

【文章编号】 1004-1540(2006)03-0246-05

# 遗传算法的双目标柔性作业车间调度研究

余琦玮, 黄铁群, 叶良朋

(中国计量学院 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

**【摘要】** 研究了 FMS 环境下先进制造车间路径柔性的优化调度问题. 同时考虑现代生产准时制的要求, 建立了柔性作业车间调度问题的双目标数学优化模型, 并给出了求解模型的遗传算法的具体实现过程; 针对模型的特殊性, 提出了染色体两层编码结构, 将 AOV 网络图应用到解码和适应度函数的计算中, 通过一个调度实例进行验证, 给出了相应的选择、交叉、变异操作设计方案.

**【关键词】** 遗传算法; 双目标; 柔性作业车间调度

**【中图分类号】** F406.2

**【文献标识码】** A

## Research on bi-objective flexible job shop scheduling based on genetic algorithm

YU Qi-wei, HUANG Tie-qun, YE Liang-peng

(College of Electrical & Mechanical Eng, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The flexible job-shop optimal scheduling problem in FMS is studied by analyzing the weakness of classical job-shop scheduling. Considering just-in-time production, the mathematical model of flexible job-shop scheduling (FJSS) for bi-objective is established. To solve the model, a genetic algorithm is developed. In this algorithm, a two-row chromosome structure is presented because of the special point of the model. At the same time, AOV network is applied to decode and compute the fitness function. Then selection, crossover and mutation operator of the genetic algorithm are designed. Finally, an example of job shop scheduling is shown.

**Key words:** genetic algorithm; bi-objective; flexible job shop scheduling

Job shop 是一类最具一般性的生产加工环境, 该类调度问题已得到广泛的关注和研究<sup>[1-4]</sup>. 在传统的 Job shop 调度问题研究中, 仅考虑各工序在唯一确定的机床上加工的情况, 即先有确定的加工计划, 再进行作业调度, 缺乏一定的柔性. 随着 FMS 的出现, 这一传统限制已被突破, 各工

序可以在多台可选的机床上加工<sup>[5]</sup>, 即路径柔性已成为生产的实际需求. 路径柔性是 FMS 的一个重要特性, 它可有效地平衡工序负荷, 缩短加工时间, 减少在制品库存, 并能应对突发事件的干扰, 从而大大提高了加工系统的整体性能. 因此, 研究具有路径柔性的车间调度问题具有重要的实

**【收稿日期】** 2006-05-23

**【作者简介】** 余琦玮(1978—), 女, 浙江淳安人, 硕士. 主要从事生产管理的教学与研究.

际意义.

车间调度问题属于强 NP 完全难题,而柔性作业车间调度问题比一般的调度问题更具复杂性,因此如何采用一种有效的算法寻找该问题的最优解也是研究的重点.遗传算法是借鉴生物的自然选择和遗传进化机制而开发出的一种全局优化自适应概率搜索算法,与其它方法比具有更强的寻优能力<sup>[6]</sup>.本文针对柔性作业车间调度(flexible job-shop scheduling,简称 FJSS)问题展开研究,提出该问题的数学模型,并重点研究了解决 FJSS 问题的遗传算法的实现.最后通过一个实例来验证算法的有效性.

### 1 FJSS 问题描述

假定一个加工系统有  $m$  台机器和  $n$  个工件,每个工件包含一道或多道工序,工件的工序顺序是预先确定的,每道工序可以在多台不同的机床上加工,工序的加工时间随机床的性能不同而变化.调度目标是为每道工序选择最合适的机器,以及确定每台机器上各工件工序的最佳加工顺序及开工时间,使系统的某些性能指标达到最优.

并假设:1) 工序一旦进行不能中断;2) 所有机床一开始均处于空闲状态;3) 假定工件之间具备相同的优先级;4) 不同工件的工序之间没有先后约束;5) 在零时刻,所有的工件都可被加工;6) 各工件的准备时间和移动时间一起计入加工时间.

## 2 FJSS 问题的数学优化模型

### 2.1 变量描述

模型所需的主要变量: $m_{ijk}$ —工件  $i$  的第  $j$  道工序在机器  $k$  上的加工时间; $S_{ijk}$ —工件  $i$  的第  $j$  道工序在机器  $k$  上的开始时间; $E_{ijk}$ —工件  $i$  的第  $j$  道工序在机器  $k$  上的完工时间; $MP_k$ —所有工件在机器  $k$  上的完工时间; $MS$ —所有工件的最后完工时间; $D_i$ —工件  $i$  的交货期; $r_i$ —工件  $i$  提前完工的惩罚系数; $w_i$ —工件  $i$  拖期完工的惩罚系数;

$$R_{ijegk} \begin{cases} 1 & \text{工件 } i \text{ 的第 } j \text{ 道工序和工件 } e \text{ 的第 } \\ & g \text{ 道工序在同一台机器 } k \text{ 上执行,} \\ & \text{若工序 } j \text{ 先于工序 } g \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$X_{ijk} \begin{cases} 1 & \text{若工件 } i \text{ 的第 } j \text{ 道工序在机器 } k \text{ 上执行} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

### 2.2 目标函数

以往的车间调度问题的研究大多基于单目标优化,如使工件在系统中的流通时间(Makespan)最短.随着产品生命周期的日益缩短和客户需求水平的不断提高,企业对于准时交货的要求越来越高,产品的提前 / 拖期罚款最少也成为衡量调度系统性能的一个主要目标<sup>[7-10]</sup>.因此,本文在以往研究的基础上,提出双目标 FJSS 模型,在增加系统柔性的同时提高系统的性能水平.主要目标函数如下:

1) 使工件在系统中的流通时间最短

$$\min(MS) = \max_{k=1, \dots, k} (MP_k)$$

2) 对工件提前 / 拖期完工进行的惩罚最小

$$\min P = \sum_{i=1}^N [r_i \times \max(0, D_i - E_{ij,k}) + w_i \times \max(0, E_{ij,k} - D_i)]$$

### 2.3 约束条件

1) 顺序约束——工艺要求的同一工件相邻工序间的加工顺序

$$E_{ijk} - E_{i(j-1)m} \geq m_{ijk} \quad (1)$$

其中  $1 < j \leq J_i, X_{ijk} = X_{i(j-1)m} = 1$

式(1)表示工件  $i$  的第  $j$  道工序必须在第  $j-1$  道工序完成后才能开始.

2) 资源约束——同一机器  $k$  上一个加工任务完成后才能开始另一个任务的加工

$$E_{egk} - E_{ijk} \geq m_{egk} \quad (2)$$

其中  $X_{ijk} = X_{egk} = 1, R_{ijegk} = 1$

式(2)表示任一确定时刻,机器  $k$  不能同时加工任意两个不同的工件,也不能同时加工任意两道不同的工序.

3) 其它约束——任何一道工序的完工时间不能小于其加工时间

$$E_{ijk} \geq m_{ijk}, \forall j \quad \text{其中 } X_{wjk} = 1 \quad (3)$$

## 3 解 FJSS 问题的遗传算法设计

### 3.1 遗传算法流程

运用遗传算法求解 FJSS 模型的总体流程如下:

Step1 设计问题的染色体,随机生成种群规模为  $P$  的初始可行解,即初始的可行调度.

Step2 根据 FJSS 模型的目标函数定义调度

问题的适应度,评价个体的适应度值。

Step3 按某种选择策略选择下一代种群。

Step4 按交叉概率  $P_c$  对种群中未匹配的个体进行交叉操作,生成新个体。

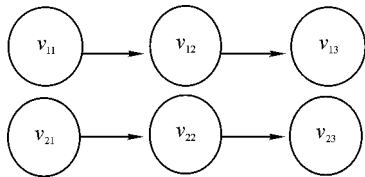
Step5 按变异概率  $P_m$  随机选择个体,进行变异操作生成新个体。

Step6 计算新个体的适应度值,父代个体和子代个体共同参与生存竞争。

Step7 判断算法是否达到终止条件,是则停止算法运行,最优个体为问题的最优解,即最优调度,否则转 Step3。

### 3.2 遗传操作设计

3.2.1 编码与解码 编码是遗传算法实施优化的首要和关键问题。对于机器事先确定的经典调度问题,大多采用基于工序的编码方法。而本文提出的柔性作业车间调度问题的解包含两方面的内容:工序的顺序和机器的选择。因此编码也要反映这两方面的内容,为此提出了新的基于工序和机器的两层编码方案,如图1:



工序	机器
$v_{11}$	$M_1, M_2, M_3$
$v_{12}$	$M_1, M_3$
$v_{13}$	$M_1, M_2, M_3, M_5$
$v_{21}$	$M_1, M_3, M_4, M_5$
$v_{22}$	$M_3, M_5$
$v_{23}$	$M_1, M_5$

	$v_{11}$	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{21}$	$v_{22}$	$v_{23}$
第一层编码	5	2	4	1	6	3
第二层编码	$M_2$	$M_1$	$M_2$	$M_1$	$M_3$	$M_1$

图1 编码方案示意

在图1中,上方的AOV网络图表示了各工件工序的先后关系,共两个工件,每个工件有三道工序,同一工件的工序有先后约束,不同工件的工序之间没有先后约束。第一层编码为各工序的优先权随机数(在 $[1, J]$ 中产生,其中 $J$ 表示总的工序

数),第二层编码是各工序所选择的加工机器,从中间的表中可供选择的机器中随机选出。图中的编码代表了一个染色体,对该染色体进行解码就可以得到一个调度方案。对于上述编码方案的解码主要是排定所有工序的加工顺序。在这里采用结合编码中各工序的优先权随机数对AOV图进行拓扑排序的方法。步骤如下:

Step1 选取没有前驱(入度为零)的工序,如图3.2为 $v_{11}, v_{21}$ 。

Step2 比较选出工序的优先权,如 $v_{11}$ 为5, $v_{21}$ 为1, $v_{21}$ 的优先权高,首先选出 $v_{21}$ ,同时在AOV图中去掉 $v_{21}$ 顶点以及以它为尾的所有有向弧。

Step3 若入度为零的顶点输出完毕,则结束,否则重复Step1和Step2。

按照上述步骤可排定图3.2染色体的工序顺序为 $v_{21}-v_{11}-v_{12}-v_{13}-v_{22}-v_{23}$ ,然后根据各工序选择的机器就可得到每台机器上加工的工序及顺序,即调度问题的一个解: $M_1$ 上的加工顺序为 $v_{21}-v_{12}-v_{23}$ , $M_2$ 上的加工顺序为 $v_{11}-v_{13}$ , $M_3$ 上为 $V_{22}$ 。因为在拓扑排序过程中已经考虑了各工件工序的先后约束,所以得到的调度一定是可行的。

3.2.2 适应度定义和选择策略 计算个体适应度首先要得到个体的目标函数值。FJSS模型是双目标优化模型,因此采用标准化归一处理法:

$$u(f(x)) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x)$$

总的目标函数值等于各个子目标的线性加权和,所以要分别求出各子目标函数的值。在模型中,

$$f_1(x) = MS = \max_{k=1, \dots, k} (MP_k),$$

$$f_2(x) = p = \sum_{i=1}^N [r_i \times \max(0, D_i - E_{ij,k}) + w_i \times \max(0, E_{ij,k})]$$

从前两式可以看出求目标函数的关键在于对所有工件的最后完工时间 $MS$ 和各工件最后完工时间 $E_{ij,k}$ 的计算。调度过程是一个受各种约束条件制约的动态过程,其完成时间不能由简单的解析式直接给出,下面给出利用AOV网络图求 $MS$ 和 $E_{ij,k}$ 的算法。

以根据图1得到的可行解为例,由于调度方案中的工序排列受到工件和机器的双重约束,而图1的AOV网络图只受工件的约束,所以在该图的基础上根据得到的可行解构造新的AOV图。如图2:

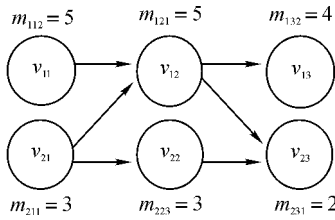


图 2 基于工件和机器约束的 AOV 网络图

图中各顶点上的权  $m_{ijk}$  表示工件  $i$  的第  $j$  道工序在机器  $k$  上的加工时间. 根据 FJSS 问题的假设条件: 在零时刻, 所有的工件都可被加工, 则  $S_{112} = 0, E_{112} = S_{112} + m_{112} = 5, S_{212} = 0, E_{212} = S_{212} + m_{211} = 3$ , 因为  $v_{12}$  必须在  $v_{11}, v_{21}$  加工完成后才能开始, 所以  $v_{121} = \max(E_{112}, E_{212}) = 5, E_{121} = S_{121} + m_{121} = 10$ , 同理可得,  $S_{223} = 3, E_{223} = 6, S_{132} = 10, E_{132} = 14, S_{231} = 10, E_{231} = 12$ . 显然  $MS = 14$ , 工件 1 的最后完工时间  $E_{132}$  为 14, 工件 2 的最后完工时间  $E_{231}$  为 12.

由于在 FJSS 模型中要求目标函数值最小, 为了便于概率选择, 令适应度  $f = \frac{1}{u(f(x))}$ , 选择操作建立在对个体的适应度进行评价的基础之上, 选择策略采用适应度比例选择法计算个体生存概率:

$$p_i = f_i / \sum_{i=1}^M f_i \text{ (其中, } M \text{ 为群体大小, } f_i \text{ 为个体 } i \text{ 的适应度). 然后采用轮转赌法选出新一代种群.}$$

3.2.3 交叉和变异 由于染色体具有两层编码, 因此分别对每一层编码进行交叉操作, 如图 3.

图 3 中交叉操作方法主要是采用从一个父代 (如父代 1) 中随机挑选一个子序列拷贝到子代的相应位置的方法. 对于第一层编码为避免产生不合法染色体, 可以从父代 2 中移走在子代中已有的随机数 4、1, 得到 6、2、3、5, 依次放入子代中. 而对于第二层编码则可以将父代 2 的基因 (除子代中已有的子序列外) 直接拷贝到子代的相应位置.

变异操作相对而言比较简单, 本文中仅对第一层编码进行变异操作, 采用倒置变异的方法. 如图 3, 对于父代 1, 将子序列中的随机数 1、4 反转得到 4、1, 从而得到新个体的第一层编码为 5、2、1、4、6、3.

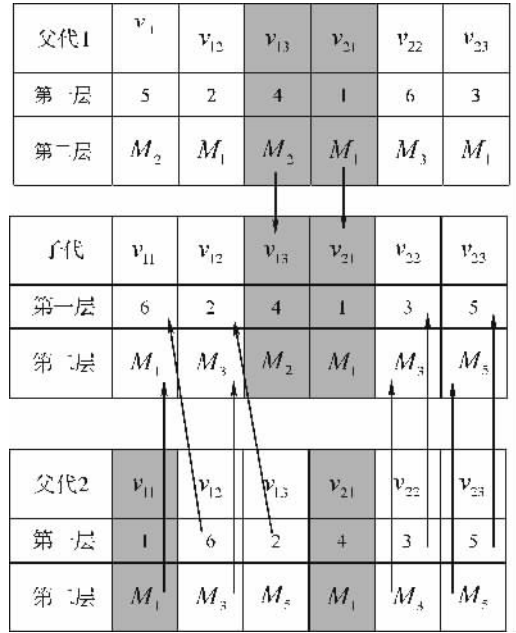


图 3 交叉操作图解

### 4 算法应用实例

对于一个  $n = 8, m = 5$  的作业车间调度问题, 其主要数据如表 1 所示.

表 1 工序加工时间表

工件号	工序号	机器号(加工时间)
1	1	1(5)、2(3)
	2	2(7)
2	1	3(6)
	2	4(3)、5(4)
3	1	2(4)、3(6)
	2	1(7)
	3	4(7)
4	1	5(10)
	5	4(5)
5	2	1(4)、2(5)、3(8)
	3	4(6)、5(5)
	4	5(4)、2(3)
	6	1
6	2	3(8)
	7	1
7	2	4(7)、5(4)
	8	1
8	2	4(9)、5(6)
	3	3(7)
	4	2(3)

遗传算法中的运行参数为: 群体大小  $M = 50$ , 终止代数  $T = 500$ , 交叉概率  $P_c = 0.4$ , 变异

概率  $P_m = 0.1$ . 得到的运行结果如图4所示,此时目标函数值  $MS$  为 30,为问题的最优解.

而采用优先调度法则 SPT(Shortest Processing Time) 法则得到的结果如图5所示,此时目标函数值  $MS$  为 34,从两种算法得到的结果值对比可以看出,遗传算法可以寻找到更优的调度方案.

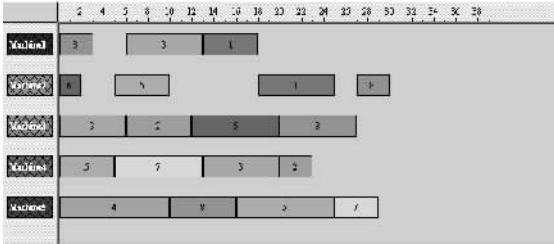


图4 GA 最优调度甘特图

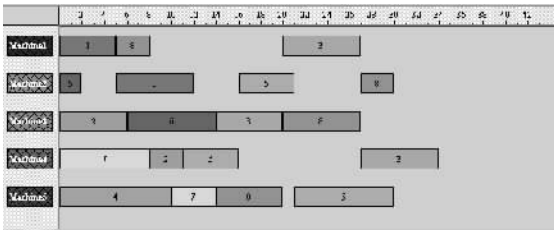


图5 SPT 最优调度甘特图

## 5 结语

针对传统车间调度问题的局限性,结合生产实际情况,对具有路径柔性的作业车间问题展开研究,并考虑现代生产准时制的要求,建立了基于双目标的柔性作业车间调度问题的数学模型,然后利用遗传算法对模型进行解的优化.由于 FJSS

问题的相对复杂性,提出了求解模型的新的染色体两层编码结构,将 AOV 网络图应用到染色体的解码及个体适应度函数的计算中,针对两层编码结构的特殊性给出了相应的交叉、变异操作的设计方法.最后的实例运行结果表明该算法是正确的、有效的.

## 【参 考 文 献】

- [1] 王 凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京:清华大学出版社,2003:1-9.
- [2] 戴绍利,谭跃进,汪 浩. 生产调度方法的系统研究[J]. 系统工程,1999,17(1):41-45.
- [3] 何 霆,刘 飞,马玉林,等. 车间生产调度问题研究[J]. 机械工程学报,2000,36(5):97-102.
- [4] GRAVES S. A review of production scheduling[J]. Operations Research,1981,29(4):646-675.
- [5] 陈 皓,陈铁英. 用遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 兵工自动化,2004,23(4):14-15.
- [6] 周 明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002:1-5.
- [7] 潘全科,罗 翔,朱剑英. 基于准时制的时间-成本双目标作业调度优化[J]. 东南大学学报(自然科学版),2003,33(1):97-101.
- [8] ISHIBUCHI H, MURATA T. A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern C,1998(28):392-403.
- [9] CHANG P C, HSIEH J C, LIN S G. The development of gradual priority weighting approach for the multi-objective flowshop scheduling problem[J]. Int J Prod Econ,2002(79):171-183.
- [10] 蔡 兰,郭顺生,王 彬. 基于交货期的流水线车间调度算法设计与实现[J]. 机械设计与制造,2005(8):161-163.