(b) 压电作动器



(c) 迟滞曲线

图2 压电作动器实验数据采集系统

Fig. 2 The experimental data acquisition system of a PEA

多次实验表明, 输入电压频率小于1 Hz时压电作动器迟滞环几乎没有变化, 可以近似认为是静态的. 这里采用1 Hz信号激励作动器所测输入/输出数据进行Bouc-Wen迟滞建模. 基于PSO优化得到Bouc-Wen模型参数

$$\begin{aligned} \alpha &= 37.37317 \mu\text{m}/\text{V}, \quad \beta = 5.1044 \text{ V}^{-1}, \\ \gamma &= 4.9110 \text{ V}^{-1}, \quad d = 64.2772 \mu\text{m}/\text{V}, \end{aligned}$$

且建模的相对误差为0.0211.

根据辨识得到的Bouc-Wen模型, 用 $0 \sim 100$ Hz正弦扫描信号激励压电作动器采集得到的输入/输出数据进行动态线性模块的参数辨识. 采用最小二乘(ARX)方法辨识得到Hammerstein线性动态模型为

$$G(z) = \frac{1.014(z + 0.5377)}{(z + 0.8115)(z - 0.1021)}. \quad (9)$$

最后, 采用建模得到的Hammerstein率相关迟滞模型

分别对20 Hz和80 Hz激励下的迟滞环进行模型验证, 模型检验曲线见图3, 该模型具有良好的泛化能力.

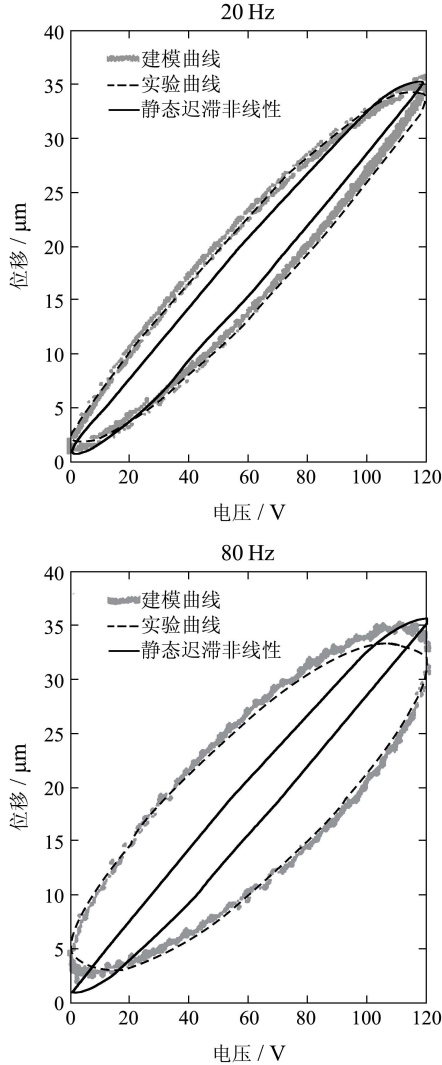


图3 模型检验
Fig. 3 Model validation

3 H_∞鲁棒跟踪控制(H_∞ robust tracking control)

3.1 迟滞补偿器(Hysteresis compensator)

迟滞非线性具有多值映射性和记忆性, 不同于一般的非线性系统. 为了消除作动器中的静态迟滞, 实现精密控制, 有必要引入一个迟滞补偿器.

根据压电作动器位移 x 与电压 V 的关系(2), 即

$$x = dV - H(\cdot), \quad (10)$$

其中: $H(\cdot) = H(V, \hat{z})$, \hat{z} 是基于辨识模型参数 α, β 和 γ 的迟滞估计. 因此, 根据上式可知

$$V = \frac{1}{d}(r_x + H(\cdot)), \quad (11)$$

其中 r_x 表示期望位移.

为了补偿压电作动器中的静态迟滞非线性, 所设计的Bouc-Wen迟滞补偿结构如图4所示. 由图4可见, 一旦辨识得到系统的Bouc-Wen正模型, 即可确定迟滞补偿器的参数. 因此, 本文所提出的Bouc-Wen迟滞

补偿器设计简单, 且不需要额外的计算量.

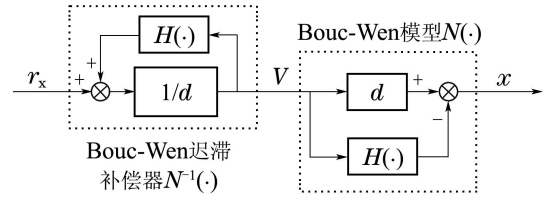


图4 迟滞补偿结构

Fig. 4 The hysteresis compensation structure

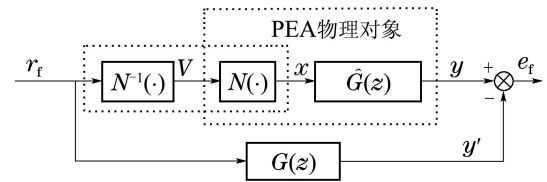
3.2 不确定性系统模型(Uncertainty system model)

基于Hammerstein模型结构建立压电作动器的率相关迟滞非线性模型, 用Bouc-Wen模型描述作动器的静态迟滞非线性, 用辨识的传递函数 $G(z)$ 描述动态线性环节, 表征系统的率相关特性. 假设所构造的迟滞补偿器可以完全补偿压电作动器的静态迟滞非线性, 由于参数摄动、传感器灵敏度以及作动器系统误差等的影响, 辨识得到的传递函数 $G(z)$ 不可能完全描述真实的动态线性环节, 存在线性不确定性. 因此, 动态线性系统的加性不确定性模型可以描述为^[28-29]

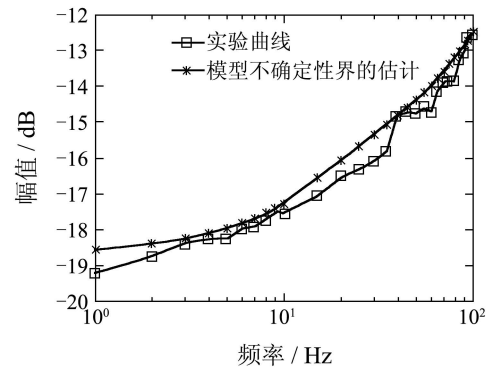
$$\hat{G}(z) = G(z) + \Delta_m(z)W_m(z), \quad (12)$$

其中: $\hat{G}(z)$ 表示压电作动器真实的动态线性环节, 加性摄动 $\Delta_m(z)$ 是规范化不确定性, 且 $\|\Delta_m(z)\|_\infty \leq 1$, $W_m(z)$ 为不确定性加权函数.

基于第3.1节提出的迟滞补偿策略, 通过实验确定 $G(z)$ 在不同频率下的最大相对误差, 系统工作原理如图5(a)所示. 在1 ~ 100 Hz的频率范围内选择多个频率, 经过多次实验可测得 $G(z)$ 在给定频率范围内的加性不确定性界如图5(b)所示.



(a) 实验原理图



(b) $G(z)$ 的加性不确定性界

图5 模型不确定性界

Fig. 5 Model uncertainty bound

通过估计可以得到 $G(z)$ 的一个3阶不确定性上界

$$W_m(z) = \frac{0.420z^3 - 1.234z^2 + 1.208z - 0.394}{z^3 - 2.86z^2 + 2.72z - 0.862}$$

3.3 鲁棒控制器设计(Robust controller design)

为了实现高精度的跟踪控制, 本文提出一种基于Bouc-Wen迟滞补偿器的H_∞鲁棒跟踪控制方案. 考虑到实际存在的建模误差和外部扰动, 前馈控制用于实现系统对参考输入的精密跟踪, 反馈控制则用于保

证系统的稳定性和增强系统的干扰抑制性能. 基于所提出的Hammerstein率相关迟滞模型, 通过Bouc-Wen迟滞补偿器进行迟滞线性化, 压电率相关迟滞非线性系统的控制就转化为对线性系统 $G(z)$ 的控制问题. H_∞鲁棒跟踪控制系统框图如图6所示. 图6中: r 为参考输入, y 为压电作动器的输出, $G(z)$ 为建模得到的线性系统, $W_m(z)$ 为实验确定的模型加性不确定性界, $K(z)$ 为鲁棒反馈控制器, $W(z)$ 为前馈控制器, u 为控制器输出.

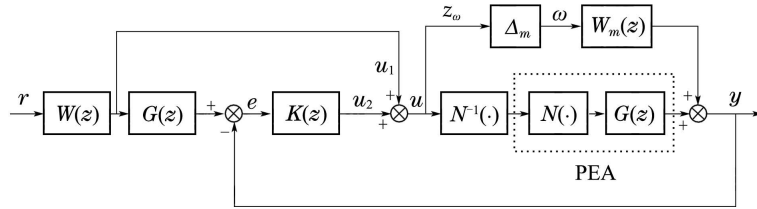


图 6 H_∞鲁棒跟踪控制系统框图

Fig. 6 Diagram of the H_∞ robust tracking control system

压电作动器的率相关跟踪控制可以转化为标准H_∞控制问题, 基本框图如图7所示. 其中输入和输出分别为 $w = [\omega \ r]^T$, $z = [z_\omega \ e]^T$, P 和 K 分别为广义被控对象和控制器, 且广义被控对象 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 0 & W & 1 \\ -W_m & 0 & -G \\ -W_m & 0 & -G \end{bmatrix}. \quad (13)$$

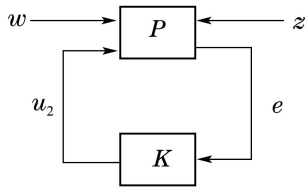


图 7 标准H_∞控制问题框图

Fig. 7 The block diagram of the standard H_∞ control

为保证系统的鲁棒稳定性, 并抑制 ω 对输出 y 的影响, 要解决的跟踪问题转化为设计输出反馈控制器 K , 使闭环系统稳定, 且最小化 P_{zw} 的H_∞范数, 即

$$\min_{K \text{ 镇定 } P} \|P_{zw}\|_{\infty}. \quad (14)$$

当控制器 $W(z) = G^{-1}(z)$, 可以实现系统的精确跟踪, 然而, 若 $G(z)$ 是严格真的, 显然无法这样直接求解 $W(z)$. 因此, 对于式(9)辨识得到的线性系统 $G(z)$, $W(z)$ 可以近似为

$$W(z) = \frac{(z + 0.8115)(z - 0.1021)}{1.014z(z + 0.5377)}. \quad (15)$$

基于辨识和实验得到的 $G(z)$ 和 $W_m(z)$, 根据H_∞标准控制解法, 直接采用离散系统的H_∞鲁棒控制器

求解方法, 并利用MATLAB中bstmr()函数进行模型降阶, 得到一个4阶控制器

$$K(z) = \frac{-0.0061(z - 0.922)(z + 0.8041)}{(z - 0.9547)(z - 0.8975)} \times \frac{z^2 + 0.307z + 0.9575}{z^2 + 1.145z + 0.3425}. \quad (16)$$

4 跟踪控制实验(Tracking control experiment)

根据设计的H_∞鲁棒控制器, 构建跟踪控制实验系统如图8所示. 控制信号被下载到dSPACE控制卡中, 并作用于压电作动器; 用电涡流传感器检测作动器位移输出.

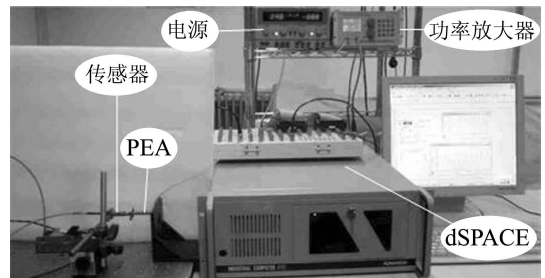


图 8 跟踪控制实验系统

Fig. 8 Experimental system of tracking control

为了保证控制信号不超出压电作动器的额定电压范围, 本文设参考位移的轨迹为 $r(t) = 5 + 17[q - \cos(2\pi f_1 t) - \dots - \cos(2\pi f_q t)] \mu\text{m}$, 其中: q 表示复合频率的个数, $q=1$ 表示参考输入是单频率信号. 1 ~ 100 Hz内部分单频率和复合频率信号的实验跟踪性能如表1所示. 图9给出了单频率1 Hz, 30 Hz, 60 Hz, 90 Hz以及两组复合频率(5, 25, 55, 75, 95) Hz和(20, 40, 60, 80, 100) Hz下的跟踪控制实验曲线.

可以看出,本文提出的跟踪控制方案不仅能很好的跟踪单频率信号,而且对复合频率参考信号也能实现良好的跟踪.在给定的频率范围内,基于所提出

的Hammerstein率相关迟滞模型设计的 H_∞ 鲁棒控制方案,实际输出能有效跟踪参考输入信号,相对误差均小于8%,能满足实际工程要求.

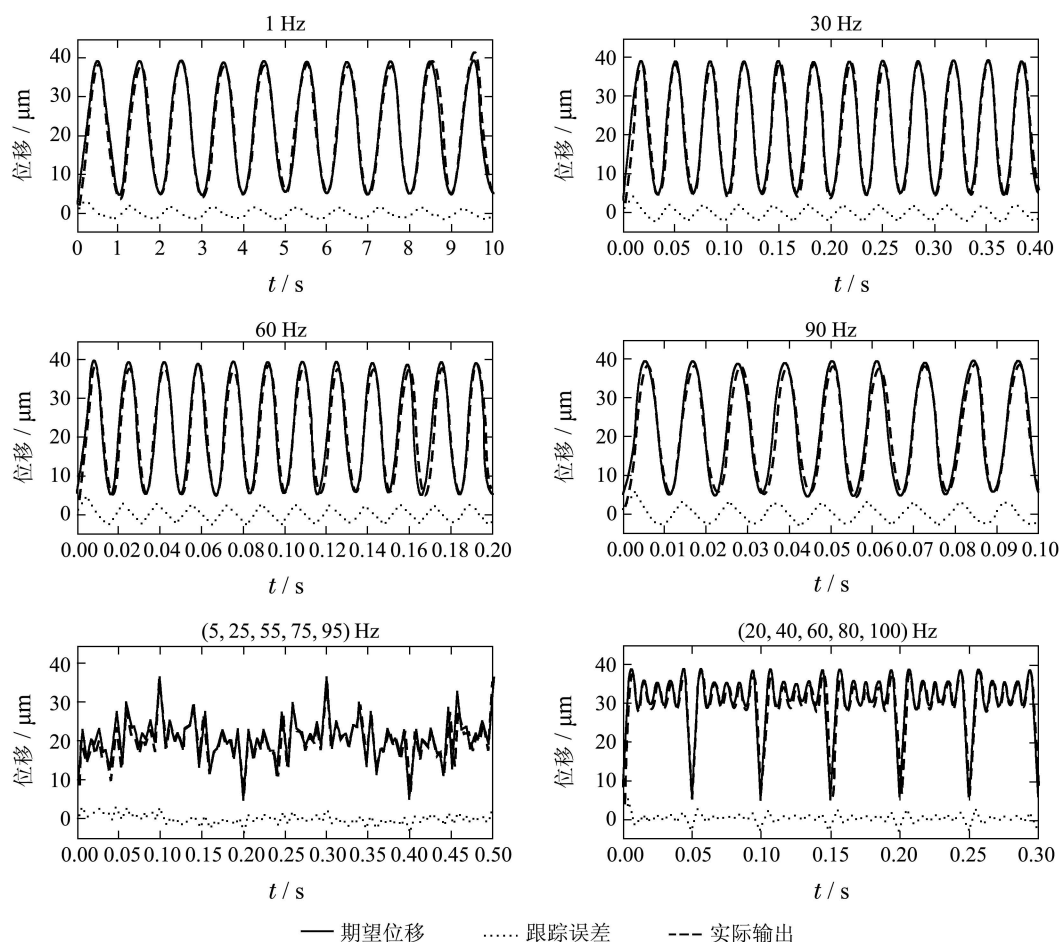


图9 鲁棒跟踪控制实验结果

Fig. 9 Experimental results of robust tracking control

表1 鲁棒跟踪控制实验结果

Table 1 Experimental results of tracking control

频率/Hz	RMSE/ μm	RE
1	1.0216	0.0408
10	1.0640	0.0424
20	1.1970	0.0477
30	1.3232	0.0528
40	1.4237	0.0568
50	1.5172	0.0605
60	1.6188	0.0646
70	1.7008	0.0678
80	1.8196	0.0726
90	1.8816	0.0751
100	1.9586	0.0781
(5,25,55,75,95)	1.0712	0.0496
(20,40,60,80,100)	1.0697	0.0345

5 结论(Conclusions)

针对压电作动器动态迟滞非线性系统,提出了一种基于Bouc-Wen的Hammerstein率相关迟滞非线性模型.同时,在实现Bouc-Wen静态迟滞补偿的基础上,提出了一种 H_∞ 鲁棒跟踪控制方案.通过实验确定了作动器的不确定性模型,并设计了 H_∞ 鲁棒跟踪控制器,在保证系统跟踪性能的同时,增强了系统的鲁棒抗干扰能力.实验结果表明,基于所提出的跟踪控制策略,可以实现给定频率范围内单频率和复合频率参考信号的良好跟踪,相对误差小于8%,证明了所提出方法的可行性和有效性.

参考文献(References):

- [1] MAYERGOYZ I D. *Mathematical Models of Hysteresis* [M]. New York: Springer-Verlag, 1991.

- [2] GOLDFARB M, CELANOVIC N. Modeling piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation [J]. *IEEE Control Systems*, 1997, 17(3): 69 – 79.
- [3] LIN C, LIN P. Tracking control of a biaxial piezo-actuated positioning stage using generalized Duhem model [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2012, 64(5): 766 – 787.
- [4] LIU L, TAN K K, CHEN S, et al. SVD-based Preisach hysteresis identification and composite control of piezo actuators [J]. *ISA Transactions*, 2012, 51(3): 430 – 438.
- [5] AL JANAIDEH M, RAKHEJA S, SU C Y. A generalized Prandtl-Ishlinskii model for characterizing rate dependent hysteresis [C] // *IEEE International Conference on Control Applications*. Singapore: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007: 343 – 348.
- [6] AL JANAIDEH M, SU C, RAKHEJA S. Compensation of rate-dependent hysteresis nonlinearities in a piezo micro-positioning stage [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2010: 512 – 517.
- [7] PAK-KIN W, XU Q S, VONG C M, et al. Rate-dependent hysteresis modeling and control of a piezostage using online support vector machine and relevance vector machine [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(4): 1988 – 2001.
- [8] HU H, GEORGIU H M S, BEN-MRAD R. Enhancement of tracking ability in piezoceramic actuators subject to dynamic excitation conditions [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(2): 230 – 239.
- [9] CROFT D, SHED G, DEVASIA S. Creep, hysteresis, and vibration compensation for piezoactuators: atomic force microscopy application [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2001, 123(1): 35 – 43.
- [10] JAYAWARDHANA B, LOGEMANN H, RYAN E P. PID control of second-order systems with hysteresis [J]. *International Journal of Control*, 2008, 81(8): 1331 – 1342.
- [11] CHEN X, SU C, FUKUDA T. Advanced adaptive control for piezo-actuated nano-positioner [C] // *The 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2011: 3346 – 3351.
- [12] RU C, CHEN L, SHAO B, et al. A hysteresis compensation method of piezoelectric actuator: model, identification and control [J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(9): 1107 – 1114.
- [13] GHAFARIRAD H, REZAEI S M, ABDULLAH A, et al. Observer-based sliding mode control with adaptive perturbation estimation for micropositioning actuators [J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(2): 271 – 281.
- [14] 赖志林, 刘向东, 耿洁, 等. 压电陶瓷执行器迟滞的滑模逆补偿控制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1281 – 1290. (LAI Zhilin, LIU Xiangdong, GENG Jie, et al. Sliding mode control of hysteresis of piezoceramic actuator based on inverse preisach compensation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1281 – 1290.)
- [15] 柳萍, 毛剑琴, 刘青松, 等. 率相关超磁致伸缩作动器的建模与 H_∞ 鲁棒控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(2): 148 – 155. (LIU Ping, MAO Jianqin, LIU Qingsong, et al. Modeling and H_∞ robust control for giant magnetostrictive actuators with rate-dependent hysteresis [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(2): 148 – 155.)
- [16] LIN C, CHEN S. Evolutionary algorithm based feedforward control for contouring of a biaxial piezo-actuated stage [J]. *Mechatronics*, 2009, 19(6): 829 – 839.
- [17] RAKOTONDRABE M, HADDAB Y, LUTZ P. Nonlinear modeling and estimation of force in a piezoelectric cantilever [C] // *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Zurich, Switzerland: IEEE, 2007: 1 – 6.
- [18] BOUC R. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis [C] // *Proceeding of the 4th Conference on Nonlinear Oscillations*. Prague, Czechoslovakia: Academia, 1967.
- [19] WEN Y K. Method for random vibration of hysteresis systems [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1976, 102(2): 249 – 263.
- [20] WANG Z Y, MAO J Q. On PSO based Bouc-Wen modeling for piezoelectric actuator [C] // *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. Shanghai: Springer-Verlag, 2010: 125 – 134.
- [21] IKHOUANE F, RODELLAR J. *Systems with Hysteresis: Analysis, Identification and Control Using the Bouc-Wen Model* [M]. Hoboken, USA: John Wiley and Sons. Ltd, 2007.
- [22] CHASSIAKOS A G, MASRI S F, SMYTH A W, et al. On-line identification of hysteretic systems [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1998, 65(1): 194 – 203.
- [23] RAKOTONDRABE M. Bouc-Wen modeling and inverse multiplicative structure to compensate hysteresis nonlinearity in piezoelectric actuators [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(2): 428 – 431.
- [24] 王代华, 朱炜. WTYD型压电陶瓷微位移器的迟滞特性建模与实验验证 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 205 – 211. (WANG Daihua, ZHU Wei. Hysteretic modeling and experimental verification for WTYD type piezoceramic micro-actuators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 205 – 211.)
- [25] LAWRYNCZUK M. On-line set-point optimisation and predictive control using neural Hammerstein models [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 166(1): 269 – 287.
- [26] CHAN K H, BAO J, WHITEN W J. Identification of MIMO Hammerstein systems using cardinal spline functions [J]. *Journal of Process Control*, 2006, 16(7): 659 – 670.
- [27] GOETHALS I, PELCKMANS K, SUYKENS J A K, et al. Identification of MIMO Hammerstein models using least squares support vector machines [J]. *Automatica*, 2005, 41(7): 1263 – 1272.
- [28] ZHOU K, DOYLE J C. *Essentials of Robust Control* [M]. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1997.
- [29] ZHOU K, DOYLE J C, GLOVER K. *Robust and Optimal Control* [M]. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1996.

作者简介:

王贞艳 (1981–), 女, 博士研究生, 副教授, 目前研究方向为动态迟滞非线性系统的建模与控制, E-mail: w9851@126.com;

张臻 (1974–), 男, 硕士生导师, 讲师, 目前研究方向为动态迟滞非线性系统的建模与控制、智能结构高精度跟踪定位及振动控制等, E-mail: zhangzhen@buaa.edu.cn;

周克敏 (1962–), 男, 博士生导师, 教授, 国际电气与电子工程师学会会员, 目前研究方向为鲁棒控制、多目标优化、故障诊断与容错控制、迟滞非线性控制等, E-mail: kmzhou@gmail.com;

毛剑琴 (1940–), 女, 博士生导师, 教授, 目前研究方向为动态迟滞非线性系统的建模与控制、智能结构动力学与控制等, E-mail: jqmao@buaa.edu.cn.