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 2 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是现在汽车装配的主要方式。

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是现在汽车装配的主要方式。
- 技术革新，客户需求的多样化，以及精益思想、环保节能观念的出现，汽车工业的生产模式转变为面向订单的大批量、多品种的生产方式。

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是现在汽车装配的主要方式。
- 技术革新，客户需求的多样化，以及精益思想、环保节能观念的出现，汽车工业的生产模式转变为面向订单的大批量、多品种的生产方式。
- 为配合汽车生产，汽车电子部件的装配生产也要呈现多品种与批量化。

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是现在汽车装配的主要方式。
- 技术革新，客户需求的多样化，以及精益思想、环保节能观念的出现，汽车工业的生产模式转变为面向订单的大批量、多品种的生产方式。
- 为配合汽车生产，汽车电子部件的装配生产也要呈现多品种与批量化。
- 合理安排装配产线，优化调度作业单元，对保证汽车零部件装配质量，快速响应需求，提高汽车零部件装配线的生产效率有着重要的现实意义。

研究技术路线

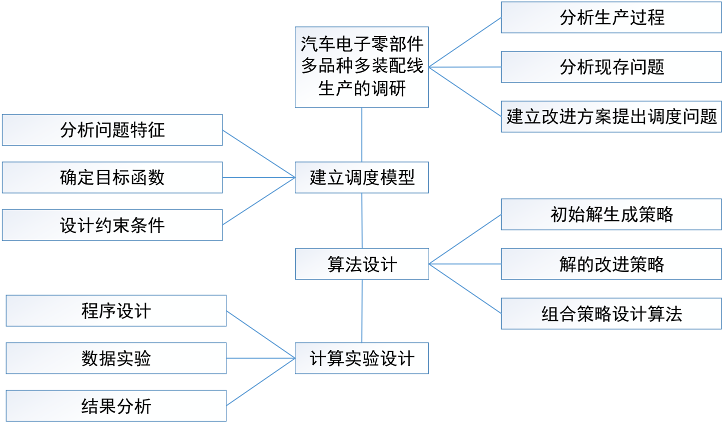


图: 课题研究关键技术路线

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。

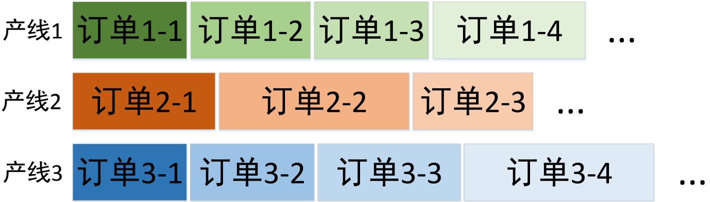


图: 3 条生产线的现行调度[1]

[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

现行调度方案存在一些改进空间，例如多条装配线负荷不均衡，有的任务过重，有的任务不足，负荷不均衡，一条装配线上装配的产品工艺相似性较低，导致换线时间增加，产生更长的等待。其主要问题如下：

- 产线利用率低

装配车间分析

存在问题

现行调度方案存在一些改进空间，例如多条装配线负荷不均衡，有的任务过重，有的任务不足，负荷不均衡，一条装配线上装配的产品工艺相似性较低，导致换线时间增加，产生更长的等待。其主要问题如下：

- 产线利用率低
- 生产不够均衡

装配车间分析

存在问题

现行调度方案存在一些改进空间，例如多条装配线负荷不均衡，有的任务过重，有的任务不足，负荷不均衡，一条装配线上装配的产品工艺相似性较低，导致换线时间增加，产生更长的等待。其主要问题如下：

- 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

现行调度方案存在一些改进空间，例如多条装配线负荷不均衡，有的任务过重，有的任务不足，负荷不均衡，一条装配线上装配的产品工艺相似性较低，导致换线时间增加，产生更长的等待。其主要问题如下：

- 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

现行调度方案存在一些改进空间，例如多条装配线负荷不均衡，有的任务过重，有的任务不足，负荷不均衡，一条装配线上装配的产品工艺相似性较低，导致换线时间增加，产生更长的等待。其主要问题如下：

- 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

目前的生产现状的主要问题是各主机厂有其专用流水线，使得订单的调度安排为较为单一，受到一些限制，不能很合理地利用流水线的生产能力，所以首要的改进是突破专用线的生产界限。如此一来，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

目前的生产现状的主要问题是各主机厂有其专用流水线，使得订单的调度安排为较为单一，受到一些限制，不能很合理地利用流水线的生产能力，所以首要的改进是突破专用线的生产界限。如此一来，生产线可以加工多家主机厂的订单，形成所谓的混线生产。

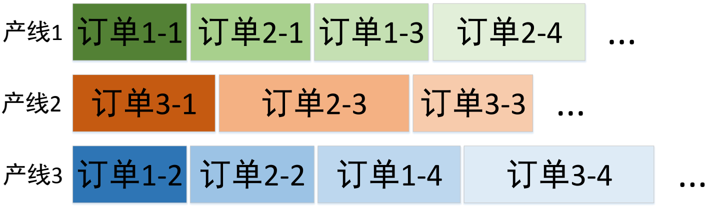


图: 3 条产线的混线装配生产示意

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

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

$$s.t. \begin{cases}
\sum_{l=1}^{m} |S_l| = n & (2) \\
\bigcup_{l=1}^{m} \overline{S_l} = N & (3) \\
\sum_{l=1}^{m} \sum_{k=1}^{|S_l|} wt_{l_k} = 1 & (4) \\
\sum_{l=1}^{m} \sum_{k=1}^{|S_l|} wc_{l_k} = 1 & (5) \\
\lambda_c + \lambda_t = 1 & (6) \\
C_{l_1} = p_{l_1} \quad l = 1, 2, \dots, m & (7) \\
C_{l_k} = C_{l_{k-1}} + p_{l_k} \quad k = 2, 3, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m & (8) \\
p_{l_k} = p'_{l_k} + s_{l_k} \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m & (9) \\
T_{l_k} = \max\{0, C_{l_k} - d_{l_k}\} \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m & (10) \\
p'_{l_k}, s_{l_k}, d_{l_k}, wt_{l_k}, \lambda_t, \lambda_c \ge 0 \quad k = 1, 2, \dots, |S_l|, l = 1, 2, \dots, m & (11)
\end{cases}$$

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：

$$Rb = \frac{\sum_{l=1}^{m} C_l}{m \times \max\limits_{1 \le l \le m} \{C_l\}}$$

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：

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

$$\min \quad \lambda_1 \sum_{l=1}^{m} \frac{\sum_{k=1}^{|S_l|} w_{l_k} |L_{l_k}|}{Ru_l} + \lambda_2 e^{-Rb} \sum_{l=1}^{m} \sum_{k=1}^{|S_l|} wc_{l_k} C_{l_k} \tag{1}$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{l=1}^{m} |S_l| = n & & (2) \\ \bigcup_{l=1}^{m} \overline{S_l} = N & & (3) \\ \sum_{l=1}^{m} \sum_{k=1}^{|S_l|} w_{l_k} = 1 & & (4) \\ \sum_{l=1}^{m} \sum_{k=1}^{|S_l|} wc_{l_k} = 1 & & (5) \\ \lambda_1 + \lambda_2 = 1 & & (6) \\ C_{l_1} = f_{l_1} + s_{l_1} + p_{l_1} & l = 1, 2, \ldots, m & (7) \\ C_{l_k} = C_{l_{k-1}} + f_{l_k} + s_{l_k} + p_{l_k} & k = 2, 3, \ldots, |S_l|, l = 1, 2, \ldots, m & (8) \\ \sum_{l=1}^{m} \sum_{k=1}^{|S_l|} r_{l_k} > 0 & k = 2, 3, \ldots, |S_l|, l = 1, 2, \ldots, m & (9) \\ L_{l_k} = C_{l_k} - d_{l_k} & k = 1, 2, \ldots, |S_l|, l = 1, 2, \ldots, m & (10) \\ T_{l_k} = \max\{0, C_{l_k} - d_{l_k}\} & k = 1, 2, \ldots, |S_l|, l = 1, 2, \ldots, m & (11) \\ E_{l_k} = \max\{d_{l_k} - C_{l_k}, 0\} & k = 1, 2, \ldots, |S_l|, l = 1, 2, \ldots, m & (12) \\ s_{l_k}, d_{l_k}, w_{l_k}, wc_{l_k}, \lambda_1, \lambda_2, r_{l_k} \geq 0 & k = 1, 2, \ldots, |S_l|, l = 1, 2, \ldots, m & (13) \end{cases}$$

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

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

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。$J = N, \overline{L} = \varnothing$, $t_l = 0, \overline{S_l} = \varnothing, a_l = 0, (l = 1, 2, \ldots, m)$，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 $p_j = p_j' + s_j, (j = 1, 2, \ldots, n)$，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^*}，$\overline{S_{l^*}} = \overline{S_{l^*}} \bigcup \{j^*\}$, $J = J - \{j^*\}$，记录调度订单序列 $\overline{L} = \overline{L} \bigcup \{j^*\}$，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 $J = \varnothing$，订单初始调度完毕，执行 **Step5**，否则执行 **Step2**；

Step4 记 lt 使得 $t_{lt} = \min_{1\le l\le m}\{t_l\}$，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。$J = \overline{S_l}(l = l^+, l^-)$，置所选的流水线系统时间 $t_l = 0$，重置 $\overline{S_l} = \varnothing$；

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 $\overline{S_l} = \overline{S_l} \bigcup \{l_k^*\}$。若 $J = \varnothing$，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 $k \le NR$，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 根据算流水线 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 $L_j, (j = 1, 2, ..., n)$。

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 $k\le N_I$，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 $\overline{S^{(c)}}$ 中的调度按函数值的非减排列，记为 $S_{[1]}, S_{[2]}, \ldots, S_{[|S^{(c)}|]}$，置 $i = 1$。设定禁忌搜索迭代次数 N_l，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 $k \leq N_l$，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

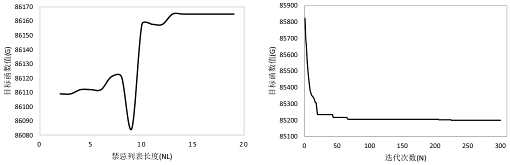
实验设计

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

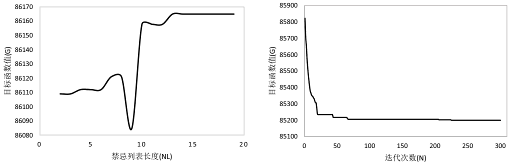


(a) 禁忌列表长度　　(b) 迭代次数

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

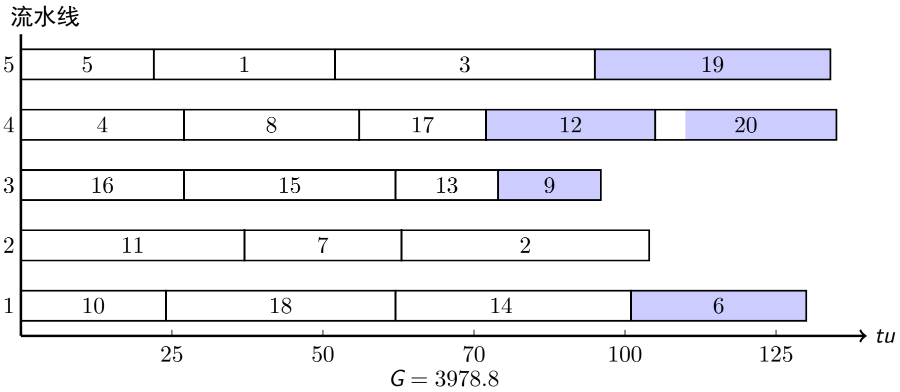


图: Cyc – ATC 算法调度结果

实验结果示例

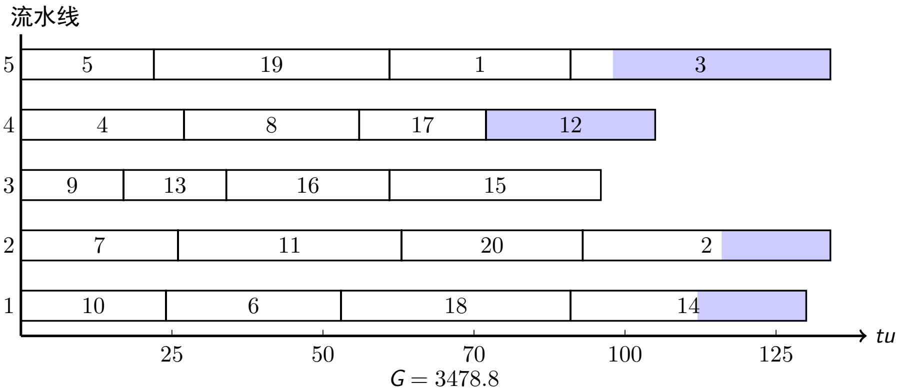


图: Cyc – Tabu 算法调度结果

实验结果示例

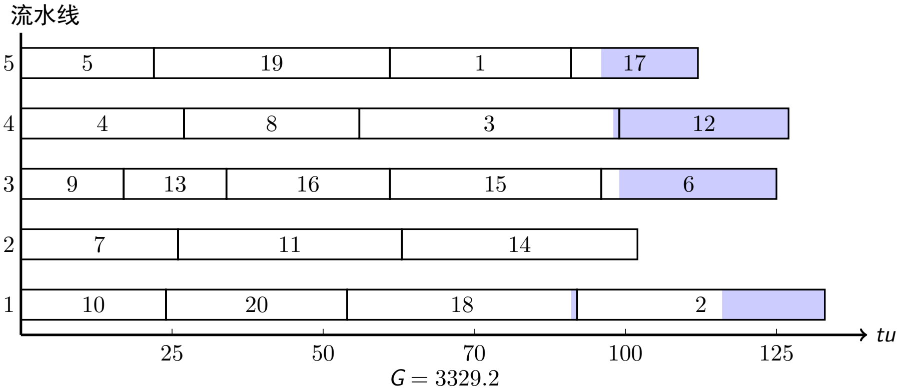


图: Vtr – Tabu 算法调度结果

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

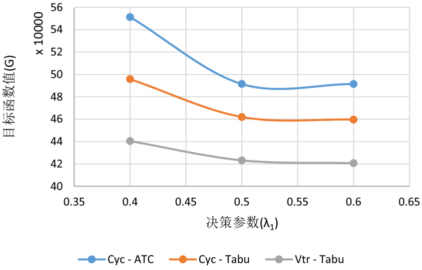
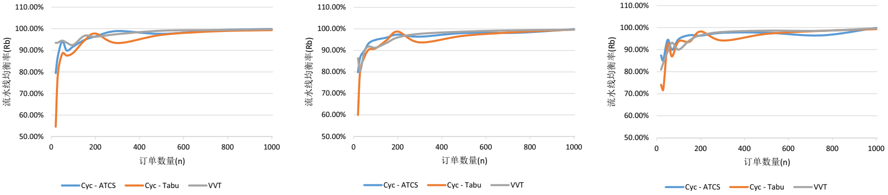


图: 决策参数和目标函数值关系示例

模型 2 求解结果与分析

流水线均衡率分析

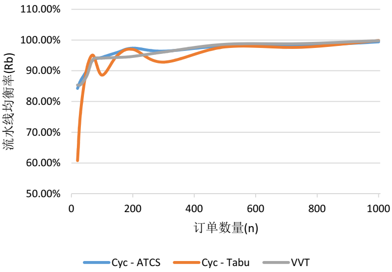


(a) $m = 5$ (b) $m = 6$ (c) $m = 7$

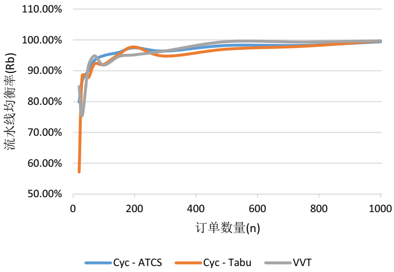
图: 不同流水线数量和流水线均衡率关系 ($\lambda_1 = 0.5$)

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 $(m = 6)$

谢　谢！