

多目标柔性作业调度的优化研究

梁迪¹, 陶泽²

LIANG Di¹, TAO Ze²

1. 沈阳大学 机械工程学院 工业工程系, 沈阳 110044

2. 沈阳理工大学 机械工程学院, 沈阳 110168

1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China

2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Science & Technology University, Shenyang 110168, China

E-mail: sydxld@163.com

LIANG Di, TAO Ze. Multi-objective optimization search for flexible job shop scheduling problem. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(15): 223-225.

Abstract: A hybrid algorithm is proposed to solve scheduling problem in flexible production environment, where time, cost and equipment utilization rate are all concerned. Firstly, the scheduling model is built. The scheduling precedence is determined by the representation based operation. Objective dimensions can be unified by standardization principle. Secondly, AHP application is adopted to translate multi-objective into single objective problem. In order to avoid the premature convergence of simple GA, it combines the advantage of global search ability of GA with the self-adaptive merit of Tabu Search (TS). The result of the test shows that this method is feasible and efficient.

Key words: multi-objective optimization; flexible job shop scheduling; hybrid genetic-tabu search algorithm

摘要: 针对以生产周期、生产成本、设备利用率为目标的柔性作业调度问题, 基于混合遗传算法提出了一种新的优化求解方法。首先建立了该类问题的调度模型, 基于工序编码的染色体决定了工序调度的优先级; 利用无量纲的标准化处理方法统一目标量纲; 然后, 利用层次分析法将多目标问题转化为单目标问题, 同时为了保证算法的收敛性, 在基本遗传算法框架的基础上集成了禁忌搜索算法, 从而延缓或避免了早熟收敛的发生。最后通过实验仿真, 证明提出的方法可以有效解决该类多目标柔性作业调度问题。
关键词: 多目标优化; 柔性作业调度; 混合遗传算法

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.15.065 文章编号: 1002-8331(2009)15-0223-03 文献标识码: A 中图分类号: TP18

柔性作业调度问题(Flexible Job Shop Scheduling Problem, FJSP)是指带有机器可选的多工艺路线的作业调度问题, 它通常包含机器分配问题和工序调度问题。生产调度的目标也是多种多样的, 可以根据调度目标的多少把调度问题分为单目标调度问题、双目标调度问题和多目标调度问题。大多数文献研究的是以生产周期为目标的单目标调度优化问题。Ponnambalam等^[1]研究了以生产周期、机床闲置时间和工件延误时间为目标的多目标调度优化问题。实际的调度大多是多目标的, 传统调度中工件的加工路线是固定的, 为了增加调度的灵活性, 在工艺规划时可为工件设计多条工艺路线, 调度时再根据生产情况选择最合适的一条工艺路线。Nasr等^[2]的研究表明, 为工件预留多条加工路线能有效地提高生产率和生产柔性。

到目前为止, 已有一些传统的启发式算法求解 FJSP 优化调度问题^[3-5]。庞哈利^[6]从集成化的角度研究了柔性 Job Shop 计划和调度问题, 建立了两层混合整数规划模型, 并用遗传算法求解最佳加工路径, 用启发式规则求解调度问题。Alvarez-

Valdes 等人^[7]提出了一个启发式规则, 建模玻璃生产企业的生产调度为 FJSP; Dimitri 等人^[8]从成本的角度优化调度, 考虑了延迟成本和存储成本, 提出了一个启发式规则, 采用中心极限定理解决了调度中的竞争问题。

利用遗传算法良好的全局搜索能力和禁忌搜索具有记忆能力的全局逐步优化特性, 将两种算法进行混合, 针对车间流控系统柔性作业调度问题进行研究, 利用层次分析法求解各个目标的权重, 利用线性加权公式把多个目标函数映射为染色体的适应度。通过混合遗传操作, 得到符合要求的最优解或近优解。

1 数学模型

FJSP 调度问题描述如下: n 个工件在 m 台机器上加工, 已知各操作的加工时间、生产费用和各工件在各机器上的加工次序约束, 要求确定与工艺约束条件相容的各机器上所有工件的加工开始时间、完成时间和加工次序, 使生产周期、生产成本、

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA412020)。

作者简介: 梁迪(1971-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: workflow建模与仿真、生产计划与调度的智能优化方法等; 陶泽(1977-), 女, 博士, 副教授, 研究领域为 workflow建模与仿真、Petri 网及性能分析。

收稿日期: 2008-03-26 修回日期: 2008-05-23

设备利用率加工性能指标达到最优或次优。其中生产周期目标用工件的最大完成时间度量;生产成本目标用所消耗的加工成本以及在制品存储成本度量;设备利用率目标用机器的总负载和最大负载度量。

目标函数及约束条件如下:

$$\min f_1 = \min(\max C_i) \quad (1)$$

$$\min f_2 = \min F_p = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{i=1}^{n_i} (F_{ijk} X_{ijk} + (T_{S_{ik}} - T_{E_{i,j-1,k}}) F_{S_{ij}} X_{ijk}) \quad (2)$$

$$\min f_3 = \min \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{i=1}^{n_i} P_{ijk} X_{ijk} \quad (3)$$

$$\min f_4 = \min(\max \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{i=1}^{n_i} P_{ijk} X_{ijk}) \quad (4)$$

式中: C_i 是工件 J_i 的完工时间; F_p 是总加工成本; F_{ijk} 为工件 i 的第 j 个工序在第 k 个机床上的加工费用; $T_{S_{ik}}$ 为工件 i 的第 j 个工序在第 k 个机床上的最早加工时间; $T_{E_{i,j-1,k}}$ 为工件 i 第 $j-1$ 个工序在第 k 个机床上的加工结束时间,即当前工序的最早允许加工时间; t_{1k}, t_{2k} 机床 k 空闲时间段的起点和终点; $T_{S_{ij}}$ 为工件 i 的第 $j-1$ 个和第 j 个工序间的单位时间存储费用; P_{ijk} 为工件 i 的第 j 个工序在第 k 个机床上加工所需的时间; X_{ijk} 为决策变量,表示工件 i 的第 j 道工序是否选择在 k 机器上加工, $X_{ijk}=1$ 表示选中, $X_{ijk}=0$ 表示未选中;

$$\text{s.t. } i=1, 2, \dots, n_i, j=1, 2, \dots, n_j, k=1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{k=1}^m X_{ijk} = 1, X_{ijk} = 1 \text{ 或 } 0$$

$$T_{S_{ik}} = \max(T_{E_{i,j-1,k}}, t_{1k})$$

$$\max(T_{E_{i,j-1,k}}, t_{1k}) + P_{ijk} \leq t_{2k}$$

$$P_{ijk} \geq 0 \text{ 且 } P_{i0k} = 0$$

2 混合遗传算法(GATS)

本文所解决的问题属于典型的 NP 难题,近年发展起来的遗传算法对该类问题的求解具有较为显著的优势。遗传算法的优越性主要表现在搜索过程中不易陷入局部最优,即使在所定义的适应度函数不连续的情况下,也能以极大的概率找到最优解。然而,与传统的启发式算法相比,遗传算法不适用于邻域最优解的微调结构,运算效率低。把禁忌搜索算法嵌入到遗传算法中,这种混合结构由于融入了禁忌搜索法的思想,使得那些只有通过禁忌检验的个体,才能真正地被作为新的个体所接收,这一方面使得那些有效基因缺失、但适宜度不高于其父代的个体被禁忌掉,另一方面,也使得那些包含有效基因、但适宜度较低的个体有更多的机会参加交叉和变异,从而延缓或避免了早熟收敛的发生,也提高了遗传算法的爬山能力。

2.1 编码与解码

选择一种合适的染色体表现型是应用遗传算法寻优的第一步。本文考虑到存在柔性路径的情况,选择了基于工序的表述法,给所有同一零件的工序指定相同的符号,然后根据它们在给定染色体中出现的顺序加以解释,如表 1 所示。

表 1 编码方式

工序	2-1	1-1	3-1	4-1	4-2	3-2	2-3	2-2	1-3	1-2	3-3	4-3
染色体	2	1	3	4	4	3	2	2	1	1	3	4

以零件 4 为例,该零件有三道工序,分别用 4-1、4-2 和 4-

3 来表示。在遗传算法的染色体中都用“4”来表示,由于工序的先后顺序是固定的,所以在染色体中第一次出现的“4”代表工序 4-1,其次代表工序 4-2,最后出现的“4”代表工序 4-3。很容易看出染色体的任意排列总能产生可行调度,而且可以肯定这种编码方式一定含有最优调度,初始种群是随机产生的。

解码是将染色体还原成问题本身,调度问题解码的工作就是生成调度方案。本文解码算法如下:

步骤 1 初始化工件加工工序向量, $K[J_i]=1, i=1, 2, \dots, n$ 。

步骤 2 从染色体读取要加工的工件。

步骤 3 在 $J_M(J_i, K[J_i])$ 查找当前工序 $K[J_i]$ 的所有可用机器序列,选择加工结束时间最早的机器;若存在结束时间相同的机器,取耗时较短的。

步骤 4 比较该机器的空闲时间段,如果工序可以插入到机器的中间空闲时间段,则转入步骤 5,否则进步骤 6。

步骤 5 插入该工序,并更新工件当前工序的结束时间和机器的开始时间和空闲时间。

步骤 6 在机器加工序列的末尾接着安排该工序,更新机器的当前结束时间和工件的当前工序的结束时间。

步骤 7 工件 J_i 的工序号 $K[J_i]$ 加 1,返回步骤 2,直到处理完该染色体中的所有工序。

步骤 8 结束循环,生成可行解。

2.2 多目标权衡决策方案

本文以生产周期、生产成本和设备利用率为目标,但是由于时间和成本是不同量纲的参数,可以根据以下步骤处理该问题。

首先对时间和成本按照式(5)进行无量纲的标准化处理,再根据层次分析法对优化目标分别确定加权系数,按照式(6)把多目标的优化问题转化为单目标的优化问题。

例如,表 2 中的几种调度方案指标经过标准化处理后得到表 3 所示的结果,如果取生产时间权重系数与生产成本权重系数均为 0.5,则调度方案 A_2 的综合指标为最优。

表 2 3 种调度方案的指标值

调度方案	生产时间	生产费用
A_1	17	60
A_2	18	55
A_3	20	50

表 3 经过标准化处理的 3 种调度方案的指标值

调度方案	生产时间	生产费用
A_1	1	100
A_2	34	50.5
A_3	100	1

无量纲标准化处理^[9]公式为:

$$a_{ij} = \frac{99 \times (c_{ij} - \min_i c_{ij})}{\max_i c_{ij} - \min_i c_{ij}} + 1 \quad (5)$$

式中: a_{ij} 与 c_{ij} 分别指表 3 和表 2 中的第 i 行 j 列的指标值。

线性加权和公式为:

$$U_i = \sum_j (a_{ij} \times w_j) \quad (6)$$

式中: w_j 为第 j 个指标的权重系数; U_i 为第 i 个方案的综合指标。

权重系数 w_i 的产生,可以通过层次分析法得到。首先对生产周期、生产成本和设备利用率这些优化指标建立判断矩阵进行相对重要度计算。如在选定的车间调度目标函数中, C_1 为生产周期, C_2 为设备利用率, C_3 为生产成本。假定以生产周期为比较基准,对这 3 个目标两两比较的结果如表 4 所示。

上述矩阵表明:对车间优化调度而言,生产周期比设备利

表4 重要度比较矩阵

重要度	C_1	C_2	C_3
C_1	1	5	3
C_2	1/5	1	1/3
C_3	1/3	3	1

用率($a_{ij}=5$)重要、比生产成本较重要($a_{ij}=3$),而生产周期比生产成本较重要($a_{ij}=3$),其他可以类推。接着可以采用求根法来计算特征值的近似值。

(1)将矩阵按行求: $v_i = \sqrt[n]{\prod_j a_{ij}}$

(2)归一化: $w_i = \frac{v_i}{\sum v_i}, i=1,2,\dots,n$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{求根法: } V = \begin{bmatrix} 2.466 \\ 0.405 \\ 1 \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} 0.637 \\ 0.105 \\ 0.258 \end{bmatrix}$$

即生产周期权重 w_1 为 0.637,设备利用率 w_2 为 0.105,生产成本权重 w_3 为 0.258。

2.3 选择操作

选择操作用于避免有效基因的丢失,使高性能的个体得以更大的概率生存,从而提高全局收敛性和计算效率。通常有两种选择策略:其一为纯选择(pure selection)记为 S=P,即种群中每一个体根据其适配值;其二为保优策略(elitist strategy),记为 S=E,即先用纯选择进行选择,然后将 best so far 加入下一代种群,该策略可防止最优解的丢失。本文采用第二种策略。

2.4 交叉操作

在执行操作前,将整个种群分成 K 个子种群(仿真时均分为 4 份)在各子种群中分别选取一个个体与整个种群中的最佳个体以不同的方式进行交叉,直至产生 K 个新子种群,然后进行择优操作。仿真时采用 MPPX、MGOX、MGPMX1、MGPMX2^[10] 这几种不同方式的交叉操作来继承父代优良模式,如此复合化多交叉操作使得搜索行为具有明显的多样性。

2.5 变异操作

变异操作可以帮助收敛过程跳出局部最优点,增加种群的多样性。采用 INV 变异操作,随机交换染色体中两个不同基因的位置。

2.6 终止条件

通过设定最大进化代数 T ,当运行代数达到 T 时,进化终止。混合遗传算法的流程如图 1 所示。

3 仿真实验及分析

在以上算法的基础上,对 4 个工件、6 个机床的一个作业排序问题进行了研究,主要数据如表 5 和表 6 所示。在表 5 中, J 为工件; O 为工序; M_i 为机床;“/”左边的数字为加工时间,右边为加工费用。如:工件 J_1 表示第 1 个工序 O_{1-1} 在机床 M_1 上的加工时间为 2,加工费用为 8。“-”表示工件不能在该机床上加工。表 6 表示了各个工序完工后工件的单位时间库存费用。其中, S_i 表示第 i 个工序完工后单位时间的存储费用。经过 10 次

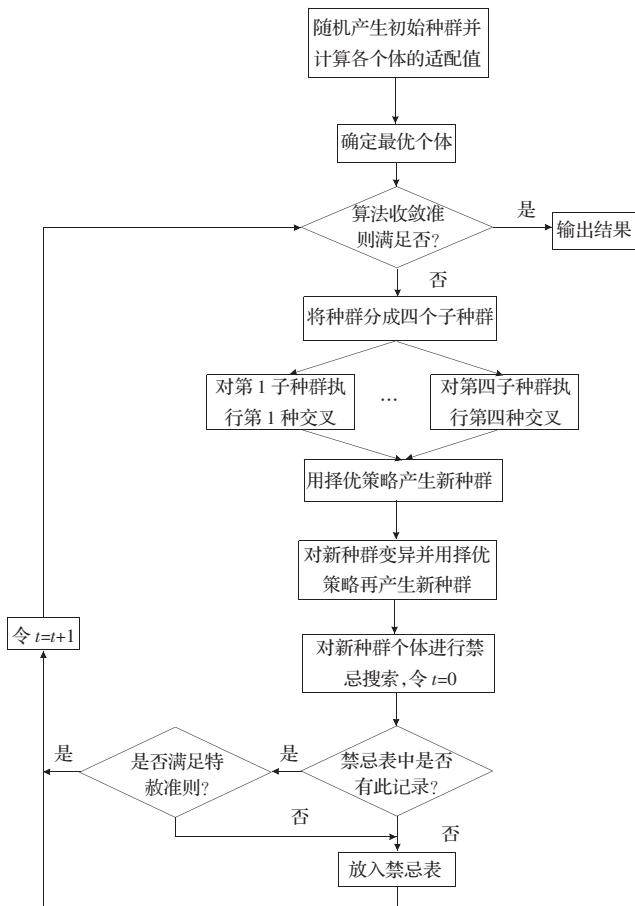


图1 混合遗传算法流程图

表5 工序的加工时间、加工费用

J	O	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	J	O	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
1-1	2/8	3/6	4/4	-	-	-	-	3-1	5/8	6/6	-	-	-	-	-
J_1	1-2	-	3/6	-	2/8	4/4	-	J_3	3-2	-	4/6	-	3/10	5/4	-
	1-3	1/8	4/6	-	5/5	-	-		3-3	-	-	13/9	-	9/16	12/12
	2-1	3/8	-	5/4	-	2/10	-		4-1	9/12	-	7/16	9/12	-	-
J_2	2-2	4/8	3/10	-	-	6/8	-	J_4	4-2	-	6/6	-	4/10	-	5/8
	2-3	-	-	4/14	-	7/8	11/4		4-3	1/8	-	3/6	-	-	3/6

表6 工序完工后工件的单位时间存储费用

J/S	S_1	S_2	S_3
J_1	2	1	3
J_2	2	1	2
J_3	1	2	3
J_4	1	3	2

仿真优化,每次得到的 Pareto 解个数均在 16~20 个之间,取第 5 次运算结果。图 2 为生产周期权重 w_1 为 0.637,机床负载 w_2 为 0.105,生产费用权重 w_3 为 0.258 时的最优调度结果所对应

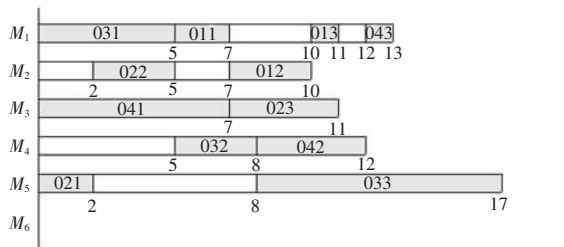


图2 多目标最佳方案调度图