

成批生产计划调度的集成建模及优化

尚文利^{1,2}, 范玉顺³

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 针对多品种批量生产类型建立考虑调度约束的生产计划与调度的集成优化模型。函数目标是使总的调整费用、库存费用及生产费用之和最小, 约束函数包括库存平衡约束和生产能力约束, 同时考虑了调度约束, 即工序顺序约束和工件在单机上加工的能力约束, 调度约束的引入保证了计划的可行性。该模型为两层混合整数规划模型, 综合运用遗传算法和启发式规则, 提出了混合启发式求解算法。最后针对沈阳第一机床厂的多品种批量生产类型车间进行了实例应用, 对车间零件月份作业计划进行分解, 得到各工段的单元零件周作业计划, 确定了零件各周的生产批量与投产顺序。

关键词: 计划调度集成; 调度约束; 生产批量; 遗传算法

中图分类号: TP29

0 引言

在机床制造业, 机加车间主要分为多品种、小件、大批量与大件、小批量两种生产方式。小件、大批量生产车间主要生产机床轴杆、轴套、奇型、盘类等工件, 产品类型变化大, 生产批量大, 流水性较强, 生产周期短, 计划性变化较大, 投产方式由于投料数量多、入库频繁, 采用月批、半月批、周批或日批的方式进行。企业的计划包括年度、季度和月份产品生产计划。厂级生产制造部下达月份产品生产计划到车间, 由车间负责具体实施, 而车间计划人员制定短期零件加工计划时, 往往凭经验确定零件的加工批量和投产顺序, 常会导致在制品存量高, 计划不能按时完成以及生产不平衡等情况的发生。传统递阶结构的 MRPII 计划分解方法, 在确定零件在各周期的生产批量时, 由于没有考虑具体的调度约束, 常导致制定的计划在调度中的不可行性。

对于批量生产类型的车间, 制定生产计划的核心是确定产品在每个时间段上的生产数量, 使产品的总的调整费用与库存保管费用之和最小。针对批量生产的制造环境, 文献[1~4]分别给出了生产计划和调度的集成优化方法。文献[1]提出了一种车间环境集成计划与调度模型, 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, 以求最后得到最优的可行计划, 但这种方法只能收敛于局部最优解。文献[2]建立了一个车间的集成生产计划与调度模型, 同时考虑了工序加工的先后顺序约束和作业在机床上加工的能力约束, 并采用拉氏松弛技术对其进行求解, 但求解松弛调度子问题的算法的计算复杂性

基金项目: 国家高技术计划资助, 合同号: 2002AA412020

作者简介: 尚文利 (1974 -), 男, 黑龙江省北安市人, 中国科学院沈阳自动化研究所先进制造技术研究室博士研究生, 主要从事生产计划与调度优化技术、系统建模等研究。E-mail: shangwl@sia.cn.

较大，难以解决大规模问题。文献[3]针对复杂的装配型产品制造，给出了一种启发式方法，通过对产品订单进行分组，寻找网络关键路径进行调度，以准备时间、库存和总交付周期最小为目标，来确定最优批量，但没有考虑多周期加工情况。文献[4]针对多级、多资源约束的柔性生产线，以使总的调整费用、库存费用及加班费用之和最小为目标，建立了一种分批与调度集成的通用模型，但没有考虑生产费用和调度约束。

目前，针对生产计划与调度集成优化问题已经开展了较为深入的研究，但在技术上还不成熟，缺乏适合解决批量生产类型的实际问题的方法。在生产计划与调度集成决策问题上，主要分为递阶结构法和整体优化法。递阶结构法由不同层次的子模型构成，各子模型都有各自的目标函数和约束条件，但这种分而治之的决策模式影响了系统的整体运行性能。整体式优化法由于采用大而详细的整体优化模型，难以获取函数参数，不易解决生产实际问题。本文建立了一个基于分解方法的适于批量生产的计划调度集成优化模型，对计划和调度的目标函数进行综合评价，避免了上述两种方法的缺点，并采用启发式遗传算法求解。建立了由生产批量计划和加工完成时间联合确定的综合评价目标函数，使得在整个计划周期内项目总的调整费用、库存费用及生产费用之和最小，同时保证最大完工时间最小化的目标，约束函数考虑了库存平衡约束、生产能力约束、工序顺序约束以及单机加工能力约束，该模型为非线性混合整数规划模型。通过遗传算法和启发式方法相结合，对建立的两层混合整数规划模型进行求解，以给出可行的计划和调度解。

1 成批生产计划调度的集成优化模型

机床制造业的多品种批量生产的机加车间，生产的品种从几种到几十种，每月生产的零件不仅种类多而且也不断变化，生产车间一般拥有十几种或二十多种设备，并且每种设备拥有一台或多台机床，由于市场的变化，车间零件加工计划必须是动态的，具有实时性和灵活性。本文以沈阳第一机床厂的多品种中小批量生产类型的盘类工段为背景，建立一个考虑加工顺序和能力约束的成批生产的生产计划与调度的集成优化模型，将车间工段月份生产零件计划分解为单元周零件加工计划，并确定各零件的周生产批量和投产顺序。

盘类工段属于小件、中小批量生产类型。由于生产任务繁重，个别机床进行白夜两班生产。计划下达主要考虑零件工序长短、复杂度、单元设备能力、生产能力平衡以及整台机床的配套数和成套性，现场调度主要考虑毛坯、刀具、设备和人员等因素。

单元周零件加工计划属于生产批量计划问题。生产批量计划是在一定的计划周期内，将产品的生产批量和时间在加工项目集上进行分配，以满足一定的性能指标集。考虑在车间环境下有限计划跨度内，在 M 台机器上加工 N 种不同的工件，每种工件以相同的顺序依次通

过各机床加工。计划跨度根据情况分为 T 个周期，周期 t 内各工件的外部需求 d_{it} 已知。生产批量计划的目的是安排不同项目在各个计划周期内的加工批量，使在满足约束条件下，整个计划期内项目总的调整费用、库存费用以及生产费用之和最小。

在确定各个零件的周生产批量的基础上，通过考虑调度约束关系，确定批零件的生产顺序。生产批量与投产顺序的确定具有内容逻辑上的递阶关系，可以划分为两个层次的决策问题。上层问题确定零件的周生产批量，下层问题确定各个零件的投产顺序。下层问题的求解依赖于上层问题的决策结果，同时下层问题的求解结果对于上层决策具有反馈作用。考虑的调度约束包括工序约束和能力约束。工序约束是指一个工件的加工有多个工序，各工序间有一定的先后顺序。能力约束是指在任何时间点上，一台机床最多只能加工一个工件。

为便于描述，定义符号与变量如下： d_{it} - 周期 t 工件 i 的独立需求量； p_i - 工件 i 在 t 时段的单位生产费用； a_{ik} - 工件 i 的单位产品在机器 k 上的调整时间； b_{ik} - 工件 i 的单位产品在机器 k 上的加工时间； sc_i - 工件 i 的调整费用； h_i - 工件 i 在 t 到 $t+1$ 时段的单位库存费用； C_{kt} - 周期 t 的机器 k 的可用工时； B - 一个很大的正数。 I_{it} - 工件 i 在周期 t 的库存量； X_{it} - 周期 t 工件 i 的生产数量； Y_{it} - 工件 i 在周期 t 加工的生产调整变量。

为了描述调度约束，给出如下符号定义： J_{it} - 一个工件批作业 (i,t) ，即在 t 计划周期生产的工件 i ，其生产数量为 X_{it} ， $\forall i \in N, \forall t \in T$ ； J_t - N 个必须在第 t 个计划周期内完成的作业集， $J_t = \{J_{1t}, J_{2t}, \dots, J_{Nt}, \forall t \in T\}$ ； J - 表示所有的作业集， $J = \bigcup_{t=1}^T J_t$ ； s_{it} - 二值调整

变量，满足 $s_{it} = \begin{cases} 1, & X_{it} > 0 \\ 0, & X_{it} = 0 \end{cases}$ ； o_{ikt} - 表示作业 J_{it} 在机床 k 上的操作； t_{ikt} - 表示操作 o_{ikt}

的开始加工时间； f_{ikt} - 表示操作 o_{ikt} 的完成加工时间， $f_{ikt} = t_{ikt} + b_{ik} X_{it}$ ； p_{ikt}^u - 单位工件 i 的操作 o_{ikt} 的加工时间； τ_{ikt} - 单位工件 i 的关于操作 o_{ikt} 的调整时间； GN - 表示所有的操作连同虚拟的起始及完成操作所组成的集合； GA - 表示由所有操作间工序加工先后约束所构成的工序对集； GE_k - 表示在机床 k 上加工的所有操作的工序对的集合。

假设：1) 加工批量必须满足各周期的外部需求，既不允许缺货；2) 同一周期内，一种工件一旦开始加工，中间不能间断，只有在该工件加工完以后才能转向另外工件的加工。

令

$$Mks = \max_{i \in N, k \in M, t \in T} (f_{ikt} \cdot Y_{it}) \quad (1)$$

满足上述条件的生产计划分批与调度集成模型如下：

$$J = \min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (p_i X_{it} + h_i I_{it} + sc_i Y_{it}) + Mks \quad (2)$$

$$s. t. \quad I_{i,t-1} + X_{it} - d_{it} = I_{it}, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N (a_{ik} X_{it} + b_{ik} Y_{it}) \leq C_{kt}, \forall t \in T, \forall k \in M \quad (4)$$

$$Y_{it} B - X_{it} \geq 0, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (5)$$

$$X_{it}, I_{it} \geq 0, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (6)$$

$$Y_{it} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (7)$$

$$I_{i0} = I_{iT} = 0, \forall i \in N \quad (8)$$

其中 Mks 满足下列关系式。

$$\min Mks$$

$$s. t. \quad t_{ikt} - t_{ik't} - p_{ik't}^u X_{it} - \tau_{ik't} s_{it} \geq 0, \forall (o_{ik't}, o_{ikt}) \in GA \quad (9)$$

$$\begin{cases} t_{ikt} - t_{ik't} - p_{ik't}^u X_{it} - \tau_{ik't} s_{it} \geq 0 \\ t_{ik't} - t_{ikt} - p_{ikt}^u X_{it} - \tau_{ikt} s_{it} \geq 0 \end{cases}, \forall (o_{ik't}, o_{ikt}) \in GE_k \quad (10)$$

$$t_{ikt} \geq 0, \forall o_{ikt} \in GN \quad (11)$$

$$s_{it} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (12)$$

$$f_{ikt} \leq B Y_{it}, \forall o_{ikt} \in GN \quad (13)$$

$$f_{ikt} \leq Mks, \forall o_{ikt} \in GN \quad (14)$$

式(2)描述了由生产批量计划和加工完成时间联合确定的综合评价目标函数，使得在整个计划周期内项目总的生产调整费用、库存保管费用及生产费用之和最小，同时保证最大完工时间最小化的目标；约束(3)为基本的库存平衡方程式；约束(4)为能力约束不等式；约束(5)表示只有生产数量大于0，且相邻加工工件不相同才能发生调整；约束(6)表示决策变量是非负的；约束(7)表示调整变量的0、1约束；约束(8)表示表示初始和结束周期的库存状态为0；式(9)表示同一工件不同工序间的加工顺序约束；约束(10)表示在同一机床上不同工

件加工的先后顺序关系，每台机器在同一时间加工一道工序；约束(11)表示决策变量是非负的；式(12)表示调整变量的 0、1 约束；式(13)将上层问题的零件批量决策结果与下层的工件完工时间计算联系起来；式(14)表示所有工件的完工时间小于最大完工时间。上述集成模型中，生产调整费用、库存保管费用和生产费用的值与产品有关而与周期无关。

2 计划与调度集成问题的解方法

2.1 求解算法流程

成批生产的计划与调度集成优化模型包括确定零件每周的生产批量和投产顺序两方面的决策问题。将 $F = C_{\max} - J$ 作为评价函数， C_{\max} 为一个非常大的正数，且 $C_{\max} > J$ 。该算法描述如下：

第 1 步：初始化：

1) 给定交叉率 P_c ，变异率 P_m ，种群规模 Pop-size、进化代数 Max-gen，进化代数计数器 0；

2) 根据启发式规则随机产生染色体初始可行解 Y 。

第 2 步：评价函数计算：

1) 针对目标函数的前一部分，调用线性规划算法求解^[5]。判断线性规划求解是否可行，若不可行，则令 $F_i = 0$ ，转第 3 步；若可行，则转 2)。

2) 调用调度排序子过程，求解 Mks ；

3) 计算评价函数值 $F_i = C_{\max} - J, i=1$ 。

第 3 步：调度排序与生产批量评价：

1) 获得直到当前代为止的最好的染色体及评价价值；

2) $i=i+1, i>Pop_size$ ，转第 5 步；否则，转第 4 步。

第 4 步：对染色体调整模式进行遗传运算：

1) 选择运算；

2) 交叉运算；

3) 变异运算。

第 5 步：迭代次数 $>max_gen$ 或连续 20 代的改进量 $< \delta$ 则算法终止。

2.2 遗传算法过程

遗传运算过程用于对生产批量和投产顺序决策结果进行综合评价，主要由初始种群生

成、评价函数选取、选择操作、交叉操作和变异操作构成。

1) 初始种群生成：只使用调整变量 Y_{it} 编码，用 0、1 构造染色体基因。设 Y 为 $N \times T$ 维矩阵，行表示项目，列表示对应各个项目不同周期的调整变量的值。若 $\tau_i = \min_{t=1,2,\dots,T} \{t \mid d_{it} > 0\}$ ，则当 $t = \tau_i$ 时， $Y_{it} = 1$ ，否则 $Y_{it} = R(0,1)$ 。为了避免产生不可行解，假设 $d_{it} > 0$ ，则有 $Y_{it} = 1$ 。

2) 评价函数的选取：评价函数用于对个体进行评价，也是优化过程发展的依据。选取评价函数为： $F = C_{\max} - J$ ，其中 J 为(2)式中目标函数。

3) 选择操作：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 $p_i = F_i / \sum_{i=1}^{\text{pop_size}} F_i, i = 1, 2, \dots, \text{pop_size}$ 。

4) 交叉操作：采用双亲双子女交叉法。交叉后代直接代替双亲，没有交叉的双亲直接遗传到下一代，交叉后的种群规模同原种群的规模相同。

5) 变异操作：对各行单独进行变异，每一行采用值变异法进行变异，且只允许从第一个基因大于 0 以后的位置开始变异。

2.3 调度排序子过程

调度排序子过程根据生产计划的生产批量结果确定各周期的零件投产顺序。对于基于成组技术加工的生产线的批量生产类型，确定投产顺序可看作是同顺序调度问题(Permutation Flow Shop)，对于最大完工时间最小化的目标问题，研究表明在优化目标为最大完工时间和平均流程时间时，启发式算法中 NEH 的效果最好^[6]。因此，调度排序过程采用 NEH 准则分别处理各周期的零件投产顺序，从而减少在制品量。

NEH 方法的基本思想是赋予总加工时间长的工件优先权。首先计算各工件在所有机器上的加工时间之和，并按递减顺序排列，然后将前两个工件进行最优调度，再将剩余工件逐一插入到已调度的工件排列中的某个位置，使得调度指标最小，直到所有工件调度完毕。

在车间调度实践中，调度员多优先选择生产周期较长的工件加工，以保证生产计划的顺利完成。如果出现意外情况，不能完成计划时，则通过加班等形式对后期生产周期短的工件进行应急处理。NEH 调度规则符合工厂实际生产安排的思想。

启发式调度排序子过程的算法可描述如下：

计算各周期内每个工件 i 的总加工时间 $T_i = \sum_{k=1}^M p_{ikt}^u X_{it}$;

将工件按 T_i 递减顺序排列, 得到排列 S_1 ;

取排列 S_1 中的第 1、2 个工件, 计算两个工件两种排序的 f_{\max} , 选择 f_{\max} 值较小的排序结果, 并将两个工件放入排列 S_2 , 令 $k=3$;

从 S_1 中选择第 k 位的工件, 插入到 S_2 中的第 k 个位置中, 选择 f_{\max} 值最小的排序结果, 作为新的排列 S_2 ;

若 $k=n$, 则算法终止, 否则, 令 $k=k+1$, 转步骤 。

3 应用实例

将上述集成模型应用于沈阳第一机床厂多品种中小批量生产车间的计划决策中, 通过将零件月份生产作业计划分解为零件周生产作业计划, 确定各零件的周投产批量及投产顺序。该车间的盘类工段的主要设备包括普通车床、数控车床、内圆磨床、外圆磨床、铣床、平面磨床等。典型的盘类零件的主要机械加工过程包括: 车加工→铣加工→磨加工等工序。考虑 3 种典型加工零件, 计划跨度共 4 周。有 $M=3$, $N=3$ 和 $T=4$ 。零件需求矩阵如表 1。工件 i 的各工序加工时间 a_{ik} 、调整时间 b_{ik} 、调整费用 sc_i 及生产费用 p_i 如表 2 所示。机器 k 在周期 t 的可用工时 = $5d \times 8h/d \times 60 = 240\text{min}$, 若相同的机器 k 有多台, 则可用工时还应该乘以相同机器的台数。该工段的机械加工设备中每种机器有两台, 并且采用黑白两班人员制度, 故不做加班核算, 按车间生产实际有 机器 k 在周期 t 的可用工时 = $2 \times 2 \times 7d \times 8h/d \times 60 = 13440\text{min}$ 。工件 i 的单位库存费用 h_i 如表 3。

表 1 零件需求矩阵 d_{it}

周期 t \ 零件 i	1	2	3
1	42	30	32
2	42	38	40
3	38	60	38
4	50	38	50

表 2 工件各工序调整时间 b_{ik} 、加工时间 a_{ik} 、调整费用 sc_i 及生产费用 p_i

加工时间	J_1	J_2	J_3
------	-------	-------	-------

及成本	b_{1k}	a_{1k}	b_{2k}	a_{2k}	b_{3k}	a_{3k}
工序 1 时间/h	60	31	60	33	60	40
工序 2 时间/h	60	32	60	30	60	38
工序 3 时间/h	60	31	50	28	60	32
sc_i/p_i	120	78	100	70	128	86

表 3 工件 i 的单位库存费用 h_i

$h_i \setminus$ 工件	1	2	3
h_i	0.357	0.258	0.451

表 4 集成分批与排序的结果

周期	生产批量与投产顺序		
1	(2,68)	(1,42)	(3,32)
2	(1,42)	(3,40)	
3	(2,98)	(1,38)	(3,38)
4	(3,50)	(1,50)	

遗传算法参数为 $p_c = 0.5$, $p_m = 0.95$, $PoP_Size=30$, $Max_gen=100$ 。计算得到零件分批及排序结果如表 4, 结果不仅给出了各周期的零件生产批量, 而且还给出了零件在各周期的投产顺序。

4 结论

针对递阶结构生产计划分解方法存在的生产计划和调度脱节, 制定的生产计划在调度中往往不可行的缺点, 提出了一种适于成批生产的计划与调度集成优化模型。在确定零件投产批量时, 考虑了详细的调度约束, 可以保证得到一个可行的生产计划解。通过对生产计划和调度决策目标的综合评价分析, 确定合理的零件各周的生产批量和投产顺序。综合运用遗传算法和启发式规则, 提出了混合启发式求解算法。针对最大完工时间最小化的目标, 采用 NEH 准则分别处理各周期的零件投产顺序。由于考虑了具体的调度约束, 确定的生产批量与投产顺序结果是可行的。针对沈阳第一机床厂的多品种批量生产类型车间进行了实例应用, 对车间零件月份作业计划进行分解, 得到各工段的单元零件周作业计划, 确定了零件各周的生产批量与投产顺序。集成的计划调度优化模型具有较好的实际应用意义, 将集成到已

经开发应用的可重构车间管理系统^[7]中。

参考文献：

- [1] Lasserre J B. An integrated model for job-shop planning and scheduling[J]. Management Science, 1992, 38(8): 1201~1211.
- [2] Xiong R, Chen H S, Hu B S. An integration model for production planning and job shop scheduling and its lagrangian relaxation-based solution approach[J]. Journal of Xidian University, 1996, 23(4): 510~516. (in Chinese)[熊锐, 陈浩勋, 胡保生. 一种生产计划与车间调度的集成模型及其拉氏松弛求解法[J]. 西安电子科技大学学报, 1996,23(4):510~516.]
- [3] 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.
- [4] Xiong H Y, He Y. An integrated model jointing lot-sizing and scheduling for flexible flow-line and its genetic heuristic algorithm[J]. Journal of changsha railway university, 2001,19(1):51~55. (in Chinese)[熊红云, 何钺. 面向柔性生产线的分批与调度集成模型及其遗传启发算法, 长沙铁道学院学报, 2001,19(1):51~55.]
- [5] TANG Lixin. Theory and application of Lot-Sizing problem in CIMS[M]. Beijing: science press. 1999:134~137. (in Chinese)[唐立新著. CIMS 下生产批量计划理论及其应用. 北京: 科学出版社. 1999: 134 - 137.]
- [6] Brah S A, Luan Loo. Heuristics for Scheduling in a Flowshop with Multiple Processors[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 113(1): 113-122.
- [7] SHANG Wenli, et al. Research of primary technique to design reconfigurable shop floor control system[J]. Chinese Journal of mechanical engineering, 2004,40(12). [尚文利等. 可重构车间管理系统的關鍵设计技术研究, 机械工程学报, 2004,40(12).]

**Integrated production planning and scheduling model and optimization for batch
production**

SHANG Wen-li^{1,2}, FAN Yu-shun³

- (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110014, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;
3. National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An integrated optimization model of production planning and scheduling for batch production is introduced. Function objective is to minimize sum of total setup cost, stock cost and production cost. Restraint functions include equilibrium stock, production capacity, as while as

schedule restraints(procedure restriction and single machine capacity restriction). Feasible plan can be set down with considering schedule restraints. For solving the two mixed integer programming model, a hybrid heuristic algorithm based on genetic algorithm and heuristics rules is developed. Integrated optimization model is used in a batch production shop floor of shenyang machine tool company. Cell weekly production planning of workshop section is set down by decomposing work shop monthly production planning, and each item's weekly lot-size and sequence in which to put items into production are ascertained.

Key words: integrated production planning and scheduling; schedule restraints; lot-size; genetic algorithm