

## 基于免疫算法的混沌多模型微扰控制

陆益民<sup>1,3</sup>, 毛宗源<sup>1</sup>, 张波<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

3. 广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** A. Duchateau et al 的多模型控制策略是一种改进的 OGY 方法, 为扩大控制器在吸引子中的作用范围, 需要在混沌系统的一条无控收敛轨道上设置一系列的局部线性模型, 由线性反馈控制律把混沌系统引导到不动点, 这要求控制器的结构和控制量的大小是可变的. 本文应用人工免疫算法的参数和结构双重可塑性来产生多模型控制策略控制律, 由此提出了一种新的混沌控制方法. 对 Hénon 映射仿真的结果表明: 与其他方法相比, 新方法能在较短的混沌暂态时间内把系统控制到预定轨道. 因此, 基于人工免疫算法的混沌多模型微扰控制方法能对混沌系统实施有效控制, 且能够应用于系统全局动力学模型未知而仅获得实验数据的情况.

**关键词:** 混沌控制; 免疫算法; 多模型控制策略; Hénon 映射

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A

## Multi-model solution for chaos control based on the immune algorithm

LU Yi-min<sup>1,3</sup>, MAO Zong-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>

(1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangdong Guangzhou 510640, China;

2. Electric Power College, South China University of Technology, Guangdong Guangzhou 510640, China;

3. College of Electric Engineering, Guangxi University, Guangxi Nanning 530004, China)

**Abstract:** The multi-model solution proposed by A. Duchateau et al is a further extension of the OGY method. In order to increase the zones of effective control (ZECs) of the attractor, a series of local linear models and control laws was positioned along an uncontrolled convergent trajectory that could direct the chaotic process towards its fixed point. So, controllers with both variable structure and parameter were required. A new control method was presented that the control laws of multi-model solution were generated by artificial immune algorithm to obtain double plasticity of parameter and structure. The simulation results showed that the new method could control the chaotic system towards its desired trajectory in less chaotic transient time than it used to be. The proposed approach is applicable to the systems with unknown dynamic model and known experimental data.

**Key words:** chaos control; immune algorithm; multi-model solution; Hénon map

### 1 引言(Introduction)

混沌现象广泛存在于工程、物理、数学和生物医学等领域. 混沌系统最基本的特性是对于初值的敏感性, 即初始状态的微小不同可以导致系统状态巨大差别. 混沌行为是复杂和不规则, 在实际中, 作者常常希望能够通过去除或避免混沌以提高系统的性能, 使系统能够达到稳定或得到预期的性能. 因此, 混沌控制的研究自上世纪 90 年代初以来受到了广泛的重视, 提出了一系列混沌控制的方法, 如参数微扰法、纳入轨道法和强迫迁徙法、工程反馈控制方法及智能控制方法等.

较为系统和严密的参数微扰法是 Edward Ott et al 的 OGY 法<sup>[1]</sup>. 这种方法用系统的局部线性化模

型, 并利用线性反馈控制技术把系统控制在不动点上. 其优点在于只需有限的控制作用(微扰)就可以取得好的控制效果, 而无需对系统的动力学形态作大的改动. 但由于控制律仅作用在不动点的小邻域, 因此只有当混沌轨道从不动点附近经过, 即不动点被吸引子内的其他点稠密包围时, 才能奏效.

为扩大控制器的作用范围, 减少系统进入被控范围前的徘徊时间, A. Duchateau et al 提出了全局非线性的多模型控制方案(multi-model solution)<sup>[2]</sup>, 在混沌轨道上设置一系列的控制器(若干个局部线性模型及局部反馈控制律), 控制器所能作用的区域称为有效控制区 ZEC(zones of effective control, 在文中控制器及相应的有效作用区域均用“ZEC”来指代).

只要系统状态进入任何一个 ZEC, 就能被捕获, 在控制律的引导下趋近不动点. 多模型控制方案是 OGY 法的一种改进方法, OGY 法的有效控制区只有一个, 即不动点附近的小区域, 而多模型控制方案则除了不动点外, 还设置了多个有效控制区, 扩大可控范围. A. Duchateau et al 的控制器有以下两个特征:

- 1) 是全局非线性的, 因为控制对象是高度非线性的, 局部线性化模型在别处不成立.
- 2) 假设控制作用的大小是受限制的, 控制律必须保证控制器能在每一时间步长只用很小的扰动就能引导系统收敛.

因此要求控制器的结构应是可以变化的, 控制作用的大小是可以调节的, 即具有参数和结构双重可塑性. 所谓的“参数可塑性”是指当执行某种任务时, 系统能够调整自身的参数以提高性能的能力, 典型的例子就是神经网络(NN). “结构可塑性”是更进一步的调节, 在由相互作用的元素所组成的网络结构中, 网络的一些元素能够相互组合或消失, 如遗传算法(GA)的交叉与变异. 如果把系统描述为微分(或差分)方程组, 参数的改变不能改变这个微分方程组, 而结构改变可以添加或去掉一些方程.

借鉴生物机体免疫系统的概念与理论的免疫算法(IA)具有参数和结构的双重可塑性<sup>[3]</sup>, 表现在网络中已存在的个体的浓度可以改变, 同时个体也可消失或出现新的个体, 能满足多模型控制策略的要求, 因此本文拟采用免疫算法对混沌进行控制.

## 2 混沌的多模型控制策略 (Multi-model solution for control of chaos)

### 2.1 问题的描述 (Problem description)

考虑一个非线性离散动力学系统

$$x_{n+1} = f(x_n, p_n), \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中  $p_n = p^* + u_n$ . 这里  $x_n \in \mathbb{R}^n$  为系统的状态,  $p_n \in (p^* - \delta, p^* + \delta)$  为系统的控制参数,  $\delta$  为  $p_n$  允许扰动的最大值. 假定系统(1)在  $p_n = p^*$  时出现混沌, 要找到一组适当的控制律  $|u_n| \leq \delta$ , 使系统由初始点  $x_0$  到达目标点  $x^*$  (如不稳定不动点)的某一范围, 即  $\|x_n - x^*\| \leq \epsilon$ , 并在此后稳定于该点.

### 2.2 控制器的设计和控制律的产生 (Designing controller and generating the control law)

在未加任何控制作用的情况下, 选取一条收敛到不动点的轨道, 在其上嵌入若干控制器, 控制的最终目标是不动点, 因此, 第一个控制器  $ZEC_0$  的中心选取在不动点上, 当轨迹落入  $ZEC_0$  的作用范围时,  $ZEC_0$  将产生控制律, 把状态引导向不动点. 经学习和训练, 能达到满意的收敛效果后, 在  $ZEC_0$  外添加下一个控制器  $ZEC_1$ ,  $ZEC_1$  的控制目标是把状态送

入  $ZEC_0$  中的一个点. 不断添加新的控制器,  $ZEC_i$  的控制目标是把状态送入  $ZEC_{i-1}$  的中心. 这样就形成了一条混沌的引导轨线. ZEC 增加了吸引子的可控部分, ZEC 覆盖的范围越大, 抑制混沌所需的暂态时间就越短, 理想的情况是控制律覆盖吸引子内所有的点, 但是与此同时, 学习和产生控制律的计算时间变长. 因此控制器的数目应综合这两方面考虑. 用于把 Henon 混沌映射稳定在不动点上的 ZEC 网络及收敛轨线示意图如图 1 所示<sup>[2]</sup>.

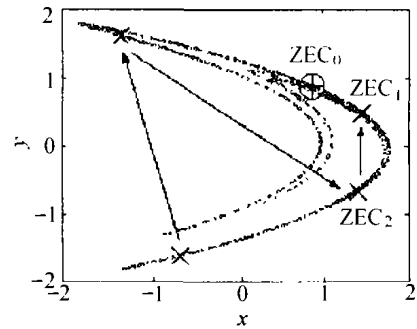


图 1 ZEC 网络及收敛轨线示意图  
Fig. 1 Sketch map of ZEC network and trajectory which converges to fixed point

ZEC 的中心设置在系统的某一状态上, 为在每一个 ZEC 处训练模型, 确定控制律, 须明确划定 ZEC 的作用范围, 定义一个从属函数, 如作用范围可划定为一个以其中心为球心的球域, 此外两个 ZEC 的作用范围不应重叠. ZEC 控制律的产生流程如图 2.

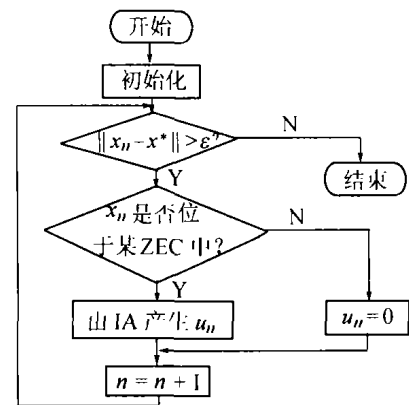


图 2 控制律的产生  
Fig. 2 Generating control law

## 3 免疫算法 (Immune algorithm)

### 3.1 免疫算法流程 (Flow of immune algorithm)

免疫算法是借鉴生物机体的免疫系统的概念与理论, 结合工程应用而描述的一种计算模型, 它将待求解的问题对应为抗原, 问题的一个解对应为抗体, 其提出主要基于以下启发: 生物的免疫系统对外来侵犯的抗原可自动产生相应的抗体来抵御, 抗体与抗原结合后, 会通过一系列的反应破坏抗原, 并且抗

体之间也有相互刺激与抑制反应,这种反应根据抗体浓度进行:抗体的浓度越高,则越受抑制;浓度越低,则越受促进<sup>[4]</sup>.免疫算法的运算过程如图 3 所示.

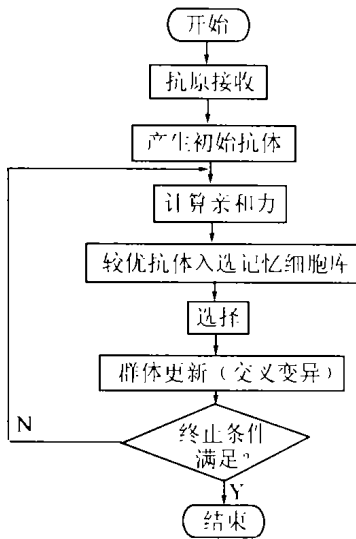


图 3 免疫算法流程图

Fig. 3 Flow chart of immune algorithm

### 3.2 目标函数 (Objective function)

抗体的编码采用二进制形式,抗体编码串包含控制量信息.抗原对应于所求解问题的目标函数.假设当前系统状态  $x_n$  处于  $ZEC_i$  中,希望在控制量  $u_n$  的作用下,下一个时间步的状态  $x_{n+1}$  能到达  $ZEC_{i-1}$  的中心  $x_{i-1}^*$ ,因此可以选择距离  $\|x_{n+1} - x_{i-1}^*\|$  作为目标函数.

### 3.3 免疫记忆及初始抗体的产生 (Immune memory and production of initial antibody population)

免疫记忆的引入是免疫算法有别于遗传算法的一个特点.所谓的免疫记忆是指系统在完成一个问题的求解后,把求解过程中的较优抗体保留下来,放入抗体记忆细胞库,这样在以后接收同类问题的求解时,就可以以记忆细胞群作为初始群体,提高求解的收敛速度.

记忆细胞库由 ZEC 的识别码(识别码包括 ZEC 序号及当前系统状态  $x_n$  信息)及记忆细胞群组成,如图 4.设记忆细胞群的规模为  $N$ ,在每一次群体评估后,将适应度最好的  $M$  个抗体入选到细胞库中,若记忆细胞库已满,则替换掉适应度最差的抗体,同时比较库中有否与入选的抗体相同的记忆细胞,以保证记忆细胞群的多样性.

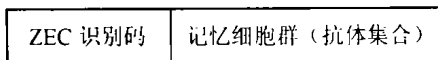


图 4 记忆细胞库结构简图

Fig. 4 Structure of memory cells

初始抗体的产生有两种途径:

1) 通过随机方法产生;

2) 针对待求解问题的特征,若能与记忆细胞群的特征参数信息(ZEC 识别码)相匹配,则由库中的记忆细胞组成初始抗体群,不足部分随机产生.

### 3.4 计算亲和力 (Calculation of affinities)

生物机体免疫系统中的抗体有着足够的多样性,以对付不同的抗原,整个系统在抗体与抗原、以及抗体与抗体之间的相互作用中保持着微妙的平衡.抗体的多样性由信息熵衡量.假设抗体群由  $N$  个抗体组成,每个抗体的基因数为  $M$ ,等位基因的种类为  $S$ ,则抗体群的平均信息熵为<sup>[5,6]</sup>

$$H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N). \quad (2)$$

其中  $H_j(N)$  为  $N$  个抗体第  $j$  位的信息熵:

$$H_j(N) = \sum_{i=1}^S -p_{i,j} \log p_{i,j}. \quad (3)$$

$p_{i,j}$  表示第  $j$  位为等位基因  $i$  的概率.

为从抗体群中找出适应度较优的抗体,并产生新的群体,须进行群体评估,即比较抗体与抗体、抗体与抗原间的相似程度(亲和力).抗体  $v$  与抗体  $w$  的亲和力定义为<sup>[5,6]</sup>

$$ay_{v,w} = \frac{1}{1 + H(2)}. \quad (4)$$

抗体  $v$  与抗原的亲和力定义为<sup>[6]</sup>

$$ax_v = \frac{1}{1 + \text{opt}_v}. \quad (5)$$

其中  $\text{opt}_v$  为目标函数.

### 3.5 选择及群体更新 (Selection of antibodies and production of new antibodies)

在选择过程中,希望适应度高的抗体被保留下来,但如果此类抗体过于集中,浓度过高,则很难保证抗体的多样性,在进化过程中陷入未成熟收敛,因此引入期望繁殖率  $e_i$  作为选择的依据,目的是抑制浓度过高的抗体,同时保证适应度高的个体被选中的概率较大.

抗体  $v$  被选择到下一代的可能性由期望繁殖率  $e_v$  决定<sup>[6]</sup>:

$$e_v = \frac{a x_v}{c_v}. \quad (6)$$

其中  $c_v$  为抗体  $v$  的浓度,由下式计算:

$$\begin{cases} c_v = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N ac_{v,w}, \\ ac_{v,w} = \begin{cases} 1, & ay_{v,w} \geq Tac1, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

$Tac1$  为一个事先确定的阈值.

从中选取期望繁殖率高的  $N$  个抗体组成新的抗体群.上述机制使得在新一代群体中,各适应度层

次的抗体维持一定的浓度,从而使群体的多样性得到保持.

群体更新采用遗传算法的两种基本遗传算子:交叉和变异.

#### 4 仿真实例 (Simulation example)

1976 年, Hénon 利用数值方法研究了迭代映射<sup>[7]</sup>:

$$H: \begin{cases} x_{n+1} = a + by_n - x_n^2, \\ y_{n+1} = x_n. \end{cases} \quad (8)$$

当  $a = a^* = 1.4, b = b^* = 0.3$  时, Hénon 映射有奇怪吸引子, 有一个不稳定不动点位于  $(0.8839, 0.8839)$ . 采用免疫算法把混沌运动控制到

不动点上, 令系统 (8) 的参数  $b = b^*$  不变化, 取  $a$  为控制参数, 让  $a$  在  $a^*$  附近变化:  $a = a^* + u_n, u_n$  为控制量. 假设  $a$  的可变化范围为  $a^* - \delta \leq a \leq a^* + \delta, \delta$  为允许扰动的最大值, 则  $|u_n| \leq \delta$ .

取  $\delta = 0.01$ , 设置 30 个 ZEC, 在 4 个不同的初始条件  $(x_0, y_0)$  下的控制结果分别如图 5(a)、(b)、(c)、(d) 所示, 图中  $n$  为迭代次数,  $u$  为控制量, 输出变量取系统 (8) 中两个状态变量之一  $x$ . 混沌轨道由初始值开始直至进入 ZEC 之前,  $u = 0$ , 而被任一 ZEC 捕获后, 控制律起作用, 轨道沿着事先设置好的一系列 ZEC 被引导至不动点.

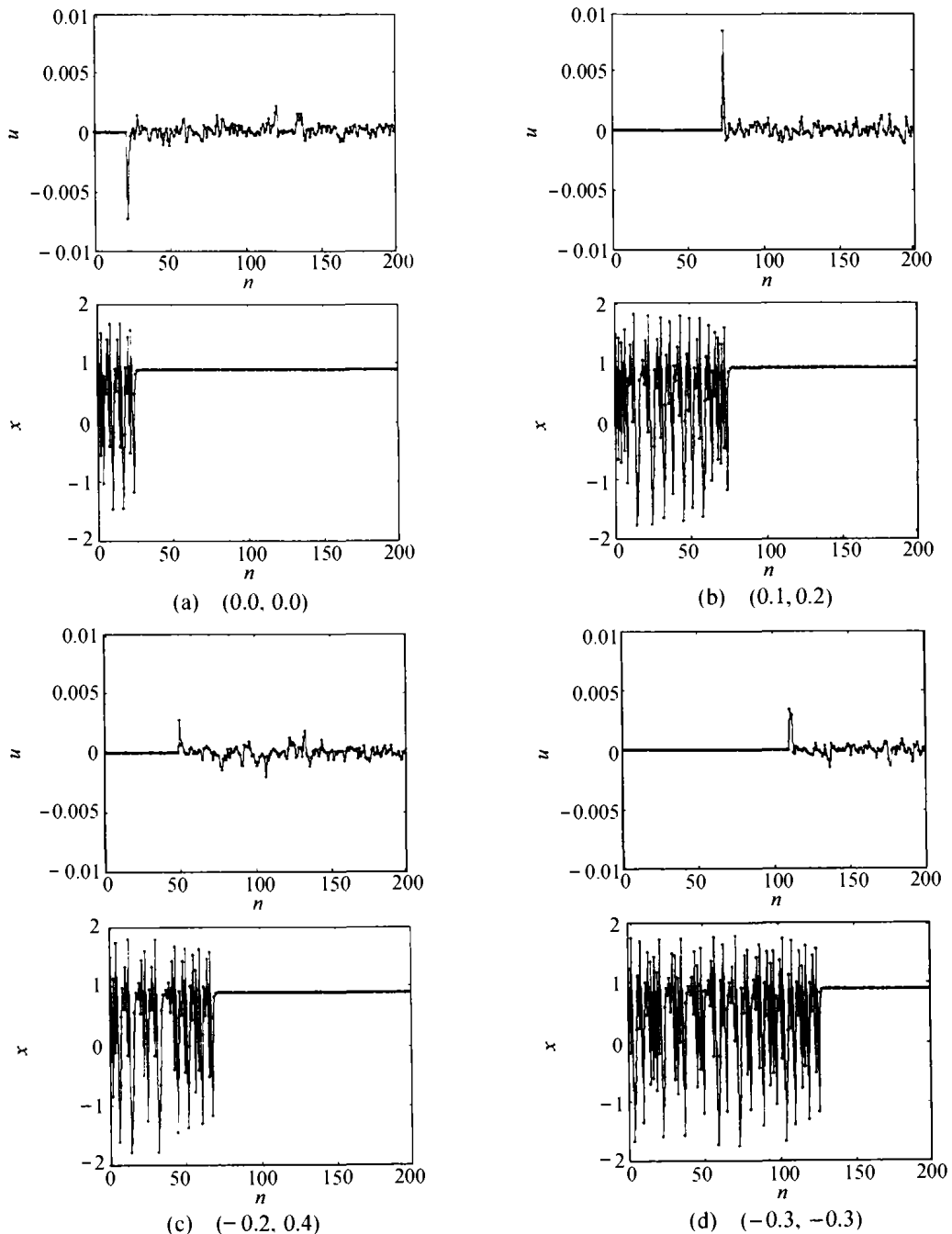


图 5 不同初始条件下的控制效果

Fig. 5 Simulation results for different initial value

混沌由初始状态开始直至进入不动点周围能控区域的时间称为混沌暂态时间,混沌暂态时间与可控区域的大小成反比.其估计方法如下:在无控条件下,在混沌吸引子中随机产生大量初始状态进行迭代(典型的迭代次数为 500 次),直至这些初始状态布满吸引子,然后加上扰动,计算这些轨道进入以不动点为中心的可控区域所需迭代次数的平均值,即得到平均混沌暂态时间<sup>[1]</sup>.在不同的允许扰动幅度  $\delta$  下,把本方法用于 Hénon 映射,得到的平均混沌暂态时间如表 1 所示,与其他方法的比较见表 2<sup>[2]</sup>.

由仿真结果可见使用多模型控制策略可以增加混沌的可控区域,缩短混沌暂态时间.所用的控制器越多,则混沌暂态时间越短,但与此同时增加了产生控制律的计算时间,应综合这两方面的因素选取控制器个数.

表 1 基于免疫算法的平均混沌暂态时间  
Table 1 Average time of chaotic transient for using immune algorithm

ZEC 个数	$\delta = 10^{-2}$	$\delta = 10^{-3}$
30	110	1130
60	80	630

表 2 其他方法的平均混沌暂态时间  
Table 2 Average time of chaotic transient for the other control methods

控制方法	$\delta = 10^{-2}$	$\delta = 10^{-3}$
优化线性控制器	400	10000
ZEC 个数为 1*	880	17000
ZEC 个数为 60*	170	3120

\* 注: A. Duchateau et al(1999)的结果,控制律为局部线性反馈控制律.

## 5 结语(Conclusion)

免疫算法可以成功地应用于混沌的多模型微扰控制,与 OGY 法一样,其适用范围为离散动力学系统及可用庞加莱映像表征的连续动力学系统.而基本框架与之相近的另一种优化方法——遗传算法亦可以应用于此目的.与基本的遗传算法相比,免疫算法中引入了抗体浓度调节机制,使各适应度层次的抗体维持一定的浓度,从而保持群体的多样性,避免在搜索过程中陷入局部极优,因而对于维数较高的复杂系统,免疫算法可能会取得更好的控制效果.钟晓敏等(1998)<sup>[8]</sup>用遗传算法引导混沌轨道,采用全局控制的策略:从任意初始点开始施加控制作用,目标函数为使系统的下一个状态到不动点的距离最小,如果知道系统的全局动力学模型,很快就可以达

到控制目标.本文为局部控制方法,有效控制区全部设置在未加扰动的混沌系统的收敛轨道上,其局部模型可根据实验数据由最小二乘法拟合(详见文献[2]),因此本文的方法可以应用于仅知道系统的实验数据或系统存在较大的干扰和噪声,与数学模型有较大出入的情况.

## 参考文献(References):

- [1] EDWARD O, CELSO G, JAMES Y A. Controlling chaos [J]. *Physical Review Letter*, 1990, 64(11): 1196 - 1199.
- [2] DUCHATEAU A, BRADSHAW N P, BERSINI H. A multi-model solution for the control of chaos [J]. *Int J Control*, 1999, 72(7/8): 727 - 739.
- [3] HUGUES B. The endogenous double plasticity of the immune network and the inspiration to be drawn for engineering artifacts [M]// DASGUPTA D. *Artificial Immune Systems and Their Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 22 - 44.
- [4] 周伟良,何鲲,曹先彬,等.基于一种免疫遗传算法的 BP 网络设计[J].安徽大学学报(自然科学版),1999,23(1):63 - 66. (ZHOU Weiliang, HE Kun, CAO Xianbin, et al. Design of BP network based on immune genetic algorithm [J]. *J of Anhui University (Natural Science Edition)*, 1999, 23(1): 63 - 66.)
- [5] TOYOO F, KAZUYUKI M, MAKOTO T. Parallel search for multimodal function optimization with diversity and learning of immune algorithm [M]// DASGUPTA D. *Artificial Immune Systems and Their Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 210 - 220.
- [6] CHUN Jang-sung, KIM Min-kyu, JUNG Hyun-kyo. Shape optimization of electromagnetic devices using immune algorithm [J]. *IEEE Trans on Magnetic*, 1997, 33(2): 1876 - 1879.
- [7] Hénon M. A two-dimensional mapping with a strange attractor [J]. *Communication in Mathematics Physics*, 1976, 50(1): 69 - 77.
- [8] 钟晓敏,邵世煌,方建安.用遗传算法引导混沌轨迹[J].控制与决策,1998,13(2):165 - 168. (ZHONG Xiaomin, SHAO Shihuang, FANG Jian'an. Directing orbits of chaotic dynamical systems using genetic algorithms [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(2): 165 - 168.)

## 作者简介:

陆益民 (1970—),女,1992年毕业于东南大学自动控制系,现为华南理工大学博士生,广西大学电气工程学院讲师.目前研究方向:智能控制,非线性系统的混沌现象及控制. E-mail: gxulym@163.com;

毛宗源 (1936—),男,教授,博士生导师.1961年毕业于大连理工大学工业自动化系.已发表论文 100 多篇.目前研究方向:现代控制理论及应用,电力电子技术;

张波 (1962—),男,博士,教授,博士生导师.1982年毕业于浙江大学电机专业,1994年在南京航空航天大学电力电子技术专业获博士学位.已发表论文 70 余篇.目前研究方向:交流传动和电力电子技术.