

文章编号: 1001-0920(2003)05-0581-04

一类 Job-shop 车间生产计划和调度的集成优化

张晓东, 严洪森

(东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 讨论一类 Job-shop 车间的生产计划和调度的集成优化问题, 给出了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。该模型利用调度约束来细化生产计划, 以保证得到可行的调度解。在混合算法中, 利用启发式规则来改善初始解集, 并采用分段编码策略将计划和调度解映射为染色体。算例研究表明, 该算法对求解该类问题具有很好的效果。

关键词: 成批生产; Job-shop; 生产计划和调度; 混合遗传算法

中图分类号: TB49

文献标识码: A

Integrated optimization of production planning and scheduling for a kind of job-shop

ZHANG Xiao-dong, YAN Hong-sen

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

Abstract: An integrated job-shop production planning and scheduling problem with setup time and batches is addressed. A nonlinear mix integer programming model is presented and solved by a hybrid genetic algorithm. In the model, the scheduling constraints are used to make the production planning more accurate, which provides a feasible scheduling. In the hybrid algorithm, the heuristic rules are used to improve the initial solutions. And a subsection coding strategy is offered to convert the planning and scheduling solution into a chromosome. An example shows the effectiveness of the hybrid algorithm.

Key words: Batch process; Job-shop; Production planning and scheduling; Hybrid genetic algorithm

1 引言

在汽车制造业, 冲压件制造车间属于一类典型的 Job-shop 车间。这类车间的生产特点是: 产品的品种多、批量大, 往往采用批生产, 而且生产品种和批次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, 而模具的更换时间大多为小时级)。另外, 零件的加工工艺路线互不相同, 具有很大的柔性。如果按 MRPII 系统中自顶向下递阶分解的方法进行生产计划制定^[1], 则不可避免地导致在制品库存量大, 计划不能按时完成以及生产节拍

不平衡等情况的发生, 这些都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[2~5]分别针对不同制造环境, 给出了生产计划和调度的集成优化方法。文献[2]针对 Job-shop 车间中有准备时间和无准备时间两种情况, 交替进行生产计划分解, Job-shop 调度渐次收敛于一个局部最优点, 但对柔性加工路径问题并未展开讨论; 文献[3]针对汽车装配车间(Flow-shop), 将 Tabu 搜索法与快速调度仿真相结合, 给出了 3 种不

收稿日期: 2002-06-11; 修回日期: 2002-09-09。

作者简介: 张晓东(1974—), 男, 山东临沂人, 博士生, 从事生产计划与调度等研究; 严洪森(1957—), 男, 浙江江山人, 教授, 博士生导师, 从事 CIMS、生产计划与知识化制造等研究。

同的启发式算法,使生产计划和调度同时得到优化;文献[4]针对复杂装配件制造环境,给出了一种启发式方法,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,但对多周期加工情形没有进一步讨论;文献[5]给出了单机批量确定和调度排序的集成优化模型。针对上述问题,本文建立了一个零件加工有准备时间和成批加工的生产计划与调度集成优化模型,该模型为非线性混合整数规划模型(NLMIP-model)。

对于上述模型,已不能用常规的线性规划方法或牛顿法、梯度法等非线性规划方法予以解决。考虑到遗传算法对解决复杂的非线性问题具有很好的效果^[6-9],它适应性强,扩展性能好,已成功地用于解决许多不同类型的复杂问题,可以方便地结合启发式规则、神经网络以及其他搜索方法,用于改善遗传算法的收敛性能。另外,遗传算法是一种具有全局优化能力的搜索方法,有利于解决本文提出的整体优化模型。因此,本文利用遗传算法来求解上述NLMIP模型,给出可行的计划和调度解。

2 冲压车间生产计划和调度集成优化模型

冲压车间在加工冲压件前需提前换装模具,换装模具所需时间(小时级)一般远大于单个零件的加工时间(秒级)。因此,在制定生产计划时,应尽可能安排零件成批生产,这样可减少准备时间,获得设备最大利用率以及保证零件的准时完工。另外,如果零件种类多、需求数量大,则可能无法在交货期内按时完工,这样就不可避免地需要提前生产一些零件或委托外协厂进行一部分零件的加工。但是,这部分零件储存在仓库中,会在不同程度上增加库存费用,所以应尽量减少零件生产的提前量和外协任务数量,以减少库存,降低存储费用。

下面给出生产计划和调度的集成优化模型。目标是在满足零件生产调度约束的前提下,使零件生产尽可能满足需求,同时获得设备的最大利用率,减少零件生产的准备费用和在制品的库存费用。定义目标函数

$$J = \text{Min} \left\{ \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{n_i} (a_{il} x_{ilk} + b p_{iul} x_{ilk}) + \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^N (c_i^+ \Delta^+ d_{ik} + c_i^- \Delta^- d_{ik}) + \sum_{k=1}^T \sum_{j=1}^M (e_j^+ \Delta^+ \beta_k + e_j^- \Delta^- \beta_k) + \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^N (br_{i\tau_{ik}}) \right\} \quad (1)$$

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_{iul} 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; e_j^+ 为在设备 j 上的单位加班工时费; $\Delta^+ \beta_k$ 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; $\Delta^- \beta_k$ 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; τ_{ik} 表示零件加工前准备工作的有无, $\tau_{ik} = 1$ 表示零件 i 的第 l 道工序在周期 k 需要做准备工作, $\tau_{ik} = 0$ 表示可不做准备工作。

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, $x_{i(l)}$ 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,即

$$x_{i(l+1)} = x_{ilk} + u_{i(l-1)k} - u_{ilk} \quad (2)$$

$$x_{i(l+1)} = x_{ilk} + R_{ik} - u_{ilk} \quad (3)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, N; l = 2, 3, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, T$ 。

在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与用户的需求量之间的关系。设 u_{iek} 为零件 i 最后一道工序在周期 k 的计划生产量, d_{it} 为周期 t 零件 i 的需求数量,即

$$\sum_{t=1}^k u_{iet} - \Delta^+ d_{ik} + \Delta^- d_{ik} = \sum_{t=1}^k d_{it} \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, T$

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_{iul} 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($p_{iul} > p_{i(l+1)l}$ 和 $p_{iul} < p_{i(l+1)l}$),由图1和图2可得工序约束为

$$\begin{cases} t_r(i, l, k) + p_{iul}(u_{i(l+1)k} - x_{i(l+1)k}) \\ t_r(i, l+1, k) + p_{i(l+1)l}(u_{i(l+1)k} - 1) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \text{s.t. } u_{i(l+1)k} > x_{i(l+1)k} > 0, \quad p_{iul} > p_{i(l+1)l} \\ t_r(i, l, k) + p_{iul} \\ t_r(i, l+1, k) + p_{i(l+1)l}x_{i(l+1)k} \end{cases} \quad (6)$$

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



图 1 工序约束 $p_{il} > p_{i(l+1)}$

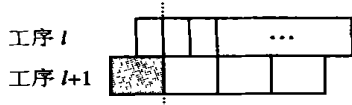


图 2 工序约束 $p_{il} < p_{i(l+1)}$

图中: 无填充的方框代表使用前一道工序在相同加工周期内加工完成的零件所生产的工件, 有填充的方框代表直接使用在制品所生产的工件, 方框的长短表示工序工时的大小。

当 $x_{i(l+1)k} = u_{i(l+1)k}$ 时, 容易看出工序 l 与 $l+1$ 之间不再存在工序约束。

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, 按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 最先加工的工序可不必做准备工作即可开始加工, 即准备时间为 0。定义变量 τ_{ilk} 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, $\tau_{ilk} = 0$ 表示可不做准备工作。则设备占用约束为

$$t_r(i, l, k) + p_{iilk} + \tau_{ilk} r_{il} \leq t_r(i, l, k) \quad \forall il, i l |_{jk} \quad (7)$$

定义 β_k 为周期 k 设备 j 的可用加工时间, 则设备负荷约束为

$$\max\{t_r(i, l, k) + p_{iilk}\} + \Delta^- \beta_k - \Delta^+ \beta_k = \beta_k, \quad \forall il \in y_{jk} \quad (8)$$

另外, 规定零件在同一个加工周期内只能占用一台设备, 定义 Γ_{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 $w_{jilk} = 0$ 。则有如下约束

$$w_{jilk} = 1, \quad u_{ilk} > 0 \quad (9)$$

$$w_{jilk} = 0, \quad u_{ilk} = 0 \quad (10)$$

成立。其中: $i = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, T$ 。另外, 考虑到加工任务的排序, 应该保证下式

成立。

$$w_{jilk} = 1, \quad \forall il \in y_{jk} \quad (11)$$

3 算法和算例

由于该问题解的结构十分复杂, 如果用二进制位串编码, 则很难保证遗传运算时解的合法性, 特别是对于大规模问题, 二进制位串的规模将变得非常大, 不利于求解。因此, 对于本文的计划和设备指派部分解, 采用实数编码的方法不失为一种好的选择^[6-9]。而对于调度部分解, 由于其中包含了两种信息(加工排序和工序约束), 一般的实数编码方法不能满足遗传运算的需求^[7,8]。考虑文献[8]总结的 9 种调度解表达方法, 本文采用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, 为了能将上述 3 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, A_u 表示计划部分解, A_s 表示调度部分解, A_d 表示设备指派部分解。

Step1: 指定遗传运算参数: 最大代数 $g\text{-num}$, 种群规模 popsize , 交叉概率 p_c 和变异概率 p_m , 并读取模型参数数据。

Step2: 生成初始种群。考虑式(2)和(3)的约束, 随机生成 A_u 段染色体, 而 A_s 段染色体则利用文献[8]提到的基于工序的表达法随机生成, A_d 段染色体由可用加工设备集即可确定。在初始种群中选出部分染色体(概率为 0.1), 其 A_s 段用最短加工时间优先规则(SPT)生成。

Step3: 由 Step2 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, 通过如下计算得到染色体适值

$$f_i = J_{\max} - J_i \quad (12)$$

其中: 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。

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

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{\text{popsize}} f_i}, \quad i = 1, 2, \dots, \text{popsize} \quad (13)$$

Step5: 选择个体进行交叉, A_u , A_s 和 A_d 段染色体分别独立进行交叉运算。 A_u 段染色体采取通用的两点交叉算子进行交叉运算。 A_s 和 A_d 段染色体的交叉运算相互关联, 先用两点交叉算子对 A_s 段染色体

表1 HGA与HPP算法的比较

问 题 零件种类数 × 工序数 × 设备台数	HPP		HGA	
	计算时间 / s	最优值	计算时间 / s	最优值
4 × 3 × 3	22.43	131.92	21	102.60
6 × 4 × 4	36.15	467.27	36	466.96
8 × 6 × 6	158.62	1 528.04	74	1 498.97
12 × 8 × 8	173.29	7 065.27	153	6 654.12
16 × 8 × 8	370.80	15 486.49	206	15 379.93
20 × 10 × 8	698.93	35 218.61	282	34 596.92

进行运算;然后对 A_s 段染色体进行染色体修正。相应地, A_d 段染色体也必须进行修正操作,产生的解才能保证为合法的解。

Step6: 选择染色体进行变异。 A_u 段染色体采取单点变异, A_s 段染色体采取互换基因值的方法进行变异(对随机产生的两个基因点互相交换位置)。变异后的修正操作是必要的, A_d 段染色体参照修正后的 A_s 段染色体相应进行修正操作。

Step7: 检查是否符合终止条件,如果符合,则终止遗传运算并输出解,否则转Step3。

上述混合遗传算法已用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。表1给出了针对不同规模算例,混合遗传算法(HGA)与文献[1]的递阶分解方法(HPP)计算结果的比较。由表1可以看出,采用HGA获得的目标值更好,运算速度更快,尤其在问题规模比较大的情况下,HGA的运算速度比HPP快很多。

4 结 论

本文针对递阶生产计划分解方法存在的缺点,提出了一类Job-shop车间(零件加工有准备时间、批量生产和柔性加工路径)的生产计划和调度集成优化模型。模型中考虑了详细的批量调度约束,其调度复杂度与批量大小无关,与递阶分解方法相比,可以保证得到一个可行的生产计划。本文在简单遗传算法的基础上,给出了一种适于求解此类问题的混合遗传算法,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。大量算例研究表明,该算法是有效的。

参考文献(References):

[1] Yan Hongsen. Hierarchical stochastic production planning with delay interaction[J]. *J of Optimization The-*

ry and Applications, 2000, 104(3): 659-689.

- [2] Lasserre J B. An integrated model for job-shop planning and scheduling[J]. *Management Science*, 1992, 38(8): 1201-1211.
- [3] 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.
(Yan H S, Xia Q F, Zhu M R, et al. Approaches to integrated production planning and scheduling in automobile assembly workshops[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(5): 83-89.)
- [4] Anwar M F, Nagi R. Integrated lot-sizing and scheduling for just-in-time production of complex assemblies with finite set-up[J]. *Int J of Production Research*, 1997, 35(5): 1447-1470.
- [5] Haase K, Kimms A. Lot sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities[J]. *Int J Production Economics*, 2000, 66(2): 159-169.
- [6] Kimms A. A genetic algorithm for multi-level, multi-machine lot sizing and scheduling[J]. *Computers & Operations Research*, 1999, 26(8): 829-848.
- [7] Knosala R, Wal T. A production scheduling problem using genetic algorithm[J]. *J of Materials Processing Technology*, 2001, 109(1-2): 90-95.
- [8] Cheng Runwei, Gen Mitsuo, Tsujimura Yasuhiro. A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms—Part : Hybrid genetic search strategies [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1999, 36(2): 343-364.
- [9] Li Y, Ip W H, Wang D W. Genetic algorithm approach to earliness and tardiness production scheduling and planning problem [J]. *Int J Production Economics*, 1998, 54(1): 65-76.