

云自适应遗传算法

戴朝华¹, 朱云芳², 陈维荣¹

(1. 西南交通大学 电气化自动化研究所, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 峨眉校区 计算机系, 四川 峨眉 614202)

摘要: 传统自适应遗传算法(AGA)虽能有效提高收敛速度, 却难以增强算法的鲁棒性. 以当代种群平均适应度为期望 Ex , 根据云模型“ $3En$ ”规则确定熵 En , 由 X 条件云发生器自适应调整交叉变异概率, 提出云自适应遗传算法(CAGA). 由于云模型云滴具有随机性和稳定倾向性特点, 使交叉变异概率值既具有传统AGA的趋势性, 满足快速寻优能力; 又具有随机性, 且当种群适应度最大时并非绝对的零概率值, 有利于提高种群多样性, 从而大大改善避免陷入局部最优的能力. 典型函数优化实验表明, 与标准遗传算法(SGA)和AGA相比, CAGA具有更好的收敛速度和鲁棒性.

关键词: 自适应遗传算法; 云理论; 云自适应遗传算法

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Adaptive genetic algorithm based on cloud theory

DAI Chao-hua¹, ZHU Yun-fang², CHEN Wei-rong¹

(1. Institute of Electrification & Automation, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. Department of Computer & communication Engineering, E'mei Branch, Southwest Jiaotong University, E'mei Sichuan 614202, China)

Abstract: Traditional adaptive genetic algorithm (AGA) has higher convergence speed, but it still easily gets stuck at a local optimum. A novel algorithm called cloud-based adaptive genetic algorithm (CAGA) is introduced, which is based on cloud model with the properties of randomness and stable tendency. In the CAGA, the probabilities of crossover and mutation, p_c and p_m , are adaptively varied depending on X -conditional cloud generator. In X -conditional cloud generator, the average fitness of the current population is used as expected value Ex , and entropy En is specified based on the “ $3En$ ” rule of cloud model. CAGA can improve its convergence capacity because of the stable tendency of cloud model. Meanwhile, it can remarkably avoid a local minimum using the randomness of cloud model to maintain diversity in the population. Finally, the performance of the CAGA is compared with that of the standard GA (SGA) and AGA in optimizing several nontrivial multimodal functions with varying degrees of complexity. In all cases studied, CAGA is greatly superior to SGA and AGA in terms of robustness and efficiency.

Key words: adaptive genetic algorithm; cloud theory; cloud-based adaptive genetic algorithm

1 引言(Introduction)

遗传算法(GA)^[1]是一类借鉴生物进化思想的随机优化算法. 由模式定理知, 具有低阶、短定义距及平均适应度高于种群平均适应度的模式在子代中呈指数增长^[2]. 算法初期, 模式集中在适应度较低的个体, 若采用较小的交叉、变异概率, 种群很难产生新的优秀个体; 算法后期, 模式开始向高适应度的个体集中, 如仍采用较大的交叉、变异概率, 容易破坏优良模式, 使算法陷入局部收敛^[3]. 标准遗传算法(SGA)采用固定的交叉率和变异率, 存在早熟与收

敛速度慢的不足, 而且为特定优化问题设置好这两个参数需要经过反复的试验^[3]. 自从Srinivasas等^[4]提出自适应遗传算法(AGA)以来, 自适应调整交叉率和变异率成为遗传计算中的研究热点^[3,5~12].

传统AGA较之SGA在提高算法的收敛速度上有显著改善, 但也容易使进化走向局部最优解的可能性增加^[13]. 基于此, 众多改进的AGA相继提出^[3,5~12]. 其中文献[3]采用适应度的sigmoid函数产生交叉变异概率, 实现了非线性的自适应调整. 该算法为了较优个体仍具有一定的交叉变异概率, 指定

了一个最小概率值. 显然这种做法与传统AGA类似, 因为Srinivas等提出AGA时就指定了0.005的最小概率值^[4]. 同时为了“尽可能地”保留较优个体的模式, 文献[3]对最大适应度附近的概率调整曲线进行了“平滑”处理, 造成更多较优个体交叉变异概率接近最小值, 从而不利于算法克服陷入局部极值的能力. 文献[5~10]与文献[3]类似, 除了部分辅之以改进的选择、交叉、变异策略外, 都是采用一些特定的函数形式, 使交叉变异概率自适应于适应度或进化代数. 考虑到交叉变异概率的自适应调整策略往往表示为以自然语言来描述的定性概念, 文献[11, 12]引入了模糊理论. 然而, 模糊理论中隶属函数一旦被人为假定, 就不再有丝毫模糊性; 同时模糊理论也无法体现自然语言描述过程中的随机性^[14]. 总之, 以往提出的AGA大都只是考虑了进化过程中的趋势性, 即交叉变异概率随适应度或进化代数递减, 使交叉变异概率由固定曲线形式确定, 忽视了自然环境中演化的随机性.

云模型^[14]是用语言值表示的定性概念与其定量表示之间的不确定性转换模型, 同时具有随机性和模糊性, 为定性定量相结合的信息处理提供了有力手段^[14, 15]. 正态云模型不但放宽了形成正态分布的前提条件, 而且把精确确定隶属函数放宽到构造正态隶属度分布的期望函数, 因而更具有普适性^[16]. 本文引入云理论, 克服了以往交叉变异概率调整只考虑了概率趋势性和模糊理论不彻底性^[14]的缺点, 利用正态云模型云滴的随机性和稳定倾向性特点, 提出云自适应遗传算法(CAGA).

2 云理论(Cloud theory)

定义 1 设 T 为论域 u 上的语言值, u 到 $[0, 1]$ 的映射 $C_T(u): U \rightarrow [0, 1]; u \rightarrow C_T(u)$, 则 $C_T(u)$ 在 u 上的分布称为 T 的隶属云, 简称云^[14].

当 $C_T(u)$ 服从正态分布时, 称为正态云模型. 它是一个遵循正态分布规律的具有稳定倾向的随机数集, 由期望值 Ex 、熵 En 、超熵 He 来表征(如图1).

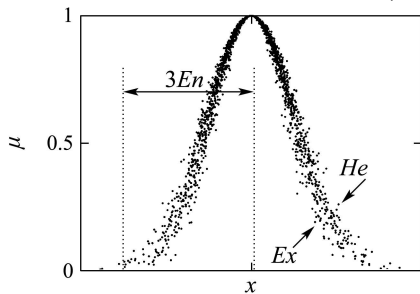


图1 正态云模型的3个数字特征示意图

Fig. 1 Three digital characteristics of a normal cloud

正态云的基本生成算法如下:

算法 1 正态云的基本生成(基本云发生器).

INPUT: $\{Ex, En, He\}, n$ // 数字特征和云滴数

FOR =1 to n

$En' = \text{RANDN}(En, He)$

$x_i = \text{RANDN}(Ex, En')$

$\text{drop}(x_i, \mu_i)$ // 生成第 i 个云滴

其中 $\text{RANDN}(En, He)$ 生成期望值为 En , 标准偏差为 He 的正态随机数.

3 云自适应遗传算法(Cloud-based adaptive genetic algorithm)

传统AGA^[4]主要使交叉概率和变异概率自适应于适应度, 其算法如下:

$$p_c = \begin{cases} k_1(f_{\max} - f')/(f_{\max} - \bar{f}), & f' \geq \bar{f}, \\ k_3, & f' < \bar{f}, \end{cases} \quad (1)$$

$$p_m = \begin{cases} k_2(f_{\max} - f)/(f_{\max} - \bar{f}), & f \geq \bar{f}, \\ k_4, & f < \bar{f}. \end{cases} \quad (2)$$

其中: p_c 和 p_m 分别为交叉、变异概率; $f_{\max}$ 为种群最大适应度; $\bar{f}$ 为平均适应度; f 为变异个体适应度; f' 为交叉两个个体适应度的较大值. $k_1 \sim k_4$ 为 $[0, 1]$ 内常数, 文献[4]取 $k_1=k_3=1.0$, $k_2=k_4=0.5$.

AGA的作用机理可用自然语言描述为: 高于种群平均适应度的个体, 随着适应度的增加, 交叉变异概率逐渐减小, 以便对较优模式进行“保护”; 而低于种群适应度的个体采用最大交叉变异概率, 使之产生较优个体. CAGA引入正态云模型, 能更好地体现AGA以自然语言描述的作用机理. 本文利用云模型云滴的随机性和稳定倾向性特点, 由云模型 X 条件云发生器算法产生交叉概率和变异概率, 使概率值既具有传统AGA的趋势性, 满足快速寻优能力; 又具有随机性, 在适应度最大时并非绝对的零值, 从而提高了避免陷入局部最优的能力. 其算法如下:

算法 2 自适应交叉概率 p_c 新算法.

$Ex = \bar{f}$

$En = (f_{\max} - \bar{f})/c_1$ // c_1 为控制参数

$He = En/c_2$ // c_2 为控制参数

$En' = \text{RANDN}(En, He)$

$$p_c = \begin{cases} k_1 e^{\frac{-(f' - Ex)^2}{2(En')^2}}, & f' \geq \bar{f}, \\ k_3, & f' < \bar{f}. \end{cases} \quad (3)$$

算法 3 自适应变异概率 p_m 新算法.

$Ex = f$

$En = (f_{\max} - f)/c_3$ // c_3 为控制参数

$He = En/c_4$ // c_4 为控制参数

$En' = \text{RANDN}(En, He)$

$$p_m = \begin{cases} k_2 e^{\frac{-(f - Ex)^2}{2(En')^2}}, & f \geq \bar{f}, \\ k_4, & f < \bar{f}. \end{cases} \quad (4)$$

交叉、变异概率可如图2所示.

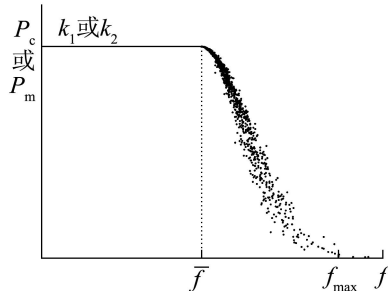


图2 交叉变异概率

Fig. 2 Illustration of the p_c and p_m

4 参数分析(Parameter analysis)

En 影响正态云的陡峭程度. 根据“ $3En$ ”规则^[15], 对于论域 u 上的语言值, 有贡献的定量值的99.74%落在 $[Ex-3En, Ex+3En]$ 上. En 越大, 则云覆盖的水平宽度大, 从而使更多较优个体取到较小交叉、变异概率. 结合算法的速度和精度, 算法中 c_1 和 c_3 取3.0附近的值. 本文实验取 $c_1=2.9, c_3=3.0$.

He 决定云滴离散程度. He 过大, 会在一定程度上丧失“稳定倾向性”; He 过小, 又在一定程度上丧失“随机性”. 建议 $5 \leq c_{2,4} \leq 15$, 本文实验取 $c_{2,4}=10$.

5 性能测试(Performance evaluation)

5.1 优化函数(Optimization functions)

采用文献[4]验证AGA的DeJong' f_5 , DeJong' f_6 , DeJong' f_7 进行测试.

$$F1 = \frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6},$$

$$-65.536 \leq x_{1,2} \leq 65.536$$

$$F2 = 0.5 + \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1.0 + 0.0001(x_1^2 + x_2^2)]^2},$$

$$-100 \leq x_{1,2} \leq 100$$

$$F3 = (x_1^2 + x_2^2)^{0.25} [\sin^2(50(x_1^2 + x_2^2)^{0.1}) + 1.0],$$

$$-100 \leq x_{1,2} \leq 100.$$

5.2 实验参数(Experimental parameters)

二进制编码串长分别是: $F1$ 为34, $F2$ 和 $F3$ 为44. 适应度函数 $\text{Fit}_1 = F1$; $\text{Fit}_i = 1/(1 + Fi)$, $i = 2, 3$. 适应度阈值同文献[4], 即 $F1$ 的为1.0; $F2$ 的为0.999; $F3$ 的为0.995. SGA的 $p_c=0.8, p_m=0.1$, AGA的交叉变异概率设置了0.005的最小值. 种群大小100、最大代数1000, 采用轮盘赌和精英保留选择策略, 记录30次独立实验的最佳函数值标准偏差、平均CPU耗时、平均代数(30次实验最大种群适应度达到指定阈值时进化代数平均值)和失败次数(最大种群适应度小于指定阈值的实验次数). 算法使用MATLAB代码, 运行于P4 2.4 GHz, 256MB内存的普通PC机上. 结果见表1, 平均适应度曲线分别如图3~图5.

表1 3种算法的性能比较

Table 1 Comparisons of the performances

函数	标准偏差			平均代数			失败次数			平均耗时/s		
	SGA	AGA	CAGA	SGA	AGA	CAGA	SGA	AGA	CAGA	SGA	AGA	CAGA
$F1$	3.1515×10^{-10}	1.8112×10^{-10}	1.3465×10^{-10}	105.5	108.67	101.23	0	0	0	17.64	17.36	18.08
$F2$	0.0024544	0.0029004	1.1250×10^{-19}	772.10	507.67	290.60	5	6	0	10.19	10.42	10.47
$F3$	0.0024544	0.0011217	1.0842×10^{-17}	907.03	358.73	342.17	22	2	0	10.58	10.66	11.05

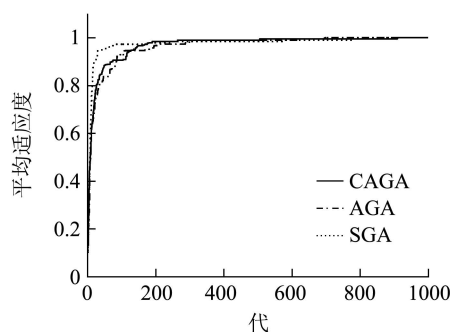


图3 $F1$ 的平均进化适应度曲线

Fig. 3 Average fitness values for $F1$

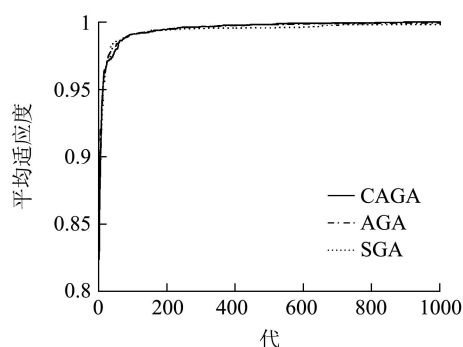


图4 $F2$ 的平均进化适应度曲线

Fig. 4 Average fitness values for $F2$

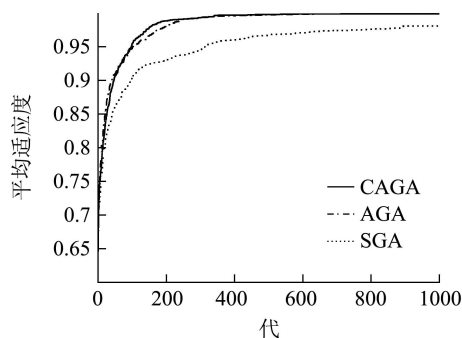


图5 F3的平均进化适应度曲线

Fig. 5 Average fitness values for F3

5.3 性能分析(Performance analysis)

从表1可知, CAGA算法由于借鉴了正态云模型稳定倾向性特点, 30次实验种群最佳适应度达到指定阈值的平均代数均小于AGA和SGA, 具有更快的收敛速度. 同时, CAGA结合了交叉变异概率自适应调整不确定性知识描述的模糊性和随机性, 且在适应度最大时并非零值或指定的最小值, 能较好地保持种群多样性, 在算法探索(explore)和开发(exploitation)之间取得了很好的平衡. 所以, 在优化3个典型函数时, 30次实验中经历最大代进化后种群最佳适应度全部超过指定阈值, 具有更好的避免陷入局部极值的能力, 而AGA和SGA都出现了不同程度的失败次数. 不仅如此, 从表1中30次实验最佳函数值标准偏差来看, CAGA得到的标准偏差远远小于AGA和SGA, 说明CAGA具有更强的鲁棒性.

显然, 从图3~图5同样可以得到同样的结论. 而且, 在整个搜索过程(即使进化代数已经很大), 平均适应度还在增加;可见, CAGA既具有很好的收敛能力, 又保持了很好的种群多样性.

为了评估CAGA引入正态云模型对运行时间影响, 本文记录了CAGA、AGA和SGA经历30次独立实验的平均CPU运行时间(如表1). 3个函数优化实验中, CAGA比SGA增加平均耗时绝对值最大的是0.47 s, 最小的只有0.28 s, 而相对增加最大的是4.44%, 最小的只有2.49%; CAGA比AGA平均耗时绝对增加最大的是0.72 s, 最小的则只有0.05 s, 而相对增加最大的是4.15%, 最小的则只有0.48%. 可见, 引入云模型所产生的额外时间开销是可以接受的. 考虑到CAGA收敛速度快, 如果算法在种群最大适应度达到指定阈值即停止计算, 则算法所需CPU时间可能反而会小于AGA和SGA.

6 结论(Conclusion)

本文利用云模型云滴的随机性和稳定倾向性

特点, 由云模型X条件云发生器算法产生交叉概率和变异概率, 使概率值既具有AGA的稳定倾向性, 满足快速寻优能力, 又具有随机性, 在适应度最大时并非绝对的零值, 保持了种群的多样性, 改善了避免陷入局部最优的能力, 使算法能在探索和开发之间取得较好的平衡. 通过函数优化实验可知, 与SGA和AGA相比, CAGA不仅进化代数减少, 提高了进化速度, 而且陷入局部最优的次数减少, 鲁棒性更高, 证明了本文算法的优越性. 虽然新算法中的云模型计算需要额外的计算时间, 但通过函数优化实验记录的CPU运行时间来看, 所增加的额外时间很少, 完全能够接受.

由于新算法只是对交叉变异概率进行了改进, 理论上说传统遗传算法和自适应遗传算法适用的复杂优化问题, 新算法都能适用.

参考文献(References):

- [1] HOLLAND J H. *Adaptation in Natural and Artificial System*[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [2] GOLDBERG D E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*[M]. Reading, MA: Addison Wesley, 1989.
- [3] 金晶, 苏勇. 一种改进的自适应遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(18): 64-69.
(JIN Jing, SU Yong. An improved adaptive genetic algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 41(18): 64-69.)
- [4] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithm[J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, 1994, 24(4): 656-667.
- [5] SMITH J E, FOGARTY T C. Operator and parameter adaptation in genetic algorithms[J]. *Soft Computing*, 1997, 1(2): 81-87.
- [6] EIBEN A E, HINTERDING R, MICHALEWICZ Z. Parameter control in evolutionary algorithms[J]. *IEEE Trans on Evolution Computation*, 1999, 3(2): 124-141.
- [7] SUFISAKS M, FAN Xinjian. Adaptive genetic algorithm with a co-operative mode[C]//*Proc of IEEE Int Symposium on Industrial Electronics*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001, 3: 1941-1945.
- [8] 吴志远, 邵惠鹤, 吴新余. 一种新的自适应遗传算法及其在多峰值函数优化中的应用[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(1): 127-129.
(WU Zhiyuan, SHAO Huihe, WU Xinyu. A new adaptive genetic algorithm & its application in multimodal function optimization[J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(1): 127-129.)
- [9] 沐阿华, 周绍磊, 于晓丽. 一种快速自适应遗传算法及其仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 122-125.
(MU Ahua, ZHOU Shaolei, YU Xiaoli. Research on fast self-adaptive genetic algorithm and its simulation[J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(1): 122-125.)
- [10] 黄永青, 梁昌勇, 张祥德, 等. 一种小种群自适应遗传算法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(11): 92-97.
(HUANG Yongqing, LIANG Changyong, ZHANG Xiangde. Research on adaptive genetic algorithm with small population[J]. *J of Systems Science and Systems Engineering*, 2005, 25(11): 92-97.)
- [11] HERRERA F, LOZANO M. Adaptation of genetic algorithm parameters based on fuzzy logic controller[C]//HERRERA F, VERDE-GAY J L. *Genetic Algorithms and Soft Computing*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1996: 95-125.

- [12] HERRERA F, LOZANO M. Adaptive genetic operators based on co-evolution with fuzzy behaviors[J]. *IEEE Trans on Evolutionary computation*, 2001, 5(2): 149 – 165.
- [13] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
(WANG Xiaoping, CAO Liming. *Genetic algorithms-theory, application and software implementation*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.)
- [14] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995(6): 15 – 20.
(LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. *J of Computer Research and Development*, 1995, 32(6): 15 – 20.)
- [15] 刘常昱, 李德毅, 潘莉莉. 基于云模型的不确定性知识表示[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(2): 32 – 35.
(LIU Changyu, LI Deyi, PAN Lili. Uncertain knowledge representation based on cloud model[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(2): 32 – 35.)
- [16] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28 – 34.
(LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. *Engineering Science*, 2004, 6(8): 28 – 34.)

作者简介:

- 戴朝华** (1974—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为计算智能、模式识别等, E-mail: dchzyf@126.com;
- 朱云芳** (1974—), 女, 硕士, 讲师, 目前研究方向为测控系统、信号分析与处理, E-mail: zyfdch@126.com;
- 陈维荣** (1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能检测技术、图像处理与计算机视觉, E-mail: wrchen@home.swjtu.edu.cn.

(上接第642页)

参考文献(References):

- [5] KENNE J P, GHARBI A. Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2004, 46(4): 865 – 875.
- [6] GROSFELD-NIR A, GERCHAK Y, HE Q M. Manufacturing to order with random yield and costly inspection[J]. *Operations Research*, 2000, 48(5): 761 – 767.
- [7] GURNANI H. Supply management in assembly systems with random yields and random demand[J]. *IIE Transactions*, 2000, 32(8): 701 – 714.
- [8] KOGAN K, SHU C, PERKINS J R. Optimal finite-horizon production control in a defect-prone environment[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(10): 1795 – 1800.

作者简介:

- 宋春跃** (1972—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为最优生产控制、随机过程的建模及优化、数据挖掘等, E-mail: cysong@iipc.zju.edu.cn;
- 王 慧** (1959—), 女, 教授, 研究领域为智能交通系统、复杂过程建模、控制与优化, 计算机控制, E-mail: hwang@iipc.zju.edu.cn.

(上接第645页)

参考文献(References):

- [1] HA Q P, NGUYEN Q H, RYE D C, et al. Fuzzy sliding-mode controllers with applications[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2001, 48 (1): 38 – 46.
- [2] HSU Feng-Yih, FU Li-Chen. Nonlinear control of robot manipulators using adaptive fuzzy sliding mode control[J]. *Proceedings of the IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems* 95, 1995, 1(1): 156 – 161.
- [3] EMAMI M R, GOLDENBERG A A, TURKSEN I B. A robust model-based fuzzy-logic controller for robot manipulators[J]. *Proceedings of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1998, 3(3): 2500 – 2505.
- [4] TSAY T I, HUANG J H. Robust nonlinear control of robot manipulators[J]. *Proceedings of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1994, 8(3): 2083 – 2088.
- [5] BEKIT B W, WHIDBORNE J F, SENEVIRATNE L D. Fuzzy sliding mode control for a robot manipulator[J]. *Proceedings of the IEEE Int Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 1997, 33(2): 149 – 160.
- [6] GRIMM W M . Robot nonlinear bounds evaluation techniques for robust control[J]. *Adaptive Cont Signal Processing*, 1990, 4(2): 501 – 522.
- [7] MAN Zhihong, PALANISWAMI M . Robust tracking control for rigid robotic manipulators[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(1): 154 – 159.

作者简介:

- 林 雷** (1970—), 男, 博士研究生, 研究领域为机器人智能控制, E-mail: leilin@tom.com;
- 王洪瑞** (1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 河北大学校长, 研究领域为机器人控制、现代控制理论、冶金自动化, E-mail: wanghr_999@yahoo.com.cn;
- 任华彬** (1981—), 男, 硕士研究生, 研究领域为机器人智能变换结构控制, E-mail: rhb-888@163.com.