

文章编号:1000-582X(2011)02-086-09

应用需求时间窗的柔性作业车间调度优化模型

曾 强^{1,2}, 杨 育¹, 王小磊^{1,3}, 邢青松¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 河南理工大学 工业工程系, 河南 焦作 454000;
3. 华北电力大学 机械工程系, 河北 保定 071003)

摘 要:为解决拉动式生产模式下准时交货给生产调度带来的困难,提出了一种基于“需求时间窗”的柔性作业车间调度问题优化方法。首先,根据工件的需求时间窗口,构建了一种以工件完工时间平均隶属度最大为目标函数的柔性作业车间调度问题优化模型。然后,针对模型提出并设计了一种基于多阶段混合变异的禁忌搜索算法。为增强算法收敛性,利用“逆序变异”和“基因段交换变异”找到较好的初解,在此基础上利用“基因交换变异”继续搜索优解。最后,通过在某多品种小批量生产车间的应用验证了该方法有效性。

关键词:柔性作业车间调度;需求时间窗;禁忌搜索算法;多阶段混合变异

中图分类号:C93-03 ; TP391

文献标志码:A

Optimal model and algorithm for flexible job-shop scheduling problem based on demand time window

ZENG Qiang^{1,2}, YANG Yu¹, WANG Xiao-lei^{1,3}, XING Qing-song¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China;

2. Department of Industry Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China;

3. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University,
Baoding 071003, Hebei, P. R. China)

Abstract: Aiming at the scheduling problem for jit delivery under the pulling type production, an optimal method for flexible job-shop scheduling problem (FJSP) based on demand time window is proposed. According to the demand time window of every workpiece, an optimal model for FJSP is constructed to maximize the average membership degree based on the completion time for every workpiece. Then, a tabu search algorithm based on multi-stage hybrid mutation is proposed and designed. To improve the convergence of the algorithm, inverse order mutation and gene segment swap mutation are used to find a good original solution, upon which gene swap mutation is used to find the optimal solution. The effectiveness of the proposed method is validated by applying to a multi-type and small-batch production manufacturing workshop.

Key words: flexible job-shop scheduling; demand time window; tabu search algorithm; multi-stage hybrid mutation

收稿日期:2010-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(71071173);教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-07-0908);教育部高校博士点科研基金资助项目(20090191110004);重庆市重点科技攻关项目(2010GGB108)

作者简介:曾强(1975-),男,重庆大学机械工程学院博士研究生,主要从事工业工程、生产管理研究,
(E-mail)zengqiang@cqu.edu.cn。

近年来,国内外学者对柔性作业车间调度问题(Flexible Job-shop Scheduling Problem, FJSP)进行了大量的研究并取得了一定的研究成果。这些成果中,有的以工件最大完工时间(Makespan)最短作为优化目标^[1-3],有的以工件平均流程时间(Average Flow Time)最短作为优化目标^[4],有的以总延迟时间(Total Delay Time)或平均延迟时间(Average Delay Time)最短为优化目标^[5],有的以加工成本(Machining Cost)、设备负荷率(Machine Load Ratio)、加工质量(Machining Quality)、延迟时间(Delay Time)、流程时间(Flow Time)、最大完工时间(Makespan)中的两个及两个以上目标作为优化目标^[6-10]。随着供应链管理思想在企业中的导入,客户对产品准时交货的要求越来越高。按照丰田拉动式生产思想,产品最理想的供给方式是按需求供给^[11],供给过早或过迟均会形成不同程度的浪费。以上传统的 FJSP 研究成果对优化目标的设定已不适应准时交货之需,因此,需要研究并提出有效的优化调度方法以适应这种新的市场需求。实际生产中,客户通常对所需产品向生产方给出一个交货时间段(称之为“需求时间窗”),在需求时间窗内供给产品则可视为准时供货,此时客户满意度最高。超出需求时间窗口的供货均会导致客户满意度下降,严重者会受到客户的惩罚。另外,对于生产方来说,其调度的工件可能来自不同订单,各工件优先级及需求时间窗各异,需区别对待。

FJSP 是一个复杂非多项式算法问题(NP),对这类问题的求解一般采用智能搜索算法,如遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法、蚁群搜索算法等。但这些智能搜索算法各有其优缺点,应用时需加以适当改进。禁忌搜索算法是对人类智力过程的一种模拟,该算法通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索,同时通过特赦准则赦免一些优良的解,进而保证多样化的有效搜索以实现全局优化。但禁忌搜索算法也有其局限性,它对初始解有较强的依赖性^[13]。近年来,学者对禁忌搜索算法进行了改进研究,其一是对禁忌搜索算法本身的参数进行改进^[12-14],其二是将禁忌搜索算法与其它智能搜索算法结合以取长补短^[15-17]。

基于以上分析,为解决拉动式生产模式下准时交货给生产调度带来的困难,笔者提出一种基于“需求时间窗”的柔性作业车间调度问题优化方法。根据工件的需求时间窗口,建立一种以工件完工时间

平均隶属度最大为目标函数的柔性作业车间调度问题优化模型。针对模型提出并设计了一种基于多阶段混合变异的禁忌搜索算法,并通过应用实例及分析验证该方法的有效性。

1 基于工件完工时间平均隶属度的 FJSP 优化模型

1.1 问题描述

车间要在 S 台设备中对 N 个工件进行排产,每个工件有 $1 \sim m$ 道工序,工序 j 有 $1 \sim S$ 台设备可供选择,工序的加工时间因所选设备不同而异。可用表 1 所示的二维表格加以表示,表 1 中 Ct_{ijk} 表示工件 i 的工序 j 在设备 k 上的加工时间,其值为空表示工件 i 的工序 j 不能由设备 k 加工。

表 1 工艺参数

序号	工件	工序	加工设备			
			1	2	...	S
...
...	i	1	Ct_{i11}	Ct_{i12}	...	Ct_{i1S}
...	i	2	Ct_{i21}	Ct_{i2S}
...
...	i	j	Ct_{ij1}	Ct_{ij2}	...	Ct_{ijS}
...
...	i	m	Ct_{im1}	Ct_{im2}	...	Ct_{imS}
...
$nm-1$	n	$m-1$	$Ct_{n(m-1)1}$	$Ct_{n(m-1)2}$...	$Ct_{n(m-1)S}$
nm	n	m	Ct_{nm1}	Ct_{nm2}	...	Ct_{nmS}

假设:①工序一旦开始加工不能中断;②各设备同一时刻只加工一个工件;③工件之间具备相同的优先级;④某工件的上道工序加工完毕后,若其分配的设备空闲,则立即开始加工下一道工序,无时滞;⑤工序在设备 k 上的加工时间确定,调整时间、搬运时间、装卸时间计算在加工时间内。目标:确定工序的最佳加工顺序并为每道工序选择最合适的设备,使工件完工时间平均隶属度最大。

1.2 变量定义

N :要调度的工件总数;

J_i :工件 i ;

m :各工件的最大工序数;
 nm :工序总数;
 S :设备台数;
 $Mach(i), Free$:设备 i 的空闲时间表;
 Ct_{ijk} : J_i 的工序 j 在设备 k 上的加工时间 (min/件);
 Tb_i : J_i 的最早允许开工时间;
 T_i : J_i 最后一道工序完工时间;
 S_{ijk}, E_{ijk} : J_i 的工序 j 在设备 k 上的开工时间和完工时间;

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & J_i \text{ 的工序 } j \text{ 在设备 } k \text{ 上加工} \\ 0 & \text{其它} \end{cases};$$

$$R_{ijfgk} = \begin{cases} 1 & J_i \text{ 的工序 } j \text{ 和 } J_f \text{ 的工序 } g \text{ 在同一台设备 } k \text{ 上加工且工序 } j \text{ 先于工序 } g。 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

1.3 优化模型

1)决策变量

FJSP 优化包括两个子问题,其一是安排各工序的加工顺序,其二是为各工序选择加工设备。因此,决策变量可用 2 个向量 \mathbf{X}, \mathbf{Y} 来表示, \mathbf{X} 表示工序 1~nm 的安排顺序, \mathbf{Y} 表示工序 1~nm 的加工设备序列。

2)目标函数

$$OPT \quad f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \max \left[\frac{\sum_{i=1}^N \mu_i(T_i)}{N} \right] \quad (1)$$

式(1)表示各工件完工时间的平均隶属度最大化。其中, $\mu_i(T)$ 是 J_i 完工时间的隶属度函数,其形式可以有多种,笔者参照文献[18]的线性隶属度函数并对其进行适当改进,设计了如图 1 及式(2)所示的线性隶属度函数。

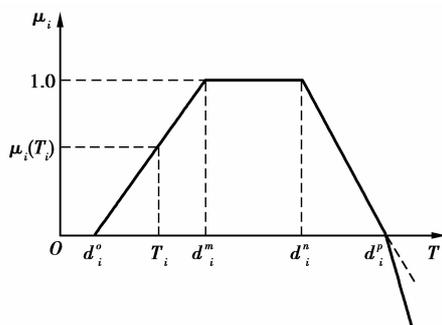


图 1 线性隶属度函数

$$\mu_i(T_i) = \begin{cases} 0, & \text{当 } 0 \leq T_i < d_i^o \text{ 时;} \\ \frac{T_i - d_i^o}{d_i^m - d_i^o}, & \text{当 } d_i^o \leq T_i < d_i^m \text{ 时;} \\ 1.0, & \text{当 } d_i^m \leq T_i < d_i^n \text{ 时;} \\ \frac{d_i^p - T_i}{d_i^p - d_i^n}, & \text{当 } d_i^n \leq T_i < d_i^p \text{ 时;} \\ F_i \frac{d_i^p - T_i}{d_i^m - d_i^n}, & \text{当 } d_i^p \leq T_i \text{ 时。} \end{cases} \quad (2)$$

其中, T_i 为 J_i 的完工时间, $[d_i^m \ d_i^n]$ 表示 J_i 的需求时间窗,若 J_i 在此窗口内完工交货则客户最满意(隶属度为 1.0); d_i^o, d_i^p 为需求时间悲观值下界和上界, F_i 为 J_i 的延期完工交货的惩罚系数,其值通常大于 1。

3)约束条件

$$\sum_{k=1}^S X_{ijk} = 1, \quad \text{其中 } i \in (1, N), j \in (1, n_i), X_{ijk} = 1 \text{ 或 } 0. \quad (3)$$

$$E_{ijk} - E_{i(j-1)m} \geq Ct_{ijk}, \text{ 其中 } i \in (1, N), j \in (1, n_i), X_{ijk} = X_{i(j-1)m} = 1. \quad (4)$$

$$E_{fjgk} - E_{ijk} \geq Ct_{fjgk}, \text{ 其中 } f \in (1, N), g \in (1, n_f), i \in (1, N), j \in (1, n_i), X_{fjgk} = X_{ijk} = 1 \text{ 且 } R_{ijfjgk} = 1. \quad (5)$$

$$E_{ijk} - S_{ijk} \geq Ct_{ijk}, \text{ 其中 } i \in (1, N), j \in (1, n_i), X_{ijk} = 1. \quad (6)$$

其中,式(3)表示工序唯一由 S 台设备中的一台独立完成;式(4)表示任意工件必须在上道工序完工后才能开始下道工序;式(5)表示同一台设备 k 不能同时加工两道工序;式(6)表示任意工序的完工时间与开工时间之差不能小于其所需时间。

2 基于多阶段混合变异的禁忌搜索算法

针对 FJSP 的组合爆炸特点,为改善优化效果、提高优化效率,设计了一种基于多阶段混合变异的禁忌搜索算法。

2.1 算法流程

图 2 是基于多阶段混合变异禁忌搜索算法的流程图。

图 2 中,BSF 为截至当前代的最好染色体,bsf 为 BSF 对应的适应度, c_1 为候选解数, c_2 为保留好解数, Tlist 为禁忌表, t_1 为禁忌长度, maxepoc 为最大迭代次数, epoc 为当前迭代次数, N 记录各代最好个体, M 记录各代最好个体的适应度 f 。

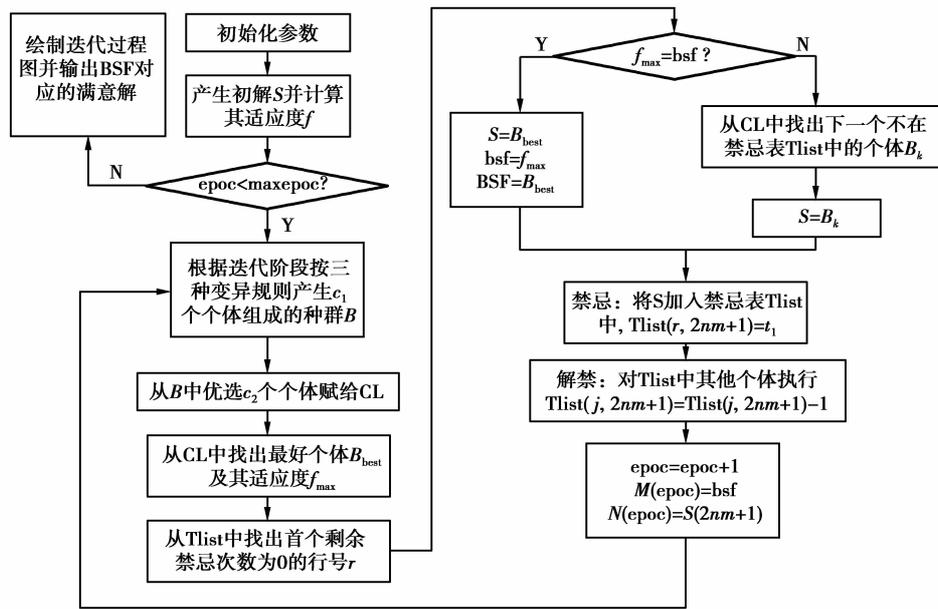


图 2 算法流程

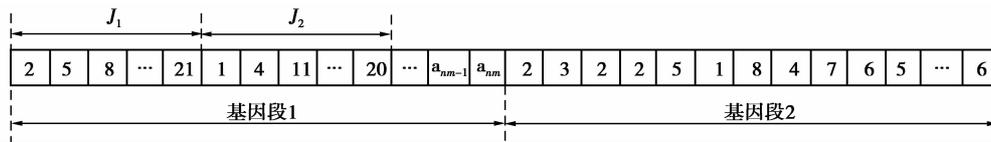


图 3 染色体编码

2.2 编码方式

采用两段编码方式进行编码,染色体编码总长度为 $2nm$ 。前 nm 个基因座组成的基因段 1 代表 nm 道工序的安排顺序(对应于式(1)中的 X);后 nm 个基因座组成的基因段 2 代表 nm 道工序的加工设备序列(对应于式(1)中的 Y)。基因段 1 的基因值是 $1 \sim nm$ 的自然数的随机排列,为保证各工件的工序加工先后顺序,基因段 1 的编码以 m 为节点进行升序排列,图 3 中 J_i 编码长度为 m , J_1 的 $1 \sim m$ 道工序的安排顺序依次为 2、5、8、...、21,依次类推。基因段 2 中基因值为 $1 \sim S$ 的随机整数,图 3 中各工序的加工设备依次为 2、3、2、2、5、1、8、4、7、6、5、...、6。

2.3 解码操作

为提高设备利用率,对工序采用“间隙挤压法”进行“插入式”时间安排以产生活动化调度^[19],如图 4。具体解码过程如下

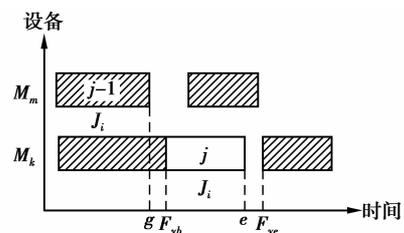


图 4 解码示意图

- 1) 令 $p=1$;
- 2) 找出染色体中第 p 个待安排工序的工件号 i 、工序号 j 及加工设备 k (即 J_i 的工序 j 拟在设备 k 安排);
- 3) 若 $j>1$, 令 $g=J_i$ 的工序 $j-1$ 完工时间, 否则令 $g=J_i$ 的最早允许开工时间;
- 4) 令 $y=1$;

5) 根据 $Mach(k).Free$, 取出设备 k 的第 y 个空闲时间段起始值, 设为 $[F_{yb} F_{ye}]$;

7) 判断, 若 $\max(g, F_{yb}) + Ct_{ijk} \leq F_{ye}$, 则将 J_i 的工序 j 安排在设备 k 的第 y 空闲时间段, 其开工时间为 $\max(g, F_{yb})$, 完工时间为 $\max(g, F_{yb}) + Ct_{ijk}$, 更新 $Mach(k).Free$, 转第 7) 步; 否则令 $y = y + 1$, 转第 5) 步;

8) 令 $p = p + 1$;

9) 判断, 若 $p \leq nm$, 则转步骤 2), 否则解码结束。

2.4 目标值计算

根据解码所得调度矩阵, 计算每个工件的完工时间 T_i , 由式(1)、(2)计算得到染色体对应的工件完工时间平均隶属度。

2.5 变异操作

变异是产生新染色体的基础, 为了减少算法出现早熟现象, 变异应当尽可能保证染色体的多样性。由于禁忌搜索算法是从某个初解开始产生变异, 所以初解的选取对算法的收敛性和收敛速度也有较大的影响。因此, 笔者设计了三阶段变异操作, 每个阶段采用基因段 1 和基因段 1 分别变异的混合变异方式进行变异。

2.5.1 基因段 1 的变异设计

基因段 1 代表了工序安排顺序, 为保证染色体多样性、增强算法的收敛性和加快算法的收敛速度, 设计了 3 种变异方式并分 3 个阶段进行变异, 即第一阶段为快速找到解空间邻域, 采用变异度较大的逆序变异方式, 第二阶段适当减小变异度, 采用整体交换变异方式, 第三阶段为保持好解的稳定性采用变异度较小的基因对换变异方式。



图 5 基因段 1 变异操作

①逆序变异

首先随机生成 $1 \sim N$ 之间的 2 个不相等的随机整数 v_1, v_2 并使 $v_1 < v_2$; 然后随机生成 $1 \sim m$ 之间的 2 个随机整数 d_1, d_2 , 按式(7)、(8)计算得 k_1, k_2 ; 然后将 $k_1 \sim k_2$ 之间(包括 k_1 和 k_2)的基因值进行逆序变换。

$$k_1 = (v_1 - 1) \times m + d_1, \quad (7)$$

$$k_2 = (v_2 - 1) \times m + d_2. \quad (8)$$

②基因段交换变异

首先随机生成 $1 \sim N$ 之间的两个不相等的随机整数 v_1, v_2 并使 $v_1 < v_2$, 然后将 $(v_1 - 1) \times m + 1 \sim v_1 \times m$ 之间的基因值组成的基因段与 $(v_2 - 1) \times m + 1 \sim v_2 \times m$ 之间的基因值组成的基因段进行整体交换。

③基因交换变异

首先按①的方式生成两个 $1 \sim nm$ 之间的两个不相等的随机整数 k_1, k_2 , 然后将 k_1, k_2 对应的基因值进行交换。

2.5.2 基因段 2 的变异设计

基因段 2 代表了工序加工设备序列, 对该基因段的变异采用了两点变异, 变异率取变值, 即第一阶段取 p_m , 第二阶段取 $p_m/3$, 第三阶段取 $p_m/6$ 。变异过程为: 第一步, 产生 $0 \sim 1$ 随机数 r , 若 $r <$ 变异率, 则随机生成两个 $1 \sim nm$ 之间的不相等的随机整数 l_1, l_2 代表变异点, 再随机生成 $1 \sim S$ 之间的 2 个随机整数 s_1, s_2 代表设备号, 将基因座 l_1, l_2 对应的基因值替换成 s_1, s_2 , 如图 6 所示; 第二步对产生的新设备号根据工序加工工艺参数判断其是否可行, 若不可行, 转入第一步重新变异。

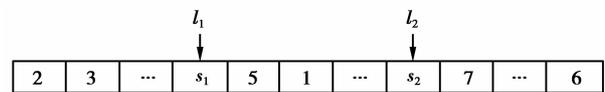


图 6 基因段 2 变异操作

2.6 禁忌操作

禁忌表的作用是将搜索到的好解暂时存放于其中以防止迂回搜索, 将好解放入该表称为禁忌, 反之将好解从禁忌表中释放称为解禁。根据编码特征, 设计了 $Tlist(t_1, 2nm + 1)$ 的数组作为禁忌表。其中 t_1 为禁忌表长度, 该值应适当选取, 过大会增加存储量和计算量, 过小则容易造成循环搜索^[12]。Tlist 数组的前 $2nm$ 维存放好解, 第 $2nm + 1$ 维存放解的剩余禁忌次数。每次放入新解时, 寻找剩余禁忌次数为 0 的位置进行放入。每放入一个新解, 则将该解的剩余禁忌数赋为 t_1 , 同时将其它解的剩余禁忌次数减 1。如图 7 所示。



图 7 禁忌表结构

3 应用实例及分析

3.1 应用实例

为验证算法有效性,用 Matlab 7.0 实现了上述算法并在某多品种小批量生产车间作业调度中进行了应用验证。该车间要将 11 个工件的 110 道工序(含虚工序,对虚工序的处理将其加工时间设为 0,表示不占用设备资源)在 12 台设备上进行优化调度,具体参数为: $N=11, m=10, nm=110, S=12, \max epoc=1\ 100, t_1=9, c_1=40, c_2=20, p_m=0.8$, 工件需求时间窗及最早允许开工时间 Tb_i 参数见表 2, 工序加工工艺参数略。将算法进行若干次运算,均能得到最大平均隶属度 $f_{max}=1.0$ 。图 8 是其中某次优化的进化过程图,图 9-10 是该次优化所得优解对应的设备调度甘特图和工件调度甘特图,该优其对应的工件完工时间 T_i 及相应的隶属度 $\mu_i(T_i)$ 见表 2。

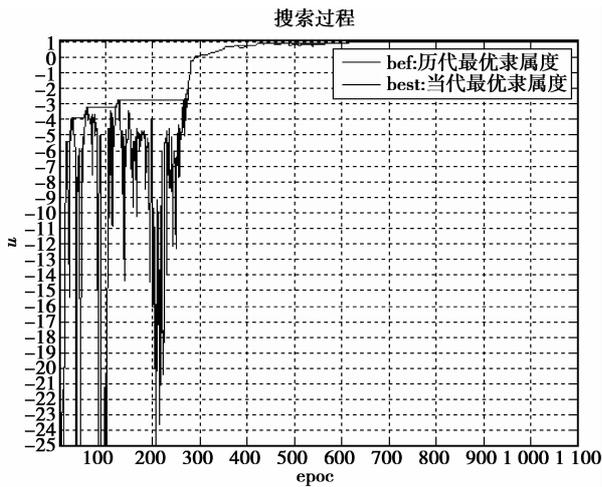


图 8 进化过程图

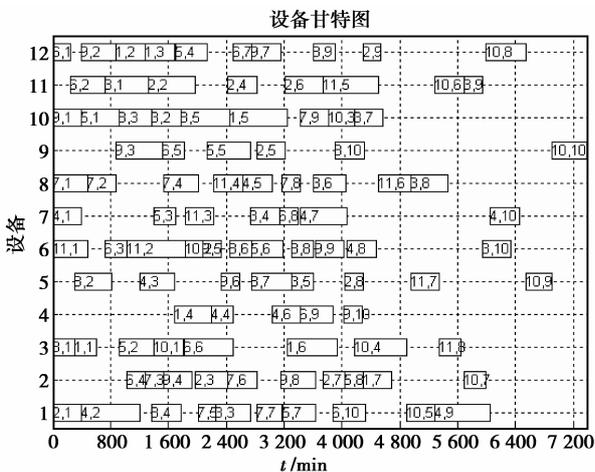


图 9 设备调度甘特图

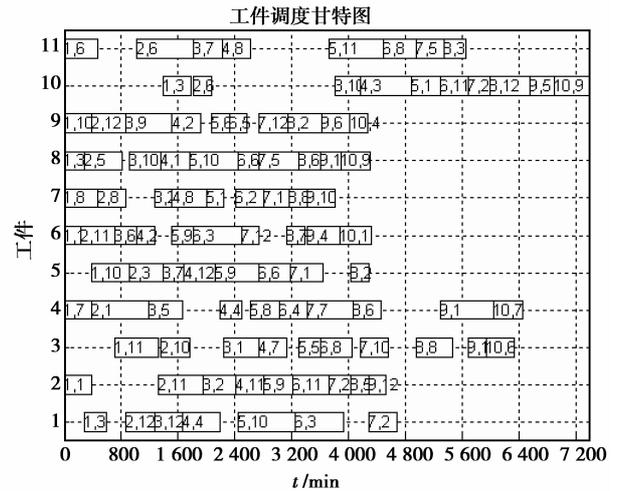


图 10 工件调度甘特图 1

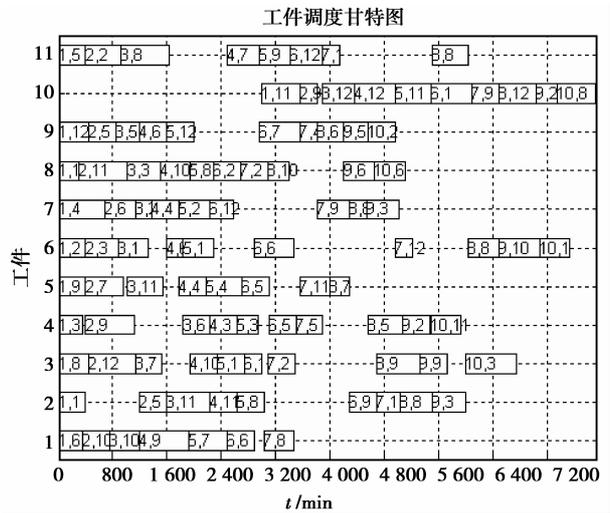


图 11 工件调度甘特图 2

表 2 调度结果 min

work piece	d_i^o	d_i^m	d_i^n	d_i^p	F_i	Tb_i	T_i	$\mu_i(T_i)$
1	4 320	3 840	4 800	5 760	2	0	4 690	1.0
2	3 040	3 840	4 800	5 760	2	0	4 540	1.0
3	4 240	5 280	6 720	8 160	100	0	6 340	1.0
4	4 000	4 800	6 720	7 680	2	0	6 450	1.0
5	2 800	3 360	4 320	5 280	100	0	4 290	1.0
6	3 040	3 840	4 800	5 760	2	0	4 320	1.0
7	2 400	2 880	3 840	4 320	2	0	3 820	1.0
8	2 800	3 360	4 800	5 280	100	0	4 310	1.0
9	2 800	3 360	4 320	5 280	2	0	4 280	1.0
10	5 200	6 720	8 160	9 600	2	0	7 380	1.0
11	3 600	4 320	5 760	6 720	2	0	5 650	1.0
$f(X, Y)$								1.0

3.2 实例分析

3.2.1 算法收敛性分析

由图 8 可看出,1~137 代为第一阶段,采用的是逆序变异,138~275 代为第二阶段,采用的是基因段交换变异,第三阶段为 276~1 100 代,采用的是基因交换变异。第一、二阶段,虽然爬山能力不强,却为第三阶段寻找到了较好的初解,在此初解的基础上,通过第三阶段继续爬山最终搜索到最优解。为进一步说明采用三阶段变异的优越性,分别设计了三种变异方式在其它条件相同的情况下进行进化计算,图 10~12 分别是其对应的进化过程图。从进化过程图可看出,三种方式均难以找到最好解,第一和第二种变异方式前期爬山能力相对较强,后期爬山能力弱;第三种变异方式找到的解好于前 2 种方式,但由于其变异方式的局限性使其易陷入局部最优解。

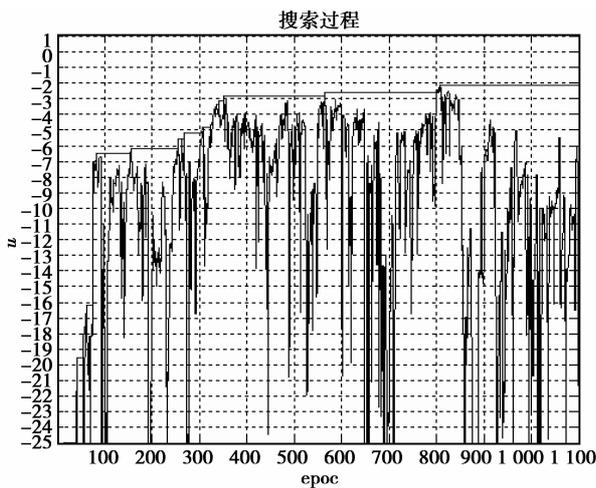


图 12 逆序变异 ($f_{\max} = -2.12$)

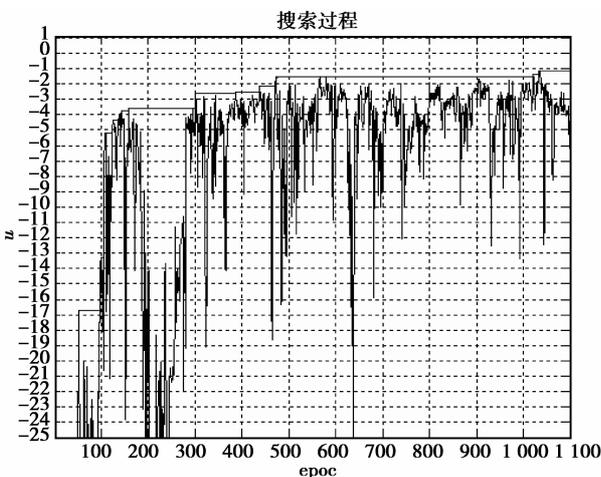


图 13 整体交换变异 ($f_{\max} = -1.13$)

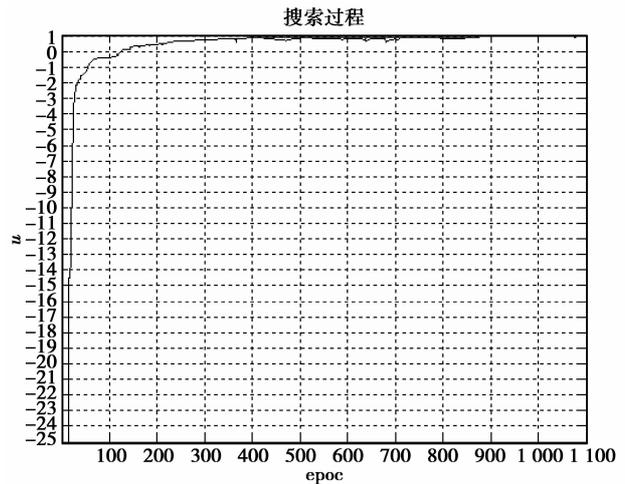


图 14 基因交换变异 ($f_{\max} = 0.96$)

3.2.2 工件准时性分析

能实现工件准时供应是基于“需求时间窗”的优化调度优点之一。从表 2 和图 9 可以看出,算法得到的工件实际完工时间不是越早越好,也不是越迟越好,而是在客户订单中工件允许的范围为最佳(其隶属度为 1.0)。若工件提前完工,而客户在此时刻并不需要这个工件,则会为双方带来库存损失;工件滞后完工则会造成客户等待损失,降低客户满意度。

3.2.3 工件同步性分析

能实现来自同一客户订单的不同工件同步供应是基于“需求时间窗”的优化调度优点之二。多品种小批量生产模式下,同一张客户订单通常包含多个品种、每个品种生产数量少、各工件交货期可能相同。企业在接到客户订单后若单独为 1 个客户的订单安排组织生产则会造成大量的人力物力浪费,因此企业通常的做法是将不同客户的订单进行合并,按成组理论将性质相似的工件安排在 1 个车间生产,使得同一张客户订单的不同工件有可能被分配到不同的车间组织生产,传统的 FJSP 调度方法难以实现它们的同步完工。而采用“基于时间窗”的优化调度则可以有效保证来自同一交货期的工件基本实现同步完工从而实现同步供应。

3.2.4 其它方面的分析

由于工件需求时间窗是一个范围,只要工件的完工时间落在其需求时间窗口 $[d_{im}, d_{in}]$ 内,则其隶属度为 1.0,因此最终优化方案可能会有多个。生产调度过程中除关注工件交货及时性指标外,还可能关注其它指标,如工件流程时间、设备利用率等。利用笔者提出的基于“需求时间窗”的优化调度方法可通过以下几种途径来优化其它相关指标:①通过

人为控制工件的最早开工时间 Tb_i 可以缩短工件的流程时间(从投产到完工的时间间隔),从而提高流动资金周转率。例如,图 10 中 J_{10} 从投产到完工的过程中有较长的等待时间,因此可人为将其最早允许开工时间延后(设 $Tb_{10} = 3\ 000$) 所得优化结果中工件完工时间的平均隶属度仍为 1.0,但是 J_{10} 的流程时间得以缩短,如图 11 所示。②若剩余时间紧张,导致无论怎样安排均会有工件交货时间延后,此时可根据工件的紧急程度或重要程度,将最紧急或最重要的工件的惩罚系数 F_i 赋较大值,使 F_i 越大的工件越能提前安排,从而尽量满足其交货时间要求。例如,表 2 中的 J_3 、 J_5 、 J_8 是比较重要的工件,因此将其 F_i 值设为 100。③引入空闲时间表 Free,采用“间隙挤压法”对工序时间进行“插入式”安排,可产生活动化调度方案,它有利于减少设备空闲时间,提高设备利用率;另外,可将排产后设备空闲时间段移至下一个调度过程加以再利用,从而进一步提高设备利用率。

4 结 论

为解决拉动式生产模式下准时交货给优化调度带来的困难,提出一种基于“需求时间窗”的 FJSP 优化方法。根据工件的“需求时间窗”,构建了以工件完工时间平均隶属度最大为目标函数的 FJSP 优化调度模型并提出一种基于多阶段混合变异的禁忌搜索算法对模型加以求解。应用实例及分析表明,笔者提出的方法符合拉动式生产模式下准时交货优化调度的要求,能辅助生产调度人员进行科学排产,既提高工件准时交货率及同步供应率,又可在一定程度上优化其它相关指标,如工件流程时间、设备利用率等。

参考文献:

- [1] IDA K, OKA K. Flexible job-shop scheduling problem by genetic algorithm[J]. Transactions on Electronics, Information and Systems, 2009, 129(3): 505-511.
- [2] MOHAMMAD S M, PARVIZ F. Flexible job shop scheduling with tabu search algorithms [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(5/6): 563-570.
- [3] ENNIGROU M A, GHEDIRA K. Multi-agent approach based on tabu search for the flexible job shop scheduling problem [C] // Proceedings of the Sixth International Conference on Enterprise Information Systems, April 14-17, 2004, Porto, Portugal. Porto, Portugal: International Conference on Enterprise Information Systems, 2004: 22-28.
- [4] TSUBONE H, HORIKAWA M. Comparison between machine flexibility and routing flexibility in bottleneck job shop[J]. Journal of Engineering Valuation and Cost Analysis, 2000, 3(4/5): 323-335.
- [5] SCRICH C, ARMENTANO V A, LAGUNA M. Tardiness minimization in a flexible job shop: a tabu search approach [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004, 15(1): 103-115.
- [6] FATTAHI, PARVIZ. A hybrid multi objective algorithm for flexible job shop scheduling [C]. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, 8: 555-560.
- [7] FATTAHI P, JOLAI F, ARKAT J. Flexible job shop scheduling with overlapping in operations[J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(7): 3076-3087.
- [8] 刘明周, 张明伟, 蒋增强, 等. 基于混合粒子群算法的多目标柔性 Job2Shop 调度方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 122-127.
LIU MING-ZHOU, ZHANG MING-WEI, JIANG ZENG-QIANG, et al. Multi-objective and flexible job-shop problems study based on hybrid particle swarm optimization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 122-127.
- [9] IMANIPOUR N, ZEGORDI S H. A heuristic approach based on Tabu Search for early/tardy flexible job shop problems[J]. Scientia Iranica, 2006, 13(1): 1-13.
- [10] GHOLAMI M, ZANDIEH M. Integrating simulation and genetic algorithm to schedule a dynamic flexible job shop [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2009, 20(4): 481-498.
- [11] WHITE R E, PEARSON J N, WILSON J R. JIT manufacturing: a survey of implementations in small and large U. S. manufacturers [J]. Management Science, 1999, 45(1):1-15.
- [12] 宋晓宇, 孟秋宏, 曹阳. 求解 Job Shop 调度问题的改进禁忌搜索算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1): 93-96.
SONG XIAO-YU, MENG QIU-HONG, CAO YANG. Improved taboo search algorithm for Job Shop scheduling problems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(1): 93-96.
- [13] 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(5): 536-539.
PAN QUAN-KE, ZHU JIAN-YING. A Modified Tabu Search Algorithm for Job Shop Scheduling [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(5): 536-539.
- [14] 董宏光, 秦立民, 王涛, 等. 基于自适应并行禁忌搜索的精馏分离序列优化综合 [J]. 化工学报, 2004, 55(10):1669-1673.
DONG HONG-GUANG, QIN LI-MIN, WANG TAO, et al. Distillation separation sequence optimization synthesis based on adaptive and parallel tabu search[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2004,

- 55(10):1669-1673.
- [15] 乔佩利, 韩风, 张宏芳. 复合禁忌搜索算法求解流水调度问题[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(6): 672-675.
QIAO PEI-LI, HAN FENG, ZHANG HONG-FANG. Hybrid tabu algorithm for flow shop scheduling problems[J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(6): 672-675.
- [16] 王正国, 刘振元, 王红卫. 适应性禁忌搜索算法求解带回程的时变速度车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(9): 1453-1458.
WANG ZHENG-GUO, LIU ZHEN-YUAN, WANG HONG-WEI. Reactive tabu search algorithm for time-dependent vehicle routing problem [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(9): 1453-1458.
- [17] 竺长安, 齐继阳, 曾议. 基于遗传禁忌混合搜索算法的设备布局研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(4): 630-636.
ZHU CHANG-AN, QI JI-YANG, ZENG YI. Study on machine layout problem based on genetic algorithm and Tabu search hybrid algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(4): 630-636.
- [18] 王万良, 吴启迪. 生产调度智能算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 219.
WANG WAN-LIANG, WU QI-DI. Intelligent Algorithm and Application for production scheduling [M]. Beijing: science press, 2007: 219.
- [19] 吴秀丽, 孙树栋, 余建军, 等. 多目标柔性作业车间调度优化研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(5): 731-736.
WU XIU-LI, SUN SHU-DONG, YU JJIAN-JUN, et al. Research on multi-objective optimization for flexible job shop scheduling [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(5): 731-736.

(编辑 张小强)

(上接第81页)

- [7] PHUCL D H, RAKSINCHAROENSAKL P, NAGAI M, et al. Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Driver Vehicle Following Model[C]// SICE-ICASE International Joint Conference 2006 Otc, 18-21, 2006 in Bexco, Busan, Korea, 2006: 555-560.
- [8] 刘钊, 张超. 新型油电混合动力传动装置运行模式应用分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(9): 1250-1254.
LIU ZHAO, ZHANG CHAO. Application analysis of run mode of a new type of oil-electric hybrid power transmission unit [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2008, 36(9): 1250-1254.
- [9] 步曦, 杜爱民, 薛锋. 混合动力汽车用行星齿轮机构的理论与仿真分析[J]. 汽车工程, 2006, 28(9): 834-838.
BU XI, DU AI-MIN, XU FENG. Theoretical study and simulation on planetary gear set for hybrid electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(9): 834-838.
- [10] KOPRUBASI K, WESTERVELT E R, AND RIZZONI G. Toward the systematic design of controllers for smooth hybrid electric vehicle mode changes [C] // Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007, 6(4): 2985-2990.
- [11] ZHANG R J, CHEN Y B. Control of Hybrid Dynamical Systems for Electric Vehicles [J]. Proceedings of the American Control Conference Arlington, 2001(VA June 25-27): 2884-2889.
- [12] 安东尼·所左曼诺夫斯基. 混合动力城市公交车系统设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [13] DAVIS R I, LORENZ R D. Engine Torque Ripple Cancellation With an Integrated Starter Alternator in a Hybrid Electric Vehicle: Implementation and Control [C] // IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1765-1774.
- [14] LEE, YOUNG D. Method for controlling engine torque in hybrid vehicle: US Patents, US20100004831 [P]. 2010-01-07.
- [15] FRANKLIN G F, POWELL J D, NAEINI A E. 动态系统的反馈控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [16] 颜伏伍, 潘庆庆, 杜常清. 并联混合动力汽车从纯电动切换至发动机驱动的控制研究[J]. 汽车技术, 2009(01): 30-34.
YAN FU-WU, PAN QING-QIGN, DU CHANG-QIGN. Research on Control of State-Switch from Pure Motor Drive to Engine Drive in PHEV[J]. Automotive Technology, 2009(01): 30-34.
- [17] 黄伟. 基于 CVT 的四轮驱动混合动力汽车传动控制策略研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2008.
- [18] SCHOUTEN N J, SALMAN M A, KHEIR N A. Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles[C] // IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 460-468.

(编辑 张小强)