

doi:10.3969/j.issn.1007-7162.2014.04.011

一类具有不确定性的线性系统的模糊自适应控制

解元, 金朝永

(广东工业大学 应用数学学院, 广东 广州 510520)

摘要: 针对一类具有不确定性和干扰的线性系统, 首先将系统不确定性进行归一化处理, 然后利用模糊逻辑系统对系统不确定性进行逼近估计. 同时对模糊逻辑系统的未知参数进行估计合成相应的自适应律, 由此提出了一种模糊自适应控制设计方法. 这种模糊自适应控制不仅能够减少自适应律的数目, 而且也能够保证被控系统的状态及参数估计误差一致终极有界. 最后的仿真结果表明了该方法的有效性.

关键词: 不确定性; 模糊逻辑系统; 自适应控制; 一致终极有界

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7162(2014)04-0060-05

Adaptive Fuzzy Control for a Class of Uncertain Linear Systems

Xie Yuan, Jin Chao-yong

(School of Applied Mathematics, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China)

Abstract: An adaptive fuzzy control approach was proposed for a class of linear systems with uncertainty and disturbance. Firstly, the uncertainties of systems were normalized and processed. Then, the fuzzy logic system was employed to estimate the uncertainties of the system. Meanwhile, the unknown parameters of the fuzzy logic system were estimated and the corresponding adaptive laws were synthesized. The fuzzy adaptive controller not only reduces the number of adaptive laws but also ensures the state of the systems controlled and errors of parameter estimate are uniform and ultimately bounded (UUB). The simulation experiment demonstrates the effectiveness of the control method.

Key words: uncertainty; fuzzy logic system; adaptive control; uniformly ultimately bounded(UUB)

依据被控系统的线性动态模型进行控制设计是控制理论中经常采用的方法,可是在许多实际控制问题中,由于被控系统的某些组成部件具有较强的未知非线性性(不确定性)、系统运行过程中还存在环境干扰等,因此线性动态模型并不能精确描述被控系统的动态行为,在这种情况下,如果仍然使用依据线性模型得到的控制策略,那么上述不确定性和干扰就会影响控制效果而导致闭环系统失稳. 为了解决这个问题,使用模糊逻辑系统抽取系统不确定性的信息而构造非线性控制策略是模糊控制研究领域的重要研究课题之一.

已有的结果证明了模糊系统能逼近非线性连续函数到任意指定的精度^[1]. 针对具有不确定性的系统,利用模糊系统的这种逼近特性构造模糊控制策略已经取得了许多理论研究成果^[2-7]. 其中模糊自适应控制被证明是一种处理不确定性的非常有效的方法^[8-11]. 值得注意的是,在这些模糊自适应控制策略

中,自适应律的构造主要依据模糊逻辑系统的输出参数(基函数线性组合系数),因而自适应律的数目依赖于模糊规则的数目. 由于模糊规则数目会随着系统状态变量维数的增加而急剧增加,因此相应的自适应律的数目也会急剧增加,这种情形往往会使自适应律的在线运算时间增加而导致闭环系统失稳. 因此,如何减少自适应律是一个值得研究的问题. 针对这一问题也取得了相应的研究成果^[12-14],所以,如何给出一种设计自适应控制的方法,使得自适应律的数目大大减少是值得继续深入研究的问题.

本文在假设系统中未知非线性函数有界但界函数未知的情况下,对一类线性不确定系统,设计了一种模糊自适应控制方案. 由于其标称系统是线性的,可直接利用线性反馈设计其控制器;然后对系统中的不确定性归一化,设计其模糊自适应控制器,同时对模糊逻辑系统中的未知参数设计自适应律. 此方

案减少了模糊逻辑系统的使用数目,相应地也减少了自适应律.在这种控制器、自适应律及模糊逻辑系统的共同作用下,被控系统的状态一致终极有界,参数估计误差也被控制在有界的范围内.最后以单级倒立摆为例说明该方案的有效性.

1 系统描述

考虑下面具有不确定性的系统

$$\dot{x} = Ax + \Delta f(x, t) + B(u + \Delta g(x, t)). \quad (1)$$

其中,状态向量 $x \in U \subseteq R^n$, U 是 R^n 中的紧集;输入 $u \in R^r$; A, B 为常数矩阵; $\Delta f(x, t)$ 是系统的结构不确定性或干扰; $\Delta g(x, t)$ 是输入通道上的不确定性或干扰.

假定 1 系统(1)中的不确定性满足下列条件:

$$(1) \|\Delta f(x, t)\| \leq \zeta(x), x \in U; \quad (2a)$$

$$(2) \|\Delta g(x, t)\| \leq \eta(x), x \in U. \quad (2b)$$

其中, $\zeta(x)$ 、 $\eta(x)$ 是未知的非负连续函数; $\|\cdot\|$ 表示欧氏范数.

假定 2 系统(1)的标称系统 $\dot{x} = Ax + Bu$ 经状态反馈 $u = Kx$, 在 $x = 0$ 的邻域 Ω 内渐进稳定.

显然,若假定 2 成立,则由 Lyapunov 判据知,对任给一个正定矩阵 Q , Lyapunov 方程

$$(A + BK)^T P + P(A + BK) = -Q \quad (3)$$

有唯一正定矩阵 P .

对于系统(1)中的不确定性(或干扰),利用一个模糊逻辑系统来逼近.选用单点模糊化、乘积模糊推理机、中心解模糊和如下模糊规则:

$$R^j: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^j \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^j \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^j, \\ \text{Then } y \text{ is } B^j, j = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

构造模糊逻辑系统.输出为

$$F(x) = \frac{\sum_{j=1}^N \theta_j \prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)}{\sum_{j=1}^N [\prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)]}. \quad (5)$$

其中, $A_i^j(x_i)$ 是模糊集 A_i^j 的隶属函数, $\theta_j = \max_{y \in R} B^j(y)$, $(1 \leq j \leq N)$, 是常数.

令

$$r_j(x) = \frac{\prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)}{\sum_{j=1}^N [\prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)]}, \quad (6)$$

则(5)式表示为

$$F(x) = \theta^T R(x), \quad (7)$$

其中 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)^T$, $R(x) = (r_1(x), r_2(x), \dots, r_N(x))^T$.

定理 1 设 $h(x)$ 是紧集 $U \subseteq R^n$ 上的连续函数,那么,对 $\varepsilon > 0$, 存在如式(4)和(5)的模糊逻辑

系统使

$$\sup_{x \in U} \|h(x) - F(x)\| \leq \varepsilon. \quad (8)$$

由定理 1 可知,对于不确定项 $\zeta(x) + \|B\|\eta(x)$. 可以得到:对于任意 $\varepsilon > 0$, 存在形如(4)和(5)的模糊逻辑系统使下式成立:

$$\sup_{x \in U} \|\zeta(x) + \|B\|\eta(x) - F(x)\| \leq \varepsilon. \quad (9)$$

2 控制器和自适应律设计

记 $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - \hat{\varepsilon}$. 其中 $\hat{\theta}$ 、 $\hat{\varepsilon}$ 分别为 θ 、 ε 的估计值.

对于系统(1),采用如下控制器:

$$u = u^a + u^b, \quad (10a)$$

$$u^a = Kx, \quad (10b)$$

$$u^b = \begin{cases} -\frac{B^T P x}{\|x^T P B\|} \hat{\theta}^T R(x), & x^T P B \neq 0, \\ 0, & x^T P B = 0. \end{cases} \quad (10c)$$

对未知参数采用如下自适应律:

$$\dot{\hat{\theta}} = -\alpha \hat{\theta} + 2\|P\| \cdot \|x\| R(x), \quad (11a)$$

$$\dot{\hat{\varepsilon}} = -\beta \hat{\varepsilon} + 2\|P\| \cdot \|x\|. \quad (11b)$$

其中, K 由假定 2 确定; $R(x)$ 由式(7)确定; α 、 β 为可调正常数,满足:

$$\frac{1}{\beta} + \frac{(1 + \|B\|^2)N}{\alpha} < \frac{\|Q\|}{2\|P\|^2}. \quad (12)$$

定理 2 考虑系统(1),如果假定 1、2 成立,则在模糊逻辑系统式(4)、(5)及非线性控制器式(10)和自适应律(11)的共同作用下,系统(1)的状态 x 有界且估计误差 $\tilde{\theta}$ 、 $\tilde{\varepsilon}$ 也有界.

证明 考虑正定函数 $W = x^T P x + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2} \tilde{\varepsilon}^2$,

则

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} + \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} + \tilde{\varepsilon}^T \dot{\tilde{\varepsilon}} = \\ &= -x^T Q x + [\Delta f + Bu^b + B\Delta g(x, t)]^T P x + \\ &+ x^T P [\Delta f + Bu^b + B\Delta g(x, t)] - \tilde{\theta}^T \dot{\hat{\theta}} - \tilde{\varepsilon} \dot{\hat{\varepsilon}} \leq \\ &= -x^T Q x + 2[\zeta(x) + \|B\|u^b + \\ &\|B\|\eta(x)]\|P\| \cdot \|x\| - \tilde{\theta}^T \dot{\hat{\theta}} - \tilde{\varepsilon} \dot{\hat{\varepsilon}} = \\ &= -x^T Q x + 2[\zeta(x) + \|B\|\eta(x)]\|P\| \cdot \|x\| - \\ &- 2B^T P x \hat{\theta}^T R(x) - \tilde{\theta}^T \dot{\hat{\theta}} - \tilde{\varepsilon} \dot{\hat{\varepsilon}} \end{aligned} \quad (13)$$

满足(9)的模糊逻辑系统,可得

$$\begin{aligned} \dot{W} &\leq -x^T Q x + 2\|P\| \cdot \|x\| \cdot [\zeta(x) + \\ &\|B\|\eta(x) - \hat{\theta}^T R(x)] + 2\|P\| \cdot \|x\| \cdot \hat{\theta}^T R(x) - \\ &- 2\|B^T P x\| \hat{\theta}^T R(x) - \tilde{\theta}^T \dot{\hat{\theta}} - \tilde{\varepsilon} \dot{\hat{\varepsilon}} \leq \\ &= -x^T Q x + 2\varepsilon\|P\| \cdot \|x\| + 2\|P\| \cdot \|x\| \cdot \hat{\theta}^T R(x) - \\ &- 2\|B^T P x\| \hat{\theta}^T R(x) - \tilde{\theta}^T \dot{\hat{\theta}} - \tilde{\varepsilon} \dot{\hat{\varepsilon}} = -x^T Q x + 2\hat{\varepsilon}\|P\| \cdot \\ &\|x\| + 2[\|P\| \cdot \|x\| - \|B^T P x\|] \cdot \hat{\theta}^T R(x) - \tilde{\theta}^T [\dot{\hat{\theta}} + \\ &\alpha \hat{\theta} - 2\|P\| \cdot \|x\| \cdot R(x)] - \tilde{\varepsilon} [\dot{\hat{\varepsilon}} + \beta \hat{\varepsilon} - 2\varepsilon\|P\| \cdot \\ &\|x\|] + \alpha \tilde{\theta}^T \hat{\theta} + \beta \tilde{\varepsilon} \hat{\varepsilon}. \end{aligned} \quad (14)$$

注意到

$$\|\theta\|^2 = \theta^T \theta = (\hat{\theta} + \tilde{\theta})^T (\hat{\theta} + \tilde{\theta}) = \|\hat{\theta}\|^2 + 2\tilde{\theta}^T \hat{\theta} + \|\tilde{\theta}\|^2, \quad (15)$$

$$\varepsilon^2 = \hat{\varepsilon}^2 + 2\tilde{\varepsilon}\hat{\varepsilon} + \tilde{\varepsilon}^2, \quad (16)$$

得

$$\tilde{\theta}^T \hat{\theta} = \frac{1}{2} \|\theta\|^2 - \frac{1}{2} \|\hat{\theta}\|^2 - \frac{1}{2} \|\tilde{\theta}\|^2, \quad (17)$$

$$\tilde{\varepsilon}\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \varepsilon^2 - \frac{1}{2} \hat{\varepsilon}^2 - \frac{1}{2} \tilde{\varepsilon}^2. \quad (18)$$

则

$$\alpha \tilde{\theta}^T \hat{\theta} + \beta \tilde{\varepsilon}\hat{\varepsilon} = \frac{\alpha}{2} \|\theta\|^2 - \frac{\alpha}{2} \|\hat{\theta}\|^2 - \frac{\alpha}{2} \|\tilde{\theta}\|^2 +$$

$$\frac{\beta}{2} \varepsilon^2 - \frac{\beta}{2} \hat{\varepsilon}^2 - \frac{\beta}{2} \tilde{\varepsilon}^2. \quad (19)$$

利用柯西-施瓦慈不等式,得

$$\begin{aligned} 2\hat{\varepsilon}\|P\| \cdot \|x\| + 2[\|P\| \cdot \|x\| - \|B^T Px\|] \cdot \hat{\theta}^T R(x) = \\ 2\|P\| \cdot \|x\| \frac{1}{\sqrt{\beta}} \cdot \sqrt{\beta} \cdot \hat{\varepsilon} + 2[\|P\| \cdot \|x\| - \|B^T Px\|] \cdot \\ R(x) \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \hat{\theta}^T \leq \end{aligned}$$

$$\sqrt{\frac{4\|P\|^2\|x\|^2}{\beta} + \frac{4(\|P\| \cdot \|x\| - \|B^T Px\|)^2\|R(x)\|^2}{\alpha}} \cdot$$

$$\sqrt{\alpha\|\hat{\theta}\|^2 + \beta\hat{\varepsilon}^2}, \quad (20)$$

$$\dot{W} \leq -x^T Qx +$$

$$\sqrt{\frac{4\|P\|^2\|x\|^2}{\beta} + \frac{4(\|P\| \cdot \|x\| - \|B^T Px\|)^2\|R(x)\|^2}{\alpha}} \cdot$$

$$\sqrt{\alpha\|\hat{\theta}\|^2 + \beta\hat{\varepsilon}^2} - \frac{1}{2}(\alpha\|\hat{\theta}\|^2 + \beta\hat{\varepsilon}^2) + \frac{\alpha}{2}\|\theta\|^2 + \frac{\beta}{2}\varepsilon^2 -$$

$$\frac{\alpha}{2}\|\tilde{\theta}\|^2 - \frac{\beta}{2}\tilde{\varepsilon}^2 - \tilde{\theta}^T(\hat{\theta} + \alpha\hat{\theta} - 2\|P\| \cdot \|x\|R(x)) -$$

$$\tilde{\varepsilon}(\hat{\varepsilon} + \beta\hat{\varepsilon} - 2\|P\| \cdot \|x\|). \quad (21)$$

采用自适应律(11),记

$$z = \sqrt{\alpha\|\hat{\theta}\|^2 + \beta\hat{\varepsilon}^2},$$

$$\delta = \sqrt{\frac{4\|P\|^2\|x\|^2}{\beta} + \frac{4(\|P\| \cdot \|x\| - \|B^T Px\|)^2\|R(x)\|^2}{\alpha}},$$

得

$$\dot{W} \leq -x^T Qx + \delta z - \frac{1}{2}z^2 + \frac{\alpha}{2}\|\theta\|^2 + \frac{\beta}{2}\varepsilon^2 -$$

$$\frac{\alpha}{2}\|\tilde{\theta}\|^2 - \frac{\beta}{2}\tilde{\varepsilon}^2. \quad (22)$$

又

$$\delta z - \frac{1}{2}z^2 = -\frac{1}{2}(z - \delta)^2 + \frac{1}{2}\delta^2 \leq \frac{1}{2}\delta^2, \quad (23)$$

所以

$$\dot{W} \leq -x^T Qx - \frac{\alpha}{2}\|\tilde{\theta}\|^2 - \frac{\beta}{2}\tilde{\varepsilon}^2 + \frac{\alpha}{2}\|\theta\|^2 + \frac{\beta}{2}\varepsilon^2 + \frac{1}{2}\delta^2 \leq$$

$$-x^T Px \cdot \left[\frac{\|Q\|}{\|P\|} - 2\|P\| \cdot \left(\frac{1}{\beta} + \frac{(1 + \|B\|^2)N}{\alpha} \right) \right] -$$

$$\frac{\alpha}{2}\|\tilde{\theta}\|^2 - \frac{\beta}{2}\tilde{\varepsilon}^2 + \frac{\alpha}{2}\|\theta\|^2 + \frac{\beta}{2}\varepsilon^2 \leq -\lambda_0 x^T Px - \frac{\alpha}{2}\|\tilde{\theta}\|^2 -$$

$$\frac{\beta}{2}\tilde{\varepsilon}^2 + M. \quad (24)$$

$$\text{其中 } \lambda_0 = \frac{\|Q\|}{\|P\|} - 2\|P\| \cdot \left(\frac{1}{\beta} + \frac{(1 + \|B\|^2)N}{\alpha} \right),$$

$$M = \frac{\alpha}{2}\|\theta\|^2 + \frac{\beta}{2}\varepsilon^2.$$

取 $\lambda = \min(\lambda_0, \alpha, \beta)$ 则

$$\dot{W} \leq -\lambda W + M. \quad (25)$$

又知 $\lambda > 0$, 且 M 是常数, 即得

$$x^T Px + \frac{1}{2}\|\tilde{\theta}\|^2 + \frac{1}{2}\tilde{\varepsilon}^2 \leq W(0)e^{-\lambda T} + \frac{M}{\lambda}.$$

所以

$$\|x\| \leq \sqrt{\frac{W(0)}{\|P\|} e^{-\lambda t} + \frac{M}{\|P\|k}} \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} \sqrt{\frac{M}{\|P\|k}}, \quad (26a)$$

$$\|\tilde{\theta}\| \leq \sqrt{2W(0)e^{-\lambda t} + \frac{2M}{\lambda}} \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} \sqrt{\frac{2M}{\lambda}}, \quad (26b)$$

$$\|\tilde{\varepsilon}\| \leq \sqrt{2W(0)e^{-\lambda t} + \frac{2M}{\lambda}} \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} \sqrt{\frac{2M}{\lambda}}. \quad (26c)$$

定理2得到证明.

3 仿真算例

单级倒立摆系统如图1所示,单级倒立摆动态方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin x_1 - \frac{m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} + \frac{\frac{\cos x_1}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} u + \Delta, \end{aligned} \quad (27)$$

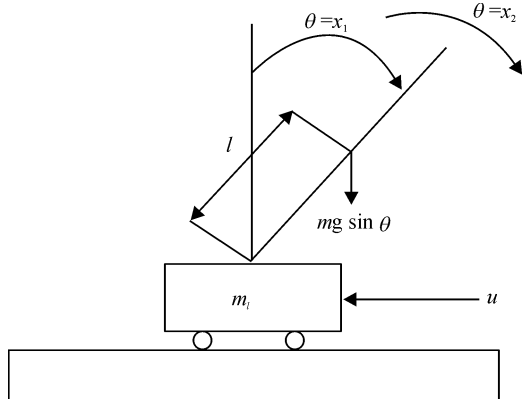


图1 单级倒立摆系统

Fig.1 The single inverted pendulum system

其中, g 是重力加速度, m_c 是小车的质量, m 是摆的质量, l 是摆长度的一半, u 是施加的外力(控制). $\theta = x_1$ 为摆杆与竖直向上方向的夹角, $\dot{\theta} = x_2$ 为摆的旋转角速度.

令

$$f(x) = \frac{g \sin x_1 - \frac{m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)},$$
$$g(x) = \frac{\frac{\cos x_1}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)}.$$

将 $f(x)$ 在 $(0,0)$ 处泰勒展开,得 $f(x) = cx_1 + \Delta f(x_1, x_2)$,

其中, $c = \frac{g}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m}{m_c + m} \right)}$, $\Delta f(x_1, x_2)$ 是 高阶余项. 于

是式(27)可改写为

$$\dot{x} = Ax + \Delta f(x) + B(g(x)u + \Delta), \tag{28}$$

其中, $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ c & 0 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. 参考文献[15], 选取以

下4条模糊逻辑系统规则:

- 如果 x_1 是正且 x_2 是正, 则 y 是负最大值.
 - 如果 x_1 是正且 x_2 是负, 则 y 是零;
 - 如果 x_1 是负且 x_2 是正, 则 y 是零;
 - 如果 x_1 是负且 x_2 是负, 则 y 是正最大值.
- 模糊集‘正’、‘负’、‘负最大值’、‘零’、‘正最大

大值’的隶属函数分别为 $A_1(x) = \frac{1}{1 + e^{-30x}}$,

$$A_2(x) = \frac{1}{1 + e^{30x}}, A_3(y) = e^{-(y+5)^2}, A_4(y) = e^{-y^2},$$

$$A_5(y) = e^{-(y-5)^2}.$$

以下仿真选定 $m_c = 1\text{kg}$, $m = 0.1\text{kg}$, $l = 0.5\text{m}$, 可得 $c \approx 16$. $k = (-30, -10)$, $Q = \begin{pmatrix} 28 & 0 \\ 0 & 18 \end{pmatrix}$, 则求解

Lyapunov 方程(3)得 $P = \begin{pmatrix} 28 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$. 设 $\Delta =$

$\frac{2x_1 \sin x_2}{1 + e^{-x_1}}$, 取 $x(0) = (1.5, 1)$, $\tilde{\epsilon}(0) = -4$. 仿真结果如图2~5所示. 图2~3是系统(27)在线性控制器 $u = Kx$ 下状态响应曲线和参数估计误差响应曲线. 图4~5是系统(27)在本文设计的控制器(10)下状态响应曲线和参数估计误差响应曲线.

对比发现:从图4可看出本文所设计的控制器使得系统(27)的状态趋于零;从图5可看出在控制器(10)下参数估计误差趋于某一常数并稳定,表明参数估计值有效并具有一定的自适应性;因此,在处理具有不确定性和干扰的线性系统时,本文所设计的模糊自适应控制方法比线性反馈所设计的控制方法较优越. 另外,本文只用了4条模糊规则就使倒立摆(27)稳定,而文献[14]用了6条模糊规则,相比之下,本文减少了模糊逻辑系统的使用数目.

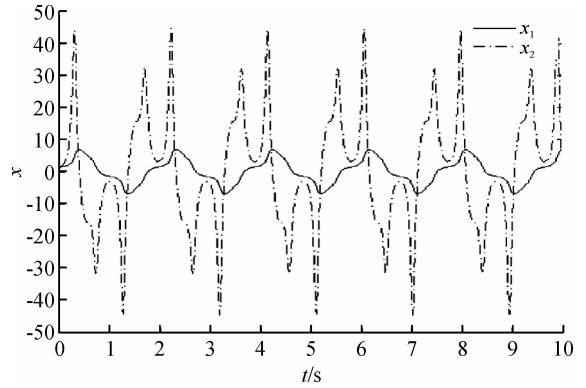


图2 在线性控制器下状态 x_1 与 x_2 的响应曲线
Fig. 2 Corresponding curves of states x_1 and x_2 under the linear controller

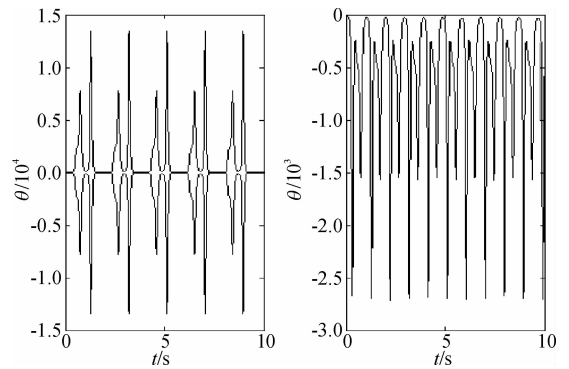


图3 在线性控制器下参数 θ, ϵ 的估计误差响应曲线
Fig. 3 Estimate error curves of θ and ϵ under the linear controller

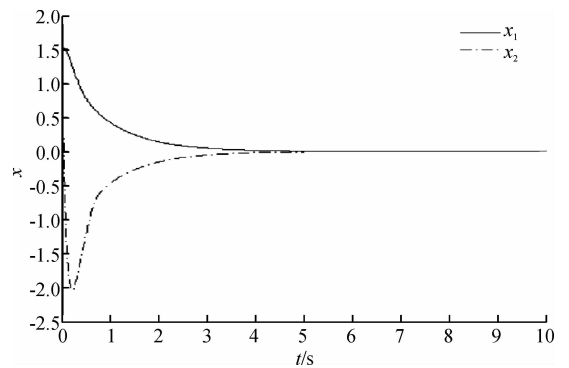


图4 在本文控制器下状态 x_1 与 x_2 的响应曲线
Fig. 4 Corresponding curves of states x_1 and x_2 under the controller of this thesis

4 结论

本文基于模糊逻辑系统对一类具有干扰和不确定性的线性系统,提出一种模糊自适应控制方法. 该系统的特点:(1)标称系统是线性的,所以对于非线性的标称系统,只需进行线性化即可;(2)系统的干扰有界但上界未知,只需对系统的不确定性设计模糊自适应控制,减少了控制器设计的复杂性. 最后利用 Lyapunov 稳定理论证明该方法具有收敛性. 以单

级倒立摆为仿真实例表明方法的合理性与有效性.

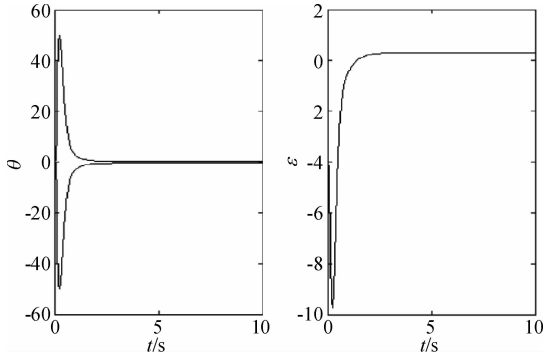


图5 在本文控制器下参数 θ, ε 的估计误差响应曲线

Fig.5 Estimate error curves of θ and ε under the controller of this thesis

参考文献:

- [1] 王立新. 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析[M]. 北京:国防工业出版社,1995:1-34.
- [2] Slotine J J E, Li W. Applied Nonlinear Control[C]. Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall,1991.
- [3] Shaocheng Tong, Qingguo Li, Tianyou Chai. Fuzzy adaptive control for a class of nonlinear systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 101: 31-39.
- [4] Li H X, Miao Z H, Lee E S. Variable universe stable adaptive fuzzy control of a nonlinear system[J]. Computers and Mathematics with Application, 2002, 44(516): 799-815.
- [5] 郭文成, 师五喜, 郭利进. 一类不确定非线性系统的自适应模糊控制[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 351-354.
Guo W C, Shi W X, Guo L J. Adaptive fuzzy control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(2): 351-354.
- [6] 王银河, 戴冠中. 一类非线性不确定系统的模糊自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(2): 271-274.
Wang Y H, Dai G Z. Adaptive fuzzy control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications, 2004(4): 271-274.
- [7] 刘艳军, 王伟. 一类多变量非线性系统的自适应模糊控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(11): 1163-1169.
Liu Y J, Wang W. Adaptive fuzzy control for a class of multivariable nonlinear systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(11): 1163-1169.
- [8] 文杰, 姜长生. 一类非仿射受扰混沌系统的自适应模糊控制[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2664-2668.
Wen J, Jiang C S. Adaptive fuzzy control for a class of uncertain chaotic systems with nonaffine inputs[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12): 2664-2668.
- [9] 刘晓辉. 一类不确定非线性系统的自适应模糊控制[J]. 制造业自动化, 2011, 33(9): 113-115.
Liu X H. Adaptive fuzzy control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(9): 113-115.
- [10] 高冰, 李鹏, 张学, 等. 基于自适应模糊控制的飞机自动着陆系统[J]. 电气传动, 2011, 41(8): 24-27.
Gao B, Li P, Zhang X, et al. Airplane automatic landing system based on adaptive fuzzy control[J]. Electric Drive, 2011, 41(8): 24-27.
- [11] 马克茂, 孟桂芝, 张佳为. 基于模糊自适应控制的一类非线性不确定系统的输出调节[C]//第31届中国控制会议论文A卷. 合肥:中国自动化学会控制理论专业委员会, 中国系统工程学会, 2012, 25-27(7): 969-974.
- [12] 段洪君, 史小平. 基于模糊自适应的微型飞行器姿态控制[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(10): 2455-2459.
Duan H J, Shi X P. Attitude control for micro-vehicle based on fuzzy adaptive algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(10): 2455-2459.
- [13] 范永青, 王银河, 罗亮, 等. 带有伸缩器和饱和器的一类非线性系统模糊自适应控制设计[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(9): 1105-1110.
Fan Y Q, Wang Y H, Luo L, et al. Fuzzy adaptive control design for a class of nonlinear systems with scalers and saturators[J]. Control Theory & Applications, 2011(9): 1105-1110.
- [14] 王文丽, 王银河, 章云, 等. 基于局部模糊系统合成的一类非线性不确定系统的自适应控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(12): 1849-1853.
Wang W L, Wang Y H, Zhang Y, et al. Adaptive control for a class of nonlinear uncertain systems based on synthesis of local fuzzy systems[J]. Control and Decision, 2012, 27(12): 1849-1853.
- [15] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与MATLAB仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 183-184.