

# 基于 HGA 的冲压车间生产计划与调度的集成优化

路致远, 严洪森, 沈 境

(东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096)

**摘 要:**根据车身厂冲压车间和生产库房的实际情况,研究了冲压件成批生产的 Job-shop 车间生产计划和调度的集成优化问题,给出该问题的非线性混合整数规划模型,并采用混合遗传算法进行求解。遗传算法中,给出一种新的启发式规则来改善初始解集,通过与递阶分解方法进行比较,得出该算法对求解该类问题有着很好的效果。

**关键词:**混合遗传算法; Job-shop; 生产计划和调度; 成批生产

**中图分类号:** TP39; TP273

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2007)03-0179-04

## Integrated Optimization of Production Planning and Scheduling Based on Hybrid Genetic Algorithm

LU Zhi-yuan, YAN Hong-sen, SHEN Jing

(Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** According to the actual environment of the press shop and production warehouse in a body plant, this paper addresses an integrated job-shop production planning and scheduling problem of the press part with setup time and batches. A nonlinear mixed integer programming model is presented and solved by using a hybrid genetic algorithm. In the hybrid algorithm, the heuristic rules are used to improve the initial solutions. A comparison is then made between the hybrid algorithm and a hierarchical algorithm, which shows that the former can solve the problem effectively.

**Key words:** hybrid genetic algorithm; job-shop; production planning and scheduling; batch production

### 0 引 言

目前,在制造业中相当一部分产品在生产过程中的等待时间占到了生产过程总时间的 90%,而这些时间大部分都浪费在等待原材料和相关工序的加工上面。通过制定一个合理的生产作业计划往往可以在一定程度上缩短等待时间,增加机器的利用率。在汽车制造业中,冲压件制造车间属于一类典型的 Job-shop 车间。如果按照 MRPII 系统中自顶向下递阶分解的方法进行生产计划的制定<sup>[1]</sup>,很有可能得不到可行的调度解,不利于增强企业的市场竞争力和企业的长远发展。因此采取新的生产计划制定方法是十分必要

的。

文献[2]针对汽车装配车间(Flow-shop),利用 Tabu 搜索法与快速调度仿真相结合给出了三种不同的启发式算法,使生产计划和调度同时得到优化。文献[3]针对多品种批量生产类型,建立了生产计划与调度的集成优化模型,并综合运用遗传算法和启发式规则进行求解,但未详细考虑到设备加班、闲置以及冲压件的准备费用。文献[4]讨论了零件加工有准备时间且为成批生产的 Job-shop 车间的生产计划和调度的集成优化问题,给出该问题的非线性混合整数规划模型,并用混合遗传算法进行求解,但模型中未考虑到生产库房的冲压件库存费用,调度约束中也未考虑到冲压件的库存上下限。文献[5]中针对复杂装配件制造环境,给出一种启发式方法,通过寻找网络关键路径进行调度,并对订单进行分组以确定最优批量,使准备时间、库存和总交付周期达到最小,但是对多周期加工情形没有进一步给予讨论。针对上述问题,文中建立了一类零件加工有准备时间、批量生产且有库存限制的

收稿日期:2006-06-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475075);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040286012)

作者简介:路致远(1981-),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程;严洪森,博士,教授,博士生导师,研究方向为 CIMS 及 FMS 建模、生产计划、调度、控制、仿真、并行工程和知识化制造。



Job-shop 车间的生产计划和调度集成优化模型,并且给出了一种适合于求解此类问题的混合遗传算法。

## 1 冲压车间生产计划和调度集成优化模型

南京某车身厂包括冲压、焊装和油漆三个车间,且三个车间成串联关系,原材料将依次经过冲压、焊装和涂装生产后成为车身,其中冲压车间产品的品种多,采用成批生产,且生产品种的更换需要不可忽略的准备时间(一个冲压件的加工时间一般为秒级而模具的更换时间多为小时级),所以换一次模具肯定不能只生产一个或若干个冲压件,而应生产一批(几百上千)冲压件,否则得不偿失。但是,批量大了也不行,会增加在制品库存。因为车身厂生产好的冲压件不是马上就进入焊装车间,而是先进入生产库房存储以供焊装车间从库房提货。由此可见,冲压车间的生产计划与调度是一个非常值得研究而又困难的问题。

下面给出生产计划和调度的集成优化模型,目标是在满足冲压件生产调度约束的前提下,使冲压件生产尽可能满足需求,获得设备的最大利用率,同时减少冲压件生产的准备费用、在制品的库存费用,以及成品冲压件的库存费用。定义目标函数如下:

$$J = \text{Min} \left\{ \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{l=1}^{n_i} (a_{il}x_{ilk} + bp_{il}u_{ilk}) + c_i^+ \Delta^+ d_{ik} + c_i^- \Delta^- d_{ik} + h_{ik}u_{iek} \right] + \sum_{k=1}^T \sum_{j=1}^M (e_j^+ \Delta^+ \beta_{jk} + e_j^- \Delta^- \beta_{jk}) + \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{n_i} (br_{il}\tau_{ilk}) \right\} \quad (1)$$

其中,  $M$  为车间中可用加工设备数量。  $N$  为零件需求种类数。  $T$  为生产计划周期数。  $n_i$  为零件  $i$  的加工工序数。  $a_{il}$  为零件  $i$  第  $l$  道加工工序在每个周期的单件在制品储存费用。  $x_{ilk}$  为周期  $k$  开始时,零件  $i$  的第  $l$  道加工工序上的在制品储存量(简称期初在制)。  $b$  为单位工时费用,用于核算工人工资。  $p_{il}$  为零件  $i$  第  $l$  道工序的单件加工工时。  $u_{ilk}$  为零件  $i$  的第  $l$  道加工工序在周期  $k$  的计划加工数量。  $c_i^+$  为零件  $i$  超出需求部分的单件惩罚费用。  $\Delta^+ d_{ik}$  为周期  $k$  零件  $i$  超出需求部分的数量。  $c_i^-$  为零件  $i$  欠产部分的单件惩罚费用。  $\Delta^- d_{ik}$  为周期  $k$  零件  $i$  的欠产数量。  $h_{ik}$  为冲压件  $i$  周期  $k$  的在生产库房中的单件库存费用。  $u_{iek}$  为零件  $i$  最后一道工序在周期  $k$  的计划生产量,即冲压件  $i$  周期  $k$  的计划加工数量。  $e_j^+$  为在设备  $j$  上的单位加班工时费。  $\Delta^+ \beta_{jk}$  为周期  $k$  在设备  $j$  上的加班工时。  $e_j^-$  为设备  $j$  的单位时间闲置费用。  $\Delta^- \beta_{jk}$  为周期  $k$  设备  $j$  的空闲时间。  $r_{il}$  为零件  $i$  的第  $l$  道工序的准备时间。  $\tau_{ilk}$  为用来表示零件加工前准备工作的有无,  $\tau_{ilk} = 1$  表示零件  $i$  的第  $l$  道工序在周期  $k$

需要做准备工作,  $\tau_{ilk} = 0$  表示可不用做准备工作。

此外,需满足如下约束:

### ① 生产平衡约束:

生产平衡约束考虑在制品、毛坯和计划生产量之间的平衡关系,  $x_{il1}$  为期初在制,  $R_{ik}$  为周期  $k$  供给零件  $i$  加工所使用的毛坯数量:

$$x_{il(k+1)} = x_{ilk} + u_{i(l-1)k} - u_{ilk} \quad i = 1, 2, \dots, N; l = 2, 3, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

$$x_{il(k+1)} = x_{ilk} + R_{ik} - u_{ilk} \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

### ② 需求约束:

需求约束中引入超产和欠产两个变量来表示产品的产出量和用户的需求量之间的关系:

$$\sum_{t=1}^k u_{iet} - \Delta^+ d_{ik} + \Delta^- d_{ik} = \sum_{t=1}^k d_{it} \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

式中,  $d_{it}$  为周期  $t$  零件  $i$  的需求数量。

### ③ 冲压件库存约束:

实际情况中,冲压件在加工完后不是马上进入焊装线,而是要经过入库处理,因此,对于计划周期内冲压件  $i$  的库存量,都有最高储备量和最低储备量限制,需满足:

$$m_{ik} \leq u_{iek} + c_{ik} \leq M_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

式中,  $c_{ik}$  为冲压件  $i$  在周期  $k$  的已有库存量,  $m_{ik}$  和  $M_{ik}$  为冲压件  $i$  在周期  $k$  的最低储备量和最高储备量。

### ④ 冲压件工序调度约束:

假设零件批量生产过程是连续不间断的(批量中相邻零件的生产是相互衔接的),定义  $t_r(i, l, k)$  为周期  $k$  第  $i$  种零件第  $l$  道工序的批开工时间(周期  $k$  开始时:  $t_r(i, l, k) = 0$ ),  $p_{il}$  为第  $i$  种零件第  $l$  道工序上的单件加工工时,  $u_{ilk}$  为加工批量,  $x_{ilk}$  为在制品储存量。

针对工序约束存在的两种不同情况:a.  $p_{il} > p_{i(l+1)}$ ; b.  $p_{il} \leq p_{i(l+1)}$ ,由图1,2可得工序约束如下(图中无斜线填充的方框代表使用相同加工周期内前一道工序上加工完成的零件进行生产的工件,用斜线填充的方框代表直接使用在制品进行生产的工件,方框的长短表示工序工时的大小):

$$t_r(i, l, k) + p_{il}(u_{i(l+1)k} - x_{i(l+1)k}) \leq t_r(i, l+1, k) + p_{i(l+1)}(u_{i(l+1)k} - 1) \quad (6)$$

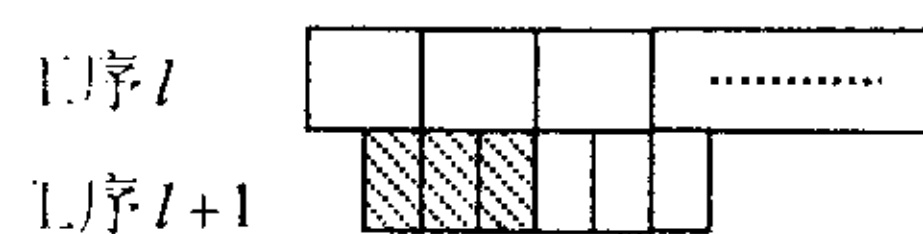


图1 工序约束(a)



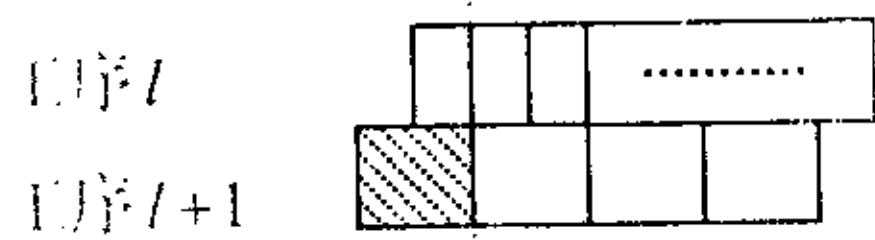


图2 工序约束(b)

$$\text{s.t. } u_{i(l+1)k} > x_{i(l+1)k} > 0, p_{il} > p_{i(l+1)}$$

$$t_r(i, l, k) + p_{il} \leq t_r(i, l+1, k) + p_{i(l+1)} x_{i(l+1)k} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } u_{i(l+1)k} > x_{i(l+1)k} > 0, p_{il} \leq p_{i(l+1)}$$

当  $x_{i(l+1)k} \geq u_{i(l+1)k}$  时, 可以容易地看出工序  $l, l+1$  之间将不再存在工序约束。

对任意给定的零件加工序列, 定义  $y_{jk}$  为周期  $k$  设备  $j$  上加工零件的一个排序, 定义符号  $il, i'l' |_{jk}$  表示周期  $k$  在设备  $j$  上零件  $il$  安排在  $i'l'$  之前加工。 $r_{il}$  为零件  $i$  的第  $l$  道工序的准备工作时间。另外对任意  $y_{j(k-1)}$  和  $y_{jk}$ , 如果  $y_{j(k-1)}$  中最后一个加工工序与  $y_{jk}$  中最先加工工序相同时, 按照生产惯例不需要在后面一个周期(周期  $k$ ) 再进行一次准备工作, 则周期  $k$  最先加工的工序可以不用再做准备工作即可开始加工, 即准备时间为 0。定义变量  $\tau_{ilk}$  用来表示零件加工前准备工作的有无,  $\tau_{ilk} = 1$  表示零件  $i$  的第  $l$  道工序在周期  $k$  需要做准备工作,  $\tau_{ilk} = 0$  表示可以不用做准备工作。则冲压设备占用约束为:

$$t_r(i, l, k) + p_{il} u_{ilk} + \tau_{ilk} r_{il} \leq t_r(i', l', k) \quad \forall il, i'l' |_{jk} \quad (8)$$

#### ⑤ 设备负荷约束:

定义  $\beta_{jk}$  为周期  $k$  设备  $j$  的可用加工时间。则设备负荷约束为:

$$\max\{t_r(i, l, k) + p_{il} u_{ilk}\} + \Delta^- \beta_{jk} - \Delta^+ \beta_{jk} = \beta_{jk} \quad \forall il \in y_{jk} \quad (9)$$

#### ⑥ 冲压件占用设备约束:

规定零件在同一个加工周期内只能占用一台设备, 定义  $\Gamma_{il}$  为零件  $i$  的第  $l$  道工序可用的加工设备集,  $w_{jilk}$  为零件占用加工设备的指示变量。设设备  $j$  在周期  $k$  加工零件  $i$  的第  $l$  道工序, 则  $w_{jilk} = 1$ ; 否则  $w_{jilk} = 0$ 。则有约束(10)、(11)成立:

$$\sum_{j \in \Gamma_{il}} w_{jilk} = 1 \quad u_{ilk} > 0 \quad i = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, T \quad (10)$$

$$\sum_{j \in \Gamma_{il}} w_{jilk} = 0 \quad u_{ilk} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

#### ⑦ 加工任务排序约束:

$$w_{jilk} = 1 \quad \forall il \in y_{jk} \quad (12)$$

## 2 算法实现和算例研究

由于该问题解的结构十分复杂, 如果用二进制位

串编码, 规模将变得非常大, 不利于求解, 因此对于文中的计划和设备指派部分解, 采用实数编码的方法将是一个很好的选择。而对于调度部分解, 由于其中包含了两种信息: 加工排序, 工序约束。一般的实数编码方法已经不能满足遗传运算的需求, 考虑文献[6]中总结的 9 种调度解表达方法, 文中采用了其中基于工序的表达法来表示调度解。由于计划、调度和设备指派解在表达方法上互不相同, 为了能够将上述三个部分解作为一个整体参与遗传运算, 在算法中采用了分段编码策略(不同形式的解用相应的表达方法编码为染色体中不同的段)将解编码为一个染色体。下面算法中,  $Au$  表示计划部分解,  $As$  表示调度部分解,  $Ad$  表示设备指派部分解。

### Step1 初始化。

(1) 读取模型数据:  $a_{il}, b, p_{il}, c_i^+, c_i^-, h_{ik}, e_j^+, e_j^-, r_{il}, x_{il1}, R_{ik}$   
 $i = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, T; j = 1, 2, \dots, M$

(2) 读取算法参数:  $g\_Max, popsize, p_c, p_m$ ;

(3) 设置  $g\_num = 0, pop_0 = \{\Phi\}, pop_1 = \{\Phi\}, fit\_val = \{\Phi\}, chromo\_best = \{\Phi\}, Op\_schedule = \{\Phi\}, Op\_plan = \{\Phi\}$ 。

Step2 生成初始种群。考虑式 2, 3 的约束随机生成  $Au$  段染色体,  $As$  段染色体利用文献[6]中提到的基于工序的表达法随机生成,  $Ad$  段染色体由可用加工设备集即可确定。初始种群中选出部分染色体(概率为 0.1), 其  $As$  段根据车身厂实际情况, 采用冲压件消耗时间最短优先规则生成, 即根据冲压件的库存量和此类冲压件在焊装线上的单位时间消耗速度来确定该类冲压件可供消耗的时间, 时间短的优先。

Step3 由 Step2 中生成染色体的逆过程并考虑模型中的约束可将染色体映射到解空间。通过下式计算染色体适值, 评估初始种群  $pop_0$  并更新染色体适值集  $fit\_val$  ( $J_i$  表示第  $i$  条染色体对应解的目标函数值,  $J_{max}$  为当前代中染色体对应解的最大目标函数值,  $f_i$  为第  $i$  条染色体的适值):

$$f_i = J_{max} - J_i \quad (13)$$

从初始种群  $pop_0$  中选出最佳染色体, 并更新最佳染色体集  $chromo\_best$ 。将最佳染色体映射到解空间, 并更新最优调度集  $Op\_schedule$  和最优生产计划集  $Op\_plan$ 。

Step4 采用比例选择的方法进行个体的筛选, 个体被选中的概率  $p_i$  与其适应度大小成正比:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{popsize} f_i} \quad i = 1, 2, \dots, popsize \quad (14)$$



选择操作作用于父种群  $pop_0$  以产生子代种群  $pop_1$ 。

Step5 对子代种群  $pop_1$  进行交叉运算。首先给每一个染色体产生一个随机数,然后将该随机数与交叉概率  $p_c$  率进行比较,如果某个随机数小于  $p_c$ ,则相应染色体被选出参与交叉运算。 $Au$ ,  $As$  和  $Ad$  段染色体分别独立地进行交叉运算,  $Au$  段染色体采用通用的两点交叉算子进行交叉运算,  $As$  和  $Ad$  段染色体的交叉运算相互关联,先用两点交叉算子对  $As$  段染色体进行运算,然后对  $As$  段染色体进行染色体修正,  $Ad$  段染色体相应地也必须进行修正操作,产生的解才能保证为合法的解。

Step6 对子代种群  $pop_1$  进行变异运算。染色体的选择过程与 Step5 中相同,除了用变异概率  $p_m$  来代替交叉概率  $p_c$ 。

Step7 设置遗传代数:  $g\_num = g\_num + 1$ 。用式(13)评估子代种群  $pop_1$  并更新  $fit\_val$ 。用  $chromo\_best$  中的最佳染色体替换子代种群  $pop_1$  中的最差染色体。选择子代种群  $pop_1$  中的最佳染色体并更新  $chromo\_best$ 。将最佳染色体映射到解空间,并更新最优调度集  $Op\_schedule$  和最优生产计划集  $Op\_plan$ 。用子代种群替换父代种群  $pop_0 \leftarrow pop_1$ 。判断遗传代数是否满足终止条件,如果  $g\_num < g\_Max$ ,转 Step4;否则转 Step8。

Step8 终止算法,输出最优调度集  $Op\_schedule$  和最优生产计划集  $Op\_plan$ 。

上述算法中,  $g\_Max$  为遗传算法迭代最大次数,  $popsiz$  为种群规模,  $p_c$  为交叉概率,  $p_m$  为变异概率,  $g\_num$  为当前遗传代数,  $pop_0$  为父代种群,  $pop_1$  为子代种群,  $fit\_val$  为染色体适应值集,  $chromo\_best$  为最佳染色体集,  $Op\_schedule$  为最优调度集,  $Op\_plan$  为最优生产计划集。

上述混合遗传算法已经用 VC++ 6.0 实现,并在该算法的基础上开发了生产计划和调度集成优化软件。算法的运行环境为 Pentium 2.4G 微机,256M 内存,操作系统为 Windows XP。表 1 中给出了针对不同规模算例,混合遗传算法(HGA)与文献[1]中提到的递阶分解方法(HPP)计算结果的比较。从表中可以看到采用 HGA 所花费的时间比 HPP 要长一些,但是获得的目标函数值相对要小一些,即在可接受的时间内 HGA 要比 HPP 能获得更好的解。另外,由于增加了冲压件库存约束,文献[4]产生的计划解可能在文中的

算例中变得不可行,因而采用文中的 HGA 可以保证获得一个可行解。

表 1 HGA 与 HPP 算法的比较

问题	HPP		HGA	
零件种类数 $\times$ 工序数 $\times$ 设备台数	计算时间(s)	最优	计算时间(s)	最优
$4 \times 3 \times 3$	15	1016.40	26	879.29
$6 \times 4 \times 4$	26	1280.34	39	1244.69
$8 \times 6 \times 6$	45	1684.35	57	1679.50
$12 \times 8 \times 8$	90	3086.84	98	3092.42
$16 \times 8 \times 8$	134	4190.60	144	4039.91

### 3 结 论

递阶生产计划的优点是求解问题比较快,但是由于在生产计划模型中忽略了详细的调度约束,因此不能保证存在一个可行的调度解。笔者根据南京某车身厂冲压车间和生产库房的实际情况,提出了一类冲压件加工有准备时间、批量生产且有库存限制的 Job-shop 车间的生产计划和调度集成优化模型。在建立的模型中考虑了详细的批量调度约束以及冲压件库存成本,与以往的递阶分解方法相比,可以保证得到一个可行的生产计划。给出了一种适合于求解此类问题的混合遗传算法,在生成初始解空间的时候考虑焊装线的情况,采用冲压件消耗时间最短优先的原则,此外,对基因表达、染色体交叉和变异分别进行了适当的调整和改进,通过大量算例研究表明该算法是有效的。

#### 参考文献:

- [1] Yan Hongsen. Hierarchical stochastic production planning with delay interaction[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2000, 104(3): 659 - 689.
- [2] 严洪森,夏琦峰,朱敏如,等. 汽车装配车间生产计划与调度的集成优化方法[J]. 自动化学报, 2002, 28(5): 83 - 89.
- [3] 尚文利,范玉顺. 成批生产计划调度的集成建模与优化[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(12): 1663 - 1667.
- [4] 张晓东,严洪森. 一类 Job-shop 车间生产计划和调度的集成优化[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 581 - 584.
- [5] Anwar M F, Nagi R. Integrated lot-sizing and scheduling for just-in-time production of complex assemblies with finite set-ups[J]. International journal of production research, 1997, 35(5): 1447 - 1470.
- [6] Cheng Runwei, Mitsuo G, Yasuhiro T. A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms, part II: hybrid genetic search strategies[J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 36(2): 343 - 364.