

文章编号: 1001-0920(2007)06-0689-04

具有未知非线性死区的自适应模糊控制

沈启坤, 张天平

(扬州大学 信息工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 基于滑模控制原理, 利用模糊系统的逼近能力, 提出一种自适应模糊控制方法. 该方法提出一种简化非线性死区输入模型, 取消了非线性死区输入模型的倾斜度相等以及死区边界对称的条件, 还取消了非线性死区输入模型各种参数已知的条件. 该方法通过引入逼近误差的自适应补偿项来消除建模误差和参数估计误差的影响. 理论分析证明了闭环系统是半全局一致终结有界, 跟踪误差收敛到零. 仿真结果表明了该方案的有效性.

关键词: 非线性死区; 模糊控制; 自适应控制; 非线性; 滑模控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Adaptive fuzzy control with unknown nonlinear dead-zone

SHEN Qi-kun, ZHANG Tian-ping

(College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China. Correspondent: ZHANG Tian-ping, E-mail: tpzhang@yzu.edu.cn)

Abstract: Based on the principle of sliding mode control, using the simplified nonlinear dead-zone model and the fuzzy systems with linear adjustable parameters which are used to approximate plant unknown functions, a design scheme of adaptive fuzzy controller is proposed. By using the approach, the conditions that the dead-zone slopes and the boundaries are equal and symmetrical, are removed, respectively. In addition, the assumptions which all nonlinear dead-zone model parameters are known constants are canceled. The adaptive compensation term of the approximation errors is adopted to minify the influence of modeling errors and parameter estimation errors. By theoretical analysis, the closed-loop control system is proved to be semi-globally uniformly ultimately bounded with tracking errors converging to zero. Simulation results show the effectiveness of the approach.

Key words: Nonlinear dead-zone; Fuzzy control; Adaptive control; Nonlinear; Sliding mode control

1 引言

物理器件的固有特性使其在实际系统和设备中经常出现死区、非线性输入等环节, 在控制精度要求很高的情况下, 必须考虑这些因素对系统性能的影响. 为此, 近年来很多学者对这些非线性环节进行广泛的研究, 以期消除或减少其对控制系统的影响, 并取得了一些成果^[1-5].

Tao 等^[1,2]对于一类线性系统, 分别引用连续和离散的自适应死区逆对死区进行补偿. 文献[3-5]针对含有死区模型的线性或非线性系统, 提出了新的控制方案. 其中 Wang 等^[4,5]通过简化死区模型使得控制律的设计更为简单. Yu 等^[6-8]利用滑模控制的思想分别探讨了具有非线性输入结构的一类时滞系

统、混沌系统的稳定控制问题. 张天平等^[9]研究了一类带有死区模型并具有未知函数控制增益的 SISO 非线性系统的稳定控制问题. Hsu 等^[10]利用滑模控制的思想探讨了具有非线性死区输入结构的一类多输入系统的稳定控制问题. Yan 等^[11]针对一类具有非线性死区输入的混沌系统的控制问题, 提出了一种自适应变结构控制器. 但上述文献都有非线性死区输入模型的各种参数已知的条件, 然而遗憾的是该条件往往因先验知识缺乏而不能满足.

本文在有未知非线性死区和外来干扰的情况下, 利用模糊系统的逼近能力, 并采用简化非线性死区输入模型, 对一类非线性系统, 提出一种自适应模糊控制方法, 取消了非线性死区输入模型参数已知

收稿日期: 2006-02-27; 修回日期: 2006-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074013); 江苏省教育厅指导性计划项目(KK0310067); 扬州大学新世纪人才工程中青年学术带头人项目.

作者简介: 沈启坤(1971—), 男, 江苏高邮人, 讲师, 硕士, 从事自适应控制、模糊控制理论等研究; 张天平(1964—), 男, 江苏泰兴人, 教授, 博士, 从事自适应控制、模糊控制理论等研究.

的条件. 通过 Lyapunov 综合方法, 证明了闭环系统半全局一致终结有界, 跟踪误差收敛到零.

2 问题描述及基本假设

考虑如下具有非线性输入结构的 SISO 系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1}, i = 1, 2, \dots, n-1, \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)(u(t)) + d(x, t), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ 是系统状态向量, y 是系统输出, f 是未知连续函数, g 为未知函数控制增益, u 为系统控制输入, $(u(t))$ 为系统非线性死区输入模型的输出, d 代表未知有界干扰.

输入为 $u(t)$, 输出为 $(u(t))$ 的简化非线性死区输入模型描述如下:

$$(u(t)) = \begin{cases} + (u - u_+), u > u_+; \\ 0, -u - u_- \leq u \leq u_+; \\ - (u + u_-), u < -u_-. \end{cases} \quad (2)$$

其中 $+, -$ 有下列特性:

$$\begin{cases} (u - u_+) + (u - u_+) = + (u - u_+)^2, \\ u > u_+; \\ (u + u_-) - (u + u_-) = - (u + u_-)^2, \\ u < -u_-. \end{cases} \quad (3)$$

进一步分析, 有

$$\begin{cases} + (u - u_+) + (u - u_+), u > u_+; \\ - (u + u_-) - (u + u_-), u < -u_-. \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 $+, -, u_+, u_-$ 都是未知非零正常量. 式(4)成立, 说明当 $u > u_+$ 时, $+$ > 0 ; 当 $u < -u_-$ 时, $- < 0$.

设 $0 < = \min(+, -)$, $0 < \bar{u} = \max(u_+, u_-)$, 并令 $b = \bar{u}$, 于是式(2)变为

$$(u(t)) = \begin{cases} + (u - u_+) + (u - u_+) = u - b, \\ u > u_+; \\ 0, -u - u_- \leq u \leq u_+; \\ - (u + u_-) - (u + u_-) = u + b, \\ u < -u_-. \end{cases} \quad (5)$$

控制目标要求系统输出 y 跟踪一个指定的期望轨迹 y_d , 因此, 问题为设计一个控制律 $u(t)$, 使得 $y - y_d$ 收敛到零. 定义跟踪误差向量

$$e = (e_1, \dots, e_n)^T = (y - y_d, \dot{y} - \dot{y}_d, \dots, y^{(n-1)} - y_d^{(n-1)})^T.$$

定义滤波误差 s 为

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \right)^{n-1} e_1 = \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_i + e_n, \quad (6)$$

其中 $c_i = C_{n-1}^{i-1} \lambda^{n-i}$ ($i = 1, \dots, n, \lambda > 0$) 为设计参数.

由式(1), (6)可知

$$\dot{s} = f(x) + g(x)(u) + d(x, t), \quad (7)$$

$$\text{其中 } = \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} - y_d^{(n)}.$$

为了设计稳定的自适应模糊滑模控制器, 对系统(1)作如下假设:

$$g_1 > g(x) \quad g_0 > 0, \forall x \in R^n; \quad (8)$$

$$|d(x, t)| \leq D; \quad (9)$$

$$(x_d, y_d^{(n)})^T \in \mathcal{D}; \quad (10)$$

$$\{x_d \mid x_d \in M_d\} \subset R^{n+1}; \quad (10)$$

$$\bar{u} = u_{\max}, \quad \min, \quad (11)$$

其中 $D, g_0, g_1, u_{\max}, \min$ 是已知的正常数; \mathcal{D} 是已知的有界闭集; $x_d = (y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(n-1)})^T$.

注1 在文献[10, 11]中, 要求 $+, -, u_+, u_-$ 都为已知常量.

3 自适应模糊控制器的设计及稳定性分析

定义光滑函数 $V_1(t) = \frac{1}{2}s(t)^2$. 将 V_1 关于时间

t 求导, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s\dot{s} = \\ s(f(x) + g(x)(u) + d(t)) &= \\ s(f(x) +) + sg(x)(u) + sd(x, t) &= \\ sh(z) + sg(x)(u) + sd(x, t), \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $h(z) = f(x) + , z = (x^T,)^T$.

定义控制律

$$u(t) = \begin{cases} -u - u_{\max}, s > 0; \\ 0, s = 0; \\ u + u_{\max}, s < 0. \end{cases} \quad (13)$$

其中 $u = 0$, 具体定义将在下面给出.

由式(5)和(13)可知:

1) 当 $s < 0$ 时, $u > u_+$, 有 $(u(t)) = u - b$, 代入式(12)整理可得

$$\dot{V}_1 = sh(z) + sg_0(u - b) + s/g_1 b + sd(x, t); \quad (14)$$

2) 当 $s > 0$ 时, $u < -u_-$, 有 $(u(t)) = u + b$, 代入式(12)可得

$$\dot{V}_1 = sh(z) - sg_0(u + b) + s/g_1 b + sd(x, t). \quad (15)$$

式(14)和(15)中, $b = u_{\max} + b$. 由以上分析可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \\ sh(z) - |s|/g_0(u - b) + |s|/g_1 b + sd(x, t) &= \\ s(f(x) +) - |s|/g_0(u - b) + |s|/g_1 b + sd(x, t). \end{aligned} \quad (16)$$

由于式(12)中 $f(x)$ 未知, 现用模糊逻辑系统来逼近它. 设 $f(x,)$ 是 I 型模糊逻辑系统在有界闭

区域 x 上对 $f(x)$ 的一个逼近,即

$$f(x, \theta) = \theta^T \phi(x), \quad (17)$$

而 M 是模糊系统的规则数目,模糊基向量 $\phi(x) = (\phi_1(x), \dots, \phi_M(x))^T$,模糊基函数 $\phi_i(x)$ 的具体表达式见文献[12], $\theta = (y_1, \dots, y_M)^T$ 是可调参数.

令

$$\theta \in \{ \theta / \theta \in M \}, \quad (18)$$

$$\theta^* = \arg \min \{ \sup_x | f(x, \theta) - f(x) | \}, \quad (19)$$

其中 M 是设计参数.设 $\hat{\theta}$ 为 θ^* 在 t 时刻的估计值.定义最优逼近误差

$$w = f(x, \theta^*) - f(x), \quad (20)$$

令

$$w = \max_x | (f(x, \theta^*) - f(x)) |, \quad (21)$$

则 w 是未知有界常数.

采用式(13)控制律,其中

$$u = \frac{1}{g_0 \min} [| f(x, \hat{\theta}) | + | \dot{x} | + | s | + D + g_1 b + \hat{w}], \quad (22)$$

$\hat{w}, \hat{w}, \hat{b}$ 分别表示 w, w, b 在 t 时刻的估计值.令 $\tilde{w} = w - \hat{w}, \tilde{w} = w - \hat{w}, \tilde{b} = b - \hat{b}$.

采用如下的自适应律:

$$\hat{\theta} = \begin{cases} s(x), & \hat{\theta} < M \text{ 或 } \hat{\theta} = M \text{ 且 } s^T(x) \leq 0; \\ s(x) - \frac{\hat{\theta}^T}{\hat{\theta}^T} s(x), & \hat{\theta} = M \text{ 且 } s^T(x) > 0; \end{cases} \quad (23)$$

$$\dot{\hat{w}} = \gamma_2 | s |; \quad (24)$$

$$\dot{\hat{b}} = \gamma_3 g_1 | s |; \quad (25)$$

其中 $\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0, \gamma_3 > 0$ 是自适应率.

针对系统(1),采用上述的控制律和自适应律,提出如下定理:

定理 1 考虑过程(1),其控制律由式(13), (22)确定,自适应律由式(23)~(25)确定,并满足假设(8)~(11),则闭环系统中所有信号有界,且

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0,$$

$$x \in \Omega_x =$$

$$\{ x / | s | \leq \sqrt{2V(0)}, (x_d, y_d^{(n)})^T \in \Omega_d \}.$$

其中: Ω_x 为有界闭区域,

$$V(0) = \frac{s^2(0)}{2} + \frac{1}{2\gamma_1} \tau^{-1}(0) \tau^{-1}(0) +$$

$$\frac{1}{2\gamma_2} \tau_w^{-1}(0) + \frac{1}{2\gamma_3} \tau_b^{-1}(0).$$

证明 令

$$V(t) = V_1 + \frac{1}{2\gamma_1} \tau^{-1} + \frac{1}{2\gamma_2} \tau_w^{-1} + \frac{1}{2\gamma_3} \tau_b^{-1}.$$

将 $V(t)$ 关于 t 求导,并利用式(16)和(20),有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(\dot{f}(x) + \dot{\theta}) - |s|g_0 u + |s|g_1 b + sd(x, t) - \frac{1}{\gamma_1} (\dot{\theta} - \dot{\theta}^*)^T \hat{\theta} - \frac{1}{\gamma_2} (\dot{w} - \dot{w}) \hat{w} - \frac{1}{\gamma_3} (b - \hat{b}) \dot{\hat{b}} \\ &= s(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*)^T (x) + |s| (|f(x, \hat{\theta})| + |s| + D) + |s| \dot{w} - |s|g_0 u + |s|g_1 b - \frac{1}{\gamma_1} (\dot{\theta} - \dot{\theta}^*)^T \hat{\theta} - \frac{1}{\gamma_2} (\dot{w} - \dot{w}) \hat{w} - \frac{1}{\gamma_3} (b - \hat{b}) \dot{\hat{b}}. \end{aligned} \quad (26)$$

将控制律以及自适应律代入式(26),可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -s^2 + (\dot{\theta} - \dot{\theta}^*)^T (s(x) - \frac{1}{\gamma_1} \hat{\theta}) - (\dot{w} - \dot{w}) (|s| - \frac{1}{\gamma_2} \hat{w}) - (b - \hat{b}) (|s|g_1 - \frac{1}{\gamma_3} \dot{\hat{b}}) - s^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (27)$$

对式(27)积分,有

$$\int_0^t \dot{V}(\tau) d\tau \leq - \int_0^t s(\tau)^2 d\tau,$$

即

$$\int_0^t s(\tau)^2 d\tau \leq V(0) - V(t).$$

又由 V 是单调不减函数的性质可知 $V(+\infty)$ 存在,故

$$\int_0^t s(\tau)^2 d\tau \leq V(0) - V(+\infty),$$

所以 $s \in L_2, |s| \leq \sqrt{2V(0)}$. 又由式(7), (27)得 $\dot{s} \in L_\infty$, 于是由Babalat引理可知, $\lim_{t \rightarrow \infty} s = 0$. 进一步可得, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0$.

4 仿真结果

考虑如下非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1 - e^{-x_1}}{1 + e^{-x_1}} - (x_2^2 + 2x_1) \sin(x_2) + (1 - 0.5 \sin(x_2)) (u) + d, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (28)$$

非线性死区输入 $(u(t))$ 定义如式(2), 仿真中取

$$u_+ = 1 - 0.3\sin(u(t)),$$

$$u_- = 0.8 - 0.3\cos(u(t)),$$

$$d = -0.5\sin(3x_1), u_+ = 0.3, u_- = 0.2,$$

期望的轨迹 $y_d = (\pi/30)\sin t$. 仿真中取 $\tau_1 = 2.5, \tau_2 = 2.5, \tau_3 = 2.5, g_0 = 0.5, g_1 = 1.5, u_{\max} = 0.5, u_{\min} = -0.5$, 系统的初始状态取为 $x_1(0) = 0.25, x_2(0) = 0, \hat{x}_w(0)$ 在区间 $[-1, 1]$ 上随机取值, 模糊逻辑系统的规则数目取为 5, $\hat{x}_w(0)$ 在区间 $[-1, 1]$ 上随机取值. 仿真结果如图 1 和图 2 所示. 由图 1 可以看出, 本文设计的控制器具有良好的收敛性能. 图 2 反映了控制信号的有界性.

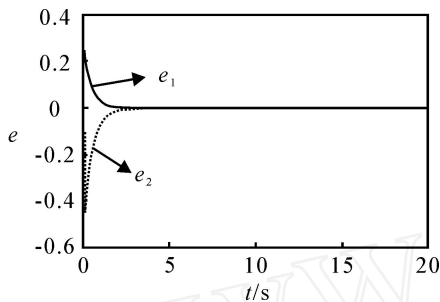


图1 跟踪误差 e

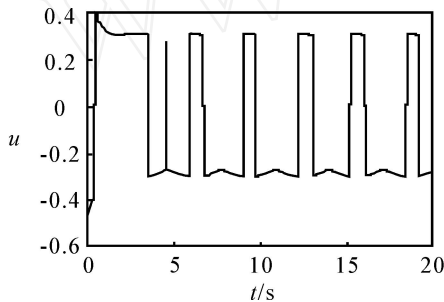


图2 控制信号 u

5 结 语

本文针对一类具有未知非线性死区输入的非线性系统, 在取消了非线性死区输入模型各种参数已知的条件下, 基于滑模控制原理和模糊系统的逼近能力, 提出了一种自适应模糊控制器的设计方案. 通过 Lyapunov 方法, 证明了闭环系统是鲁棒稳定的, 跟踪误差收敛到零.

参考文献 (References)

[1] Tao G, Kokotovic P V. Adaptive sliding control of plants with unknown dead-zone [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(1): 59-68.

- [2] Tao G, Kokotovic P V. Discrete-time adaptive control of systems with unknown dead-zone [J]. Int J of Control, 1995, 61(1): 1-17.
- [3] Cho H Y, Bai E W. Convergence results for an adaptive dead zone inverse [J]. Int J of Adaptive Control and Signal Processing, 1998, 12: 451-466.
- [4] Wang X S, Hong H, Su C Y. Model reference adaptive control of continuous time systems with an unknown dead-zone [J]. IEE Proc of Control Theory Application, 2003, 150(3): 261-266.
- [5] Wang X S, Su C Y, Hong H. Robust adaptive control a class of nonlinear systems with an unknown dead-zone [J]. Automatica, 2004, 40(3): 407-413.
- [6] Yu F M, Chung H Y, Chen S Y. Fuzzy sliding mode controller design for uncertain time-delayed systems with nonlinear input [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 140(2): 359-374.
- [7] Yan J J. Design of robust controllers for uncertain chaotic systems with nonlinear inputs [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 19(3): 541-547.
- [8] Yau H T, Yan J J. Design of sliding mode controller for Lorenz chaotic system with nonlinear input [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 19(4): 891-898.
- [9] 张天平, 裔扬, 梅建东. 带有未知死区模型的鲁棒自适应模糊控制 [J]. 控制与决策, 2006, 21(4): 367-370. (Zhang T P, Yi Y, Mei J D. Robust adaptive fuzzy control with unknown dead-zone model [J]. Control and Decision, 2006, 21(4): 367-370.)
- [10] Hsu K C, Wang W Y, Lin P Z. Sliding mode control for uncertain nonlinear systems with multiple inputs containing sector nonlinearities and deadzones [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics, 2004, 34(1): 374-380.
- [11] Yan J J, Shyu K K, Lin J S. Adaptive variable structure control for uncertain chaotic systems containing dead-zone nonlinearity [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 25(2): 347-355.
- [12] Wang L X. Adaptive fuzzy systems and control—design and stability analysis [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1994: 102-185.