

混沌系统的变论域模糊控制算法研究*

张巍巍[†] 王京 王慧 赵云涛

(北京科技大学, 高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083)

(2010年4月15日收到; 2010年5月19日收到修改稿)

混沌运动和混沌控制受到广泛关注, 本文利用模糊控制实现混沌系统的控制. 针对模糊控制器精度不高, 模糊控制中规则数量与控制精度之间的矛盾, 提出了一种基于蚁群优化算法的变论域模糊控制器. 通过分析变论域模糊控制中的2类伸缩因子, 指出其中1类并不能满足广义伸缩因子条件. 提出利用蚁群优化算法对伸缩因子智能寻优的方法, 在对蚁群算法改进的基础上, 构成一种基于蚁群算法的变论域模糊控制, 将设计的控制器用于 Duffing 混沌系统的控制. 仿真结果表明, 提出的控制算法在收敛速度和稳态性能上要略优于其他控制方式.

关键词: 混沌, 变论域模糊控制, 伸缩因子, 蚁群优化算法

PACS: 05.45.Gg

1. 引言

混沌运动是一种非线性运动, 它的运动轨迹非常复杂且长期变化不可预测^[1]. 自1972年洛伦兹在美国科学发展会议上发表题为《蝴蝶效应》的论文至今, 混沌学已发展成为一门影响深远、发展迅速的前沿科学. 混沌系统的控制和混沌同步成为工程界和学术界研究的热点, 利用混沌系统尤其是利用混沌系统对初始条件敏感性以及混沌轨道的随机性进行保密通信也掀起了研究热潮^[2,3].

20世纪90年代, Ott, Grebogi, Yorke 提出了第一种混沌控制方法, 即 Ott-Grebogi-Yorke (OGY) 方法^[4], 该控制方法是通过在一些系统参数中加入小扰动, 来稳定镶嵌于混沌吸引子中的不稳定轨道. OGY 方法通过微小的控制信号而获得较好的控制效果, 但是需要足够长的时间来检测系统, 用以决定在期望的不稳定周期轨道附近的线性化行为, 且人为因素起主导作用, 参数的调整没有固定的模式可以遵循, 之后该方法有了进一步的扩展和改进^[5,6]. 同一时期用于混沌控制的方法是 Pyragas 提出的延迟反馈控制方法 (delay feedback control, DFC)^[7-10]. 该控制方法直接把系统的输出信号取出一部分经过时间延迟后再反馈到混沌系统中去作为控制信号. DFC 法并不需要知道期望周期轨道

的相关信息, 而且应用简单的模拟器件即可实现. 近十年来的混沌控制新思路在于把许多在其他领域里成功应用的控制方法用于混沌控制, 例如, 反馈线性方程组方法^[11,12]、变结构控制法^[13,14]、比例-积分-微分方法^[15,16]、模糊控制法^[17,18]等等. 其中, 模糊控制法是将模糊函数作为万能逼近器, 用 T-S 模糊系统逼近混沌系统, 进而应用系统控制理论求得模糊控制器. 本文就是将变论域模糊控制器用于 Duffing 混沌系统的控制, 以实现混沌系统的稳定控制. 为了解决模糊控制精度不高、调节死区等问题, 采用蚁群优化方法对模糊控制算法中的伸缩因子进行智能寻优, 构成一种基于混合蚁群算法的变论域模糊控制来提高对混沌系统控制的快速收敛速度, 仿真研究验证了本文提出的算法能以较快的收敛速度实现混沌系统的稳定控制.

2. 变论域模糊控制及伸缩因子的分析

2.1. 变论域模糊控制

一般模糊逻辑系统可描述如下: R^1 : 如果 $x_1(t) = F_{1j}, x_2(t) = F_{2j}, \dots, x_n(t) = F_{nj}$, 则

$$y_j(t) = G_j \quad (j = 1, 2, \dots, m),$$

式中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 和 y 为语言变量, $F_{ij} (i =$

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2009AA04Z163)资助的课题.

[†] E-mail: zhv2008@gmail.com

1, 2, ..., n) 和 G_j 是模糊集合, l 是规则个数, R^l 表示模糊系统的第 l 条规则. 采用单值模糊化机理, 乘积推理规则和中心平均解模糊化机理, 模糊逻辑系统的输出为

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^m y_l \left[\prod_{i=1}^n \mu_{F_{ij}}(x) \right]}{\sum_{l=1}^m \left[\prod_{i=1}^n \mu_{F_{ij}}(x) \right]}$$

$\mu_{F_{ij}}$ 为在模糊集 F_{ij} 上的隶属度函数.

理论证明, 单输入单输出模糊控制器是个分段 P 控制器, 普通的模糊控制器具有 PD 调节特性^[19,20], 存在控制精度不高, “调节死区”等问题. 要提高控制精度, 就意味着要增加控制规则的数量, 规则数量与控制精度之间的矛盾限制了模糊控制器的应用^[21]. 为克服此矛盾, 文献[22]提出了一种变论域模糊控制方法.

设 $X_i = [-E_i, E_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 分别为输入变量 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 论域, $Y = [-U, U]$ 为输出变量 y 的论域. $A_i = \{A_{ij}\}$ ($1 \leq j \leq m$) ($i = 1, 2, \dots, n$) 是论域 X_i 上的一个模糊集合, $B = \{B_j\}$ ($1 \leq j \leq m$) 是论域 Y 上的一个模糊集合. 在此基础上形成一组模糊控制规则:

R^l : 如果 $x_1(t) = A_{1j}, x_2(t) = A_{2j}, \dots, x_n(t) = A_{nj}$, 则

$$y(t) = B_j \quad (j = 1, 2, \dots, m).$$

所谓的变论域方法是指某些论域可以随着输入变量和输出变量的变化而改变大小. 对于输入变量 x_i 和输出变量 y 的论域 X_i 和 Y 来说, 当状态的测量值为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 时, 表示变化后的论域为

$$X'_i = [-\alpha_i E_i, \alpha_i E_i], Y' = [-\beta U, \beta U],$$

其中, α_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 和 β 分别是论域 X_i 和 Y 的伸缩因子. 相对于变化后的论域, 将原来的论域 X_i 和 Y 称作初始论域. 论域的变化情形如图 1 所示.

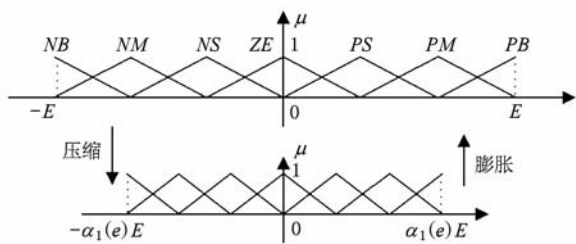


图 1 论域的变化情况

变论域控制器的输出可以表示为

$$u_{FC}(x/\beta) = \beta \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n A_{ij} \left(\frac{x_j}{\alpha(x_j)} \right) y_i.$$

可以看出, 论域变化等效于控制的调整, 而论域变化是通过伸缩因子实现的.

2.2. 伸缩因子的讨论

确定各论域的伸缩因子是一个重要的问题. 文献[22]给出了一个函数 $\alpha: X \rightarrow [0, 1]$ 称为正规伸缩因子的条件.

对偶性: $\alpha(x) = \alpha(-x), \forall x \in X$;

避零性: $\alpha(x) \geq \zeta > 0, \zeta$ 是一个很小的实常数;

单调性: α 在区间 $[0, E]$ 上是严格单调增加的;

相容性: $|x| \leq \alpha(x)E, \forall x \in X$;

正规性: $\alpha(\pm E) = 1$.

其中, 相容性是保证在论域变化的过程中, 原来论域内的自变量不会“跑出”变化后论域的边界. 这一点尤为重要, 也是设计变论域模糊控制器容易疏忽的地方. 下面分析常用的 2 种形式的伸缩因子 (详见文献[22—24]).

伸缩因子 1 $\alpha_1(x) = \left(\frac{|x|}{E} \right)^\tau + \xi, \tau > 0, \xi$ 为充分小的正数.

伸缩因子 2 $\alpha_2(x) = 1 - \lambda \exp(-kx^2), \lambda \in (0, 1), k > 0$.

对于伸缩因子 1, 因为 $\forall x \in X = [-E, E]$, 令 $x = E_L \leq E$, 则 $\alpha_1(x)E = \alpha_1(E_L)E$, 若要证明 $|x| \leq \alpha(x)E$, 即证 $|E_L| \leq \alpha_1(E_L)E = \left(\frac{E_L}{E} \right)^\tau E$, 不

等式两边同时除以 E , 即 $\frac{|E_L|}{E} \leq \left(\frac{E_L}{E} \right)^\tau$, 由函数 $f(x) = x^\tau$ ($0 < \tau < 1$) 的性质可知, $\frac{|E_L|}{E} \leq \left(\frac{E_L}{E} \right)^\tau$ 成立. 因此, 伸缩因子 1 满足相容性条件.

对于伸缩因子 2, 要证明相容性, 既要满足 $\alpha_2(x) \geq \frac{|x|}{E}, x \in [-E, E]$. 令 $\alpha_2(x) = 1 - \exp(-kx^2) = f(x), g_0(x) = \frac{|x|}{E}, x \in X$, 为简化分析, 令 $g(x) = x, x \in [0, 1]$. 要保证相容性, 则曲线 $f(x)$ 应严格位于曲线 $g(x)$ 上方. 考虑到函数的对偶性, 仅讨论 $x \in [0, 1]$ 的部分. 从图 2 可以看出:

当 $k < 2$ 时, 曲线 $f(x)$ 全部位于曲线 $g(x)$ 下

方,不能保证相容性.

当 $k > 5$ 时,曲线 $f(x)$ 部分位于曲线 $g(x)$ 上方,但是,在 x 较小时仍位于曲线 $g(x)$ 下方,相容性不能保证.

因此,不论 k 取何值,都不能保证该伸缩因子的相容性. 即该伸缩因子不满足相容性条件.

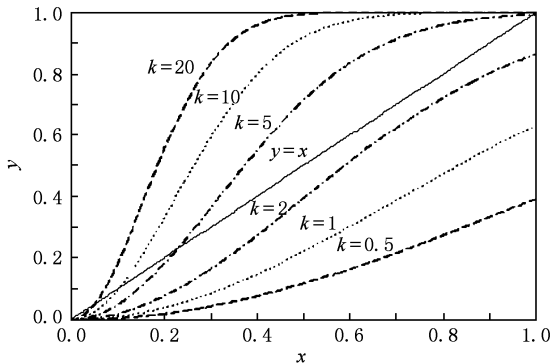


图2 伸缩因子 2 的变化趋势

通过伸缩因子的选择或设计,可以达到调整控制规则的目的,获得较好的控制效果. 然而,定式的伸缩因子有时并不能满足广义伸缩因子的条件. 为了获得满意的控制效果,可以借用诸如最优化方法,李雅普诺夫方法和传统的自适应控制理论等来获得伸缩因子. 下面将利用一种改进的可用于连续域的蚁群优化算法,构成一种动态调整伸缩因子的变论域自适应模糊控制器.

3. 基于改进蚁群算法的变论域模糊控制器

基本的蚁群算法(ant colony optimization, ACO)是一种新的随机型离散全局搜索算法,该算法具有启发式搜索、信息正反馈等特征,采用分布式并行计算机理,易与其他方法相结合,具有较强的鲁棒性,是进化算法中的一种新型随机性优化算法. 蚁群算法对于求解离散优化问题,如旅行商问题、调度二次分配等都表现出良好的性能,已有文献将其拓展到求解连续空间优化的问题^[25]. 由于蚁群算法本身初始求解速度慢,遗传算法(genetic algorithm, GA)虽然具有快速的全局搜索能力,却不能很好地利用系统的反馈信息. 因此本文参考文献[26]中提出的一种改进的蚁群算法,保留了 ACO 的并行分布式正反馈的优点,同时采用两层搜索策略:在局部搜索中采用离散域的经典蚁群算法思想,构建蚁群

搜索个体的顺序及实现信息素的局部更新;全局搜索中采用 Ant Walk 和 Ant Diffusion 技术(类似于遗传算法的交叉和变异操作)以对解空间的进行挖掘搜索,并利用经典蚁群算法的“精英策略”把每代中的最优个体保留到下一代中,从而得到了可用于连续域的改进的蚁群算法.

考察常规的无约束连续优化(对于有约束问题,可以通过罚函数法等将其转化为无约束问题),通常具有如下描述:

$$\min f(x) \text{ 求 } S^* = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}.$$

改进的蚁群算法其具体步骤如下:

步骤 1 初始化

根据问题的定义,在解空间 S 中随机生成 $n \in R$ 个个体 $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ (每个个体具有 D 维实数值信息),由此构成 n 个解区域. 然后对每个个体 x_i 的适配值进行评估,并对任意两个个体的节点之间信息素初始化. 在本算法中任意两个节点之间信息素,都满足 $\tau_{ij} \in (\tau_{\min}, \tau_{\max})$.

步骤 2 局部搜索

生成 $NP \in R$ 只蚂蚁,并把这 NP 只蚂蚁随机的放在起始解 x_i 的任一节点上. 每只蚂蚁独立地从起始解开始,根据概率 P 来选择下一步的移动目标. 从个体 x_a 的某一节点 i 选择个体 x_b 某一节点 j 的概率可按下式计算:

$$p_{ij}(t) = \frac{\tau_{ij}^g(t)}{\sum_{r \in \text{un_visit}} \tau_{ir}^g(t)}, \quad (1)$$

其中 $\tau_{ij}^g(t)$ 表示 g 次周游中第 $t \in n$ 步 i, j 两节点之间的信息素(trail value). $r \in \text{un_visit}$ 代表蚂蚁下一步可选的所有节点.

当蚂蚁经过一个节点移动到新的节点后,需对信息素强度更新. 考虑到信息素的局部更新应该使路径上的信息素减弱,要反应出适配值的提高程度,当算法开始时信息素应更新较大. 按(2)式计算局部搜索中信息素的增量 $\Delta\tau_{ij}^{\text{local}}(t)$,

$$\Delta\tau_{ij}^{\text{local}}(t) = \begin{cases} \tau_{ij}^{\text{init}\Delta f}, & \Delta f \geq 0, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\Delta\tau_{ij}^{\text{local}}(t)$ 表示第 t 步 i, j 两节点之间的信息素变化值, Δf 代表适配值 fitness 提高值.

当蚂蚁经过一个节点后,根据信息素挥发机理,按(3)式对本路径进行局部信息素更新.

$$\tau_{ij}^g(t+1) = (1 - \rho) \times \tau_{ij}^g(t) + \rho \times \Delta\tau_{ij}^{\text{local}}(t), \quad (3)$$

$\rho \in (0, 1)$ 为局部信息素挥发系数.

步骤3 全局搜索

在全局搜索中,为防止算法陷入局部最优解,使蚁群在搜索过程中能扩展到未搜索区域,借鉴GA中利用交叉算子的个体重组技术,在全局搜索阶段引入类似于遗传算法的交叉和变异操作,这里称为Ant Walk和Ant Diffusion技术,用以实现解空间中原始解的偏移.具体实现过程为, Ant Walk指从父代中随机选择2个个体,这2个父代个体进行组合生成子代.按照下式计算:

$$x_i(\text{child}) = \alpha \times x_i + (1 - \alpha) \times x_j. \quad (4)$$

子代个体的遗传和获得与Ant Walk算子 $\alpha \in (0,1)$ 有关. Ant Diffusion相似于GA中的变异操作.

$$x_i(\text{child}) = \text{Mid} + \text{Dif} \times (\text{rand} - 0.50),$$

其中Mid为解空间S的中间区域,Dif为解空间S的最大解区间,rand $\in (0,1)$ 为一随机数.这里,假设由Ant Walk和Ant Diffusion所得到新解的相关信息素为操作前原始解的相关信息素平均值.

全局信息素的更新也根据信息素挥发机理,按下式进行全局信息素更新:

$$\tau_{ij}^{g+1} = (1 - \beta) \times \tau_{ij}^g + \beta \times \Delta\tau_{ij}^{\text{global}}, \quad (5)$$

其中 $\beta \in (0,1)$ 为全局信息素挥发系数.此时信息素的更新需要根据本次周游中搜索到的目标值,如果是本次周游最佳目标函数值,则计算相关节点上的信息素增量 $\Delta\tau_{ij}^{\text{global}}$,否则信息素增量为0.

这样,在全局搜索中,改进的ACO算法的“精英策略”能保留本次周游中适配值最好的几个解,并用产生的新解来替代原来适配值较弱的解.每次周游完成后,全局信息素的更新规则保证了只有与适配值最好解相关的节点才能更新其间的信息素,诱使更多的蚂蚁搜索已发现最好节点周围的区域.通过全局搜索和局部搜索的互相配合,混合蚁群算法能克服陷入局部最优解的缺点,并且随着周游代数的增加和较好解的出现,精细搜索的效果也越来越明显,最终输出问题的最优解.在改进算法中,采用Ant Walk和Ant Diffusion技术,在局部和全局搜索中使用不同的搜索策略,因此定义为混合蚁群算法(Hybrid Ant Colony optimization, HACO).

将HACO算法用于模糊控制器的伸缩因子优化,就构成了基于HACO的变论域模糊控制方法(variable universe fuzzy control based on HACO, HACO_VUFC).即在每个采样周期,蚁群根据一定的性能指标通过全局搜索和局部搜索的配合机理

对各伸缩因子寻优,经过多次迭代搜索得到满足性能指标的问题最优解,并将此值作为下个采样时刻模糊控制器的伸缩因子.基于HACO的变论域自适应模糊控制系统如图3所示.

采用文献[27]误差 e 和误差变化率 ec 的绝对值的加权($J = 0.95 \times |e| + 0.05 \times |ec|$)最小作为性能指标.此指标侧重抑制过程中大误差的出现,并兼顾防止系统输出振荡剧烈.图3中HACO算法根据系统状态对控制器伸缩因子 $\alpha_1(e)$, $\alpha_2(ec)$ 和 $\beta(e,ec)$ 作自适应智能调节:放大伸缩因子相当于膨胀论域,缩小伸缩因子 $\alpha_1(e)$, $\alpha_2(ec)$ 和 $\beta(e,ec)$ 相当于收缩论域.假设输出论域不变,输入论域缩小后,同样的输入值相对“变大”,相当于输入值被放大,系统对于输入值的变化也更加敏感,虽然这时控制规则从形式和数量上前后没有变化,但输出量发生了变化,这相当于调整了模糊控制规则.对于输出论域来说,论域的变化对控制量的影响和输入论域正好相反:输出论域缩小后,同样的输入值,控制量的绝对值变小,对输入变量的敏感性也减弱.

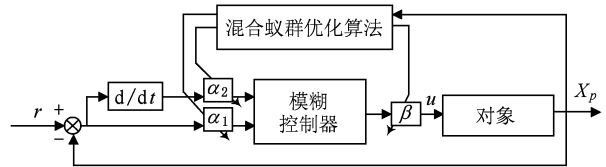


图3 基于混合蚁群算法的变论域自适应模糊控制系统

总之,论域的变化相当于模糊控制规则的调整.这样就克服了规则数量与控制精度之间的矛盾,可以在不直接修改控制规则,只需要知道规则的大致趋势的情况下,通过论域的自适应调整,实现对象动态性能的改善,提高控制的稳态精度.此外,由于可根据性能指标动态调整伸缩因子,因此即使模糊控制器的初始论域 $FX_1 = [-E, E]$, $FX_2 = [-EC, EC]$, $FY = [-U, U]$ 依经验设计,HACO算法也能通过各采样周期逐步调整论域大小,从而使控制器输出满足性能指标的较好的控制量.

4. 仿真研究

考虑Duffing方程

$$\ddot{x} + \mu\dot{x} + \alpha x^3 = \delta \cos t + u, \quad (6)$$

当 $\mu = 0.1, \alpha = 1, \delta = 12, u = 0$ 时,系统(6)呈现混

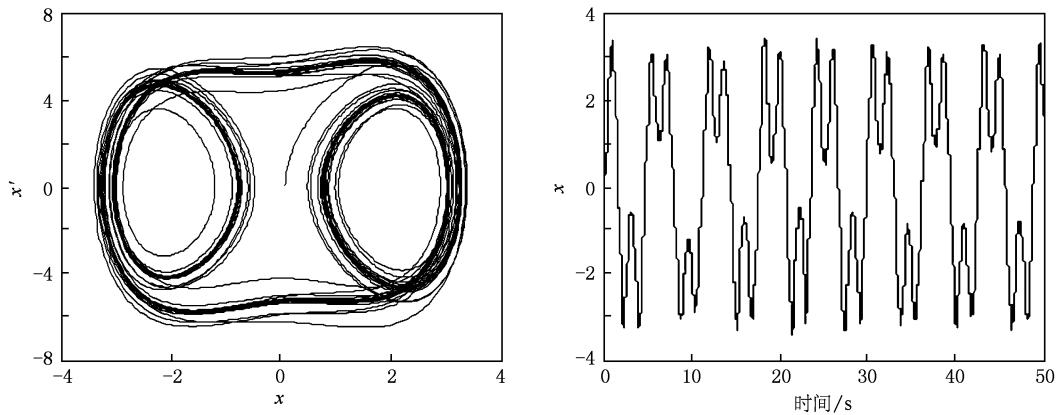


图4 Duffing 系统呈现混沌态的相图和时域图

沌态,其相图和时域图如图4所示.

4.1. 采用定式变论域模糊控制方法

为和本文提出的方法区别,将采用2.2节中2类伸缩因子的变论域控制称为定式变论域控制(variable universe fuzzy control, VUFC). 定式变论域模糊控制器中输入误差 e 及误差变化率 ec 的初始论域均为 $[-5, 5]$, 控制器输出 u 初始论域为 $[-10, 10]$, 其伸缩因子选择第一种形式的伸缩因子,为

$$\alpha_1(e) = \left(\frac{|e|}{E}\right)^{0.8} + 0.001,$$

$$\alpha_2(ec) = \left(\frac{|ec|}{EC}\right)^{0.9} + 0.001,$$

$$\beta(e, ec) = \left(\frac{|e|}{E}\right)^{0.3} \left(\frac{|ec|}{EC}\right)^{0.9}.$$

相应模糊集均划分为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$. 控制器采用三角形隶属函数,并采用加权平均法将模糊量精确化,控制决策表如表1所示.

表1 模糊控制规则

$e \backslash ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

图5是采用VUFC后Duffing系统的相图和时域图. 从图中可以看出,系统能较快的收敛. 但由于伸缩因子为了满足避零性,对 α_1 和 α_2 加入了 $\xi = 0.001$ 项,当误差较小的时候,误差和误差变化率对 α_1 和 α_2 的影响很微弱,控制效果变得不明显,在较长的时间里系统存在稳态误差.

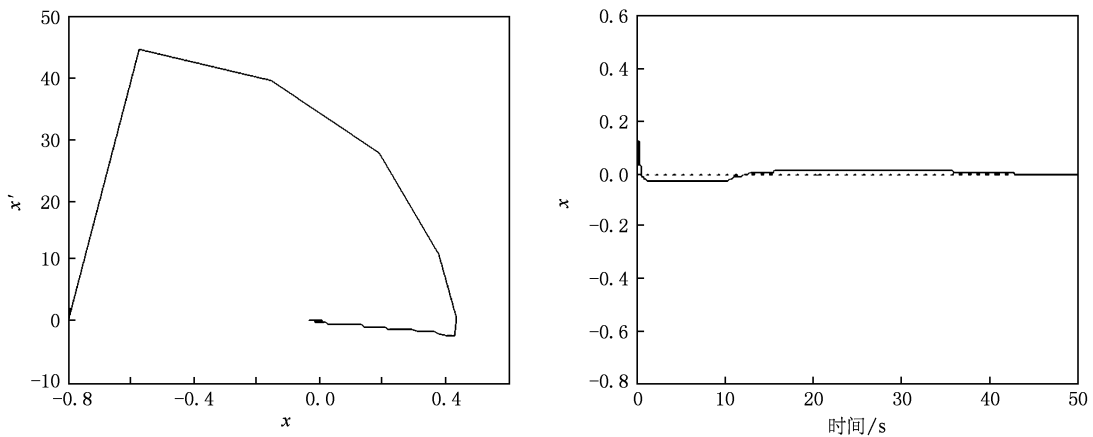
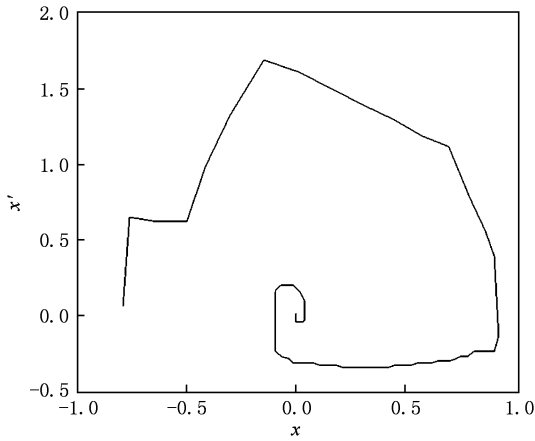


图5 采用VUFC时系统的相图和时域图

4.2. 采用基于 HACO 的变论域模糊控制方法

相同的计算条件下采用 HACO_VUFC 方法, 控制器输入误差、误差变化率和输入的初始论域和定式变论域控制器相同, 模糊化方法、去模糊方法和决策表也和定式变论域控制器相同. 蚁群算法参数设置为

$$NP = 10, \tau_{\min} = 0.01, \tau_{\max} = 40,$$



$$\rho = 0.5, \alpha = 0.5, \beta = 0.8.$$

图 6 是采用基于 HACO 的变论域模糊控制后 Duffing 系统的相图和时域图. 从图中可以看出, Duffing 系统很快收敛. 图 7 显示整个控制过程中模糊控制器 2 个伸缩因子的变化过程, α_2 的变化过程和 α_1 类似, 这里不再给出. 可以看出, 为了消除 Duffing 系统中非线性扰动的影响, 参数 α_1 和 β 通过不断调整来满足性能指标的要求.

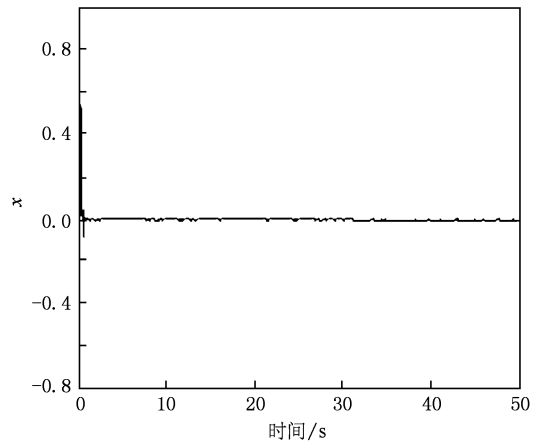


图 6 采用 HACO_VUFC 时系统的相图和时域图

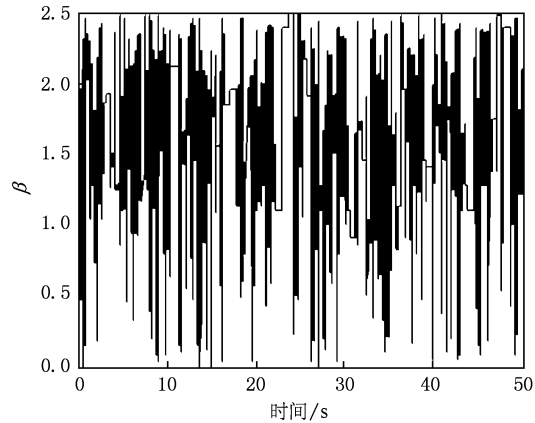
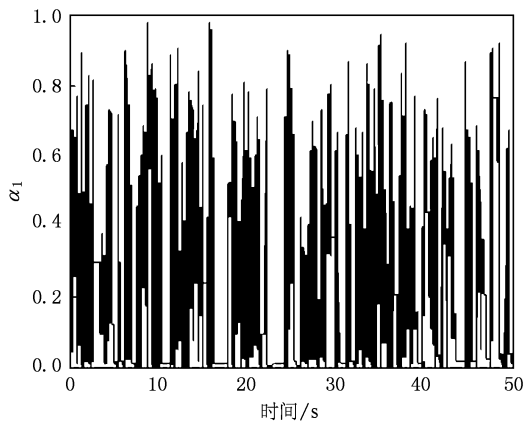


图 7 混合蚁群算法对 α_1, β 的整定曲线

4.3. 与其他算法的比较

为比较算法的控制效果, 本文将 HACO_VUFC 和基于 T-S 模糊模型的平行分散补偿方法 (parallel distribution compensation, PDC)^[26,27]、反馈线性化方法 (feedback linearization, FL)^[11,12] 进行对比.

图 8 是 4 种控制方式下 Duffing 系统的输出曲线. 从图 8 可以看出, 采用 HACO_VUFC 方法, 系统

的输出响应在快速性和稳态性能上都优于 VUFC 方法、基于 T-S 模糊模型的 PDC 方法和 FL 方法. 基于 T-S 模糊模型的 PDC 方法要经过 15 s 才能逐渐使系统稳定, FL 方法经过 5 s 能使系统趋于稳定. VUFC 虽然也能使系统快速收敛, 但在误差已经很小的情况下, 其调节效果变弱, 要经过较长的时间才能消除稳态误差.

文献[29,30]中论及混沌控制时提出, 除了混

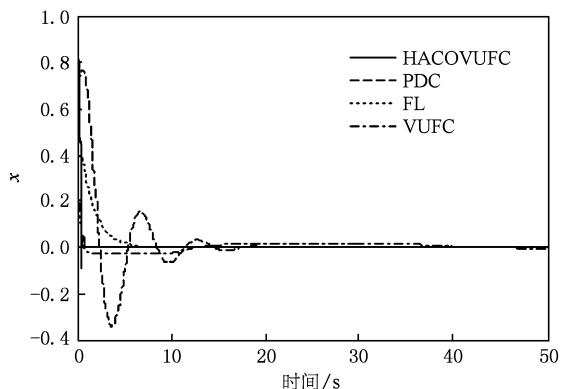


图8 4中控制方式下系统的响应

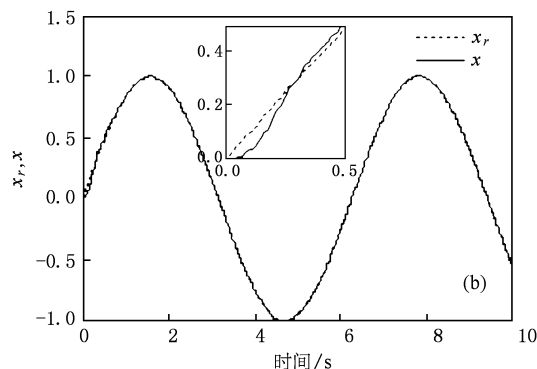
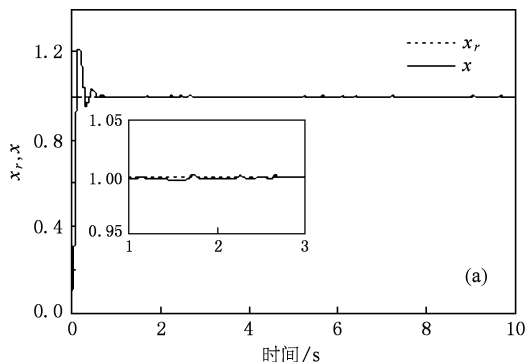


图9 混沌跟踪控制的响应

5. 结 论

本文针对模糊控制器精度不高,模糊控制中规则数量与控制精度之间的矛盾,分析了变论域模糊控制中2类伸缩因子,指出其中1类并不能满

沌的稳定,混沌同步之外,还应考虑混沌模型的跟踪控制(chaotic model following control, CMFC). 本文提出的算法也可以实现混沌的跟踪控制,通过仿真验证如下. 图9中虚线均为给定信号,实线为施加HACO_VUFC的Duffing混沌系统的响应曲线. 图9(a)为混沌系统的阶跃响应,系统大约经过0.4s后便进入稳态,由局部放大图可以看出,系统在进入稳态后有很小的误差,在控制允许的误差范围内;图9(b)为混沌系统跟踪正弦曲线的结果,从局部放大图中可以看出,系统在很短时间内就可以比较准确的实现对正弦信号的跟踪.

足广义伸缩因子条件. 提出利用HACO算法对伸缩因子寻优,构成一种基于混合蚁群算法的变论域模糊控制,以呈现混沌态的Duffing系统为被控对象进行研究. 仿真结果表明,算法能自适应调整模糊控制器的论域,从而取得比其他控制方法更好的控制效果.

[1] Ke X Z, Wu Z S 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1436 (in Chinese) [柯熙政、吴振森 1998 物理学报 **47** 1436]

[2] Wang H X, Cai G L, Miao S, Tian L X 2010 *Chin. Phys. B* **329** 103

[3] Wu D H, Ke X Z 2004 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **21** 355 (in Chinese) [兀旦晖、柯熙政 2004 量子电子学报 **21** 355]

[4] Ott E, Grebogi C, Yorke J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196

[5] Ott E 2002 *Chaos in dynamical systems* (2nd ed) (Cambridge: Cambridge University Press) p61

[6] Wang X F, Xue H J, Si S K, Yao Y T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3729 (in Chinese) [王校锋、薛红军、司守奎、姚跃亭 2009 物理学报 **58** 3729]

[7] Mehta N J, Henderson R M 1991 *Phys. Rev. Lett.* **44** 4861

[8] Zhang X M, Peng J H, Chen G R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2864 (in Chinese) [张晓明、彭建华、陈关荣 2004 物理学报 **53** 2864]

[9] Wu C L, Ma S J, Sun Z K, Fang T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6253 (in Chinese) [吴存利、马少娟、孙中奎、方同 2006 物理学报 **55** 6253]

[10] Yu H J, Zheng N 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3782 (in Chinese) [于洪洁、郑宁 2007 物理学报 **56** 3782]

[11] Li G H, Zhou S P, Xu D M, Lai J W 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2123 (in Chinese) [李国辉、周世平、徐得名、赖建文 2000 物理学报 **49** 2123]

[12] Li R H, Xu W, Li S, 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 598 (in Chinese) [李瑞红、徐伟、李爽 2006 物理学报 **55** 598]

[13] Yu D C, Meng Q H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1092 (in Chinese)

- Chinese) [禹东川、孟庆浩 2005 物理学报 **54** 1092]
- [14] Huang G Y, Jiang C S, Wang Y H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6224 (in Chinese) [黄国勇、姜长生、王玉惠 2007 物理学报 **56** 6224]
- [15] Wang D F, Han P 2006 *Acta Phys. Sin.* **56** 1644 (in Chinese) [王东风、韩璞 2006 物理学报 **56** 1644]
- [16] Niu P F, Zhang J, Guan X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3769 (in Chinese) [牛培峰、张君、关新平 2007 物理学报 **56** 3769]
- [17] Tan W, Wang Y N, Duan F, Li X H 2006 *Chin. Phys.* **15** 2529
- [18] Zheng Y G 2006 *Chin. Phys.* **15** 2549
- [19] Zhang G L, Zeng J, Ke X Z, Deng F L 2002 *Fuzzy control and MATLAB application* 2002 (Xi'an; Xi'an Jiaotong University Press) p113 (in Chinese) [张国良、曾静、柯熙政、邓方林 2002 模糊控制及其 MATLAB 应用 (西安: 西安交通大学出版社) 第 113 页]
- [20] Li H X 1999 *Science in China (Series E)* **29** 136 (in Chinese) [李洪兴 1999 中国科学 (E 辑) **29** 136]
- [21] Li H X 1997 *Control Theory & Applications* **14** 868 (in Chinese) [李洪兴 1997 控制理论与应用 **14** 868]
- [22] Li H X 1999 *Science in China (Series E)* **29** 32 (in Chinese) [李洪兴 1999 中国科学 (E 辑) **29** 32]
- [23] Li H X 1997 *Control Theory & Applications* **14** 868 (in Chinese) [李洪兴 1997 控制理论与应用 **14** 868]
- [24] Li H X 2002 *Science in China (Series E)* **32** 211 (in Chinese) [李洪兴 2002 中国科学 (E 辑) **32** 211]
- [25] Dorigo M 1997 *IEEE Trans. On. Evolutionary Compute* **1** 53
- [26] Zhao Y T 2009 *Pattern Recognition and Artificial Intelligence* **22** 794 (in Chinese) [赵云涛 2009 模式识别与人工智能 **22** 794]
- [27] Liu J K 2005 *Advanced PID control and MATLAB simulation* (Beijing: Electronics Industry Press) p215 (in Chinese) [刘金琨 2005 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 (北京: 电子工业出版社) 第 211 页]
- [28] Qian J L 2005 *Journal of System Simulation* **17** 2987 (in Chinese) [钱俊磊 2005 系统仿真学报 **17** 2987]
- [29] Tanaka K 1998 *IEEE Trans. On. Circuits and Systems* **45** 1021
- [30] Tanaka K, Wang H O 2001 *Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach.* (New York: John Wiley & Sons) p153—194

Research on the variable universe fuzzy algorithm of chaotic systems*

Zhang Wei-Wei[†] Wang Jing Wang Hui Zhao Yun-Tao

(National Engineer Research Center of Advanced Rolling, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(Received 15 April 2010; revised manuscript received 19 May 2010)

Abstract

Chaos and chaos control received extensive attention. The fuzzy controller is used to control chaotic systems in this paper. The accuracy of fuzzy controller is not high and there is contradiction between the number of control rules and accuracy. Accordingly a variable universe fuzzy controller based on ant colony optimization algorithm is proposed. By analyzing the two kinds of contraction-expansion factors, one of them was found unable to satisfy the general contraction-expansion factor condition. A method for optimizing the contraction-expansion factors intelligently via ant colony optimization algorithm is proposed. A variable universe fuzzy controller based on ant colony optimization algorithm is constituted and used to control the Duffing chaotic system. Simulation results show that the control method is superior to the others both in convergence speed and steady-state performance.

Keywords: chaos, variable universe fuzzy control, contraction-expansion factor, ant colony optimization algorithm

PACS: 05.45.Gg

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA04Z163).

[†] E-mail: zhv2008@gmail.com