

多品种装配车间调度研究

论文答辩

陈晟恺

健行理工 1001 201002750102

指导老师：鲁建厦、董巧英

2014 年 6 月 6 日

研究背景及意义

多品种生产方式出现

- 同步装配流水线方式作业

研究背景及意义

多品种生产方式出现

- 同步装配流水线方式作业
- 技术革新，客户需求的多样化

研究背景及意义

多品种生产方式出现

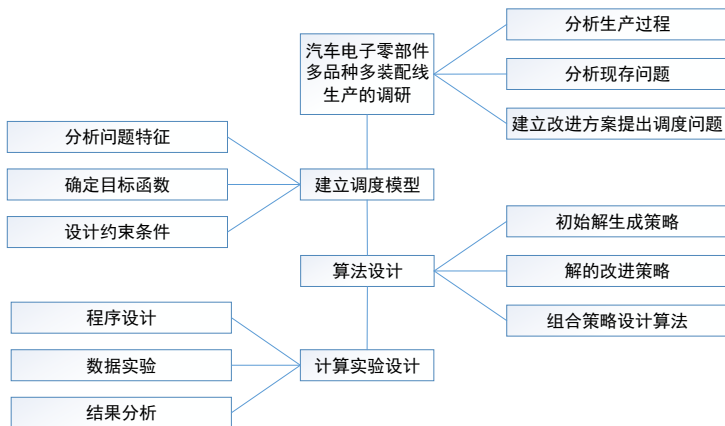
- 同步装配流水线方式作业
- 技术革新，客户需求的多样化
- 配合汽车生产

研究背景及意义

多品种生产方式出现

- 同步装配流水线方式作业
- 技术革新，客户需求的多样化
- 配合汽车生产
- 合理安排装配产线，优化调度作业单元

研究技术路线



图：课题研究关键技术路线

装配车间现状

采用专线生产的方式，当同一客户有多个订单下达时，按照先到先服务 (FCFS) 的规则进行装配生产安排，多条产线并行作业互不干扰。

¹其中订单 $a - b$ 表示主机厂 a 的第 b 个订单，下同。

装配车间现状

采用专线生产的方式，当同一客户有多个订单下达时，按照先到先服务 (FCFS) 的规则进行装配生产安排，多条产线并行作业互不干扰。



图: 3 条生产线的现行调度¹

¹其中订单 a - b 表示主机厂 a 的第 b 个订单，下同。

装配车间分析

存在问题

- 产线利用率低

装配车间分析

存在问题

- 产线利用率低
- 生产不够均衡

装配车间分析

存在问题

- 产线利用率低
- 生产不够均衡
- 产线冗余度高

装配车间分析

存在问题

- 产线利用率低
- 生产不够均衡
- 产线冗余度高
- 工期可控性底

装配车间分析

存在问题

- 产线利用率低
- 生产不够均衡
- 产线冗余度高
- 工期可控性底
- 工艺及设备和生产需求不匹配

装配车间分析

改进设计

突破专用线的生产界限，生产线可以加工多家主机厂的订单，形成所谓的混线生产。

装配车间分析

改进设计

突破专用线的生产界限，生产线可以加工多家主机厂的订单，形成所谓的混线生产。



图: 3 条产线的混线装配生产示意

模型 1

基本假设

- 整数变量假设

模型 1

基本假设

- 整数变量假设
- 数量有限假设

模型 1

基本假设

- 整数变量假设
- 数量有限假设
- 无差别假设

模型 1

基本假设

- 整数变量假设
- 数量有限假设
- 无差别假设
- 无插单生产假设

模型 1

基本假设

- 整数变量假设
- 数量有限假设
- 无差别假设
- 无插单生产假设
- 不可中断假设

模型 1

基本假设

- 整数变量假设
- 数量有限假设
- 无差别假设
- 无插单生产假设
- 不可中断假设
- 无相关假设

$$\min \quad \lambda_t \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^{|S_l|} wt_{l_k} T_{l_k} + \lambda_c \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^{|S_l|} wc_{l_k} C_{l_k} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum_{l=1}^m |S_l| = n \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\bigcup_{l=1}^m \overline{S_l} = N \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^{|S_l|} wt_{l_k} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^{|S_l|} wc_{l_k} = 1 \quad (5)$$

$$\lambda_c + \lambda_t = 1 \quad (6)$$

$$C_{l_1} = p_{l_1} \quad l = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$C_{l_k} = C_{l_{k-1}} + p_{l_k} \quad k = 2, 3, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$p_{l_k} = p'_{l_k} + s_{l_k} \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$T_{l_k} = \max\{0, C_{l_k} - d_{l_k}\} \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$p'_{l_k}, s_{l_k}, d_{l_k}, wt_{l_k}, \lambda_t, \lambda_c \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

模型 2

相关假设

- 插单假设

模型 2

相关假设

- 插单假设
- 惩罚一致假设

模型 2

相关假设

- 插单假设
- 惩罚一致假设
- 订单最早可处理时刻假设

模型 2

相关定义

产线均衡率

考虑订单陆续到达时，更为注重订单的按时交付，同时也关注流水线的生产均衡性。生产均衡性指的是流水线的使用均衡，不要出现某条流水线一直繁忙而有些流水线空闲居多，导致负荷不均衡，损失产能。产线均衡率定义如下：

$$Rb = \frac{\sum_{l=1}^m C_l}{m \times \max_{1 \leq l \leq m} \{C_l\}}$$

模型 2

相关定义

产线的利用率

各流水线除了切换准备，其余时间都在处理订单，在模型 2 中，流水线上订单间的空闲等待将会出现，其中切换准备同样不计入空闲，流水线利用率定义为：

$$Ru_l = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{|S_l|} f_{l_k}}{C_l}$$

其中， f_{l_k} 为订单的闲置，定义为：

$$f_{l_k} = \begin{cases} \max\{r_{l_k} - s_{l_k}, 0\} & k = 1 \\ \max\{r_{l_k} - s_{l_k} - C_{l_{k-1}}, 0\} & k \geq 2 \end{cases}$$

$$\min \quad \lambda_1 \sum_{l=1}^m \frac{\sum_{k=1}^{|S_l|} w_{l_k} |L_{l_k}|}{Ru_{l_j}} + \lambda_2 e^{-Rb} \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^{|S_l|} w_{l_k} C_{l_k} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{l=1}^m |S_l| = n \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \bigcup_{l=1}^m \overline{S_l} = N \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^{|S_l|} w_{l_k} = 1 \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^{|S_l|} w_{l_k} C_{l_k} = 1 \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} C_{l_1} = f_{l_1} + s_{l_1} + p_{l_1} \end{array} \right\} \quad l = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} C_{l_k} = C_{l_{k-1}} + f_{l_k} + s_{l_k} + p_{l_k} \end{array} \right\} \quad k = 2, 3, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^{|S_l|} r_{l_k} > 0 \end{array} \right\} \quad k = 2, 3, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} L_{l_k} = C_{l_k} - d_{l_k} \end{array} \right\} \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$\left. \begin{array}{l} T_{l_k} = \max\{0, C_{l_k} - d_{l_k}\} \end{array} \right\} \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$\left. \begin{array}{l} E_{l_k} = \max\{d_{l_k} - C_{l_k}, 0\} \end{array} \right\} \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$\left. \begin{array}{l} s_{l_k}, d_{l_k}, w_{l_k}, w_{l_k} C_{l_k}, \lambda_1, \lambda_2, r_{l_k} \geq 0 \end{array} \right\} \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

初始解构造

复合分派规则

复合分派规则是综合了许多基本规则的一个表达式，各基本规则都有其各自的比例参数，用来给作业的排序提供参考，没有固定的形式，可以用作调度问题初始解的求解。

初始解构造

复合分派规则

复合分派规则是综合了许多基本规则的一个表达式，各基本规则都有其各自的比例参数，用来给作业的排序提供参考，没有固定的形式，可以用作调度问题初始解的求解。

ATC 规则

$$l_j(t) = \frac{wt_j}{p_j} \exp \left(-\frac{\max\{d_j - p_j - t, 0\}}{K\bar{p}} \right)$$

初始解构造

复合分派规则

模型 1 适合用 ATC 规则进行初始解的构造，按照系统时间 t 的进行，动态判断各流水线闲忙状态，若有流水线处于空闲状态，则根据排序指数选出下一个进行处理的订单，将其安排入该空闲流水线，更新流水线状态及待调度订单列表，预估该流水线的下一次空闲时刻，重复这个步骤一直到所有订单都被调度。

解的改进

交替调整策略 (Cycly Amend, Cyc)

- 流水线内部调整

解的改进

交替调整策略 (Cycly Amend, Cyc)

- 流水线内部调整
 - 使用规则调整

解的改进

交替调整策略 (Cycly Amend, Cyc)

- 流水线内部调整
 - 使用规则调整
 - 区域搜索调整

解的改进

交替调整策略 (Cycly Amend, Cyc)

- 流水线内部调整
 - 使用规则调整
 - 区域搜索调整
- 流水线之间调整

解的改进

交替调整策略 (Cycly Amend, Cyc)

- 流水线内部调整
 - 使用规则调整
 - 区域搜索调整
- 流水线之间调整
 - 流水线贡献值

解的改进

交替调整策略 (Cycly Amend, Cyc)

- 流水线内部调整
 - 使用规则调整
 - 区域搜索调整
- 流水线之间调整
 - 流水线贡献值
 - 订单贡献值

Cyc – ATC 算法

- Step1** 初始化。 $J = N, \bar{L} = \emptyset, t_l = 0, \bar{S}_l = \emptyset, a_l = 0, (l = 1, 2, \dots, m)$, 计算各订单处理时间 $p'_j = g(j, n_j)$, 进一步得到整合订单处理时间 $p_j = p'_j + s_j, (j = 1, 2, \dots, n)$, 置系统时间 $t = 0$;
- Step2** 若存在 $a_l = 0$, 记 $l^* = \min_{a_l=0} \{l\}$, 执行 **Step3**, 否则执行 **Step4**;
- Step3** 根据排序指数, 选取预备调度订单 j^* , 使得 $I_{j^*}(t) = \max_{j \in J} \{I_j(t)\}$, 将订单 j^* 安排入流水线 l^* 进行处理, 记入调度 S_{l^*} , $\bar{S}_{l^*} = \bar{S}_{l^*} \cup \{j^*\}, J = J - \{j^*\}$, 记录调度订单序列 $\bar{L} = \bar{L} \cup \{j^*\}$, 更新流水线预计空闲时刻 $t_{l^*} = t + p_{j^*}$, 修改流水线状态 $a_{l^*} = 1$ 。若 $J = \emptyset$, 订单初始调度完毕, 执行 **Step5**, 否则执行 **Step2**;
- Step4** 记 l_t 使得 $t_{lt} = \min_{1 \leq l \leq m} \{t_l\}$, 修改流水线状态 $a_{lt} = 0$, 并更新系统时间 $t = t_{lt}$, 执行 **Step2**;
- Step5** 设定交替次数 NR , 置 $k = 1$;
- Step6** 根据各流水线的贡献值 $H(S_l)$ 值, 选出具有最大值与最小值的流水线, 分别记为 l^+, l^- ;
- Step7** 根据流水线 l^+ 的调度 S_{l^+} 中具有最大贡献值 $h(l_k)$ 值的订单 l_k^+ , 并将其添入流水线 l^- 的调度 S_{l^-} 末端, 更新流水线 l^+, l^- 的订单安排序列;
- Step8** 内部调整初始化。 $J = \bar{S}_l (l = l^+, l^-)$, 置所选的流水线系统时间 $t_l = 0$, 重置 $\bar{S}_l = \emptyset$;
- Step9** 根据排序指数, 选取预备调度订单 l_k^* , 使得 $I_{l_k^*}(t) = \max_{l_k \in J} \{I_{l_k}(t)\}$, 将订单 l_k^* 进行安排处理, $J = J - \{l_k^*\}$, 将该订单排入该流水线的调度 $\bar{S}_l = \bar{S}_l \cup \{l_k^*\}$ 。若 $J = \emptyset$, 该流水线上的订单调度完毕, 执行 **Step11**, 否则执行 **Step10**;
- Step10** 更新流水线系统时间 $t_l = t_l + p_{l_k^*}$, 执行 **Step9**;
- Step11** 置 $k = k + 1$, 若 $k \leq NR$, 执行 **Step6**, 否则终止算法。

Cyc – Tabu 算法

Step1 根据调度分派规则生成初始调度解 S ;

Step2 设定交替次数 NR , 置 $k_r = 1$;

Step3 根据各流水线的贡献值 $H(S_l)$ 值, 选出具有最大值与最小值的流水线, 分别记为 l^+ , l^- ;

Step4 根据流水线 l^+ 的调度 S_{l^+} 中具有最大贡献值 $h(l_k)$ 的订单 $l_{k^*}^+$, 并将其添入流水线 l^- 的调度 S_{l^-} 末端, 更新流水线 l^+ , l^- 的订单安排序列;

Step5 初始化。设定迭代次数 N_l , 清空禁忌列表 TL , 设定列表长度 NL , 将构造算法所得的调度作为初始调度, 并记为当前最优调度, $S^{(0)} = S^{(1)} = S_l(l = l^+, l^-)$, 并置 $k = 1$;

Step6 从 $S^{(k)}$ 所有不在禁忌列表中的相邻移动 (l_j, l_k) 中, 所得调度具有最小函数值的移动, 记为 (l_j^*, l_k^*) , 所得调度记为 S^* , 并置 $S^{(k+1)} = S^*$;

Step7 将相邻移动 (l_j^*, l_k^*) 入栈禁忌列表, 若列表容量已满, 则按 FIFO 规则出栈最早的相邻移动;

Step8 若 $G(S^*) < G(S^{(0)})$, 置 $S^{(0)} = S^*$;

Step9 置 $k = k + 1$, 若 $k \leq N_l$, 执行 **Step6**, 否则禁忌搜索调整完成, 更新调度解 S , 执行 **Step10**;

Step10 置 $k_r = k_r + 1$, 若 $k_r \leq NR$, 执行 **Step2**, 否则终止算法。

解的改进

虚拟序列策略 (Virtual List, Vtr)

虚拟序列

将所有流水线上的调度看作一个整体，所有订单都在这个序列上，其排列顺序由初始解的生成规则决定，也就是在调度安排时的记录序列 L ，并按先后顺序记该序列上的订单为 $L_j, (j = 1, 2, \dots, n)$ 。

解的改进

虚拟序列策略 (Virtual List, Vtr)

虚拟序列

虚拟序列上只有所有订单的先后信息，其订单的一种排序称为一种虚拟调度。

- 相邻订单 L_j, L_k 安排在同一条流水线 l 上进行处理
- 相邻订单 L_j, L_k 分别安排在不同流水线 l, l' 上进行处理

注意过度禁忌

解的改进

虚拟序列策略 (Virtual List, Vtr)

虚拟序列

虚拟序列上只有所有订单的先后信息，其订单的一种排序称为一种虚拟调度。

- 相邻订单 L_j, L_k 安排在同一条流水线 l 上进行处理
- 相邻订单 L_j, L_k 分别安排在不同流水线 l, l' 上进行处理

注意过度禁忌

- 流水线之间相邻订单过度禁忌

解的改进

虚拟序列策略 (Virtual List, Vtr)

虚拟序列

虚拟序列上只有所有订单的先后信息，其订单的一种排序称为一种虚拟调度。

- 相邻订单 L_j, L_k 安排在同一条流水线 l 上进行处理
- 相邻订单 L_j, L_k 分别安排在不同流水线 l, l' 上进行处理

注意过度禁忌

- 流水线之间相邻订单过度禁忌
- 流水线之内相邻订单过度禁忌

Vtr – Tabu 算法

- Step1** 运用调度规则 (如 ATC、ATCS) 建立流水线全局调度初始解, 得到虚拟序列 L 及其初始调度 $S^{(0)}$, 并将其作为目前最优调度。设定禁忌搜索迭代次数 N_I , 设定列表长度 NL , 并置特赦调度 $A = S^{(0)}$;
- Step2** 置 $S^{(1)} = S_{(0)}$, 清空禁忌列表 TL , 置 $k = 1$;
- Step3** 在 L 所生成的邻域中, 按顺序选取 (L_m, L_n) , 记当前调度为 S^- , 若 L_m, L_n 当前均安排在同一流水线的调度中, 则执行 **Step4**, 否则执行 **Step5**;
- Step4** 交换订单对顺序, 得到新的调度为 S^+ 型;
- Step5** 将订单 L_m 重派入流水线 l' , 得到调度为 S^{a+} 型, 或将订单 L_n 重派入流水线 l 得到调度为 S^{b+} 型, 或将订单 L_m, L_n 交换位置, 得到调度为 S^+ 型;
- Step6** 更新虚拟序列中这两个订单的位置为 (L_m, L_n) ;
- Step7** 检查禁忌列表中的订单对, 若它们别安排在不同的流水线, 则只对其交换位置的移动禁忌; 若移动后的调度为特赦调度, 一样认定为可行移动。计算 $S^{(k)}$ 中所有可行移动组成的邻域, 选取它们中具有最小函数值调度的移动, 记该订单对为 (L_m^*, L_n^*) , 所得调度记为 S^* , 并置 $S^{(k+1)} = S^*$;
- Step8** 若相邻移动所得调度属于 S^+ 型, 则将 (L_m^*, L_n^*) 入栈禁忌列表, 若列表容量已满, 则按 FIFO 规则出栈最早的相邻移动, 检查禁忌列表, 删除过禁忌项;
- Step9** 若 $G(S^*) < G(S^{(0)})$, 置 $S^{(0)} = S^*$;
- Step10** 置 $k = k + 1$, 若 $k \leq N_I$, 执行 **Step3**, 否则终止算法, $S^{(0)}$ 为最终所得调度。

模型 2 解的改进

变动邻域策略 (Variate Neighbor, VN)

Vtr - Tabu 算法可以得到较有的结果，然而由于其邻域结构的特点，可能需要很大的迭代次数才能将解改进。采用变动邻域的策略可以人为切换邻域结构，放弃一些需要过多迭代次数的邻域结构，以减少计算时间，这样的综合策略称为 VVT (变动邻域结构的虚拟序列禁忌搜索)

VVT 算法

- Step1** 运用调度规则 (如 ATC、ATCS) 建立流水线全局调度初始解, 得到虚拟序列 L 及其初始调度 $S^{(0)}$, 并将其作为目前最优调度, 将其邻域集合 $S^{(c)}$ 中的调度按函数值的非减排列, 记为 $S_{[1]}, S_{[2]}, \dots, S_{[|S^{(c)}|]}$, 置 $i = 1$ 。设定禁忌搜索迭代次数 N_I , 设定列表长度 NL , 并置特赦调度 $A = S^{(0)}$;
- Step2** 若 $i \leq |S^{(c)}|$, 置 $S^{(1)} = S_{[i]}$, 清空禁忌列表 TL , 置 $k = 1$, 否则终止算法;
- Step3** 在 L 所生成的邻域中, 按顺序选取 (L_m, L_n) , 记当前调度为 S^- , 若 L_m, L_n 当前均安排在同一流水线的调度中, 则执行 **Step4**, 否则执行 **Step5**;
- Step4** 交换订单对顺序, 得到新的调度为 S^+ 型;
- Step5** 将订单 L_m 重派入流水线 l' , 得到调度为 S^{a+} 型, 或将订单 L_n 重派入流水线 l 得到调度为 S^{b+} 型, 或将订单 L_m, L_n 交换位置, 得到调度为 S^+ 型;
- Step6** 更新虚拟序列中这两个订单的位置为 (L_m, L_n) 。
- Step7** 计算 $S^{(k)}$ 中所有可行移动组成的邻域, 选取它们中具有最小函数值调度的移动, 记该订单对为 (L_m^*, L_n^*) , 所得调度记为 S^* , 并置 $S^{(k+1)} = S^*$;
- Step8** 若相邻移动所得调度属于 S^+ 型, 则将 (L_m^*, L_n^*) 入栈禁忌列表, 若列表容量已满, 则按 FIFO 规则出栈最早的相邻移动;
- Step9** 若 $G(S^*) < G(S^{(0)})$, 置 $S^{(0)} = S^*$;
- Step10** 置 $k = k + 1$, 若连续 50 次采用没有更新 $S^{(0)}$, 则置 $i = i + 1$, 执行 **Step2**, 否则若 $k \leq N_I$, 执行 **Step3**, 否则终止算法, $S^{(0)}$ 为最终所得调度。

实验设计

生产装配信息生成

- 数量信息

实验设计

生产装配信息生成

- 数量信息
- 时间信息

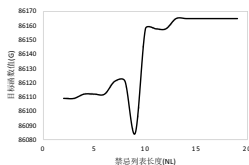
实验设计

生产装配信息生成

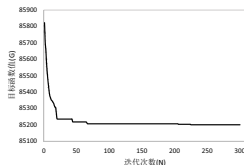
- 数量信息
- 时间信息
- 惩罚系数和有限系数

实验设计

相关参数确定



(a) 禁忌列表长度

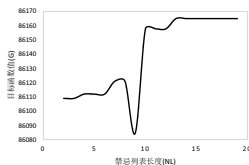


(b) 迭代次数

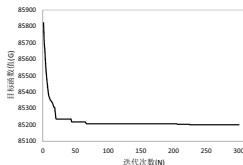
图: 100 件订单的目标函数值和相关参数的关系

实验设计

相关参数确定



(a) 禁忌列表长度



(b) 迭代次数

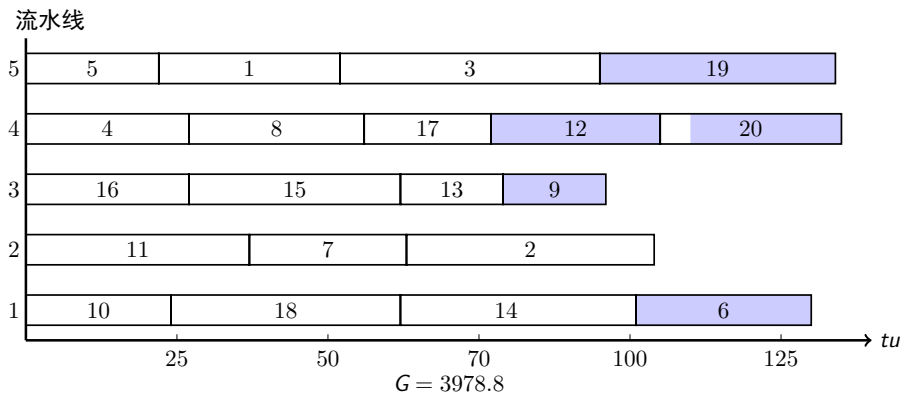
图: 100 件订单的目标函数值和相关参数的关系

可以看出, $NL = 9$ 是最佳列表长度, 取迭代次数 $N = 70$ 是较为适宜的

实验结果示例

以模型 1 为例，示例订单量 $n = 20$ ，决策参数为 $\lambda_1 = 0.6, \lambda_2 = 0.4$

实验结果示例



实验结果示例

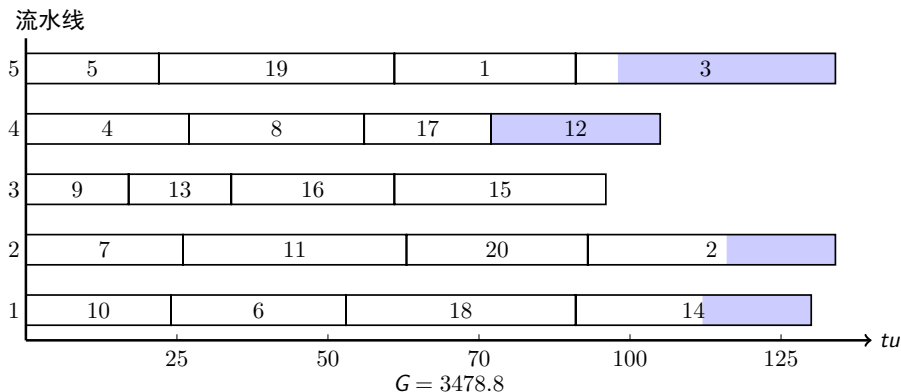
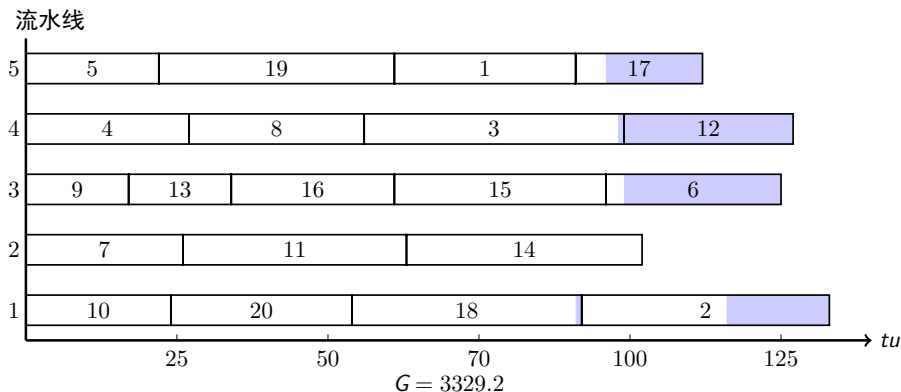


图: Cyc – Tabu 算法调度结果

实验结果示例



模型 1 求解结果与分析

不同决策环境分析

以 $m = 6, n = 200$ 为例

模型 1 求解结果与分析

不同决策环境分析

以 $m = 6, n = 200$ 为例

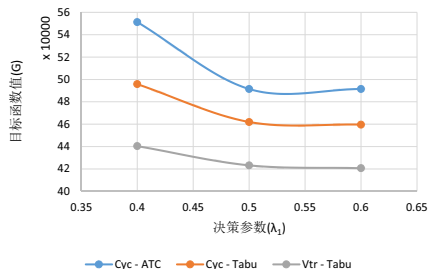
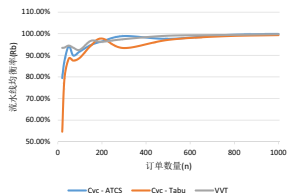


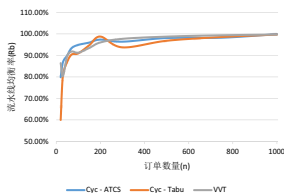
图: 决策参数和目标函数值关系示例

模型 2 求解结果与分析

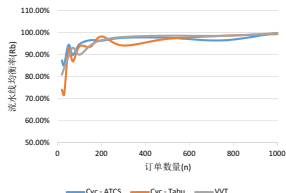
流水线均衡率分析



(a) $m = 5$



(b) $m = 6$

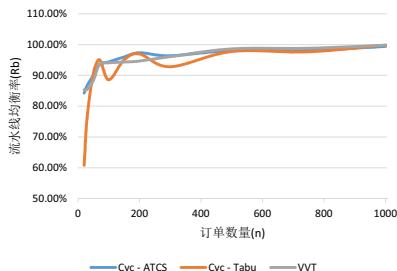


(c) $m = 7$

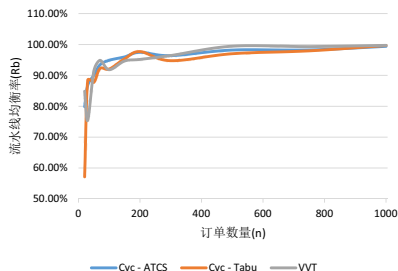
图: 不同流水线数量和流水线均衡率关系 ($\lambda_1 = 0.5$)

模型 2 求解结果与分析

不同决策环境分析



(a) $\lambda_1 = 0.4$



(b) $\lambda_1 = 0.6$

图: 决策环境和流水线均衡率关系 ($m = 6$)

未来展望

- 考虑混流生产的情况

未来展望

- 考虑混流生产的情况
- 假设限制

未来展望

- 考虑混流生产的情况
- 假设限制
- 调度分派规则

未来展望

- 考虑混流生产的情况
- 假设限制
- 调度分派规则
- 算法创新

谢谢！