

文章编号: 2095-2163(2023)05-0171-04

中图分类号: TP301

文献标志码: A

混合禁忌搜索的车间调度遗传算法研究

管 赛, 熊禾根

(武汉科技大学 机械自动化学院, 武汉 430081)

摘要: 针对以最小化最大完工时间为目标的作业车间调度问题, 提出一种混合禁忌搜索的遗传算法。禁忌搜索是一种能有效跳出局部最优解的元启发式算法, 在每次迭代过程中通过搜索当前解的邻域来获得一个新解, 通过评价新解的优越性来优化求解结果; 加入多种交叉方式随机选择来扩大种群多样性; 同时加入局部邻域搜索来改善解的质量, 加快算法收敛速度。将提出的改进算法用于求解若干基准问题, 算法具有一定的改良性, 能优化求解结果。

关键词: 作业车间调度; 遗传算法; 禁忌搜索; 局部邻域搜索

A hybrid taboo search genetic algorithm for shop floor scheduling

GUAN Sai, XIONG Hegen

(School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

【Abstract】 A genetic algorithm with hybrid taboo search is proposed for a job shop scheduling problem to minimize the maximum completion time. Taboo search is a meta-heuristic algorithm that can effectively jump out of the local optimal solution, and obtains a new solution by searching the neighborhood of the current solution during each iteration, and optimizes the solution result by evaluating the superiority of the new solution. A variety of crossover methods are added for random selection to expand the population diversity. Meanwhile, local neighborhood search is added to improve the quality of the solution and speed up the convergence of the algorithm. The proposed improved algorithm is used to solve several benchmark problems, and the algorithm has some improvements to optimize the solution results.

【Key words】 job shop scheduling; genetic algorithm; taboo search; local neighborhood search

0 引言

作业车间调度问题 (Job Shop Scheduling Problem, JSP) 是典型的 NP-hard 问题, 是目前研究最为广泛的一类调度问题, 其存在于制造、物流、汽车等众多领域的实际生产中, 故研究内容具有重要的理论意义和工程价值。

调度问题的求解方法可分为两类: 精确求解方法和近似求解方法。精确求解方法包括解析法、穷举法、分支定界法等; 近似求解方法包括基于规则的构造性方法、邻域搜索方法以及人工智能方法等。其中邻域搜索中的遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 结构简单、易于实现, 且能获得较好的求解结果, 所以被作为应用最广的智能优化算法, 广泛应用于 JSP 的求解之中。但标准遗传算法存在早熟收敛, 解的稳定性差等缺点。对此何斌等人^[1] 提出一

种改进遗传算法来求解作业车间调度问题, 通过采取新的个体适应度计算方法, 多种交叉操作随机选择, 自适应交叉变异参数调整策略, 来提升遗传算法的性能。张超勇等人^[2] 提出一种局部邻域搜索的遗传算法求解 JSP。该算法采用新的 POX 交叉算子, 基于邻域搜索的变异算子, 以及基于关键路径邻域的局部搜索, 以改善解的质量。郑先鹏等人^[3] 提出的改进遗传算法采用精英保留策略, 并结合改进自适应算子对问题进行求解, 提升了求解 JSP 的能力。王玉芳等人^[4] 提出了一种改进混合模拟退火算法, 该算法采用自适应策略对概率进行动态调整, 选择一种基于工序编码新的 IPOX 交叉算子, 同时加入有记忆功能的模拟退火算法, 优化了 JSP 的求解结果。禁忌搜索是一种全局寻优算法, 搜索过程中能跳出局部最优解, 同时具有良好的寻求优良解的能力, 能有效提升算法的运算效率, 实现高效搜

作者简介: 管 赛 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 作业车间调度及其智能算法; 熊禾根 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 作业车间调度及其智能算法。

通讯作者: 熊禾根 Email: xionghegen@126.com

收稿日期: 2022-05-31

索^[5]。标准遗传算法虽然具有较强的全局搜索能力,但局部搜索能力较弱,在迭代过程中易早熟且陷入局部最优解。因此,本文提出一种混合禁忌搜索的改进遗传算法(Improved Tabu Search Genetic Algorithm, ITSGA),在原有的标准遗传算法基础上加入禁忌搜索算法,并改进算法流程,加入多种交叉方式的随机选择来提高种群的多样性以及产生优质解,同时加入局部邻域搜索对解进行微调,改善解的质量,达到寻找全局最优解的目的。

1 JSP 问题描述

JSP 可描述为:用 m 台机器加工 n 个工件,每个工件 i 都包含一系列工序,给定每道工序 O_{ij} 的加工机器及加工时间 p_{ij} 。约束条件为:

- (1) 同一时刻一台机器只能加工一道工序;
- (2) 工件不能在同一台机器上多次加工;
- (3) 不考虑工件加工优先权且工序加工过程不能中断。

建立 JSP 数学模型如下:

$$F = \min \{ \max \{ C_i \} \}$$

$$c_{ik} - p_{ik} + M(1 - a_{ikh}) \geq c_{ih} \quad (1)$$

$$c_{lk} - c_{ik} + M(1 - x_{ilk}) \geq p_{lk} \quad (2)$$

$$c_{ik} \geq 0 \quad (3)$$

$$a_{ikh} = \begin{cases} 1 & \text{若机器 } h \text{ 先于机器 } k \text{ 加工工件 } i \\ 0 & \text{非上述情况} \end{cases} \quad (4)$$

$$x_{ilk} = \begin{cases} 1 & \text{若工件 } i \text{ 先于工件 } l \text{ 在机器 } k \text{ 上加工} \\ 0 & \text{非上述情况} \end{cases} \quad (5)$$

其中,目标函数 F 为最小化最大完工时间; C_i 为工件 i 的最大完工时间;式(1)~式(3)表示工艺约束条件决定的工件上各工序先后操作顺序,以及加工各工件的机器先后顺序; c_{ik} 、 p_{ik} 分别为工件 i 在机器 k 上的完工时间和加工时间; M 为一足够大正数;式(4)、式(5)中定义决策变量 a_{ikh} 和 x_{ilk} ,分别确定同一工件在不同机器上的加工先后顺序和同一机器上不同工序的加工先后顺序,

2 ITSGA

ITSGA 算法采用基于工序编码的编码方式来表示个体,具有在进行染色体置换操作后总能得到可行解的优点。种群初始化方式为随机生成初始种群,以最小化最大完工时间为评价指标,采用轮盘赌选择算子来进行个体选择,同时为了保留优秀个体,加快种群收敛速度,加入精英保留策略。在每次选

择时,将最优基因直接复制保留下来,以便个体的优良性能遗传到子代中。

个体适应度函数定义为

$$f(i) = MS_{\max} - MS(g) \quad (6)$$

其中, $MS(g)$ 表示个体 g 对应的最大完工时间, MS_{\max} 为种群中的最大值。

2.1 随机选择多种交叉方式

交叉操作是遗传算法的核心操作,直接决定迭代过程中解的优劣情况和算法的全局搜索能力。本文提出迭代过程中多种交叉方式随机选择,以增加求解结果的多样性。以下列出一些在求解 JSP 时用到的交叉操作,随机选择的方式为等概率随机选择。

POX 交叉^[6]示意图如图 1 所示,随机划分工件集 $\{1, 2, 3, \dots, n\}$ 为两个非空子集 J_1, J_2 ; 将父代 P_1, P_2 中包含 J_1 的工件复制到子代 C_1, C_2 中,保留原位置;复制父代 P_1 中包含 J_2 的工件到子代 C_2 ,复制父代 P_2 中包含 J_2 的工件到子代 C_1 ,保留其顺序。图 1 说明了 POX 算子交叉过程。

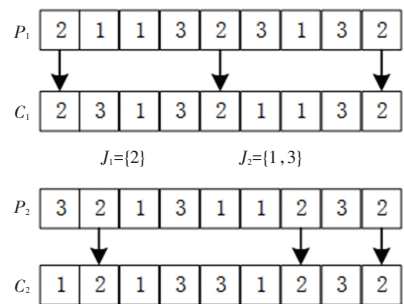


图 1 POX 交叉

Fig. 1 POX crossover

2.1.1 OX 交叉

OX 交叉操作的示意如图 2 所示。父代中随机生成两个基因座(假设 4 和 6),以生成子代 C_1 为例,将父代 P_1 基因片段 323 继承给子代 C_1 ,以父代 P_2 第 7 个基因座作为第一个基因,从右往左生成临时基因编码 $\{232321311\}$,再根据对应位置将基因片段在临时基因编码中一一剔除 $\{232321311\} \rightarrow \{221311\}$,最后再将剔除后剩余的基因片段放入子代 C_1 中。同理,子代 C_2 的生成过程与上述类似。

2.1.2 PMX 交叉

PMX 交叉操作的示意如图 3 所示。随机选择两个基因座(假设 4 和 7),得到映射关系 3(工件 3 第一道工序) \leftrightarrow 1(工件 1 第三道工序)、1(工件 1 第三道工序) \leftrightarrow 1(工件 1 第二道工序),将父代 P_1 的基因片段 3231 继承给子代 C_1 并保留原位置,再根据映射关系替换父代 P_2 中非选中基因片段 $\{321xxxx32\} \rightarrow \{121xxxx32\}$,将替换后的片段放入

子代 C_1 中,生成子代 C_1 。同理子代 C_2 的生成过程与上述类似。

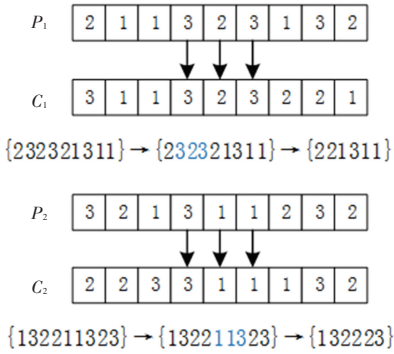


图2 OX交叉

Fig. 2 OX crossover

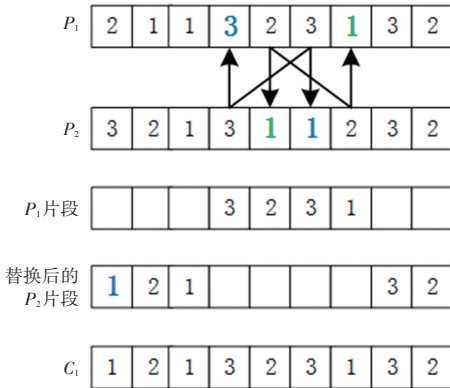


图3 PMX交叉

Fig. 3 PMX crossover

2.2 局部邻域搜索

关键路径的变化是改变最大完工时间的关键,本文采取基于关键块的快速邻域搜索方式^[7-9],其流程如下:

步骤1 确定当前解的关键路径和全部关键块。

步骤2 设计邻域构造为交换关键块中的两个工序。3种交换方式为:

- (1) 选择关键块中的首工序与块中任一工序进行交换;
- (2) 选择关键块中任意两个内部工序进行交换;
- (3) 选择关键块中的尾工序与块中任一工序进行交换。

步骤3 通过随机选择来确定关键块中工序的交换方式。

步骤4 将经过局部邻域搜索操作后的解添加到种群中。

3 算法验证

为了验证 ITSGA 算法在求解作业车间调度问题的有效性,将本文算法与改进粒子群(Improved Particle Swarm Optimization, IPSO)算法^[10]、量子鲸鱼优化(Quantum Whale Optimization Algorithm, QWOA)算法^[11]、改进混合遗传模拟退火(Improved Genetic Simulated Annealing Algorithm, IGSA)算法^[4]进行对比。算法采用 python 编程,在 2.40 GHz 处理器的 Windows10 系统下运行。参数设置如下:

种群规模 $P = 100$,最大迭代次数 200,交叉概率 $p_c = 0.9$,变异概率 $p_m = 0.1$,禁忌表长度为最大迭代次数。

表1中, C^* 为已知最优解;best 为运行 10 次得到的最优解;avg 为连续运行 10 次得到的平均值;加粗数据表示已经达到最优解。选取 benchmark 中关于 JSP 的若干算例进行验证。

从表1中所列数据可以看出,ITSGA 算法对于表格算例中求解的最优值和平均值均优于其它算法。对于除 FT20 外的其他算例均已达到最优解,这是其他算法所未能达到的,且本文算法求解 FT10、FT20 得到的平均值都要明显优与其他算法。

表1 各算法对 benchmark 问题求解结果比较

Tab. 1 Comparison of the results of benchmark problem by different algorithms

算例	规模 $n \times m$	C^*	GA		IPSO		QWOA		IGSAA		ITSGA	
			best	avg	best	avg	best	avg	best	avg	best	avg
FT06	6×6	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
FT10	10×10	930	994	1 040.9	975	1 027	966	1 007.2	951	981.4	930	947.2
FT20	20×5	1 165	1 264	1 320.6	1 206	1 222	1 207	1 252.1	1 181	1 207.6	1 168	1 191.2
LA01	10×5	666	666	667.6	666	666	666	667.5	666	666	666	666
LA06	15×5	926	926	926	926	926	926	926	926	926	926	926
LA11	20×5	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222	1 222
LA16	10×10	945	978	990.3	973	1 011	946	994.3	945	953.7	945	952.7

以求解机器数量较多的 FT10 为例,进一步说明 ITSGA 的有效性。ITSGA 算法在求解 FT10 得到的最优值和平均值都大大优于算法 GA,更易跳出局部最优解,且在迭代初期就能快速收敛,说明加入的禁忌搜索算法和多种交叉方式随机选择起到了很

好的作用。同时,精英保留策略也能够使子代更好地继承父代的优良性状;局部邻域搜索则提高了算法达到最优解的可能性。图 4 为运用 ITSGA 求解算例 FT10 得到的甘特图,图中 $O_{i,2}$ 中 1 表示工件号,2 表示工序号。

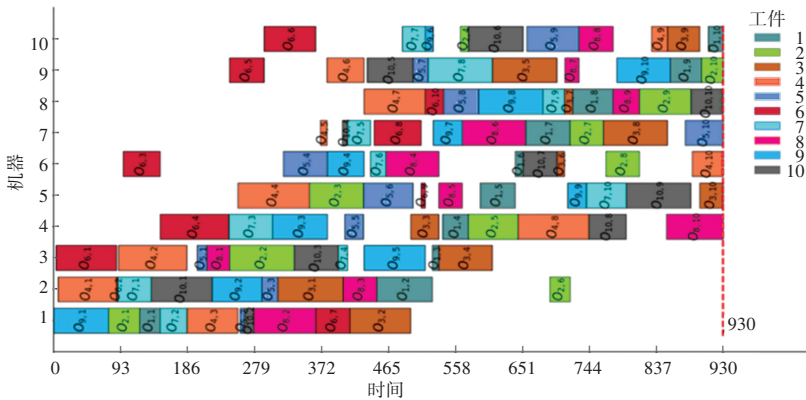


图 4 ITSGA 求解 FT10 得到的甘特图

Fig. 4 Gantt chart obtained by ITSGA solving benchmark FT10

4 结束语

本文提出的 ITSGA 算法通过融合禁忌搜索和局部邻域搜索的改进,增强了求解 JSP 的寻优能力,既有一定的全局寻优能力,能很好地避免陷入局部最优解,提高了算法的求解效率。将本文算法应用于求解若干基准问题时得到了较好结果,与传统遗传算法的求解结果相比均有较大的提升,经过与其它改进算法的比较结果,验证了 ITSGA 算法的有效性。

参考文献

- [1] 何斌,张接信,张富强. 一种求解作业车间调度问题的改进遗传算法[J]. 制造业自动化, 2018, 40(8): 113-117.
- [2] 王佳怡,潘瑞林,秦飞. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 制造业自动化, 2022, 44(12): 91-94, 106.

- [3] 郑先鹏,王雷. 面向作业车间调度问题的遗传算法改进[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(6): 496-502.
- [4] 王玉芳,缪昇,马铭阳,等. 改进混合遗传算法的作业车间调度研究[J]. 现代制造工程, 2021(5): 32-38.
- [5] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京:清华大学, 2003.
- [6] 张超勇,饶运清,刘向军,等. 基于 POX 交叉的遗传算法求解 Job-Shop 调度问题[J]. 中国机械工程, 2004(23): 83-87.
- [7] LAARHOVEN P J M V, AARTS E H L, LENSTRA J K. Job shop scheduling by simulated annealing[j]. Operations Research, 1992, 40(1): 1.
- [8] NOWICKI E, SMUTNICKI C. A fast taboo search algorithm for the job shop problem[J]. Management Science, 1996, 42(6): 3.
- [9] 张超勇. 基于自然启发式算法的作业车间调度问题理论与应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
- [10] 刘洪铭,曾鸿雁,周伟,等. 基于改进粒子群算法作业车间调度问题的优化[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(1): 75-82.
- [11] 闫旭,叶春明,姚远远. 量子鲸鱼优化算法求解作业车间调度问题[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(4): 975-979.