

文章编号: 1001-0920(2012)12-1849-05

基于局部模糊系统集成的一类非线性不确定系统自适应控制

王文丽^a, 王银河^b, 章云^b, 王钦若^b

(广东工业大学 a. 应用数学学院, b. 自动化学院, 广州 510006)

摘要: 通过使用从属于系统状态区域上开覆盖的单位分解, 首先将若干个局部生成的模糊逻辑系统集成而产生一种函数逼近器, 与通常的模糊逻辑系统相比较, 这种逼近器不仅具有万能逼近性质, 而且由于局部模糊逻辑系统具有较少规则而能够保持语言可解释性; 然后, 通过将适当的参数植入这种函数逼近器中, 能够为某些非线性不确定系统设计自适应镇定控制器; 最后, 通过仿真例子验证了所提出方法的有效性。

关键词: 单位分解; 模糊逻辑系统; 自适应控制; 镇定

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Adaptive control for a class of nonlinear uncertain systems based on synthesis of local fuzzy systems

WANG Wen-li^a, WANG Yin-he^b, ZHANG Yun^b, WANG Qin-ruo^b

(a. Faculty of Applied Mathematics, b. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China. Correspondent: WANG Wen-li, E-mail: wenli_wang@sina.com)

Abstract: By employing the partition of unity subordinated to an open covering of the system state domain, firstly several local fuzzy logic systems are synthesized to product a function approximator. Compared with the existing results, this approximator possesses not only the property of universal approximation but also the language interpretability due to the local fuzzy logic systems with fewer rules. Then, a time-varying parameter is introduced into the approximator to design adaptive controllers for a class of nonlinear systems with uncertainties. Finally, simulations show the effectiveness of the proposed method.

Key words: partition of unity; fuzzy logic system; adaptive control; stabilization

1 引言

在控制理论中, 作为未知不确定性的万能逼近器以及吸取语言信息的工具, 模糊逻辑系统得到了广泛的应用^[1], 其中 Mamdani 和 T-S 型模糊逻辑系统是两种常用的形式. 文献 [1-4] 依据这两种形式的模糊逻辑系统, 讨论了在不同条件下为非线性不确定系统设计镇定或跟踪控制器. 值得注意的是, 在这些文献中, 所涉及的模糊逻辑系统输出都能够表示为某些基函数的常系数线性组合, 如果这些组合系数是未知的(相当于假定模糊规则的后件是未知的), 则这些组合系数可以用自适应策略进行估计, 并由此产生自适应控制器.

在工程实践中, 也经常使用后件表现为非线性函数的 T-S 型的模糊逻辑系统, 例如在文献 [5-6] 中使用

的 T-S 型模糊逻辑系统, 其后件表现为高次多项式形式; 在文献 [8-9] 中使用的 T-S 型模糊逻辑系统, 其后件表现为其他类型的非线性函数. 但是在一般情况下, 后件表现为非线性函数的 T-S 型模糊逻辑系统的输出不能表示为某些基函数的常系数线性组合形式, 因而前述文献中的自适应控制设计方法已经不能适用于这种形式的 T-S 型模糊逻辑系统. 因此, 寻找适用于这种形式的 T-S 型模糊逻辑系统的自适应控制方法是完全必要的.

在系统控制过程中, 使用具有较少数目规则的模糊逻辑系统不仅能够有效地减少在线运算时间, 而且能较好地提高规则的语言可解释性^[5,10]. 文献 [11] 利用合并变量的分层方法讨论了如何减少模糊规则问题, 但是这种方法产生的合并变量增加了语言可解释

收稿日期: 2011-08-19; 修回日期: 2011-12-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273219); 广东省自然科学基金团队项目(8351009001000002).

作者简介: 王文丽(1961—), 女, 副教授, 硕士, 从事非线性系统模糊控制等研究; 王银河(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事控制理论与工程等研究.

性的难度. 一般认为, 在相同规则数目的条件下, 后件表现为非线性函数的 T-S 型模糊逻辑系统的逼近能力要比 Mamdani 型模糊逻辑系统强, 因此使用后件为非线性函数的 T-S 型模糊逻辑系统能够有效地减少规则数目, 因而也提高了规则的语言可解释性.

如果从数学几何的角度看待模糊逻辑系统, 则每条模糊规则实际上是描述了整个论域上的一块“补丁”^[12], 所有模糊规则(补丁)形成了论域的一个覆盖, 模糊规则多则覆盖细, 反之亦然. 因此, 从覆盖的角度看, 较小的论域一般需要较少的规则. 依据这一思想, 本文首先利用若干个局部开集合构成整个论域(有界闭集)的一个开覆盖; 然后在每一个局部开集合上构造局部 T-S 型模糊逻辑系统, 由于局部开集合比整个论域小得多, 产生的局部 T-S 型模糊逻辑系统应具有较少的规则; 最后利用从属于这些开覆盖的单位分解, 将这些局部 T-S 型模糊逻辑系统的输出“粘合”起来形成整个论域上的函数逼近器. 容易看出, 这种函数逼近器具有较好的局部语言可解释性, 其输出一般不能表示为某些基函数的常系数线性组合形式, 因此前述文献中的自适应控制方法不适用于这类函数逼近器. 本文的目的就是使用这类函数逼近器为一类非线性不确定系统设计自适应镇定控制器.

2 系统描述

考虑如下系统:

$$\dot{z} = Az + B[f(z) + \xi(t) + g(z)u]. \quad (1)$$

其中: 控制输入 $u \in R$, 状态向量 $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T \in W \subseteq R^n$, W 是一个有界闭集合; A 与 B 分别是 $n \times n$, $n \times 1$ 阶矩阵; $f(z)$, $g(z)$ 和 $\xi(t)$ 都是未知的连续函数, $g(z) \neq 0$.

注 1 若 $A = \begin{bmatrix} O & I_{n-1} \\ 0 & O_T \end{bmatrix}$, $B = [O^T \ 1]^T$, 其中 O 表示 $n-1$ 阶零向量, I_{n-1} 表示 $n-1$ 阶单位矩阵, 则系统(1)常见于文献[1-4]中.

假设 1 矩阵对 (A, B) 是完全可控的, 即存在一个 $1 \times n$ 阶矩阵 K 使得对于任意给定的正定矩阵 Q , 下列 Lyapunov 方程有唯一的正定矩阵解 P :

$$(A + BK)^T P + P(A + BK) = -Q. \quad (2)$$

假设 2 1) $|\xi(t)| \leq \omega(t)$, 其中 $\omega(t)$ 为已知的有界连续函数; 2) 存在一个(或未知)正常数 σ 及两个已知的正值函数 $\underline{g}(z)$ 和 $\bar{g}(z)$, 满足 $0 < \sigma < \underline{g}(z) \leq g(z) \leq \bar{g}(z)$; 3) 在有界闭集 W 上, $f(z)$ 满足 Lipschitz 条件, 也就是说, 存在常数(或未知) L , 使得对于任意 $z_1, z_2 \in W$, 满足 $|f(z_1) - f(z_2)| \leq L\|z_1 - z_2\|$.

注 2 若 $\partial f / \partial z_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$) 在 W 上连续,

则假设 2 中的 Lipschitz 常数 $L = \sup_{z \in W} \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial z_j}\right)^2}$.

现在考虑论域(有界闭集) $W \in R^n$, 设 $\{U_k, k = 1, 2, \dots, N\}$ 是论域的一组有限开覆盖, 即 U_k 是开集且满足 $\bigcup_{j=1}^N U_k \supseteq W$; 又设 $\{\alpha_k, k = 1, 2, \dots, N\}$ 是从属于这组开覆盖的(光滑)单位分解. 文献[13]的结论说明这样的(光滑)单位分解总是存在的, 文献[14]给出了一些构造光滑单位分解的方法. 在每一个局部论域(开集)上, 考虑具有如下规则的模糊逻辑系统:

FS $\{k\}$ - R^{i_k} :

If z_1 is $A_{1k}^{i_k}$ and z_2 is $A_{2k}^{i_k}$ and \dots and z_n is $A_{nk}^{i_k}$,

Then $y^k = F_{i_k}^k(z)$; (3)

$$i_k = 1, 2, \dots, N_k, k = 1, 2, \dots, N.$$

其中: $A_{jk}^{i_k}$ ($j = 1, 2, \dots, n$) 表示模糊集合, $A_{jk}^{i_k}(z_j)$ 表示其相应的隶属函数; $y^k = F_{i_k}^k(z)$ 为开集 $U_k \subseteq R^n$ 上的连续函数.

如果采用单点模糊化、乘积推理和中心解模糊, 则相应于规则(3)的模糊逻辑系统输出为

$$y^k = F^k(z) = \frac{\sum_{i_k=1}^{N_k} F_{i_k}^k(z) \prod_{j=1}^n A_{jk}^{i_k}(z_j)}{\sum_{i_k=1}^{N_k} \prod_{j=1}^n A_{jk}^{i_k}(z_j)}. \quad (4)$$

注 3 特别地, 当 $y^k = F_{i_k}^k(z)$ 都为常数函数时, 输出(4)等价于 Mamdani 型模糊逻辑系统的输出, 否则输出(4)表示规则为(3)的 T-S 型模糊逻辑系统的输出.

注意到输出(4)是开集 U_k 上的连续函数, 因此可以利用论域 W 上的开覆盖 $\{U_k, k = 1, 2, \dots, N\}$ 以及从属于这组开覆盖的单位分解 $\{\alpha_k, k = 1, 2, \dots, N\}$, 将 N 个形如(4)的模糊逻辑系统输出“粘合”为如下形式的、定义在论域 W 上的连续函数:

$$y = F(z) = \sum_{k=1}^N \alpha_k(z) F^k(z). \quad (5)$$

利用单位分解的局部支撑和归一性质 $\sum_{k=1}^N \alpha_k(z) = 1$ 容易证明, 当开覆盖 $\{U_k, k = 1, 2, \dots, N\}$ 中每个开集 U_k 上的模糊逻辑系统对未知连续函数 $f(z)$ 都具有逼近精度 ϵ 时, 总体“粘合”输出(5)在整体论域上对未知连续函数 $f(z)$ 也具有逼近精度 ϵ , 因此式(5)是连续函数的逼近器. 证明略.

因为逼近器(5)是由若干个局部模糊逻辑系统“粘合”而成, 所以这种结构不仅保持了在局部范围内容易构造具有小数目规则的模糊逻辑系统的优势, 而

且也保持了在整体范围内具有万能逼近性质的优势. 值得注意的是, 形如式 (5) 的逼近器一般不具有“基函数常系统线性组合”的形式, 因此如果将式 (5) 作为未知连续函数的逼近器, 则以往的模糊自适应控制设计方法^[1-4]并不适用于逼近器 (5). 本文首先将一个非零时变参数 $\rho = \rho(t)$ 引入逼近器 (5) 中, 产生带有参数的扩展逼近器

$$y = F\left(\frac{z}{\rho}\right) = \sum_{k=1}^N \alpha_k\left(\frac{z}{\rho}\right) F^k\left(\frac{z}{\rho}\right). \quad (6)$$

假设 3 考虑系统 (1), 存在正常数 ϵ 和一个形如式 (5) 的函数逼近器, 满足 $\sup_{z \in W} \left| \frac{f(z)}{g(z)} - F(z) \right| \leq \epsilon$.

3 控制设计

本文使用 $\hat{\epsilon}$ 和 \hat{L} 分别表示 ϵ 和 L 的估计值, $\tilde{\epsilon} = \hat{\epsilon} - \epsilon$ 和 $\tilde{L} = \hat{L} - L$ 分别表示相应的估计误差. 考虑如下形式的扩展闭环系统:

$$\dot{z} = Az + B[f(z) + \xi(t) + g(z)u], \quad (7a)$$

$$\dot{\rho} = \pi(z, \rho, \hat{\epsilon}, \hat{L}), \quad (7b)$$

$$\dot{\hat{\epsilon}} = \Psi_1(z, \rho, \hat{\epsilon}, \hat{L}), \quad (7c)$$

$$\dot{\hat{L}} = \Psi_2(z, \rho, \hat{\epsilon}, \hat{L}), \quad (7d)$$

$$u = u(z, \rho). \quad (7e)$$

其中: $Z = (z^T, \rho, \hat{\epsilon}, \hat{L})^T$ 是扩展闭环系统 (7) 的状态向量; $\pi(\cdot)$ 表示参数 ρ 的更新律, $\Psi_1(\cdot)$ 和 $\Psi_2(\cdot)$ 分别表示参数 ϵ 和 L 的估计值的更新律; $u = u(z, \rho)$ 表示需要根据以下控制目标设计的自适应控制器.

控制目标: 设计形如式 (7e) 的控制器和参数更新律 (7b)~(7d), 使状态向量 Z 有界且使系统 (1) 的状态向量 $z \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$.

为达到上述控制目标, 本文提出如下形式的控制器和参数更新律:

$$u = \begin{cases} 0, & \|z\| > |\rho|\chi; \\ u_1 + u_2, & \|z\| \leq |\rho|\chi; \end{cases} \quad (8a)$$

$$u_1 = Kz + v, \quad u_2 = -F\left(\frac{z}{\rho}\right); \quad (8b)$$

$$v = \begin{cases} -\frac{B^T Pz}{|B^T Pz|} \frac{(\bar{g}(z)+1)|Kz|+\omega(t)}{g(z)}, & B^T Pz \neq 0; \\ 0, & B^T Pz = 0; \end{cases} \quad (8c)$$

$$\dot{\rho} = \begin{cases} \frac{1}{2\rho\chi^2} \{\delta + [\lambda_{\max}(A^T + A) + h_1]\}, & \|z\| > |\rho|\chi; \\ -2\beta_1 \|PB\| \frac{\chi \hat{L} \Delta(\rho, z) + \hat{\epsilon}}{\rho} h_2, & \|z\| \leq |\rho|\chi; \end{cases}$$

$$h_1 = 2\|B\|\hat{L}\|z\|^2 + 2\|B\|\|z\|\omega(t),$$

$$h_2 = \|z\|\|\bar{g}(z)\|; \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon} = \begin{cases} 0, & \|z\| > |\rho|\chi; \\ 2\beta_2 \|z\|\|PB\|\bar{g}(z), & \|z\| \leq |\rho|\chi; \end{cases} \quad (10)$$

$$\dot{L} = \begin{cases} 2\lambda \|B\|\|z\|^2, & \|z\| > |\rho|\chi; \\ 2\chi\beta_3 \|z\|\|PB\|\bar{g}(z)\Delta(\rho, z), & \|z\| \leq |\rho|\chi. \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\delta, \lambda, \beta_k (k = 1, 2, 3)$ 是可调的正值参数; χ 是一个满足 $\{z\|\|z\| \leq \chi, z \in R^n\}$ 的可调设计正值参数. 正值函数 $\Delta(\rho, z)$ 的定义如下:

$$\Delta(\rho, z) = \frac{(1 + |\rho|)\bar{g}\left(\frac{z}{\rho}\right) + \bar{g}(z)}{g(z)g\left(\frac{z}{\rho}\right)}. \quad (12)$$

定理 1 如果假设 1~假设 3 成立, 则在控制器 (8) 和参数更新律 (9)~(11) 的作用下, 状态向量 Z 有界且使系统 (1) 的状态向量 $z \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$.

证明 分两种情形来证明.

情形 1: $\|z\| > |\rho|\chi$.

首先证明状态 Z 能够在有限时间内到达集合 $D = \{Z\|\|z\| \leq |\rho|\chi\}$. 记 $s = \|z\|^2 - \rho^2\chi^2 + 0.5\tilde{\epsilon}^2 + 0.5\lambda^{-1}\tilde{L}^2$, 容易看出这种情形意味着 $s > 0$. 考虑关于 s 的正定函数 $\bar{V} = 0.5s^2$, 利用式 (8)~(11), 沿着扩展闭环系统 (7)~(11), \bar{V} 关于时间 t 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{\bar{V}} &= s(\dot{z}^T z + z^T \dot{z} - 2\rho\dot{\rho}\chi^2 + \tilde{\epsilon}\dot{\tilde{\epsilon}} + \lambda^{-1}\tilde{L}\dot{\tilde{L}}) \leq \\ & s\{\lambda_{\max}(A^T + A)\|z\|^2 + 2\|z\|\|B\|\|L\|z\| + \\ & \omega(t)\} - 2\rho\dot{\rho}\chi^2 + \lambda^{-1}\tilde{L}\dot{\tilde{L}} = -\delta s. \end{aligned} \quad (13)$$

由文献 [15] 的结果知, 不等式 (13) 意味着 Z 能够在有限时间内到达滑模面 $s = 0$, 注意到 $\{Z|s = 0\} \subseteq D$, 因此在情形 1 时 Z 能够在有限时间内到达 D .

情形 2: $\|z\| \leq |\rho|\chi$.

考虑正定函数

$$V(t) = z^T Pz + 0.5\beta_1^{-1}\rho^2 + 0.5\beta_2^{-1}\tilde{\epsilon}^2 + 0.5\beta_3^{-1}\tilde{L}^2,$$

如果假定 1~假设 3 成立, 则 $V(t)$ 沿着扩展闭环系统 (7)~(11) 关于时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -z^T Qz + 2z^T PBg(z) \left[\frac{-Kz + \xi(t)}{g(z)} + u_1 \right] + \\ & 2z^T PBg(z) \left[\frac{f(z)}{g(z)} + u_2 \right] + \\ & \beta_1^{-1}\rho\dot{\rho} + \beta_2^{-1}\tilde{\epsilon}\dot{\tilde{\epsilon}} + \beta_3^{-1}\tilde{L}\dot{\tilde{L}}. \end{aligned} \quad (14)$$

利用控制器 (8), 可以得到

$$\begin{aligned} 2z^T PBg(z) \left[\frac{(g(z)-1)|Kz| + \xi(t)}{g(z)} + v \right] \leq \\ 2|z^T PB|[(\bar{g}(z)+1)|Kz| + \omega(t)] \left[1 - \frac{g(z)}{g(z)} \right] \leq 0. \end{aligned} \quad (15)$$

同时也可以得到

$$\begin{aligned}
 2z^T PBg(z) \left[\frac{f(z)}{g(z)} + u_2 \right] &= \\
 2z^T PBg(z) \left[\frac{f(z)}{g(z)} - F\left(\frac{z}{\rho}\right) \right] &\leq \\
 2\|PB\| \|z\| [(\hat{L} - \tilde{L})\chi\Delta(\rho, z) + \hat{\varepsilon} - \tilde{\varepsilon}]. &\quad (16)
 \end{aligned}$$

由式(14)~(16)可以得到

$$\dot{V}(t) \leq -z^T Qz. \quad (17)$$

不等式(17)意味着 Z 是有界的. 再由式(7)和(8)及假定2和假设3, 容易看出 $z(t)$ 在情形2时也是有界的, 因此利用Barbalat引理^[15]可得 $z \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$. 综合情形1和情形2的证明可知定理1的结论成立. \square

注4 参数更新律(9)~(11)具有以下特点: 1)更新律(10)和(11)说明估计值 $\hat{\varepsilon}(t)$ 和 $\hat{L}(t)$ 在 $[0, +\infty]$ 上是单调增加的, 因此初始条件 $\hat{\varepsilon}(0) > 0$ 和 $\hat{L}(0) > 0$ 能够保证 $\hat{\varepsilon}(t) > 0$ 和 $\hat{L}(t) > 0$, 意味着初始条件 $\rho(0) \neq 0$ 能够保证在 $\{t \mid \|z\| > |\rho(t)|\chi\}$ 内使 $\rho(t) \neq 0$; 2) 如果状态向量 $z(t)$ 的大小随时间增加, 则由参数更新律(9)可以看出 $\rho^2(t)$ 也增加, 并且能够在有限时间内使得 $\|z(t)/\rho(t)\|$ 落入 $\{z \mid \|z\| \leq |\rho(t)|\chi\}$; 3) 在实际应用中, 为了保证 $\hat{\varepsilon}(t)$ 和 $\hat{L}(t)$ 有界, 需要选择较小的可调参数 $\lambda, \beta_2, \beta_3$.

4 仿真算例

考虑直线型一级倒立摆^[1]

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = f(z) + g(z)u + d. \quad (18)$$

其中: $z = (x_1, x_2)^T$, x_1 表示摆角; u 表示控制力; $d = d(t)$ 表示外部干扰. 小车质量 $M = 1 \text{ kg}$, 摆杆质量 $m = 0.1 \text{ kg}$, 摆杆半长 $l = 0.5 \text{ m}$. 本文中假定连续函数 $f(z)$, $g(z)$ 和 $d(t)$ 是未知的.

考虑模糊输入论域 $W = \left[-\frac{22}{45}\pi, \frac{22}{45}\pi\right]$, 其中 $\frac{22}{45}\pi = 88^\circ$. 假定 $0.04 \leq g(z) \leq 1.5$, 根据经验, 利用两个开集合 U_1 和 U_2 将论域 W 覆盖 (U_1 和 U_2 可以分别理解为“小角度”和“大角度”范畴): $U_1 = \{z \mid \|z\| < \pi/10\}$, $U_2 = \{z \mid 0.3 < \|z\| < \pi/2\}$.

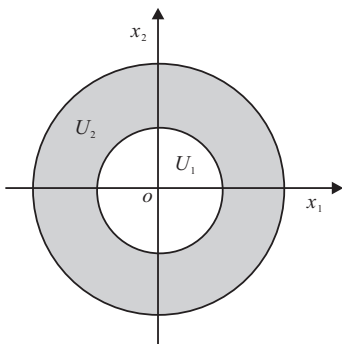


图1 开覆盖“小角度”和“大角度”示意图

根据文献[14]中的方法, 可得到从属于 U_1 和 U_2 的光滑单位分解, 即

$$\alpha_1 = \frac{\theta_1(z)}{\theta_2(z)[1 + h(\|z\| - r_1)\theta_1(z)] + \theta_1(z)}, \quad (19a)$$

$$\alpha_2 = \frac{\theta_2(z)[1 + h(\|z\| - r_1)\theta_1(z)]}{\theta_2(z)[1 + h(\|z\| - r_1)\theta_1(z)] + \theta_1(z)}. \quad (19b)$$

其中

$$\theta_1(z) = \frac{h(r_1 - \|z\|)}{h(r_1 - \|z\|) + h(\|z\| - r_1)},$$

$$\theta_2(z) = \frac{h(r_2 - \|z\|)}{h(r_2 - \|z\|) + h(\|z\| - r_2)},$$

$$r_1 = \frac{\pi}{10}, \quad r_2 = \frac{\pi}{2},$$

可调参数 $0 < r_1, r_2 < 1$; 光滑函数

$$h(\mu) = \begin{cases} 0, & \mu \leq 0; \\ \exp(-\mu^{-1}), & \mu > 0. \end{cases}$$

下面给出分别以 U_1 和 U_2 为论域的模糊逻辑系统规则:

FS1_R:

If x_1 is “Zero” Then $y_1 = 0$;

If x_1 is “Positive-zero” Then $y_1 = 0.09x_2^2$;

If x_1 is “Negative-zero” Then $y_1 = -0.09x_2^2$.

FS2_R:

If x_1 is “Positive-big” Then $y_1 = 0.01 + 0.02x_2^2$;

If x_1 is “Mean-big” Then $y_1 = 0.1x_2^2$;

If x_1 is “Negative-big” Then $y_1 = 10x_1 - 0.09x_2^2$.

参照文献[1], 上述模糊集合的隶属函数选取为

$$\mu_{\text{Zero}}(x_1) = \exp(-x_1^2),$$

$$\mu_{\text{Negative-zero}}(x_1) = \exp\left(-\left(x_1 + \frac{\pi}{36}\right)^2\right),$$

$$\mu_{\text{Positive-zero}}(x_1) = \exp\left(-\left(x_1 - \frac{\pi}{36}\right)^2\right),$$

$$\mu_{\text{Positive-big}}(x_1) = \exp\left(-\left(x_1 - \frac{22}{45}\pi\right)^2\right),$$

$$\mu_{\text{Mean-big}}(x_1) = \exp(-(x_1 - 1)^2),$$

$$\mu_{\text{Negative-big}}(x_1) = \exp\left(-\left(x_1 + \frac{22}{45}\pi\right)^2\right).$$

仿真中, 倒立摆的精确模型取自文献[1], 参数分别取为 $\delta = 50$, $\chi = 10$, $\lambda = 0.001$, $\beta_1 = 0.002$, $\beta_2 = 0.00001$, $\beta_3 = 0.00001$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $d(t) = 0.5 \times \text{square}(t)$; 状态初始值 $x_1(0) = 1.5 \approx 85^\circ$, $x_2(0) = 0$, $\rho(0) = 1$, $\hat{\varepsilon}(0) = 0.8$, $\hat{L}(0) = 0.3$. 图2和图3为仿真结果.

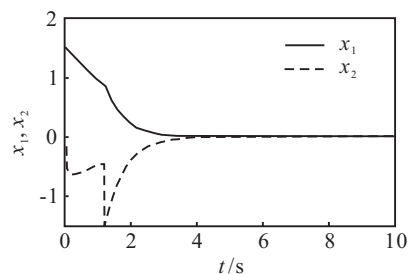


图2 初始值 $x_1(0) \approx 85^\circ$ 时状态 z 的响应曲线

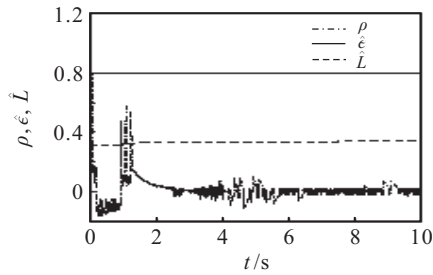


图3 参数 $\rho, \hat{\epsilon}, \hat{L}$ 的响应曲线

注5 以上仿真结果表明了本文方法的有效性. 另外, 文献[1, 6]通过使用具有较多规则的T-S型模糊逻辑系统使倒立摆(18)稳定, 与其相比较, 本文只用了6条规则, 增加了语言可解释性, 因此本文的方法好于文献[1,6]中的方法.

5 结 论

利用开覆盖可以将被控系统的状态域划分为若干(有重叠)局部区域, 与整体情形相比, 在每一个局部区域上构造的模糊逻辑系统一般具有较少的模糊规则, 因而也具有好的语言可解释性. 通过使用从属于开覆盖的单位分解, 能够将这些局部模糊逻辑系统进行适当的粘合而产生一种函数逼近器, 与通常在整体情况下构造的模糊逻辑系统相比, 这种函数逼近器不仅具有万能逼近性质, 而且也能保持语言的可解释性. 进一步, 如果将适当的参数植入这种函数逼近器中, 则使用这种形式的函数逼近器可以为某些非线性不确定系统设计自适应镇定控制器.

参考文献(References)

- [1] Wang L X. A course in fuzzy systems and control[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1997.
- [2] Tong S C, Li Q G, Chai T Y. Fuzzy adaptive control for a class of nonlinear systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 101(1): 31-39.
- [3] Diaz D V, Tang Y. Adaptive robust fuzzy control of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 2004, 34(3): 1596-1601.
- [4] Chen B, Liu X P, Liu K F, et al. Direct adaptive fuzzy control of nonlinear strict-feedback systems[J]. Automatica, 2009, 45(6): 1530-1535.
- [5] Marwan B. A high interpretable form of sugeno inference systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1999, 7(6): 687-696.
- [6] Cococcioni M, Lazzarini B, Marcelloni F. Estimating the concentration of optically active constituents of seawater by Takagi-Sugeno models with quadratic rule consequents[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(10): 2846-2860.
- [7] Park B J, Pedrycz W, OH S K. A design of genetically oriented fuzzy relation neural networks(FrNNs) based on the fuzzy polynomial inference scheme[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2009, 17(6): 1310-1323.
- [8] Castro J L, Delgado M. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximators[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 1996, 26(1): 149-153.
- [9] Wong L K, Frank H F, Leung Peter K S Tam. Lyapunov-function-based design of fuzzy logic controllers and its application on combining controllers[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45(3): 502-509.
- [10] Shang-Ming Zhou, John Q Gan. Low-level interpretability and high-level interpretability: A unified view of data-driven interpretable fuzzy system modelling[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159(23): 3091-3131.
- [11] Wang L X. Universal approximation by hierarchical fuzzy systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 93(2): 223-230.
- [12] Kosko B. Fuzzy Engineering[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1997.
- [13] Boothby W. An introduction to differentiable manifolds and Riemannian geometry[M]. Academic Press INC, 1986.
- [14] Wang Yinhe, Li Zhiyuan, Zhang Siying. Approximation property of partition of unity and its applications[J]. J of Control Theory and Applications, 2004, 2(3): 267-275.
- [15] Slotine J E. Applied nonlinear control[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.
- [16] Chi-Hsu Wang, Han-Leih Liu, Tsung-Chih Lin. Direct adaptive fuzzy-neural control with state observer and supervisory controller for unknown nonlinear dynamical systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2002, 10(1): 39-49.