

基于排挤机制改进的多目标进化算法*

侯中喜,陈小庆,郭良民

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要 进化算法是求解多目标优化问题(MOP)重要而有效的方法。为加快收敛速度,提高收敛精度,在已有算法(NSGA-II)的基础上,引进小生境思想,提出了更为合理的排挤机制。通过典型应用函数的计算测试结果表明:上述改进不仅具有较高的计算效率,而且能够得到分布更为合理的解,且能保持解的多样性分布。

关键词 多目标优化;进化算法;排挤机制

中图分类号:TP301 文献标识码:A

An Improved Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Crowing Mechanism

HOU Zhong-xi, CHEN Xiao-qing, GUO Liang-min

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Evolutionary algorithms are the main and effective methods in solving multi-objective optimization problems (MOP). Based on the NSGA-II algorithm studied and analyzed, we improved its crowding mechanism by introducing the Niche theory to expedite its convergence velocity and improve its convergence precision. The representative test functions show that the improvements have higher computational efficiency and can obtain a reasonable distributing solution; it can also maintain the solutions' diversity.

Key words multi-objective optimization; evolutionary algorithm; crowing mechanism

一般来说,科学研究和工程实践中许多优化问题都是多目标优化问题(MOP:Multi-objective Optimization Problem)。一个包括 N 个决策变量, K 个目标函数, L 个约束条件的最小化 MOP 可用如下模型表述:

$$\begin{aligned} \text{最小化:} & \quad y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \\ \text{满足:} & \quad g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_l(x)) \leq 0 \\ \text{且:} & \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \in X, X \subset R^N \\ & \quad y = (y_1, y_2, \dots, y_K) \in Y, Y \subset R^K \end{aligned}$$

对任意 $x \in A$, 若存在 x 的一个邻域使得 x 对此邻域非劣, 则称 x 是 MOP 的局部 Pareto 最优解; 若 x 对整个设计容许集 X_f 非劣, 则称 x 是 MOP 的全局 Pareto 最优解。所谓 Pareto 最优就是, 不存在比其中至少一个目标好而其它目标不劣的更好的解, 也就是不可能通过优化其中部分目标而其他目标不劣化。Pareto 最优解集中的元素就所有目标而言是彼此不可比较的。

进化算法(Evolutionary Algorithms)对整个群体进行进化操作, 着眼于个体的集合。MOP 的 Pareto 最优解一般也是一个集合, 这种相似性使得 EA 非常适合于求解 MOP 的 Pareto 最优集。目前主要的多目标进化算法有 VEGA、HLGA、MOGA、NPGA、NSGA、NAGA-II、MOMOGA、SPEA 等。

E. Zitzler 指出, 对于实际的复杂系统 MOP, 不可能精确地求出整个 Pareto 最优集, 为了能够获得 Pareto 最优集的良好近似, 要求多目标优化搜索方法满足如下目标^[1]:

(1) 求得的近似 Pareto 最优前沿与真正 Pareto 最优前沿的距离应尽可能小;

* 收稿日期:2006-01-11
基金项目:国家 863 基金资助项目(2005AA756050)
作者简介:侯中喜(1973-),男,副教授,博士。

(2) 求得的各个近似 Pareto 最优解应尽量地在近似 Pareto 前沿上均匀分布;

(3) 求得的近似 Pareto 最优前沿应具有较广的散布,各个目标都能在较广的取值范围内被各个近似 Pareto 最优解所覆盖。

常规的 EA 会使种群收敛到单个解,无法满足 Pareto 最优解良好分布和散布的目标,必须在 EA 中引入专门的多目标处理机制。多目标优化对 EA 的要求具体体现在两个方面^[1]:

(1) 如何进行个体分配适应度和实施选择,以引导搜索过程使种群向 Pareto 最优集收敛;

(2) 如何维持群体多样性以避免“早熟”收敛,以获得具有良好分布和散布的近似 Pareto 最优前沿。

为了实现多目标搜索的三个目标,围绕多目标进化算法的两个主要问题,学者们展开了大量的研究,提出了多种处理策略,并形成了许多行之有效的多目标进化算法。MOEAs 中,对个体适应度分配和选择的方法主要有:切换目标选择、归并目标函数、基于 Pareto 优越的选择等;其中基于 Pareto 优越的方法最为有效,被广泛采用。而保持群体多样性的方法主要有适应度共享、排挤机制等。

本文针对应用 NAGA-II^[2]时发现的搜索过程中单参数劣化的情况,针对其排挤机制进行了改进,提高了进化效率,加快收敛速度。

1 算法改进思路

在进化算法中,保持群体多样性的方法主要是基于小生境思想提出的适应度共享以及排挤机制等。

适应度共享通过反映个体之间的相似程度的共享函数来调整群体中各个个体的适应度,进化过程中依据调整后的适应度进行选择运算,维护群体的多样性。比较困难的是共享函数参数 σ_{share} (或称 Niche 半径) 的确定, σ_{share} 的选择将极大地影响算法的性能。目前比较多的算法都采用了适应度共享的思想,如 MOGA、NPGA、NSGA 等。排挤机制通过设置一个排挤因子 CF,由群体中随机选取的 $1/CF$ 个个体组成排挤成员,然后依据新产生的个体与排挤成员的相似性来排挤掉一些与排挤成员相类似的个体。个体之间的相似性可用个体编码串之间的海明距离来度量。随着排挤过程的进行,群体中的个体逐渐被分类,从而形成各个小的生存环境,并维持了群体的多样性。基于排挤机制的算法有 NSGA-II 等。

NSGA-II 算法中排挤距离的定义是基于目标空间的,以两目标为例,同一 Pareto 前沿面上每个个体的排挤距离定义如图 1,解的排挤距离定义为围绕其矩形的平均边长,两端点的排挤距离则定义为无穷大。操作时依据排挤距离的大小排序进行选择操作。这一方法计算比较简单,但是,当目标函数的变化范围比较大的时候,在端点处,一些极端的不可行解可能被保留而降低解的质量,如图 2 所示。

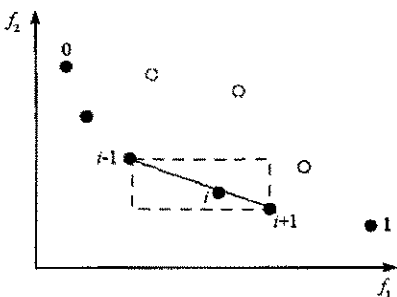


图 1 NAGA-II 排挤距离定义

Fig.1 Crowding-distance calculation of NSGA-II

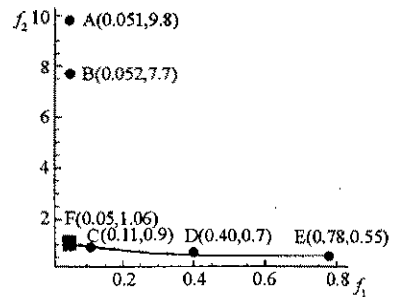


图 2 极端不可行解

Fig.2 Extreme unfeasible solutions

从图 2 中可以看出,一些极端的解(比如 A、B)是不可行的,与 Pareto 前沿差别很大,进化时占据了空间,降低了进化效率,增加了计算成本且收敛不到 Pareto 前沿。究其原因,在于排挤机制不完善导致不可行解得以保存而降低了进化效率。

依据上述定义,对于图 2,解 A、B 与 C、D、E 不属于同一 Pareto 前沿面,但是确定 Pareto 群体时,在未出现比 A 和 B 更优的个体(比如 F)时,程序会将它们归到同一“等级”下。根据定义,解 A 的排挤距离是无穷大,解 B 的排挤距离是 8.92,而解 D 排挤距离是 0.76。在排挤淘汰的时候,这样的结果显然是不合理的。共享函数法对之无能为力(虽然它们一个目标的函数值相差很小,但另一个目标函数值相差很

大);单纯从改进排挤距离出发也十分困难。

本文中,基于小生境思想提出如下改进:在确定群体的 Pareto 等级时,先对群体进行初步排挤筛选,以尽量剔除群体中的不合理的解。筛选的算法是:在目标空间中,选一个目标函数为指标,当任意两个个体中其函数值差绝对值小于预先确定的一个小数 L 时,再比较另一个目标函数,淘汰比较差的那个个体。这样,对于在预先指定的某一距离 L 之内,将只会保留一个个体,从而既维护了群体的多样性,又使得各个个体之间保持一定的距离并使得个体能够在整个约束空间分散开来,这样就实现了一种小生境算法。

筛选之后再在此基础上对种群进行 Pareto 分类选择等进化操作。数值试验显示,本文提出的算法有效地剔除了端点处的不合理的解,提高了群体的多样性,提高了进化效率。

2 测试函数结果及分析

本文的改进是针对计算过程中出现单参数劣化而提出的,因此,本文选取的测试函数均为有一个优化目标函数变化范围较大的 ZDT4 和 ZDT6^[3]。

测试函数的结构以相同的方式组成:

$$\text{最小化 } T(X) = (f_1(x_1), f_2(x))$$

$$\text{其中 } f_2(X) = g(x_2, \dots, x_m)h(f_1(x_1), g(x_2, \dots, x_m)), X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$$

测试函数随 $f_1(x_1)$, $g(X)$, $h(X)$ 三个函数的不同以及变量的个数和取值的不同而不同。具体函数可参阅文献 [3]。

本文选取的计算参数为:种群规模 100,交配池规模 220,交叉概率 0.95,变异概率 0.05,预设进化代数为 5000。

计算结果显示:在成功剔除掉端点处不合理的解之后,算法有效地提高了进化效率,成功地收敛到 Pareto 最优前沿。由于这两个测试函数的组成十分复杂,一般的进化算法很难收敛到其 Pareto 前沿。文献 [3] 给出了其他算法的计算结果。结果比较如下:图 3、4 中 (a) 图为 NSGA-II 算法计算结果 (b) 图为文献 [3] 的结果,图中显示了采用一般算法 (SPEA、SOEA、NSGA、VEGA、HLGA、NPGA、FFGA、RAND) 的仿真结果 (c) 图为采用本文改进排挤机制后 NSGA-II 计算结果。

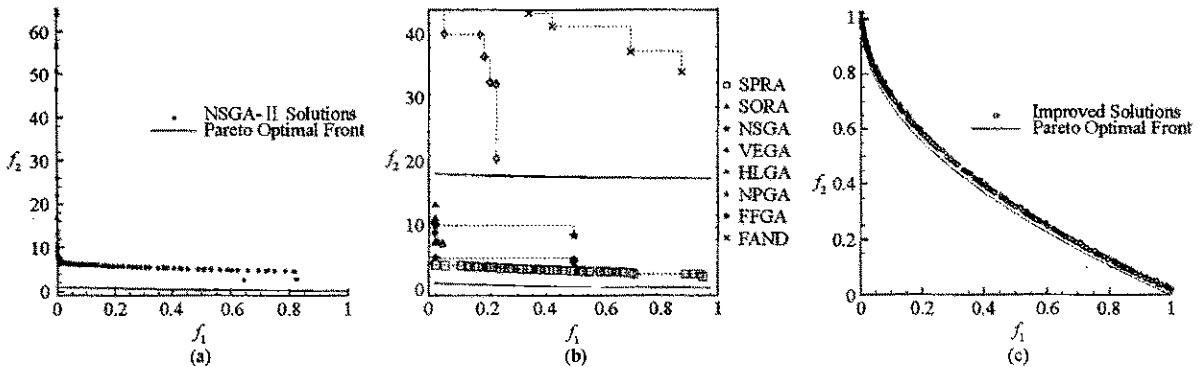


图 3 ZDT4 计算结果比较
Fig. 3 Comparison of the results of ZDT4

3 结论

论文在分析多目标问题求解方法以及为保持解的多样性所采取的方法基础上,针对 NSGA-II 在求解复杂函数时出现的参数恶化的现象,通过完善其排挤机制,使得改进后的算法在逼近性和分布均匀性上都取得了很好的结果。这表明该算法对多目标问题求解做出了有益的探索,还可以在求解目标更多的问题以及工程实际中作进一步的研究。

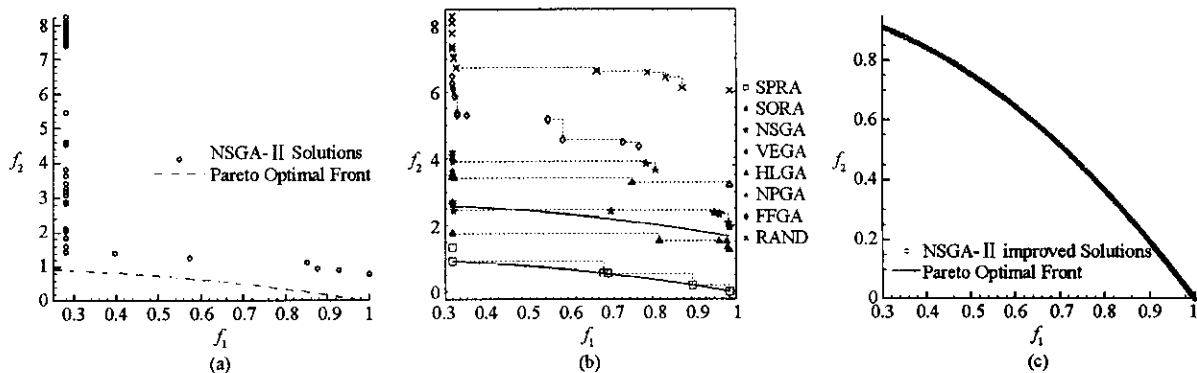


图 4 ZDT6 计算结果比较

Fig.4 Comparison of the results of ZDT6

参考文献：

- [1] Zitzler E. Evolutionary Algorithms for Multi-objective Optimization : Methods and Applications [D]. A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich for the degree of Doctor of Technical Sciences ,1999.
- [2] Deb K , Pratap A. A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm : NSGA- II [R]. KanGAL Report No. 200001 ,India , 2000.
- [3] Zitzler E , Deb K , Thiele L. Comparison of Multi-objective Evolutionary Algorithms : Empirical Results [J]. Evolutionary Computation ,2000 ,8 (2) : 173 - 195.

(上接第 9 页)

参考文献：

- [1] Reader-Harris M J , Brunton W C , Gibson J J , et al. Discharge Coefficients of Venturi Tubes with Standard and Non-standard convergent angles [J]. Flow Measurement and Instrumentation 2001 ,12 :135 - 145.
- [2] Xu C H , Heister S D , Collicott S H , et al. Modeling Cavitating Venturi Flows [R]. AIAA 2002 - 3699 ,2002.
- [3] Elperin T , Fominykh A , Klochko M. Performance of a Venturi Meter in Gas-liquid Flow in the Presence of Dissolved Gases [J]. Flow Measurement and Instrumentation ,2002 ,13 :13 - 16.
- [4] Valdberg A Y ,Dubinskaya F E. Design and Operational Aspects of Venturi Scrubbers [J]. Chemical and Petroleum Engineering ,2002 ,38 (7 - 8).
- [5] Allen R W K , Santen A V. Designing for Pressure Drop in Venturi Scrubbers : the Importance of Dry Pressure Drop [J]. The Chemical Engineering Journal ,1996 ,61 :203 - 211.
- [6] Rocker M. Modeling of Nonacoustic Combustion Instability in Simulations of Hybrid Motor Tests [R]. NASA/TP - 2000 - 209905 ,2000.
- [7] Hass N , Mizukami M , Neal B A , et al. Propellant Feed System Leak Detection-Lessons Learned From the Linear Aerospike SR - 71 Experiment (LASRE) [R]. NASA/TM - 1999 - 206590 ,1999.
- [8] 陆政林,等. 双组元变推力液体火箭发动机专题技术译丛 [R]. 长沙 :国防科技大学 ,1982.
- [9] 冯心. 变推力液体火箭发动机脉宽调制控制与故障检测 [D]. 长沙 :国防科技大学 , 1993.
- [10] 张育林. 变推力液体火箭发动机及其控制技术 [M]. 北京 :国防工业出版社 ,2001.
- [11] Tao Y J , Wu J P , Tian Z F , et al. Design and Application of Throttling Venturi for Cryogenic Propellants in Tripropellant Rocket Engine [A]. 42th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference , 2006.

