

文章编号: 1000-8152(2004)06-0993-04

一种改进的遗传算法及其在钢卷优化组合中的应用

王晓东¹, 金吉凌², 刘全利², 潘学军², 王伟²

(1. 东北大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110006; 2. 大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对遗传算法易于陷入局部最优和收敛速度慢的不足, 引入个体适应度值的方差和均值来描述种群的聚散程度, 提出了一种具有参数动态调节功能的改进遗传算法, 仿真试验证明了算法的有效性. 改进遗传算法应用于罩式退火车间钢卷的自动组合堆垛, 并在生产应用中取得了很好的效果.

关键词: 遗传算法; 旅行商问题; 组合优化

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A

Improved genetic algorithm and its application in optimal combination stacks of steel roll

WANG Xiao-dong¹, JIN Ji-ling², LIU Quan-li², PAN Xue-jun², WANG Wei²

(1. Faculty of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110006, China;

2. Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: To overcome the disadvantage of local optimum and slower convergence speed of general genetic algorithms, an improved genetic algorithm with dynamic changing parameters was proposed by introducing the variance and expectation of individual adaptive value to describe concentration dissipation degree of population. The improved algorithm's validity was verified by simulation tests. The improved algorithm was applied to automatic combination stacks of steel roll in a batch annealing shop and a satisfactory result is obtained in production.

Key words: genetic algorithm; traveling salesman problem; combination optimization

1 引言 (Introduction)

如何提高遗传算法的搜索能力和收敛速度, 使其更好地解决实际问题, 仍是当前遗传算法研究中的重点之一^[1]. 实际上, 对遗传算法的收敛性起决定作用的是交叉率和变异率^[2]. 在简单的遗传算法中, 交叉率和变异率固定不变, 因此遗传算法收敛速度太慢, 很难逃离局部解所在区域. 多年来, 改变交叉率和变异率使之具有动态调整功能的遗传算法不断地被提出^[3-5], 最具代表性的工作是文献[3]提出的自适应遗传算法. 该算法随着种群进化自适应地调整交叉率和变异率. 但该方法对于种群处于进化后期比较合适, 而对于种群进化初期阶段就使得进化过程略显缓慢, 因为在进化初期阶段群体中的较优良的个体几乎处于一种不发生变化的状态, 使得进化停留在局部最优. 针对此问题, 本文引入个体适应度值的方差和均值来更加准确的描述种群的多样

性和收敛程度, 提出一种具有参数动态调节功能的改进遗传算法. 仿真试验表明该算法不仅能收敛到全局最优解, 而且提高了搜索效率, 节省了优化时间, 非常适合于复杂的仿真优化问题. 作者将提出的改进算法应用到冶金工业罩式退火炉炉群退火生产的钢卷优化组合堆垛中, 生产实践表明取得了很好的应用效果.

2 参数动态调整的遗传算法 (Genetic algorithm with dynamic parameters)

在具有动态调节功能遗传算法方面, 最具代表性的是文献[3]中提出的根据染色体的适应值来调节个体的交叉率和变异率, 具体的调节方式如下:

$$P_c = \begin{cases} k_1(f_{\max} - f') / (f_{\max} - f_{\text{avg}}), & f' > f_{\text{avg}}, \\ k_3, & f' \leq f_{\text{avg}}, \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = \begin{cases} k_2(f_{\max} - f) / (f_{\max} - f_{\text{avg}}), & f > f_{\text{avg}}, \\ k_4, & f \leq f_{\text{avg}}. \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期: 2003-05-28; 收修改稿日期: 2003-12-30.

基金项目: 国家“863 计划”重点课题 (2002AA412020); 教育部科学技术研究重点题目 (01053); 辽宁省高等学校学科拔尖人才资金项目 (2003-54).

式中： p_c 表示交叉率， p_m 为变异率， f_{max} 表示种群最大适应度值， f_{avg} 表示种群平均适应度值， f' 表示交叉的两个个体中较大的适应度值， f 表示要变异的个体适应度值。这里， k_1, k_2, k_3, k_4 是在 0 和 1 之间取值的常数， k_3 和 k_4 较大。该算法能够保护有效模式并加快了劣质解的淘汰速度。但是，由于参数是按照个体的适应度值来确定的，这样就减少了种群中个体的联系。同时，由式(1)可以看到，优秀的个体交叉率很小。这样就使得好的基因不能有效传播。这种调节策略使得种群中的个体缺乏协作精神，导致进化速度缓慢，尤其是在进化初期，不能快速达到最优解附近。此外，该调节策略对于每个个体都要计算控制参数，当群体规模比较大的时候，必然要花费大量的时间，降低优化效率。

遗传算法进化过程分两个阶段，第一个阶段是在大的搜索空间中快速向最优解附近靠拢(称为粗糙搜索)，第二个阶段是在最优解附近寻找最优解(称为精细搜索)。如何处理粗糙搜索和精细搜索之间的平衡是保证解的质量和收敛效率的关键。本节对式(1)和(2)进行改进，用适应度的均值和方差联合描述种群的状态，通过适应度的集中程度自适应的调节种群的 p_c 和 p_m 来保证算法的全局收敛和收敛效率。具体的自适应调节参数公式如下：

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} + k_1 \exp(-\beta)\alpha, & k_1 \exp(-\beta)\alpha \leq k_2 - p_{c1}, \\ k_2, & k_1 \exp(-\beta)\alpha > k_2 - p_{c1}, \end{cases} \quad (3)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} + k_3 \exp(-\beta)\alpha, & k_3 \exp(-\beta)\alpha \leq k_4 - p_{m1}, \\ k_4, & k_3 \exp(-\beta)\alpha > k_4 - p_{m1}. \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\alpha = f_{avg}/f_{max}$ ， $\beta = f_{dev}/f_{dev-max}$ ， f_{avg} 表示种群个体适应度的平均值， f_{max} 表示种群个体适应度的最大值， f_{dev} 表示目前种群个体适应度的方差值， $f_{dev-max}$ 表示到目前为止个体适应度方差的最大值。 p_{c1} 和 p_{m1} 为常数，根据不同的问题通常分别取值范围为 0.2 ~ 0.65 和 0.001 ~ 0.2。常数 k_1 和 k_3 取值范围 0 ~ 1.0。常数 k_2 是接近于 1 的常数，通常取为 1.0，常数 k_4 通常取为 0.2 ~ 0.4。

式(1)和(2)是针对种群中的个体来调节参数的，这样的调节策略使得个体缺乏相互间的协作，导致进化速度缓慢，另外也增加了计算量。不同于式(1)和(2)，式(3)和(4)是针对种群的整体进行参数调节，引进了适应度的方差和均值联合描述种群个体的集中程度，这样更有利于种群个体间的协作和

进化速度的提高。

另外，在遗传算法的搜索过程中，当种群的收敛程度很大，群体的多样性丧失时，为了跳出局部最优点，应该适当增加 p_c 和 p_m ；反之，当种群的收敛程度很小，群体具有一定的多样性时，为了防止最优解被破坏，应该使 p_c 和 p_m 适当减小。由于种群在进化的不同阶段 f_{avg} 、 f_{max} 、 f_{dev} 和 $f_{dev-max}$ 都是不同的。这几个参数在进化的每一代都不会完全一样，它们完全描述了种群的进化过程。正是由于在进化过程中这几个参数的改变，使得 α 、 β 可以自动调整，从而使得 p_c 、 p_m 随之改变，达到动态调节进化参数的目的。随着进化的不断进行， α 和 β 能够完整地表示目前种群的进化状态和个体的聚散状态。根据 α 和 β 的值来动态调整 p_c 和 p_m 能够根据目前种群的状态来决定下一步进化的操作，使得整个搜索过程能够快速寻优。运用本节的参数调整策略能够在保证算法全局收敛的同时，加快收敛速度，提高寻优效率。

3 仿真算例(Simulation example)

本文以旅行商(TSP)问题为例，将本文改进遗传算法同文献[3]的自适应遗传算法进行仿真对比。两种遗传算法的选择方法、标定方法相同。

选择 105 个城市的旅行商问题。采用稳态遗传算法，种群规模为 2000，最大优化代数为 500。文献[3]算法的参数见原文，本文改进算法的参数： $p_{c1} = 0.65$ ， $k_1 = 1.0$ ， $k_2 = 1.0$ ， $p_{m1} = 0.005$ ， $k_3 = 0.1$ ， $k_4 = 0.2$ 。本文的改进算法 MAGA (Modified adaptive genetic algorithm) 与文献[3]中的算法 AGA (Adaptive genetic algorithm) 的收敛曲线比较如图 1 所示。在图中可清楚看出，本文的改进算法优于文献[3]中的算法。

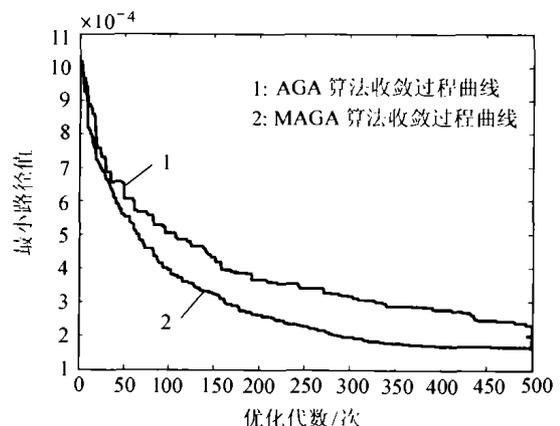


图1 MAGA与AGA收敛曲线比较

Fig. 1 Convergence curve compare of MAGA and AGA

4 改进遗传算法的应用 (Application of the improved genetic algorithm)

退火是冶金工业冷轧薄板生产中的重要工序,通常采用罩式退火炉炉群退火,一般的退火车间有几十个加热退火炉.退火的生产过程如下:1)建池.即按照预定的合同订单和市场需求从前库中选取每天生产需要的钢卷,通常几十至几百卷不等;2)堆垛.就是排定钢卷装炉的生产计划,即按照特定的工艺规则将3~4个钢卷组合在一起(形成一个生产计划),放在一个炉台(每个炉台最多可装4个钢卷)上进行加热退火;3)加热和冷却.加热的时间一般为20h左右.加热结束以后要进行冷却,冷却结束后用行车将钢卷从炉台上取下,这样一个生产计划的钢卷退火结束,炉台可以进行下一个生产计划.

每一炉中钢卷的加热时间是由加热曲线决定的.生产工艺要求加热曲线要按照同一炉台中的钢卷的总重量进行分阶划分.钢卷的总重量每增加5t,就要更换一条加热曲线,对应的加热时间要延长0.5h,相应的冷却时间也要延长.由于实际退火中,每个钢卷的重量和规格都有差异,所以一个炉台上的钢卷的总重量会在一个范围内变化.具体就是在30.0~60.0t之间变化.具体的工艺规范是这样的,如果总重量小于或等于35t,加热时间为19h.如果总重量大于35t并且小于或等于40t,加热时间为19.5h.以此类推.显然,为了增加生产效率,降低能耗,就要在钢卷堆垛时使得总重量尽量接近加热工艺分界线的上限,而不是下限.也就是说要使堆垛以后的重量更多的应该是接近35t,40t,45t,50t,55t,60t,而不应该是45.1t,50.2t等.但是,要想在组合堆垛的时候达到这一优化目标并不容易,特别是在池中钢卷数目非常多的情况下人工堆垛更加困难.现场实际的生产情况只能是由有经验的技工根据多年的生产经验来堆垛,因此很难找到最优的组合解.

在理论上,钢卷优化组合堆垛问题可以抽象为复杂的离散组合优化问题.目标就是要使得每一炉的实际退火的钢卷重量与加热曲线的上限的偏差最小.所以,根据问题可抽象出如下的优化组合模型:

$$f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_i). \quad (5)$$

式中, f 表示组合以后各炉钢卷重量与各炉工艺设定重量偏差的平均值. N 表示本次优化组合的总炉数. y_i 表示每一炉(3~4个)钢卷的总重量, \bar{y}_i 表示与 y_i 对应的各炉工艺设定重量.优化组合堆垛的目标就是选择每一个 y_i 使 f 尽可能小.下面给出应用

本文提出的改进遗传算法求解 y_i 的步骤:

① 首先对池中的每个钢卷进行编号,用 j 表示,并记录钢卷的总个数 M 和每个钢卷重量 w_j ;

② 启动遗传算法产生初始种群,这里采用自然数编码方式;

③ 判断是否达到最大代数,如果达到最大代数,找到最小的值对应的组合方式作为最优的组合结果,优化结束.如果没到最大代数转到第④步;

④ 调用相应工艺规则,对种群中的个体进行组合堆垛,并对每个个体分别计算 y_i (y_i 为给出组合结果的第 i 个退火计划中几个钢卷的重量之和)和 f ;

⑤ 根据个体的 f 采用“赌轮选择法”进行选择操作,在对选择后的个体按照本文提出的自适应交叉率和变异率进行交叉和变异操作,生成新一代种群;

⑥ 重复执行③至⑤步,直到优化结束.

上述改进算法已应用在国内某冷轧厂罩式退火炉车间的钢卷优化组合堆垛问题.以池中具有28个钢卷为例的优化组合结果如表1和表2所示.表1表示池中可以混装在一起的28个钢卷每卷重量.表2是经过改进遗传算法优化后的装炉计划的组合结果表.从表2中可看出本次优化共生成了7个计划,每个计划的钢卷号分别在表2中给出给出,而且每个计划的总重量与对应的各炉工艺设定重量的偏差除第7个计划外均在1t以内,而第7个计划是1.07t,偏差是很小的.此时,7个计划的总重量为374.08t, f 值为0.623.

表1 钢卷重量数据表

Table 1 Data of steel roll weight

编号	重量/t	编号	重量/t
1	14.44	15	12.37
2	14.74	16	8.03
3	14.74	17	14.83
4	14.74	18	14.60
5	14.75	19	14.30
6	14.79	20	7.36
7	14.50	21	7.85
8	14.26	22	14.76
9	15.13	23	14.57
10	12.83	24	14.78
11	14.73	25	14.80
12	14.76	26	15.21
13	14.88	27	7.89
14	14.59	28	8.85

表2 优化组合结果表
Table 2 Optimal combination result

退火计划号	总重量/t	组成的钢卷编号	与上限的偏差/t
1	49.10	1 8 15 16	0.90
2	59.20	2 9 22 23	0.80
3	44.27	3 10 21 28	0.73
4	59.09	5 11 17 24	0.91
5	44.34	7 14 20 27	0.66
6	59.15	12 13 19 26	0.85
7	58.93	4 6 18 25	1.07

以改进遗传算法为核心的实时仿真系统已于2002年10月在生产现场正常运行.用该仿真系统可以根据生产工艺进行装炉规则设定、自动装炉优化组合、保证稳定堆垛、紧急合同特殊堆垛、手动堆垛及结果调整功能.该系统的使用提高了生产效率,降低了能耗.自动装炉组合具有明显的优化效果.以12月6日的现场装炉组合为例,按MR钢种建池,池中收入钢卷100卷,设定排产规则为全厚、全中、全薄为装炉组合优先级,进行自动堆垛后,共形成排产退火计划25个.所有退火计划均附合工艺规定,所有计划的吨位均靠近加热曲线的上限,优化效果明显.整个自动排产用时35s,装炉组合结果平均每炉误差总重量为0.297t.

5 结束语(Conclusion)

引入个体适应度值的方差和均值来描述种群的聚散程度,提出了一种具有参数动态调节功能的改进遗传算法.改进遗传算法能够根据种群中个体的聚散程度来动态调节交叉率和变异率,使得改进算法既具有全局收敛能力,又能快速收敛.仿真结果表明改进遗传算法适合于求解仿真优化问题.改进遗传算法已应用于冷轧厂罩式退火炉车间的钢卷优化组合堆垛,在实际生产中取得了很好的应用效果.

参考文献(References):

- [1] 张丽萍,柴跃廷.遗传算法的现状与发展动向[J].信息与控制,2001,30(6):531-536.
(ZHANG Liping, CHAI Yueting. Actuality and developmental trend for genetic algorithms[J]. *Information and Control*, 2001, 30(6): 531-536.)
- [2] SRINIVAS M. Genetic algorithms: a survey [J]. *Computer*, 1994, 26(6): 17-26.
- [3] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics*, 1994, 24(4): 656-667.
- [4] 段玉倩,贺佳李.遗传算法及其改进[J].电力系统及其自动化学报,1998,10(1):39-52.
(DUAN Yuqian, HE Jiali. Genetic algorithm and its modification [J]. *Proceeding of Electric Power Systems and Automation*, 1998, 10(1): 39-52.)
- [5] 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 Changzheng, WANG Nan. Adaptive selection of crossover and mutation probability of genetic algorithm and its mechanism [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 41-43.)

作者简介:

王晓东 (1958—),男,东北大学信息工程学院博士研究生,硕士毕业于北京科技大学,研究方向:遗传算法、工业生产过程建模与控制;

金吉凌 (1978—),男,大连理工大学硕士研究生,研究方向:遗传算法、工业生产过程建模与控制;

刘全利 (1976—),男,大连理工大学电信学院博士研究生,硕士毕业于东北大学,研究方向:流程工业生产过程建模与控制;

潘学军 (1966—)男,大连理工大学副教授,1998年获得东北大学博士学位,研究方向为工业生产过程建模与控制、智能控制;

王伟 (1955—),男,大连理工大学教授,博士生导师,1988年获得东北大学博士学位,研究方向:流程工业生产过程建模与控制、CIMS、智能控制, E-mail: wangwei@dlut.edu.cn.