

基于改进 SCE 算法的 Job Shop 调度方法研究

赵付青^{1,2}, 张建林², 王俊彪¹, Jonrinaldi Jonrinaldi³

(1.西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)
(2.兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050)
(3.University of Exeter 数学、计算机与工程学院, Exeter, 英国)

摘要: Job Shop Problem (JSP) 是生产调度领域中的一类复杂的调度问题, 高效 JSP 求解算法的研究与设计是 JSP, 乃至整个生产调度领域的关键研究内容。引入新的智能仿生算法 Shuffled Complex Evolution (SCE), 以求解工件的最小最大完成时间为目标, 通过序列映射方式将连续定义域空间中的变量映射到离散的组合优化问题空间中, 同时采用基于工序编码的方式进行编码, 最后使用顺序插入解码机制对其解码。并针对基本 SCE 算法在求解优化问题时求解质量差和求解速度慢等缺点, 对算法中个体的进化过程进行改进, 使个体进化的方向沿着当前群体最优解的方向进行。最后将此算法用于求解典型的 Job Shop 调度实例, 结果表明, 改进 SCE 算法在解决 Job Shop 调度问题上是有有效的。

关键词: Job Shop 调度问题; Shuffled Complex Evolution 算法; 工序编码; 生产调度
中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2758(2014)01-0152-06

调度是影响和制约制造行业中生产效率的一个重要因素, 有效的调度策略能够减少完成任务的时间, 提高生产效率, 从而给企业和社会带来较高的经济效益。Job Shop 调度是一种典型的生产调度问题, 且已有研究已经证明其属于典型 NP-hard 问题^[1], 对 Job Shop 调度问题的研究也成为企业和研究者的热门课题。

近年来, 基于生物进化思想的智能优化方法被大量用于求解各种 Job Shop 调度问题, 并取得了较好的效果, 主要有模拟退火^[2]、遗传算法^[3]、蛙跳算法^[4]和粒子群优化算法^[5]。但对于 Job Shop 调度问题而言, 其存在较多的局部最优解, 很多智能算法在求解时容易陷入局部最优值, 往往产生不了预期的效果。SCE 算法是一种较新的智能群体算法, 该算法结合了混洗方法, 使得空间中每个个体的信息能够得到全局共享, 因此具有较强的全局解搜索能力, 避免陷入局部最优。目前该算法已被广泛应用于各个领域^[6-7]。

Job Shop 调度问题是一类典型的组合优化问

题, 目前, SCE 算法用于求解生产调度方面的研究很少, 所以本文提出将 SCE 算法用于 Job Shop 调度问题中, 对工件的加工完成时间进行求解。由于基本 SCE 算法在获取最优解时存在求解速度慢和求解质量差等缺点, 本文对基本的 SCE 算法进行改进, 通过改进基本 SCE 算法中个体的进化策略, 使得每一代个体的进化方向趋向于当前群体中的最优个体, 从而提高了求解速度以及最终解的质量。

1 SCE 算法

1.1 SCE 算法描述

SCE 算法是 Duan 等人^[8]在解决概念性降雨模型参数评估时提出来的, 其结合了单纯形算法、生物进化和复合混洗等方法的优点, 使得 SCE 算法不仅具有有效性和健壮性, 同时也具有高效性和灵活性。确定性的搜索策略能够更有效地引导最优解的收敛。已有研究表明, SCE 算法在求解非线性复杂、非凸等高维问题时表现出更好的优化效果。

收稿日期: 2013-03-49 基金项目: 国家自然科学基金(51365030)、中国博士后科学基金特别资助(2013T60889)、中国博士后科学基金(2012M521802)及甘肃省高校基本业务费(1114ZTC139)资助

作者简介: 赵付青(1977—), 西北工业大学博士后, 兰州理工大学教授, 主要从事复杂系统及计算智能的研究。

SCE 算法的原理是通过单纯形法在待解问题的合法空间中的一个局部区域产生一个新的解, 然后通过复合体混洗的方法使得该新解的信息在整个合法空间中得到共享, 从而避免产生局部最优解的概率。

1.2 SCE 算法的步骤

Step 1 确定复合体的个数 p 和每个复合体中的个数 m 。计算初始样本的大小 $s = p * m$ 。

Step 2 在可行域中随意生成 s 个样本点 $x\{x_1, x_2, \dots, x_s\}$ 并计算每个点 x_i 的函数值 f_i 。

Step 3 将生成的 s 个样本点按照函数值升序进行排列, 并将它们存储在数组 D 中, 即 $D = \{(x_i, f_i) \mid i = 1, 2, \dots, s\}$, 其中 $i = 1$ 表示最小的函数值。

Step 4 将数组 D 中样本点划分为 p 个包含同一样本点的群体, 每个群体称为复合体, 记为 A_1, A_2, \dots, A_p , 每个包含 m 个点, 其中 $A_k = [(x_j^k, f_j^k) \mid x_j^k = x_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)}, j = 1, \dots, m]$ 。

Step 5 对每个复合体 A_k 分别使用复合体进化算法(CCE)进行计算。

Step 6 将新产生的每个复合体按照函数值升序重新进行排序, 并将排序后的结果存储到数组 D 中, 即 $D = \{A_k \mid k = 1, \dots, p\}$ 。

Step 7 如果结果满足收敛条件, 则停止, 否则返回 Step 4。

1.3 复合进化算法(CCE)

Step 1 给定 q, α, β 的初始值。其中 q 表示子复合体的个数, α 表示子代迭代的次数, β 表示每个复合体进化的次数, 各参数值须满足约束条件 $2 \leq q \leq m, \alpha \geq 1, \beta \geq 1$ 。

Step 2 给每个复合体 A_k 按照三角形概率分布赋予权重值 $p_i = \{2(m+1-i)/m(m+1)\}$, 对 $i = 1, \dots, m$, 点 x_1^k 的概率值最大, 为 $p_1 = 2/(m+1)$ 。点 x_m^k 的概率值最小, 为 $p_m = 2/\{m(m+1)\}$ 。

Step 3 利用三角形概率分布从复合体 A_k 中随机选取 q 个点 u_1, \dots, u_q 构成子复合体。然后将 q 个顶点和它们的相对位置存储在数组 $B = \{(u_i, p_i) \mid i = 1, \dots, q\}$ 和 L 中, 其中 v_i 是点 u_i 的函数值。

Step 4 对 q 个点构成的子复合体进化:

1) 对数组 B 和 L 进行排序, 使得 q 个顶点按照函数值升序排列。并通过公式 $g = [1/(q -$

$1)] \sum_{j=1}^{q-1} u_j$ 计算父代顶点的中心位置。

2) 计算新顶点 $r = 2g - u_q$, 其中 r 为顶点 U_q 对

中心位置 g 的对称映射点, 即为 U_q 对应的反射点。

3) 若顶点 r 在可行域解空间 H 中, 计算函数值 f_r , 并转到 4); 否则计算含有 A_k 的最小超正方体 $H \in \mathbf{R}^n$ 在该正方体中随机地产生一个点 z , 计算其函数值 f_z , 使得 $r = z$, 并设 $f_r = f_z$ 。

4) 若 $f_r < f_q$, 用点 r 代替 U_q , 转到 6); 否则构造一个新点 c , 使 $c = 0.5(q + u_q)$, c 为点 U_q 对应的收缩点。然后计算 f_c 。

5) 若 $f_c < f_q$, 用点 c 代替 U_q , 转到 6); 否则在 H 中随机产生一点 z , 计算 f_z , 用点 z 代替 U_q 。

6) 重复 1) ~ 5) α 次。

Step 5 用产生的子代替换掉数组 B 中对应的父代。重新按照函数值升序进行排列。

Step 6 重复执行 Step 2 到 Step 6 β 次。

2 Job Shop 调度问题

2.1 问题描述及数学模型

Job Shop 调度问题可描述为: 在 m 台机器上加工 n 个工件, 每个工件都有自己的加工工序且在各个机器上的加工时间已知。其目标就是确定每台机器上各工件的加工顺序, 从而使得某种特定性能指标达到最优。以最小化工件的最大完成时间为目标的 Job Shop 调度问题的数学模型如(1)式所示:

$$\min \max_{k=1}^m \left\{ \max_{i=1}^n c_{ik} \right\} \tag{1}$$

$$\text{s.t. } c_{ik} - p_{ik} + M(1 - a_{ihk}) \geq c_{ih}, \tag{2}$$

$$i = 1, 2, \dots, n, h, k = 1, 2, \dots, m$$

$$c_{jk} - c_{ik} + M(1 - x_{ijk}) \geq p_{jk}, \tag{3}$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m$$

$$c_{ik} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1, i, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m \tag{4}$$

$$a_{ihk} = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, n, h, k = 1, 2, \dots, m \tag{5}$$

式中: c_{ik} 表示第 i 个工件在第 k 台机器上的完成时间, p_{ik} 表示工件 i 在机器 k 上的加工时间, M 表示一个足够大的正数, a_{ihk} 表示机器 h 先于机器 k 加工工件 i , x_{ijk} 表示工件 i 先于工件 j 在机器 k 上加工。

3 基于改进 SCE 算法的 Job Shop 调度问题

3.1 编码机制

本文采用基于工序编码的方式进行编码。对于一个 $m \times n$ 的 Job Shop 调度, 编码后的序列由工件的编号组成, 长度为 $m \times n$, 同一工件的所有工序都采用其编号表示, 并根据它们在序列中出现的顺序确定它们的加工顺序。例如序列 [2 1 1 1 3 2 2 3 3], 其中 1、2、3 分别代表工件 J1、J2、J3 的编号, 在序列中的顺序代表工件依次进行的加工操作。

为了使 SCE 算法能够合理地求解组合优化问题, 本文采用序列映射方式将连续解空间的变量映射到离散空间中。以 3×3 的 Job Shop 调度为例, 具体过程如图 1 所示, 首先在 $[0, 1]$ 区间随机产生一长度为 3×3 的实数序列 1, 然后按从大到小的顺序进行排序, 并依次记录其所在的相应位置, 便可产生序列 2。将序列 2 中的每个数字除以待解问题中的设备数目 m , 可产生序列 3, 此序列即为 SCE 算法在求解 Job Shop 调度问题时的编码序列, 其代表待解问题的一个候选解。

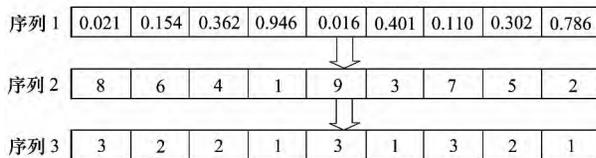


图 1 实数空间到离散空间的映射

3.2 解码机制

采用顺序插入解码机制。其过程为: ①将已有序列转化成有序操作表; ②利用产生的操作表以及对应的工艺约束对各操作以最早允许加工时间逐一进行加工; ③产生对应的调度方案。

表 1 工件的加工时间

工件	加工时间			加工机器		
	M_1	M_2	M_3	1	2	3
J_1	3	3	2	M_1	M_2	M_3
J_2	1	5	3	M_1	M_3	M_2
J_3	3	2	3	M_2	M_1	M_3

对于一个 3×3 的 Job Shop 调度, 其加工时间和顺序如表 1。假设有一序列 [2 1 1 1 2 2 3 3 3], 由解码机制可产生有序操作表 [$O_{211}, O_{111}, O_{122}, O_{133}, O_{223}, O_{232}, O_{312}, O_{321}, O_{333}$] 其中 O_{ijk} 表示工件 i 的第 j 次操作在机器 k 上。对照机器和工件的工艺约束条件, 可产生相应的调度如图 2 所示。

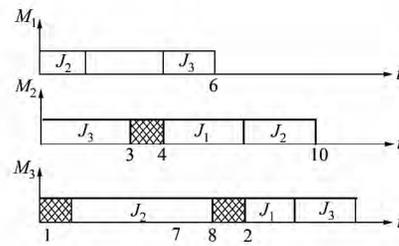


图 2 序列 [2 1 1 1 3 2 2 3 3] 的调度图

3.3 适应度函数

根据 2.1 建立的 Job Shop 调度数学模型, 以最小化工件的最大完成时间为目标, 确定目标函数为 fitness, 如公式 (4) 所示: 其中 C 为工件的完成时间。

$$fitness = \min \{ \max C \} \quad (4)$$

3.4 基于改进 SCE 算法的 Job Shop 调度

基本 SCE 算法在求解比较复杂的问题时, 存在求解速度慢以及求解质量差等缺点。从基本 SCE 算法的求解过程看出, 其新一代个体解的产生是通过复合体中全部个体的中心点进行反射和收缩的, 这种进化方式并没有很好地沿着当前复合体中最优个体的方向进行。因此本文对基本 SCE 算法进行改进, 通过改变个体的进化策略, 使下一代个体的进化方向更加趋向于当前群体中的最优个体。基本 SCE 算法和改进 SCE 算法中个体的进化方式分别如公式 (5) ~ (8) 所示。

基本 SCE 算法:

反射点:

$$X_{ref} = 2 * C_e - X_w \quad (5)$$

收缩点:

$$X_{con} = \frac{(X_w + C_e)}{2} \quad (6)$$

改进 SCE 算法:

反射点:

$$S_t = t * C_e + (1 - t) * X_b \quad 0 < t < 1$$

$$X_{ref} = 2 * S_t - X_w \quad (7)$$

收缩点:

$$S_t = t * C_e + (1 - t) * X_b \quad 0 < t < 1$$

$$X_{con} = \frac{2}{3} * S_t + \frac{1}{3} * X_w \quad (8)$$

式中: X_w 为复合体中适应度最低的个体; C_e 为复合体中个体的中心位置; X_b 为复合体中适应度最高的个体; X_{ref} 为产生的反射点; X_{con} 为收缩点。

可以看出,改进的 SCE 算法中,中心点的产生策略更多地借鉴了最优个体 X_b 的信息,使得产生的新解更趋近于 X_b 的区域。

3.5 算法复杂度分析

假设待解调度问题中工件数目为 N , 机器数目为 M 。结合改进 SCE 算法的流程可得,该算法主要由 4 个部分组成: ① 计算目标函数值,其复杂度为 $O(pmMN)$; ② 对整个群体中个体排序,最坏情况下其复杂度为 $O(pm * pm)$; ③ 为复合体进化部分,即 CCE 算法,主要包括 2 个部分: a) 对 q 个个体排序,最坏情况下其复杂度为 $O(q^2)$; b) 对 m 个个体进行排序,最坏情况下其复杂度为 $O(m^2)$ 。在 CCE 迭代 β 次的情况下,其复杂度为 $O(\beta) * (O(q^2) + O(m^2))$ 约为 $O(m^2)$; ④ 为进化后的整个个体混洗排序,最坏情况下其复杂度为 $O(pm * pm)$ 。

利用文献 [7] 中提出的 SCE 算法参数关系式,在整个 SCE 算法迭代 k 次的情况下,用于求解 Job Shop 调度问题的改进 SCE 算法复杂度为:

$$O(p m q \alpha \beta M N) = O(k) * (O(pmMN) + O(pm * pm) + O(m^2) + O(pm * pm)) = O(p(2MN + 1)MN) + O(p^2M^2N^2) + O((2MN + 1)^2) + O(p^2(2MN + 1)^2) \approx O(M^2N^2)$$

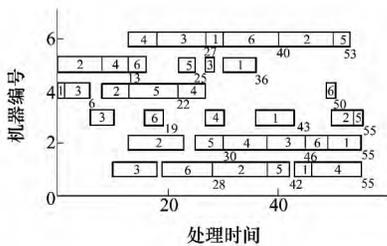


图 3 FT 06 问题的一个最优解的甘特图

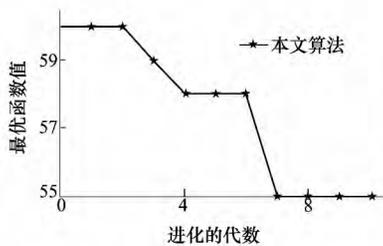


图 4 FT06 的求解过程

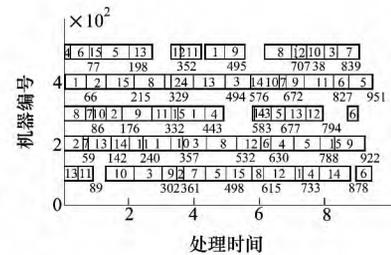


图 5 LA 09 问题的一个最优解的甘特图

4 实验仿真与结果分析

为验证本文算法的有效性,选取了 11 个经典调度问题进行求解。算法采用 MATLAB 编写,运行环境为 Windows XP Professional,1.73 GHz CPU,1G 的内存,每次实验运行 20 次。算法终止的条件是:计算目标函数值的最大次数 $maxn > 10\ 000$ 时。实验结果如表 2 所示:

表 2 改进 SCE 算法的计算结果

问题	规模	最优解	改进 SCE 算法		
			最终解	参数(p)	迭代次数
FT06	6×6	55	55	9	10
LA01	10×5	666	666	12	10
LA05	10×5	593	593	2	11
LA06	15×5	926	926	5	11
LA08	15×5	863	863	13	5
LA09	15×5	951	951	3	14
LA10	15×5	958	958	2	12
LA11	20×5	1 222	1 222	9	5
LA12	20×5	1 039	1 039	2	16
LA13	20×5	1 150	1 150	3	11
LA14	20×5	1 292	1 292	2	13

可以看出,改进的 SCE 算法在该 11 个经典调度问题上都取得了很好的效果,在参数一定的情况下都能够获得理论最优解。

图 3~图 8 分别是 FT06、LA09 和 LA12 的甘特图和收敛曲线图,可以看出,改进的 SCE 算法在一定的迭代次数下都可以有效地收敛到最优值。

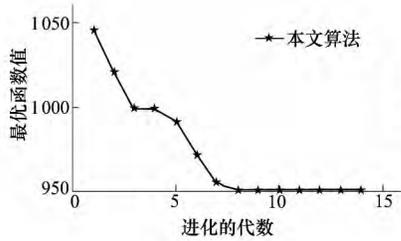


图 6 LA09 的求解过程

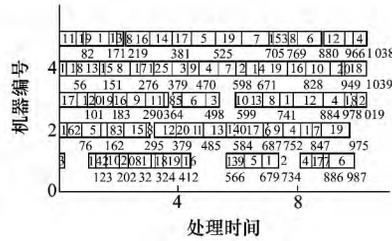


图 7 LA 12 问题的一个最优解的甘特图

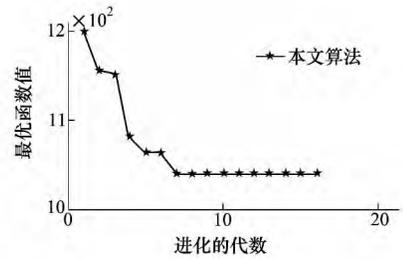


图 8 LA12 的求解过程

表 3 改进 SCE 算法和基本 SCE 算法的比较

问题	规模	理论最优解	基本 SCE 算法		改进 SCE 算法	
			最优解	时间/s	最优解	时间/s
FT06	6×6	55	57	4.209 962	55	5.253 687
LA01	10×5	666	666	5.703 717	666	6.948 297
LA05	10×5	593	593	2.911 768	593	1.926 514
LA06	15×5	926	939	7.879 740	926	9.974 258
LA08	15×5	863	892	8.091 363	863	10.340 299
LA09	15×5	951	956	6.767 137	951	8.024 657
LA10	15×5	958	958	7.610 644	958	4.548 690
LA11	20×5	1 222	1258	10.509 073	1 222	13.254 694
LA12	20×5	1 039	1074	10.707 953	1 039	11.151 807
LA13	20×5	1 150	1211	10.637 841	1 150	11.209 403
LA14	20×5	1 292	1292	10.683 133	1 292	8.884 434

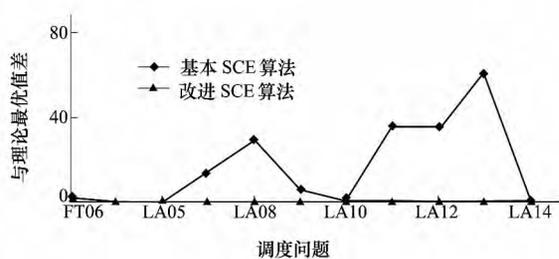


图 9 改进 SCE 算法和基本 SCE 算法求解性能比较

表 3 对基本 SCE 算法和改进的 SCE 算法在求解经典调度问题时的情况进行了对比,可以看出:基本 SCE 算法只有在求解 LA01、LA05、LA10 和 LA14 问题时获得了理论最优解,图 9 为 2 个算法所求最优解分别与理论最优解之差的对比图,从表 3 中可以得出,在两者都求出最优解的情况下,除了在

LA01 问题中改进 SCE 算法所用的时间稍大于基本的 SCE 算法之外,另外 3 个问题中改进的 SCE 算法所用时间都要少于基本 SCE 算法。可以看出,改进的 SCE 在求解 Job Shop 调度问题上相比基本 SCE 算法更加有效。

5 结 论

本文以求解 Job Shop 调度中工件的最小完成时间为目标,研究了改进的 SCE 算法在 Job Shop 调度中的应用。同时也对改进 SCE 算法和基本 SCE 算法在 Job Shop 调度问题中的性能进行了对比分析。结果表明,改进的 SCE 算法在求解 Job Shop 调度问题上是有用的,从而为解决该类问题提供了一种新的途径。

参考文献:

- [1] Cook S A. The Complexity of Theorem-Proving Procedures [C] // Proc of the 3rd Annual ACM Symp on Theory of Computing. New York: ACM Press, 1971, 151-158
- [2] Atabak E, Maghsud S, Seyda T, Afshin E. A Simulated Annealing Algorithm for the Job Shop Cell Scheduling Problem with Intercellular Moves and Reentrant Parts [J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 61(1): 171-178
- [3] 王凌. 车间调度及其遗传算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
Wang Ling. Shop Scheduling with Genetic Algorithms [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (in Chinese)
- [4] Wannaporn T, Arit T. A Combination of Shuffled Frog Leaping and Fuzzy Logic for Flexible Job Shop Scheduling Problems [J]. Procedia Computer Science, 2011, 6: 69-75
- [5] Gary G Y, Brian I. Job Shop Scheduling Optimization through Multiple Independent Particle Swarms [J]. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2009, 2(1): 5-33
- [6] Samer A, Barakat, Salah Altoubat. Application of Evolutionary Global Optimization Techniques in the Design of RC Water Tanks [J]. Engineering Structures, 2009, 31: 332-344
- [7] Charles N M, Donath M. Shuffled Complex Evolution Algorithms in Infrastructure Works Programming [J]. Journal of Computing in Civil Engineering. 2004, 18(3): 257-266
- [8] Duan Q Y, Gupta V K, Sorooshian S. Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization [J]. Journal of Optimization Theory and Application, 1993, 76(3): 501-521

An Improved and Effective Shuffled Complex Evolution Algorithm for Job Shop Scheduling Problems

Zhao Fuqing^{1, 2}, Zhang Jianlin¹, Wang Junbiao², Jonrinaldi Jonrinaldi³

(1. Department of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
2. School of Computer and Communication Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China
3. School of Engineering, Computer Science and Mathematics, University of Exeter, EX4 4QF, United Kingdom)

Abstract: The job shop problem is an important content of scheduling in the manufacturing industry. The design of the high efficiency algorithm for JSP is the key to the production scheduling in manufacturing factory. A new intelligent algorithm, named Shuffled Complex Evolution (SCE) algorithm, is proposed in this paper with the aim of getting the minimized makespan. The sequence mapping mechanism is used to change the variables in the continuous domain to discrete variables in the combinational optimization problem; the sequence, which is based on job permutation, is adopted for encoding mechanism and sequence insertion mechanism for decoding. Considering that the basic SCE algorithm has the drawbacks of poor solution and lower rate of convergence, we use a new strategy to change the individual's evolution in the basic SCE algorithm. The strategy makes the new individual closer to best individual in the current population. The improved SCE algorithm was used to solve the typical job shop scheduling problems and the results and their analysis show preliminarily that the improved algorithm is effective for such problems.

Key words: Combinatorial optimization, Computational complexity, decoding, encoding (symbols), evolutionary algorithms, functions, mathematical models, mathematical transformations, MATLAB, scheduling; job permutation, job shop scheduling, sequence mapping mechanism, shuffled complex evolution (SCE)