

间歇式化工系统的Petri网优化调度与控制方法

周家忠, 罗继亮[†], 詹瑜坤

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了解决复杂间歇式化工系统的优化调度和控制问题, 提出了一种基于Petri网的优化调度与控制方法: 首先, 根据加工工艺, 建立加工过程的赋时Petri网模型; 其次, 根据间歇式化工生产对象的拓扑结构, 在该赋时Petri网模型中引入阀门系统的网结构, 从而获得系统的受控Petri网模型; 最后, 利用可达图来计算加工时间最短的控制策略, 借助网结构信息, 得到了控制策略的阀门控制矩阵, 并用一个示例演示验证了本文方法。

关键词: Petri网; 优化调度; 控制; 间歇式化工; 可达图

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Optimal scheduling and control of batch chemical processes with Petri nets

ZHOU Jia-zhong, LUO Ji-liang[†], ZHAN Yu-kun

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian 361021, China)

Abstract: A method based on Petri nets is proposed to schedule and control a batch chemical system. First, an operational process is modeled as a P-timed Petri net according to its recipe. Second, a net structure is introduced in the P-timed Petri net to model a valve according to the topological structure of a batch chemical system. Consequently, a controlled Petri net model is obtained for a batch chemical system. Finally, via the reachability tree of this controlled Petri net, a method is proposed to calculate an optimal control strategy that makes the processing time shortest. Further, a control matrix for valves is calculated based on the structure of the controlled Petri net. The proposed methods are illustrated by a typical batch system.

Key words: Petri nets; optimal scheduling; control; batch chemical processes; the reachability tree

1 引言(Introduction)

间歇式化工系统中有大量的物料运输和反应过程, 在这些运输和反应过程中涉及大量资源单元, 例如蒸馏塔、阀门、管道、反应器、储存罐等. 系统状态呈指数级增长, 从而使得优化调度问题十分复杂. 此外, 得到最优调度策略后, 如何给出正确的阀门控制指令, 关系到系统能否正确安全运行, 而系统中阀门数量众多, 且阀门资源之间控制关系复杂, 这使得从优化策略到控制指令的计算非常复杂.

针对间歇式化工系统的优化调度和控制^[1-2]问题, 学界已经开展了卓有成效的研究工作. 文献[3]对化工系统的传输过程进行了Petri网(Petri net, PN)建模, 给出了阀门的具体控制方案. 但要结合优化策略计算控制指令时, 该方法分析起来比较复杂. 文献[4-5]利用

进程代数和Petri网相结合的方法描述了间歇式化工系统的工艺路径规范. 对于给定的工艺规范, 进程代数的描述能力很强, 但却很难应用到动态的优化调度问题中. 文献[6]将生产系统的工艺流程描述为Petri网事件串规范, 建立了资源单元的模型并根据Petri网监控理论^[7-10], 给出了满足控制规范的顺序Petri网监控器. 但当生产过程的加工顺序需要在优化的基础上给出相应控制规范时, 这类方法不再适用. 文献[11]给出了柔性制造系统的赋时Petri网模型, 并用A*算法对可达图进行搜索, 最终得到了时间最优的调度策略. 但文献没有在优化调度的基础上进一步给出资源单元的控制策略. 文献[12]对柔性制造系统的加工工序和资源分配进行了Petri网建模, 运用遗传调度算法对

收稿日期: 2015-08-17; 录用日期: 2016-01-13.

[†]通信作者. E-mail: jlluo@hqu.edu.cn; Tel.: +86 13110595996.

本文责任编辑: 陈积明.

国家自然科学基金项目(61573158), 福建省自然科学基金项目(2014J01241), 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(11FJRC01), 福建省高校杰出青年科研人才培养计划项目(JA10004)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61573158), Natural Science Foundation of Fujian Province (2014J01241), Program for New Century Excellent Talents in Fujian Province (11FJRC01) and Fujian Youth College Outstanding Research Talents Cultivation Plan (JA10004).

系统进行了无死锁研究,并最终给出了防死锁控制器,但针对加工顺序的优化调度以及资源单元的具体控制问题,该方法并不适用.文献[13-14]对批量生产过程进行赋时Petri网建模,并分别用分支界定法和启发式搜索两种方法给出了生产过程的优化调度,但执行最优加工策略的资源单元的控制方法同样没有给出.

由于涉及到共享资源的表示与分配.因此,小规模间歇式化工系统也可能引起复杂的调度控制问题,正确的阀门指令,取决于使用该阀门的所有生产阶段.虽然单个生产阶段对应的阀门操作是确定的,但当涉及到生产流程需要优化调度时,由于生产阶段的工作顺序是不定的,阀门的控制也变得更加复杂.例如,两个操作在不同的生产流程中可能同时发生,也可能按不同的顺序分别发生.因此,两个操作在不同生产流程中按照不同的顺序发生时,就会相应地导致四种不同的阀门设置,而当生产阶段变得更多而又需要优化调度的时候,阀门的控制会变得更加复杂.

为此,本文首先利用赋时Petri网对间歇式化工系统的生产过程和资源单元进行了建模;然后通过分析最大速度运行的可达图,给出了针对生产过程的优化调度策略;并最终结合Petri网结构信息与调度策略,给出资源单元的具体控制策略.对于模型的建立、优化调度策略和控制策略的计算,本文给出了3个相应的算法,以供计算机来完成间歇式化工系统的仿真与优化调度、控制工作,并在每个算法后面进行了验证.与文献[3]相比,本文不仅对生产过程进行了建模,还考虑了加工过程的时间因素、资源单元的建模问题,并在模型中完整地体现了资源单元的状态与各生产阶段之间的关系;与文献[13-14]相比,本文在最大速度运行的可达图的基础上给出了调度策略,不仅使可达图的规模大大减小,而且将调度策略与Petri网结构信息相结合,降低了阀门控制问题的计算复杂度,并最终给出了实现优化调度策略的具体控制策略.

2 基本概念(Basic concepts)

Petri网可表示为 $N = \{P, T, \text{Pre}, \text{Post}, \mathbf{m}_0\}$,其中: P 是一个有限的非空库所集合, T 是一个有限的非空变迁集合, $\text{Pre} : P \times T \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ 是输入关联矩阵,定义了从库所到变迁的有向弧的权值; $\text{Post} : T \times P \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ 是输出关联矩阵,定义了从变迁到库所的有向弧的权值. $\mathbf{m}_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$,对应初始标识下各库所持有的托肯数.

库所时延Petri网(P-timed Petri net, PTPN)^[15]的结构可以用二元组 $N = \{R, \text{Tempo}\}$ 表示,其中: R 是标识的PN; Tempo 是一个库所集到非负有理数集的函数, $\text{Tempo}(P_i) = d_i$,表示与库所 P_i 相联系的时限.

赋时Petri网的变迁激发规则:在普通Petri网中,若

变迁的每一个输入库所都包含至少一个托肯,则该变迁允许激发;当变迁 t 激发后,变迁的每个输入库所减去一个托肯,变迁 t 的每个输出库所增加一个托肯.在PTPN中,当一个托肯置入赋时库所 P_i 时,该托肯在 P_i 中至少停留时间 d_i ,在这段时间内,托肯不可用;经过时间 d_i 后,托肯变为可用的.若变迁的每一个输入库所都包含至少一个可用的托肯,则该变迁允许激发.在任意时刻,变迁的激发,与非时延普通PN类似,但从输入库所仅移除可用的托肯.

最大速度运行的PTPN:一般情况下,变迁从使能到激发之间的等待时间是任意的.如果变迁一旦使能就立即激发,称这种情况为最大速度运行.在最大速度运行的可达图中,将标识 m_i 到标识 m_j 的变迁,记为 t_j/d_k . t_j 激发引起标识 m_i 转换到标识 m_j , d_k 是从获得标识 m_i 瞬时起至变迁 t_j 激发所经过的时间.某些情况下,从标识 m_i 到标识 m_j 的转换由几个同时刻使能的变迁完成,记为 $\{t_i, t_j, \dots\}/d_k$,以指明变迁 t_i, t_j, \dots 的任一激发顺序,期间可能有多重激发^[12].

3 问题描述(Problem description)

如图1所示,这是一个典型的间歇式化工系统,储料罐 T_1, T_2 和 T_3 分别储存不同的原料;储存罐 T_4 和 T_5 储存成品; v_8, v_9, v_{10} 和 v_{11} 是排空阀;管道线包含有9个阀门 $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_{12}, v_{13}$, R_1 和 R_2 是两个反应器.假使该系统有两个生产任务 J_1 和 J_2 .任务 J_1 有5个生产阶段: $J_{1,1}, J_{1,2}, J_{1,3}, J_{1,4}$ 和 $J_{1,5}$;其中: $J_{1,1}$ 阶段,将储料罐 T_1 和 T_2 中的原料运输到反应器 R_2 中; $J_{1,2}$ 阶段,对反应器 R_2 中的原料进行搅拌加热等一系列反应; $J_{1,3}$ 阶段,将 R_2 中生成的半成品与 T_3 中的原料运输到 T_5 ; $J_{1,4}$ 阶段, T_5 中的物料发生化学反应,生成成品A; $J_{1,5}$ 阶段,将成品A从 T_5 中输送出来.任务 J_2 也有5个生产阶段: $J_{2,1}, J_{2,2}, J_{2,3}, J_{2,4}$ 和 $J_{2,5}$,其中: $J_{2,1}$ 阶段,将储料罐 T_1 中的原料运输到反应器 R_1 中; $J_{2,2}$ 阶段,对反应器 R_1 中原料进行搅拌加热等一系列反应; $J_{2,3}$ 阶段,将 R_1 中生成的半成品与 T_3 中的原料运输到 T_4 ; $J_{2,4}$ 阶段, T_4 中的物料发生化学反应,生成成品B; $J_{2,5}$ 阶段,将成品B从 T_4 中输送出来.

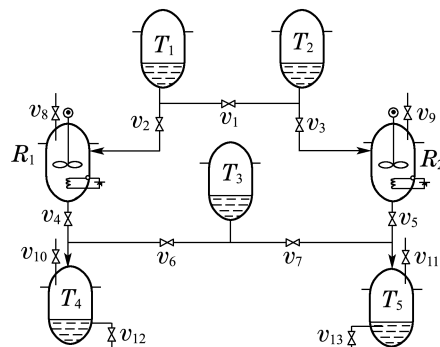


图1 间歇式化工系统的示意图

Fig. 1 Conceptual diagram of batch chemical processes

两个生产任务中, 各阶段具体的阀门状态和所需的执行时间(单位为min)如表1所示。

表 1 间歇式化工系统的任务表
Table 1 Job recipes of batch chemical processes

任务1			
生产阶段	打开的阀门	关闭的阀门	执行时间
$J_{1,1}$	v_1, v_3	v_2, v_5	20 min
$J_{1,2}$	v_9	v_3, v_5	30 min
$J_{1,3}$	v_5, v_7	v_3, v_6	30 min
$J_{1,4}$	v_{11}	v_5, v_7, v_{13}	40 min
$J_{1,5}$	v_{13}	v_5, v_7	40 min
任务2			
生产阶段	打开的阀门	关闭的阀门	执行时间
$J_{2,1}$	v_2	v_1, v_4	30 min
$J_{2,2}$	v_8	v_2, v_4	40 min
$J_{2,3}$	v_4, v_6	v_2, v_7	40 min
$J_{2,4}$	v_{10}	v_4, v_6, v_{12}	50 min
$J_{2,5}$	v_{12}	v_4, v_6	60 min

当具体的加工任务给定时, 由于存在并发过程和资源争夺问题, 因此加工顺序不同, 完成整个任务所用的时间也是不同的。接下来, 将给出建模、调度策略以及控制策略的相关算法, 并以该系统作为示例进行验证。

4 间歇式化工系统的建模方法(Modeling of batch chemical processes)

本节主要考虑加工过程的建模和资源单元的建模与控制, 从系统运行的逻辑层面看, 每个阀门均可以抽象为打开和关闭两种状态, 而且始终在两种状态中进行切换, 该切换也有对应的开和闭两类事件驱动。此外, 本文将生产操作描述为开始、结束、中间过程3个阶段。其中, 开始、结束可以看做两个事件, 在逻辑层次上用一对变迁表示; 而中间的具体过程可看做是一种与具体时间相关的工作状态, 可以用带时间的库所来描述, 由此得到化工系统的Petri网模型。

定义 1 给定间歇式化工系统中的一个有 j 个生产阶段的任务 J_i , 其Petri网模型为 $N_{J_i} := ((P^{J_i}, T^{J_i}, F^{J_i}), d^{J_i}, \mathbf{m}_0^{J_i})$ 。其中, 库所集合 $P^{J_i} = \{P_s^{J_i}, P_{i,j}, P_{i,j}^*, P_f^{J_i}\}$, $P_s^{J_i}$ 表示任务 J_i 开始状态, $P_{i,j}$ 表示生产阶段 $J_{i,j}$ 的进行状态, $P_{i,j}^*$ 为后续的缓冲库所, $P_f^{J_i}$ 表示任务 J_i 的结束状态; 且除了库所 $P_s^{J_i}$ 和 $P_f^{J_i}$ 外, 其他库所中最多只能有一个托肯。变迁集合 $T^{J_i} = \{t_{b,i,j}, t_{f,i,j}\}$, $t_{b,i,j}$ 表示生产阶段 $J_{i,j}$ 的开始事件, $t_{f,i,j}$ 表示生产阶段 $J_{i,j}$ 的结束事件; 有向弧集合

$$F^{J_i} = \{(P_s^{J_i}, t_{b,i,j}), (P_s^{J_i}, t_{b,i,j}), (t_{b,i,j}, P_{i,j}), (P_{i,j}, t_{f,i,j}), (t_{f,i,j}, P_{i,j}^*), (P_{i,j}^*, t_{b,i,j}), (t_{f,i,j}, P_f^{J_i})\};$$

初始标识 $\mathbf{m}_0^{J_i} = (N, 0, \dots, 0)^T$, $P_s^{J_i}$ 中的托肯数为 N , 而其他库所中的托肯数为 0, 其中 N 为非负整数。 $d_{i,j}$ 为

$P_{i,j}$ 所带的时延, 表示生产阶段 $J_{i,j}$ 所持续的时间。

以图1中系统的任务 J_1 为例, 其Petri网模型可以描述为 $N_{J_1} := ((P^{J_1}, T^{J_1}, F^{J_1}), d^{J_1}, \mathbf{m}_0^{J_1})$, $P_s^{J_1}$ 表示任务开始状态; $t_{b,1,1}, t_{b,1,2}, t_{b,1,3}, t_{b,1,4}, t_{b,1,5}$ 分别表示生产阶段 $J_{1,1}, J_{1,2}, J_{1,3}, J_{1,4}, J_{1,5}$ 的开始事件; $P_{1,1}, P_{1,2}, P_{1,3}, P_{1,4}, P_{1,5}$ 分别表示生产阶段 $J_{1,1}, J_{1,2}, J_{1,3}, J_{1,4}, J_{1,5}$ 的进行状态; $t_{f,1,1}, t_{f,1,2}, t_{f,1,3}, t_{f,1,4}, t_{f,1,5}$ 表示阶段 $J_{1,1}, J_{1,2}, J_{1,3}, J_{1,4}, J_{1,5}$ 的结束事件; $P_{1,1}^*, P_{1,2}^*, P_{1,3}^*, P_{1,4}^*, P_{1,5}^*$ 分别为 $P_{1,1}, P_{1,2}, P_{1,3}, P_{1,4}, P_{1,5}$ 后续的缓冲库所; $P_f^{J_1}$ 表示任务结束状态; $d_{1,1}, d_{1,2}, d_{1,3}, d_{1,4}, d_{1,5}$ 分别为库所 $P_{1,1}, P_{1,2}, P_{1,3}, P_{1,4}, P_{1,5}$ 所带的时延; 表示生产阶段 $J_{1,1}, J_{1,2}, J_{1,3}, J_{1,4}, J_{1,5}$ 所持续的时间, 在这里具体为 20 min, 30 min, 30 min, 40 min, 40 min。初始标识 $\mathbf{m}_0^{J_1} = (1, 0, \dots, 0)^T$, 即 $\mathbf{m}_0^{J_1}(P_s^{J_1}) = 1$, 其他库所中的托肯数为 0。模型具体如图2所示。

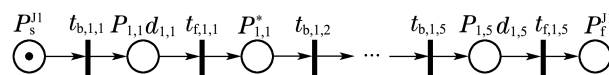


图 2 生产任务 J_1 的 Petri 网模型

Fig. 2 Petri net model of operations in J_1

定义 2^[6] 给定间歇式化工系统中的一个阀门 v_n , 其网元件是一个Petri网 $N_{v_n} = ((P_{v_n}, T_{v_n}, F_{v_n}), \mathbf{m}_0^{v_n})$ 。其中: 库所集合 $P_{v_n} = \{w_{v_n}, \bar{w}_{v_n}\}$, w_{v_n} 表示阀门为开状态, \bar{w}_{v_n} 表示阀门为关状态; 变迁集合 $T_{v_n} = \{o_{v_n}, c_{v_n}\}$, o_{v_n} 表示阀门由关状态切换到开状态, c_{v_n} 表示阀门由开状态切换到关状态; 有向弧集合 $F_{v_n} = \{(w_{v_n}, c_{v_n}), (c_{v_n}, \bar{w}_{v_n}), (\bar{w}_{v_n}, o_{v_n}), (o_{v_n}, w_{v_n})\}$ 。初始标识 $\mathbf{m}_0^{v_n} = (0, 1)^T$, 即 $\mathbf{m}_0^{v_n}(w_{v_n}) = 0, \mathbf{m}_0^{v_n}(\bar{w}_{v_n}) = 1$ 。

如图3所示, 以阀门 v_1 为例, 它可以描述成元件网模型 $N_{v_1} = ((P_{v_1}, T_{v_1}, F_{v_1}), \mathbf{m}_0^{v_1})$ 。

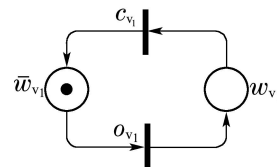


图 3 阀门 v_1 的网元件

Fig. 3 Net element of valve v_1

在上述两个定义的基础上给出模型的具体建模算法——算法1。

算法 1 系统的受控Petri网模型的建模算法。

输入: 间歇式化工系统的任务表。

输出: 系统的受控Petri网模型。

Step 1 根据定义1, 对间歇式化工系统的各生产任务进行建模。

Step 2 根据定义2, 对间歇式化工系统中的各阀门进行建模.

Step 3 根据任务表中各任务阶段与阀门的状态关系, 构建库所 w_{v_n} , 库所 \bar{w}_{v_n} 与变迁 $t_{b,i,j}$ 之间的有向弧.

Step 3.1 如果系统某生产阶段 $J_{i,j}$ 需要阀门 v_n 打开, 则在变迁 $t_{b,i,j}$ 与库所 w_{v_n} 之间构造一条双向弧.

Step 3.2 如果系统某个生产阶段 $J_{i,j}$ 需要阀门 v_n 关闭, 则在变迁 $t_{b,i,j}$ 与库所 \bar{w}_{v_n} 之间构造一条双向弧; 否则, 不用构造双向弧, 以此构造出各生产阶段 $J_{i,j}$ 的开始变迁 $t_{b,i,j}$ 与各阀门的库所 w_{v_n} 或 \bar{w}_{v_n} 之间的双向弧.

Step 4 为防止任务进行过程中阀门的危险动作, 针对每个生产阶段构造控制库所及相应的双向弧.

Step 4.1 在每个生产阶段的开始变迁 $t_{b,i,j}$ 与结

束变迁 $t_{f,i,j}$ 之间构造一个控制库所 $P_{c,i,j}$, 并构造有向弧 $(t_{f,i,j}, P_{c,i,j}), (P_{c,i,j}, t_{b,i,j})$.

Step 4.2 如果变迁 $t_{b,i,j}$ 与库所 w_{v_n} 之间有一条双向弧, 则在库所 $P_{c,i,j}$ 与 c_{v_n} 之间构造一条双向弧; 若 $t_{b,i,j}$ 与库所 \bar{w}_{v_n} 之间有一条双向弧, 则在库所 $P_{c,i,j}$ 与 o_{v_n} 之间构造一条双向弧, 否则不用构造库所 $P_{c,i,j}$ 与变迁 c_{v_n} 或 o_{v_n} 之间的双向弧.

Step 5 为防止缓冲阶段的阀门危险动作, 构造控制库所 $P_{cd,i,j}$. 若生产阶段 $J_{i,j}$ 及后续生产阶段 $J_{i,j+1}$ 都需要阀门 v_n 关闭; 则在生产阶段 $J_{i,j}$ 的开始变迁 $t_{b,i,j}$ 与生产阶段 $J_{i,j+1}$ 的结束变迁 $t_{f,i,j+1}$ 之间构造控制库所 $P_{cd,i,j}$ 以及有向弧 $(t_{f,i,j+1}, P_{cd,i,j}), (P_{cd,i,j}, t_{b,i,j})$; 并且在库所 $P_{cd,i,j}$ 与变迁 o_{v_n} 之间构造一条双向弧.

如图4所示, 根据定义1-2及算法1, 得到图1中间歇式化工系统的Petri网模型.

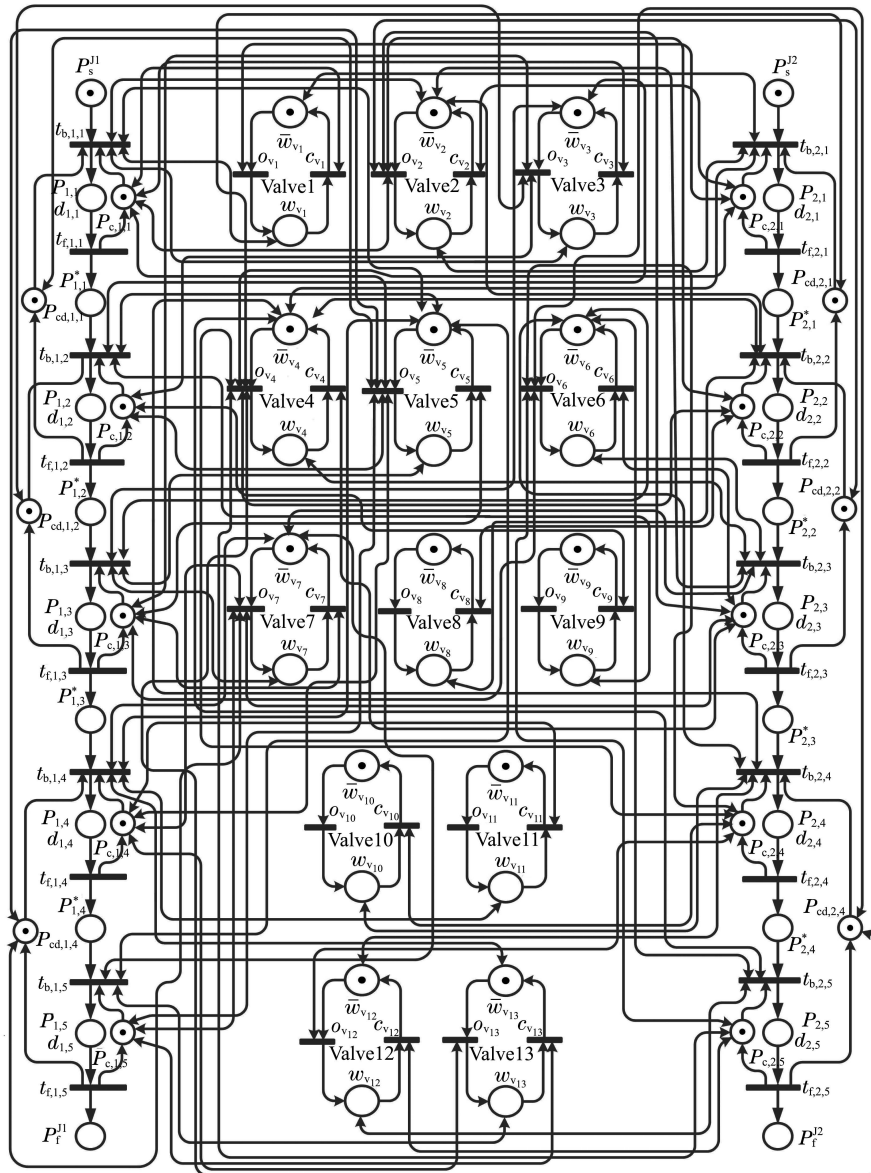


图4 间歇式化工系统的Petri网模型

Fig. 4 Petri net model of batch chemical processes

算法1以任务表为输入,对间歇式化工系统中的阀门、生产任务进行了建模,并在模型中描述了各生产阶段与阀门状态之间的关系,Petri网的网节点随着阀门与生产阶段数量的增加是线性增长的。

5 间歇式化工系统最优加工策略的计算方法(The optimal process strategy of batch chemical processes)

在由算法1得到的受控Petri网的基础上,给出间歇式化工系统最优加工策略的计算方法——算法2。

算法2 系统最优加工策略的生成算法。

输入: 间歇式化工系统的受控Petri网,初始标识 m_0 。

输出: 变迁最优激发序列。

Step 1 由初始标识 m_0 开始,指出在初始标识下所有使能的变迁,在这里按照变迁一旦使能就立即激发的最大速度运行规则,生成变迁激发后相应的标识。并且与变迁 $t_{b,i,j}$ 激发无关的阀门状态设定为关闭状态,即 \bar{w}_{v_n} 中有托肯。

Step 2 对由标识 m_i 激发变迁 T_i 后生成的新标识 m_j , 执行Step 2.1或Step 2.2。

Step 2.1 若 m_j 与已有的标识相等,则绘制 m_i 到已有标识的有向弧;有向弧上标注激发变迁 T_j/d_k 或 $\{T_i, T_j, \dots\}/d_k$ 。

Step 2.2 若 m_j 不同于任何已有的标识,则 m_j 为一新的标识,绘制 m_j 到 m_i 的有向弧;有向弧上标注激发变迁 T_j/d_k 或 $\{T_i, T_j, \dots\}/d_k$ 。

Step 3 若所有变迁都不使能或没有新的标识生成,则最大速度运行可达图构建完成。在可达图中,标识的第1行为生产任务Petri网标识,第2行为各阀门网元件标识。

Step 4 对最大速度运行的可达图进行解析:可达图中, $t_{b,i,j}$ 之前时间 d_k 的累加值为 $t_{b,i,j}$ 被激发的时刻,即 $J_{i,j}$ 阶段开始进行的时刻。将所有支路的时间 d_k 进行累加,所求的不同支路上 d_k 的和,即为不同加工顺序完成给定任务所用的时间;求和最小的支路即为最优支路,找出最优支路中的变迁激发序列,即为最优加工策略。

随着网节点的增加,Petri网的可达图是呈指数级增长的,而算法2对赋时Petri网进行最大速度运行的可达图分析,很大程度上减小了可达图的规模,因而在计算最优加工策略时,降低了计算的复杂度。

由算法2中的步骤1-3,对图4中的Petri网模型的最大速度运行可达图进行计算绘制,其中的两条支路具体如图5所示。

根据算法2的Step 4,以图5中的两条可达图支路为例进行分析:首先,从图5中得出,该可达图有两条支路,分别对两条支路上的 d_k 进行求和运算:

$$\sum_{k=1}^{16} d_k = 0 + 20 + 0 + 30 + 0 + 30 + 0 + 10 + 0 + 30 + 0 + 10 + 0 + 30 + 20 + 0 + 60 = 240 \text{ min,}$$

$$\sum_{k=1}^{16} d_k = 0 + 30 + 0 + 20 + 0 + 20 + 0 + 10 + 30 + 0 + 30 + 0 + 20 + 0 + 20 + 0 + 40 = 220 \text{ min.}$$

依次对最大速度运行可达图其他支路的 d_k 进行求和。比较可得,图5中右边支路 d_k 求和最小为 220 min,其激发序列,即最优加工策略为

$$o_{v_2}, t_{b,2,1}, t_{f,2,1}, o_{v_1} o_{v_3} o_{v_8} c_{v_2}, t_{b,1,1}, t_{b,2,2}, t_{f,1,1}, c_{v_3} o_{v_9}, t_{b,1,2}, t_{f,2,2}, o_{v_4} o_{v_6}, t_{b,2,3}, t_{f,1,2}, t_{f,2,3}, c_{v_4} c_{v_6} o_{v_5} o_{v_7} o_{v_{10}}, t_{b,1,3} t_{b,2,4}, t_{f,1,3}, c_{v_5} c_{v_7} o_{v_{11}}, t_{b,1,4}, t_{f,2,4}, o_{v_{12}}, t_{b,2,5}, t_{f,1,4}, o_{v_{13}}, t_{b,1,5}, t_{f,2,5} t_{f,1,5}.$$

最优加工策略中各 $t_{b,i,j}$ 被激发的时刻为该变迁激发前所有时间 d_k 的累加值,分别为: 0 min, 30 min, 50 min, 70 min, 110 min, 140 min, 160 min, 180 min。

由此,可得到各生产阶段的最优工作顺序为:初始时刻, $J_{2,1}$ 开始执行; 30 min时, $J_{1,1}, J_{2,2}$ 开始执行; 50 min时, $J_{1,2}$ 开始执行; 70 min时, $J_{2,3}$ 始执行; 110 min时, $J_{1,3}, J_{2,4}$ 开始执行; 140 min时, $J_{1,4}$ 开始执行; 160 min时, $J_{2,5}$ 开始执行; 180 min时, $J_{1,5}$ 开始执行; 220 min后任务结束。

6 执行最优加工策略的控制方法(Control method of the optimal process strategy)

从算法2所得到的优化调度策略中,可以得到系统中各生产阶段的具体工作顺序。下面将根据上文所得到的最优加工策略,生成阀门的具体控制策略——算法3。

算法3 控制策略的阀门控制矩阵的生成算法。

输入: 最优加工策略。

输出: 控制策略的阀门控制矩阵。

Step 1 从最优加工策略中提取阀门动作事件 $o_{v_n} c_{v_n}$ 激发序列 S , S 有 X 个子序列 S_1, S_2, \dots, S_x 。

Step 2 设计控制矩阵 $A_{X \times N}$, $A_{X \times N}$ 有 X 行, N 列。 X 行表示有 X 组相应的动作, N 列表示有 N 个阀门。令阀门初始状态均为关闭,即 $a_{0,n} = 0$ 。矩阵 $A_{X \times N}$ 的第 x 行 n 列元素 $a_{x,n}$ 的计算为

$$a_{x,n} = \begin{cases} 1, & o_{v_n} \in S_x, \\ 0, & c_{v_n} \in S_x, \\ a_{x-1,n}, & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

算法3将最优加工策略映射到阀门的控制策略,并最终给出了阀门的控制矩阵,其计算复杂度是多项式级的。

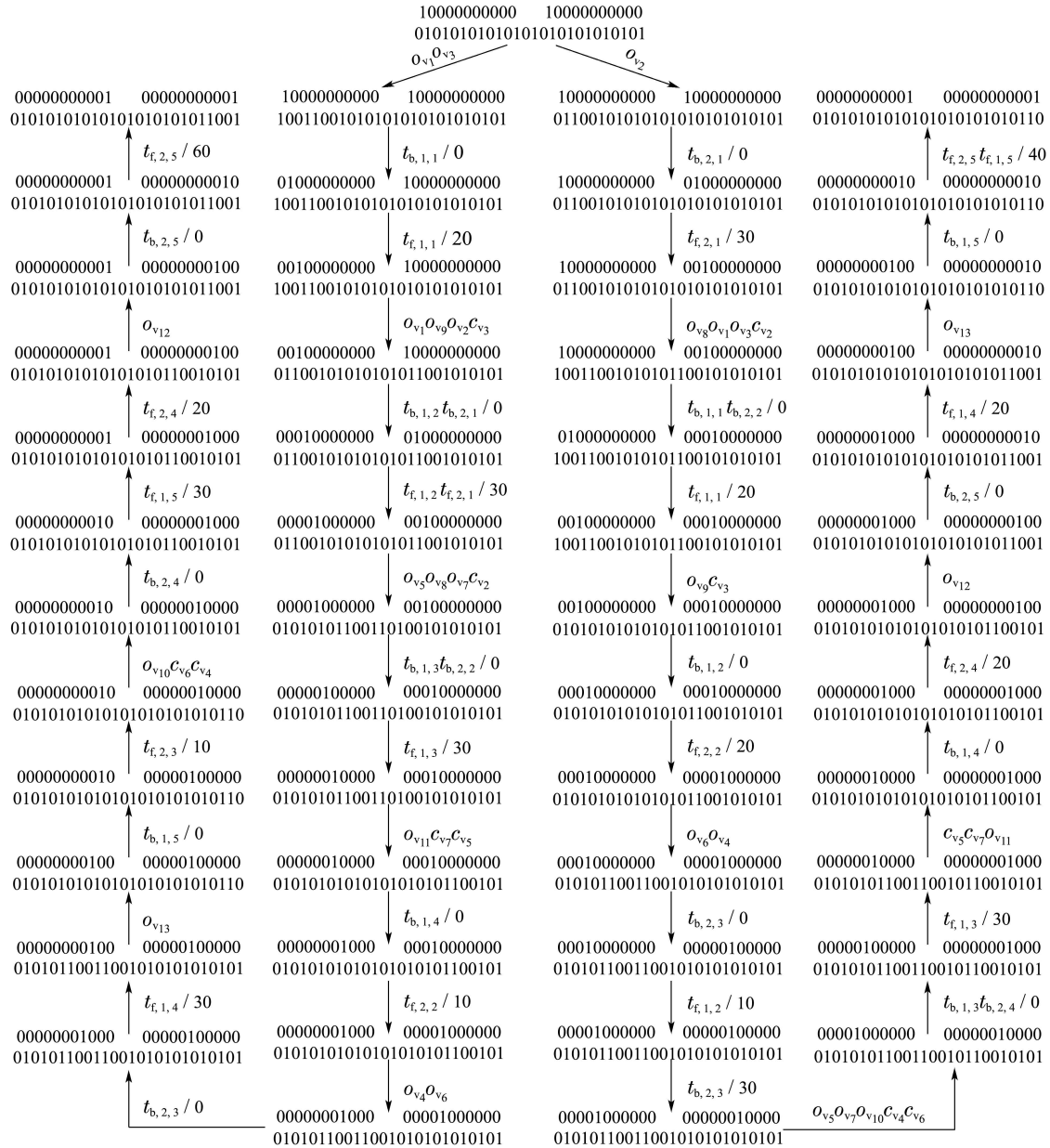


图5 间歇式化工系统的最大速度运行的可达图

Fig. 5 The reachability tree of batch chemical processes

下面, 根据算法3的Step 1, 从算法2得到的最优加工策略

$o_{v_2}, t_{b,2,1}, t_{f,2,1}, o_{v_1}o_{v_3}o_{v_8}c_{v_2}, t_{b,1,1}, t_{b,2,2}, t_{f,1,1}, c_{v_3}o_{v_9}, t_{b,1,2}, t_{f,2,2}, o_{v_4}o_{v_6}, t_{b,2,3}, t_{f,1,2}, t_{f,2,3}, c_{v_4}c_{v_6}o_{v_5}o_{v_7}o_{v_{10}}, t_{b,1,3}t_{b,2,4}, t_{f,1,3}, c_{v_5}c_{v_7}o_{v_{11}}, t_{b,1,4}, t_{f,2,4}, o_{v_{12}}, t_{b,2,5}, t_{f,1,4}, o_{v_{13}}, t_{b,1,5}, t_{f,2,5}t_{f,1,5}$

中提取阀门动作序列 S , S 有 8 个子序列:

$$\begin{aligned} S_1 &= o_{v_2}, S_2 = o_{v_1}o_{v_3}o_{v_8}c_{v_2}, S_3 = c_{v_3}o_{v_9}, \\ S_4 &= o_{v_4}o_{v_6}, S_5 = c_{v_4}c_{v_6}o_{v_5}o_{v_7}o_{v_{10}}, \\ S_6 &= c_{v_5}c_{v_7}o_{v_{11}}, S_7 = o_{v_{12}}, S_8 = o_{v_{13}}. \end{aligned}$$

根据算法3的步骤2设计并计算控制矩阵 $A_{8 \times 13}$.

从 S 的 8 个子序列 S_1, S_2, \dots, S_8 中可以看出

$$\begin{aligned} o_{v_2} &\in S_1, o_{v_1}o_{v_3}o_{v_8} \in S_2, o_{v_9} \in S_3, \\ o_{v_4}o_{v_6} &\in S_4, o_{v_5}o_{v_7}o_{v_{10}} \in S_5, o_{v_{11}} \in S_6, \\ o_{v_{12}} &\in S_7, o_{v_{13}} \in S_8, c_{v_2} \in S_2, \\ c_{v_3} &\in S_3, c_{v_4}c_{v_6} \in S_5, c_{v_5}c_{v_7} \in S_6. \end{aligned}$$

由式 (1), 可得控制矩阵 $A_{8 \times 13}$ 中的元素 $a_{1,2}, a_{2,1}, a_{2,3}, a_{2,8}, a_{3,9}, a_{4,4}, a_{4,6}, a_{5,5}, a_{5,7}, a_{5,10}, a_{6,11}, a_{7,12}, a_{8,13}$ 为 1, $a_{2,2}, a_{3,3}, a_{5,4}, a_{5,6}, a_{6,5}, a_{6,7}$ 为 0, 其余元素等于同列的上一行元素. 由此可得, 阀门具体的控制矩阵为

$$A_{8 \times 13} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $A_{X \times N}$ 中元素 $a_{x,n}$ 为0, 表示阀门 v_n 在第 x 阶段关闭; $a_{x,n}$ 为1, 表示阀门 v_n 在第 x 阶段打开.

结合最优变迁激发序列以及阀门控制矩阵, 为了实现优化调度策略: 开始工作时, v_2 打开, 其他阀门关闭, $J_{2,1}$ 开始执行; 30 min 时, 阀门 v_1, v_2 和 v_8 打开, 其他阀门关闭, $J_{1,1}$ 和 $J_{2,2}$ 开始执行; 50 min 时, 阀门 v_9 打开, 其他阀门关闭, $J_{1,2}$ 开始执行; 70 min 时, 阀门 v_4, v_6 打开, 其他阀门关闭, $J_{2,3}$ 开始执行; 110 min 时, 阀门 v_5, v_7 和 v_{10} 打开, 其他阀门关闭, $J_{1,3}, J_{2,4}$ 开始执行; 140 min 时, 阀门 v_{11} 打开, 其他阀门关闭, $J_{1,4}$ 开始执行; 160 min 时, 阀门 v_{12} 打开, 其他阀门关闭, $J_{2,5}$ 开始执行; 180 min 时, 阀门 v_{13} 打开, 其他阀门关闭, $J_{1,5}$ 开始执行; 220 min 后任务结束, 关闭所有打开的阀门.

7 总结(Conclusions)

本文首先对间歇式化工系统进行了形式化建模, 然后根据该系统的赋时 Petri 网模型, 计算出最大速度运行的可达图, 并从中得到优化调度策略, 最后根据优化调度策略与网结构信息给出阀门控制策略, 从而实现系统高效、安全地运行. 考虑到间歇式化工系统中因阀门故障等原因引起的不确定性问题, 在本文模型中加入监控库所, 从而快速地对模型进行修改, 并给出相应的调度策略和控制策略, 将是下一步的研究目标.

参考文献(References):

- [1] TUNCEL G, BAYHAN G M. Applications of Petri nets in production scheduling: A review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34(7): 762 – 773.
- [2] BONVIN D, SRINIVASAN B, HUNKELER D. Control and optimization of batch processes [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, 26(6): 34 – 45.
- [3] FERRARINI L, PIRODDI L. Modeling and control of fluid transportation operations in production plants with Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 1090 – 1098.

- [4] FALKMAN P, LENNARTSON B. Combined process algebra and petri nets for specification of resource booking problems [C] // *Proceedings of 2001 IEEE American Control Conference*. Arlington, VA, USA: IEEE, 2001, 6: 4949 – 4955.
- [5] FALKMAN P, LENNARTSON B, TITTUS M. Specification of a batch plant using process algebra and Petri nets [J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(9): 1004 – 1015.
- [6] LUO Jiliang, CHEN Xuekun, QI Pengfei, et al. Sequential controller synthesis and formal models for batch chemical processes [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46(12): 1896 – 1900. (罗继亮, 陈雪琨, 齐鹏飞, 等. 间歇式化工形式化建模与顺序控制器设计 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(12): 1896 – 1900.)
- [7] LUO J L, NONAMI K. Approach for transforming linear constraints on Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(12): 2751 – 2765.
- [8] LUO J L, SHAO H, NONAMI K, et al. Maximally permissive supervisor synthesis based on a new constraint transformation method [J]. *Automatica*, 2012, 48(6): 1097 – 1101.
- [9] WU Weimin, SU Hongye, CHU Jian. Synthesis of Petri nets controller for discrete event systems based on finite capacity places, Part 1 [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(2): 228 – 232. (吴维敏, 苏宏业, 褚健. 基于有限容量库所的离散事件系统的 Petri 网控制器综合——第1部分 [J]. 控制理论与应用, 2003, 20(2): 228 – 232.)
- [10] WU Weimin, SU Hongye, CHU Jian. Synthesis of Petri nets controller for discrete event systems based on finite capacity places, Part 2 [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(2): 233 – 238. (吴维敏, 苏宏业, 褚健. 基于有限容量库所的离散事件系统的 Petri 网控制器综合——第2部分 [J]. 控制理论与应用, 2003, 20(2): 233 – 238.)
- [11] LI C, WU W M, FENG Y P, et al. Scheduling FMS problems with heuristic search function and transition-timed Petri nets [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, 26(5): 933 – 944.
- [12] REN Lei, WANG Feng, XING Keyi. A Petri-net-based deadlock-free genetic scheduling for flexible manufacturing systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(1): 13 – 18. (任磊, 王峰, 邢科义. 基于 Petri 网的柔性制造系统无死锁遗传调度算法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(1): 13 – 18.)
- [13] GU T, BAHRI P A, CAI G. Timed Petri-net based formulation and an algorithm for the optimal scheduling of batch plants [J]. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2003, 13(4): 527 – 536.
- [14] GHAELI M, BAHRI P A, LEE P, et al. Petri-net based formulation and algorithm for short-term scheduling of batch plants [J]. *Computers & chemical engineering*, 2005, 29(2): 249 – 259.
- [15] DAVID R, ALLA H. *Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets* [M]. Berlin: Springer, 2005.

作者简介:

周家忠 (1991–), 男, 硕士研究生, 主要从事离散事件系统和 Petri 网理论与应用等研究, E-mail: zhouyanjiazhong@163.com;

罗继亮 (1977–), 男, 教授, 博士, 主要从事离散事件系统、Petri 网监控理论和智能制造等研究, E-mail: jlluo@hqu.edu.cn;

詹瑜坤 (1974–), 女, 实验师, 主要从事 PLC、电力电子等研究, E-mail: zyk@hqu.edu.cn.