

文章编号: 1001-0920(2004)07-0791-04

一种结合 Tabu 搜索的非线性遗传算法研究

崔志华, 曾建潮, 徐玉斌

(太原重型机械学院 系统仿真与计算机应用研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 利用 Tabu 搜索的强大局部搜索性能, 提出一种新的非线性遗传算法。该方法将 Tabu 搜索技术内嵌于遗传算子中, 构造了基于 Tabu 搜索的非线性杂交及变异算子, 它能有效地提高算子的局部搜索能力, 通过实例仿真证明了该算法的有效性; 同时, 以“平均截止代数”和“平均截止代数分布熵”作为评价指标, 对该方法的优化效率进行研究, 定量评价了该方法的优化效率, 通过与实数遗传算法进行比较, 说明了该方法的优化效率高于实数遗传算法。

关键词: 非线性遗传算法; Tabu 搜索; 局部搜索能力

中图分类号: TP13

文献标识码: A

On nonlinear genetic algorithm based on Tabu search

CUI Zhi-hua, ZEN G Jian-chao, XU Yu-bin

(Division of System Simulation and Computer Application, Taiyuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan 030024, China. Correspondent: CUI Zhi-hua, E-mail: cui_zhi_hua_7645@sohu.com)

Abstract: Based on strong local search capability of Tabu search technique, a new nonlinear genetic algorithm (NGA) is proposed, and the nonlinear crossover and mutation operators are constructed based on Tabu search technique. The computational results indicate that the NGA has good performance and significantly improves the computational efficiency in optimization. “The average truncated generations” and “the distribution entropy of truncated generations” are used to optimization efficiency of NGA. The optimization efficiency of NGA is evaluated quantitatively. It is shown that the optimization efficiency of NGA is higher than that of real-coded genetic algorithm.

Key words: nonlinear genetic algorithm; Tabu search; local search capability

1 引言

遗传算法(GA)因其具有自适应、隐并行性等特点, 已成功地应用于许多领域。它的全局搜索能力较强, 但局部搜索能力较弱, 因此在应用时, 可将一些成熟的局部搜索算法与遗传算法相结合。目前, 混合遗传算法大致可分为3类: 第1类可看作是算法的合成^[1], 即遗传算法与局部搜索算法顺序执行; 第2类是将局部搜索算法作为遗传算法的一个算子嵌入该算法, 从而能有效提高算法效率^[2-4]; 第3类是将局部搜索算法作为遗传算子的组成部分置于杂交、

变异等算子, 这种混合算法可提高算子的搜索效率, 使得遗传算法的计算效率大幅度提高^[5]。以上3种方式中, 第1种并未解决遗传算法所具有的缺陷; 第2种虽然在一定程度上提高了算法的效率, 但由于杂交、变异操作仍然不变, 导致遗传算法的缺陷没有得到根本的改变; 第3种将局部搜索算法融入杂交、变异等操作, 从根本上改变了因算子问题而导致算法过早收敛及封闭竞争等问题。

文献[6]通过研究简单遗传算法的算子, 发现其复制、杂交、变异等算子的每次作用均相当于对所作

收稿日期: 2003-08-11; 修回日期: 2004-01-11

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(20031041)

作者简介: 崔志华(1976—), 男, 河北丰南人, 讲师, 硕士, 从事进化算法、神经网络等研究; 曾建潮(1963—), 男, 陕西大荔人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、系统建模与仿真等研究

用的个体进行一次线性变换, 因而通过修改线性变换为非线性变换, 提出了非线性遗传算法(NGA)的

概念 文献[7]讨论了基于区间概念的模式定理, 经研究发现, 非线性遗传算子的选择问题是制约非线性遗传算法效率的一个根本问题 为此, 本文引入基于Tabu搜索的非线性遗传算法, 该方法相当于上述第3种合成方式, 将Tabu搜索技术融入杂交、变异等算子, 大大提高了算法的计算效率 通过分析可以发现, 该算法的杂交、变异算子因引入Tabu搜索技术而成为非线性算子, 从而在很大程度上提高了算法效率

2 结合Tabu搜索的非线性遗传算法

考虑如下问题:

$$\begin{aligned} \max F(x), \\ x \in D = [\lambda_1, \mu_1] \times [\lambda_2, \mu_2] \times \\ \dots \times [\lambda_n, \mu_n] \end{aligned} \quad (1)$$

本文算法的复制算子使用转轮法, 下面具体解释非线性杂交及变异算子.

2.1 非线性杂交算子

对于实数遗传算法(RGA), 其算术杂交算子定义为: 设杂交母体为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, 子代为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, 则有

$$\begin{cases} w_j = \alpha x_j + (1 - \alpha) y_j, \\ v_j = \alpha y_j + (1 - \alpha) x_j, \end{cases} \quad \alpha \in [0, 1] \quad (2)$$

Tabu搜索(TS)是对局部邻域搜索的一种扩展, 是一种全局逐步寻优算法 TS算法通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索, 并通过蔑视准则来赦免一些被禁忌的优良状态, 进而保证多样化的有效探索以最终实现全局优化 因此, 在构造基于Tabu搜索技术的非线性杂交算子时, 利用随机数 α 进行Tabu搜索

首先定义邻域结构, 将随机数 α 的定义域 $[0, 1]$ 平均分成 $\text{Number} + 1$ 份, 称区间 $\left[\frac{j-1}{\text{Number}+1}, \frac{j}{\text{Number}+1}\right]$ 为一个邻域, 禁忌表长度为 Number , 每对母体执行 K 次Tabu搜索策略, 当执行第 k 次Tabu搜索时, 随机产生不在同一邻域的 Number 个随机数 α_t , 并得到 Number 个临时解 $\{w_j^k\}$. 其中

$$\begin{aligned} w_t^k &= \alpha_t x_t + (1 - \alpha_t) y_t, \\ j &= 1, 2, \dots, \text{Number}, \\ k &= 1, 2, \dots, K, t = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

然后按照Tabu搜索技术进行操作 其最终最优解设为 s , 则杂交结果为 w , 且满足

$$F(w) = \max\{F(x), F(y), F(s)\}.$$

显然, 杂交结果可看成作用于杂交母体的一个非线性函数, 因而称该算子为非线性杂交算子.

2.2 非线性变异算子

对于RGA, 其变异算子定义为: 设杂交母体为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 子代为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 则有

$$w_j = \lambda_j + (\mu_j - \lambda_j) \times \alpha, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (4)$$

在构造基于Tabu搜索技术的非线性变异算子时, 与非线性杂交算子相同, 当执行第 k 次Tabu搜索时, 随机产生不在同一邻域的 Number 个随机数 α_t , 并得到 Number 个临时解 $\{w_j^k\}$. 其中

$$\begin{aligned} w_t^k &= \lambda + (\mu_t - \lambda) \alpha_t, \\ j &= 1, 2, \dots, \text{Number}, \\ k &= 1, 2, \dots, K, t = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

然后按照Tabu搜索技术进行操作 其最终最优解不妨设为 s , 则杂交结果为 w , 且满足 $F(w) = \max\{F(x), F(s)\}$. 显然, 变异结果可看成作用于母体的一个非线性函数, 因此称该算子为非线性变异算子.

下面给出基于Tabu搜索的非线性遗传算法框架:

Program NGA

Begin

初始化参数: 杂交概率 P_c , 变异概率 P_m , 禁忌表长度 Number , 群体大小 N ;

随机产生初始种群 $P(k): k = 0$;

计算 $P(k)$ 中个体的适应值;

当前解 $\text{Solution} = P(k)$ 中最优个体的适应值;

Repeat

对种群 $P(k)$ 执行复制操作, 得到 $2N$ 个杂交母体;

对每对杂交母体执行非线性杂交操作, 得到 N 个子体;

对每个子体执行非线性变异操作, 得到新种群 $P(k+1)$;

If($\text{Solution} < P(k+1)$ 中的最优个体适应值)

$\text{Solution} = P(k+1)$ 中的最优个体适应值;

Until(满足终止条件)

输出 Solution ;

End

3 实例仿真

为了验证本文提出的非线性遗传算法, 利用4

个常用的测试函数进行测试 它们分别是:

$$f_1(X) = \sum_{j=1}^3 x_j^2, x_j^2 \quad [- 5 \ 12, 5 \ 12];$$

$$f_2(X) = 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2, \quad x_1, x_2 \quad [- 2 \ 014, 2 \ 014];$$

$$f_3(X) = \left| \sin(30x_1) \right| \times \left(1 - \frac{x_1}{2} \right) + \left| \sin(30x_2) \right| \times \left(1 - \frac{x_2}{2} \right), x_1, x_2 \quad [0, 1 \ 0];$$

$$f_4(X) = \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2} - 0.5, \quad x_1, x_2 \quad [- 30 \ 0, 30 \ 0]$$

函数 $f_1(X)$ 是一种简单的单峰函数, 在 (0, 0, 0) 点达到极小值; 函数 $f_2(X)$ 称为 Generalized Rosenbrock 函数, 其最优状态和最优解为 $f_2(1, 1) = 0$; 函数 $f_3(X)$ 是一个多峰函数, 有 100 个局部最优解, 1 个全局最优解, 最优值为 1. 947 925 329 2; 函数 $f_4(X)$ 的最优状态和最优解为 $f_4(0, 0) = - 1$, 此函数在距全局最优点大约 3. 14 范围内存在无穷多个局部极小将其包围, 并且函数强烈振荡, 因此一般算法难以得到最优解 群体个数为 40, 杂交概率 $P_c = 0. 85$, 变异概率 $P_m = 0. 1$, 最大迭代次数为 5 000, 禁忌表长度为 10, 误差为 0. 001, 判断全局收敛的终止条件为

$$\begin{cases} |F^* - F^{best}| < \epsilon |F^*|, F^* \neq 0; \\ |F^* - F^{best}| < \epsilon, F^* = 0 \end{cases}$$

其中: F^* 表示全局最优解, F^{best} 表示算法所得到的最优解 比较结果如表 1 及图 1 和图 2 所示

通过实验结果可以看出, 非线性遗传算法在计

表 1 RGA 与 NGA 性能比较

函数	算法	平均收敛代数	平均收敛率/%	最优解	最差解
F_1	RGA	4 225	40	0. 000 256	0. 000 887
	NGA	2 4	100	0. 000 000	0. 000 000
F_2	RGA	1 191. 913	92	0. 000 000	0. 000 990
	NGA	70. 9	100	0. 000 000	0. 000 309
F_3	RGA	2 08	100	1. 947 925	1. 946 955
	NGA	3 92	100	1. 947 925	1. 947 030
F_4	RGA	2 378 187. 5	32	0. 000 000	0. 000 907
	NGA	970. 10	98	0. 000 000	0. 000 973

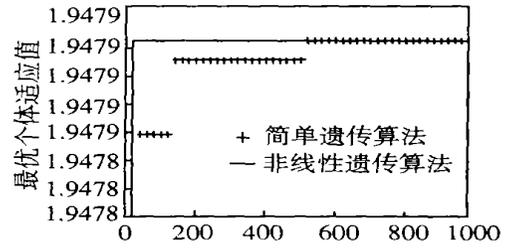


图 1 函数 $f_3(X)$ 性能比较

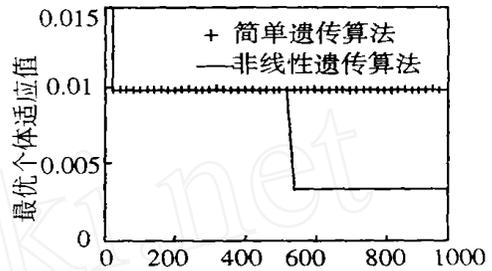


图 2 函数 $f_4(X)$ 性能比较

算速度和计算效率方面都有很大的优势 函数 $f_1(X)$ 和 $f_3(X)$ 几乎在 10 代以内即趋于全局最优解, 不仅比实数遗传算法计算速度提高很多, 而且精度也分别提高了 20% 和 6%. 函数 $f_2(X)$ 在 100 代以内也趋于全局最优解, 其计算速度比实数遗传算法提前近 400 代 函数 $f_4(X)$ 虽然在 100 代以内得到了一个局部最优解, 但非线性遗传算法在 500 代左右就跳出局部极值点, 收敛到最优解, 而实数遗传算法则陷入局部极值点, 即使搜索到 1 000 代也未收敛 因此, 本文提出的非线性遗传算法在解决过早收敛及封闭竞争方面要优于实数遗传算法

4 算法优化效率的评价准则

为了验证本文提出的非线性遗传算法的收敛速度与收敛稳定性, 利用文献[8]提出的“平均截止代数”和“截止代数分布熵”对其进行评价. 平均截止代数越小, 说明达到相同精度时的遗传算法终止代数越小, 平均收敛速度越快; 截止代数分布熵越小, 表明多次独立运行遗传算法的截止代数分布越集中, 收敛稳定性越好.

4.1 杂交算子分析

杂交概率取值范围为 0. 05 ~ 1. 0, 间隔为 0. 05, 变异概率为 0. 1, 每次算法执行 50 次, 分别对前 3 个测试函数进行测试, 仅附函数 $f_1(X)$ 的性能表现如图 3 和图 4 所示, 其他略

由实验结果可以看出, 随着杂交概率的增加, 非线性遗传算法的平均截止代数迅速减小 这表明对于非线性遗传算法而言, 较大的杂交概率将会提高

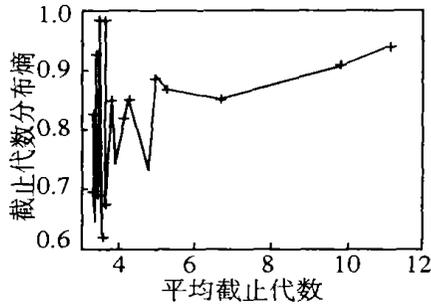


图3 NGA 在 $f_1(X)$ 中的性能表现

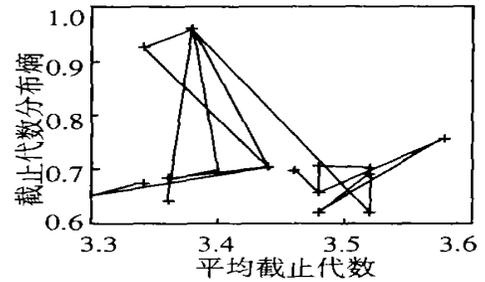


图5 NGA 在 $f_1(X)$ 中的性能表现

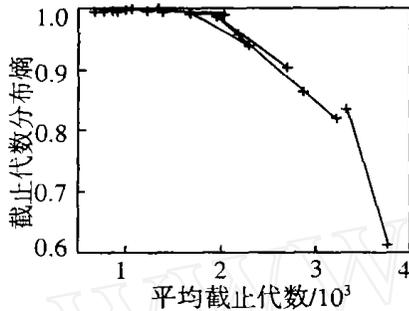


图4 RGA 在 $f_1(X)$ 中的性能表现

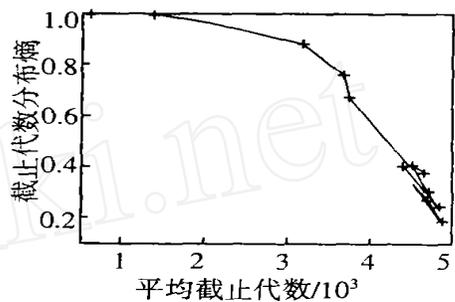


图6 RGA 在 $f_1(X)$ 中的性能表现

算法的速度,但提高的幅度有所不同.如对于函数 $f_1(X)$,NGA 的平均截止代数在 4 代以内;而 RGA 的平均截止代数要多于 500 代.至于平均截止代数分布熵,取 $P_c = 0.05$ 时,RGA 优于 NGA,但随着杂交概率的增加,RGA 迅速趋于 1.0,收敛极不稳定;而 NGA 随着杂交概率的增加,平均截止代数分布熵大体上在 0.6 ~ 0.85 之间波动,虽然不太稳定,但比 RGA 稳定得多.总之,从 3 个测试函数看,NGA 的平均截止代数和平均截止代数分布熵均优于 RGA,且给出较好的 P_c 选择范围为 0.65 ~ 1.0.

4.2 变异算子分析

变异概率取值范围为 0.05 ~ 1.0,间隔为 0.05,杂交概率为 0.65,每次算法执行 50 次,分别对前 3 个测试函数进行测试.函数 $f_1(X)$ 的性能如图 5 和图 6 所示,其他略.

由实验结果可以看出,随着变异概率的增加,非线性遗传算法的平均截止代数迅速减小.这表明对于非线性遗传算法而言,较大的变异概率将会提高算法速度,但提高的幅度不同.对于函数 $f_1(X)$,NGA 的平均截止代数在 4 代以内,而 RGA 的平均截止代数则呈递增形式,从 500 代迅速增到 5 000 代附近. NGA 的平均截止代数分布熵除了 P_m 取 0.15,0.5,0.85 时,其他的分布范围为 0.6 ~ 0.75,而 RGA 的平均截止代数分布熵则主要在 0.1 ~ 0.4

之间,这表明 RGA 的收敛稳定性优于 NGA. 总之,3 个测试函数的平均收敛代数均为 NGA 优于 RGA.

5 结论

本文通过将 Tabu 搜索技术引入杂交、变异算子,提出了一种新的非线性遗传算法,该方法实现简单,并可显著提高计算效率,具有较大的实用价值.通过将平均截止代数和平均截止代数分布熵作为评价准则,可从中得出基于 Tabu 搜索技术的非线性遗传算法的优化效率高于实数遗传算法的结论.

参考文献(References):

- [1] 向丽,顾培亮.一种快速收敛的混合遗传算法[J].控制与决策,2002,17(1):19-23
(Xiang L, Gu P L. Hybrid genetic algorithm with quick convergence[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(1): 19-23)
- [2] Brown D, Huntley C, Spillane A. A parallel genetic heuristic for the quadratic assignment problem [A]. *Proc of the 3rd Int Conf on Genetic Algorithm* [C]. San Mateo, 1989. 406-415.
- [3] Renders JM, Flasse S P. Hybrid methods using genetic algorithms for global optimization[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics (Part B)*, 1996, 26(2): 243-258.

(下转第 798 页)

度高,收敛速度快,鲁棒性强的优点,能有效克服早熟收敛问题,特别适合于高精度求解较大规模的函数优化计算.文中仿真计算结果是在相同的种群参数下得到的,实际使用非常方便.

利用引导进化的思想,可建立一类这样的进化算法.如果求导数方便,可以引入导数(梯度)信息,也可与具体的领域问题相结合,构成各种更具针对性、收敛性能更好的引导进化算法.

参考文献(References):

- [1] 席裕庚,柴天佑,恽为民.遗传算法综述[J].控制理论与应用,1996,13(6):696-704
(Xi Y G, Chai T Y, Yun W M. Survey on genetic algorithm [J]. *Control Theory and Applications*, 1996, 13(6): 696-704.)
- [2] 戴晓辉,李敏强,寇纪淞.遗传算法理论研究综述[J].控制与决策,2000,15(3):263-268
(Dai X H, Li M Q, Kou J S. Survey on the theory of genetic algorithms [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 263-268.)
- [3] 陈长征,王楠.遗传算法中交叉和变异概率选择的自适应方法及作用机理[J].控制理论与应用,2002,19(1):41-43
(Chen C Z, Wang N. Adaptive selection of crossover and mutation probability of genetic algorithm and its mechanism [J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(1): 41-43.)
- [4] 江瑞,罗予频,胡东成,等.一种协调勘探和开采的遗传算法:收敛性及性能分析[J].计算机学报,2001,24(12):1233-1241
(Jiang R, Luo Y P, Hu D C, et al. A genetic algorithm by coordinating exploration and exploitation-convergence properties and performance analyses [J]. *J of Computers*, 2001, 24(12): 1233-1241.)
- [5] 杨启文,蒋静坪,张国宏.遗传优化速度的改进[J].软件学报,2001,12(1):270-275
(Yang Q W, Jiang J P, Zhang G H. Improving optimization speed for genetic algorithms [J]. *J of Software*, 2001, 12(1): 270-275.)
- [6] 向丽,顾培亮.一种快速收敛的混合遗传算法[J].控制与决策,2002,17(1):19-23
(Xiang L, Gu P L. Hybrid genetic algorithm with quick convergence [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(1): 19-23.)
- [7] Whitley D A. The genitor algorithm and selection pressure: Why rank-based allocation reproduction trials is best [A]. *Proc of the 3rd Int Conf on Genetic Algorithms* [C]. Los Altos: Morgan Kaufmann Publishers, 1989. 116-121.
- [8] 王正志,薄涛.进化计算[M].长沙:国防科技大学出版社,2000.108-109.
- [9] Yiu-wing Leung, Yiping Wang. An orthogonal genetic algorithm with quantization for global numerical optimization [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2001, 1(5): 41-53.
- [4] 彭伟,卢锡城.一种函数优化问题的混合遗传算法[J].软件学报,1999,10(8):819-823
(Peng W, Lu X C. A hybrid genetic algorithm for function optimization [J]. *J of Software*, 1999, 10(8): 819-823.)
- [5] 邓建军,徐立鸿,吴启迪.一种求解非线性函数优化问题的混合遗传算法[J].同济大学学报,2001,29(11):1363-1367.
(Deng J J, Xu L H, Wu Q D. Hybrid genetic algorithm for nonlinear function optimization [J]. *J of Tongji University*, 2001, 29(11): 1363-1367.)
- [6] Cui Zhi-hua, Zeng Jian-chao. Study of nonlinear genetic algorithm [A]. *Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Shanghai, 2002. 812-814.
- [7] Cui Zhi-hua, Zeng Jian-chao. Schema theorem studying of real-coded nonlinear genetic algorithm [A]. *The First Int Conf on Machine Learning and Cybernetics* [C]. Beijing, 2002. 1429-1431.
- [8] 孙瑞祥,屈梁生.遗传算法优化效率的定量评价[J].自动化学报,2000,26(4):552-556
(Sun R X, Qu L S. Quantitative evaluation of optimization efficiency for genetic algorithms [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(4): 552-556.)

(上接第794页)