

一种基于 CTCH 网的批过程 动态调度方法¹⁾

刘斌 曾建潮

(太原重型机械学院系统仿真与计算机应用研究所, 山西, 太原, 030024)

摘要 根据批生产过程的特点, 在 CTCH 网的基础上对批生产系统动态调度问题以关键设备利用率最大为目标进行了建模, 建立了优化模型, 并提出了一种启发式算法. 最后用一个实例对算法进行了验证.

关键词 批生产过程, Petri 网, 动态调度.

1 引言

批生产过程是一类同时具有连续和离散生产特征的生产过程, 多产品、小批量, 有很大的灵活性. 怎样充分利用有限的资源? 怎样在发生冲突的情况下分配各种资源从而达到使利润最大的目的? 这些都是批生产过程控制中要解决的问题, 即调度问题, 该问题又可分为静态和动态两种. 对于前者利用 Lagrange 松弛法等已得到了满意的结果; 但在动态调度方面还不够深入. 文[1]利用动态规划原理在时延 Petri 网上较好地解决了以生产时间最小为目标的调度问题. 本文在文[2]的基础上, 以关键设备利用率最高生产利益最大为目标给出了一种动态调度方法.

2 批生产过程调度的 CTCH 网模型

CTCH 模型为十元组:

$CTCH = \langle P \cup R, T, A, W, M_0, C(pt), \{S_{ij}, (f_{ij}, X_{ij}, C_{ij}, Z_{ij}, X_{ij0}, V_{ij}), p_i \in P\}, TC, D(T/C), V(T/C) \rangle$ 其中: $P \cup R$ 为库所集, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 为过程库所集; $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 为资源库所集; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 为变迁集; A 为连接所有库所和变迁的有向弧集; 其余变量请参考文[2].

3 调度模型

¹⁾ 本文受山西省青年科学基金项目资助

用 CTCH 网模型对一个批生产系统建模. 设关键过程 (指可以产生最终产品的库所) 对应的输入变迁集为 U , 定义变量 $t_{j,i}$ 和 τ_{i-1} : j 表示激发变迁 t_j , i 表示 t_j 的激发次序, τ_{i-1} 表示激发 $t_{j,i}$ 对应的变迁 t_j 的时刻; 设 CTCH 网中变迁集为 T , 取目标函数为:

$$J(n) = \max \sum_{\substack{i=1, \\ t_j \in T \\ ij \in T}}^n [pv(\tau_{i-1}, t_{j,i}) - mv(\tau_{i-1}, t_{j,i}) - sv(\tau_{i-1}, \tau_i, t_{j,i}, t_{j,i+1})] \quad (1)$$

其中,
$$pv(\tau_{i-1}, t_{j,i}) = \begin{cases} 0 & t_j \notin U \\ \xi(\tau_{i-1}, t_j) * C_p & t_j \in U \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n; t_j \in T \quad (2)$$

$pv(\tau_{i-1}, t_{j,i})$ 为 τ_{i-1} 时刻激发变迁 t_j 时将得到的最终产品的价值; C_p 为各产品的价格向量 (行向量); $\xi(\tau_{i-1}, t_j) = (x_A(\tau_{i-1}, t_j), x_B(\tau_{i-1}, t_j), \dots)$ 为 τ_{i-1} 时刻激发 t_j 时将出现的各最终产品增量向量. 设 t_j 激活了某一过程库所 P_k , 则 P_k

所表示的动态过程为:
$$\begin{cases} \dot{x}_k(t) = f_k(x_k(t), c_k(t), t) \\ x_k(0) = x_k(\tau_{i-1}) \end{cases} \quad (3)$$

其解为:
$$x_k(t) = g(t_j, x_k(\tau_{i-1})) \quad (4)$$

而 t 时刻的产品量为: $y_k(t) = y(x_k(t))$, 设在 τ_m 时刻 P 完成过程, 根据已知的 τ_{i-1} 时刻初态通过仿真预测 τ_m 时刻得到的产品量, 有:

$$(x_A(\tau_{i-1}, t_j), x_B(\tau_{i-1}, t_j), \dots) = y(\tau_m) \quad (5)$$

$$mv(\tau_{i-1}, t_{j,i}) = \begin{cases} 0 & t_j \notin U \\ M(\tau_{i-1}, t_j) * C_m & t_j \in U \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n; t_j \in T \quad (6)$$

$mv(\tau_{i-1}, t_{j,i})$ 为 τ_{i-1} 时刻激发变迁 t_j 时消耗的资源量; C_m 为各资源的价格向量 (行向量); $M(\tau_{i-1}, t_j)$ 表示在 τ_{i-1} 时刻激发 t_j 时, 资源库所输出的标识向量: $M(\tau_{i-1}, t_j) = (M_1(\tau_{i-1}, t_j), M_2(\tau_{i-1}, t_j), \dots, M_k(\tau_{i-1}, t_j))$. 其中 $M_k(\tau_{i-1}, t_j)$ 表示在 τ_{i-1} 时刻关键设备进行 t_j 对应的任务时, 资源库所 k 必须有的资源消耗量.

$sv(\tau_{i-1}, \tau_i, t_{j,i}, t_{j,i+1})$ 为分别在 τ_{i-1} 和 τ_i 时刻激发 t_j 和 $t_{j,i}$, 它们之间区段上的存储费用;

$$sv(\tau_{i-1}, \tau_i, t_{j,i}, t_{j,i+1}) = S(\tau_{i-1}) * (\tau_i - \tau_{i-1}) * C_s \quad i=1, 2, \dots, n; t_j \in T \quad (7)$$

C_s 为单位时间内单位中间产品的存储费用向量 (行向量); $S(\tau_{i-1}) = (m(r_1, \tau_{i-1}), m(r_2, \tau_{i-1}), \dots, m(r_k, \tau_{i-1}))$, $m(r_k, \tau_{i-1})$ 为第 k 个中间存储库所 r_k 在 τ_{i-1} 时刻的标志大小;

约束条件:

(1) 激发区间约束: 对于 $t_{j,i}$, 设 t_j 对颜色组合 C_j 是使能的, 则其使能时刻 $E(t_j/C_j)$

$$\text{应满足: } C_{\max}(t_j/C_j) - D(t_j/C_j) \geq E(t_j/C_j) \geq C_{\min}(t_j/C_j) \quad (8)$$

$$t_j \text{ 的激发时刻 } \tau_{i-1} \text{ 应满足: } C_{\max}(t_j/C_j) - D(t_j/C_j) \geq \tau_{i-1} \geq E(t_j/C_j) \quad (9)$$

关于 $C_{\max}(t_j/C_j)$, $D(t_j/C_j)$ 和 $C_{\min}(t_j/C_j)$ 的关系可参考文[2].

(2) 定单约束: 设 $Order = (X_A, X_B, X_C, \dots)$, 则:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ j \in T}}^n \xi(\tau_{i-1}, t_{j,i}) \geq \text{Order} \quad \text{其中 } X_A, X_B, X_C, \dots \text{ 分别为定单上要求的产品量} \quad (10)$$

(3)中间存储约束:

a. UIS 或 FIS 存储方式:

在 UIS 或 FIS 存储方式下, 中间产品可以在存储库所中等待足够长时间, 这种类型的存储库所的输入变迁一旦满足使能条件就可以激发.

b. FTW/NIS, ZW/NIS 存储方式

$t \in T$, t' 为 t 的输出库所集, t 为 t' 的输入库所集; $p \in P \cup R$, p' 表示 p 的输入变迁集, p 表示 p' 的输出变迁集. 设产品无中间存储的任务集为 V , 对应的过程库所的输入变迁集为 $T1$, 输出变迁集为 $T2$, 易知:

$$\forall e \in T2, \exists p \subset \text{过程库所集 } P, p \subset e \quad \forall f \in T1, \exists g \subset T1 \quad g = (\cdot f) \cap V$$

记为 $g = \Phi(f)$; 对任一 t_m, p , 若 $t_m \in T2$, 必有:

$$\max[\tau_{i-1} + \max(\Psi(p'))] \leq \tau_{i-1} \leq \min[\tau_{i-1} + \min(\Psi(p') + d(p'))] \quad (11)$$

其中: $p' \in t_j \cap t_m \cap V$, $t_{j,i} \in \{t_{j,i} \mid t_j \in \Phi(t_m), \tau_{i-1} \leq \tau_{i-1}\}$. $\Psi(p)$ 为库所 p 被激活后完成过程所经历的过程时间; $d(p)$ 为库所 p 被激活且过程完成后, 其产品可以等待的时间, 当 d 为 0 时是零等待情况.

由式(1)可知, 本问题为多段决策, 可用动态规划方法求解, 表述为:

$$J^*(k) = \max\{pv(\tau_{k-1}, t_{j,k}) - mv(\tau_{k-1}, t_{j,k}) - sv(\tau_{k-1}, \tau_k, t_{j,k}, t_{j1,k+1}) + J^*(k-1)\} \\ k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, n; t_j, t_{j1} \in T \quad (12)$$

约束条件为: (8) (9) (10) (11)

4 调度算法

本问题可用动态规划来解, 但由于其中还要涉及许多 Petri 网上变迁的激发和计算, 所以比较复杂, 为此给出一种启发式算法. 该算法的总体思想是: 在保证关键设备利用率最大的前提下, 在其完成任务的每一个时刻, 选择要进行的下一个任务. 然后, 以保证此任务为目标, 对其余设备的开始加工时间提出要求. 其中, 选择下一个任务就是求取在一定时段上使获利最大的变迁. 即在关键设备可以进行的任务范围内进行搜索, 并计算其对应的产品价值及原料消耗等指标, 获利最大的任务选项为下一个任务.

算法步骤:

步骤一. 初始化, 此时关键设备库所 P_0 被激发为空, 某些过程库所中出现标志.

步骤二. 设表示关键设备正在处理任务的库所为 P_1 , 本时刻为 τ_0 , 通过仿真可以获得其状态方程 $x_1(t) = f_1(x_1(t), c_1(t), t)$ 的动态行为, 预测该过程完成时刻, 设为 τ_1 . 假设 P_1 激发, 关键设备库所中将有托肯出现.

步骤三. 令 $T3 = P_0$, 对任一 $t \in T3$, 设其在 τ_1 时刻激发. 找出进行 t 对应的任务之

前必须完成的过程，这些过程对应的过程库所集为 P_i ；

步骤四.若无 $P \in P_i$ ，使 P 在 $[\tau_0, \tau_1]$ 内不只是为 t 对应的任务作准备. 则作以下计算：对 $P_i \in t$ ，若 P_i 是中间存储库所，则 P_i 的输入变迁 $t_a = \cdot P_i$ 是某过程库所 P_j 的结束变迁，根据式(9)其使能时刻 $E(t_a/C_a)$ 应满足： $E(t_a/C_a) \leq \tau_1$. 而 P_j 的输入变迁 $t_b = \cdot P_j$ 的激发时刻 τ_b 应满足 $\tau_1 = \tau_b + \Psi(P_j)$ ，所以 $\tau_b + \Psi(P_j) \leq \tau_1$ ，因为激发越晚存储费用越少，取 $\tau_b = \tau_1 - \Psi(P_j)$. 若 P_i 是 NIS 库所，根据式(11)其输入变迁 t_a 的激发时刻 τ_a 应满足： $\tau_a + \Psi(P_i) \leq \tau_1 \leq \tau_a + \Psi(P_i) + d(P_i)$ ，有 $\tau_1 - \Psi(P_i) - d(P_i) \leq \tau_a \leq \tau_1 - \Psi(P_i)$ ，取 $\tau_a = \tau_1 - \Psi(P_i)$. 若 $\exists P \in P_i$ ， P 在 $[\tau_0, \tau_1]$ 内不只是为 t 对应的任务作准备. 设在 τ 时刻 P 被激活. 设从 P 到 t 之间的过程库所集为 $Q(P,t) = \{P, P_u, \dots, P_y, P_z\}$ ，它们之间应有如下顺序 P, P_u, \dots, P_y, P_z . 根据约束(11)，不难算出，为在 τ_1 时刻激发 t 变迁， $\cdot P$ 的激发时刻 τ_p (为 t 对应的任务作准备) 的范围应为：

$$\tau_p \in [\tau_1 - \sum_{q \in Q(P,t)} d(q) - \sum_{q \in Q(P,t)} \psi(q), \tau_1 - \sum_{q \in Q(P,t)} \psi(q)]$$

令 $a = \tau_1 - \sum_{q \in Q(P,t)} d(q) - \sum_{q \in Q(P,t)} \psi(q)$, $b = \tau_1 - \sum_{q \in Q(P,t)} \psi(q)$, $c = \tau_1 - \sum_{q \in Q(P,t)-p} d(q) - \sum_{q \in Q(P,t)-p} \psi(q)$, $d = \tau_1 - \sum_{q \in Q(P,t)-p} \psi(q)$, 有：

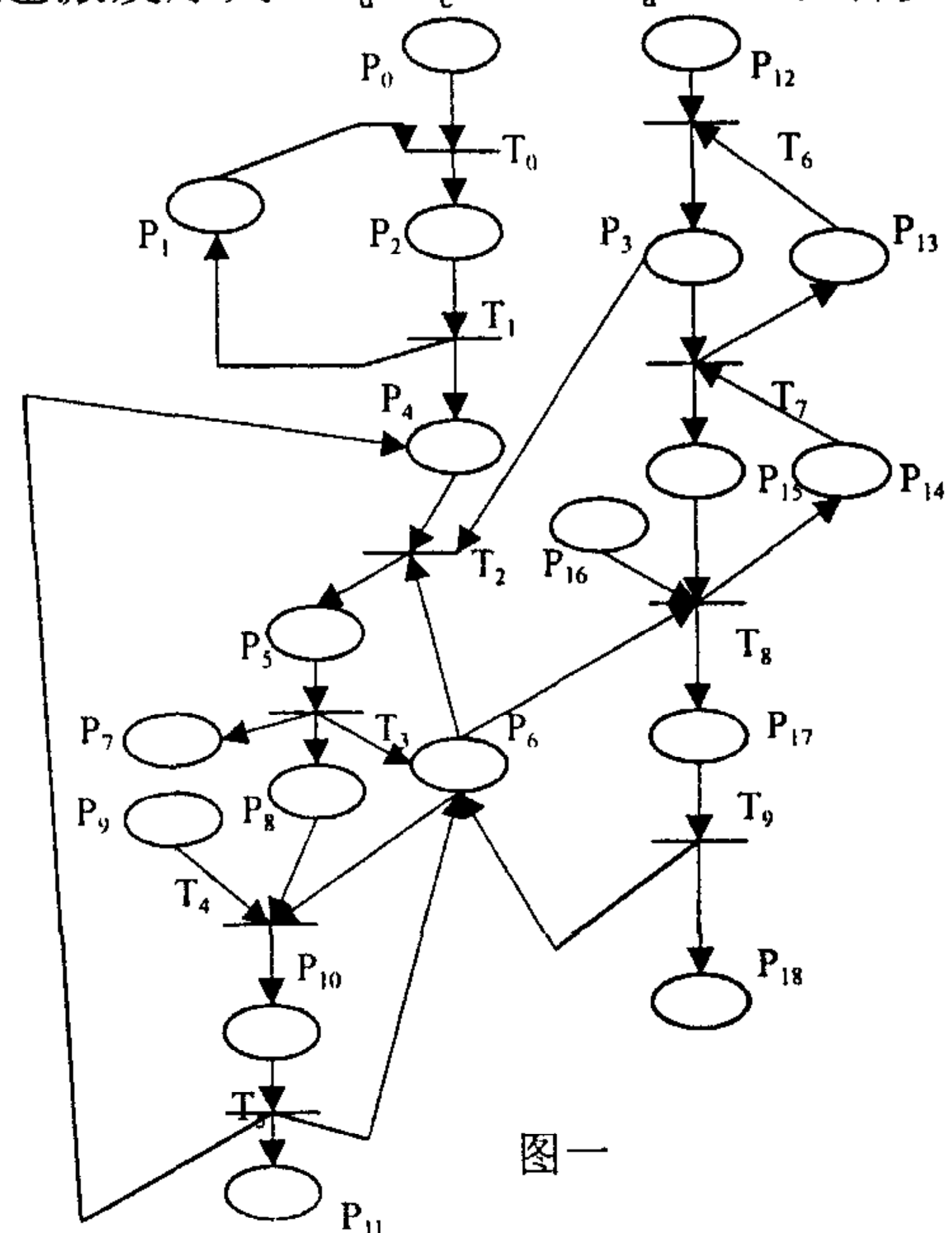
如果 $\tau \in [\tau_0, \tau_1]$ ：若 $\tau < a + \Psi(P)$ 且 $\tau + \Psi(P) > b$, T3 集中去掉 t , 转步骤三；若 $\tau < a + \Psi(P)$ 且 $\tau + \Psi(P) \leq b$, 则取 $\tau_z = \tau_1 - \Psi(P_z)$, $\tau_y = \tau_1 - \Psi(P_z) - \Psi(P_y)$, (τ_z, τ_y, τ_p 为 P_z, P_y, P 的输入变迁的激发时间)；若 $\tau \geq a + \Psi(P)$, 且 $b \geq \tau + \Psi(P) \geq a$, 则取 $\tau_z = \tau_1 - \Psi(P_z)$, $\tau_y = \tau_1 - \Psi(P_z) - \Psi(P_y), \dots$ ；若 $\tau \geq a + \Psi(P)$ 且 $\tau + \Psi(P) > b$, $d \geq \tau \geq c$, 则取 $\tau_p = \tau - \Psi(P), \tau_u = \tau, \dots, \tau_z = \tau_1 - \Psi(P_z)$ ；若 $\tau \geq a + \Psi(P)$ 且 $\tau + \Psi(P) > b, \tau < c$ 或 $\tau > d$, T3 集中去掉 t , 转步骤三；

如果 $\tau < \tau_0$, 有 $\tau_0 + \Psi(P) \in [\tau_0, \tau_1]$ ：若 $\tau + \Psi(P) > b$, T3 集中去掉 t , 转步骤三；若 $\tau + \Psi(P) \leq b$, 则取 $\tau_z = \tau_1 - \Psi(P_z), \tau_y = \tau_1 - \Psi(P_z) - \Psi(P_y), \dots$ ；

步骤五.继续往回推算，最后可得一变迁激发序列 $(t_d t_c \dots t_a t)$ 和各变迁激发的时刻 $(\tau_d \tau_c \dots \tau_a \tau_1)$. 找出文[4]中讨论的可能死锁的变迁集 T_c , 对任一的 $s \in \{t_d t_c \dots t_a t\} \cap T_c$, 验证其激发后是否会同时满足死锁条件，若是，T3 中去掉变迁 t , 转步骤三. 否则，根据式 (2) (6) (7) 计算与这两序列中各变迁和时刻对应的 p_v, m_v, s_v , 并相加得 J' .

步骤六.当遍历了各个 $t \in T3$ 之后可得一个最大的 J' 和与其对应的 $(t_d t_c \dots t_a t)$ 及 $(\tau_d \tau_c \dots \tau_a \tau_1)$. 依次激发 $P_1 t_d t_c \dots t_a t$, 转步骤二.

5 仿真实例

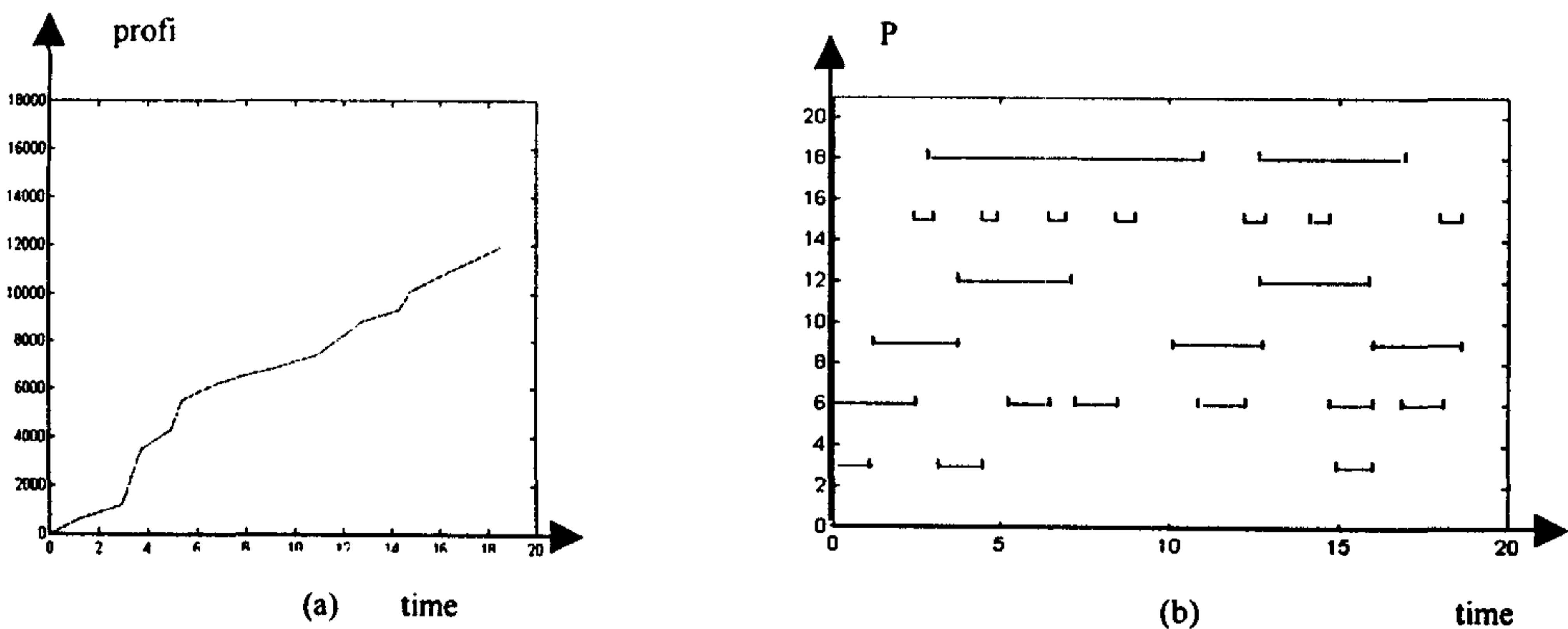


图一

P₁₁

某一化工生产过程：物质 A 先加热 1 小时，B 加热 1.2 小时，然后 A 与 B 以 1:1 的比例进行反应一，用 2.6 小时产生比例为 3:7 的产物 E 与 C，其中 E 为第一个最终产品，另一方面 C 与 D 以 1:1 的比例进行反应二，用 1.6 小时产生比例为 8:2 的产物 F 与 A，其中 F 为第二个最终产品。另外 B 也可加热后进行碾碎和 G 以 1:1 的比例进行反应三，用 2 小时产生第三个最终产品 H。设备有两个加热器 Heater1 和 Heater2、两个相同的反应器 Reactor1 和 Reactor2、一个碾碎器。该问题的 CTCH 模型如图一所示：其中过程库所集为 { P₂P₃P₅P₁₀P₁₅P₁₇ }，资源库所集为 { P₀P₁P₄P₆P₇P₈P₉P₁₁P₁₂P₁₃P₁₄P₁₆P₁₈ }，P₃、P₁₅ 都是 FTW/NIS 型的过程库所，产品可等待的时间分别为 0.3 和 0.2 个时间单位；变迁集为 { T₀.....T₈ }；初始标识（标志）为：m(P₀)= m(P₁₂) = m(P₉) = m(P₁₆)=10000, m(P₁) = m(P₁₃)= m(P₁₄) = 1, m(P₆)=2, m(P₅) = 20, 其余库所初始值为 0。

仿真时间为 18.55 个时间单位，所得结果如图二所示。其中，图(a)中是利润随时间变化的曲线，图(b)中是各过程库所对应过程的甘特图。在(a)中，当时间为 18.55 个时间单位时，所求利润已达到了 11957 个单位。在图(b)中，P₅、P₁₀、P₁₇ 对应的各时间段为其工作区段，可以看到，本例中三个可以产出最终产品的过程库所中，大部分时间内都是有其中两个在进行反应的，即两个关键设备基本上处于不停歇状态，这与上面提出的算法的总体思想是符合的。所以，提出的算法是可行的。虽然最后结果不是最优解，但已达到次最优，得到了一个满意解。可以从所得的数据中看到，通过每一步的计算使目标函数值朝着增加更快的方向发展，从而达到了调度的目的。



图二

参 考 文 献

1. 吴锋等, 化工间歇过程的时间 Petri 网模型和优化控制, 《控制理论与应用》, 97, 14 (4): 502—506;
2. 吴亚丽, 曾建潮, 批生产过程调度的 CTCH 网模型, 《基础自动化》, 99, 4, 增刊;
3. 王朝晖等, 化工批处理过程调度, 《控制与决策》, 98, 13 (2): 97—102;
4. 吴亚丽, 基于混合 Petri 网的批处理生产过程的建模及调度方法研究 太原重型机械学院硕士学位论文