

文章编号:1671-6833(2011)06-0117-04

参数不确定异结构混沌系统的自适应同步控制

张昭晗¹, 高金峰²

(1. 周口职业技术学院, 河南 周口 466001; 2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对一类参数未知的不确定混沌系统, 将自适应方法与非线性反馈方法相结合, 实现了异结构混沌系统的自适应同步控制. 基于 Lyapunov 稳定性理论, 设计了自适应控制器和参数自适应律. 采用所设计的自适应控制器和参数自适应律, 在一定的条件下, 可以实现参数不确定异结构整数阶混沌系统的大范围渐近同步. 为了减小控制所需的能量, 对控制系数 k_0 引入自适应估计, 优化控制系数. 计算机仿真结果进一步验证了所设计方法的有效性和可行性.

关键词: 混沌; 分数阶; 同步; 自适应; 优化控制

中图分类号: TP278 **文献标志码:** A

0 引言

参数微扰(OGY)方法^[1]自1990年由 E. Ott, C. Grebogi 和 J. A. Yorke 提出以来, 引起了研究混沌系统的控制问题的热潮, 在研究过程中, 涌现出许多控制和同步的方法和技巧^[2-6]. 但是混沌系统有其自身的特性, 寻找有效的优化控制方法, 仍是今后一定时期内研究的重点.

对同结构混沌系统的同步控制研究已相对成熟, 由于混沌系统自身的特性, 实现异结构混沌系统的同步与控制则更加困难^[7-9]. 文献[2]和文献[3]采用 Lyapunov 直接法, 给出的非线性状态反馈控制方法, 能有效地实现参数已知异结构混沌系统的渐近稳定同步与控制. 但在实际应用中, 一般混沌系统的参数通常是未知或含有不确定性.

笔者将自适应和非线性反馈方法相结合, 实现了异结构参数未知混沌系统之间的大范围渐近同步与控制; 通过对控制系数 k_0 引入自适应, 解决了控制能量的优化问题.

1 混沌系统同步控制问题描述

考虑如下形式的两个异结构混沌系统

$$\dot{x} = f(x) + F(x)\tilde{\theta}_1 \quad (1)$$

$$\dot{y} = g(y) + G(y)\tilde{\theta}_2 \quad (2)$$

将系统(1)作为驱动系统, 受控的响应系统为

$$\dot{y} = g(y) + G(y)\tilde{\theta}_2 + U(x, y), x \in \mathbf{R}^n, y \in \mathbf{R}^n \quad (3)$$

$\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2$ 为系统未知参数, $f(x)$ 与 $g(y)$ 为连续的向量函数, $F(x), G(y)$ 为矩阵函数, $U(x, y)$ 为控制参量. 当 $f(x) \neq g(y), F(x) \neq G(y)$ 时, 系统(1)和(2)是异结构系统, 且是一大类系统的一般表达形式.

令系统(1)与(2)的同步误差为

$$e = y - x, e \in \mathbf{R}^n$$

可得误差系统

$$\dot{e} = \dot{y} - \dot{x} = g(y) + G(y)\tilde{\theta}_2 - f(x) - F(x)\tilde{\theta}_1 + U(x, y) \quad (4)$$

实现同步控制的目标就是选择合适的控制器 $U(x, y)$ 和相应参数的自适应调节律, 使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$.

误差系统(4)还可以写成 $\dot{e} = A(e)e$ 的形式, 其中系数矩阵 $A(e)$ 满足

$$A(e) = B(e) + D(e), \text{ 并且 } B^T(e) = -B(e),$$

$$D(e) = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_n), b_i < 0 (i = 1, 2, \dots, n)$$

2 参数未知异结构混沌系统的同步控制

2.1 确定控制系数混沌系统同步控制策略与数值模拟

一般情况下, 不论系统的状态是平衡点、周期

收稿日期: 2011-07-08; 修订日期: 2010-08-13

作者简介: 张昭晗(1975-), 女, 周口职业技术学院讲师, 硕士, 主要研究方向为非线性电路理论及其应用, E-mail: zhangzhaohanok@126.com.

还是混沌,对任意的时间 t 都有

$$\|y(t)\| \leq M_1, \quad \forall t \in [0, +\infty) \quad M_1 \in \mathbf{R}^+$$

$$\|x(t)\| \leq M_2, \quad \forall t \in [0, +\infty) \quad M_2 \in \mathbf{R}^+$$

对混沌系统而言,不失一般性,总有

$$\|g(y(t))\| \leq W \quad \forall t \in [0, \infty),$$

$$\|f(x(t))\| \leq T \quad \forall t \in [0, \infty),$$

其中, $W, T \in \mathbf{R}^+$.

为实现系统(1)、(2)之间的同步控制,在式(4)中,选如下形式的控制器和参数自适应律

$$U(x, y) = K_1 e - k_0 \operatorname{sgn}(e) - G(y)\theta_2 + F(x)\theta_1 \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_1 = -F^T(x)e$$

$$\dot{\theta}_2 = -G^T(x)e \quad (6)$$

式中: K_1 和 A 性质相同,为系数矩阵,参数 θ_1, θ_2 分别是未知参数 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2$ 的估计. 于是有:

定理 1: 对于参数未知异结构混沌系统(1)和(2),若选取控制器(5)和参数自适应律(6),当满足 $k_0 \geq W + T$ 时,可以实现两系统所有状态变量的大范围渐近同步控制.

证明: 选 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2}(e^T e + \bar{\theta}_1^T \bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_2^T \bar{\theta}_2)$$

其中, $\bar{\theta}_1 = \theta_1 - \bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2 = \theta_2 - \bar{\theta}_2$, 沿着系统(4)对时间求导,有

$$\dot{V} = \frac{1}{2}(\dot{e}^T e + e^T \dot{e} + \dot{\bar{\theta}}_1^T \bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_1^T \dot{\bar{\theta}}_1 + \dot{\bar{\theta}}_2^T \bar{\theta}_2 + \bar{\theta}_2^T \dot{\bar{\theta}}_2) =$$

$$\frac{1}{2}[g(y) - f(x) + G(y)(\theta_2 - \bar{\theta}_2) - F(x) \cdot$$

$$(\theta_1 - \bar{\theta}_1) + U]^T e +$$

$$\frac{1}{2}e^T [g(y) - f(x) + G(y)(\theta_2 - \bar{\theta}_2) - F(x)$$

$$(\theta_1 - \bar{\theta}_1) + U] +$$

$$\frac{1}{2}(\dot{\bar{\theta}}_1^T \bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_1^T \dot{\bar{\theta}}_1 + \dot{\bar{\theta}}_2^T \bar{\theta}_2 + \bar{\theta}_2^T \dot{\bar{\theta}}_2)$$

将(5)、(6)式代入上式得

$$\dot{V} = \frac{1}{2}e^T (K_1^T + K_1)e - k_0 \operatorname{sgn}(e)^T e + g(y)e$$

$$- f(x)e \leq \frac{1}{2}e^T (K_1^T + K_1)e - k_0 \operatorname{sgn}(e)^T e + (\|g(y)\| + \|f(y)\|) \|e\|$$

$$\leq \frac{1}{2}e^T (K_1^T + K_1)e - k_0 \operatorname{sgn}(e)^T e + [W + T] \|e\|$$

由于 $\operatorname{sgn}(e)^T e = \|e\|$ 所以,

$$\dot{V} \leq \frac{1}{2}e^T (K_1^T + K_1)e - [k_0 - (W + T)] \|e\|$$

所以,当选择 $k_0 \geq W + T$ 时, $\dot{V}(e)$ 为一负定函数.

显然,式(4)的平衡点大范围渐近稳定,既实现了式(1)与(2)的同步控制.

下面以参数不确定异结构 Lorenz 和 Lü 混沌系统之间的同步控制为例说明控制策略的有效性.

选下式表示 Lorenz 系统为驱动系统

$$\dot{x} = f(x) + F(x)\bar{\theta}_1 =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -x_2 - x_1 x_3 \\ x_1 x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & 0 \\ 0 & 0 & -x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{a}_1 \\ \bar{b}_1 \\ \bar{c}_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Lü 系统为受控系统

$$\dot{y} = g(y) + G(y)\bar{\theta}_2 + U(x, y) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -y_1 y_3 \\ y_1 y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_2 - y_1 & 0 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 \\ 0 & 0 & -y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{a}_2 \\ \bar{b}_2 \\ \bar{c}_2 \end{bmatrix} + U(x, y) \quad (8)$$

当参数取 $\bar{a}_1 = 10, \bar{b}_1 = 28, \bar{c}_1 = 8/3$, 和 $\bar{a}_2 = 36, \bar{b}_2 = 20, \bar{c}_2 = 3$ 时,系统(7)和(8)处于混沌态.

由式(8)减去式(7)可得误差状态系统为

$$\dot{e} = g(y) + G(y)\bar{\theta}_2 - f(x) - F(x)\bar{\theta}_1 + U(x, y) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -y_1 y_3 \\ y_1 y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_2 - y_1 & 0 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 \\ 0 & 0 & -y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{a}_2 \\ \bar{b}_2 \\ \bar{c}_2 \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -x_2 - x_1 x_3 \\ x_1 x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & 0 \\ 0 & 0 & -x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{a}_1 \\ \bar{b}_1 \\ \bar{c}_1 \end{bmatrix} + U(x, y)$$

(9)

根据式(5)和(6)所表示的控制器和参数自适应律,选取“未知”参数 $\bar{a}_1 = 10, \bar{b}_1 = 28, \bar{c}_1 = 8/3, \bar{a}_2 = 36, \bar{b}_2 = 20, \bar{c}_2 = 3$. 初始状态分别取 $(x_1(0), x_2(0), x_3(0)) = (11, 25, 26)$ 和 $(y_1(0), y_2(0), y_3(0)) = (20, 20, 20)$, 自适应参数的初始值为 $(a_1(0), b_1(0), c_1(0)) = (3, 3, 4)$ 和 $(a_2(0), b_2(0), c_2(0)) = (5, 5, 5)$. $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ 是未知参数 $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{b}_1, \bar{b}_2, \bar{c}_1, \bar{c}_2$ 的估计. 取 $k_0 = 2$, 采用四阶龙格-库塔算法, 仿真结果如图 1, 2 所示. 从仿真结果可以看出, 两混沌系统实现了同步, 随着时间的增加, 参数估计值最终收敛到一个常值. 将图 1 同步误差演化曲线与文献[2]

参数已知时直接采用反馈控制器相比较可以看出,笔者所采用的方法由于参数未知而引入自适应,使得误差在开始阶段振荡减小,同步时间加快.

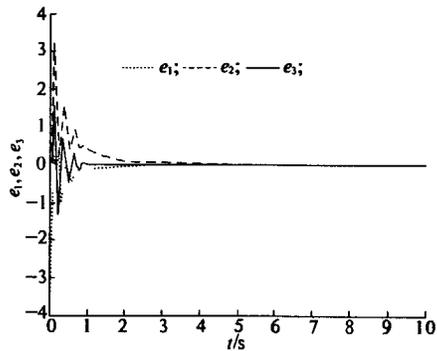
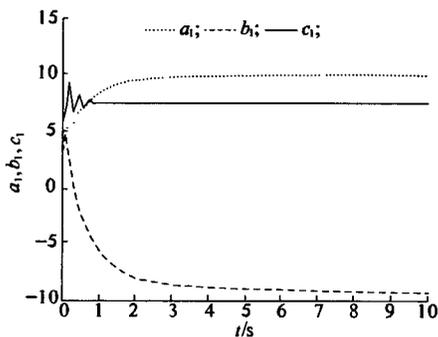
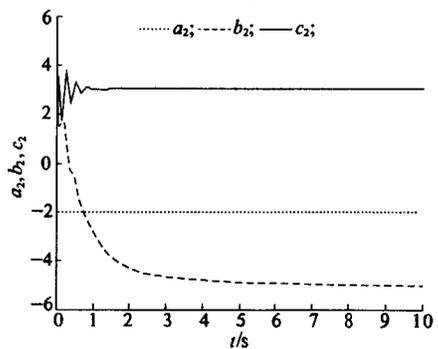


图1 确定控制系数 k_0 时的同步误差曲线
Fig.1 Determine the control coefficient k_0 the error of synchronization



(a) a_1, b_1, c_1



(b) a_2, b_2, c_2

图2 确定控制系数 k_0 参数估计的收敛曲线
Fig.2 Determine the control coefficient k_0 the convergence curve of parameter estimate

2.2 优化控制系数混沌系统同步控制策略与数值模拟

在实际运用中需要估计 k_0 的大小,当选择的 $k_0 \gg W + T$ 时,虽然能以较快的速度实现同步,可是所需的控制能量比较大,这在一些场所是不允许的.所以,能准确估计 k_0 的大小实现较小能量控制是十分必要的.

为了准确估计 k_0 的大小,在驱动系统和响应系统满足状态变量有界的条件下,以2.1节设计的控制器和自适应律为基础,对控制系数 k_0 引入自适应,有以下定理.

定理2:若驱动系统和响应系统状态变量有界,控制器 U 和控制系数取如下形式

$$U(x, y) = K_1 e - k(t) \operatorname{sgn}(e) - G(y) \theta_2 + F(x) \theta_1 \quad (10)$$

$k(t)$ 自适应律为

$$\dot{k}(t) = \operatorname{sgn}(e)^T e \quad (11)$$

参数自适应律为

$$\dot{\theta}_1 = -F^T(x)e \quad \dot{\theta}_2 = G^T(y)e \quad (12)$$

对任意的初始条件 $x(0) \in \mathbf{R}^n, e(0) \in \mathbf{R}^r, k(0) \in \mathbf{R}^+$, K_1 和 A 性质相同,为系数矩阵.

证明:选下列函数

$$V = \frac{1}{2}(e^T e + \bar{\theta}_1^T \bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_2^T \bar{\theta}_2) + \frac{1}{2}(W + T - K)^2$$

式中: $\bar{\theta}_1 = \theta_1 - \bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2 = \theta_2 - \bar{\theta}_2$ 沿着系统(4)和(12)对时间求导

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2}(\dot{e}^T e + e^T \dot{e} + \dot{\bar{\theta}}_1^T \bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_1^T \dot{\bar{\theta}}_1 + \dot{\bar{\theta}}_2^T \bar{\theta}_2 + \bar{\theta}_2^T \dot{\bar{\theta}}_2) \\ &- (W + T - K) \dot{K} = \frac{1}{2}[g(y) - f(x) + G(y)(\theta_2 - \bar{\theta}_2) - F(x)(\theta_1 - \bar{\theta}_1) + U]^T e + \frac{1}{2}e^T [g(y) - f(x) \\ &+ G(y)(\theta_2 - \bar{\theta}_2) - F(x)(\theta_1 - \bar{\theta}_1) + U] + \frac{1}{2} \end{aligned}$$

$$(\dot{\theta}^T \bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_1^T \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2^T \bar{\theta}_2 + \bar{\theta}_2^T \dot{\theta}_2) - (W + T - K) \dot{K}$$

将(10),(11)和(12)式代入上式得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2}e^T (K_1^T + K_1) e - k(t) \operatorname{sgn}(e)^T e + g(y) e - \\ &f(x) e - (W + T) \operatorname{sgn}(e)^T e + k \operatorname{sgn}(e)^T e \leq \frac{1}{2}e^T (K_1^T + \\ &K_1) e + (\|g(y)\| + \|f(x)\|) \|e\| - (W + T) \\ &\operatorname{sgn}(e)^T e \leq \frac{1}{2}e^T (K_1^T + K_1) e + (W + T) \|e\| - (W \\ &+ T) \operatorname{sgn}(e)^T e \end{aligned}$$

由于 $\operatorname{sgn}(e)^T e = \|e\|$, 所以有

$$\dot{V} \leq \frac{1}{2}e^T (K_1^T + K_1) e$$

由于 K_1 和 A 性质相同,所以 $\dot{V} \leq 0$, 可得驱动系统(1)和响应系统(2)在控制器(10)和自适应律(11),(12)作用下实现同步控制.

下面仍然以 Lorenz 混沌系统和 Lü 混沌系统的同步控制为例说明控制策略的可行性.

Lorenz 系统和 Lü 系统的误差状态方程为式(9).根据式(10),(11),(12)所表示的控制器和自适应律,初始值选取与2.1节选取相同.数值模拟中采用四阶龙格-库塔算法,仿真结果如图3

至图5所示.通过图3和图1对比可以看出,引入控制系数的自适应机制后,开始阶段误差振荡的频率增加,从图5还可以发现估计的控制系数比上个示例中选择的 $k_0 = 2$ 要小,这可以粗略地说实现了较小控制能量的同步控制.

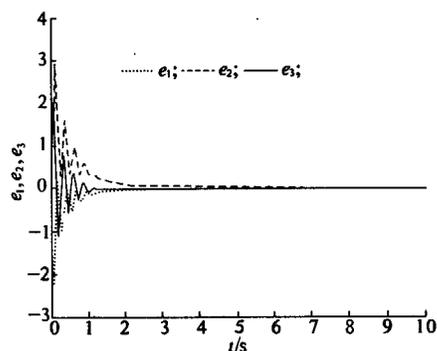
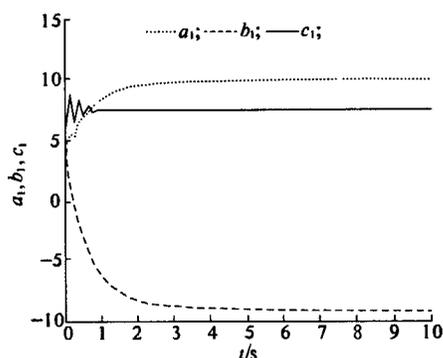
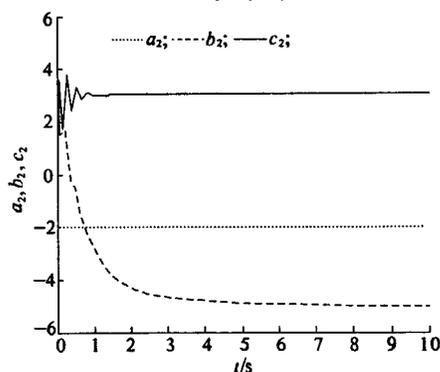


图3 优化控制系数 k_0 同步误差

Fig. 3 Optimization of control coefficient k_0 , the error of synchronization



(a) a_1, b_1, c_1



(b) a_2, b_2, c_2

图4 优化控制系数 k_0 参数估计的收敛曲线

Fig. 4 Optimization of control coefficient k_0 , the convergence curve of parameter estimate a_2, b_2, c_2

3 结论

(1) 针对一类参数未知的不确定混沌系统,基于 Lyapunov 稳定性理论,将自适应方法与非线性反馈方法相结合,设计了自适应控制器和参数自适应律,实现了异结构混沌系统的自适应同步

控制.

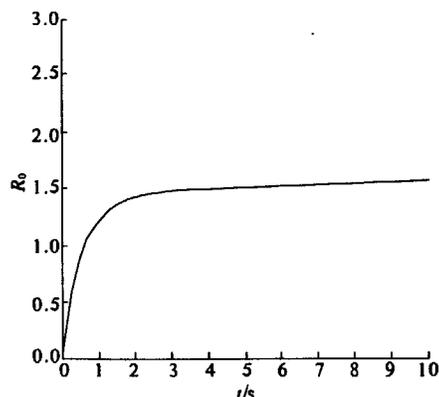


图5 控制系数 k_0 随着时间的演化曲线

Fig. 5 evolution curve of control coefficient k_0 with time

(2) 为了减小控制所需的能量,对控制系数 k_0 引入了自适应估计,优化了控制系数.完全保留了非线性项,在一定的条件下,可以实现参数不确定异结构整数阶混沌系统的大范围渐近同步.该方法鲁棒性强,使用范围广,数学推理和计算机仿真结果验证了所提方法的有效性和可行性.

参考文献:

- [1] OTT E, GREBOGI C, YORKE J A. Controlling chaos [J]. *phys. Rev. Lett.*, 1990, 64: 1196 - 1199.
- [2] 高金峰, 罗先觉, 马西奎, 等. 控制与同步连续时间混沌系统的非线性反馈方法[J]. *物理学报*, 1999, 48(9): 1618 - 1627.
- [3] 高金峰, 罗先觉, 马西奎. 实现连续时间标量(超)混沌信号同步控制的非线性反馈方法[J]. *物理学报*, 2000, 49(5): 838 - 848.
- [4] 付景超, 井元伟, 张中华, 等. 一类具有收获系数的单种群模型的混沌控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(2): 448 - 451.
- [5] CUI Bao-tong, LOU Xu-yang. Chaos synchronization and application of a class of mixed delayed systems [J]. *System Engineering and Electronics*, 2008, 30(1): 146 - 150.
- [6] HO M-C, HUNG Y-C, CHOU C-H. Phase and Anti-phase Synchronization of two Chaotic Systems by Using Active Control [J]. *Phys. Lett. A*, 2002, 8: 296 - 298.
- [7] LIU Chong-xin, LIU Tao, LIU Ling, et al. A new chaotic attractor [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004, 22(5): 1031 - 1038.
- [8] 蔡国梁, 黄娟娟. 超混沌 Chen 系统和超混沌 Rossler 系统的异结构同步 [J]. *物理学报*, 2006, 55(8): 3997 - 4005.

(下转第 125 页)

- [5] 卢志刚,韩彦玲,常磊.基于组合权重的配电网运行经济性评价[J].电力系统保护与控制,2008,36(18):1-5.
- [6] 李晓辉,张来,李小宇.基于层次分析法的现状电网评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2008,36(14):57-61.
- [7] 王莲芬,许树柏.层次分析法引论[M].北京:中国人民大学出版社,1990.
- [8] 国家电网公司.输配电电压序列优化及20千伏应用关键技术研究框架[R].北京:国家电网公司,2008.
- [9] GB 156—2003 标准电压[S].北京:中国标准出版社,2003.

Voltage Class Series Optimization Research of Zhengzhou New Area Based on AHP

CHEN Gen-yong¹, SUN Li¹, PENG Yong², WANG Fa-yi², CHANG Jun-fu³, LI Jun-wei³

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Xinyang Power Supply CoMPany, Xinyang 464000, China; 3. Yuzhou Power Supply CoMPany, Yuzhou 461670, China)

Abstract: The evaluation method of distribution network construction based on analytic hierarchy process (AHP) is proposed. By building the model of electric network using the load density method, taking the technical, economic and social aspects as the indicators of decision-making, the hierarchical structure model is established. The voltage class series of Zhengzhou New Area are evaluated synthetically using AHP, and the optimal voltage class series are given. The method establishes the judgment matrix, and analyses the decision-making process of complicated systems hierarchically. It changed the way that the weight is determined by experts experience alone, and the method is suitable to determine the weight of the comprehensive evaluation index for distribution network. The study results can be used as the reference for the voltage class series optimization of Zhengzhou New Area.

Key words: AHP; voltage class; distribution network; load density; comprehensive assessment

(上接第120页)

- [9] MATIGNON D. Stability results of fractional differential equations with applications to control processing [J]. IMACS, IEEE-SMC, Lille, France, 1996, 11: 963-968.

Synchronization and Control Between Different Chaotic Systems with Uncertain Parameters

ZHANG Zhao-han¹, GAO Jin-feng²

(1. Zhoukou Vocational & Technical College, Zhoukou 466001, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;)

Abstract: For a class of uncertain chaotic systems with unknown parameters, the adaptive synchronization control of two different chaotic systems is achieved in the paper, by means of the adaptive approach combined with the nonlinear feedback method. First, based on the Lyapunov stability theory, the adaptive controller and the parameter identification scheme are presented. Second, under certain conditions, large-scale asymptotic synchronization is proposed between two different uncertain integer order chaotic systems. Third, in order to reduce the energy required to control, k_0 is introduced for the adaptive optimal control coefficient estimation. Finally, the simulation result proves the feasibility and effectiveness of the method.

Key word: chaos; fractional; synchronization; self-adaptive; optimization control