

基于混合遗传禁忌的多目标柔性作业车间调度*

莫建麟¹, 吴喆²

(1. 阿坝师范高等专科学校 电子信息工程系, 四川 汶川 623002; 2. 西南大学 计算机与信息科学学院, 重庆 北碚 400715)

摘要 针对多目标柔性作业车间调度问题(Flexible job-shop scheduling problem, FJSP)提出了一种结合遗传算法和禁忌算法求解FJSP的调度算法。首先,定义了FJSP问题模型,然后提出采用改进的遗传算法对其进行求解,采用双链进行染色体编码和NEH方法获得初始解,并提出了自适应的选择策略、混合交叉策略和复合变异策略以实现个体保优和更新,当遗传算法陷入局部最优解时,采用禁忌算法跳出局部最优,以实现全局最优解的获取。仿真实验证明文中的方法能有效地解决FJSP问题,获得全局最优解,且与其他方法相比,文中方法具有收敛速度快和求解效率高的优势。

关键词 柔性作业车间调度;禁忌算法;多目标;遗传算法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2013)02-0087-05

调度作为生产制造系统的重要环节,好的调度策略能提高设备利用率、降低库存和成本,从而确保制造企业的经济效益^[1]。

柔性作业车间调度问题较传统的车间作业调度(Job-shop scheduling problem, JSP)更符合生产实际,它突破了机器约束和加工工艺路线的限制,去除了作业车间调度中加工机器唯一的限制。不仅需要确定工序对应的机器分配顺序,而且需要确定不同机器上的工序的执行顺序。柔性作业车间调度问题已被证明是一个NP难题。

传统的解决FJSP的方法主要是精确算法和启发式优化算法,其中精确算法主要有列举法、分支界定法、动态规划法和拉格朗日松弛法;启发式优化算法主要包含NEH算法、遗传算法、模拟退火算法和粒子群算法等。

当问题的规模较小时,精确算法能得到全局最优解,并具有较高的求解效率,但是当问题规模变大时,精确算法的求解精确度和效率大大降低。

启发式优化算法能克服精确算法在求解大规模问题时的不足,目前,已有不少文献采用改进的启发式优化算法来解决FJSP问题。

文献[3]将粒子群算法和模拟退火算法相结合并用于解决流水车间调度问题。文献[4]提出了一种粒子群和局部搜索混合相结合用于解决柔性车间调度的方法。文献[5]采用模块化设计与遗传算法相结合,对遗传算法进行修正,并最终用于解决车间调度问题。

文献[6]采用逆转策略对最优粒子进行变异从而克服粒子群算法的早熟收敛问题,并采用模拟退火思想概率接收最新粒子,从而实现车辆调度问题的求解。文献[7]设计了一种动态禁忌算法和粒子群优化算法的混合Pareto算法来解决柔性作业车间调度问题。文献[8]提出了一种采用遗传算法解决机器分配问题,采用蚁群算法解决工序排序问题。

上述工作对于采用启发式优化算法来解决柔性作业车间调度问题具有重要的借鉴意义,但是,并未涉及到多目标柔性作业车间调度问题的求解。所以,本文在上述工作的基础上,采用一种混合遗传禁忌算法来实现多目标柔性作业车间调度问题的求解。

1 多目标柔性作业车间调度

FJSP^[9-11]可以描述为 n 个工件的集合为 $J = \{J_i, 1 \leq i \leq n\}$, m 台机器的集合为 $M = \{M_i, 1 \leq i \leq m\}$, 每个工件 J_i 有 n_i 道工序;工件 J_i 的第 j 道工序可以表示为 O_{ij} , 则对工序 O_{ij} 进行加工的机器集合为 W , 工序 O_{ij} 在某台机器 $W_k \in W$ 上的加工时间可以表示为 T_{ijk} , 在加工过程中, FJSP 必须满足下列约束:

- 1) 同一台机器同一时刻只能加工一个工件;
- 2) 工序在机器上一旦开始加工便不能被中断;
- 3) 同一工件的工序之间具有先后顺序,不同工件的工序之间无先后顺序约束;

* 收稿日期 2012-07-17 网络出版时间 2013-03-16 13:37

资助项目: 国家自然科学基金(No. 61270831)

作者简介: 莫建麟,男(藏族),讲师,硕士研究生,研究方向为单片机和嵌入式系统及应用, E-mail: yatingzx@163.com

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20130316.1337.201302.87_020.html

4) 一个工件在某一时刻只能在一台机器上进行加工。

柔性作业车间调度的主要任务即安排 n 个工件的所有工序 O_{ij} 的加工,同时优化既定目标。

1) 最小最后完工时间:使最后完工的工件的完工时间最小,表示为 $MakeSpan$,如(1)式所示

$$MakeSpan = \min \left(\max_{i=1}^n F_{ik} \right), 1 \leq k \leq m \quad (1)$$

其中 F_{ik} 表示工件 J_i 在机器 M_k 上的完成时间,其可以表示为

$$\begin{cases} F_{i0} = 0, F_{0k} = 0 \\ F_{ik} = \max \{ F_{i-1,k}, F_{i,k-1} \} + T_{ik} \\ 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, 1 \leq k \leq m \end{cases} \quad (2)$$

2) 最小延迟时间:即所有工件在机器上进行加工完成对应的最小延迟时间 $Delay$,其可以表示为

$$Delay = \min \left(\max_{i=1}^n (0, F_i - E_i) \right), 1 \leq k \leq m \quad (3)$$

其中 E_i 表示工件 J_i 的期望完成时间。

3) 最小负载:即在机器上加工的所有工件对应的总执行时间 $Load$ 最少,其可以表示为

$$Load = \min \left(\max_{k=1}^m L_k \right) \quad (4)$$

其中 L_k 为机器 M_k 上执行其分配的工件所需要的时间。

2 FJSP 混合遗传禁忌算法

遗传算法是一种求解优化问题的并行搜索算法。下面首先采用遗传算法来求解 FJSP,然后利用禁忌搜索跳出局部最优获得全局最优解。

2.1 双链染色体编码

针对 FJSP 的特点,设计一种双链表示染色体的方式,第1条链表示工序的执行顺序,第2条链表示工序执行对应的机器,如对于某工件3的 FJSP 调度问题,工件对应的工序分为 3-2-3,机器数为3,其对应的一条染色体编码可以表示为表1所示。

表1 某工件 FJSP 染色体编码

工序	3	1	1	2	3	1	2	3
机器	2	1	3	3	2	1	1	3

在表1中,第1行代表工序链,第2行代表机器链,第1行中的第1列表示工件3的第一道工序,第5列表示工件3的第2道工序,第8列代表工件3的第3道工序,机器链表示工序执行对应的机器,如第2条链的第1列表示工件3的第一道工序在机器2上执行。

2.2 NEH 算法获得初始解

使用 NEH 启发式算法进行初始解求解,该算法假设所有机器上的总加工时间越大的工件比总加工时间越小的工件的优先级高,它通过每次插入一个工件,从而得到局部最优解,其步骤可以描述如下:

1) 初始化所有工件总数 N 和机器总数 M ;

2) 计算工件在所有机器上的总加工时间 $F(i)$;

3) 对所有工件的总加工时间 $F(i)$ 按照从大到小进行排序,选择前两个工件 i, j ;

4) 对两工件 i, j 的最后完工时间 $MakeSpan$ 进行比较,如果 $MakeSpan(i) \leq MakeSpan(j)$,则当前序列为 i, j ,否则当前序列为 j, i ;

5) 从3)得到的序列中选择下一个工件,并将其根据最小 $MakeSpan$ 值原则插入到当前序列中;

6) 判断所有工件是否已插入,如果插入完毕则算法结束,输出当前工件序列以及对应的机器序列,否则转入5)继续插入。

2.3 适应度函数设计

适应度函数的选择需要考虑 FJSP 的多个目标,因此文中设计了一种加权的多目标适应度函数,如(5)式所示。

$$Fit = \frac{1}{w_1 MakeSpan + w_2 Delay + w_3 Load} \quad (5)$$

其中 $MakeSpan$ 、 $Delay$ 和 $Load$ 可以通过式(1)、(2)和(3)获得, $w_1 + w_2 + w_3 = 1$,根据实际情况,可以根据系统各目标的重要性级别取不同的权值。

2.4 自适应选择策略

采用锦标赛选择策略和新生策略相结合的方式。锦标赛选择法即首先从种群中选择出锦标赛规模个染色体,对染色体根据式(5)进行适应度计算,并选择其中适应度最优的染色体。重复此步骤,直到选择出满足设定个数的染色体。

当连续几代的最优染色体适应度值未发生变化时,为了增加染色体多样性,避免早熟收敛,从种群中随机产生若干新染色体,当最优染色体得到更新时,再使用锦标赛选择法进行染色体选择。

2.5 混合交叉策略

交叉操作是将种群的染色体进行基因交换,产生新的个体。文中采用混合交叉策略,对工序序列和机器分配序列采用不同的交叉方式,采用改进 POX 交叉操作实现工序序列的交叉;采用多点交叉操作 MPX 实现机器分配序列的交叉。

POX 对工序序列的交叉过程如下:将所有工件分为两个集合 S_1 和 S_2 ,随机选取两个父代 1 和 2 进行交叉操作,其中一个子代 1 继承父代 1 对应集合 S_1 的相应位置的基因,其他位置按顺继承父代 S_2 中的基因,

同理,对子代 2 继承父代 2 对应 S_2 的相应位置的基因,其他位置按顺继承父代 S_1 的基因。

MPX 对机器序列的交叉过程如下:为了保持原工件中工序的加工顺序,对于任意 2 个父染色体,选取同一工序对应的机器进行互换从而得到的交叉序列,仍然保存了解的可行性。

2.6 复合变异策略

采用互换变异方式实现对染色体基因的互换,对于不属于同一工件的工序父代,对其任意两个基因进行互换,得到经过变异操作的工序序列子代。

由于柔性作业车间调度的每道工序均可以由若干机器进行加工,所以在对工序进行变异时,选择可对其进行加工的机器集中的不同于当前机器的基因来替换当前机器号,从而得到经过变异操作的机器序列子代。

2.7 禁忌搜索算法

当通过遗传算法所获得最优个体连续若干代未发生变化时,使用禁忌搜索算法对局部最优解进行邻域搜索,以跳出局部最优解。

禁忌算法采用线性表来存储局部最优解,通过禁忌准则来避免局部最优解的迂回搜索,从而跳出局部最优,最终实现全局最优,其步骤如下:

步骤 1 禁忌表的长度 Len , 候选解规模为 Y , 最大迭代次数 t_{max} , 禁忌表的初值为 Φ , 遗传算法的局部最优解为 s , 当前解和历史最优解的初值为 s ;

步骤 2 当前迭代次数 $t = t + 1$;

步骤 3 由当前解产生邻域解 N , 并确定候选解;

步骤 4 根据(5)式判断候选解的优劣,并判断其是否满足藐视准则:

1)如果满足,则将其赋给当前解和历史最优解,并重新为其设置禁忌长度,以及更新禁忌表中的其他元素的禁忌长度;

2)如果不满足,则将非禁忌的次优解作为当前解,并将其置入禁忌表,替换最早进入禁忌表的对象并更新禁忌表中的其他元素的禁忌长度。

步骤 5 重复步骤 2~4 直到达到最大迭代次数 t_{max} , 则输出最优解。

2.8 算法流程

混合遗传禁忌算法解决多目标柔性车间作业调度问题的算法流程如图 1 所示。

3 仿真实验

采用具有 4 工件和 6 台机器的实例进行仿真,其工件和机器的调度表如表 2 所示。

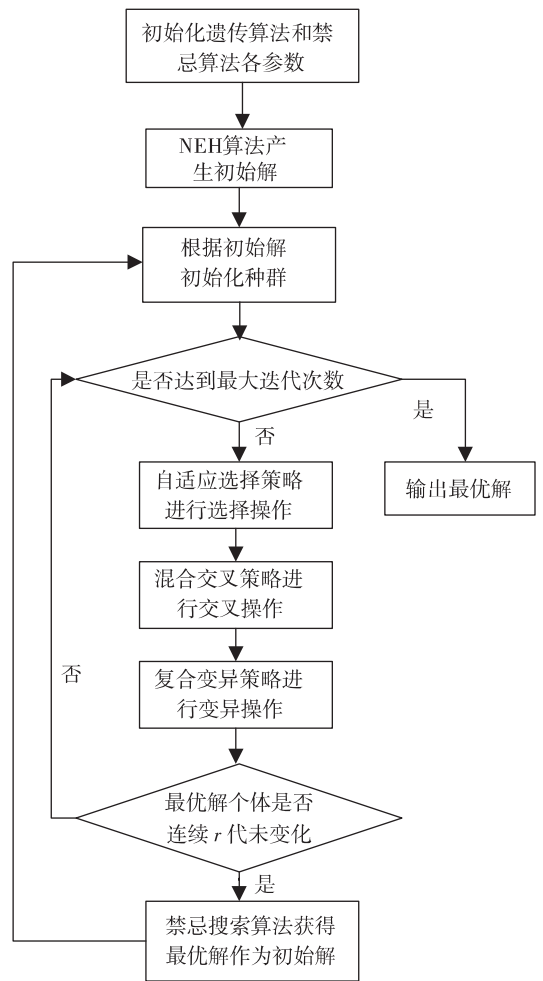


图 1 混合遗传禁忌算法流程

表 2 4 工件 * 6 机器的 FJSP 参数

工件	工序	期望完成时间	可选择机器及加工时间					
			M1	M2	M3	M4	M5	M6
J1	O11		2	3	4			
	O12	6		3		2	4	
	O13		1	4	5			
J2	O21		5	6				
	O22	13		4		3	5	
	O23				13		9	2
J3	O31		3		5		2	
	O32	11	4	3			6	
	O33			4			7	11
J4	O41		9		7	9		
	O42	12	6		4			5
	O43		1		3			3

表 2 列出了 4 工件在 6 台机器上的柔性调度问题,每个工件都对应若干道工序,每道工序均可以采用不同机器进行加工,且在不同机器上的加工时间不同,工件的每道加工工序可使用的机器数目小于总机器

数。

使用 Matlab 仿真工具,采用文中的混合遗传禁忌算法对表 1 所示的实例进行仿真,并与文献 [8]和 [9]所示方法进行比较,以证明本文方法的优越性。

各参数设置如下:遗传算法的种群规模为 100,最大迭代次数为 200,交叉概率为 0.68,变异概率为 0.52,最优解未变化次数阈值 $r = 15$,适应度函数权值 $w_1 = 0.5, w_2 = 0.3, w_3 = 0.2$,禁忌算法候选解规模为 50,迭代次数为 100,禁忌长度为 8,连续运行 20 次,得到的平均结果如表 3 所示。

表 3 不同算法运行结果

算法	最优值	最差值	平均收敛代数	平均收敛时间/s
本文	16.1	17	175	0.65
文献 [8]	18.5	23	240	34
文献 [9]	21	24.6	268	99

从表 3 中可以看出,文中算法得到的最优值为 16.1,而文献 [8]和文献 [9]中方法得到的解为 18.5 和 21,所以本文的方法对应的最优解较文献 [8]和 [9]分别提高了 13% 和 23%,最差值也分别提高了 26% 和 31%,且在收敛时间和收敛代数上也具有较大优越性。

对 3 种算法的适应度随时间变化的曲线进行仿真,得到的结果如图 2 所示。

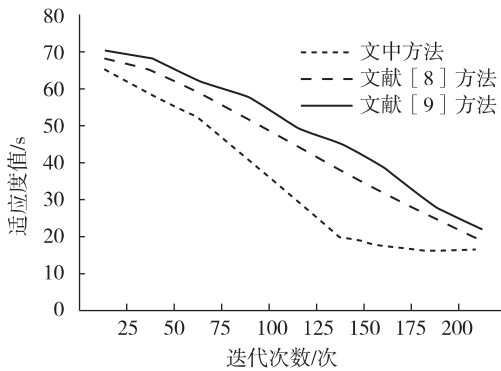


图 2 适应度随迭代次数变化图

从图 2 中可以看出,文献 [8]和文献 [9]在迭代到最大次数 225 次时对应的最优适应度值分别约为 19 和 22,且尚未处于收敛状态,而文中方法在迭代次数为 175 次时趋于收敛,获得了最优适应度值 16.1,显然,文中方法的适应度值远远优于文献 [8]和文献 [9],这是因为文中采用 NEH 算法获取初始值再采用遗传算法进行迭代寻优,当算法陷入局部最优时,采用禁忌算法跳出局部最优解,最终实现全局最优,所以文中方法与其他方法相比在全局寻优能力和求解效率方面具有较大的优势。

图 3 对应了最优解,即最大完成时间为 16.1 的调

度方案,其中填充图案为交叉线的部分表示机器空余时间。

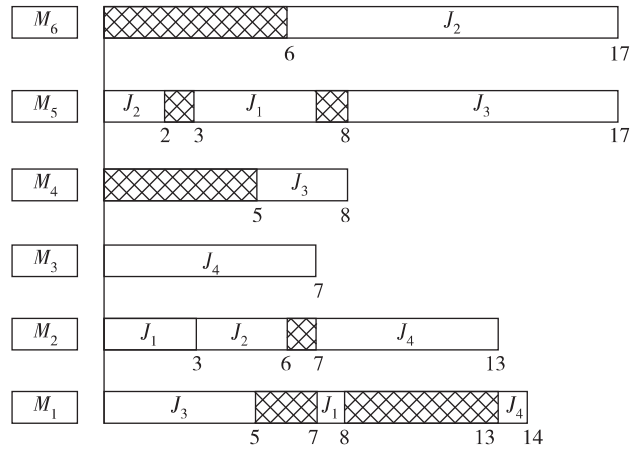


图 3 4 工件 * 6 机器的 FJSP 甘特图

从图 3 所示的甘特图可以看出:文中方法对应的最小最后完工时间 $MakeSpan = 17$,最小总延迟时间 $Delay = 14$,总执行时间 $Load = 17$ 。

4 结语

多目标柔性作业车间调度 FJSP 问题是一个 NP 难题,本文提出了一种混合遗传算法和禁忌算法的 FJSP 调度算法。首先采用 NEH 算法来获得初始解,在初始化种群后,采用自适应的选择策略来保留优良个体,采用混合交叉策略和复合变异策略实现个体的更新,并在个体最优值连续若干代未发生变化,即陷入早熟后,采用禁忌算法对最优解进行更新,以跳出局部最优,最终实现全局最优。仿真实验证明该算法提高了全局搜索能力,能实现全局最优解的求解,且相对其他方法^[10-12],具有收敛速度快和求解效率高的优点。

参考文献:

[1] 张超勇,董星,王晓娟,等. 基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间调度[J]. 机械工程学报,2010,46(11):156-164.
Zhang C Y, Dong X, Wang X J, et al. Improved NSGA-II for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Journal of Mechanical Engineering 2010 46(11):156-164.

[2] Garey E L, Johnson D S, Sethi R. The complexity of flowshop and job-shop scheduling[J]. Mathematics of Operations Research, 1976(1):117-129.

[3] Lee H S, Chen B. Empirical error rate minimization based linear discriminant analysis[C]// Proceedings of the IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing. Taipei: IEEE, 2009:1801-1804.

[4] Moslehi G, Mahnam M. A pareto approach to multi-objective

- flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization and local search[J]. International Journal of Production Economics 2010 ,8(4) 25-31.
- [5] Gutierrez C ,Garcia-magarino I. Modular design of a hybrid genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem[J]. Knowledge-Based Systems 2010 ,7(10) 219-225.
- [6] 张其亮 ,陈永生 ,韩斌. 改进的粒子群算法求解置换流水车间调度问题[J]. 计算机应用 2012 ,32(4) :1022-1024.
Zhang Q L ,Chen Y S ,Han B. Improved particle swarm optimization for permutation flowshop scheduling problem [J]. Journal of Computer Applications 2012 ,32(4) :1022-1024.
- [7] 贾兆红 ,朱建建 ,陈华平. 柔性作业车间调度的动态禁忌粒子群优化算法[J]. 华南理工大学学报 :自然科学版 2012 ,40(1) 69-75.
Jia Z H ,Zhu J J ,Chen H P. Dynamic Tabu particle swarm optimization algorithm for flexible job-shop scheduling[J]. Journal of South China University of Technology :Natural Science Edition 2012 ,40(1) 69-75.
- [8] 陈成 ,邢立宁. 求解柔性作业车间调度问题的遗传-蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统 2011 ,17(3) 615-621.
Chen C ,Xing L N. GA-ACO for solving flexible job shop scheduling problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems 2011 ,17(3) 615-621.
- [9] Nhu B H ,Joc C T ,Edmund M. An effective architecture for learning and evolving flexible job-shop schedules[J]. European Journal of Operational Research 2007 ,179(2) 316-333.
- [10] 郝平波 ,魏英姿 ,冯艺君. 基于基因片段分解的粒子群算法求解置换 Flowshop 问题[J]. 电子设计工程 2011 ,19(2) :85-88.
Hao P B ,Wei Y Z ,Feng Y J. Decomposition of gene section particle swarm optimization for the flowshop problem[J]. Electronic Design Engineering 2011 ,19(2) 85-88.
- [11] 王公堂 ,许化强. 带学习策略的遗传算法求解柔性作业调度问题[J]. 电子设计工程 2011 ,19(16) 57-60.
Wang G T ,Xu H Q. Improved evolutionary algorithm with learning strategy for the electronic design engineering[J]. Electronic Design Engineering 2011 ,19(16) 57-60.
- [12] 王克华 ,牛慧 ,张亚南 ,等. 一种参数自适应调整和边界约束的粒子群算法[J]. 电子设计工程 2011 ,19(21) 46-49.
Wang K H ,Niu H ,Zhang Y N et al. Particle swarm optimization with adaptive parameters and boundary constraints[J]. Electronic Design Engineering 2011 ,19(21) 46-49.

Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problem Based on Compound Gene and Tabu Algorithm

MO Jian-lin¹ , WU Zhe²

(1. Dept. of Electronic Information ,Aba Teachers College ,Wenchuan Sichuan 623002 ;

2. College of Computer and Information Science ,Southwest University ,Beibei Chongqing 400715 ,China)

Abstract : Aiming at the solving FJSP(Flexible job-shop scheduling problem) , a scheduling algorithm combined gene and tabu algorithm were proposed. Firstly , the FJSP problem model was defined , then the improve gene algorithm was used to obtain the solution , the chromosome was coded as double-stranded and the NEH algorithm was used to get the initial solution. And the adaptive selection strategy , compound cross strategy and mutation strategy were introduced to protect the optimum chromosome and renew. When the gene algorithm got the local optimum solution , the tabu algorithm was used to get the global solution. The simulation experiment shows our method in this paper can resolve the FJSP effectively and get the optimal solution , compared with the other methods ; the method has the rapid convergence and high solution efficiency.

Key words : flexible job-shop scheduling problem ; Tabu search ; multi-goal ; gene algorithm

(责任编辑 游中胜)