

输出受限迟滞非线性系统的反步控制器设计

赵新龙^{1†}, 章亿凯¹, 潘海鹏¹, 马连伟²

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江科技学院 自动化系, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对一类含有Bouc-Wen迟滞的输出受限非线性系统设计了反步控制器. 首先分析了Bouc-Wen模型的特性并得到其上界值, 然后设计了对称型障碍Lyapunov函数(barrier Lyapunov function, BLF), 保证了BLF有界, 从而满足了输出受限的条件, 最后利用反步法设计控制器. 该方法消除了迟滞引起的振荡和超调并且使得系统输出约束在设定的范围内, 同时解决了迟滞和系统输出受限两个方面的影响, 提高了控制精度. 仿真和实验结果表明了控制方法的可行性.

关键词: 迟滞; Bouc-Wen模型; 输出受限; 障碍Lyapunov函数(BLF); 反步控制;

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Backstepping control of output-constrained nonlinear systems with hysteresis

ZHAO Xin-long^{1†}, ZHANG Yi-kai¹, PAN Hai-peng¹, MA Lian-wei²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;

2. Department of Automation, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China)

Abstract: A backstepping controller is proposed for a class of output-constrained nonlinear system with hysteresis described by Bouc-Wen model. First, the property of Bouc-Wen mode is discussed and the upper bound is derived. Then the symmetric barrier Lyapunov function (BLF) is proposed to ensure the boundedness and achieve the output-constrained conditions. Finally, the backstepping controller is proposed to eliminate oscillation and overshoot caused by hysteresis. Furthermore, it constrains the output of system in set range. This controller solves the influence of hysteresis and constrained output simultaneously. Moreover, the controller can improve the control precision. The simulation and experimental results prove that this control method is practicable.

Key words: hysteresis; Bouc-Wen model; output constrain; barrier Lyapunov function (BLF); backstepping control

1 引言(Introduction)

在超精密定位系统中, 通常采用基于智能材料(如压电陶瓷、磁致伸缩材料、形状记忆合金等)的驱动器, 然而这些智能驱动器存在固有的迟滞特性, 迟滞是一种具有非平滑、多映射、记忆性的非线性, 能够引起系统误差和振荡甚至造成系统不稳定, 难以采用常规方法对其进行精确控制^[1]. 迟滞控制主要有两类: 基于逆模型的控制和直接控制. 基于逆模型的控制从控制结构上主要分为直接开环逆控制^[2]、逆模型作为前馈与常规反馈相结合的控制^[3]、逆模型线性化后与常规控制相结合的控制^[4]. 直接控制分为直接融合迟滞模型的控制^[5-7]和将迟滞作为扰动的控制^[8]. 目前对迟滞系统的研究一般都是在输出不受限的情况下.

输出受限是指实际系统的输出不能超过某个特定范围^[9], 传统的控制器设计方法比如Lyapunov方法缺少自身受限条件, 仅保证了系统稳定而忽略了系统输出受限, 难以用于输出受限的非线性系统. 为满足系统的输出约束条件, 一些学者提出barrier Lyapunov function(BLF), 以约束区间为定义域来构造Lyapunov函数, 当约束量趋向于临界约束条件时, Lyapunov函数值将趋向于无穷大, 进而保证约束量始终保持在约束区间内. 在文献[10]中, 通过构造log型的对称BLF, 解决了Brunovsky类型输出受限系统的控制问题. 文献[11]针对一类严反馈形式的非线性系统, 通过构造带约束限制的Lyapunov函数来保证输出有界, 解决了系统输出受限问题. 文献[12]针对输出受限的非线性

收稿日期: 2015-09-09; 录用日期: 2015-12-17.

[†]通信作者. E-mail: zhaoxinlong@hotmail.com; Tel.: +86 571-86843358.

本文责任编辑: 陈增强.

国家自然科学基金项目(61273184, 61540034), 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT13097), 浙江省自然科学基金项目(LY15F030022, LZ15F030005), 浙江理工大学“521”人才培养计划项目资助.

Supported by National Science Foundation of China (61273184, 61540034), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT13097), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LY15F030022, LZ15F030005) and “521” Talent Project of Zhejiang Sci-Tech University.

系统, 扩大了约束量的初值选取区间, 提出了基于非线性映射的自适应反推控制方法. 文献[13]提出了非对称时变BLF, 研究了具有时变输出受限的反馈非线性系统的输出跟踪控制问题. 文献[14]针对一类非参数不确定系统的约束迭代学习控制问题, 采用了二次分式型BLF设计了控制器. 文献[15]针对全状态约束的机器人系统, 基于BLF设计了自适应神经网络控制器, 处理了系统的不确定性和扰动. 文献[16-17]针对一类欠驱动吊车系统, 采用Lyapunov-like函数的方法设计了控制器, 实现吊车的快速定位和防摆控制. 这些研究推动了输出受限非线性系统控制的发展. 然而, 当迟滞特性与输出受限相结合时, 在控制器设计时需要同时考虑迟滞和输出受限这两个方面的影响.

本文针对一类含有Bouc-Wen迟滞模型的输出受限非线性系统, 将对称型BLF和反步控制方法相结合来设计控制器, 在闭环系统中保证了BLF有界, 从而满足了输出受限的条件. 与其他文献相比, 本文的创新点在于: 1) 引入对称型BLF来保证系统输出在约束区间内, 从而实现对具有输出受限的迟滞系统的有效控制; 2) 直接结合迟滞模型来设计反步控制器, 同时解决了迟滞和输出受限的影响, 消除了迟滞引起的振荡和超调并且使得系统输出约束在设定的范围内, 提高控制精度, 保证系统稳定.

2 迟滞非线性系统结构 (The structure of Hysteresis nonlinear system)

基于智能材料执行器的非线性系统结构描述如图1所示.

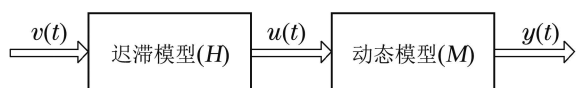


图 1 迟滞非线性系统

Fig. 1 Hysteresis nonlinear system

图1中: H 表示智能材料执行器中的迟滞特性, M 表示驱动的动态系统, $\nu(t)$ 为迟滞输入, $u(t)$ 为迟滞输出及动态系统的输入, $y(t)$ 为动态系统的输出.

整个系统描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i)x_{i+1}, \\ \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \\ \dot{x}_n = f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)u, \\ y = x_1, \\ u = H(\nu), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $f_1, \dots, f_n, g_1, \dots, g_n$ 是光滑的函数, x_1, \dots, x_n 为系统状态, 定义 $\bar{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$; 输出 y 受约束 $|y| \leq k_{c1}, \forall t \geq 0, k_{c1}$ 为正数.

注 1 系统输出受限体现在输出 $y(t)$ 约束在某个范围之内, 影响系统的控制性能. 同时, 迟滞H的多映射性和非平滑性会引起振荡和超调, 进一步增加了控制器设计的难度.

假设 1 期望输出 y_d 是关于时间 t 的有界函数, 其导数也有界.

假设 2 函数 $g_i(\bar{x}_i), i = 1, 2, \dots, n$ 为严格正定或严格负定, 且有正常 g_i^* 和已知光滑函数 $\bar{g}_i(\bar{x}_i), 0 < g_i^* \leq |g_i(\bar{x}_i)| \leq \bar{g}_i(\bar{x}_i)$.

迟滞H由Bouc-Wen模型来表示, 表达式如下:

$$\dot{h} = A_{bw}\dot{\nu} - \beta|\dot{\nu}|h|h|^{n-1} - \gamma\nu|h|^n, \quad (2)$$

$$u(t) = d_p\nu(t) - h(t), \quad (3)$$

其中: $\nu(t)$ 为迟滞输入, $u(t)$ 为迟滞输出, A_{bw} 为恢复力振幅的控制参数, β, γ 为迟滞形状控制参数, $d_p = 1.6, A_{bw} = 1.1, \beta = 0.2, \gamma = -0.1, n = 2$; 当 $\nu(t) = e^{-0.1t} \sin t$ 时, 其Bouc-Wen模型的输入输出曲线如图2所示.

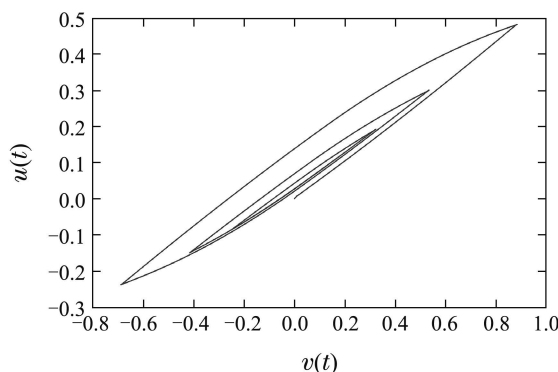


图 2 Bouc-Wen模型表示的迟滞特性

Fig. 2 Hysteresis characteristics of Bouc-Wen model

从图2可以看出迟滞的3个特性: 其一为多映射性, 即相同的输入对应不同的输出; 其二为非平滑性, 即在输入方向变化时, 在转折点处是不可微分的; 其三为记忆性, 即当前输出不仅与当前输入有关, 与先前的极值也有关.

3 控制器的设计(Controller design)

Bouc-Wen迟滞模型通过微分方程的形式来描述, 但是到目前为止还不能得到该微分方程的通解. 在解的特性未知的情况下不能采用常规的控制算法来对迟滞系统直接设计控制器, 这也是Bouc-Wen迟滞系统控制器设计的难点. 为了将常规的控制算法应用于迟滞系统, 首先需要对Bouc-Wen模型的微分方程进行分析, 文[18]证明了Bouc-Wen模型的中间变量 h 有界, 并给出了上界值 h_M :

$$h = \varphi_{\beta, \gamma, n} \sqrt[n]{\frac{A_{bw}}{\beta + \gamma}}, \quad (4)$$

其中: $0 \leq \varphi_{\beta, \gamma, n} \leq 1$, 可以得到 $h_M = \sqrt[n]{\frac{A_{bw}}{\beta + \gamma}}$. 上界值 h_M 是反步控制算法设计的关键.

定义1 BLF(barrier Lyapunov function)是一个标量函数 $V(x)$, 定义一个包含原点的开区间 D , $V(x)$ 在 D 中每一点的一阶偏微分都连续, 当 x 趋向于 D 的两端时, $V(x) \rightarrow \infty$, 当 $x(0) \in D$, 满足 $V(x(t)) \leq b$, $\forall t \geq 0$.

基于上界 h_M 和定义1, 针对系统(1), 反步控制器设计如下:

第1步 令 $z_1 = x_1 - y_d$, $z_i = x_i - \alpha_{i-1}$, $i = 2, \dots, n$. 取

$$V_1 = \frac{1}{2} \log \frac{K_{b_1}^2}{K_{b_1}^2 - z_1^2}, |z_1(0)| < K_{b_1}, \quad (5)$$

$$V_i = V_{i-1} + \frac{1}{2} z_i^2, i = 2, \dots, n. \quad (6)$$

对 V_1 求导得

$$\dot{V}_1 = \frac{z_1 \dot{z}_1}{K_{b_1}^2 - z_1^2} = \frac{z_1(f_1 + g_1(z_2 + \alpha_1) - \dot{y}_d)}{K_{b_1}^2 - z_1^2}. \quad (7)$$

设计 α_1 为

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_1}(-f_1 - (K_{b_1}^2 - z_1^2)K_1 z_1 + \dot{y}_d). \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得

$$\dot{V}_1 = -K_1 z_1^2 + \frac{g_1 z_1 z_2}{K_{b_1}^2 - z_1^2}. \quad (9)$$

第2步

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2. \quad (10)$$

对 V_2 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = & \\ & -K_1 z_1^2 + \frac{g_1 z_1 z_2}{K_{b_1}^2 - z_1^2} + \\ & z_2(f_2 + g_2(z_3 + \alpha_2) - \dot{\alpha}_1). \end{aligned} \quad (11)$$

设计 α_2 为

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_2}(-f_2 + \dot{\alpha}_1 - K_2 z_2 - \frac{g_1 z_1}{K_{b_1}^2 - z_1^2}). \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)得

$$\dot{V}_2 = -K_1 z_1^2 - K_2 z_2^2 + g_2 z_2 z_3. \quad (13)$$

第 i 步 ($3 \leq i \leq n-1$)

$$V_i = V_{i-1} + \frac{1}{2} z_i^2. \quad (14)$$

对 V_i 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = \dot{V}_{i-1} + z_i \dot{z}_i = & \\ \dot{V}_{i-1} + z_i(f_i + g_i(z_{i+1} + \alpha_i) - \dot{\alpha}_{i-1}). \end{aligned} \quad (15)$$

设计 α_i 为

$$\alpha_i = \frac{1}{g_i}(-f_i + \dot{\alpha}_{i-1} - K_i z_i - g_{i-1} z_{i-1}). \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得

$$\dot{V}_i = -\sum_{j=1}^i K_j z_j^2 + g_i z_i z_{i+1}. \quad (17)$$

第 n 步

对 V_n 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_n = \dot{V}_{n-1} + z_n \dot{z}_n = & \\ & -\sum_{j=1}^{n-1} K_j z_j^2 + g_{n-1} z_{n-1} z_n + \\ & z_n(f_n + g_n(d_p \nu(t) - h(t)) - \dot{\alpha}_{n-1}). \end{aligned} \quad (18)$$

设计实际控制律为

$$\begin{aligned} \nu = \frac{1}{d_p g_n}(-f_n + \dot{\alpha}_{n-1} - K_n z_n - \\ g_{n-1} z_{n-1} - \text{sgn } z_n \hat{D}), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\hat{D} = d |z_n|, \quad (20)$$

其中: $D = \bar{g}_n h_M$, \hat{D} 是 D 的估计值, K_1, \dots, K_n 都是正实数.

定理1 考虑迟滞非线性系统(1), 在满足假设1的前提下, 通过BLF函数(5)和(6)设计反步控制律(19)和(20), 则系统输出能够满足输出约束条件, 且闭环系统的所有信号均有界.

证 首先证明满足系统输出受限的条件. 因 $y(t) = z_1(t) + y_d(t)$, 而 $|z_1(t)| < K_{b_1}$, $|y_d(t)| \leq A_0$, A_0 为一正常数, 所以 $|y(t)| < K_{b_1} + A_0$, 满足输出约束.

然后证明系统稳定性. 选取Lyapunov函数

$$V = V_n + \frac{1}{2d} \tilde{D}^2, \quad (21)$$

其中 $\tilde{D} = D - \hat{D}$. 对 V 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{V}_n + \frac{1}{d} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} = & \\ & -\sum_{j=1}^n K_j z_j^2 - z_n \text{sgn } z_n \hat{D} - z_n g_n h - \frac{1}{d} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} \leq \\ & -\sum_{j=1}^n K_j z_j^2 - |z_n| \hat{D} + |z_n| D - \frac{1}{d} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} = \\ & -\sum_{j=1}^n K_j z_j^2 + |z_n| (D - \hat{D}) - \frac{1}{d} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} = \\ & -\sum_{j=1}^n K_j z_j^2 + |z_n| \tilde{D} - \frac{1}{d} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} = \\ & -\sum_{j=1}^n K_j z_j^2 + \tilde{D} (|z_n| - \frac{1}{d} \dot{\tilde{D}}) \leq 0. \end{aligned} \quad (22)$$

因此 $z_1, z_2, \dots, z_n, y_d, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}$ 均有界, 则 x_1, x_2, \dots, x_n 也是有界的, 因此系统的所有信号都是有界的.

4 仿真结果(Simulation results)

本文首先采用二阶迟滞非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \theta_1 x_1^2 + x_2, \\ \dot{x}_2 = \theta_2 x_1 x_2 + \theta_3 x_1 + (1 + x_1^2)u, \\ u(t) = d_p \nu(t) - h(t), \\ \dot{h} = A_{bw} \dot{\nu} - \beta |\dot{\nu}| h |h|^{n-1} - \gamma \dot{\nu} |h|^n, \end{cases}$$

其中: $\theta_1 = 0.1$, $\theta_2 = 0.1$, $\theta_3 = -0.2$, $d_p = 1.6$, $A_{bw} = 0.9$, $\beta = 0.02$, $\gamma = -0.01$. 期望输出轨迹 $y_d = 0.2 \cos(2t) + 0.1 \sin t$, 输出约束 $|y| < K_{c_1} = 0.32$.

初始条件 $x_1(0) = 0.2, x_2(0) = 0.5$, 同时控制增益 $K_1 = K_2 = 2.0$. 因为 $|y_d| \leq 0.3$, 所以 $K_{b1} = 0.32 - 0.3 = 0.02$.

图3-5分别表示该系统的控制量、实际输出和期望输出比较、跟踪误差. 从图4可以看出, 系统经过1s左右时间就基本跟踪上系统的期望轨迹, 并且实际输出能够精确跟踪期望轨迹. 从图5可以看出, 本方法与未考虑迟滞相比, 相对误差减少了1/3, 提高了控制精度. 为了说明本文方法的控制效果, 将本文的控制方法和与经典的PID控制方法进行比较, 其中PID参数利用Ziegler-Nichols方法来整定. 图6为两种控制器的输出效果比较, 图7为跟踪误差比较.

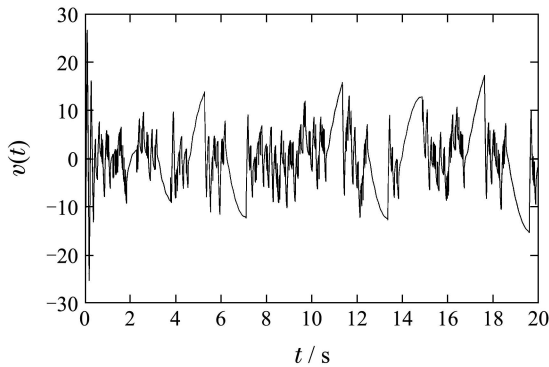


图3 系统控制量
Fig. 3 Control signal

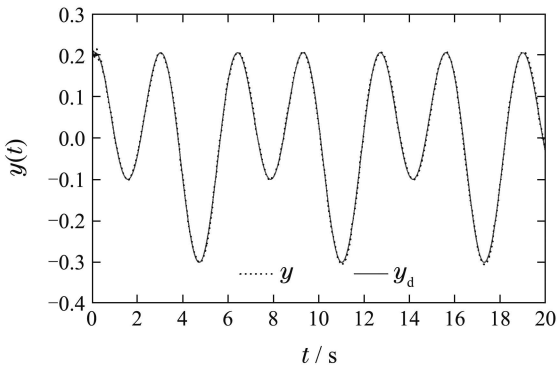


图4 系统输出轨迹
Fig. 4 The system output trajectory

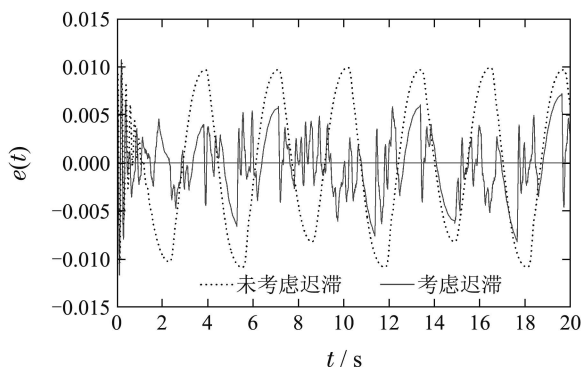


图5 系统输出误差
Fig. 5 The system output error

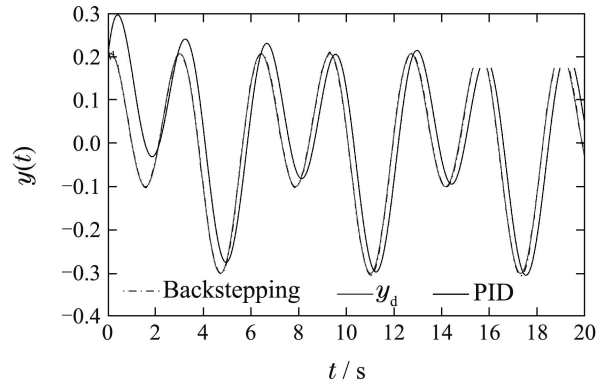


图6 系统输出比较

Fig. 6 The system output comparison

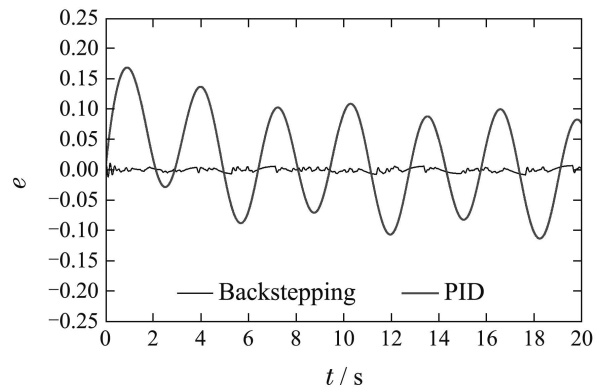


图7 跟踪误差比较

Fig. 7 Comparison of tracking error

为了进一步说明该方法的有效性, 另外针对可调金属切削系统^[19]进行实验验证. 系统描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{k_a}{m}u - \frac{c}{m}x_2 - \frac{k-h}{m}x_1 - \frac{h\mu}{m}x_1(t-\tau) + \frac{1}{m}f(x_1 - \mu x_1(t-\tau)), \\ y = x_1, \\ u(t) = d_p v(t) - h(t), \\ \dot{h} = A_{bw} \dot{v} - \beta |\dot{v}| h |h|^{n-1} - \gamma \dot{v} |h|^n, \end{cases}$$

其中: 系统参数

$$m = 20 \text{ kg}, c = 1.2,$$

$$f(x_1 - \mu x_1(t-\tau)) = 0.2 \sin(x - \mu x(t-1)),$$

$$\mu = 1, h = 4500, k = 6500 \text{ N/m}, k_a = 3000,$$

期望输出轨迹

$$y_d = 0.2 \cos(2t) + 0.1 \sin t.$$

图8为该实际系统的输出与期望的比较, 图9为实际系统输出误差. 由仿真结果可知本文的控制方法针对实际可调金属切削系统也有良好的控制效果.

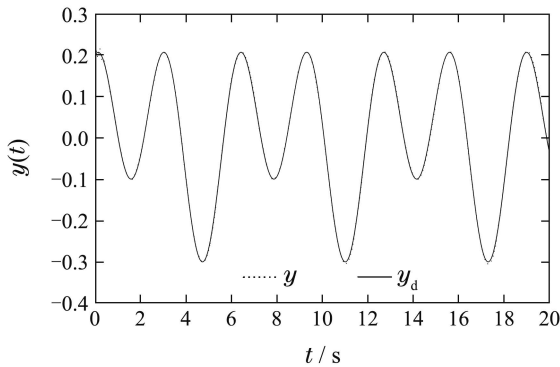


图8 实际系统输出

Fig. 8 The actual system output

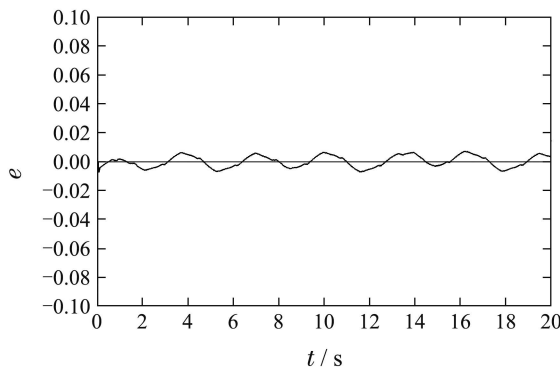


图9 实际系统输出误差

Fig. 9 The actual system output error

5 总结(Conclusions)

本文针对具有输出受限的迟滞非线性系统,利用Bouc-Wen模型来描述迟滞特性,采用对称型BLF来解决输出受限问题并设计反步控制器.该方法同时解决了迟滞和系统输出受限两个方面的影响,能够有效削弱迟滞特性产生的不良影响,保证期望的跟踪精度,并能将系统输出约束在设定范围内,提高了系统的控制性能.仿真结果表明该方法是有效的.

参考文献(References):

- [1] TAO G, KOLOTOVIC P V. Adaptive control of plants with unknown hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(2): 200 – 212.
- [2] GU G Y, YANG M J, ZHU L M. Real-time inverse hysteresis compensation of piezoelectric actuators with a modified Prandtl-Ishlinskii model [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(6): 065106 – 065106 – 8.
- [3] PING G, JOUANEH M. Tracking control of a piezoceramic actuator [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1996, 4(3): 209 – 216.
- [4] ZHOU J. Adaptive output feedback control of uncertain nonlinear systems with hysteresis nonlinearity [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(10): 2627 – 2633.
- [5] SU C Y, YURY S, SVOBODA J, et al. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(12): 2427 – 2432.
- [6] SU C Y, WANG Q Q, CHEN X K. Adaptive variable structure control of a class of nonlinear systems with unknown Prandtl-Ishlinskii hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(12): 2069 – 2074.
- [7] ZHAO Xinlong, WANG Jiali. Backstepping control with error transformation for Bouc-Wen hysteresis nonlinear system [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(8): 1094 – 1098.
(赵新龙, 汪佳丽. 结合误差变换的Bouc-Wen迟滞非线性系统反步控制器设计 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(8): 1094 – 1098.)
- [8] ZHONG J H, YAO B. Adaptive robust precision motion control of a piezoelectric positioning stage [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 1039 – 1046.
- [9] JIN X, XU J X. Iterative learning control for output-constrained systems with both parametric and nonparametric uncertainties [J]. *Automatica*, 2013, 49(8): 2508 – 2516.
- [10] NGO K B, MAHONY R, JIANG Z P. Integrator backstepping using barrier functions for systems with multiple state constraints [C] //The 44th IEEE Conference on Decision and Control, and 2005 European Control Conference. Piscataway: IEEE, 2005: 8306 – 8312.
- [11] TEE K P, GE S S, TAY E H. Barrier Lyapunov Functions for the control of output-constrained nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2009, 45(4): 918 – 927.
- [12] GUO Tao, WANG Dinglei, WANG Aimin. Adaptive backstepping control for constrained systems using nonlinear mapping [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(8): 1 – 6.
(郭涛, 王丁磊, 王爱民. 基于非线性映射的约束系统自适应反推控制 [J]. 自动化学报, 2012, 38(8): 1 – 6.)
- [13] TEE K P, REN B B, GE S S. Control of nonlinear systems with time-varying output constraints [J]. *Automatica*, 2011, 47(11): 2511 – 2516.
- [14] SUN Mingxuan, ZHANG Weibo, YAN Qiuzhen. Constrained iterative learning control of a class of non-parametric uncertain systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(4): 479 – 484.
(孙明轩, 张伟博, 严求真. 非参数不确定系统约束迭代学习控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(4): 479 – 484.)
- [15] HE W, CHEN Y, YIN Z. Adaptive neural network control of an uncertain robot with full-state constraints [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*. DOI: 10.1109/TCYB.2015.2411285.
- [16] SUN N, FANG Y. Nonlinear tracking control of underactuated cranes with load transferring and lowering: Theory and experimentation [J]. *Automatica*, 2014, 50(9): 2350 – 2357.
- [17] SUN N, FANG Y, CHEN H, et al. Adaptive nonlinear crane control with load hoisting/lowering and unknown parameters: design and experiments [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(5): 2107 – 2119.
- [18] FAYCALI I, JOSE R. *Systems with Hysteresis: Analysis, Identification and Control Using the Bouc-Wen Model* [M]. England: John Wiley, 2007.
- [19] ZHANG Xiuyu, LIU Cuiping, LIN Yan, et al. Robust adaptive dynamic surface control for adjustable metal cutting system with hysteresis input [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(9): 1274 – 1282.
(张秀宇, 刘翠平, 林岩, 等. 具有磁滞输入的可调金属切削系统鲁棒自适应动态面控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(9): 1274 – 1282.)

作者简介:

赵新龙 (1977–), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为迟滞非线性系统的建模和控制、精密定位系统控制, E-mail: zhaoxinlong@hotmail.com;

章亿凯 (1991–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为迟滞非线性系统的迭代学习控制, E-mail: zyk13588@126.com;

潘海鹏 (1965–), 男, 硕士, 教授, 目前研究方向为非线性系统建模与控制、工业过程控制等, E-mail: pan@zstu.edu.cn;

马连伟 (1976–), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为非线性系统的建模与控制、工业过程控制、太阳能光热技术等, E-mail: lianwei_ma@zust.edu.cn.