

区间Ⅱ型变论域自适应模糊逻辑控制器

赵国亮^{1,2}, 张永立³, 李洪兴^{*1}

(1. 大连理工大学 电子信息与电气工程学部, 辽宁 大连 116024;
2. 黑龙江科技学院 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150027;
3. 天津职业技术师范大学 自动化与电气工程学院, 天津 300222)

摘要: 在变论域自适应模糊控制方法的基础上, 结合Ⅱ型模糊集较强的鲁棒性和处理不确定性问题的能力, 设计了一种区间Ⅱ型变论域自适应模糊逻辑控制器. 为了使控制器保持在最优状态, 采用粒子群优化算法来优化隶属度函数; 然后由 Lyapunov 方法证明了区间Ⅱ型变论域自适应模糊逻辑控制器的稳定性. 对 Duffing 系统和 1 维 6 卷混沌系统的仿真表明, 区间Ⅱ型变论域自适应模糊逻辑控制器可以很好地跟踪参考信号, 较之变论域模糊逻辑控制器, 其可以有效地防止抖震且控制量较小.

关键词: 自适应模糊控制; 变论域; 区间Ⅱ型模糊逻辑系统

中图分类号: TP273.2 **文献标志码:** A

0 引言

变论域自适应模糊控制思想最早在文献[1,2]中被提出, 随后, 文献[3,4]详细地研究了儿种类型的变论域自适应模糊逻辑控制器, 为变论域自适应模糊逻辑控制器的应用奠定了理论基础. 变论域自适应模糊逻辑控制器能很好地处理非线性系统控制问题, 可使控制效果得到大幅度提高, 是一种强有力的非线性控制方法^[5].

1975 年, Zadeh 首次提出Ⅱ型模糊集的概念. 到目前为止, Ⅱ型模糊逻辑系统(type-2 fuzzy logic system, T2-FLS)已成功用于许多领域, 例如时间序列预测、通信和网络、模糊聚类、自主机器人控制^[6]. Ⅱ型模糊逻辑系统在传统模糊系统的基础上进行了维数扩展, 其通过控制Ⅱ型模糊逻辑控制器(type-2 fuzzy logic controller, T2-FLC)的另一维度上的隶属度函数, 在噪声等不确定环境下, 能够描述更高层次上的不确定性. Ⅱ型模糊逻辑系统提高了模糊逻辑控制器处理复杂条件下不确定性问题的能力.

通常情况下, 对于非线性复杂系统, Ⅱ型模糊逻辑控制器较传统模糊逻辑控制器更有效. 然而, 在大多数情形下, 没有经过优化的 T2-FLC 还不能得到最优的控制效果. 因此出现了采用各种最优算法离线优化 T2-FLC 的方法, 并成为设计 T2-FLC 的一个重要手段^[6-8]. Wu 等^[8]提出利用遗传算法离线优化区间Ⅱ型模糊逻辑控制器(IT2-FLC), 得到的优化系统可以消除控制器的持续震荡. 遗传算法还被文献[6]用来优化自主机器人的跟踪控制器. 文献[8,9]利用 IT2-FLC 获得了比相应 T1-FLC 和Ⅰ型模糊神经网络(type-1 fuzzy-neural network)控制器更好的控制性能. 为了减少降型算法导致的不确定信息的损失问题, 各种智能优化算法被用于优化Ⅱ型模糊集^[10,11], 文献[10]采用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法对降型算法进行二次优化, 减小了近似降型算法对 WM(Wu-Mendel)算法的逼近误差. 为了便于计算, 减少降型的计算量, 常使用区间值来设计Ⅱ型模糊逻辑控制器. Ⅱ型模糊逻辑控制器展现出了比Ⅰ型模

糊逻辑控制器更强的鲁棒性^[6,7]. 更多关于 II 型模糊系统的研究与综述见文献[12-14].

本文把文献[5]中的变论域模糊逻辑控制器(variable universe fuzzy logic controller, VU-FLC)改进为区间 II 型变论域模糊逻辑控制器(interval type-2 variable universe fuzzy logic controller, IT2-VU-FLC), 并利用粒子群算法优化 II 型隶属度函数.

1 变论域模糊逻辑系统

设 $X_i \in [-E, E] (i = 1, 2, \dots, p)$ 分别为输入变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 的论域, $Y = [-U, U]$ 为输出变量 y 的论域; 对于输入 $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_p \in X_p$, 输出 $y \in Y$. 假设模糊规则库有 M 条规则. 建立从 $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_p$ 到 Y 上的 T2 型模糊关系, 可以表示成如下形式:

$$\begin{aligned} R^l: & \text{ IF } X_1 \text{ is } \tilde{F}_1^l \text{ and } \dots \text{ and } X_p \text{ is } \tilde{F}_p^l \\ & \text{ THEN } y \text{ is } \tilde{G}^l, l = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\tilde{F}_j^l$ 是前件的 II 型模糊集 ($j = 1, 2, \dots, p$), $\tilde{G}^l$ 是后件的 II 型模糊集, M 是规则集的个数.

在推理的过程中, 涉及 II 型模糊集的交和并以及关系的合成运算, 得到的结果是一个 II 型模糊集, 需要通过降型来得到清晰化输出^[7]. 常用的一种方法为

$$\begin{aligned} Y_{\cos}(Y^1, \dots, Y^M, F^1, \dots, F^M) &= [y_l, y_r] = \\ & \int_{y^1} \dots \int_{y^M} \int_{f^1} \dots \int_{f^M} 1 / \frac{\sum_{i=1}^M f^i y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $Y_{\cos}$ 是由端点 y_l, y_r 决定的区间集, $f^i \in F^i = [\underline{f}^i, \bar{f}^i]$, $\underline{f}^i = \mu_{\tilde{F}_1^i}(x_1) \times \dots \times \mu_{\tilde{F}_p^i}(x_p)$, $\bar{f}^i = \bar{\mu}_{\tilde{F}_1^i}(x_1) \times \dots \times \bar{\mu}_{\tilde{F}_p^i}(x_p)$. 同样, 对后件有 $y^i \in Y^i$, $Y^i = [y_l^i, y_r^i]$.

IT2-FLC 是一个 $\mathcal{R}^p \rightarrow \mathcal{R}^1$ 的映射. 通常由 5 部分构成: 模糊化、规则库、推理机、降型和解模糊化. 经过上述 5 个步骤的运算后将会得到一个清晰输出.

对任意值 $y \in Y_{\cos}$, 有

$$y = \frac{\sum_{i=1}^M f^i y^i}{\sum_{i=1}^M f^i}$$

其中 y 是关于 y^i 的单调递增函数. 左端点 y_l 和右端点 y_r 可以用模糊基函数表示为

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^M f_l^i y_l^i}{\sum_{i=1}^M f_l^i} = \sum_{i=1}^M y_l^i \xi_l^i \quad (3)$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^M f_r^i y_r^i}{\sum_{i=1}^M f_r^i} = \sum_{i=1}^M y_r^i \xi_r^i \quad (4)$$

其中 $\xi_l^i = f_l^i / \sum_{i=1}^M f_l^i$, $\xi_r^i = f_r^i / \sum_{i=1}^M f_r^i$.

记基函数向量 $\xi_l = (\xi_l^1 \quad \xi_l^2 \quad \dots \quad \xi_l^M)$, $\xi_r = (\xi_r^1 \quad \xi_r^2 \quad \dots \quad \xi_r^M)$. 令 $\mathbf{y}_l^T = (y_l^1 \quad y_l^2 \quad \dots \quad y_l^M)$, $\mathbf{y}_r^T = (y_r^1 \quad y_r^2 \quad \dots \quad y_r^M)$, 则式(3)和(4)可以重写为

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^M f_l^i y_l^i}{\sum_{i=1}^M f_l^i} = \sum_{i=1}^M y_l^i \xi_l^i = \mathbf{y}_l^T \xi_l \quad (5)$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^M f_r^i y_r^i}{\sum_{i=1}^M f_r^i} = \sum_{i=1}^M y_r^i \xi_r^i = \mathbf{y}_r^T \xi_r \quad (6)$$

反模糊化后的输出值为

$$\begin{aligned} y(\underline{x}) &= \frac{y_l + y_r}{2} = \frac{1}{2} (\mathbf{y}_l^T \xi_l + \mathbf{y}_r^T \xi_r) = \\ & \frac{1}{2} (\xi_l^T \mathbf{y}_l + \xi_r^T \mathbf{y}_r) \end{aligned} \quad (7)$$

2 IT2 型变论域自适应模糊逻辑控制器设计

文献[4,5]讨论了一类如下的 n 阶连续非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}^{(n)} &= f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + bu \\ y &= x \end{aligned} \quad (8)$$

这里 f 是一个未知的非线性连续函数, b 是一个未知常量; 满足条件 $|f(\mathbf{x})| \leq f_0(\mathbf{x})$, $0 < b_1 < b < b_2$, 其中 f_0, b_1, b_2 分别为已知的连续函数和参量. 置 $\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}_r(t) - \mathbf{y}(t)$, 记 $\mathbf{e} = (e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_n)^T = (e \quad \dot{e} \quad \dots \quad e^{(n-1)})^T$. 添加反馈控制器

$$u_c(t) = U \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n A_{ij} \left(\frac{e_i(t)}{\alpha_i(e_i(t))} \right) y_i \quad (9)$$

其中 $\alpha_i(e_i(t)) = 1 - 0.99\exp(-\alpha_i e_i^2(t))$, α_i 和 U 是设计参数.

选择 Hurwitz 多项式:

$$h(s) = s^n + k_1 s^{n-1} + \cdots + k_{n-1} s + k_n \quad (10)$$

该多项式的根均位于左半平面, 记多项式的系数 $\mathbf{K} = (k_n \ k_{n-1} \ \cdots \ k_1)^\top$, 误差动态方程可表示为

$$\dot{\mathbf{e}}^{(n)} = -\mathbf{K}^\top \mathbf{e} \quad (11)$$

若理想的控制记为 u^* , 则 u^* 可以写成

$$u^* = \frac{1}{b}(-f(\mathbf{x}) + r^{(n)} + \mathbf{K}^\top \mathbf{e}) \quad (12)$$

其中 $r^{(n)}$ 为参考输入的 n 阶导数.

选取形如式(9)的控制器, 再配置一个补偿器 $u_s(t)$, 则控制器具有如下形式:

$$u(t) = u_c(t) + u_s(t) \quad (13)$$

再由式(8)、(12)和(13), 可得到误差方程

$$\dot{\mathbf{e}}^{(n)} = -\mathbf{K}^\top \mathbf{e} + b(u^* - u_c - u_s) \quad (14)$$

上述误差方程还可以写成等价的向量形式:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B}(u^* - u_c - u_s) \quad (15)$$

其中 $\mathbf{B} = (0 \ \cdots \ 0 \ b)^\top$,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -k_n & -k_{n-1} & -k_{n-2} & \cdots & -k_1 \end{pmatrix}$$

定理 1 选取补偿器

$$u_s(t) = \begin{cases} 0; & |e^\top \mathbf{PB}| \tilde{f}_0/b < e^\top \mathbf{Q}e/2 \\ \text{sgn}(e^\top \mathbf{PB}) \tilde{f}_0/b; & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\tilde{f}_0 = |f_0| + |r^{(n)}| + |\mathbf{K}^\top \mathbf{e}| + b|u_c|$. 则误差方程(15)是一个渐近稳定系统.

证明 构造能量函数 $V_1(\mathbf{e}) = \frac{1}{2}e^\top \mathbf{P}e$, 对时间 t 求导并利用 Lyapunov 方程 $\mathbf{A}^\top \mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(\mathbf{e}) &= -\frac{1}{2}e^\top \mathbf{Q}e + e^\top \mathbf{PB}(u^* - u_c - u_s) \leq \\ &= -\frac{1}{2}e^\top \mathbf{Q}e + |e^\top \mathbf{PB}| \tilde{f}_0/b - e^\top \mathbf{PB}u_s \end{aligned}$$

再由 u_s 的取法可知 $\dot{V}_1(\mathbf{e}) \leq -\frac{1}{2}e^\top \mathbf{Q}e \leq 0$.

此外, 文献[5]利用积分调节原理设计了作用于推理后件的伸缩因子以提高系统的鲁棒性.

同样, 给 $u_c(t)$ 增加一个伸缩因子, 记为

$$u_c(\mathbf{e}, \beta) = \beta(t)u_c(t) \quad (17)$$

由式(5)知 $\beta(t)$ 有界, 即 $|\beta(t)| \leq M_\beta$. 假设 β 的最优值 β^* 满足下式:

$$\beta^* = \arg \min \{ \|u_c(\mathbf{e}, \beta) - u^*\|, \ |\beta| \leq M_\beta \} \quad (18)$$

构造残差函数

$$\gamma(t) = u_c(\mathbf{e}, \beta^*) - u^*(t) \quad (19)$$

这时误差方程为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B}(u^* - u_c(\mathbf{e}, \beta) - u_s) = \\ &= \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B}[u_c(\mathbf{e}, \beta^*) - \mathbf{B}u_c(\mathbf{e}, \beta)] - \mathbf{B}\gamma(t) - \\ &= \mathbf{B}u_s = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B}\eta(t)u_c(t) - \mathbf{B}\gamma(t) - \mathbf{B}u_s \end{aligned}$$

其中 $\eta(t) = \beta^* - \beta(t)$. 再构造能量函数

$$V_2(\mathbf{e}) = \frac{1}{2}e^\top \mathbf{P}e + \frac{1}{2K_1}\eta^2(t) \quad (20)$$

其中 K_1 为一个常数. 若自适应律选择为

$$\dot{\eta}(t) = \begin{cases} -K_1 e^* u_c(t); \\ \quad |\beta| = M_\beta \text{ 且 } e^* u_c(t)\beta \leq 0 \\ \quad \text{或 } |\beta| < M_\beta \\ 0; \quad |\beta| \geq M_\beta \text{ 且 } e^* u_c(t)\beta > 0 \end{cases} \quad (21)$$

其中 $e^* = e^\top \mathbf{PB}$. 可证若 $\gamma(t)$ 平方可积, 即

$$\int_0^\infty \gamma^2(t) dt < \infty$$

则有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}(t)\| = 0$.

将 $V_2(\mathbf{e})$ 对 t 求导, 并利用 Lyapunov 方程 $\mathbf{A}^\top \mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} = -\mathbf{Q}$ 和式(20)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(\mathbf{e}) &= -\frac{e^\top \mathbf{Q}e}{2} + \frac{\eta(t)\dot{\eta}(t)}{K_1} + \\ &= e^\top \mathbf{PB}(\eta(t)u_c(t) - u_s - \gamma(t)) = \\ &= -\frac{e^\top \mathbf{Q}e}{2} - e^\top \mathbf{PB}(u_s + \gamma(t)) + \\ &= \frac{1}{K_1}\eta(t)(\dot{\eta}(t) + K_1 e^\top \mathbf{PB}u_c(t)) \end{aligned}$$

由 u_s 的选取可知 $e^\top \mathbf{PB}u_s \geq 0$, $\gamma(t)$ 为残差, 只要 $\gamma(t)$ 足够小, 由自适应律(21)就可以使

$$-\frac{e^\top \mathbf{Q}e}{2} - e^\top \mathbf{PB}(u_s + \gamma(t)) \leq 0 \quad (22)$$

也即

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{e}) &\leq -\frac{1}{2}\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\mathbf{P}e\mathbf{P}^2 - e^\top \mathbf{PB}\gamma(t) \leq \\ &= -\frac{1}{2}\lambda_{\min}(\mathbf{Q})\|\mathbf{e}\|^2 - \frac{1}{2}(\|\mathbf{e}\|^2 + \end{aligned}$$

$$2e^T \mathbf{P} \mathbf{B} \gamma(t) + |\mathbf{P} \mathbf{B} \gamma(t)|^2 +$$
$$\frac{1}{2} (|\mathbf{P} \mathbf{B} \gamma(t)|^2) \leq$$
$$-\frac{1}{2} (\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) - 1) \|e\|^2 + \frac{1}{2} |\mathbf{P} \mathbf{B} \gamma(t)|^2$$

(23)

其中 $\lambda_{\min}(\mathbf{Q})$ 为正定矩阵 $\mathbf{Q}$ 的最小特征值. 由 $\mathbf{Q}$ 的任意性, 总可以选择适当的 $\mathbf{Q}$, 使得满足条件:
 $\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) > 1$. 从式(23)中可以估计出

$$\int_0^\infty \|e(\tau)\|^2 d\tau \leq \frac{1}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) - 1} |\mathbf{P} \mathbf{B}|^2 \times$$
$$\int_0^\infty \gamma^2(\tau) d\tau +$$
$$\frac{2(|V(0)| + |V(+\infty)|)}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) - 1} < \infty$$

由此便可以得出 $e \in L_2$, 再由误差方程(20)可得
 $\dot{e} \in L_2$. 最后, 利用 Barbalat 定理^[15]得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e\| = 0$.

3 仿真与分析

考虑 Duffing 强迫振动系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -0.1x_2 - x_1^3 + 12 \cos t + u(t) \end{cases} \quad (24)$$

仿真使用的参数均与文献[5]设置相同. 输入论域 e 和 $\dot{e}$ 均划分成 5 个区间 II 型模糊集(常均值, 方差不确定的高斯型隶属函数, 记为 $\mu_i(i = 1, 2, 3, 4, 5)$), 分别记为 NB、NM、ZO、PM、PB. 图 1、2 给出了对误差和误差变化率的论域划分, 分别用 5 个 II 型模糊集表示. 常均值不确定方差的高斯型隶属函数由参数 δ_1, δ_2 决定. 给定 $5 \times 5 = 25$ 条规则, 输出均使用区间值表示.

选取具有快速平稳特性的误差绝对值乘以时间的积分(ITAE)作为优化的目标函数, 最优准则为

$$ITAE = \int_0^t \tau \|e(\tau)\| d\tau$$

(25)

粒子群优化算法采用的参数设置如下: 种群规模设为 20; 最大迭代次数为 2 000; 加速度常数是用来表征问题搜索过程中社会学习和自身学习的均衡性, 认为无偏好, 设为 $c_1 = 2, c_2 = 2$. 迭代过程保持种群规模和加速度常数不变, 惯性权重随迭代次数从 0.9 线性递减到 0.4.

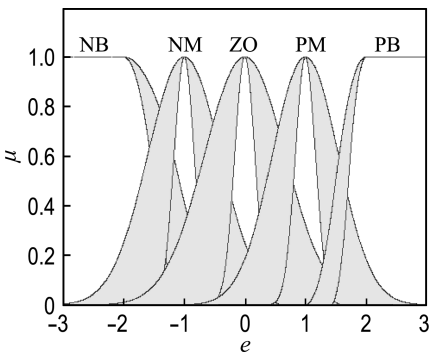


图 1 e 的隶属度函数

Fig. 1 MFs of e

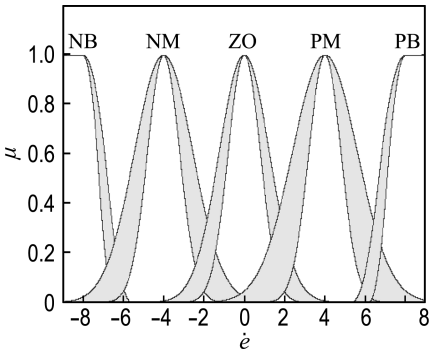


图 2 e-dot 的隶属度函数

Fig. 2 MFs of e-dot

优化的参数为 II 型隶属函数的方差 δ_1, δ_2 , 优化后的隶属度函数见表 1.

IT2-FLC 的后件使用特殊的 TSK 模型, 即对于后件规定 $\underline{y}_k = \overline{y}_k$. 规则库由表 2 给出.

表 1 优化后的 IT2-FLC 的隶属度函数
Tab. 1 Optimized MFs of the interval type-2 FLC

	e				
	NB	NM	ZO	PM	PB
m	−2	−1	0	1	2
δ ₁	−1	0.166 7	0.166 7	0.166 7	1
δ ₂	−0.053 1	0.916 5	1.052 1	0.406 4	1.505 2

	e-dot				
	NB	NM	ZO	PM	PB
m	−8	−4.8	0	4.8	8
δ ₁	−6.400 0	0.8	0.8	0.8	5.333 3
δ ₂	−5.490 9	1.629 0	0.977 4	0.873 2	5.399 3

根据上述模糊规则编程可以得到 IT2-VU-FLC, 使用该控制器对参考信号 $r(t) = \sin 3t$ 进行仿真跟踪, 图 3 给出了 IT2-VU-FLC 与 VU-FLC 的仿真比较曲线.

表 2 IT2-FLC 的规则库

Tab. 2 Rule base of interval type-2 FLC

	<i>e</i>				
	NB	NM	ZO	PM	PB
NB	−3	−2	−1	0	0
NM	−2	−2	−2	0	1
ZO	−2	−1	0	1	2
PM	−1	0	1	2	2
PB	0	0	1	2	3

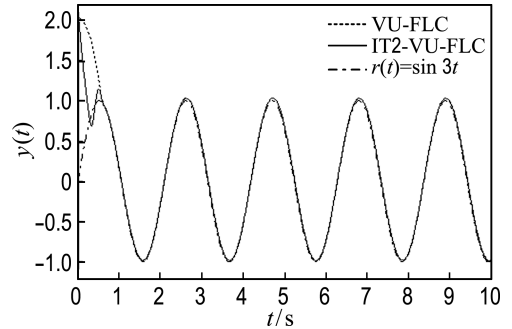


图 3 $r(t)=\sin 3t$ 时的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of reference $r(t)=\sin 3t$

从图 3 可以看出,IT2-VU-FLC 的超调更小,且图 4 所示的跟踪正弦曲线的控制量比 VU-FLC 要小.

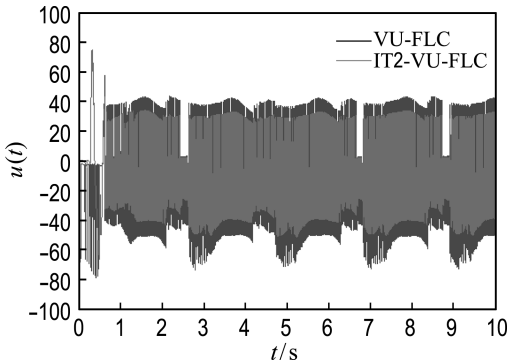


图 4 $r(t)=\sin 3t$ 时的控制曲线

Fig. 4 Control curves of reference $r(t)=\sin 3t$

同时,本文设计的 IT2-VU-FLC 的抗干扰性能更好,具有鲁棒性.

为了进一步验证控制方案的有效性,以饱和函数级数生成的多卷混沌系统^[16]为例,对 IT2-VU-FLC 进行仿真.1 维 n 卷混沌系统定义如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = -ax_1 - bx_2 - cx_3 + d_1 f(x_1; k_1, h_1, p_1, q_1) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $f(\cdot)=f(x;k,h,p,q)$ 为饱和函数级数,

$$f(\cdot)=\begin{cases} (2q+1)k; & x>qh+1 \\ k(x-ih)+2ik; & |x-ih|\leq 1, -p\leq i\leq q \\ (2i+1)k; & -p\leq i\leq q-1, \\ & ih+1<x<(i+1)h-1 \\ -(2p+1)k; & x<-ph-1 \end{cases} \quad (27)$$

图 5 给出了一个由系统(26)生成的 6 卷混沌吸引子,其中 $i\in\mathbf{N},a=b=c=d_1=0.7,p_1=q_1=2,k_1=9,h_1=18$.

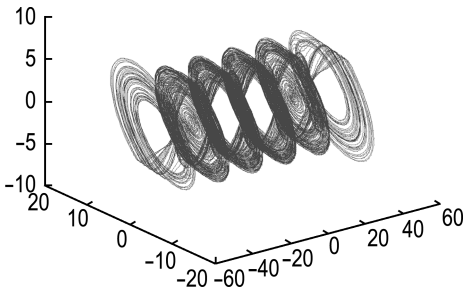


图 5 6 卷混沌吸引子

Fig. 5 6-Scroll chaotic attractors

对参考信号 $r(t)=\sin 3t$ 进行跟踪,从图 6 可以看出 IT2-VU-FLC 对受控系统的输出能够跟踪给定的参考信号,达到控制目标的目的且控制量变化不大.

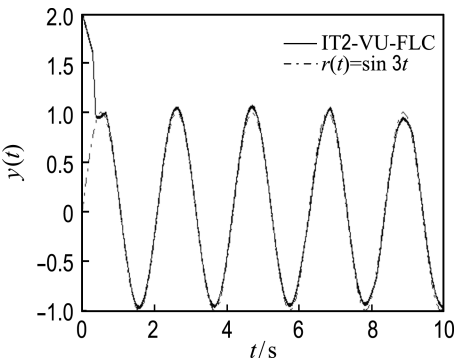


图 6 采用 IT2-VU-FLC 的输出 $y(t)$ 与参考信号 $r(t)$

Fig. 6 Trajectories of $y(t)$ and reference $r(t)$ by IT2-VU-FLC

图 7 为采用经典模糊集的 VU-FLC 对该参考信号进行跟踪的结果,误差和控制量都比 IT2-

VU-FLC 大.

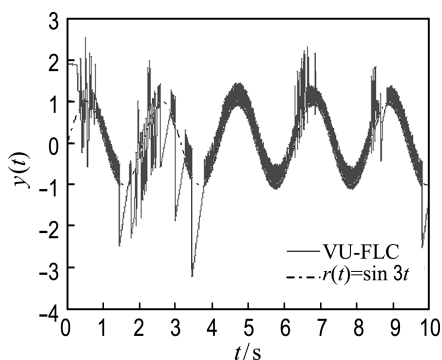


图7 采用 VU-FLC 的输出 $y(t)$ 与参考信号 $r(t)$

Fig. 7 Trajectories of $y(t)$ and reference $r(t)$ by VU-FLC

从控制量来看,由于采用区间Ⅱ型模糊集设计的 IT2-VU-FLC 较 VU-FLC 有更强的抗扰动能力,当跟踪信号变化较快时会表现出较强的鲁棒性,在控制量较小的同时可以保证更好的控制品质(如图 8 所示).

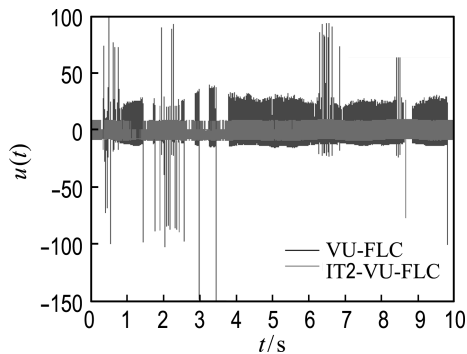


图8 控制输入

Fig. 8 The control inputs

4 结 论

本文在变论域自适应模糊控制方法的基础上引入Ⅱ型模糊集,利用Ⅱ型模糊集处理不确定问题能力强的特点,设计了一类区间Ⅱ型变论域自适应模糊控制器.仿真实验表明,该控制器使用较少的模糊规则就可以达到甚至超过变论域自适应模糊控制算法的精度,且有较好的自适应性和鲁棒性.对于处理非线性系统问题有一定的价值.

参考文献:

[1] 李洪兴. 从模糊控制的数学本质看模糊逻辑的成

功——关于“关于模糊逻辑似是而非的争论”的似是而非的介入[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(4): 1-14.

LI Hong-xing. To see the success of fuzzy logic from mathematical essence of fuzzy control—on the paradoxical success of fuzzy logic [J]. **Fuzzy Systems and Mathematics**, 1995, 9(4): 1-14. (in Chinese)

[2] 李洪兴. Fuzzy 控制的本质与一类高精度 Fuzzy 控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(6): 868-872.

LI Hong-xing. The essence of fuzzy control and a kind of fine fuzzy controller [J]. **Control Theory & Applications**, 1997, 14(6): 868-872. (in Chinese)

[3] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1999, 29(1): 32-42.

LI Hong-xing. Fuzzy controllers based on variable universe [J]. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 1999, 29(1): 32-42. (in Chinese)

[4] 李洪兴. 模糊控制的插值机理[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1998, 28(3): 259-267.

LI Hong-xing. Interpolation mechanism of fuzzy control [J]. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 1998, 28(3): 259-267. (in Chinese)

[5] 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2002, 32(2): 211-223.

LI Hong-xing, MIAO Zhi-hong, WANG Jia-yin. Variable universe adaptive fuzzy control on the quadruple inverted pendulum [J]. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 2002, 32(2): 211-223. (in Chinese)

[6] Martínez R, Castillo O, Aguilar L T. Optimization of interval type-2 fuzzy logic controllers for a perturbed autonomous wheeled mobile robot using genetic algorithms [J]. **Information Sciences**, 2009, 179(13): 2158-2174.

[7] WU Dong-rui, Wan Woei-wan. A simplified type-2 fuzzy controller for real-time control [J]. **ISA Transactions**, 2006, 15(4): 503-516.

[8] WU Dong-rui, Wan Woei-wan. Genetic learning and performance evaluation of interval type-2 fuzzy

- logic controllers [J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2006, **19**(8):829-841.
- [9] Castro J R, Castillo O, Melin P, *et al.* A hybrid learning algorithm for a class of interval type-2 fuzzy neural networks [J]. **Information Sciences**, 2009, **179**(13):2175-2193.
- [10] 曹江涛,李 平,刘洪海. 一种改进的区间二型模糊控制器设计[J]. 控制与决策, 2009, **24**(10):1597-1600.
- CAO Jiang-tao, LI Ping, LIU Hong-hai. Improved interval type-2 fuzzy logic controller [J]. **Control and Decision**, 2009, **24** (10): 1597-1600. (in Chinese)
- [11] Oscar C, Roberto S, Patricia M, *et al.* Evolutionary optimization of interval type-2 membership functions [C] // **Proceedings of the 2006 International Conference on Artificial Intelligence**. Las Vegas:CSREA Press, 2006.
- [12] Mendel J M. **Uncertain Rule-based Fuzzy Logic System:Introduction and New Directions** [M]. New Jersey:Prentice-Hall, 2001.
- [13] 潘永平,黄道平,孙文生. II 型模糊控制综述 [J]. 控制理论与应用, 2011, **28**(1):13-23.
- PAN Yong-ping, HUANG Dao-ping, SUN Wen-sheng. Overview of type-2 fuzzy logic control [J]. **Control Theory & Applications**, 2011, **28** (1): 13-23. (in Chinese)
- [14] Mendel J M. Advances in type-2 fuzzy sets and systems [J]. **Information Sciences**, 2007, **177**(1): 84-110.
- [15] 韩曾晋. 自适应控制 [M]. 北京:清华大学出版社, 1995.
- HAN Zeng-jin. **Self-adapted Control** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. (in Chinese)
- [16] LU Jin-hu, CHEN Guan-rong, YU Xing-huo, *et al.* Design and analysis of multi-scroll chaotic attractors from saturated function series [J]. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, 2004, **51**(12):2476-2490.

Interval type-2 variable universe adaptive fuzzy logic controller

ZHAO Guo-liang^{1,2}, ZHANG Yong-li³, LI Hong-xing^{*1}

- (1. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Faculty of Science, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150027, China;
3. School of Automation and Electrical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: The type-2 fuzzy sets are more robust, and have ability of tackling the uncertainty problems. Based on the merits of type-2 fuzzy sets and variable universe adaptive fuzzy control method, an interval type-2 variable universe adaptive fuzzy logic controller is proposed. The parameters of the interval type-2 membership functions are optimized by particle swarm optimization algorithm to get the most effective interval type-2 variable universe adaptive fuzzy logic controller. Lyapunov method is adopted to verify the stability of the proposed fuzzy logic controller. Finally, the tests of the proposed controller on the Duffing system and 1-dimension 6-scroll chaotic system are performed. Simulation results show that the interval type-2 variable universe adaptive fuzzy logic controller can track the trajectory well and reduce the chattering efficiently, at the same time can keep the control input small compared with variable universe fuzzy logic controller.

Key words: adaptive fuzzy control; variable universe; interval type-2 fuzzy logic system