

最优化问题的蚁群混合差分进化算法研究*

罗中良¹, 易明珠², 刘小勇³

(1. 佛山科学技术学院自动化系, 广东佛山 528000;

2. 中山大学岭南学院, 广东广州, 510275;

3. 西安交通大学自动控制系, 陕西西安, 710049)

摘要: 在最优化问题求解中, 针对采用混合差分进化算法中突变运算的不同选择产生结果存在较大差异, 同时提高算法收敛速度与避免早熟, 提出在混合差分进化法中, 使用蚁群算法进行选择适当的突变运算, 加速搜寻全局解, 并通过中国旅行商问题的求解表明其有效性。

关键词: 蚁群混合差分进化法; 最优化; 中国旅行商问题

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 03-0033-04

现实中的最优化问题具有非线性及不可微分的特征, 非线性规划法、动态规划法、序列二次规划法等求解方法, 存在难以得到最优解, 或高维问题易陷入维数灾^[1-3]。采用随机直接搜索法, 如基因算法, 能够处理任何形式的目标函数和约束条件, 是一种多路径搜索的最优化方法。使用基因算法求解过程中为了增加族群的多样性以扩展搜寻空间, 通常会设定较大的族群数, 所以相对收敛速度慢与求解耗时。模拟退火算法可以处理非线性函数和不可微分的目标函数, 但计算时必须评估非常多的设计点^[3-5]。差分进化法可以解决不可微分非线性函数最优化问题, 采用随机直接搜索法, 利用上、下代间的竞争原理, 收敛速度快, 同时族群多样性大幅度减小, 但存在收敛过早、易陷入局部最优等问题。文献[4]则提出改进差分进化法, 称为混合差分进化法 (hybrid differential evolution method), 然而, 混合差分进化法的突变操作共有五种方法, 不同操作将导致不同的结果, 因此本文提出利用蚁群算法在解决组合优化问题的突出优点, 在混合算法中使用蚂蚁系统搜寻适当的突变操作, 以利于加速算法搜索全局最优解, 解决混合差分进化法的上述缺陷, 同时算法中嵌入加速程序及迁移程序以克服收敛速度及早熟缺点, 最后通过中国旅行商问题的求解表明算法的优越性。

1 蚁群混合差分进化算法

算法步骤如下:

Step 1: 初始化

开始以随机方式产生 N_p 各族群初始值, 而在每一个解中有 D 个参数, 此随机数以均匀分布方式涵盖整个解空间, 其表示如下:

$$X_{ji}^0 = X_j^{\min} + \rho_i (X_j^{\max} - X_j^{\min}), \\ j = 1, 2, \dots, D; i = 1, 2, \dots, N_p \quad (1)$$

其中, $\rho_i \in [0, 1]$ 是均匀分布的随机数, $X_m^{\max}$ 和 $X_m^{\min}$ 分别代表第 j 个参数的上限和下限。

Step 2: 蚁群搜索

突变差分进化法中最重要步骤。利用随机方式获得差异向量来产生一个扰动向量, 并以此扩大其搜索范围。主要是利用父代的最好目标函数值与子代的目标函数值之间的差异去构造一个可变动的信息素数量, 此可变动的信息素定义如下:

$$\Delta\tau_i = \begin{cases} \frac{Q}{L_K} & \text{突变单元被选中} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, i = 1, 2, \dots, N_p \quad (2)$$

式(2)中, 当子代的目标函数值比父代的最好目标函数值较优时, 适当的突变操作才能被选择。式中 Q 是一个常数, L_K 定义为:

$$L_K = \left| \frac{M(X_j^{G+1})}{M(X_j^G) - M(X_j^{G+1})} \right| \quad (3)$$

其中 $M(X_j^{G+1})$ 表示父代最好的目标函数值; $M(X_j^G)$ 表示子代的目标函数值, 并应用(4)式作为信息素更新的原则:

$$\tau_i^{\text{New}} = \rho\tau_i^{\text{old}} + \Delta\tau_i \quad (4)$$

系数 ρ 为信息素挥发系数 (小于1), 以避免信息

* 收稿日期: 2007-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60605009)

作者简介: 罗中良 (1968年生), 男, 副教授; E-mail: hk3333@163.com

素的无限制积累。新的信息素大小式通过先前迭代有 $(1-\rho)$ 挥发掉的信息素及目前迭代产生的变动信息素量。观察选择突变单元的概率与信息数 τ_i 及信息 η_i 成正比。

$$\eta_i = \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{X_{ji}^{G+1} - X_{bj}^G}{X_{ji}^{G+1}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中 X_{ji}^{G+1} 表示在第 $G+1$ 代族群的第 i 个个体的第 j 个基因。而 X_{bj}^G 表示在第 G 代族群的最好个体的第 j 个基因, 选择突变单元的概率可表示为:

$$P_i(t) = \frac{\tau_i^\alpha(t) \eta_i^\beta}{\sum_{i=1}^{N_p} \tau_i^\alpha(t) \eta_i^\beta} \quad (6)$$

式中 α, β 分别为启发参数。

突变是差分进化法中最重要的步骤。利用随机方式获得差异向量来产生一个扰动向量, 以此扩大其搜寻范围。突变过程中, 第 $G+1$ 代的突变向量为:

$$U_j^{G+1} = U_j^G + F \cdot D_d^G \quad (7)$$

式中 D_d^G 为第 G 代从 N_p 中随机产生突变操作的差向量, 它共有五中方法可供选择^[4], $F \in [0, 1]$ 是一个常数, X_i^G 为第 G 代目前最优解。

Step 3: 交配

为了增加族群中的多样行并扩展搜寻空间, 交配程序是第 G 代标的向量与第 $G+1$ 代的突变向量进行交换、混合而成为第 $G+1$ 代的尝试向量, 第 $G+1$ 代尝试向量为:

$$\hat{U}_j^{G+1} = [\hat{U}_{1i}^{G+1}, \hat{U}_{2i}^{G+1}, \dots, \hat{U}_{ji}^{G+1}, \dots, \hat{U}_{Di}^{G+1}], \quad j = 1, 2, \dots, D; i = 1, 2, \dots, N, N_p \quad (8)$$

至于是选用第 G 代标本向量或第 $G+1$ 代突变向量来作为尝试向量, 则有随机数来决定。

$$\hat{U}_{ji}^{G+1} = \begin{cases} X_{ji}^G & \text{若一随机数值} > C_R \\ U_{ji}^{G+1} & \text{其他} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, D; i = 1, 2, \dots, N, N_p \quad (9)$$

其中 C_R 为代表基因数目。 $C_R \in [0, 1]$ 为交配率, 可由使用者自行设定。

Step 4: 选择

选择的目的是决定那些向量要留下来, 作为下一代标本向量。首先在目标函数最小值求解中, 假如尝试向量 $\hat{U}_{ji}^{G+1}$ 的目标函数小于标本向量 X_i^G 时, 则由尝试向量 $\hat{U}_{ji}^{G+1}$ 作为下一代的标本向量; 否则下一代的标本向量仍为 X_i^G 。如此经过 step 1 ~ setp 4, 即是差分进化法的一代, 反复执行到最大代数 $G_{\max}$ 为止。

Step 5: 必要时的迁移程序

差分进化法在最优化求解过程中常陷入局部最

优解, 主要原因时每一代的族群经过突变与交配运算后, 所得参数向量早已接近收敛阶段, 若此时搜索局部最优解, 突变过程中差异向量已接近为零, 难以再跳脱局部区域。此时, 启动迁移程序可避免算法早熟的缺陷。

(1) 迁移程序的使用时机。

变化指标 η_{ji} 定义为:

$$\eta_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } \left| \frac{X_{ji}^{G+1} - X_{jb}^{G+1}}{X_{jb}^{G+1}} \right| > \varepsilon_2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

当族群向量的多样性指标 u 小于容忍值 ε_1 时, 即是迁移程序使用的时机。 u 是统计变化指标 η_{ji} 有多少个 1, u 的定义如下:

$$u = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^D \eta_{ji} \right]}{D(N_p - 1)} < \varepsilon_1 \quad (11)$$

(2) 迁移方法。

第 $G+1$ 代族群的产生方式, 以 X_{jb}^{G+1} 基础情况, 根据第 i 个向量 (个体) 的第 j 个变量做迁移, 迁移操作方法为:

$$X_{jb}^{G+1} = \begin{cases} X_{jb}^{G+1} + \rho_1 (X_j^{\min} - X_{jb}^{G+1}), & \text{if } \rho_2 < \frac{X_{jb}^{G+1} - X_j^{\min}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}} \\ X_{jb}^{G+1} + \rho_1 (X_j^{\max} - X_{jb}^{G+1}) & \text{其它情况} \end{cases} \quad (12)$$

其中 ρ_1, ρ_2 为 $[0, 1]$ 内的随机数, $X_j^{\min}, X_j^{\max}$ 为参数向量第 j 个变量的下、上限, X_{jb}^{G+1} 为目前最优向量的第 j 个变量。

Step 6: 必要时的加速程序

根据应用差分进化法的经验求解时, 并非下一代目标函数优于上一代, 有时要经过数代之后才会有较优解, 因而延迟时间较长, 为此引入加速程序, 当突变与交配运算后, 若目标函数没有进一步改善时采用。加速程序为:

$$\hat{X}_b^{G+1} = \begin{cases} X_b^{G+1}, & \text{if } M(X_b^{G+1}) < M(X_b^G) \\ X_b^{G+1} - \alpha \Delta M(X_b^{G+1}), & \text{其它情况} \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\hat{X}_b^{G+1}$ 为目前最优解。若目标函数值没有进一步改善时, 暂时跳出差分进化法, 而进入传统最速梯度法求解, 因而可以大大降低求解时间, $\Delta M(X_b^{G+1})$ 为目标函数的梯度, $\alpha \in [0, 1]$ 为一参数。

2 算法仿真

以中国旅行商问题, 利用几何算法求得的解为 15 492 km, 人机结合的优质穷举法求得的解为

15 449 km^[6-7], 用蚁群优化、免疫遗传等算法求解为 15 404 km^[8-10], 对比文献 4 和本文算法求解上述中国旅行商问题, 图 1 是本文算法的最优解(旅程 15 404 km), 对应的最优旅行商路线为: 北京(401) 呼和浩特(341) 太原(171) 石家庄(376) 郑州(437) 西安(521) 银川(346) 兰州(192) 西宁(1 440) 乌鲁木齐(1 592) 拉萨(1 257) 成都(641) 昆明(434) 贵阳(449) 南宁(373) 海口(455) 广州(563) 长沙(299) 武汉(270) 南昌(441) 福州(252) 台北(596) 杭州(160) 上海(269) 南京(141) 合肥(537) 济南(271) 天津(605) 沈阳(281) 长春(232) 哈尔滨(1 061) 北京。文献 4 的混合算法和本文算法的收敛曲线如图 2 所示。

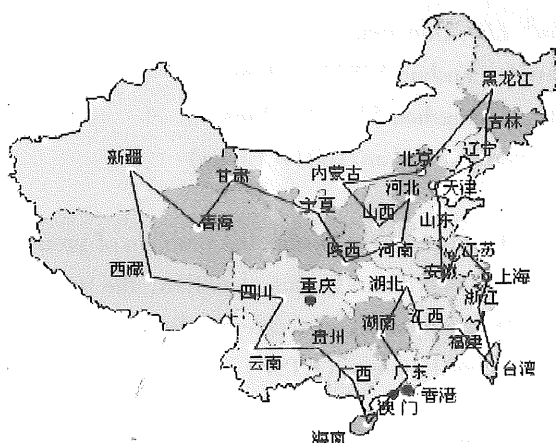


图 1 混合算法求解的最优线路

Fig. 1 The best route of CTSP sloving with this hybrid alogrithm

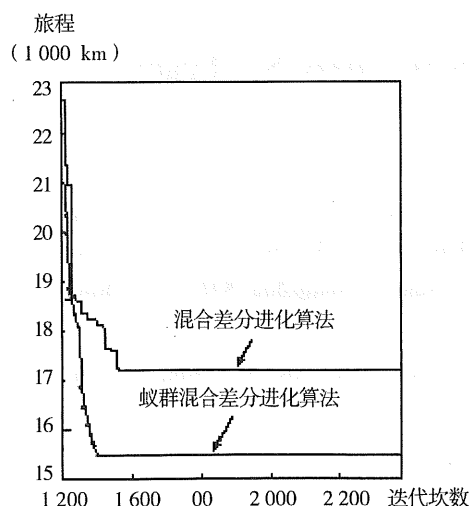


图 2 两对比算法收敛曲线

Fig. 2 Convergence curves of two comparison algorithm for solving CTSP

3 结 论

在混合差分进化算法中, 选择适当的突变算法可以加速全局解的搜索, 然而突变算法的选择与待求解问题的解空间有密不可分的关系, 本文通过蚁群算法在问题求解过程中选择适当的突变算法以加速全局解。通过中国旅行商问题的求解表明本文提出的蚁群混合差分进化算法, 能快速收敛到最优解。

参考文献:

- [1] 罗中良, 易明珠, 唐华, 等. 开 Y-开 Δ 变压器相序调整的蚁群优化方法研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 45(2): 33-37.
LUO Zhongliang, YI Mingzhu, TANG Hua, et al. ACS based algorithm and its convergence for open Y-open D transformer's phase sequence adjustment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 45(2): 33-37.
- [2] 冯远静, 冯祖仁, 彭勤科. 智能混合优化策略及其在流水作业调度中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(8): 779-782.
FENG Yuanjing, FENG Zuren, PENG Qinke. Intelligent hybrid optimization strategy and its application to flow-shop scheduling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(8): 779-782.
- [3] 罗中良, 易明珠, 周有平, 等. 基于智能混合算法的经济调度问题及其参数调整方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 46(1): 33-37.
LUO Zhongliang, YU Mingzhu, ZHOU Youping, et al. Hybrid AC and SQP algorithm and its parameters adjustment for economic dispatch problem with valve-point effect[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 46(1): 33-37.
- [4] CHIOU J P, WANG F S, A Hybrid method of differential evolution with application to optimal control problems of a bioprocess system[J]. Proc 1998 IEEE on Evolutionary Computation Conf, 1998, 1: 627-632.
- [5] 丁建立, 陈增强, 袁著祉. 遗传算法与蚂蚁算法融合的马尔可夫收敛性分析[J]. 自动化学报, 2004, 30(4): 629-634.
DING Jianli, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. On the markov convergence analysis for the combination of genetic algorithm and ant algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(4): 629-634.
- [6] 杨忠, 鲍明, 张阿舟. 求解中国旅行商问题的新结果[J]. 数据采集与处理, 1993, 8(3): 177-184.
YANG Zhong, BAO Ming, ZHANG Azhou. A new result of chinese-travelling salesman problem [J]. Journal of

- Data Acquisition & Processing, 1993, 8(3): 177 - 184.
- [7] 伍文城, 肖建. 基于蚁群算法的中国旅行商问题满意解[J]. 计算机与现代化, 2002(8): 6 - 11.
WU Wencheng, XIAO Jian. Satisfactory solution of chinese travelling salesman problem based on ant colony algorithm[J]. Computer and Modernization, 2002(8): 6 - 11.
- [8] 韩建枫, 李敏强, 寇纪淞. 一种求解 TSP 问题的新型遗传编码及应用[J]. 天津大学学报, 2003, 36(2): 225 - 229.
HAN Jianfeng, LI Minqiang, KOU Jisong. New GA encoding scheme and application for solving TSP[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(2): 225 - 229.
- [9] 燕忠, 袁春伟. 用蚁群优化算法求解中国旅行商问题[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(3): 122 - 126.
YAN Zhong, YUAN Chunwei. Applying ant colony optimizations to chinese traveling salesman problem[J]. Journal of Circuits and Systems, 2004, 9(3): 122 - 126.
- [10] 于喜洋, 王小平. 免疫遗传算法在 TSP 求解中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(5): 21 - 23.
YU Xiyang, Wang Xiaoping. Application of immune genetic algorithm to TSP [J]. Computer Applications and Software, 2006, 23(5): 21 - 23.

On Ant Colony Hybrid Differential Evolution for Optimization Problems

LUO Zhong-liang¹, YU Ming-zhu², LIU Xiao-yong³

- (1. Automation Department, Foshan University, Foshan 528000, China;
2. Lingnan College, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Automation Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An ant colony hybrid differential evolution algorithm is developed to overcome the problem of premature convergence and shorten the convergence time of differential evolution algorithm. In this algorithm, the ant colony can provide the proper mutation operator in hybrid differential evolution, then it can accelerate the search of global solution. The optimization simulation results for china traveling salesman Problem (CTSP) show that the proposed method is efficient for solving global optimization problems.

Key words: ant colony hybrid differential evolution; optimization; CTSP

(上接第 25 页)

Study on Cardinal Fuzzy Quantifiers in Fuzzy Set Frame

GAO Dong-ping¹, GUO Jia-hong², LI Yong-jin³

- (1. School of Computer sciences and technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. School of Philosophy and Sociology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. The Institute of Logic and Cognition, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Cardinal fuzzy quantifiers are applied broadly in daily communications and reasoning. In this paper, the semantic analysis of cardinal fuzzy quantifiers was extended to fuzzy set. A formal semantics of cardinal fuzzy quantifiers in fuzzy set frame was provided and their properties were discussed.

Key words: fuzzy quantifiers; cardinal fuzzy quantifiers; fuzzy set