

多级车间生产计划和调度的集成优化*

张晓东 严洪森

(东南大学自动化所 南京 210096)

摘要: 针对一类多级制造系统建立了生产计划和调度的集成优化模型。该多级制造系统为三种类型车间的一个串联, 主要有作业车间、并行生产车间和流水车间, 且终端产品和上游车间制造的零部件之间为装配关系, 因此生产关系十分复杂。在分析批量生产特点的基础上给出了一个批量动态分割并算法, 并构造了一个基于遗传进化的启发式算法对该模型进行求解。与递阶分解方法的比较试验表明所提出的集成优化方法是有效的。

关键词: 多级制造系统 生产计划 调度 集成优化 批量分割

中图分类号: TP10

0 前言

生产计划的制定是合理利用企业资源和最大限度满足客户需求的一个关键, 生产调度是显著减少产品生产等待时间和总时间、显著提高设备利用率的一个重要手段, 因此生产计划和调度的优化问题一直是研究的一个热点。目前多数文献集中于解决单车间的计划或调度问题^[1], 对于多级车间生产计划和调度优化问题的研究相对较少, 且现有对多级车间生产计划问题研究的文献集中于解决 MRP 的主生产计划或能力计划问题^[2~4], 对调度问题考虑较少, 因此该类方法产生的生产计划往往不可行, 需要进行反复的修改^[1], 如果将调度与计划一起考虑则可以解决该问题, 但是模型一般很复杂甚至无法求解, 因此对生产计划和调度集成优化问题的研究具有十分重要的意义。

参考文献[1]研究了一类作业车间的生产计划和调度集成优化问题。参考文献[5]针对汽车装配车间(流水车间), 利用禁忌搜索算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。参考文献[6]针对多级串联流水车间给出了一个基于调度仿真的集成生产计划和调度系统, 通过在生产计划制定过程中引入仿真的方法可以给出设备的准确负荷, 并通过调节计划求解部分设备的可用负荷最终得到一个可行调度。但上述文献都没有给出多级制造系统的整体优化模型。为此, 建立一个三级制造与装配混合型生产的多级制造系统的生产计划和调度整体优化模型, 该多级制造系统为三种类型车间的一个串联, 主要有作业

车间、并行生产车间和流水车间, 且终端产品和上游车间制造的零部件之间为装配关系, 因此生产关系十分复杂。由于该整体优化模型中包含了非线性约束和整数解, 无法转换为常规的线性规划模型, 也不能用常规非线性优化算法对其求解, 这里给出了一种基于遗传进化的启发式算法进行求解。参考文献[7]中详细地描述了遗传算法在生产计划与调度优化领域的理论和技术。参考文献[8~10]则分别利用遗传算法解决了生产线平衡、并行多机调度和作业车间动态调度问题。

2 生产计划和调度集成优化模型

2.1 问题描述

以某汽车车身厂为研究背景, 汽车车身厂一般包括冲压、焊装和涂装三个车间, 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), 另外零件的加工工艺路线互不相同, 具有作业车间的特性。焊装车间一般是几条功能相同或相似的并行焊装线, 使用冲压车间生产出来的车身部件焊装车身, 由于该车间中的多条焊装线功能相同, 因此可以将其看作并行生产线。焊装好的车身进入涂装线(流水线)喷漆后就可以作为成品供应给总装厂。焊装车间所有产品分属于不同的产品族, 并分批进行发交, 发交有先后顺序, 且不同批次产品不能同时发交, 如果相邻两个批次产品属于同一产品族, 则这两个批次的产品在涂装车间中的生产可以连续进行, 无需准备工作, 否则需要进行额外的准备工作才能开始后一批次产品的生

* 国家自然科学基金(50475075)和高等学校博士学科点专项科研基金(20040286012)资助项目。20041026 收到初稿, 20050220 收到修改稿

产(这里设准备时间与要加工的产品无关)。另外每一焊装线的生产单元(机器)之间无缓冲区而其终端有一缓冲区,可以临时存放等待发交的产品,缓冲区容量有限。上述实际问题可以抽象为一个多级制造系统(多阶段制造系统),该系统为三种类型车间的一个串联,第一级为作业车间,第二级为并行生产车间,第三级为流水车间,且终端产品和上游车间制造的零部件之间为装配关系。

2.2 多级车间生产计划和调度集成优化模型

为了便于生产模型的建立,这里给出几个假设:

(1) 假设第二级与第三级车间使用同一产品号,这是由于第二级和第三级车间是相邻的流水车间,第二级的产品在经过第三级车间时,只做一些表面处理工作,产品的性质和数量不发生根本的变化。

(2) 第二级车间任一产品一加工完即可进入缓冲区等待发交,且忽略产品进入缓冲区所需要的时间和从缓冲区发交到下一级车间的时间。

(3) 第二级车间任一批量的生产和发交为连续的。

(4) 规定任一批次从开始加工到完成只能在同一条生产线上进行,且任一产品的生产需要依次经过生产线上所有工位。

(5) 由于第一级车间中零部件加工前的准备时间远大于加工时间,所以这里假定零部件各工序的生产为批量连续加工。

模型的目标为满足产品需求并保证第二级和第三级车间生产节拍的平衡,同时尽可能减少第一级车间零部件库存量、设备负荷和加工时的准备工作次数以及第三级车间准备工作次数,另外第二级车间中如果产品批量太大会造成生产线的阻塞,因此需要进行批量分割,但是批量分割过多则会加重批量管理的繁琐程度,因此批量不易分割过多。第二级和第三级车间生产节拍的平衡用最小化第二级车间产品最大完工时间来实现,目标函数如下。

$$J = \min \left\{ \sum_{i=1}^{n'} \sum_{T=2}^{N_T+1} c_i x_{iT} + \sum_{m=1}^{m'} \sum_{T=1}^{N_T} b_m t_{omT} + \sum_{i=1}^{n'} \sum_{n=1}^{n_i} \sum_{T=1}^{N_T} b t_{inT} + \sum_{l=1}^{l'} \sum_{T=1}^{N_T} b_c t_{cmT} + \sum_{T=1}^{N_T} b_k k'_T + \sum_{k=1}^{k'_T} \sum_{T=1}^{N_T} b t''_{skT} \right\} \quad (1)$$

式中 n' —— 第一级车间待生产零件种类数
 N_T —— 生产计划周期数
 c_i —— 零件 i 的单件储存费用
 x_{iT} —— 周期 T 开始时,零件 i 在第一级的库

存量, $T=1,2,L,N_T$

m' —— 第一级车间中的设备数

b_m —— 第一级中设备的加班费用系数

t_{omT} —— 周期 T 第一级中设备 m 的加班时间,
 $m=1,2,L,m'$

n_i —— 零件 i 的加工工序数, $i=1,2,L,n'$

b —— 单位工时费用,用于核算工人工资

t_{in} —— 零件 i 的第 n 道工序的准备时间

t_{inT} —— 用来表示零件加工前准备工作的有无
 $t_{inT} = 1$ 表示零件 i 的第 n 道工序在周期 T 需要做准备工作, $t_{inT} = 0$ 表示可以不用做准备工作

l' —— 第二级车间生产线数

b_c —— 生产线完工时间费用系数

t_{cmT} —— 周期 T 第二级车间生产线 l 上所有加工任务的最大完工时间

b_k —— 第二级车间批次数管理费用系数

k'_T —— 周期 T 第二级车间产品生产批次数

t''_{skT} —— 周期 T 第 k 批产品在第三级生产时所需准备时间, $k=1,2,L,k'_T$

中间库存零部件库存量和下游生产线需求之间应满足以下物流平衡关系

$$x_{i(T+1)} = x_{iT} + u'_{iT} - \sum_{j \in S_e(i)} r_{ij} d_{jT} \quad (2)$$

$$i=1,2,L,n' \quad T=1,2,L,N_T$$

$$\text{s.t.} \quad x_{i1} = x_{i0}$$

式中 x_{i0} —— 零部件 i 的初始储存量
 u'_{iT} —— 第一级中零部件 i 在周期 T 的计划生产量
 r_{ij} —— 零部件 i 与终端产品 j 的相关系数,即生产一个产品 j 所需零件 i 的数目
 $S_e(i)$ —— 与零部件 i 相关的终端产品集
 d_{jT} —— 周期 T 产品 j 的需求量

定理1 设零部件为批量加工,且批量中任意工件的任一道工序在其所需设备一空闲时即开始加工,则零部件 i 的批量完工时间为

$$t'_{ciT} = t_{iT} + \sum_{n=1}^{n_i} t_{pin} + (u'_{iT} - 1) \max_{n=1}^{n_i} t_{pin} \quad (3)$$

式中 t'_{ciT} —— 周期 T 零部件 i 的批量完工时间
 t_{iT} —— 周期 T 零部件 i 的批量开工时间
 t_{pin} —— 零部件 i 工序 n 的单件工时

证明略。

考虑设备 m 的可用加工能力有限, 则工件完工时间必须满足下式

$$\max_{\substack{i=1,L,n' \\ n=1,L,n_k}} \left[w_{imT} (t'_{iT} - \sum_{h=n+1}^{n_i} t_{pih}) \right] - t_{omT} = b_m \quad (4)$$

式中 w_{imT} —— 0、1 变量, 如周期 T 零部件 i 的第 n 道工序在设备 m 上加工, 则 $w_{imT} = 1$, 否则 $w_{imT} = 0$
 b_m —— 设备 m 的可用加工能力

将式(3)代入式(4)得

$$\max_{\substack{i=1,L,n' \\ n=1,L,n_i}} \left\{ w_{imT} \left[t_{iT} + \sum_{h=1}^n t_{pih} + (u'_{iT} - 1) \max_{h=1}^{n_i} t_{pih} \right] \right\} - t_{omT} = b_m \quad (5)$$

第一级车间零件加工前的准备时间约束

$$t_{inT} = 1 - y_{FimT} y_{LinT} \quad (6)$$

式中 y_{FimT} —— 0、1 变量, 若周期 T 零部件 i 的第 n 道工序在设备 m 上最先加工, 则 $y_{FimT} = 1$, 否则 $y_{FimT} = 0$
 y_{LinT} —— 0、1 变量, 若周期 T 零部件 i 的第 n 道工序在设备 m 上最后加工, 则 $y_{LinT} = 1$, 否则 $y_{LinT} = 0$

任一零部件的任一工序在同一周期内最多只能在一台设备上加工

$$\sum_{m=1}^{m'} w_{imT} = 1 \quad (7)$$

定理 2 设备上零部件加工顺序约束可以由下式表示

$$t_{iT} = \max_{\substack{n=1,2,L,n_i \\ m=1,2,L,m'}} \left\{ w_{imT} \sum_{j=1}^{n'} z_{ijmT} \sum_{h=1}^{n_j} w_{jhmT} \left[t_{jT} + \sum_{h=1}^{n_j} t_{pih'} + (u'_{iT} - 1) \max_{h=1}^{n_j} t_{pih'} - \sum_{h=h+1}^{n_j} t_{pih'} \right] \right\} + t_{im} t_{inT} - \sum_{h=1}^{n-1} t_{pih} \quad (8)$$

式中 z_{ijmT} —— 0、1 变量, 如周期 T 设备 m 上零部件 i 为零部件 j 的紧后加工零件, 则 $z_{ijmT} = 1$, 否则 $z_{ijmT} = 0$

证明略。

由参考文献[11], 生产线 l 上第 k 批产品的批量完工时间可以由下式计算

$$t'_{clkT} = t'_{h(l,k,T)T} + \sum_{n=1}^{m'} t_{pfh(l,k,T)n} + (u''_{h(l,k,T)T} - 1) \max_{n=1}^{m'} t_{pfh(l,k,T)n} \quad (9)$$

式中 t'_{clkT} —— 周期 T 生产线 l 上第 k 批产品的完

工时间

t'_{kT} —— 周期 T 第二级车间第 k 批产品的开

工时间

$f(k,T)$ —— 周期 T 第二级车间第 k 批产品的产

品号

m' —— 第二级车间生产线的工位

u''_{kT} —— 周期 T 第二级车间第 k 批产品的

批量

$h(l,k,T)$ —— 周期 T 生产线 l 上第 k 批产品的总

批次号

周期 T 生产线 l 上加工任务的最大完工时间为

$$t_{cmT} = \max_{k=1}^{k'_{lT}} t'_{clkT} \quad (10)$$

式中 k'_{lT} —— 周期 T 生产线 l 上加工批次数

第二级车间的生产计划按照 JIT 的生产模式来制定, 所以任一周期任一产品的生产量应该等于其需求量

$$\sum_{\forall f(k,T)=i} u''_{kT} = d_{iT} \quad i=1,2,L,n'' \quad (11)$$

式中 n'' —— 第二级车间待生产产品种类数

当第二级车间相邻两批产品属于同一产品族时, 则在第三级车间加工时不需要做准备工作。

$$t'_{skT} = (1 - y_{f(k-1,T)T} \wedge y_{f(k,T)T}) t_{sf(k,T)} \quad k=2,L,k'_T \quad (12)$$

$$t'_{s1T} = t_{sf(1,T)} \quad (13)$$

式中 y_{iT} —— 第 i 种产品所属产品族

\wedge —— 运算符, 如果 $a=b$, $a \wedge b=1$, 否则

$$a \wedge b = 0$$

t_{si} —— 第 i 种产品加工前所需的准备时间

批量开工时间主要由以下四个条件决定:

(1) 任一批次中第一个产品的任一工序需要等同一生产线上其紧前批最后一个产品相应工序占用的机器转入空闲时才能开始加工。

(2) 终端缓冲区有限, 为保证批量加工连续, 批量开工时间应该可以保证当批量中某个产品完工时缓冲区可用。

(3) 第二级车间产品批量的开工必须等相关零部件加工完成时才能开始。

(4) 任一批次必须在其紧前批开工之后才能开工。

由参考文献[11]中定理 2 可以得出只要批量开工时间满足如下两式, 则条件(1)即可满足

$$t'_{h(l,k+1,T)T} \max_{m=1}^{m'} \{ t'_{clkT} - \sum_{n=m+1}^{m'} t_{pfh(l,k,T)n} - \sum_{n=1}^{m-1} t_{pfh(l,k+1,T)n} \} \quad (14)$$

$$t'_{h(l,T)} = 0 \quad (15)$$

对于条件(2)，参考文献[11]中定理 3 及其推论 1 给出了一个产品批量不大于缓冲区容量时批量连续生产的充分条件，并构造了一个算法以求解满足该条件的批量开工时间。文中则进一步给出了当产品批量大于缓冲区容量时批量连续生产的充要条件，见下面的定理 3。

定理 3 设产品批量大于缓冲区容量且周期 T 第 k 批产品在生产线 l 上加工，如果产品批次的发交速度不比其进入缓冲区的速度慢，则批次连续生产的充要条件为下式成立

$$t'_{dkT} \leq t'_{kT} + \sum_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n} + b_l \max_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n} \quad (16)$$

式中 t'_{dkT} —— 周期 T 批量 k 的发交时间

b_l —— 生产线 l 上终端缓冲区的容量

否则，批次连续生产的充要条件为批量大小必须满足下式

$$u''_{kT} \leq \frac{t'_{kT} + \sum_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n} - t'_{dkT} + e_{f(k,T)} b_l - \max_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n}}{e_{f(k,T)} - \max_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n}} \quad (17)$$

式中 e_i —— 产品 i 在第三级车间流水线的单件加工工时

证明略。

在遗传进化基础上结合定理 3 和参考文献[11]中算法 1，给出了一个批量动态分割合并算法，以计算任意大小批量的开工时间，并在批量不能保证连续生产时可以对批量进行动态分割，而参考文献[11]中的批量分割算法只能对不大于缓冲区容量的产品批量进行分割。详细过程参见第 3.2 节染色体映射到解空间中的算法 1。

对于条件式(3)，有

$$t'_{h(l,k,T)} = 0$$

$$\text{若 } r_{ji} u''_{(k,T)T} < x_{cjKT} \quad \forall j \in \mathbf{y}_i \mid_{i=f(h(l,k,T),T)} \quad (18)$$

$$t'_{h(l,k,T)} = \max_j t'_{cjT}$$

$$\text{若 } r_{ji} u''_{(k,T)T} > x_{cjKT} \quad \forall j \in \mathbf{y}_i \mid_{i=f(h(l,k,T),T)} \quad (19)$$

式中 \mathbf{y}_i —— 产品 i 的相关零部件集

x_{cjKT} —— 周期 T 第 k 批产品加工前零部件 j 的库存量

库存动态平衡约束

$$x_{cjlT} = x_{jT} \quad (20)$$

$$x_{c(j+1)T} = x_{cjKT} - r_{j,f(k,T)} u''_{kT} + \mathbf{h}_{jkT} u'_{jT} \quad (21)$$

式中 \mathbf{h}_{jkT} —— 0、1 变量， $\mathbf{h}_{jkT} = 1$ ，如果周期 T 零

件 j 的加工批量在第二级车间第 $k-1$ 批和第 k 批加工批量之间完工，即 $t'_{(k-1)T} < t'_{cjT} < t'_{kT}$ ；否则 $\mathbf{h}_{jkT} = 0$

由条件(4)得批次开工时间必须满足下式

$$t'_{(k+1)T} < t'_{kT} \quad (22)$$

相邻批次产品发交时，后一批次必须等前一批次发交完成，且下一级生产单元上的相应准备工作完成之后才能开始发交

$$t'_{dkT} \geq t'_{d(k-1)T} + e_{f(k-1,T)} u''_{k-1T} + t'_{skT} \quad (23)$$

$$t'_{dlT} < t'_{slT} \quad (24)$$

假设任一批次的发交是连续的，则任一批次的发交时间跟开工时间必须满足如下关系

$$\left\{ \begin{array}{l} t'_{dkT} + e_{f(k,T)} (u''_{kT} - 1) < t'_{kT} + \sum_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n} + \\ (u''_{kT} - 1) \max_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n} \\ e_{f(k,T)} < \max_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n} \end{array} \right. \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t'_{dkT} < t'_{kT} + \sum_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n} \\ e_{f(k,T)} < \max_{n=1}^{m'} t_{pf(k,T)n} \end{array} \right. \quad (26)$$

3 基于遗传进化的启发式算法

3.1 问题的遗传表示

采用分段表达的方法，将染色体分成 5 段，依次表示第一级车间生产计划 Au ，零部件调度 As ，第一级车间设备指派 Am ，第二级车间批量调度 Ad 和批量的生产线指派 Al 。第一级车间的生产计划采用[1, 2]均匀分布的随机数来表示，零部件调度为零件号的一个排序，第一级车间设备指派通过给零件各道工序随机指派一个可用机器来表示。第二级车间批量调度采用最小批量单位 1 分割产品需求并进行随机排序来生成，批量的生产线指派通过给各批量随机指派一个生产线来表示。

3.2 染色体映射到解空间

第一级车间生产计划由 Au 段染色体中[1,2]之间均匀分布的随机数 r 和式(2)决定的计划下界确定，即 $u'_{iT} = \max[0, r(\sum_{j \in \mathcal{S}_e(i)} r_{ij} d_{jT} - x_{iT})]$ 。零部件调度

解由 As 和 Am 段染色体结合式(5)~(8)可以得到。而第二级车间批量调度则需要先根据 Ad 和 Al 段染色体进行批量预合并，即如果同一生产线上相邻生

产批量为同一种产品时则合并为一批。将合并后的批量调度信息代入下面的算法 1 以计算批量开工时间、完工时间和发交时间。再由调度顺序和式(12)、(13)计算第三级车间批量加工前的准备时间。

算法 1 批量动态分割合并算法

(1) 根据 Ad 和 Al 段染色体生成批量信息, 即同一生产线相邻的相同产品合并为一个批次, 并给出批量总数 n_i , 设置迭代次数 $i=0$ 。

(2) 设置 $i=i+1$, 如果 $i > n_i$, 则转(3); 否则转(5)。

(3) 如果第 i 批批量不大于缓冲区容量, 则使用参考文献[11]中算法 1 计算第 i 批开工时间和发交时间, 转(2); 否则转(4)进行二次分割。

(4) 如果批次进入缓冲区的速度不比其发交速度快, 则该批次不进行分割, 并使用参考文献[11]中算法 1 计算按照缓冲区容量决定的子批量的开工时间, 即为原批量的开工时间, 并由式(22)~(26)计算批量发交时间, 将该时间和由式(16)计算的批次发交时间进行比较, 取较大的作为批次发交时间, 并代入式(16)重新计算批次开工时间, 将得到的批量开工时间代入式(9)计算批量的完工时间, 并转(2); 否则先使用参考文献[11]中算法 1 计算按照缓冲区容量决定的子批量的开工时间, 即为原批量的开工时间, 并由式(22)~(26)计算批量发交时间, 式(9)计算批量的完工时间, 再利用定理 3 中式(17)对批次进行分割。设置 $n_i = n_i + 1$, 转(2)。

(5) 对可以连续生产的批量进行合并。当前后两批为相同产品且在同一生产线上生产时, 如果前批产品的完工时间与后批产品的开工时间相同, 则两批产品合并为一批。

3.3 评估和选择运算

将任意一条染色体 v_k ($k=1,2,L, \text{pop_size}$; pop_size 为种群规模)按照 3.2 节中方法映射到解空间, 并计算其对应的目标函数值 $J(v_k)$, 然后根据适值函数 $\text{eval}(v_k) = J_{\max} - J(v_k)$ 计算染色体的适值 (J_{\max} 为当前代中染色体对应解的最大目标函数值), 对各染色体进行评估。染色体的选择运算采用经典的赌轮选择法, 个体被选中的概率和其适值成正比, 因此各染色体的选择概率为 $P(v_k) = \text{eval}(v_k) / \sum_{k=1}^{\text{pop_size}} \text{eval}(v_k)$, 然后计算各染色体累积概率 $q(v_k) = \sum_{j=1}^k P(v_j)$, 通过与 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数 r 进行比较, 如果 $r < q_1$ 则选第一个染色体 v_1 , 否则选第 k 个染色体 v_k ($2 \leq k \leq \text{pop_size}$), 使得

$q_{k-1} < r < q_k$ 成立。

3.4 交叉运算

交叉运算的作用是将父代染色体中的较优性能保留到子代中去, 由于这里是分段编码, 因此应该分别进行交叉, 对于 As 和 Ad 两段染色体由于跟调度解的结构类似, 所以采用部分映射交叉(Partial matched crossover, PMX)^[8], 步骤如下。

(1) 随机选择父代染色体 1 中不同的两个点, 这两个点之间的部分即为参与交叉的基因块。

(2) 交换父代染色体 1 和 2 中选出的基因块, 产生两个子代。

(3) 确定交叉部分的映射关系, 找出增加、减少和重复的基因值。

(4) 根据映射关系修正两个子代染色体。

Au 段染色体采用线性交叉, 而 Am 和 Al 两段染色体直接采用双亲互换子串的方法进行交叉。

3.5 变异运算

变异运算可以使得求解过程很容易地跳出局部最优点, 保证算法的全局搜索性能。 Au 段染色体采取单点变异, As 和 Ad 段染色体则采取两点变异, 即在相应基因片段中随机选取两个基因值进行互换, Ad 段染色体变异时必须同时对 Al 段染色体中相同位置的两个基因值也进行互换, 以确保变异前的生产线指派; 对 Am 和 Al 两段染色体采取单点变异, 通过在值域内给变异点随机指定一个值来实现变异。

3.6 基于遗传进化的启发式算法

算法 2 基于遗传进化的启发式算法

(1) 初始化算法参数, 包括种群规模 pop_size , 最大遗传代数 ga_num , 交叉率 P_c , 变异率 P_m , 父代种群 $\text{pop}_0 = \{F\}$, 子代种群 $\text{pop}_1 = \{F\}$, 最佳染色体集 $\text{chromo_best}^* = \{F\}$, 当前代最佳染色体集 $\text{chromo_best} = \{F\}$, 全局最优适值 $\text{fitness_best}^* = \max_t$, 当前代最优适值 $\text{fitness_best} = 0$, 当前代数 $\text{cur_num} = 0$, 第一级车间最优生产计划解集 $\text{op_plan} = \{F\}$, 最优零部件调度集 $\text{op_cyschedule} = \Phi$, 最优批量调度集 $\text{op_hzschedule} = \Phi$ 。

(2) 根据 3.1 节产生初始种群 pop_0 。

(3) 根据 3.2 节中给出的方法将染色体映射到解空间, 并利用 3.3 节中给出的评估方法, 对父代种群 pop_0 进行评估, 计算各染色体的适值并将最佳染色体放入 chromo_best , 相应的最佳适值赋值给 fitness_best 。如果 $\text{fitness_best} < \text{fitness_best}^*$, 则更新全局最优适值 $\text{fitness_best}^* = \text{fitness_best}$ 及最佳染色体集 $\text{chromo_best}^* \leftarrow \text{chromo_best}$ 。

(4) 用 3.3 节中提到的赌轮选择法对父代种群 pop₀ 进行选择，产生子代种群 pop₁。

(5) 用 3.4 节和 3.5 节中的交叉变异方法对子代种群 pop₁ 进行交叉和变异运算。

(6) 对子代种群 pop₁ 进行评估，计算各染色体的适值并将最佳染色体放入当前代最佳染色体集 chromo_best，相应的最佳适值赋值给 fitness_best。如果 fitness_best ≤ fitness_best*，则更新全局最优适值 fitness_best* = fitness_best 及最佳染色体集 chromo_best* ← chromo_best；否则用 chromo_best* 替换子代 pop₁ 中的最差染色体。

(7) 更新父代种群 pop₀ ← pop₁，设置 cur_num = cur_num + 1。如果当前代数小于最大遗传代数，即 cur_num < ga_num，则转(4)；否则转(8)。

(8) 将最佳染色体集 chromo_best* 映射到解空间，并输出第一级车间最优生产计划解集 op_plan、最优零部件调度集 op_cyschedule 和最优批量调度集 op_hzschedule。

算法中 max_t 为一个很大的常数。

4 算例研究

算法 2 在 Win2000 Server 操作系统中用 VC++6.0 实现，计算环境为 Pentium 4 1.60 GHz，内存为 256 MB。该算法计算结果将与递阶分解方法进行比较。这里的递阶分解方法采用 JIT 拉生产方式直接给出第一级的生产计划，具体见算法 3。

算法 3 递阶分解方法

(1) 同算法 2 的(1)。

(2) 在产生初始种群时，第一级生产计划解直接采用“1”来表示，不再随机产生，其他同算法 2 的(2)。

(3) 和(4) 同算法 2 的(3)和(4)。

(5) 交叉和变异时不再对第一级生产计划进行运算，其他同算法 2 的(5)。

(6)~(8)同算法 2 的(6)~(8)。

集成优化方法(算法 2)将生产计划和调度都作为优化对象，理论上应该产生比递阶分解方法更好的解。实际数值计算结果详见下面算例比较。例 1 中给出了一个较小规模的算例，调度结果以甘特图形式给出。例 2 为集成优化方法与递阶分解方法的数值比较。

例 1 表 1 中给出了第二级车间的生产工艺参数，共有两条并行生产线，每条生产线的终端缓冲区容量为 10，在下一级生产线上批量加工前的准备时间都为 30 min。

设加工周期为 3，表 2 中给出了第二级车间各周期产品需求。表 3 中给出了第一级车间生产工艺参数，第一级车间零部件各道工序在加工前的准备时间都为 30 min，且各零件初始库存都为 0。表 4 中给出了第二级车间对第一级车间零部件的需求计划(由 BOM 表分解得到)。

表 1 第二级车间工艺规划表

产品号	工序号	第二级车间产品	第三级车间产品	产品族
		单件工时 t/min	单件工时 t/min	
1	1	9.00		2
	2	7.00	6.00	
	3	9.00		
2	1	9.00		2
	2	8.00	6.00	
	3	9.00		
3	1	9.00		3
	2	9.00	6.00	
	3	7.00		

表 2 第二级车间产品需求

产品	周期 T		
	1	2	3
1	18	18	17
2	13	12	12
3	12	11	11

表 3 第一级车间工艺规划表

零件号	工序号	可用设备 m	单件工时 t/s
1	1	1,3,4,5,6	4.00
	2	3,4,6	4.00
	3	1,2,3,5,6	2.00
2	1	2,3,4,5	4.00
	2	2,3,4,6	4.00
3	1	2,6	4.00
4	1	2,4,5	3.00
5	1	2,3,6	2.00
6	1	1,2,3,4,5	3.00
	2	1,3,4,6	2.00
	3	2,4,6	3.00

表 4 第二级对第一级车间零部件的需求计划

零件	周期 T		
	1	2	3
1	60	58	56
2	97	95	91
3	38	35	35
4	25	23	23
5	0	0	0
6	44	42	41

算法 2 中种群规模 30 遗传代数 1 000，交叉率 0.8，变异率 0.000 4，经过 32 s 计算得零件生产计划和各周期未零件库存如表 5。

第一级和第二级车间的调度甘特图如图所示。图中横轴表示加工周期，纵轴表示设备或生产线号。其中 M1 ~ M6 为第一级车间设备号，Line 1 和 Line 2 为第二级车间生产线号，第一级车间设备的各周

期调度甘特图中数值 A、B 分别表示零件号和工序号。生产线的各周期调度甘特图空白矩形上面 A、B 表示产品号和产品加工批量，以灰色填充之矩形为发交批次其上面数值表示发交批次对应的产品号。横轴各周期分界线下数值 A(B) 分别表示周期号和该周期加工批次数。

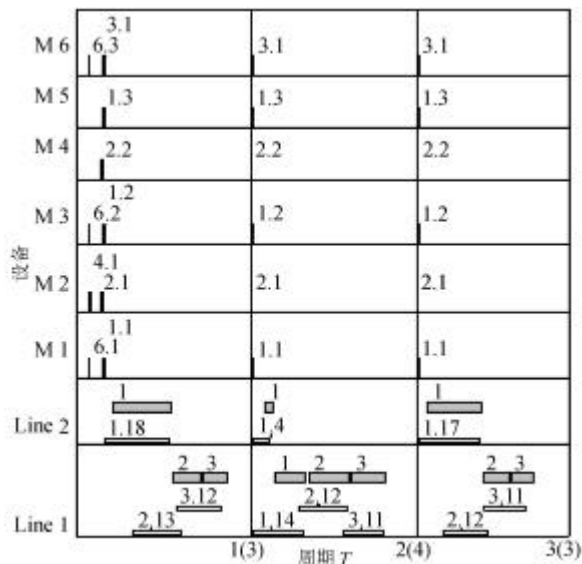


图 第一级和第二级车间调度甘特图

从上图中可以看出周期 2 和 3 中零件 1、2 和 3 的各道工序都不需要再做准备工作，使得零部件的完工时间得以提前，第二级车间各批次的开工时间也相应得到提前。另外通过批量分割排序和生产线

指派可以充分利用现有生产能力提高生产节拍，并使相同产品族尽量排在相邻批次进行生产以减少在下一级车间的准备工作次数。因此从计算结果可以看出，算法 2 已经满足了所提出的生产计划和调度集成优化的目标。

表 5 第一级车间生产计划和周期末零件库存

零件	生产计划			周期末库存		
	周期 T			周期 T		
	1	2	3	1	2	3
1	60	58	56	0	0	0
2	97	95	91	0	0	0
3	38	35	35	0	0	0
4	71	0	0	46	23	0
5	0	0	0	0	0	0
6	127	0	0	83	41	0

例 2 集成优化方法与递阶分解方法计算结果比较

表 6 中用 IGA 表示集成优化方法(算法 2)，用 HGA 表示递阶分解方法(算法 3)。表 6 中针对三个不同规模的算例给出了两种方法分别计算 10 次后得到的最大最小值和平均值，并给出了递阶分解方法与集成优化方法计算结果平均值之间的比较。从表 6 中可以看出递阶分解方法得到的目标值平均比集成优化方法得到的要大 13.58%，而给出的是一个极小化问题，因此从计算结果可以得出集成优化方法要比递阶分解方法效果好。

表 6 集成优化方法与递阶分解方法计算结果比较

	集成优化方法 IGA			递阶分解方法 HGA			目标平均值百分比 (HGA-IGA/IGA)
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	
Ex1	1 402.00	1 780.00	1 606.70	1 620.00	1 920.00	1 726.00	7.43%
Ex2	1 319.00	1 710.00	1 542.80	1 620.00	1 820.00	1 688.00	9.41%
Ex3	3 116.00	3 501.00	3 307.20	3 900.00	4 320.00	4 098.00	23.91%

5 结论

针对一个三级制造系统给出了生产计划和调度集成优化模型，并针对模型特点构造了一个基于遗传进化的启发式算法对该模型进行求解。其中针对批量生产的特点给出了一个批量动态分割合并算法，并证明了批量连续生产的充要条件。计算结果表明该批量分割算法可以有效地进行批量动态分割，以提高生产线的生产效率，且在批量分割的基础上，基于遗传进化的启发式算法可以较好地解决提出的生产计划和调度集成优化问题。最后通过与递阶分解方法进行试验比较，得出集成优化方法比递阶分解方法更有效。

参 考 文 献

- 1 Lasserre J B. An integrated model for job-shop planning and scheduling. *Management Science*, 1992, 38(8): 1201 ~ 1211
- 2 Ozdamar L, Barbarosoglu G. Hybrid heuristics for the multi-stage capacitated lot sizing and loading problem. *Journal of the Operational Research Society*, 1999, 50(8): 810 ~ 825
- 3 Beamon B M, Bermudo J M. A hybrid push/pull control algorithm for multistage, multi-line production systems. *Production Planning and Control*, 2000, 11(4): 349 ~ 356
- 4 Weng Z K. Managing production with flexible capacity deployment for serial multi-stage manufacturing systems.

- European Journal of Operational Research, 1998, 109(3) : 587 ~ 598
- 5 严洪森, 夏琦峰, 朱旻如, 等. 汽车装配车间生产计划与调度的同时优化方法. 自动化学报, 2002, 28(6) : 911 ~ 919
 - 6 Riane F, Artiba A, Iassinovski S. An integrated production planning and scheduling system for hybrid flowshop organizations. International Journal of Production Economics, 2001, 74(1-3) : 33 ~ 48
 - 7 玄光南[日], 程润伟. 遗传算法与工程设计. 汪定伟译. 北京: 科学出版社, 2000
 - 8 Tsujimura Y, Gen M, Kubota E. Solving fuzzy assembly-line balancing problem with genetic algorithms. Computers and Industrial Engineering, 1995, 29(1 ~ 4) : 543 ~ 547
 - 9 Cheng R, Gen M, Tozawa T. Minmax earliness/tardiness scheduling in identical parallel machine system using genetic algorithms. Computers and Industrial Engineering, 1995, 29(1 ~ 4) : 513 ~ 517
 - 10 孙志峻, 朱剑英, 潘全科. 基于遗传算法的多资源作业车间智能动态优化调度. 机械工程学报, 2002, 38(4) : 120 ~ 125
 - 11 张晓东, 严洪森. 并行生产线批量分割和调度的集成优化. 计算机集成制造系统—CIMS, 2004, 10(11) : 1408 ~ 1415

INTEGRATED OPTIMIZATION OF PRODUCTION PLANNING AND SCHEDULING FOR MULTI-STAGE WORKSHOP

Zhang Xiaodong Yan Hongsen
(*Research Institute of Automation,*
Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: An integrated optimization model of production planning and scheduling for a kind of multi-stage manufacturing system is presented, which consists of a forward chain of three kinds of workshops. They are a job shop, a parallel shop and a flow shop. The end products are assembled from the parts made by the upstream workshops, so that this kind of production is very complicated. On the basis of analyzing the batch production, a dynamic batch splitting and amalgamating algorithm is proposed. Also, a heuristic algorithm based on genetic evolution is used to solve the problem. At last, the experiments for comparing the proposed integrated optimization method with the hierarchical method show that the former is effective.

Key words : Multi-stage manufacturing system

Production planning Scheduling

Integrated optimization Batch splitting

作者简介: 张晓东, 男, 1974 年出生, 博士研究生。主要研究方向为生产计划与调度等。

E-mail : zwang@seu.edu.cn