

自适应尺度混沌免疫优化算法及其应用

杨海东¹, 鄂加强²

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 结合混沌优化算法与免疫算法的特点, 提出了一种采用折叠次数无限的自映射 $x = \sin(2/x)$ 产生混沌变量的自适应尺度混沌免疫优化算法. 该算法通过自适应尺度方法不断调整优化变量的搜索空间, 同时采用最大循环次数作为控制指标, 既保证了寻优的准确性, 又保证了算法的快速性. 应用该算法对 3 个测试函数进行优化计算得到了比较满意的结果. 将此算法应用于移动 Ad Hoc 网络入侵检测时的仿真实验结果表明, 自适应尺度混沌免疫优化算法能有效地减少对训练样本的依赖, 同时减少噪音数据对入侵检测系统性能的影响, 适用于移动自组网络对于入侵检测系统高检测率、高抗噪能力和低计算延迟的要求.

关键词: 混沌免疫优化算法; 混沌; 免疫; 移动 Ad Hoc 网络

中图分类号: TP393.08 **文献标识码:** A

An adaptive chaos immune optimization algorithm with mutative scale and its application

YANG Hai-dong¹, E Jia-qiang²

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

2. College of Mechanical & Vehicle Engineering Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: By combing the chaos optimization method and the immune algorithm, we propose an adaptive chaos immune optimization algorithm(AMSCIOA) with mutative scale, using one-dimensional iterative chaotic self mapping $x = \sin(2/x)$ with infinite collapses within the finite region $[-1, 1]$. In the optimization process, to ensure the high speed and precision some measures are taken, including: 1) the ranges of optimized variables are reduced continuously by the adaptive mutative scale method, and the searching precision is enhanced accordingly; 2) the maximal number of repetitions is regarded as a controlled index. The simulation results for three testing functions validate the high speed and precision of the AMSCIOA with mutative scale. The simulation of the intrusion detection system for detecting the intrusions to mobile Ad Hoc networks show that this algorithm lowers the dependence of training samples, reduces the noise influence on the performance, provides a high detection rate, and produces a small time-delay caused by computation.

Key words: chaos immune optimization algorithm; chaos; immune; mobile Ad Hoc networks

1 引言(Introduction)

人工免疫算法^[1~5]是在遗传算法的基础上发展起来的. 它模拟生物免疫系统对外来抗原的排除, 借鉴免疫系统的自组织学习、自适应调节的特点, 在保留遗传算法优良特性的前提下, 力图有选择、有目的地利用待求问题中的一些特征信息或知识来抑制其优化过程中出现的退化现象, 它具有免疫记忆特性、抗体自我识别能力和免疫多样性的特点^[1,2]. 免疫算法虽然较好地解决了遗传算法的退化现象, 能迅速把问题的最优解限制在一个较小的空间范围里, 但与遗传算法一样, 它仍不能充分利用求解问题

的特征信息指导全局搜索, 搜索是盲目的、随机的, 在小区域仍不能克服不成熟收敛现象, 在小空间搜索效率并不显著^[3~5].

混沌变量看似杂乱的变化过程, 其实却含有内在的规律性. 利用混沌变量的随机性、遍历性和规律性可以进行优化搜索^[6], 其基本思想是把混沌变量线性映射到优化变量的取值区间, 然后利用混沌变量进行搜索. 但是, 该算法在大空间、多变量的优化搜索上, 却存在着计算时间长、不能搜索到最优解的问题^[7].

本文在文献[8]的免疫算法的基础上, 充分结合

混沌搜索与免疫算法两种算法的优点,利用免疫算法的记忆特性和当代最优解指导混沌搜索.由于目前混沌免疫优化算法^[9~12]采用有限区域内折叠次数有限的Logistic模型产生混沌变量,其混沌特性不是十分明显.因此本文利用在有限区域内折叠次数无限的混沌模型来产生混沌变量,并采用自适应变尺度方法改变优化变量的搜索空间,不断提高搜索精度等方法来解决求解最优值的收敛速度缓慢难题,从而提出了一种自适应变尺度混沌免疫优化算法.应用3个测试函数对该算法进行仿真试验,试验结果表明该算法具有较好的收敛性和搜索效率.将该算法应用于移动Ad Hoc网络入侵检测,验证了该方法的有效性.

2 混沌理论和免疫原理融合的优化算法(An optimization algorithm based on fusion of chaos theory and immune principle)

2.1 混沌模型的选择(Choice of chaos model)

1维混沌自映射的表达式为

$$x_{n+1} = f(x_n). \quad (1)$$

在其相空间内总会有线性或非线性折叠现象,否则不可能产生混沌.在某种意义上,用于刻画模型“混沌性”的Lyapunov指数也可以看作是模型平均折叠次数的一种表示.当模型的平均斜率的绝对值大于1时, Lyapunov指数为正.一般常用的Logistic模型、Tent模型、Chebyshev模型等的映射折叠次数都是有限的.

考察由下式定义的1维自映射:

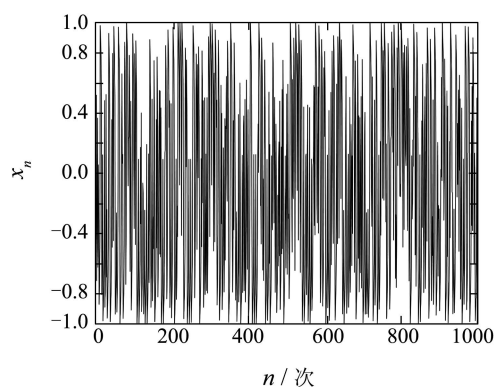
$$\begin{cases} x_{n+1} = \sin(2/x_n), & n = 0, 1, 2, \dots, N, \\ -1 \leq x_n \leq 1, & x_n \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

该映射由于折叠次数无限,在区间 $[-1, 1]$ 内有无穷多个不动点和零点,因此若要由此映射产生混沌,必须注意以下两点:

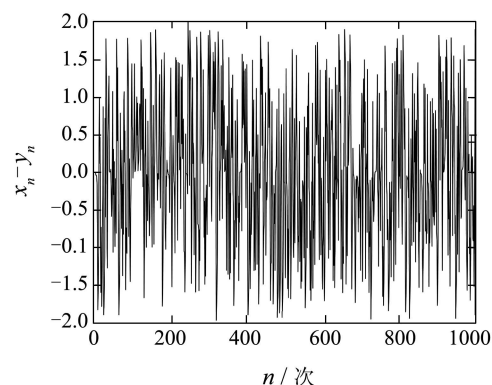
- 1) 迭代的初始值不能为0;
- 2) 初始值不能取为无穷多个不动点的任何一个,不动点为方程 $x_{n+1} = \sin(2/x_n)$ 的解.

在实际工程应用过程中,超越数 $2/(k\pi)$ (k 属于整数, $k \neq 0$)不可能出现,而总是以有限精度的有理数来近似替换.因此,只要迭代初值不为0,混沌就会发生,此时映射的定义域为 $[-1, 1]$,且 $x \neq 0$,以及不包括上述的各超越点.1维自映射 $x_{n+1} = \sin(2/x_n)$ 在迭代1000次后的随机性、初值敏感性和遍历性如图1所示.图中:图(a)的初值为 $x_0 = 0.255$,可以看到系统输出是毫无规律的;图(b)的初值分别

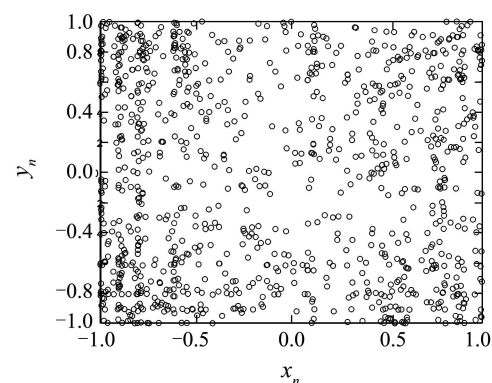
为 $x_0 = 0.2551, y_0 = 0.2552$,纵坐标为 $x_n - y_n$.可以看出,这两个系统输出完全不同;图(c)系统的初值分别为 $x_0 = 0.2551, y_0 = 0.1552$,横坐标为 x_n ($x_{n+1} = \sin(2/x_n)$);纵坐标为 y_n ($y_{n+1} = \sin(2/y_n)$),从图中可以观察到,当迭代一定次数时,系统输出将遍历整个解空间.



(a) $x_0 = 0.255$



(b) $x_0 = 0.255, y_0 = 0.2252$



(c) $x_0 = 0.2551, y_0 = 0.1552$

图1 1维自映射 $x_{n+1} = \sin(2/x_n)$ 的随机性、初值敏感性和遍历性与迭代次数关系图

Fig. 1 Properties of randomness, sensitivity to initial value and ergodicity of the one-dimensional self-map $x_{n+1} = \sin(2/x_n)$ through iterating 1000 times

Lyapunov指数是衡量混沌性质的一个重要指标,混沌自映射式(2)的Lyapunov指数表达式为

$$LE = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln |f'(x_i)| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln \left| \frac{2}{x_i^2} \cos\left(\frac{2}{x_i}\right) \right|. \quad (3)$$

从式(3)所示的Lyapunov指数表达式可以看出,与常用的有限折叠次数映射相比,显然式(2)的混沌性更明显。

通过比较基于不同混沌模型的混沌搜索,来证明式(2)模型具有更明显的混沌特性,并对下式进行计算:

$$\begin{cases} \min f(x) = \min(4 - x^2)^2, \\ -8 < x < 8, \end{cases} \quad (4)$$

式中 $f(x)$ 在极值点 $x = \pm 2$ 所取极小值为0。

利用式(2)的模型和Logistic模型,对混沌变量进行遍历整个区间的混沌优化(只进行一次搜索),得到的结果见表1。从表1中可以看出,式(2)模型的混沌优化结果更好,也说明此模型与常用的有限折叠次数模型相比,混沌特性更明显。

表 1 2种映射的混沌特性对比
Table 1 Results of chaos characteristics comparing chaos map $x_{n+1} = \sin(2/x_n)$ to Logistic map

混沌模型	计算 次数/次	平均迭代 次数/次	最长迭代 次数/次
式(2)	40	3564.3	15473
Logistic	40	2421.6	5432

2.2 自适应尺度混沌免疫优化算法(An adaptive mutative scale chaos immune optimization algorithm)

在人工免疫算法中,匹配算法或进化算法被用来实现数据训练和免疫记忆,且进化算法较匹配算法表现出更好的性能,故本文的免疫优化算法可表示为

Step 1 输入抗原 $\{Ag\}$,做标准化处理。选择式(2)产生 $(0, 1)$ 间的 N 个混沌变量,作为初始化抗体 $\{Ab\}$ 。

Step 2 对每一个抗原 Ag_i 操作如下:

Step 2.1 利用式(5)分别计算每个抗体 Ab_i 同抗原 Ag_i 的亲合力 a_{ij} :

$$a_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (Ab_{ik} - Ag_{jk})^2}. \quad (5)$$

Step 2.2 选择亲和力最高的 m 个抗体作为网络细胞;

Step 2.3 对 m 个被选择的网络细胞,做克隆操作。亲和力越高的网络细胞,克隆数 N_c 越多;

Step 2.4 对克隆后的细胞应用方程 $C = C - \alpha(C - X)$ 进行变异操作, C 是克隆抗体细胞, X 是克隆抗原细胞, α 是变异率;

Step 2.5 重新计算变异操作后的 C 的亲合力;

Step 2.6 选择其中亲和力最好的 $\xi\%$,作为部分记忆细胞数据集 M_p ;

Step 2.7 利用式(6)分别计算每个抗体 Ab_i 同抗体 Ab_j 间相似度 s_{ij} ,淘汰 M_p 中相似度 s_{ij} 大于域值 σ_s 的个体;

$$s_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (Ab_{ik} - Ab_{jk})^2}. \quad (6)$$

Step 3 合并 M_p 到已经得到的记忆数据集 M 中。

Step 4 对较优个体进行混沌细搜索。

选择记忆库中适应值较大的10%的个体进行混沌细搜索,设较优个体为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$,混沌变量搜索区间的缩小表示为

$$\begin{cases} a'_i = X_i - \phi(b_i - a_i), \\ b'_i = X_i + \phi(b_i - a_i). \end{cases} \quad (7)$$

式中 ϕ 为收缩因子, $\phi \in (0, 0.5)$ 。

为了保证新范围不至于越界,作如下处理:若 $a'_i < a_i$,则 $a'_i < a_i$;若 $b'_i > b_i$,则 $b'_i = b_i$ 。

因此, X_i 在新区间 $[a'_i, b'_i]$ 上作还原处理后的向量 Y_i 由式(8)确定:

$$Y_i = \frac{X_i - a'_i}{b'_i - a'_i}. \quad (8)$$

把 Y_i 与 $X_{i,n+1}$ 的线性组合作为新的混沌变量,用此混沌变量进行搜索:

$$X'_{i,n+1} = (1 - \beta_i)Y_i + \beta_i X_{i,n+1}. \quad (9)$$

式中: β_i 为自适应调节系数, $0 < \beta_i < 1$ 。

自适应调节系数 β_i 采用如下方法进行自适应确定:

$$\beta_i = 1 - \left(\frac{K-1}{K}\right)^m. \quad (10)$$

式中: m 为一整数,根据目标函数而定(本文取为2); K 为迭代次数(本文取为进化代数)。

淘汰记忆库中适应值较大的10%的个体相似度大于 σ_s 的个体。

Step 5 选择式(2)作为产生 N 个 $(0, 1)$ 间的个体,替换亲和力差的个体,同上次免疫计算得到的记

忆数据集 M 作为下一代免疫计算的抗体, 并返回 Step 2, 直到达到网络收敛.

算法终止条件为, 迭代次数超过设定的最大进化世代数或者相邻两代免疫网络细胞的距离均值和网络规模不再变化或者变化足够小.

2.3 自适应尺度混沌免疫优化算法收敛性(Astringency of adaptive mutative scale chaos immune optimization algorithm)

自适应尺度混沌免疫优化方法在局部搜索能力和搜索精度上优于免疫进化算法, 可以克服混沌优化方法在大范围内失效的缺点, 其收敛性也能得到保证.

由于混沌变量的遍历性, 当循环次数足够大时将保证收敛到最优解. 从测度论上讲, 由于自适应尺度混沌免疫优化算法属于下降算法, 因而设 R_0 表示全局最优点 X^* 的邻域, 自适应尺度混沌免疫优化算法产生的序列 X_i 落入 R_0 的事件集合为 A_i , 因此 $A_1 \subset A_2 \subset \dots \subset A_i \subset \dots$, 概率测度单调不减, 同时, $P(A_i) \leq 1$, 知

$$\lim_{i \rightarrow \infty} P(A_i) = P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = 1. \quad (11)$$

取正数 ε , $0 < \varepsilon < 1$, 则存在正数 N , 当 $i > N$ 时, 有 $P(A_N) \geq 1 - \varepsilon$, $P(\bar{A}_N) < \varepsilon$, 则 $P(\bar{A}_i, i > N) \leq \varepsilon^{i-N}$, 因此当 i 足够大时, 自适应尺度混沌免疫优化算法以概率1搜索到全局最优解.

3 自适应尺度混沌优化算法的数值仿真(Simulations of adaptive mutative scale chaos immune optimization algorithm)

应用本文提出的自适应尺度混沌免疫优化算

法, 对以下3个测试函数进行优化计算. 数值函数优化问题不需要专门领域的知识, 且能较好地反映算法本身的实际效能. 为了考察算法的性能, 将自适应尺度混沌免疫优化算法的结果与混沌遗传算法、自适应尺度混沌优化算法的结果进行比较.

设自适应尺度混沌免疫优化算法的免疫选择阈值为0.85, 总种群为40, 记忆库种群为14, 混沌操作种群为5时, 由混沌变量的遍历性可知时间足够长时一定能达到最优解. 故在设定同样初值的情况下, 在找到全局极值所需迭代次数指标上比较本文算法与文献[13]、文献[14]算法. 所得结果如表2所示.

$$F_1 = 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2, \\ -2.048 \leq x_i \leq 2.048. \quad (12)$$

$$F_2 = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)] \times \\ [30 + (2x_1 - 3x_2)^2(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)], \\ -2 \leq x_i \leq 2, \quad (13)$$

$$F_3 = 0.5 - \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2}, \\ -4 \leq x_i \leq 4. \quad (14)$$

其中: F_3 为求全局极大值, 其余为求全局极小值.

从表2可以看出, 自适应尺度混沌免疫优化算法将免疫进化算法与混沌搜索算法各自搜索空间上的优势结合得更好, 搜索效率和收敛性能更高, 求得极值的平均时间比混沌遗传算法、自适应尺度混沌优化算法减少了许多, 故自适应尺度混沌免疫优化算法的搜索效率较高.

表2 本文算法与文献[13,14]算法对比

Table 2 Results of comparing the algorithm in the paper to the algorithm in the reference[13] and the algorithm in the reference[14]

函数	最优解	全局极值	全局极值迭代次数		
			文献[13]算法	文献[14]算法	本文算法
F_1	(1.0000, 1.0000)	0.0000	675	687	565
F_2	(0.0000, -1.0000)	3.0000	257	253	212
F_3	(0.0000, 0.0000)	1.0000	458	462	423

4 移动Ad Hoc网络入侵检测应用仿真(Application simulations of mobile Ad Hoc networks intrusion detection)

4.1 针对AODV路由协议的网络攻击(Networks attack based on AODV routing protocol)

MANETs中的节点不但充当数据传输的功能,

而且为网络中的其他节点充当路由的功能, 一个节点到另一节点的路由依赖于参与路由的所有节点, 针对MANETs路由协议的网络攻击很常见. 本文以MANETs的AODV协议(Ad Hoc on demand distance vector routing)为例, 考虑针对AODV的黑洞攻击和FFRR攻击等两种DoS攻击.

黑洞攻击特点是恶意节点向环境中周围所有的节点广播它有最短路径. 在AODV中, 恶意的节点对选定的源节点和目的广播拥有假的最大序列号的ROUTE_REQUEST. 如果该恶意节点选定其他源节点发送ROUTE_REQUEST, 最终它将攻陷全网. 就像在网络上形成一个吸收(只进不出)数据的黑洞.

在FFRR攻击中, 恶意的节点产生大量的无用ROUTE_REQUEST来占用带宽和消耗其他节点的资源.

4.2 特征选择及数据预处理(Feature selection and data pretreatment)

在移动Ad hoc网络入侵检测系统里, 每个节点都有它相邻节点的特征, 在AODV路由协议中, 和流量相关的所有特征有100多个, 本文选取表3所示的与DoS攻击相关的4个特征作分析, 减少冗余数据和节省分析时间. 经过数据预处理模块处理的数据采用10-folder cross validation方法分割训练数据和检测数据, 取得多次检测的检测率平均值.

表 3 相邻节点流量特征

Table 3 Flux characteristics of conjoint node

参数	描述
NBSent	相邻节点发送的数据流量
NBRecv	相邻节点接收的数据流量
NBRreqSent	相邻节点发送的RREQ包数量
NBRrepSent	相邻节点发送的RREQ包数量

4.3 仿真实验结果及分析(Simulations results and analysis)

实验中, AODV协议及网络攻击的仿真平台是ns² 2.3.0, 仿真时间为600 s.

检测率是入侵检测性能的一个重要指标. 图2为训练数据集数目 n 最大为100时, 噪声数据为10%时的自适应尺度混沌免疫优化算法、KFF算法以及RANDOM算法的检测率 η 的示意图. 图中: 曲线1为自适应尺度混沌免疫优化算法; 曲线2为KFF算法; 曲线3为RANDOM算法.

从图2可以看出, 自适应尺度混沌免疫优化算法的检测率在训练数据集达到一定数目后稳定收敛, 并且检测率高于KFF算法以及RANDOM算法. 同时, 达到一定的检测率对训练样本的要求减少, 意味着计算延迟的降低. 可见, 本文检测结果明显高于文献^[15]的检测率仿真结果.

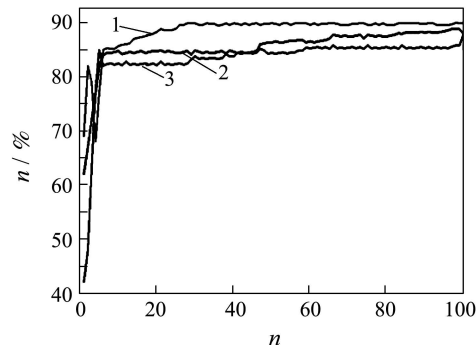


图 2 噪声数据为10%的检测率的示意图

Fig. 2 Sketch map of detection rate when noises data being 10%

5 结论(Conclusion)

1) 折叠次数无限的混沌模型 $x = \sin(2/x)$ 所产生的混沌变量约束区间的遍历性比常用来产生混沌变量的有限折叠次数混沌模型(如Logistic模型)要好一些, 也说明此模型的混沌特性更明显.

2) 自适应尺度混沌免疫优化算法综合了免疫进化算法全局搜索能力强与混沌优化算法局部搜索能力强的优势, 通过不断调整优化变量的搜索空间, 将搜索范围缩小到当前最优解附近, 既保证了寻优的准确性, 又保证了算法的快速性.

3) 自适应尺度混沌免疫优化算法验证结果表明, 本文所用的算法简单实用, 对优化问题不要求连续性、可微性, 且编程方便, 是解决优化问题的一种有效方法.

4) 自适应尺度混沌免疫优化算法在移动Ad hoc网络的入侵检测中的仿真实验表明, 与KFF算法以及RANDOM算法相比, 自适应尺度混沌免疫优化算法不仅大幅降低了学习代价, 而且在训练样本集较小的情况下分类器检测效率更高, 同时分类速度也得到了提高, 特别适用于移动自组网络高检测率、高抗噪能力和低的计算延迟的要求.

参考文献(References):

- [1] 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74 – 78. (WANG Lei, PAN Jin, JIAO Licheng. The immune algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(7): 74 – 78.)
- [2] 肖人彬, 王磊. 人工免疫系统: 原理、模型、分析及展望[J]. 计算机学报, 2002, 25(12): 1281 – 1293. (XIAO Renbin, WANG Lei. Artificial immune system: principle, models, analysis and perspectives[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(12): 1281 – 1293.)
- [3] DE L N, CASTRO. Artificial immune system as a novel soft computing paradigm[J]. *Soft Computing Journal*, 2003, 7(7): 121 – 129.
- [4] TIMMIS J, NEAL M, HUNT J. Artificial immune system for data analysis[J]. *Biosystems*, 2000, 55(1/3): 143 – 150.

- [5] TIMMIS J, NEAL M. A resource limited artificial immune system for data analysis[J]. *Knowledge Based Systems*, 2001, 14(3/4): 121 – 130.
- [6] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613 – 615.
(LI Bin, JIANG Weisun. Chaos optimization method and its application[J]. *Control Theory & Applications*, 1997, 14(4): 613 – 615.)
- [7] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用[J]. 控制与决策, 1999, 14(3): 285 – 288.
(ZHANG Tong, WANG Hongwei, WANG Zicai. Mutative scale chaos optimization algorithm and its application[J]. *Control and Decision*, 1999, 14(3): 285 – 288.)
- [8] 杨海东. 人工免疫模型集成及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
(YANG Haidong. *Artificial immune system models integration and its application*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2005.)
- [9] 杨久俊, 邓辉文, 滕姿. 基于混沌免疫进化算法的聚类算法分析[J]. 计算机科学, 2008, 35(8): 154 – 157.
(YANG Jiujun, DENG Huiwen, TENG Zi. Cluster analysis based on the chaos immune evolutionary algorithm[J]. *Computer Science*, 2008, 35(8): 154 – 157.)
- [10] 蒙文川, 邱家驹, 卞晓猛. 混电力系统经济负荷分配的人工免疫混沌优化算法[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 41 – 44, 55.
(MENG Wenchuan, QIU Jiaju, BIAN Xiaomeng. Artificial immune algorithm integrated with chaotic optimization for economic dispatch of power system[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(23): 41 – 44, 55.)
- [11] 王孙安, 郭子龙. 混沌免疫优化组合算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(2): 205 – 209.
(WANG Sunan, GUO Zilong. Novel chaos immune optimization combination algorithm[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(2): 205 – 209.)
- [12] 郭子龙, 王孙安. 三种混沌免疫优化组合算法性能之比较研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(2): 307 – 309.
(GUO Zilong, WANG Sunan. The comparative study of performance of three types of chaos immune optimization combination algorithms[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2005, 17(2): 307 – 309.)
- [13] 姚俊峰, 梅炽, 彭小奇. 混沌遗传算法(CGA)的应用研究及其优化效率评价[J]. 自动化学报, 2002, 28(6): 935 – 942.
(YAO Junfeng, MEI Chi, PENG Xiaoqi. The application research of the chaos genetic algorithm(CGA) and its evaluation of optimization efficiency[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(6): 935 – 942.)
- [14] E J Q, WANG C H, WANG Y N, et al. A new adaptive mutative scale chaos optimization algorithm and its application[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2007, 6(2): 141 – 145.
- [15] 杨春, 杨海东, 邓飞其. 移动自组网络入侵检测中主动学习算法的应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(31): 16 – 18.
(YANG Chun, YANG Haidong, DENG Feiqi. Application of active learning algorithms to intrusion detection of mobile Ad-Hoc Networks[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(31): 16 – 18.)

作者简介:

杨海东 (1973—), 男, 博士, 研究方向为智能算法及其复杂系统控制与信息安全技术研究, E-mail: hdyang@scut.edu.cn;

鄂加强 (1972—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事智能信息融合处理方法及其应用以及智能检测与智能故障诊断研究, E-mail: ejiaqiang@163.com.