

DOI: 10.3901/JME.2008.10.024

# 一种新调度类型及其在作业车间调度中的应用\*

张超勇 管在林 刘琼 邵新宇 李培根

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074)

**摘要:** 研究改进遗传算法解决作业车间调度问题, 问题染色体的编码采用基于工序的编码。针对传统的调度类型的局限性, 提出全主动调度及其基于工序编码的产生机制。为了克服传统遗传算法求解调度问题易于早熟收敛的缺点, 设计基于优先工序交叉(Precedence operation crossover, POX)和改进子代产生模式的遗传算法。用改进的遗传算法求解传统调度问题、交货期调度问题和提前/拖期(Earliness/Tardiness, E/T)调度问题, 研究半主动、主动和全主动三种不同的调度解码机制对遗传算法提供解质量的影响。

**关键词:** 作业车间调度 遗传算法 交货期调度 E/T 调度问题

**中图分类号:** TP301

## New Scheduling Type Applied to Solving Job-shop Scheduling Problem

ZHANG Chaoyong GUAN Zailin LIU Qiong SHAO Xinyu LI Peigen

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract:** An improved genetic algorithm (GA) is presented for the job-shop scheduling problem, and the chromosome representation of the problem is based on the operation-based representation. In view of the limitation of the traditional types of scheduling, a new type of scheduling—full active schedule (FAS) and the schedule generation procedure based on the operation-based representation are presented. In order to avoid premature convergence of the conventional GA, the precedence operation crossover (POX) and approach of the generation alteration model are proposed for the improved GA. The improved GA is applied to solving the classical scheduling, due-dates scheduling and E/T scheduling problems, and the effectiveness of the active schedule, semi-active schedule and full active schedule decoding procedures for optimization algorithm is studied.

**Key words:** Job-shop scheduling Genetic algorithm Due-dates scheduling Earliness/Tardiness scheduling problem

## 0 前言

为了理论研究的需要, 经典作业车间调度问题(Job-shop scheduling problem)对实际调度问题做了较大简化, 例如, 所有零件均在零时刻到达; 每个零件在加工过程中经过每台机器, 且只经过一次。此外, 调度问题的性能指标一般为最大完工时间 $C_{\max}$ 最小。在实际应用中, 许多其他类型的调度问题, 如交货期调度、提前/拖期(Earliness/Tardiness, E/T)调度问题、柔性作业车间调度问题等, 受到越来越多的关注, 它们可视为是经典 Job-shop 调度问

题的发展, 更能反映现实生产调度的实际情况。调度是制造企业生产实现高效率、高柔性和高可靠性的关键, 对它们的研究具有重大的现实和理论意义。

然而, Job-shop 调度问题是最困难的组合优化问题之一, 不可能找到精确求得最优解的多项式时间算法<sup>[1]</sup>。鉴于此, 人们将研究目标转向各种启发式方法, 如遗传算法(Genetic algorithms, GA)、禁忌搜索算法(Tabu search, TS)粒子群优化算法(Particle swarm optimization, PSO)等<sup>[2]</sup>。遗传算法<sup>[3]</sup>根据个体的适应度值进行搜索, 不受限制条件的约束, 具有操作简单、高效性、鲁棒性和通用性强等特点, 在解决实际生产的调度问题中, 受到普遍的关注。尽管国内外许多研究者对其进行了研究<sup>[4-6]</sup>, 然而传统遗传算法解决调度问题并不很成功。目前部分研究者将遗传算法搜索调度解的空间限制在主动调度,

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2005CB724107)和国家高技术研究发展计划(863 计划, 2007AA04Z107, 2007AA04Z190, 2006AA04Z131)资助项目。20071128 收到初稿, 20080623 收到修改稿

取得较好的效果<sup>[5]</sup>。然而对于传统性能指标的调度问题，遗传算法求解效率与禁忌搜索算法等局部搜索算法仍有差距(禁忌搜索算法等局部搜索算法的求解效率取决于调度模型，解决非传统性能指标的调度问题难度较大)。

本文在传统调度类型的基础上，提出了一种全主动调度及其产生机制，进一步减少了遗传算法搜索的解空间。并根据实际生产调度问题的需要，设计改进遗传算法求解非传统的 Job-shop 调度问题，验证提出调度类型实际应用的可行性。

## 1 全主动调度及解码机制

### 1.1 全主动调度

在不考虑任何两道连续工序存在闲置时间的情况下，传统调度问题包括以下三种类型<sup>[7-8]</sup>：半主动调度、主动调度和无延迟调度。半主动调度为在不改变机器上加工顺序的条件下，没有操作可以提前；主动调度为在不推迟其他操作或破坏优先顺序的条件下，没有一个操作可以提前进行加工。

为了清楚地解释传统的调度类型，表 1 给出 2 个工件在 2 台机器上加工的调度问题(1)。图 1a 和 1b 分别显示了用机器甘特图表示的该调度问题的两个可行解，图 1 中用(Ja, b)命名每一道工序，这里工件编号 Ja 为工件，b 为工件第几道工序。可以看出，图 1a 中的解为半主动调度，即在不改变每台机器上工序加工顺序的条件下，没有操作可以提前；图 1b 为主动调度，通过左移工序(J1, 2)至工序(J2, 2)左侧，但不推迟其他操作或破坏优先顺序的情况下获得，其最大完工时间从 11 缩短为 8。

表 1 2 个工件在 2 台机器上加工的调度问题(1)

工件	机器顺序		加工时间	
	工序 1	工序 2	工序 1	工序 2
J1	M2	M1	2	3
J2	M2	M1	4	2

主动调度能通过左移半主动调度的工序但不延迟其他任何工序获得，这种移动被称为可允许左移。一个不存在可允许左移工序的半主动调度就是主动调度。因此，主动调度集包含在半主动调度集中。对于正规调度性能指标，(如果目标函数是完工时间的非减函数，则称为正规性能指标)，如最大完工时间  $C_{max}$  等。业已证明最优调度必在主动调度集中<sup>[3]</sup>。无延迟调度集虽比主动调度集小，但这不能保证其包括最优解。因此，在设计优化算法时，将搜索空间限于主动调度集，不仅能保证最优调度存在，而且能提高搜索效率。

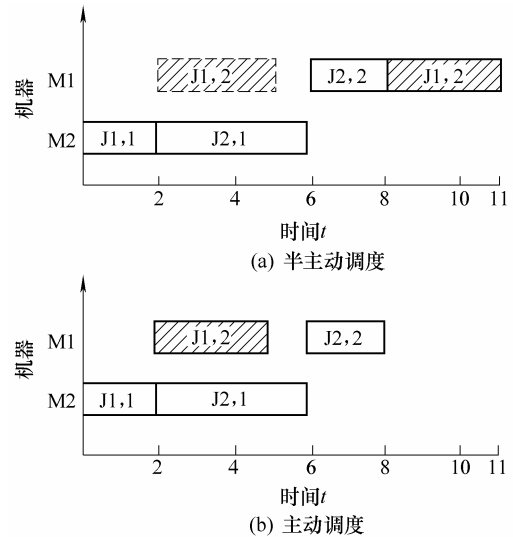


图 1 半主动调度转化主动调度

虽然把半主动调度转化为主动调度能缩短最大完工时间，但主动调度集通常也非常巨大并且包含许多存在大量延迟时间的调度。例如，考虑由表 2 所示的 2 个工件在 2 台机器上加工的调度问题(2)，图 2a 显示的机器甘特图是该调度问题的一个主动调度解，即不存在可允许左移的工序来缩短其最大完工时间。通过右移图 2a 中的工序(J1, 1)到工序(J2, 1)右侧，但不推迟其他操作或破坏优先顺序的情况下可获得图 2b 中的调度，其最大完工时间从 11 缩短为 9。从图 2 可以看出，通过右移主动调度的工序有时能有效缩短调度的最大完工时间。

表 2 2 个工件在 2 台机器上加工的调度问题(2)

工件	机器顺序		加工时间	
	工序 1	工序 2	工序 1	工序 2
J1	M2	M1	2	4
J2	M2	M1	2	3

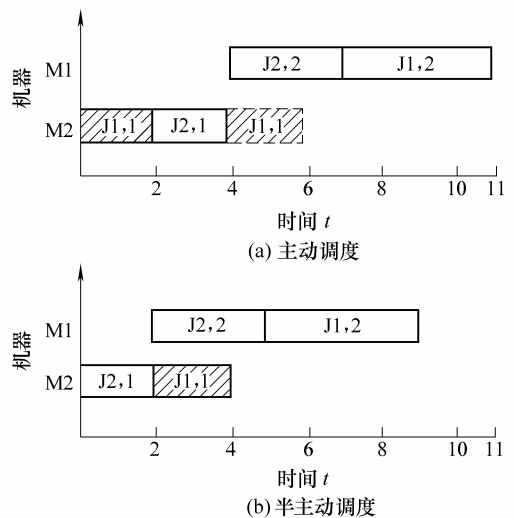


图 2 主动调度转化全主动调度

本文提出一种新的调度类型——全主动调度。

全主动调度可定义为一个不存在可允许左移和右移工序的调度。全主动调度能通过右移主动调度的工序但不延迟其他任何工序获得,因而全主动调度集是主动调度集的子集,全主动调度与传统调度类型的关系如图 3 所示。

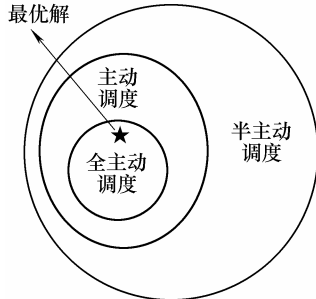


图 3 全主动调度与传统调度类型的关系图

对于正规调度性能指标,最优调度解必在主动调度集中;而全主动调度的最大完工时间小于或等于其对应的主动调度,因此最优调度解必在全主动调度集中。因此,可以推导出以下定理:对于正规性能指标的调度问题,最优调度解必在全主动调度集中。

对于正规性能指标的调度问题,在设计优化算法时,把搜索空间限于全主动调度集,能比主动调度进一步缩小搜索的解空间,这样不仅能保证最优解存在,而且更能提高搜索效率和得到高质量的解。

## 1.2 编码机制

编码是解的遗传基因表示,是遗传算法实施优化成功与否的关键。基于工序的编码具有任意置换染色体后总能得到可行调度、避免死锁、适用于不同种类的调度问题和能解码为主动调度等优点,是目前遗传算法求解 Job-shop 调度问题最常用的方法。这种编码方式是将每个工件的工序用相应的工件序号表示,然后根据在染色体中出现的次序编译。对于一个  $n$  个工件在  $m$  台机器加工的传统调度问题,其染色体由  $n \times m$  个基因组成,每个工件序号只能在染色体中出现  $m$  次,从左到右扫描染色体,对于第  $k$  次出现的工件序号,表示该工件的第  $k$  道工序。

## 1.3 半主动和主动解码机制

以表 1 中 2 个工件、2 台机器上的调度问题(1)为例,设它的一个染色体为[1 2 2 1],则“1”表示工件 J1,“2”表示工件 J2。染色体中的 2 个“1”依次表示工件 J1 的 2 个工序,分别为工序 1、工序 2; 2 个“2”依次表示 J2 的 2 个工序;该染色体对应的机器序列为[2 2 1 1],对应的加工时间序列为[2 4

2 3]。按一般解码方式,依次从左到右将染色体上的工序都安排完为止,可产生染色体对应的半主动调度如图 1a 所示,其最大完工时间  $C_{\max}=11$ 。

按照一般解码方式只能得到半主动调度,而不是主动调度。本文介绍一种插入式贪婪解码算法,能确保染色体经过解码后产生主动调度<sup>[5]</sup>。插入式贪婪解码方法的描述如下。首先将染色体看作工序的有序列,根据工序在该序列上的顺序进行解码,序列上第 1 道工序首先安排加工,然后取序列上第 2 道工序,将其插入到对应机器上最佳可行的加工时刻安排加工,以此方式直到序列上所有工序都安排在其最佳可行的地方。因此,应用插入式贪婪解码算法,工序(J1, 2)最佳可行开始加工的时间在 2 时刻,该染色体解码后可产生图 1b 所示的主动调度,最大完工时间  $C_{\max}$  缩短为 8。最后,可得到该主动调度对应的主动染色体[1 2 1 2]。

## 1.4 全主动调度解码机制

在第 1.3 节中提到的插入式贪婪解码算法仅能产生主动调度,而不是全主动调度。本文提出一种基于工序编码的全主动解码方式,可产生全主动调度。下面对提出的全主动解码方式进行详细介绍。

对于一个给定的主动调度,通过反转该调度基于工序编码的染色体及问题的工艺路线(包括加工时间),并按半主动解码方式对反转的染色体进行解码,可将原来的主动调度转化成一个新调度,这个新调度与原来的主动调度在每台机器上的工件加工顺序相反,并且拥有相同的关键路径和最大完工时间,本文将这个新调度称为反转调度。通过应用插入式贪婪解码算法左移这个反转调度的工序,就能得到全主动调度。

为了详细说明这种机制,以表 2 给出的调度问题(2)为例,图 2a 中的给定主动调度的染色体为[1 2 2 1]。通过反转该染色体和调度问题的工艺路线(反转工艺路线如表 3 所示),并用半主动解码方式对反转的染色体[1 2 2 1]进行解码,可将图 2a 中的给定主动调度转化为图 4a 中所示的新调度,这个新的调度即为反转调度。反转调度与原给定调度的最大完工时间相等,每台机器上工件的加工顺序相反,通过左移反转调度的工序就能得到全主动调度,如图 4b 所示。综上所述,本文提出的全主动解码方式为将插入式贪婪解码算法应用到给定主动调度的反转染色体和反转工艺路线,就能得到全主动调度。此外,必须注意在图 4b 中的染色体序列和每台机器的工件加工顺序与图 2b 的是相反的。

表 3 表 2 所示调度问题(2)工艺路线  
反转生产的调度问题

工件	机器顺序		加工时间	
	工序 1	工序 2	工序 1	工序 2
J1	M1	M2	4	2
J2	M1	M2	3	2

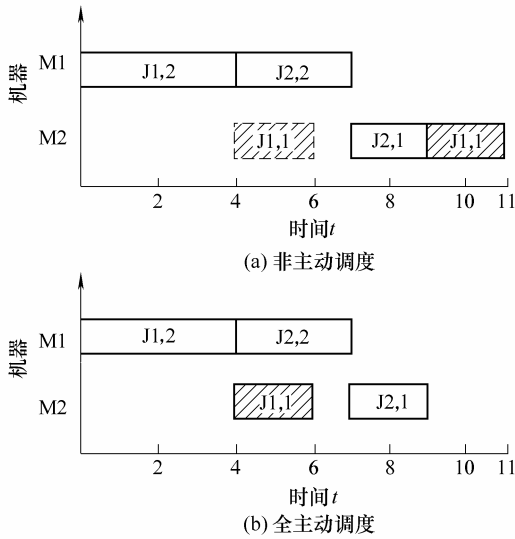


图 4 全主动调度解码产生机制

## 2 通过改进遗传算法求解非传统 Job-shop 调度问题

目前大部分文献应用基于工序编码的遗传算法求解的是传统 Job-shop 调度问题<sup>[3, 6, 9-11]</sup>。但是为了理论研究的方便,传统 Job-shop 调度问题对实际问题进行了简化。为了适应实际生产的需要,本文对以前求解传统 Job-shop 调度问题的遗传算法研究进行改善,用遗传算法求解非传统调度问题(也叫非规则调度),它们是一些带特殊要求或特殊约束的实际应用的 Job-shop 调度问题。

与传统的 Job-shop 调度问题不同,非传统的 Job-shop 调度问题,在模型上突破了传统 Job-shop 调度问题的某些假设,如一个工件可以被某台机器多次加工或不加工;引入了由实际生产需要所要求的性能指标,如总拖期时间最小或提前/拖期惩罚代价最小。因此,为了更有效解决实际生产问题,本文应用改进遗传算法求解不同性能指标调度问题,研究半主动、主动和全主动三种不同的调度解码机制对最终解质量的影响。下面介绍改进遗传算法求解非常规调度问题。

### 2.1 编码和解码

为了便于理论研究,传统 Job-shop 调度问题假

设每个工件只能被一台机器加工一次。但是在实际生产中,一个工件可能被某台机器多次加工或不加工。对于这种调度问题,遗传算法的编码仍可采用基于工序的编码。

表 4 显示了一个 3 个工件在 3 台机器上加工的调度问题,其工件能被某台机器多次加工或不加工。在基于工序编码的染色体中,每个工件的工序都用相应的工件序号表示,因此在染色体的基因中有 3 个 1、2 个 2 和 4 个 3。设它的一个染色体为[1 2 1 3 3 1 3 2 3],该染色体对应的机器序列为[1 3 2 2 3 1 1 1 2],对应的加工时间序列为[3 2 2 2 2 3 3 2 4]。采用第 1.3 和 1.4 节的半主动、主动和全主动解码机制,可分别获得染色体对应的半主动调度、主动调度或全主动调度。图 5a~5c 的机器甘特图分别显示了该染色体对应的半主动调度、主动调度和全主动调度,它们的最大完工时间依次缩短为 16、15 和 12。

表 4 3 个工件在 3 台机器上加工的调度问题

工件	机器顺序(加工时间)			
	工序 1	工序 2	工序 3	工序 4
J1	1(3)	2(2)	1(3)	—
J2	3(2)	1(2)	—	—
J3	3(2)	3(2)	1(3)	2(4)

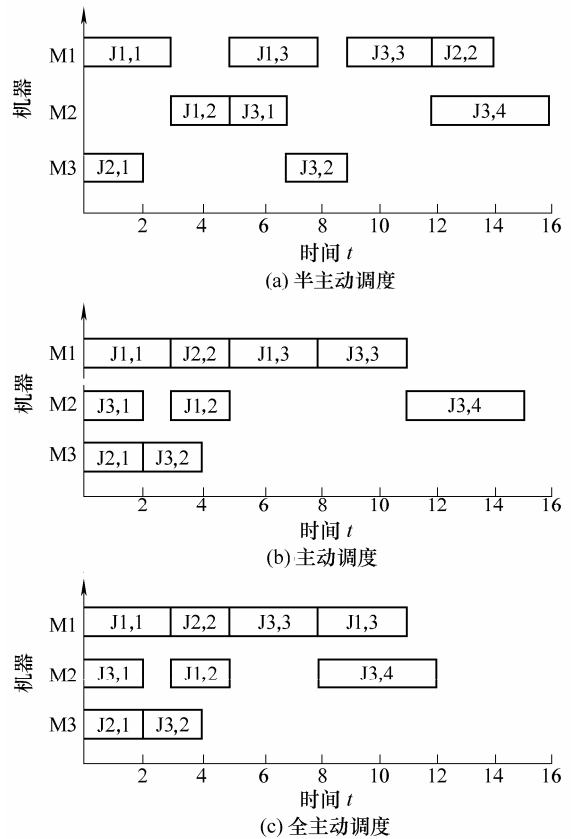


图 5 三种解码方式分别得到的半主动、主动和全主动调度

## 2.2 交叉操作

交叉是遗传算法中最重要的操作,其决定了遗传算法的全局搜索能力。根据模式定理,遗传算法优化基于以下特性:若一个个体的适应度较好,那么基因链码中的某些相邻关系片段是好的,并且由这些链码所构成的其他个体的适应度也较好。而 Job-shop 调度问题具有如下属性:如果机床  $m$  上加工相邻工件  $(i, j)$  所得到的解的指标比较好,那么包含这一顺序  $(i, j)$  的其他很多解的指标也比较好。因此,基于上述特点可应用遗传算法求解调度问题和设计有效的交叉操作,并且好的交叉操作可同时应用于不同的性能指标。

本文采用张超勇等提出的 POX 交叉操作<sup>[8]</sup>,该交叉算子的操作过程如下。把所有的工件随机分成两个集合  $P_1$  和  $P_2$ ,染色体子代 1/子代 2 继承父代 1/父代 2 中集合  $P_1$  内的工件所对应的基因,子代 1/子代 2 其余的基因位则分别由父代 2/父代 1 删除已经继承的基因后所剩的基因按顺序填充,POX 交叉操作过程如图 6 所示。

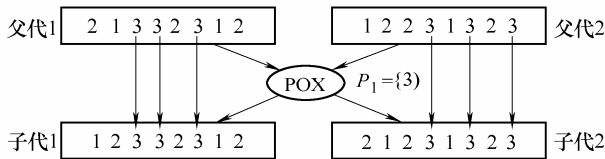


图 6 POX 交叉操作

## 2.3 变异操作

变异是由对染色体较小的扰动产生,目的是为了保持群体的多样性。传统调度问题的遗传算法变异有交换、插入和逆转操作。本文采用交换和插入操作,使用概率各为 50%,其中交换操作是随机交换染色体中两个不同基因的位置;插入操作是随机选择某个基因插入到染色体串中不同随机的位置。

## 2.4 选择操作

选择操作是根据个体适应度值的优劣程度决定它在下一代是淘汰还是遗传。这里选择操作采用最佳个体保存<sup>[12]</sup>和锦标选择<sup>[13]</sup>两种方式。最佳个体保存方法就是把群体中适应度高的个体不经配对交叉而直接复制到下一代。锦标选择是从种群中随机选择两个个体,如果随机值  $r$  (在  $0 \sim 1$  之间随机产生) 小于给定概率值  $k$  ( $k$  是一个固定参数,一般取  $k=0.8$ ),则选择优的一个,否则就选择另一个。被选择的个体放回到种群,可以重新作为父代染色体参与选择。

## 2.5 适应度指标函数

传统 Job-shop 调度问题的性能指标通常为最大完工时间  $C_{\max}$  最小,本文还研究另外两种实际生产中也常遇到的两种性能指标:基于交货期调度的总拖期时间最小和基于 E/T 调度问题的提前/拖期惩罚代价最小。

### 2.5.1 交货期调度问题的目标函数

在单件、小批量、多品种的生产形式下,有交货期的调度问题是在实际车间生产中经常遇到。交货期的延误往往可能导致超期惩罚、失去客户好感和损害企业信誉等一系列严重后果,对企业的市场竞争力造成直接的负面影响。本节主要考虑交货期调度问题中最常用的性能指标,即总拖期时间最小。

假定每个工件  $J_i (i=1,2,3,\dots,n)$  的交货期时间为  $D_i$ ,实际完工时间为  $C_i$ 。则每个工件  $J_i$  的拖期时间为  $\max\{0, C_i - D_i\}$ ,那么总拖期时间最小的适应度函数为

$$\min \left( \sum_{i=1}^n \max(0, C_i - D_i) \right)$$

### 2.5.2 E/T 调度问题的目标函数

E/T 调度问题的提出是为了适应准时制生产模式的需要。准时制生产模式的基本内容是,从企业经济效益即利益的角度来考虑,对产品(即工件)的加工应该以满足交付期为目标,即不是加工完成得越早越好,也不应该出现拖期的现象。这是因为,提前完成会导致库存费用增加,而拖期完成会受到合同惩罚<sup>[14]</sup>。本节考虑基于交货期窗口的 E/T 调度问题,优化目标为提前/拖期惩罚代价最小。

对于有  $n$  个工件在  $m$  台机器上加工的 E/T 调度问题变量定义如下。

$h_i$ : 工件  $J_i$  提前完工的单位时间惩罚系数。

$\omega_i$ : 工件  $J_i$  拖期完工的单位时间惩罚系数。

$[E_i, T_i]$ : 工件  $J_i$  的交货期窗口,  $E_i, T_i$  分别为工件  $J_i$  的最早和最晚交货期。

$C_i$ : 工件  $J_i$  的实际完工时间。

对于性能指标为基于交货期窗口提前/拖期惩罚代价最小的调度问题,若  $C_i < E_i$ ,称工件  $J_i$  提前;若  $C_i > T_i$ ,称工件  $J_i$  拖期。不论工件  $J_i$  提前或拖期,都将对工件  $J_i$  进行惩罚,其惩罚值为

$$h_i \times \max(0, E_i - C_i) + \omega_i \times \max(0, C_i - T_i)$$

则提前/拖期惩罚代价最小的适应度函数为

$$\min \left( \sum_{i=1}^n (h_i \times \max(0, E_i - C_i) + \omega_i \times \max(0, C_i - T_i)) \right)$$

### 2.6 改进遗传算法的设计

在传统的遗传算法中，交叉产生的子代总是被接受，即使其适应度远低于父代的适应度，这可能造成优良解被丢失或破坏，因此传统的遗传算法求解调度问题并不很成功，它易于早熟和收敛于较差解。本文设计了一种子代产生模式的改进遗传算法，即两父代交叉  $n$  次生成  $2n$  后代，从  $2n$  个后代中选择最优的两个染色体作为下一代(两染色体适应度不同)。这与人类繁殖类似，可使父代的优良特性更好地传递到下一代。试验结果表明，与传统的遗传算法比较，应用子代产生模式的遗传算法在收敛速度和解的质量方面都有较大提高。改进遗传算法的步骤如下。

- (1) 初始化随机产生  $P$  个染色体个体， $P$  为种群规模。
- (2) 计算个体适应度，评价个体适应度值。
- (3) 判断是否达到终止条件，若满足则输出最

好解，结束算法；否则转步骤(4)。

(4) 按选择策略选取下一代种群。

(5) 按交叉概率  $P_c$ ，对两父代个体交叉  $n$  次，从所有后代中选择最优不同的两染色体作为下一代；按变异概率  $P_m$  选择个体，变异操作生成新个体。

(6) 生成新一代的种群，返回到(3)。

### 3 计算试验结果和分析

上文所述的改进遗传算法用 Visual C++ 编程，程序运行环境为 P4 CPU，主频 3.0 GHz，内存为 512 MB。通过模拟实际生产中存在的调度问题，将标准的 FT10 基准实例简单转化，产生一个如表 5 所示 10 个工件在 10 台机器上加工的非传统调度问题，在该调度问题中一个工件可以被某台机器多次加工或不加工。

表 5 10 个工件在 10 台机器上加工的调度问题

工件	机器序号 (加工时间)											
	工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5	工序 6	工序 7	工序 8	工序 9	工序 10	工序 11	工序 12
J1	0(29)	1(78)	2(9)	3(36)	4(49)	5(11)	6(62)	7(56)	—	—	—	—
J2	0(43)	2(90)	4(75)	9(11)	3(69)	1(28)	6(46)	5(46)	7(72)	8(30)	9(21)	8(44)
J3	1(91)	0(85)	3(39)	2(74)	8(90)	5(10)	7(12)	6(89)	9(45)	—	—	—
J4	1(81)	2(95)	0(71)	4(99)	6(9)	8(52)	7(85)	3(98)	9(22)	5(43)	4(33)	—
J5	2(14)	0(6)	1(22)	5(61)	3(26)	4(69)	8(21)	7(49)	9(72)	6(53)	7(25)	—
J6	2(84)	1(2)	5(52)	3(95)	8(48)	9(72)	0(47)	6(65)	4(6)	—	—	—
J7	1(46)	0(37)	3(61)	2(13)	6(32)	5(21)	9(32)	8(89)	—	—	—	—
J8	2(31)	0(86)	1(46)	5(74)	4(32)	6(88)	8(19)	9(48)	7(36)	3(79)	7(30)	4(55)
J9	0(76)	1(69)	3(76)	5(51)	2(85)	9(11)	6(40)	7(89)	4(26)	—	—	—
J10	1(85)	0(13)	2(61)	6(7)	8(64)	9(76)	5(47)	3(52)	4(90)	7(45)	8(74)	—

用改进遗传算法求解表 5 中的非传统调度问题，对于不同性能指标，如最大完工时间最小、总拖期时间最小、基于交货期窗口提前/拖期惩罚代价最小，测试半主动、主动和全主动三种不同的解码机制的遗传算法求解的结果。改进遗传算法的运行参数为：种群规模  $P = 200$ ，交叉概率  $P_c = 0.8$ ，交叉次数  $n = 20$  次，变异概率  $P_m = 0.01$ ，终止代数 50，针对三种不同性能指标函数分别运用不同的解码方式连续运行 10 次。

对于遗传算法求解标准 FT10 基准实例的研究，详细内容参见文献[8]。对于最大完工时间最小的性能指标，应用半主动、主动和全主动调度解码机制的改进遗传算法求解表 5 所示的非传统调度问题的试验结果如表 6 所示。从表 6 可以看出，对于性能指标为最大完工时间最小的调度问题，应用全主动

解码机制的遗传算法在解的质量方面明显优于其他两种解码机制的，采用主动解码机制的遗传算法优于半主动解码机制的，得到最大完工时间为 940 最好调度解的机器甘特图如图 7 所示。

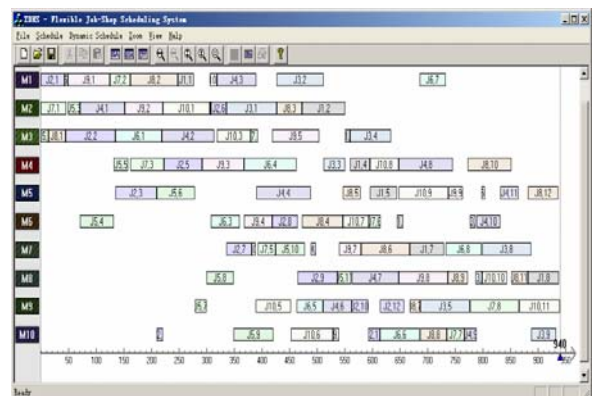


图 7 最大完工时间为 940 调度解的机器甘特图

表 6 对于最大完工时间最小性能指标三种解码方式比较

解码方式	最好解	平均解	最差解	计算时间
	$s_o$	$s_a$	$s_w$	t/s
半主动解码	976	1002.9	1044	2.6
主动解码	958	971.7	983	3.3
全主动解码	940	958.2	976	7.8

然后考虑性能指标为总拖期时间最小的交货期调度问题。对于表 5 中所示的调度问题，设每个工件交货期值均在 900 时刻，总拖期时间最小目标函数见第 2.5.1 节，运用三种解码方式的改进遗传算法求解的测试结果如表 7 所示。试验结果显示，应用全主动解码机制的遗传算法在解的质量超过其他两种解码机制的，半主动解码机制的遗传算法提供解的质量最差，得到总拖期时间 112 调度解的机器甘特图如图 8 所示。

表 7 对于总拖期时间最小性能指标应用三种解码方式比较

解码方式	最好解	平均解	最差解	计算时间
	$s_o$	$s_a$	$s_w$	t/s
半主动解码	169	340.4	530	2.8
主动解码	145	180.6	219	3.3
全主动解码	112	152.7	189	8.1

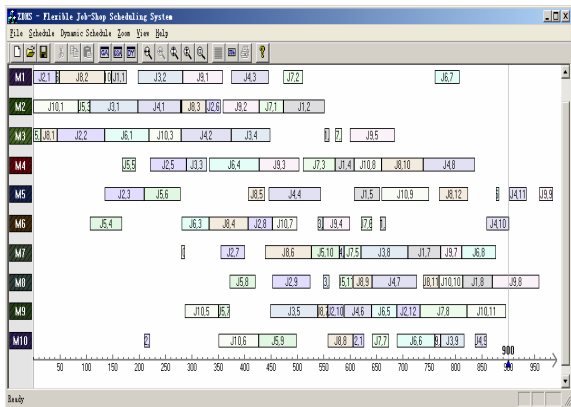


图 8 总拖期为 112 调度解的机器甘特图

最后考虑基于交货期窗口的提前/拖期惩罚代价最小的 E/T 调度问题。对于表 5 中的非传统调度问题，分别考虑交货期窗口在 [900, 930]、[1 200, 1 230]和[1 500, 1 530]时刻之间三种不同情况，提前/拖期的惩罚系数均设为 0.5，目标函数见第 2.5.2 节，表 8 显示了应用三种解码机制改进遗传算法的求解结果，图 9 显示了交货期窗口在 [900, 930]时刻之间得到提前/拖期惩罚代价为 79 调度解的机器甘特图。试验结果显示，当交货期窗口的交货期小于工件平均处理时间 1.5~2.0 倍时，采用全主动或主动解码机制能获得较好的解；否则，采用半主动解码机制能提供较高质量的解。这是因为提前/拖期调度问题与最大完工时间最小或基于交货期调度问题的调度问题不同，它属于非正规性能指标调度问题，最优解完全可能是半主动调度。

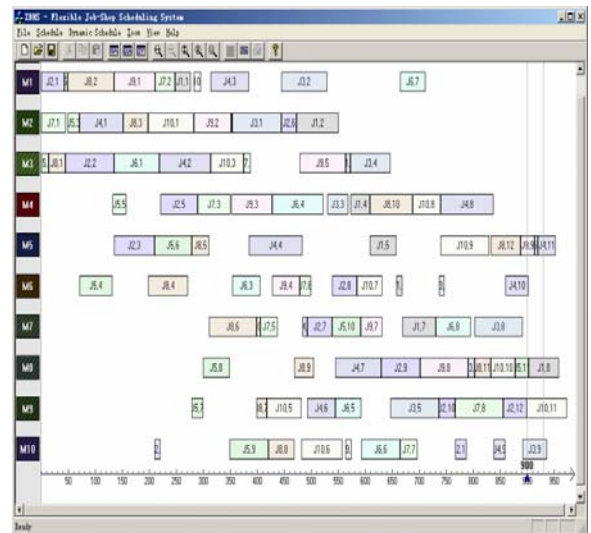


图 9 交货期窗口在 [900, 930]时刻之间得到提前/拖期惩罚代价为 79 调度解的机器甘特图

表 8 对于提前/拖期惩罚代价最小性能指标应用三种解码方式比较

交货期窗口	[900, 930]			[1 200, 1 230]			[1 500, 1 530]		
	最好解	平均解	计算时间	最好解	平均解	计算时间	最好解	平均解	计算时间
	$s_o$	$s_a$	t/s	$s_o$	$s_a$	t/s	$s_o$	$s_a$	t/s
半主动解码	105	148.3	2.7	61	62.1	2.4	61	62.0	2.4
主动解码	101	122.8	3.3	65	76.1	3.4	100	184.8	3.6
全主动解码	79	98.7	8.2	65	73.0	8.2	482	604.2	8.9

通过对非传统 Job-shop 调度问题的研究也可以看出，虽然目前大多数应用遗传算法求解作业车间调度的研究人员把注意力集中在最大完工时间最小的研究上，但是遗传算法具有很大的柔性，容易将研究成果推广到任何类型目标函数和约束的调度问题。

### 4 结论

针对传统半主动、主动调度类型的局限性，提出了一种新调度类型——全主动调度，并进一步提出该调度类型的定义、定理和解码产生机制，它们

内容具体如下。

(1) 全主动调度定义为一个不存在可允许左移和右移工序的调度。

(2) 对于正规性能指标的调度问题, 最优调度解必在全主动调度集中。

(3) 对于主动调度, 将插入式贪婪解码算法应用于该主动调度的反转染色体和反转工艺路线, 就能得到全主动调度。

基于传统和新的全主动调度类型, 本文设计了基于 POX 交叉操作和子代产生模式的改进遗传算法求解传统和非传统的调度问题, 如最小完工时间最小、交货期的总拖期最小和 E/T 调度问题。试验结果表明, 对于正规调度性能指标, 如最大完工时间最小、总拖期时间最小等, 运用全主动调度解码方式的遗传算法比主动和半主动解码方式的遗传算法提供更高质量的解, 充分证实了提出全主动调度类型的有效性; 对于非正规调度指标, 如提前/拖期惩罚最小的等性能指标, 可根据具体的需求选用适当的解码机制。

### 参 考 文 献

- [1] GAREY M R, JOHNSON D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness [M]. San Francisco: Freeman, 1979.
- [2] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
WANG Ling. Shop scheduling with genetic algorithms[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [3] HOLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
- [4] GEN M, TSUJIMURA Y, KUBOTA E. Solving job-shop scheduling problems using genetic algorithm[C] // Proc. of the 16th Int. Conf. on Computer and Industrial Engineering, Ashikaga, Japan, 1994: 576-579.
- [5] CHENG R, GEN M, TSUJIMURA Y. A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms-I. representation[J]. Computers & Industrial Engineering, 1996, 30(4): 983-997.
- [6] BIERWIRTH C. A generalized permutation approach to job shop scheduling with genetic algorithms[J]. OR Spektrum, 1995, 17: 87-92.
- [7] Baker K R. Introduction to sequencing and scheduling [M]. New York: Wiley, 1974.
- [8] PINEDO M. Scheduling theory, algorithms, and system [M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [9] 张超勇, 饶运清, 李培根, 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, 15(23): 2 149-2 153.  
ZHANG Chaoyong, RAO Yunqing, LI Peigen, et al. An improved genetic algorithm for the Job shop scheduling Problem[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(23): 2 149-2 153.
- [10] CHENG R, GEN M, TSUJIMURA Y. A tutorial survey of job shop scheduling problems using genetic algorithms, part II: hybrid genetic search strategies[J]. Computers and Industrial Engineering, 1999, 36: 343-364.
- [11] SHI G Y, IIMA H, SANNOMIYA N. A new encoding scheme for job shop problems by genetic algorithm[C] // Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, 1996, 4 395-4 400.
- [12] DE JONG K A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. Michigan: University of Michigan, 1975.
- [13] GOLDBERG D E, DEB K. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms[C/CD]// RAWLINS G (Ed.), Foundations of Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, 1991.
- [14] 郑大钟, 赵千川. 离散事件动态系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.  
ZHENG Dazhong, ZHAO Qianchaun. Discrete event dynamic system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

作者简介: 张超勇, 男, 1972 年出生, 讲师。主要研究方向为优化调度算法、制造执行系统、网络化制造和敏捷供应链。

E-mail: superhust@163.com

管在林(通信作者), 男, 1965 年出生, 副教授。主要研究方向为制造系统运作与管理, 供应链与虚拟制造组织等。

E-mail: zlguan@hust.edu.cn