

# 求解多工艺路线车间调度问题的禁忌-遗传算法

宋存利<sup>1</sup>, 时维国<sup>2</sup>

SONG Cun-li<sup>1</sup>, SHI Wei-guo<sup>2</sup>

1.大连交通大学 软件学院, 辽宁 大连 116028

2.大连交通大学, 辽宁 大连 116028

1. Software Institute, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China

2. Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China

E-mail: scunli@163.com

SONG Cun-li, SHI Wei-guo. TS-GA for solving multi-craft Job-Shop Scheduling. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(26): 227-229.

**Abstract:** Job-Shop Scheduling (JSS) is a NP problem, but the research for Job-Shop Scheduling with multi-craft is more practical. In this paper, the character of the Job-Shop Scheduling with multi-craft is analyzed, a nested algorithm TS-GA is presented, the design idea of TS and the selection, crossover, mutation operator of GA is discussed. The experiment proves the effective and feasible of the TS-GA.

**Key words:** TS-GA; Job-Shop Scheduling (JSS); multi-craft

**摘要:** 车间调度问题是一个 NP 难题, 而多工艺路线的车间调度问题更具有实际的研究意义。从生产实际出发, 在分析了多工艺路线的车间调度问题一般特点的基础上, 提出了一种禁忌-遗传的嵌套算法, 该算法重点讨论了禁忌算法的设计思想及遗传算法中遗传算子的设计。仿真实例说明了算法的有效可行。

**关键词:** 禁忌-遗传算法; 车间调度; 多工艺路线

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.26.069 **文章编号:** 1002-8331(2008)26-0227-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP29

车间作业调度 (Job-Shop Scheduling, JSS) 是一类典型的具有约束满足的调度问题, 它要求在一定的机器集上完成一批工件的调度加工, 每个工件由若干道具有次序约束不重叠的工序完成, 每道工序又有一定的加工时间和唯一的机器需求, 属于强 NP 难题, 对此国内外许多学者都做了大量研究, 如文献[1]提出了运用带有记忆库的遗传算法求解作业车间调度问题; 文献[2]利用线性时间近似算法求解无优先级的 JSP; 文献[3]提出了求解工件车间调度问题的一种新的邻域搜索算法。但是这些研究多是在工艺路线确定的情况下进行, 简化了问题模型。然而在实际的生产调度问题中, 工艺路线有时可能有多条, 且在生产之前无法确定, 要视生产过程中生产设备的情况而定, 这就放宽了约束条件, 扩大了寻优空间, 增加了问题的难度。

工艺路线决定了工件的制造加工路线, 生产调度模块则根据每个零件的工艺路线确定每个零件的加工顺序, 以满足加工性能指标 (如最短加工时间, 高的生产率等), 工艺路线不同, 则调度产生的零件的加工顺序及性能指标的满足状况不同, 因此有必要将工艺路线的选择和具体的生产调度任务有机集成起来, 以便最大限度地满足加工任务的性能指标 (如最短加工时

间等)。本文正是从车间作业调度的实际情况出发, 提出了解决多工艺路线的车间调度问题的禁忌-遗传嵌套算法, 从而将工艺路线的选择和生产调度有机结合。

## 1 问题描述

多工艺路线的车间调度问题的数学模型为:  $N(1, 2, 3, \dots, i, \dots, n)$  个工件在  $M(1, 2, \dots, j, \dots, m)$  台设备上加工。工件  $i$  可选的工艺路线数为  $P_i$  条, 其中第  $j$  条工艺路线的工序数为  $P_{ij}$ , 沿其第  $j$  条工艺路线加工其第  $k$  道工序的加工设备为第  $L$  个设备, 加工时间为  $T_{ijkl}$ , 在设备  $L$  上的开始加工时间为  $S_{ijkl}$ , 完工时间为  $F_{ijkl}$ , 按最小化完工时间作为调度目标, 则调度问题就是为每个工件选择相应的加工工艺路线, 安排工件在设备上的加工顺序, 确定每个设备的最后完工时间, 则最大的完工时间就是本问题的最小完工时间。这里:

$$P_i \geq 1, P_{ij} \geq 1 \quad (1)$$

$$F_{ij(k-1)i} \leq S_{ijkl} < F_{ijkl} \quad (0 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq P_i, 2 \leq k \leq P_{ij}) \quad (2)$$

$$F_{ijkl} = S_{ijkl} + T_{ijkl} \quad (0 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq P_i, 1 \leq k \leq P_{ij}) \quad (3)$$

本问题的最小化完工时间就是:

**基金项目:** 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.50475156)。

**作者简介:** 宋存利 (1975-), 女, 研究方向: 智能控制、生产作业调度等方面的研究; 时维国 (1973-), 男, 研究方向: 智能控制、优化算法等。

**收稿日期:** 2007-11-01 **修回日期:** 2007-12-27

$$\text{makespan}=\max\{F_{jki}|其中 0\leq i\leq N, 1\leq j\leq P_i, 1\leq k\leq P_{ij}, 0<L\leq M\} \quad (4)$$

通过数学模型可以看出本问题首先应该确定每个零件的工艺路线,然后在此基础上进行生产调度,安排每个零件在每台设备上的加工顺序。对此,本文设计了嵌套的禁忌-遗传算法,首先利用禁忌算法搜索零件的工艺路线,按后在工艺路线确定的情况下用遗传算法确定每个工件的加工顺序。算法集中讨论了禁忌算法的设计思想和遗传算法的编码规则,交叉变异算子的设计;最后通过一个实际生产调度任务进行了调度仿真,表明算法的有效可行。

## 2 禁忌-遗传算法的设计

### 2.1 禁忌算法的设计

禁忌搜索(Tabu Search, TS)的思想最早由 Glover(1986)提出,它是对局部邻域搜索的扩展,是一种局部逐步寻优算法,然而传统的 TS 算法有一些缺陷<sup>[10]</sup>如:对初始解有较强依赖性;只对一个解进行串行操作,容易陷入局部最优等。针对这些问题,本文设计了一种并行 TS,下面给出并行 TS 算法的详细描述:

(1)解的编码及规模。编码问题是 TS 算法的首要问题,根据 TS 算法的目的是对每个待加工工件选择一条有效工艺路线,因此编码采用自然数编码,共有  $n$  个待加工工件,编码长度为  $n$ ,第一个自然数对应的是第一个工件工艺路线的可选自然数,第  $i$  个自然数对应的是第  $i$  个工件工艺路线的可选自然数。例如,对于有  $N$  个待加工工件,每个工件可选的加工工艺路线有  $(P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n)$ ,其中  $P_i (P_i \geq 1)$  代表第  $i$  个待加工工件的工艺路线数,则  $N$  个待加工工件的工艺路线编码为  $(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ ,其中  $1 \leq a_i \leq P_i$ ,这表明工件 1 选择的工艺路线为第  $a_1$  条,工件  $i$  选择的加工工艺路线为第  $a_i$  条。同时为了使 TS 有一个好的出发点,对每个工件的多条工艺路线按照加工时间长短进行自然数编码,如工件 1 的最短加工工艺路线为 1,其次为 2,3 等等。这样在生成算法的初始解群时,对每个工件尽量采用较小的工艺路线编码,初始解群规模定为  $n$ 。

(2)适配值函数。本问题的适配值函数为本组工艺路线安排下经遗传算法产生的最小化完工时间。

(3)邻域生成函数。邻域函数采用变异操作,就是随机选择一个发生变异的基因,让其在对应的可选工艺路线内发生突变来产生新的染色体,这有助于算法搜索到新的邻域。

(4)禁忌表。选用适配值作为问题的禁忌对象,对每个不同的初始解都设置一个禁忌表。

### 2.2 遗传算法描述

遗传算法是由 Holland 提出的基于自然选择和遗传学机理的搜索寻优法,它是通过基因编码,利用选择、交叉、变异 3 个基本算子,在种群中进行全局寻优,将该算法用于调度问题,关键要解决两个问题,一是基因代码如何编制,另一个是遗传算子如何设置。

针对本问题设置的遗传算法是嵌套在禁忌搜索算法之中的,它的主要目标是针对禁忌搜索算法确定的一组工艺路线,利用遗传算法计算出所有工件沿着这组工艺路线生产时的最小化完工时间,因此此处的遗传算法可采用传统的解决 JSS 问题的一般遗传算法,也可重新设计,本文中给出了一种新的遗传算法来求解该问题。

#### (1)遗传编码及解码算法

本文编码采用基于工序的编码方案。根据活性调度<sup>[11]</sup>的概念,本文给出一个可行的满足活性调度的解码算法。首先按照染色体中工件工序的先后顺序来安排工件的工序进行加工,不过这样产生的调度为半活性调度,要想产生活性调度,则在安排工件  $i$  的工序  $i_k$  时,首先要查看此工序的前一道约束工艺的加工结束时间(设为  $t_{i(k-1)}$ ),待安排的工件工序只能安排在它的上一道约束工艺加工结束时间  $t_{i(k-1)}$  之后,同时,为了产生活性调度,还要查看加工此工序的加工机器在此工序的上道约束工序加工结束之后和本机器上目前为止的最后一个加工任务开始之前是否有满足此道工序加工时间的空闲时间,若有,则把此道工序安排在本机器尽可能在前的空闲时间上,若无,在把此道工序安排在本机器的目前为止的最后一道加工任务结束之后,并且必须要保证  $t_{ik} \geq t_{i(k-1)}$ 。

#### (2)选择适值函数

在本文中,为了提高算法运行速度,选取目标函数作为适值函数,这样对每个染色体适值的计算就可减少一次除法运算。

#### (3)选择

本文采用跨世代精英选择和最有保留策略,即上世代种群与通过交叉、变异产生的新的个体种群混合起来,从中按一定概率选择优良个体组成新的下一代种群,同时最优染色体直接进入下一代中。

#### (4)交叉算子(Crossover)

该操作的目的是产生新个体,从而增加搜索到更优个体的机会。为保证交叉后产生的后代是可行调度,同时又能继承父代的特性,本文设计的交叉算子步骤如下:

**步骤 1** 首先根据交叉概率,选择要交叉的两个父代染色体  $p_1$  和  $p_2$ ;

**步骤 2** 对于  $n$  个工件的编号组成的序列,随机的划分成两个工件序列集  $q_1$  和  $q_2$ ;

**步骤 3** 将父代染色体  $p_1$  中包含在工件序列集  $q_1$  中的基因按其在父染色体  $p_1$  中的基因座位置复制到子代染色体  $y_1$  中,将包含在集合  $q_2$  中的基因按其在父染色体  $p_2$  中的顺序依次填充到子代染色体  $y_1$  中,这样就产生了第一个子代染色体;

**步骤 4** 将父代染色体  $p_2$  中包含在工件序列集  $q_1$  中的基因按其在染色体  $p_2$  中的基因座位置复制到子代染色体  $y_2$  中,将包含在集合  $q_2$  中的基因按其在父染色体  $p_1$  中的顺序依次填充到子代染色体  $y_2$  中,这样就产生了第二个子代染色体。

例如:选中两个父染色体  $p_1$  和  $p_2$  如下:

$p_1: 1\ 2\ 4\ 3\ 1\ 4\ 3\ 1\ 4\ 3\ 2\ 2$

$p_2: 2\ 3\ 1\ 4\ 4\ 2\ 1\ 1\ 3\ 2\ 3\ 4$

从染色体中可以看出,要加工工件总共是 4 个,其对应编号应为:1、2、3、4,随机把它划分成两个集合为  $q_1=\{3\}, q_2=\{1, 2, 4\}$ ,则交叉操作后,产生的两个子代染色体为:

$y_1: 2\ 1\ 4\ 3\ 4\ 2\ 3\ 1\ 1\ 3\ 2\ 4$

$y_2: 1\ 3\ 2\ 4\ 1\ 4\ 1\ 4\ 3\ 2\ 3\ 2$

#### (5)变异算子

此处采用的变异操作为随即产生 1 个长度为染色体编码长度 20%的数,随机产生两个基因片段起始点,交换两基因片段,得到新的染色体,将新染色体增加到染色体群体中。

### 2.3 禁忌-遗传算法总体步骤

**步骤 1** 根据设定的规则随机产生 TS 算法的初始解  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 禁忌表为空, 对每个初始解, 即为一组给定的工艺路线, 调用遗传算法计算每个初始解的适配值。

**步骤 2** 判断算法终止条件是否满足, 若满足, 输出结果, 算法结束, 否则转步骤 3。

**步骤 3** 对每个初始解  $x_i$ , 利用邻域函数寻找其邻域候选解, 具体步骤为: 设  $i=0$ 。

**步骤 4** 判断  $i < n$  是否成立, 若成立, 则转步骤 2, 否则继续。

**步骤 5** 按照变异、交叉两种方式产生  $x_i$  的邻域解, 对每个邻域解, 即为一组给定的工艺路线, 调用遗传算法计算每个邻域解的适配值, 确定出候选解。

**步骤 6** 选择最佳的非禁忌解或满足特赦规则的解代替  $x_i$ 。

**步骤 7** 更新禁忌表,  $i=i+1$ , 转步骤 4。

### 3 实例仿真

假设客户向制造企业提交了 6 个不同的制造任务, 各制造任务的最大的工序数为 6, 同时负责该加工任务的设备有 6 台, 每个任务可行的工艺路线描述如表 1 所示。表 1 中圆括弧内的第一个数字加工任务对应工序的加工设备, 第二个数字表示加工时间, 例如工件 J1 对应的第一条工艺路线中(2,5)表示沿工件 J1 的第一条工艺路线, 加工其第一道工序的设备为编号为 2 的设备, 加工时间为 5。

表 1 制造任务的工艺路线描述

任务编号	工艺路线编号	可行工艺路线					
		O1	O2	O3	O4	O5	O6
J1	1	(2,5)	(4,6)	(6,8)			
	2	(3,5)	(4,5)	(5,6)	(6,4)		
J2	1	(2,4)	(1,2)	(4,3)	(3,2)	(5,4)	
	1	(1,7)	(3,8)	(5,9)			
J3	2	(2,7)	(1,6)	(5,6)	(3,6)		
	3	(3,6)	(4,7)	(5,8)	(6,8)		
J4	1	(1,5)	(3,7)	(6,5)			
	2	(3,6)	(2,4)	(4,5)	(5,3)		
J5	1	(1,3)	(2,4)	(3,4)	(5,3)	(4,5)	
	2	(2,5)	(5,7)	(3,9)			
J6	3	(1,3)	(4,3)	(2,5)	(3,4)	(5,6)	(6,4)
	1	(1,4)	(3,6)	(4,5)	(6,7)		
J6	2	(2,6)	(5,8)	(6,9)			

利用嵌套的禁忌-遗传算法, 对上述问题进行仿真调度, 其中设定外层并行 TS 算法的种群规模为 6, 邻域函数的变异概率 0.35; 遗传算法的种群  $P=50$ , 交叉概率  $PC=0.85$ , 变异概率

(上接 226 页)

### 5 结束语

本文建立了一个基于高速图像采集设备、频率发生器、运动控制部件和虚拟仪器技术的喷墨质量自动检测系统, 为喷墨墨滴的数字化和可视化提供了有效的工具。实验表明, 该系统能够实时有效的完成墨滴图像的采集和处理, 实现了喷墨质量的自动检测。系统对墨滴的检测和方法, 可以应用于其它类似微粒。根据实际需要, 可在本系统结果数据的基础上实现对喷头喷墨行为的动态数学建模。该系统还可作为大型喷墨印刷机的自诊部件。

$pm=0.05$ , 最大迭代代数 50。仿真结果见表 2 所示, 由此得出本问题的最优工艺路线为 111212, 生产调度 6 个工件的最长加工时间为 34。根据统计, 相对于其他工艺路线最优调度, 本调度可最大节约时间 9, 最少节约 2, 平均节约时间 4.35。

表 2 仿真结果

任务编号	最佳工艺路线	每道工序的开工与完工时间						最后完工时间
		O1	O2	O3	O4	O5	O6	
J1	1	10-15	15-21	23-31				31
J2	1	6-10	10-12	12-15	15-17	27-31		31
J3	1	0-7	7-15	15-24				24
J4	2	0-6	19-23	23-28	31-34			34
J5	1	7-10	15-19	19-23	24-27	28-33		33
J6	2	0-6	6-14	14-23				23

### 4 结论

在分析了工件工艺路线对生产调度的影响的基础上, 提出了针对具体生产任务, 动态确定工件加工路线的禁忌-遗传算法, 在利用禁忌算法确定工件加工路线的基础上, 再利用遗传算法确定出生产完成所有加工工件的最小化完工时间, 两者互为因果, 互相支撑, 很好地解决了当前制造环境中具备多工艺路线的任务的优化调度问题, 提高了企业的生产效率, 克服了传统方式下根据经验为每个工件首先从多条工艺路线中选择一条较优的加工路线, 然后不管今后任务如何变化, 工件的工艺路线不变的调度方式。实例仿真结果表明, 本算法实现了工艺路线的选择和生产调度有机结合, 调度结果令人满意。不足之处在于和单纯的求解调度问题的遗传算法相比, 本算法运行效率稍低。

### 参考文献:

- [1] 冯奇峰, 李言. 运用带有记忆库的遗传算法求解作业车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(8): 1143-1146.
- [2] Holthaus O, Ziegler H. Improving job shop performance by coordinating dispatching rules[J]. International Journal of Production Research, 2004, 35: 539-549.
- [3] 王磊, 黄文奇. 求解工件车间调度问题的一种新的邻域搜索算法[J]. 计算机学报, 2005, 28(5): 809-815.
- [4] 潘全科, 朱剑英. 一类解决 Job Shop 问题的禁忌搜索算法[J]. 中国机械工程, 2006, 17(25): 536-539.
- [5] 叶林. 面向多制造任务的工艺路线优化决策方法研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(9): 911-918.
- [6] 姜思杰, 徐小飞. 一类资源负荷均衡问题的优化调度算法[J]. 高技术通讯, 2000, 10(11): 50-52.
- [7] Glover F, Kelly J, Laguna M. Genetic algorithm and tabu search: hybrids for optimizations[J]. Computers and Ops Res, 1995, 22(1): 111-134.

### 参考文献:

- [1] Kripfgans O D, Fowlkes J B, Carson P L. High speed imaging of acoustic vaporization of single droplets[C]// Ultrasonics Symposium, 2001 IEEE, 7-10 Oct 2001, 2: 1323-1326.
- [2] iTi Corporation. Drop watcher user manual V4.7[Z]. 2006.
- [3] Spectra Inc. Apollo II printhead support kit installation and operations guide[Z]. Jan 2005.
- [4] National Instruments. IMAQ PCI/PXI™-1407 User Manual [Z]. Aug 2001.
- [5] Siam Koki Co. Ltd. Two-axis stage controller SHOT-102 User's Manual [Z]. May 2004.
- [6] 汤连春, 李海燕, 陈建华. 基于局部特征的人脸检测与提取[J]. 计算机工程, 2007, 33(10).