

基于正交试验法的小生境混合遗传算法

黄 鹄¹, 陈森发², 周振国²

(1. 中国电子科技集团公司 第 28 研究所, 江苏 南京 210007; 2. 东南大学 系统工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 在简单遗传算法应用过程中, 为了解决早熟现象、收敛缓慢和解的精度差等问题, 提高遗传算法的优化性能, 借助正交试验法的全局均衡设计思想和自然界的小生境思想, 在引入了一些高效进化操作的基础上, 提出了一种基于正交试验法的小生境混合遗传算法, 并进行了性能分析和实例研究. 研究结果表明, 该算法能够有效地增强遗传算法的全局收敛性, 加快进化速度, 同时算法稳定性也得到了提高.

关键词: 遗传算法; 全局优化; 小生境; 正交操作; 混合进化

中图分类号: O221 **文献标识码:** A

Orthogonal experiment method based on niche hybrid genetic algorithm

HUANG Kun¹, CHEN Sen-fa², ZHOU Zhen-guo²

(1. The 28 Research Institute, Electronics Technology Group Corporation of China, Nanjing Jiangsu 210007, China;

2. Institute of System Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In the applied course of simple genetic algorithm (SGA), in order to solve some problems such as premature phenomena, slow convergence and poor precision of results, raising the optimization performance of genetic algorithm, the global equilibrium design ideology of orthogonal experiment method and niche ideology of nature were studied, and some powerful evolutionary operations were imported. On the basis of these, an orthogonal experiment method based niche hybrid genetic algorithm (ONHGA) is presented, and performance analysis and case research are also done. The research results show that ONHGA can effectively improve the global astringency and the evolutionary speed of genetic algorithm, and the stability of algorithm is also improved.

Key words: genetic algorithm; global optimization; niche; orthogonal operations; hybrid evolution

1 引言(Introduction)

遗传算法^[1]是由 Holland J H 等人于 20 世纪 70 年代发展起来的. 它是一种以自然选择和遗传理论为基础, 将生物进化过程中适者生存规则与同一染色体的随机信息变换机制相结合的搜索寻优算法. 由于其简单通用、鲁棒性强、适于并行处理, 因此近年来得到了很快的发展, 并已广泛应用于优化设计与调度、模式识别、智能控制和智能信息处理等领域.

然而, 大量研究表明^[2,3], 传统的遗传算法也存在许多不足和缺陷, 如早熟收敛、计算量大和解的精度差等, 这使得最终搜索结果往往不是全局最优解, 而是局部最优解. 而全局优化问题又是一类各领域内最普遍的研究课题. 由于传统的遗传算法不能有效地克服以上缺陷, 为此, 本文借助正交试验法、小生境技术等理论, 提出了一种基于正交试验法的小生境混合遗传算法, 并进行了实例测试, 取得了令人满意的结果.

2 算法描述(Description of algorithm)

设一般优化问题为 $\min_{x \in \Omega} f(X)$, 其中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Omega$, f 为目标函数, $\Omega = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) \mid l_i \leq x_i \leq u_i, i = 1, 2, \dots, n\}$.

1) 小生境技术.

在自然界中, “物以类聚, 人以群分” 是一种司空见惯的现象. 反映到生物学中, 这种现象称之为小生境现象. 自然界的小生境为新物种的形成提供了可能性, 是生物界保持近乎无限多样性的根本原因之一. 受此启发^[4], 为了改善遗传算法的全局搜索性能, 提高交配的有效性及其优化效率, 本文算法引入了小生境技术, 具体思想为: 在进行交叉前, 把整个种群分解成若干个小生境(子种群), 每个小生境由一对具有相似适应度的个体组成, 父代个体的配对仅限于小生境内部, 在每个小生境的交叉操作后立即

应用(2+2)选择机制,即小生境中的全体父代个体和由它们繁殖的全体子代共同竞争,选择与小生境中个体数相同数量的优良个体进入下一代;变异操作也在各个小生境中按概率 P_m 进行,对小生境中的最佳个体变异时应用(1+1)选择,以保证全局收敛性,对其它个体仅做随机变异,不作选择;全体小生境在其内部完成一轮进化操作后,首先两两比较种群中各个体的海明距离,若这个距离在预先指定的距离内,再比较两个个体之间的适应度大小,并对基本适应度较小的个体施加一个较强的罚函数,极大地降低其适应度,最终使得在指定距离内将只存在一个优良的个体。

2) 正交操作.

所谓正交试验法^[5],就是指运用正交表来安排试验方案和进行结果分析的一种试验设计方法.由于正交表是根据均衡分布思想,运用组合数学理论构造的一种数学表格,具有正交性、典型性以及综合可比性等优点,所以它适用于多因素、多指标、具有随机误差的试验.据此特点,本文将将其运用于初始种群的产生和交叉操作当中.

① 初始种群的正交生成^[6,7].

在解决优化问题之前,应用者并没有全局最优解的任何信息.所以,为了顺利找到全局最优解,应用者希望初始种群在可行域内分布均匀,这样有利于保证初始种群含有较丰富的模式,从而增加搜索收敛于全局最优解的可能.具体做法为:将每一维变量看作是一个因素,根据可行域的大小、维数以及要求的求解精度,选择合适的正交表来安排生成初始种群.如果可行域空间较大,不便选择合适的正交表,此时可以将可行域分割为若干个子空间,各子空间的大小可根据经验随意选择,然后再选择合适的正交表来安排生成初始种群.

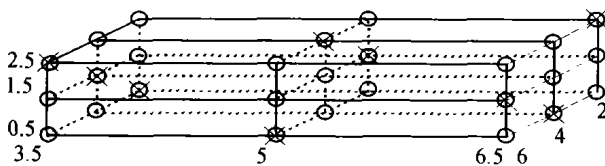


图1 初始种群的正交生成示意图

Fig. 1 Sketch map of orthogonal outcome about original population

以初始搜索空间 $\Omega = \{(x_1, x_2, x_3) \mid 3.5 \leq x_1 \leq 6.5, 0.5 \leq x_2 \leq 2.5, 2 \leq x_3 \leq 6\}$ 为例,选用正交表 $L_9(3^4)$,可产生由9个初始个体组成的初始种群,具体如图1所示.其中,“○”表示所有量化点,

“×”表示选取的初始个体.

② 正交交叉^[6~8].

考虑任一小生境内两个父代个体 $p_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1m})$ 和 $p_2 = (p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2m})$.正交交叉的具体做法为:首先,根据 m 选取相应的正交表 $L_{2^k}(2^{2^k-1})$,然后,应用此正交表以交叉概率 P_c 对父代个体进行交叉,产生 2^k 个子代个体,最后,应用(2+2)选择机制选出两个优良个体保留到下一代.其中, m 为二进制编码串总串长; $2^{k-1} \leq m \leq 2^k - 1$;若 $m < 2^k - 1$,取正交表中的前 m 列即可.

以 $m = 7$ 为例,选用正交表 $L_8(2^7)$,正交交叉产生的子代个体组合为

$$O_1: (p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16}, p_{17});$$

$$O_2: (p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{24}, p_{25}, p_{26}, p_{27});$$

$$O_3: (p_{11}, p_{22}, p_{23}, p_{14}, p_{15}, p_{26}, p_{27});$$

$$O_4: (p_{11}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{25}, p_{16}, p_{17});$$

$$O_5: (p_{21}, p_{12}, p_{23}, p_{14}, p_{25}, p_{16}, p_{27});$$

$$O_6: (p_{21}, p_{12}, p_{23}, p_{24}, p_{15}, p_{26}, p_{17});$$

$$O_7: (p_{21}, p_{22}, p_{13}, p_{14}, p_{25}, p_{26}, p_{17});$$

$$O_8: (p_{21}, p_{22}, p_{13}, p_{24}, p_{15}, p_{16}, p_{27}).$$

3) 混合进化策略.

在遗传算法的研究中,收敛性和收敛速度一直都是一个重要内容.由于传统的遗传算法很容易出现早熟、收敛缓慢等问题,所以,为了克服上述问题,本文采用了局部寻优、最优保留、赌轮选择和加速循环^[9]相结合的混合进化策略来加速收敛,具体做法为:① 对进化过程中当前群体中的所有个体按适应度进行排序,适应度最大的前几个个体,在该个体邻域范围内进行数次随机搜索,如果找到更优值,则替代原值;否则,不作任何变化;② 找出适应度最好的和最差的个体,若当前的最好个体优于迄今为止的最佳个体,则当前最差的个体被迄今为止的最佳个体取代,并复制当前的最好个体作为迄今为止的最佳个体;否则,仅复制迄今为止的最佳个体,取代当前的最好个体;③ 将除最佳个体外的其余个体按照适应度的大小进行排序,并运用赌轮机制进行选择操作;④ 在两次进化操作完成后,利用前两次产生的优秀个体的最大可能变化区间,作为变量新的初始变化区间,重新生成初始种群,重新进行进化操作,如此循环.

根据上述三方面基本思想,本文算法基本运行

步骤如下:

- ① 选择合适的适应度函数和编码规则;
- ② 确定遗传代数 T 、遗传规模 N 、参数向量精度 e 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、小生境预定距离 R 和个体惩罚度 P ;
- ③ 按照正交试验法产生初始种群,并计算其适应度;
- ④ 遗传进化操作:对父代种群进行选择、交叉、变异操作产生子代种群;
- ⑤ 对每个个体进行解码变换并计算其适应度;
- ⑥ 进行局部寻优,并根据前述最优选择进行种群最优保留;
- ⑦ 进化迭代:返回步骤④,迭代2次;
- ⑧ 按照前述方法返回步骤③加速循环;
- ⑨ 终止条件判断:若到达规定的代数或得到满意结果,则结束并输出结果;否则,继续迭代。

3 性能分析(Performance analysis)^[10]

如前所述,在 ONHGA 中,为了提高全局优化性能,本文综合了小生境技术、正交操作(包括初始种群的正交生成、正交交叉)和混合进化策略等措施。其中,小生境技术和初始种群的正交生成是为了保证种群的多样性,避免早熟;正交交叉和局部寻优是为了有效地提高搜索效率,加快进化进程;最优保留和加速循环是为了提高优化效率。几方面有机结合起来,可以充分保证 ONHGA 的全局优化性能。

1) 全局收敛性^[9]。

不失一般性,设被优化问题为单变量问题,变量的初始变化区间为 $[l_0, u_0]$, 则根据 ONHGA 的计算原理,在第 t 次加速循环后,变量的搜索区间变为 $[l_t, u_t]$, 由于 ONHGA 采用了最优保留策略,所以可以保证 $0 \leq u_t - l_t \leq u_{t-1} - l_{t-1}$, 即 $0 \leq (u_t - l_t)/(u_{t-1} - l_{t-1}) = k_t \leq 1$, 且取等号的概率很小。因此,当 $t \rightarrow \infty$ 时,有 $P(\prod_i k_i = 0) = 1$, 即 $P(u_t - l_t = 0) = 1$, 所以, ONHGA 肯定收敛。

2) 计算复杂性。

设进化过程中种群大小为 N , 编码长度为 m , 则在小生境运算中,每个个体均需要计算与其他个体之间的距离,时间复杂度为 $O(N^2)$;在正交交叉中,每个小生境需要计算 $2^{\lceil \log_2^m + 1 \rceil}$ 次适应度,并从中选择两个优良个体,时间复杂度为 $O(N \cdot m^2)$;其他

几个操作的时间复杂度为 $O(N \cdot \ln N)$ 。综合起来, ONHGA 的计算时间复杂度为 $\max[O(N^2), O(N \cdot m^2)]$ 。

3) 收敛速度。

由于 ONHGA 混合了多种有效操作,所以,从理论上分析本算法的收敛速度比较困难。为此,本文采用实例来分析其收敛速度。

4 实例分析(Case analysis)

为了检验算法的实现效果,本文选择了如下4个典型测试函数^[11]进行了测试:

① Schaffer 函数 F_1 :

$$f_1(x_1, x_2) = 0.5 - \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1.0 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2},$$

$$x_1, x_2 \in [-100, 100];$$

② Camel 函数 F_2 :

$$f_2(x_1, x_2) = (4 - 2.1x_1^2 + \frac{x_1^4}{3})x_1^2 + x_1x_2 + (-4 + 4x_2^2)x_2^2,$$

$$x_1, x_2 \in [-100, 100];$$

③ Rosenbrock 函数 F_3 :

$$f_3(X) = \sum_{i=0}^{29} [100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (1 - x_i)^2],$$

$$x_i \in [-2.048, 2.048];$$

④ Rastrigin 函数 F_4 :

$$f_4(X) = \sum_{i=1}^{30} [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10],$$

$$x_i \in [-5.12, 5.12].$$

为了便于性能对比,本文同时采用本文遗传算法(ONHGA)、加速遗传算法(AGA)^[9]、隔离小生境遗传算法(IGA)^[4]和混沌遗传算法(CGA)^[10]分别对上述函数进行了计算。计算程序采用 Matlab 编制,其中, $T = 500$, $P_c = 65\%$, $P_m = 4\%$, $e = 0.0001$, $R = 0.5$, $P = 10^{-30}$;对于函数 F_1 和 F_2 , 初始种群采用正交表 $L_{100}(10^{11})$ 产生, $N = 100$;对于函数 F_3 和 F_4 , 初始种群采用正交表 $L_{216}(6^{43})$ 产生, $N = 216$ 。

1) 收敛率及收敛速度。

为了消除随机干扰,不同算法独立运行 100 次,极值位于区间 $[f^* - 0.00025, f^* + 0.00025]$ 内的记为收敛,其中, f^* 为全局极值。具体试验统计结果如表 1 所示。

表 1 各算法收敛率及收敛速度比较

Table 1 Compare of each algorithm's convergent rate and convergent speed

性能 算法	平均代数				平均时间/s				收敛率/%				最优解			
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_1	F_2	F_3	F_4	F_1	F_2	F_3	F_4	F_1	F_2	F_3	F_4
ONHGA	39.6	18.3	19.5	46.8	5.95	2.81	3.85	12.71	99	100	100	98	1.0	-1.03162	0.0	0.000001
AGA	137.2	95.3	102.2	185.1	12.12	6.45	8.62	32.43	81	86	85	78	0.99976	-1.02627	-0.00008	-0.0001
IGA	116.8	88.7	93.9	156.2	10.63	5.73	7.23	29.86	86	89	88	84	0.99992	-1.02872	0.00005	0.00006
CGA	85.5	56.1	70.4	116.4	8.78	4.29	5.67	20.38	91	94	92	89	1.0	-1.03067	0.0	-0.000025

2) 在线性能与离线性能.

选择函数 F_3 和 F_4 进行在线性能与离线性能测试,测试结果如图 2 所示.

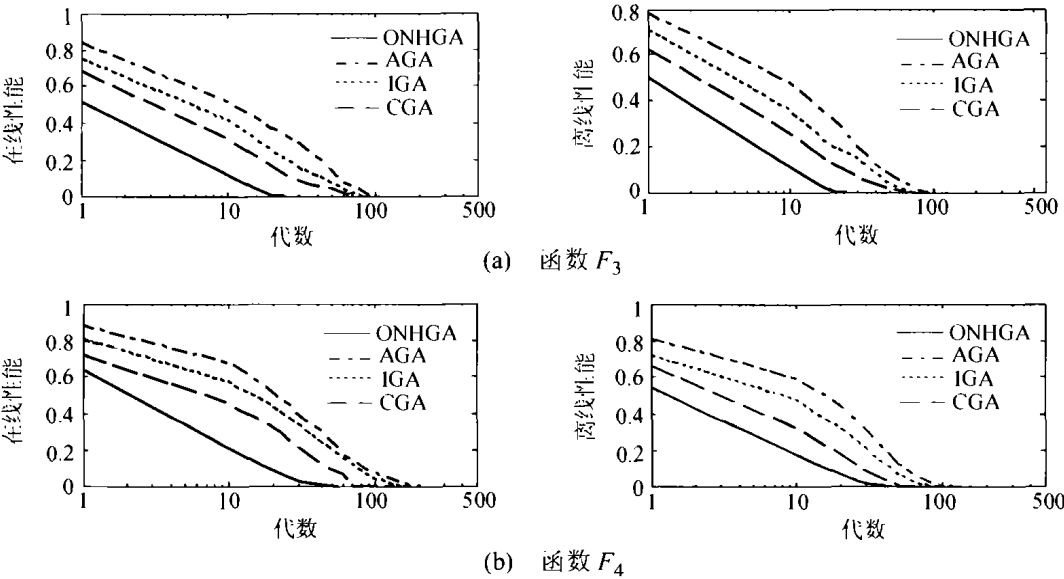


图 2 在线性能与离线性能对比图

Fig. 2 Compare figure of on-line performance and off-line performance

通过上述对比,可以看出,相对于其他几种遗传算法,本文算法的性能有不同程度的提高,这表明本文算法在解决复杂优化函数寻优问题方面具有一定的优势.

5 结束语(Conclusion)

作为一种处理复杂优化问题的有效途径,遗传算法向人们展示了其独特的魅力.但传统的遗传算法也不可避免地存在许多不足和缺陷.为此,本文针对基本遗传算法的不足,提出了一种基于正交试验法的小生境混合遗传算法.研究表明,该算法增强了遗传算法的全局收敛性,并加快了进化速度,因此该方法具有良好的应用前景和推广价值.

参考文献(References):

[1] HOLLAND J H. Genetic algorithms[J]. *Scientific American*, 1992, 9 (7):44 - 50.
[2] DAVIS L. *Handbook of Genetic Algorithms* [M]. New York: Van

Nostrand Reinhold, 1991:1 - 125.
[3] 陈国良,王熙法,庄镇泉,等.遗传算法及其应用[M].北京:人民邮电出版社,1996:1 - 165.
(CHEN Guoliang, WANG Xifa, ZHUANG Zhenquan, et al. *Genetic Algorithm and Its Applications* [M]. Beijing: People's Post & Telecommunications Publishing House, 1996:1 - 165.)
[4] 林焰,郝聚民,纪卓尚,等.隔离小生境遗传算法研究[J].系统工程学报,2000,15(1):86 - 91.
(LIN Yan, HAO Jumin, JI Zhuoshang, et al. A study of genetic algorithm based on isolation niche technique [J]. *J of Systems Engineering*, 2000, 15(1):86 - 91.)
[5] MONTGOMERY D C. *Design and Analysis of Experiments* [M]. 3rd ed. New York: Wiley, 1991:1 - 50.
[6] LEUNG Y W, ZHANG Q. *Evolutionary algorithms + experimental design methods: a hybrid approach for hard optimization and search problems* [R]. Hong Kong: Res Grant Proposal, Hong Kong Baptist Univ, 1997.
[7] LEUNG Y W, WANG Y P. An orthogonal genetic algorithm with quantization for global numerical optimization[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2001, 5(1):41 - 53.

- [6] 修智宏,张运杰,任光.输入采用标准模糊划分的模糊控制系统性质及稳定性分析[J].模糊系统与数学,2004,18(4):71-82.
(XIU Zhihong, ZHANG Yunjie, REN Guang. Properties and stability analysis of fuzzy control systems employing standard fuzzy partition inputs [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2004, 18(4): 71-82.)
- [7] TANAKA K, IKEDA T, WANG H O. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: quadratic stability, H_∞ control theory and linear matrix inequalities [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1996, 4(1): 1-13.
- [8] WANG H O, TANAKA K, GRIFFIN M F. An approach to fuzzy control of nonlinear systems: stability and design issues [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1996, 4(1): 14-23.

- [9] PARK J, KIM J, PARK D. LMI-based design of stabilizing fuzzy controllers for nonlinear systems described by Takagi-Sugeno fuzzy model [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 122: 73-82.

作者简介:

修智宏 (1967—),男,海军大连舰艇学院指控信息系高级工程师,现为大连海事大学博士生,主要研究领域:模糊控制、船舶自动化和智能化, E-mail: xzhdy@mail.dlptt.ln.cn;

任光 (1952—),男,大连海事大学轮机工程学院院长,博士,教授,博士生导师,主要研究领域:智能控制系统、船舶自动化, E-mail: reng@dlmu.edu.cn;

张运杰 (1963—),男,大连海事大学数理系教授,博士,主要研究领域:模糊数学、图象处理, E-mail: yunjiezhangcn@sohu.com.

(上接第 1010 页)

- [8] 秦进,梁梁.遗传算法与旋转正交设计的结合应用[J].系统工程理论与实践,2002,22(4):75-79.
(QIN Jin, LIANG Liang. The integrated application of genetic algorithm and rotating orthogonal method [J]. *J of System Engineering Theory and Practice*, 2002, 22(4): 75-79.)
- [9] 金菊良,杨晓华,丁晶.标准遗传算法的改进方案——加速遗传算法[J].系统工程理论与实践,2001,21(4):8-13.
(JIN Juliang, YANG Xiaohua, DING Jing. An improved simple genetic algorithm - accelerating genetic algorithm [J]. *J of System Engineering Theory and Practice*, 2001, 21(4): 8-13.)
- [10] 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.)

- [11] YAO Xin, LIU Yong, LIN Guangming. Evolutionary programming made faster [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1999, 3(2): 82-102.

作者简介:

黄鵬 (1973—),男,博士,主要研究方向为智能信息处理、智能控制与管理等, E-mail: huang_l_kun@sina.com;

陈森发 (1945—),男,博士生导师,主要研究方向为智能控制与管理、复杂系统建模等;

周振国 (1972—),男,讲师,博士研究生,研究领域为数据挖掘.

(上接第 1014 页)

- [5] FUNG Wai-keung, XI Ning, LO Wang-tai, et al. Improving efficiency of internet based teleoperation using network QoS [C] // *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Washington, DC: IEEE Press, 2002: 2707-2712.
- [6] 彭刚,黄心汉,蒋毅.网络延时和负荷变化对基于网络的遥操作机器人系统的影响和解决方法[J].计算机工程与应用,2002,38(11):12-15.
(PENG Gang, HUANG Xinhan, JIANG Yi. The influences and solutions of network delay and variable loads in telerobotics via network [J]. *J of Computer Engineering and Application*, 2002, 38(11): 12-15.)
- [7] 蔡自兴.机器人学[M].北京:清华大学出版社,2000.

(CAI Zixing. *Robotics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)

- [8] 孟玉珂.排队论基础及应用[M].上海:同济大学出版社,1989.
(MENG Yuke. *Queueing System Basic and Its Application* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1989.)

作者简介:

张平 (1964—),男,博士,副教授,主要研究智能机器人、CIMS、基于网络的智能应用等, E-mail: pzhang@suct.edu.cn;

徐扬生 (1958—),男,博士,教授,香港中文大学自动化与计算机辅助工程系主任,主要研究空间机器人、智能控制和人机智能接口等.