

控制与决策

Control and Decision

具有不可靠资源柔性制造系统的鲁棒控制器设计

刘慧霞, 李俊红, 王红梅, 张雷

引用本文:

刘慧霞, 李俊红, 王红梅, 张雷. 具有不可靠资源柔性制造系统的鲁棒控制器设计[J]. *控制与决策*, 2022, 37(8): 2040–2048.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[标签Petri网的路径信息在故障诊断中的应用](#)

Application of path information of labeled Petri nets in fault diagnosis

控制与决策. 2021, 36(2): 325–334 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0698>

[一种无人船动力定位跨平台实时控制模型](#)

Real-time cross-platform control system for unmanned ship dynamic positioning

控制与决策. 2021, 36(4): 909–916 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0960>

[一种无人船动力定位跨平台实时控制模型](#)

Real-time cross-platform control system for unmanned ship dynamic positioning

控制与决策. 2021, 36(4): 909–916 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0960>

[磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制](#)

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

[事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 \$H_\infty\$ 故障检测](#)

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

具有不可靠资源柔性制造系统的鲁棒控制器设计

刘慧霞[†], 李俊红, 王红梅, 张雷

(南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 如果柔性制造系统包含不可靠资源, 则在对系统进行控制器设计时, 不仅要考虑由于资源分配不合理带来的死锁现象, 还要考虑不可靠资源发生损坏带来的堵塞现象. 对此, 首先利用 Petri 网对具有不可靠资源的柔性制造系统进行建模, 结合 Petri 网图形结构(资源变迁回路), 模拟系统中的死锁和堵塞现象; 然后, 利用有效变迁覆盖的概念, 为系统设计一种结构简单、鲁棒性强的 Petri 网控制器; 最后, 利用两个例子验证所设计控制器的有效性.

关键词: 柔性制造系统; 死锁; 堵塞; 鲁棒控制器; 不可靠资源

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1601

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 刘慧霞, 李俊红, 王红梅, 等. 具有不可靠资源柔性制造系统的鲁棒控制器设计 [J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2040-2048.

Design of robust controllers for flexible manufacturing systems with multiple unreliable resources

LIU Hui-xia[†], LI Jun-hong, WANG Hong-mei, ZHANG Lei

(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: For flexible manufacturing systems (FMSs) with multiple unreliable resources, both deadlocks due to unreasonable resource allocations and blockings caused by the failure of unreliable resources are considered when designing controllers. Firstly, Petri nets are utilized to model the above systems, and resource transition circuits, a kind of graphical structures of Petri nets, are used to characterize the deadlocks and blockings of the systems. Then based on the concept of effective transition covers, a Petri nets controller is synthesized with small sizes and strong robustness. Finally, two examples are utilized to illustrate the effectiveness of the proposed robust controller.

Keywords: flexible manufacturing systems; deadlock; blocking; robust controllers; unreliable resources

0 引言

人们对柔性制造系统控制方面的研究一直关注其由于资源分配不恰当带来的死锁问题^[1-6], 因为死锁问题的产生易造成生产停滞, 给企业带来极大损失. 另外, 加工机床等重要资源容易发生机械损坏, 这些损坏在修复前使资源不能在生产过程中正常使用, 修复期间发生损坏的不可靠资源会使系统陷入堵塞状态^[7-18], 导致不需要这些损坏资源的工件只能等待它们修复而不能继续进行生产, 而且会使系统已有的优化调度序列失效^[19-20], 故资源损坏会大大降低系统生产效率.

相比所有资源均可靠的制造系统^[1-6], 具有不可

靠资源的制造系统其控制问题要复杂得多. 一方面, 要避免由于资源分配不合理造成的死锁问题, 另一方面, 要预防发生资源损坏后系统陷入堵塞状态. 目前, 对具有不可靠资源的柔性制造系统的控制研究, 大多采用 Petri 网进行建模^[21]. 常用方法是利用 Petri 网可达图理论或 Petri 网结构分析理论对系统建立鲁棒控制策略. 如文献 [10-11] 均利用 Petri 网可达标识分析系统可能出现的死锁现象和堵塞现象, 对系统建立鲁棒控制策略以预防对应死锁和堵塞可达标识的出现. 利用可达图理论建立的控制策略一般会遇到状态空间爆炸问题. 因此, 本文主要考虑利用 Petri 网结构分析方法建立控制策略, 尽量避免上述空间爆炸问

收稿日期: 2020-11-19; 录用日期: 2021-05-12.

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2018MF024); 国家自然科学基金项目(61973176, 41901269); 江苏省自然科学基金项目(BK20200969); 南通市基础科学研究项目(JC2021203); 江苏省“双创博士”项目(JSSCBS20211103).

责任编辑: 卢剑权.

[†]通讯作者. E-mail: huixialiu@126.com.

题.

利用 Petri 网结构分析理论建立鲁棒控制策略, 一般思路是分析系统 Petri 网模型中表征死锁状态和堵塞状态的结构特征, 然后对这些结构特征进行控制, 保证系统在有资源损坏的情况下也能够正常加工. 例如, 当不可靠资源只有一种类型且一次最多只发生一个损坏时^[13-15], 文献[13]对每个可能空的严格极小信标定义一个约束集, 对约束集添加具有合理初始标识的控制库所, 保证受控系统在资源发生损坏时整个生产过程也能够顺利进行. 文献[15]提出了强变迁覆盖概念. 通过对覆盖中每个极大完备资源变迁回路添加合适的控制库所, 对系统建立鲁棒控制器. 之后对同类系统建立了两阶段鲁棒控制策略, 提高了受控系统的容许性能^[17]. 文献[16]扩展了文献[13]的成果, 讨论了同一类不可靠资源发生多个资源损坏的情形. 对于存在多种类型不可靠资源的系统, 文献[18]讨论了不同类型的资源同时发生多个损坏的情形, 提出了强可控信标基底的概念. 对基底中每个严格极小信标添加合适的控制库所, 对系统建立了小规模鲁棒控制器.

受上述工作启发, 本文讨论具有不同类型不可靠资源的制造系统死锁和堵塞控制问题, 所考虑的不可靠资源不是带有缓冲区的加工站, 而是有多个相同加工单元组成的资源. 同时, 假设该系统中同时发生损坏的不可靠资源既可以是同一类型的, 也可以是不同类型的. 为保证系统所有工件在资源损坏时不用等待故障修复而能够继续进行加工, 进一步假设同一类型的不可靠资源中所有加工单元不能同时全部发生损坏. 在此基础上, 为该系统建立离线鲁棒控制策略. 离线控制策略的评价标准一般有3个: 行为许可性、计算复杂性、结构复杂性. 本文主要考虑结构复杂性, 其研究内容如下.

对无资源损坏发生时的柔性制造系统建立 Petri 网模型, 并对系统中每个不可靠资源的持有集中每个操作库所添加1个修复库所及相应变迁, 将上述两部分复合得到具有不可靠资源制造系统的 Petri 网模型; 利用资源变迁回路表征具有不可靠资源制造系统的死锁状态和堵塞状态, 主要讨论堵塞状态的表征问题, 给出堵塞状态的定义, 讨论该状态与资源变迁回路的关系; 利用文献[4]提出的有效变迁覆盖的概念, 对覆盖中每个资源变迁回路添加合适的控制库所和相关弧, 对系统建立结构简单、性能良好的鲁棒控制器, 保证当每个不可靠资源至少有1个没有发生损坏时, 系统仍能正常运行, 使得所有毛坯品均能够顺利

加工完成; 最后通过2个例子表明所设计控制器的有效性. 基于上述内容, 对具有不同类型不可靠资源的制造系统建立了一种新的结构简单的鲁棒控制器, 同时提高了控制器的鲁棒性, 保持了其容许性能.

1 预备知识

1.1 Petri 网

Petri 网是1个三元组 $N = (P, T, F)$, 其中 P 与 T 是两个不相交的非空有限集. P 为库所集, T 为变迁集, $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 为有向弧集. 给定1个 Petri 网 $N = (P, T, F)$ 以及1个顶点 $x \in P \cup T$, x 的前置集定义为 $\bullet x = \{y \in P \cup T | (y, x) \in F\}$, 后置集定义为 $x \bullet = \{y \in P \cup T | (x, y) \in F\}$. 若 Petri 网中的每个变迁均只有1个输入和输出库所, 即 $\forall t \in T, |\bullet t| = |t \bullet| = 1$, 则称该 Petri 网为状态机.

N 的一个状态或标识是指一个映射 $M : P \rightarrow N$, 其中 $N = \{0, 1, \dots\}$. 给定库所 $p \in P$ 和标识 M , $M(p)$ 是指在 M 下 p 所包含的 token 的个数. 令 $S \subseteq P$ 为一个库所集, $M(S)$ 表示在 M 下 S 中所有库所包含的 token 个数的总和, 即 $M(S) = \sum_{p \in S} M(p)$. 称有初始标识 M_0 的 Petri 网 N 为标识 Petri 网或简称为网, 记为 (N, M_0) . 为节省空间, 用 $\sum_{p \in P} M(p)p$ 表示向量 M .

$\forall p \in \bullet t$, 若 $M(p) > 0$, 则称 $t \in T$ 在 M 下是使能的, 记为 $M[t >]$. 使能变迁 t 在 M 下是可以引发的, 得到一个新标识 M' , 记为 $M[t > M']$. 其中: $M'(p) = M(p) - 1, \forall p \in \bullet t \setminus t \bullet; M'(p) = M(p) + 1, \forall p \in t \bullet \setminus \bullet t; M'(p) = M(p), \forall p \in P - \{\bullet t \setminus t \bullet, t \bullet \setminus \bullet t\}$. 称变迁序列 $\alpha = t_1 t_2 \dots t_k$ 在 M 下是可行的, 若存在 $M_i[t_i > M_{i+1}, t_i \in T, i \in \mathbf{N}_k = \{1, 2, \dots, k\}, M_1 = M$, 则称 M_i 是由 M 出发得到的一个可达标识. 令 $R(N, M_0)$ 表示所有从 M_0 出发得到的 N 的可达标识组成的集合.

若 $\forall M \in R(N, M_0), \exists M' \in R(N, M)$ 使得 $M'[t >]$ 成立, 则称变迁 t 是活的. 若从 M 出发没有可达标识使得 t 使能, 则称变迁 t 在 M 下是死的. 若所有的变迁均为活的, 则称网 (N, M_0) 是活的.

Petri 网 $N = (P, T, F)$ 是一个有向图, 其顶点集由库所集和变迁集构成. N 中的路径是指由顶点和弧组成的交替序列 $c = (x_0, e_1, x_1, e_2, x_2, \dots, x_{q-1}, e_q, x_q)$. 其中: $x_i \in P \cup T, e_k = (x_{k-1}, x_k) \in F, q$ 为路径 c 的长度, x_0 和 x_q 为 c 的端点. 若 $x_0 = x_q$, 则称 c 为回路.

设两个 Petri 网 $N_1 = (P_1, T_1, F_1), N_2 = (P_2, T_2, F_2)$, 其中 $P_1 \cap P_2 \neq \emptyset, T_1 \cap T_2 = \emptyset, N_1$ 与 N_2 复合得到新的 Petri 网 $N_1 \otimes N_2 = (P, T, F)$. 其中: $P = P_1 \cup$

$P_2, T=T_1 \cup T_2, F=F_1 \cup F_2$. 称两个标识Petri网 $(N_i, M_{0i}) = (P_i, T_i, F_i, M_{0i}) (i \in \mathbf{N}_2)$ 是兼容的. 若 $\forall p \in P_1 \cap P_2, M_{01}(p) = M_{02}(p)$, 则将这两个兼容标识Petri网 (N_1, M_{01}) 与 (N_2, M_{02}) 复合得到一个新的标识Petri网 $(N_1, M_{01}) \otimes (N_2, M_{02}) = (P, T, F, M_0)$. 其中: $(P, T, F) = N_1 \otimes N_2, M_0(p) = M_{0i}(p), \forall p \in P_i, i \in \mathbf{N}_2$.

1.2 拥有资源的简单序列加工进程系统网

拥有资源的简单序列加工进程系统网(简称 S^3PRs)是指满足如下条件的普通Petri网 $N = (P \cup P_0 \cup P_R, T, F)$:

1) $P \cup P_0 \cup P_R$ 满足如下条件: ① $P = \bigcup_{i=1}^k P_i$ 为一类操作库所集, 其中 $P_i \cap P_j = \emptyset, i \neq j$; ② $P_0 = \{p_{01}, p_{02}, \dots, p_{0k}\}$ 为闲置库所集, $k > 0$; ③ $P_R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 为资源库所集, $n > 0$.

2) $T = \bigcup_{i=1}^k T_i$ 为变迁集, 其中 $T_i \cap T_j = \emptyset, i \neq j$.

3) $\forall i \in \mathbf{N}_k$, 由 $P_i \cup \{p_{0i}\}$ 与 T_i 生成的子网 N_i 为强连通状态机, 且每一个 N_i 均包含 p_{0i} .

4) $\forall p \in P, \forall t_1 \in \bullet p, \forall t_2 \in p \bullet, \bullet t_1 \cap P_R = \bullet t_2 \cap P_R = \{r\}$. 称 p 需求资源 r , 记作 $\Re(p) = r$.

5) $\forall r \in P_R, \bullet \bullet r \cap P = r \bullet \bullet \cap P \neq \emptyset, \bullet r \cap r \bullet = \emptyset, \bullet \bullet (P_0) \cap P_R = (P_0) \bullet \bullet \cap P_R = \emptyset$.

令 $N = (P \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR , 其合理初始标识 M_0 满足: $\forall p_0 \in P_0, M_0(p_0) \geq 1; \forall p \in P, M_0(p) = 0; \forall r \in P_R, M_0(r) \geq 1$. 其中 $M_0(r)$ 为资源 r 的容量 $C(r)$, 即 r 中包含 $C(r)$ 个相同加工单元. 称 (N, M_0) 为一个(合理的)标识 S^3PR . 令 $t \in T, {}^{(o)}t$ 和 $t^{(o)}$ 分别为 t 的输入和输出操作(或者闲置)库所, ${}^{(r)}t$ 和 $t^{(r)}$ 分别为 t 的输入和输出资源库所. 所有对资源 r 有需求的库所组成的集合记为 $H(r)$, 即 $H(r) = \{p \in P | \Re(p) = r\}$, 称 $H(r)$ 为 r 的持有集.

令 $N = (P \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 为一个 $S^3PR, x, y \in P \cup T$ 为 N 中两个顶点. 若在 N 中存在从 x 到 y 的长度大于1、但不包含 $P_0 \cup P_R$ 中库所的路径, 则称在 N 中 x 在 y 的前面, 记作 $x < y$. 令 $W \subseteq (P \cup T)$ 为 N 中的顶点集, 若存在 $y \in W$ 使得 $x < y$, 则称在 N 中 x 在 W 的前面, 记作 $x < W$; 反之, $x \not< W$. 为叙述方便, 若 $x \in W$ 或 $x < W$, 则统一记作 $x \leq W$.

1.3 资源变迁回路

令 θ 是 $S^3PR N$ 中1条回路, 若只包含资源库所和变迁, 则称 θ 是 N 中1条资源变迁回路^[3]. 令 $\Re[\theta], \Im[\theta]$ 分别为 θ 的资源库所集和变迁集, 记作 $\theta = \langle \Re[\theta], \Im[\theta] \rangle$.

若 θ 满足 $({}^{(o)}\Im[\theta]) \bullet = \Im[\theta]$, 则称 θ 是完备的. 令

X_R 表示所有以 R 为资源集的完备资源变迁回路组成的集合, $\forall \theta_1, \theta_2 \in X(R)$, 则 $\theta_1 \cup \theta_2 \in X(R)$. 因此, $X(R)$ 包含唯一一个以 R 为资源集的极大完备资源变迁回路. Θ 为 N 中所有极大完备资源变迁回路组成的集合. $\forall M \in R(N, M_0)$, 若 θ 满足 $M({}^{(o)}\Im[\theta]) = M_0(\Re[\theta])$, 则称 θ 在 M 下是饱和的.

2 具有不可靠资源系统的Petri网建模及堵塞表征

2.1 具有不可靠资源系统的Petri网建模

首先, 对每个不可靠资源建立修复模型, 模拟不可靠资源在生产过程中发生损坏并修复的情形; 然后, 将该模型与 S^3PR 网进行复合, 得到具有不可靠资源系统的Petri网模型.

定义1 令 F 表示含不可靠资源集 R_u 的柔性制造系统, (N, M_0) 为 F 在无资源损坏下的Petri网模型, 其中每个不可靠资源 $r \in R_u$ 的容量均大于或等于2, 即 $C(r) \geq 2$. 满足如下条件的Petri网称为修复网 $(N_{R_u}, M_{R_u}) = (P_{R_u}, T_u, F_u, M_{R_u})$:

1) $P_{R_u} = H(R_u) \cup P_u$, 其中 $H(R_u)$ 为 R_u 的持有集, 称 $P_u = \bigcup_{i=1}^m \{p_{ui}\}$ 为修复库所集;

2) $T_u = T_\alpha \cup T_\beta, T_\alpha \cap T_\beta = \emptyset$. 其中: $T_\alpha = \bigcup_{i=1}^m \{\alpha_i\}, T_\beta = \bigcup_{i=1}^m \{\beta_i\}, \alpha_i$ 为损坏变迁, β_i 为修复变迁;

3) $\forall p_{ui} \in P_u$, 存在唯一操作库所 $p \in H(R_u)$ 使得 $(p_{ui}) \bullet = \bullet p = \beta_i, p \bullet = \bullet p_{ui} = \alpha_i, i \in N_m$, 记作 $p_{ui} = \text{Re}(p)$;

4) 初始标识 M_{R_u} 满足 $M_{R_u}(p) = 0, \forall p \in P_{R_u}$.

定义2 将 (N_{R_u}, M_{R_u}) 与标识 $S^3PR(N, M_0)$ 通过共享库所 $H(R_u)$ 进行复合, 得到新的Petri网 $(N_u, M_{u0}) = (P \cup P_0 \cup P_R \cup P_u, T \cup T_u, F \cup F_u, M_{u0})$, 称为标识 S^3PR_u . 其中: $M_{u0}(p) = M_0(p), \forall p \in P \cup P_0 \cup P_R; M_{u0}(p) = M_{R_u}(p), \forall p \in P_u$.

下面通过一个例子表明标识 S^3PR_u 的建模过程, 同时讨论本文设计鲁棒控制器的初衷.

例1 考虑一个有两条生产线的小型加工系统, 加工两种类型的毛坯品 J_1, J_2 , 加工机床有 r_1 和 r_3 两种, 其容量分别为2和3. 该系统还包括1台自动导引小车 r_2 , 容量为1. J_1 和 J_2 的加工路线分别为 $J_1: r_1 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3, J_2: r_3 \rightarrow r_2 \rightarrow r_1$. 该系统在无资源损坏的情况下对应的 S^3PR 网 (N, M_0) 如图1所示.

根据Petri网引发规则, 通过引发变迁序列 $t_{11}t_{11}t_{21}t_{22}$, 得到图2所示 (N_u, M_{u0}) 的一个可达标识 $M_1 = 5p_{10} + 2p_{11} + 6p_{20} + p_{22} + 3r_3$. 若在 M_1 下 r_1 中正在进行加工操作的1个加工单元发生损坏, 则通过引发损坏变迁 α_1 将其移至 p_{u1} 中进行修复, 得到 (N_u, M_{u0}) 中另一个可达标识 $M'_1 = 5p_{10} + p_{11} +$

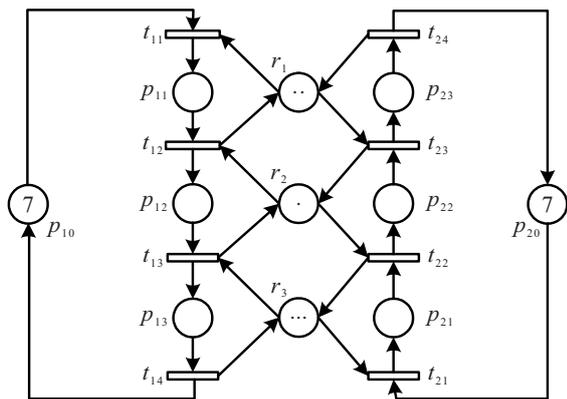


图1 标识 $S^3PR(N, M_0)$

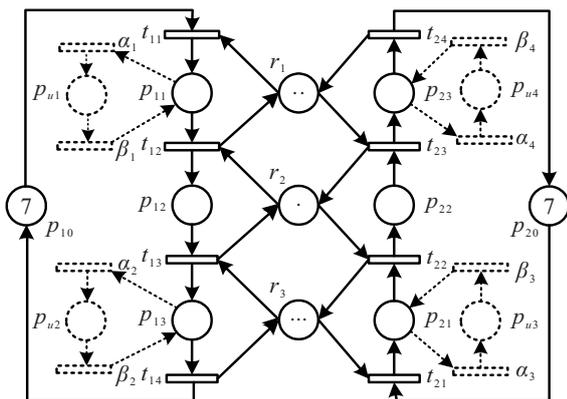


图2 标识 $S^3PR_u(N_u, M_{u0})$

$6p_{20} + p_{22} + p_{u1} + 3r_3$. 当损坏资源修复好,通过引发修复变迁 β_1 使修复好的资源重新回到 p_{11} 进行加工,重新得到标识 M_1 . 无论是在 M_1 下还是在 M'_1 下, r_1 和 r_2 分配均不合理,变迁 t_{12} 和 t_{23} 均无法引发,从而 M_1 和 M'_1 均为死锁标识.

另外,考虑 (N_u, M_{u0}) 的另一个标识 $M_2 = 6p_{10} + p_{11} + 5p_{20} + p_{22} + p_{23} + 3r_3$. 易验证在 M_2 下 t_{12} 和 t_{23} 是可以引发的,系统是正常运行的. 若 r_1 中正在 p_{23} 运行的机床发生损坏,则将正在加工的工件和机床移至 p_{u4} 中进行修复,此时得到新的标识 $M'_2 = 6p_{10} + p_{11} + 5p_{20} + p_{22} + p_{u4} + 3r_3$. 在 M'_2 下,损坏的资源正在修复. 修复期间,由于 r_1 和 r_2 中资源均被占用,从而形成了资源循环等待现象. 此时, t_{12} 和 t_{23} 在 M'_2 下是不能引发的. 待损坏资源从 p_{u4} 中修复重新回到 p_{23} 中,此时重新得到 M_2 , t_{12} 和 t_{23} 又能够引发,系统生产可以继续. 但是,在故障期间系统生产发生堵塞现象,故 M'_2 对应堵塞标识.

综上所述,无论是资源分配不合理带来的死锁现象,还是资源发生损坏带来的堵塞现象,均对系统生产造成影响. 故控制目标是既要避免死锁现象发生,又要防止出现堵塞. 由于所研究的不可靠资源是由多个相同加工单元组成的,控制策略需满足以下性质: 无论是否发生资源损坏,只要每种不可靠资源的加工单元至少有1个在正常工作,系统生产便能够顺利进行. 具体而言,希望所设计的控制器满足如下3

条性质:

- 1) 当无资源损坏发生时,系统能够顺利生产;
- 2) 当资源发生损坏(最坏的情况,每类资源 r 有 $C(r) - 1$ 个加工单元同时发生损坏)时,各类工件通过自己的生产线仍能够顺利完成加工;
- 3) 当损坏的资源修复后,能够回到生产线继续完成后续加工,不会影响系统的生产过程.

满足上述3条性质的控制器称为鲁棒控制器. 下面首先介绍例1中提到的死锁标识和堵塞标识的正规定义,然后介绍其表征问题.

2.2 饱和的资源变迁回路及堵塞表征

根据第1.3节所述, (N_u, M_{u0}) 中任一回路 θ 满足 $\mathfrak{S}[\theta] \cap T_u = \emptyset$,从而 (N, M_0) 中极大完备资源变迁回路的概念可平行移植至 (N_u, M_{u0}) 中. 换言之, N 中所有极大完备资源变迁回路均为 N_u 中极大完备资源变迁回路,反之亦然. 为方便讨论,将 (N_u, M_{u0}) 中所有极大完备资源变迁回路组成的集合记为 Θ_u .

定义3 $\forall M \in R(N_u, M_{u0}), \theta \in \Theta_u$, 令 $P_u[\theta] = \{p_u \in P_u | p_u = \text{Re}(p), p \in H(R_u) \cap {}^{(o)}\mathfrak{S}[\theta]\}$. 若 θ 满足 $M({}^{(o)}\mathfrak{S}[\theta] \cup P_u[\theta]) = M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta])$, 则称 θ 在 M 下是I型饱和的. 此时, $\mathfrak{S}[\theta]$ 中任一变迁在 M 下均是死的,称 M 为一个死锁标识.

由例1可知, $\theta_1 = r_1 t_{23} r_2 t_{12} r_1$ 是图2所示 (N_u, M_{u0}) 中的一个极大完备资源变迁回路,易验证 θ_1 在 M_1 和 M'_1 下均为I型饱和的,当然, M_1 和 M'_1 也均为死锁标识.

关于I型饱和,利用文献[3]对于 (N, M_0) 中资源变迁回路饱和性的讨论,得到如下结论.

引理1 假设 (N_u, M_{u0}) 是标识 $S^3PR_u, \forall M \in R(N_u, M_{u0})$, 令 $D(N_u, M) = \{t \in T | M({}^{(o)}t) > 0, t \text{ 在 } M \text{ 下是死的}\}$, 则 $D(N_u, M) \neq \emptyset$, 当且仅当存在 $\theta \in \Theta_u$ 使得 θ 在 M 下是I型饱和的.

证明过程略.

为后续讨论方便,定义如下符号: $P_{uu}[\theta] = \{p_u \in P_u | p_u = \text{Re}(p), p \in H(\mathfrak{R}[\theta] \cap R_u) \setminus {}^{(o)}\mathfrak{R}[\theta]\}$, $\mathfrak{S}_u[\theta] = \{t \in T | t \in p^\bullet, p_u = \text{Re}(p), p_u \in P_{uu}[\theta], M(p_u) > 0\}$.

定义4 令 (N_u, M_{u0}) 是标识 S^3PR_u, R_u 为不可靠资源集, $\theta \in \Theta_u$ 满足 $\mathfrak{R}[\theta] \cap R_u \neq \emptyset, M \in R(N_u, M_{u0})$. 若 $M(P_{uu}[\theta]) > 0, M({}^{(o)}\mathfrak{S}[\theta] \cup P_{uu}[\theta]) = M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta])$, 同时 $\exists t \in \mathfrak{S}_u[\theta]$ 使得 ${}^{(r)}t = \emptyset$ 或 $M({}^{(r)}t) > 0$, 则称 θ 在 M 下是II型饱和的,同时称 M 是一个堵塞标识.

如图2所示, $\theta_1 = r_1 t_{23} r_2 t_{12} r_1$ 在 M'_2 下是II型饱和的,同时 M'_2 是一个堵塞标识.

给定标识 $M \in R(N_u, M_{u0}), t \in T$ 满足如下条件: 1) $M({}^{(o)}t) > 0, M({}^{(r)}t) = 0$, 同时 $M(p_u) > 0$, 其中

$p_u = \text{Re}(t^{(o)}); 2) \forall M' \in R(N_u, M), M'(p_u) = M(p_u), M'({}^{(o)}t) > 0, t$ 在 M' 下仍不能引发; $3) \exists M'' \in R(N_u, M), M''(p_u) < M(p_u), t$ 在 M'' 下可以引发. 令 $B(N_u, M)$ 表示满足如上3个条件的所有变迁 t 组成的变迁集.

引理2 给定标识 $S^3PR_u(N_u, M_{u0}), M \in R(N_u, M_{u0}), B(N_u, M) \neq \emptyset$ 当且仅当存在包含不可靠资源的极大完备资源变迁回路 $\theta \in \Theta_u$, 使得 θ 在 M 下是 II 型饱和的.

证明 1) 必要性. 假设 $B(N_u, M) \neq \emptyset, \forall t_1 \in B(N_u, M), M({}^{(o)}t_1) > 0, M({}^{(r)}t_1) = 0$. 令 $({}^{(r)}t_1 = r_1, p_{u1} = \text{Re}(t_1^{(o)}),$ 则 $r_1 \in R_u, M(p_{u1}) > 0, M(r_1) = 0$. 令 $\Psi_1 = \{p \in P | p \in H(r_1), M(p) > 0\}$. 根据假设, r_1 至少有1个资源在生产使用过程中没有发生损坏, 故 $\Psi_1 \neq \emptyset. \forall t_2 \in \Psi_1^*, M({}^{(r)}t_2) = 0$. 令 $({}^{(r)}t_2 = r_2, \Psi_2 = \{p \in P | p \in H(r_2), M(p) > 0\}$, 则 $\Psi_2 \neq \emptyset$. 无论 r_2 是否为不可靠资源, $\forall t_3 \in \Psi_2^*, M({}^{(r)}t_3) = 0$. 重复上述过程, 得到资源集 $\mathfrak{R} = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 和变迁集 $\mathfrak{S} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 满足关系 $({}^{(r)}t_i = r_i, t_i^{(r)} = r_{i-1}$. 其中: $i \in N_n, r_n = r_0$. 从而得到以 \mathfrak{R} 为资源集的一个极大完备资源变迁回路 θ , 满足 $\mathfrak{R}[\theta] \cap R_u \neq \emptyset, M(\mathfrak{R}[\theta]) = 0$ 且 $M(P_{uu}[\theta]) > 0$.

根据上述讨论, $M({}^{(o)}\mathfrak{S}[\theta] \cup P_{uu}[\theta]) = M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta])$. 若对于任意 $t \in \mathfrak{S}_u[\theta]$, 均有 $({}^{(r)}t \neq \emptyset$ 且 $M({}^{(r)}t) = 0$, 则对于任一损坏资源修复后的后继标识 $M_1 \in R(N_u, M)$, 满足 $M_1({}^{(o)}t) > 0$ 的变迁 $t \in \mathfrak{S}[\theta] \cup \mathfrak{S}_u[\theta]$ 在 M_1 下是不能引发的. 这便导致 $t_1 \notin B(N_u, M)$, 与假设矛盾. 从而 $\exists t \in \mathfrak{S}_u[\theta]$, 使得 $({}^{(r)}t = \emptyset$ 或 $M({}^{(r)}t) > 0, \theta$ 在 M 下是 II 型饱和的.

2) 充分性. 令 $\theta \in \Theta_u, M \in R(N_u, M_{u0})$, 假设 θ 在 M 下是 II 型饱和的, $\forall t \in \mathfrak{S}[\theta]$, 每个满足 $M'(P_{uu}[\theta]) = M(P_{uu}[\theta])$ 的 $M' \in R(N_u, M_{u0}), t$ 在 M' 下不能引发. 否则, 存在 $t \in \mathfrak{S}[\theta]$ 及满足 $M_1(P_{uu}[\theta]) = M(P_{uu}[\theta])$ 的标识 $M_1 \in R(N_u, M)$, 使得 t 在 M_1 下是可以引发的, 则 $M_1({}^{(o)}t) > 0, M_1({}^{(r)}t) > 0$. 令 $({}^{(r)}t = r$, 则 $r \in \mathfrak{R}[\theta]$. 在 M 下, 由于 $\mathfrak{R}[\theta]$ 中故障资源仍在 $P_{uu}[\theta]$ 中进行修复, 同时 $({}^{(o)}\mathfrak{R}[\theta]$ 占据了 $\mathfrak{R}[\theta]$ 中其他资源, 从而 $M(r) = 0$. 若使 $M_1(r) > 0$, 则必须引发 $\bullet r \cap \mathfrak{S}[\theta]$ 中变迁. 但是, $({}^{(r)}\mathfrak{S}[\theta] = \mathfrak{S}[\theta]^{(r)} = \mathfrak{R}[\theta]$, 若要引发 $\mathfrak{S}[\theta]$ 中变迁, 则需要 $\mathfrak{R}[\theta]$ 中的资源, 由假设得知 $M(\mathfrak{R}[\theta]) = 0$, 从而可以推断 t 在 $P_{uu}[\theta]$ 中资源没有修复前是不能引发的, 得出与“ t 在 M_1 下是可以引发的”相矛盾的结论. 从而 $\mathfrak{S}[\theta]$ 中所有变迁在 $P_{uu}[\theta]$ 中资源没有修复之前都是不能引发的.

另一方面, 由定义4可知, 存在 $t \in \mathfrak{S}_u[\theta]$ 使得 $({}^{(r)}t = \emptyset$ 或 $M({}^{(r)}t) > 0$. 因此, 只要有1个资源在 $p_u \in P_{uu}[\theta]$

中修复并返回操作库所 $({}^{(o)}t$, 其中 $p_u = \text{Re}({}^{(o)}t), t$ 便能引发. 从而不妨假设 t 在 $M_2 \in R(N_u, M)$ 下引发, 其中 $M_2({}^{(o)}t) = 1$, 得到新标识记为 M_3 . 显然, $M_3(P_{uu}[\theta]) < M(P_{uu}[\theta])$ 且 $M_3(t^{(r)}) > 0$. 令 $t^{(r)} = r_1$, 因 $t \in \mathfrak{S}_u[\theta]$, 则 $r_1 \in \mathfrak{R}[\theta]$ 且 $\exists t_1 \in r_1^* \cap \mathfrak{S}[\theta]$ 满足 $M_3({}^{(o)}t_1) > 0$, 从而 t_1 在 M_3 下可以引发. 根据上述讨论, $t_1 \in \mathfrak{S}[\theta]$ 在满足 $M_1(P_{uu}[\theta]) = M(P_{uu}[\theta])$ 的标识 M_1 下是不能引发的, 故 $t_1 \in B(N_u, M)$. 因 $M_3(\mathfrak{R}[\theta]) > 0$, 则对于任意其他 $t_2 \in \mathfrak{S}[\theta]$, 可以找到 $M_4 \in R(N_u, M_3)$ 使得 t_2 在 M_4 下可以引发, 其中 $M_4(P_{uu}[\theta]) < M(P_{uu}[\theta])$. 同理可得 $t_2 \in B(N_u, M)$. 综上 $\mathfrak{S}[\theta] \subseteq B(N_u, M)$. \square

由引理1和引理2, 可以直接得到如下结论.

定理1 无论资源是否发生损坏, 只要每一类资源至少有1个正常工作, 系统便能够顺利生产的充要条件是 (N_u, M_{u0}) 中任意极大完备资源变迁回路在任意标识 $M \in R(N_u, M_{u0})$ 下既不是 I 型饱和也不是 II 型饱和.

3 对系统建立鲁棒控制策略

由定理1可知, 无论资源是否发生损坏, 为了生产顺利进行, 需要保证系统中所有极大完备资源变迁回路既不是 I 型饱和的也不是 II 型饱和的. 如果对每个极大完备资源变迁回路均添加控制库所, 则得到的控制器规模会随系统结构呈指数增长. 本文拟对含不可靠资源的制造系统建立基于有效变迁覆盖的鲁棒控制器, 该控制器结构简单, 其规模与系统结构呈多项式增长关系.

有效变迁覆盖的概念在文献[4]中第1次提出. 该覆盖是由 $S^3PR(N, M_0)$ 中满足条件的部分极大完备资源变迁回路组成的1个子集. (N, M_0) 中极大完备资源变迁回路与 (N_u, M_{u0}) 中极大完备资源变迁回路是完全一致的, 故将 (N, M_0) 中有效变迁覆盖的概念平行移植至 (N_u, M_{u0}) 中. 换言之, (N_u, M_{u0}) 的(有效)变迁覆盖与其对应的 (N, M_0) 的(有效)变迁覆盖是完全一致的. 为保证本文的完整性, 对(有效)变迁覆盖的概念重述如下.

定义5 令 (N_u, M_{u0}) 为标识 S^3PR_u, R_u 为不可靠资源集. 令 $\Gamma_u \subseteq \Theta_u, \theta \in \Theta_u$, 若 Γ_u 的所有变迁组成的集合覆盖了 θ 的变迁集, 即 $\mathfrak{S}[\theta] \subseteq \bigcup_{\alpha \in \Gamma_u} \mathfrak{S}[\alpha]$, 则称 Γ_u 为 θ 的1个变迁覆盖, 或称 Γ_u 覆盖 θ . 若 Γ_u 的任一真子集均不能够覆盖 θ , 则称 Γ_u 为 θ 的极小覆盖. 若 Γ_u 能够覆盖 Θ_u 中每个极大完备资源变迁回路, 则称 Γ_u 为 N_u 的1个变迁覆盖.

定义6 设 Γ_u 为 (N_u, M_{u0}) 的1个变迁覆盖, $\forall \theta \in \Theta_u \setminus \Gamma_u$, 若 Γ_u 中存在 θ 的1个极小覆盖 Γ_u 且满足 $M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) > |\Gamma_u(\theta)|$, 则称 Γ_u 为 (N_u, M_{u0}) 的1个有效

变迁覆盖. 这里 $|\Gamma_u(\theta)|$ 是指 $\Gamma_u(\theta)$ 中极大完备资源变迁回路的个数,同时称 $\Gamma_u(\theta)$ 为 θ 在 Γ_u 中的1个有效覆盖.

$\forall \theta \in \Theta_u, t \in T$,若 t 的引发能够增加 $(\circ)\mathfrak{S}[\theta] \cup H(\mathfrak{R}[\theta] \cap R_u)$ 中托肯,则称 t 为 θ 的输入变迁;反之,若 t 的引发减少 $(\circ)\mathfrak{S}[\theta] \cup H(\mathfrak{R}[\theta] \cap R_u)$ 中托肯,则称 t 为 θ 的输出变迁. 输入变迁组成的集合记为 $I[\theta]$,输出变迁组成的集合记为 $O[\theta]$.

令 $W_1[\theta] = \{t \in T | t \in P_0^* \wedge t \in I[\theta]\}, W_2[\theta] = \{t \in T | t \in O[\theta] \wedge t \not\prec (\circ)\mathfrak{R}[\theta]\}, W_3[\theta] = \{t \in T | t \not\prec O[\theta], \exists t_1 \in (\circ)t^*, \text{使得 } t_1 < O[\theta]\}$.

基于上述讨论,给出控制器的定义.

定义7 (N_u, M_{u0})关于 $\theta \in \Theta_u$ 的Petri网控制器定义如下:

$$(C_\theta, M_\theta) = (\{c_\theta\}, T_\theta, F_\theta, M_\theta).$$

其中: c_θ 为 θ 的控制库所,其初始标识为 $M_\theta(c_\theta) = M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - \xi_\theta, \xi_\theta \in [1, M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - 1]$ 为整数变量,称为控制变量; $T_\theta = W_1[\theta] \cup W_2[\theta] \cup W_3[\theta]; F_\theta = \{(c_\theta, t) | t \in W_1[\theta]\} \cup \{(t, c_\theta) | t \in W_2[\theta] \cup W_3[\theta]\}$.

注1 由定义7可知, ξ_θ 取值为 $1 \sim M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - 1$ 的任意整数.但是,为了提高受控系统的容许性能(即保证受控系统中可达标识数尽可能多), ξ_θ 的取值由后文给出的算法1中step 5提供的整数线性规划问题确定.

定义8 (N_u, M_{u0})关于 Γ_u 的Petri网控制器定义如下:

$$(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u}) = \bigotimes_{\theta \in \Gamma_u} (C_\theta, M_\theta) = (P_{\Gamma_u}, T_{\Gamma_u}, F_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u}).$$

其中: $P_{\Gamma_u} = \bigcup_{\theta \in \Gamma_u} \{c_\theta\}, T_{\Gamma_u} = \bigcup_{\theta \in \Gamma_u} T_\theta, F_{\Gamma_u} = \bigcup_{\theta \in \Gamma_u} F_\theta, M_{\Gamma_u}(c_\theta) = M_\theta(c_\theta), (C_\theta, M_\theta) = (\{c_\theta\}, T_\theta, F_\theta, M_\theta)$ 为定义7定义的 (N_u, M_{u0}) 关于 θ 的控制器.

称 $(CN_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_{u0}}) = (N_u, M_{u0}) \otimes (C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$ 为 (N_u, M_{u0}) 的基于 Γ_u 的受控系统,用 $(\circ)t$ 和 $t(\circ)$ 分别表示 t 的输入和输出控制库所集.

引理3 (N_u, M_{u0})为标识 S^3PR_u, R_u 为不可靠资源集, Γ_u 为 (N_u, M_{u0}) 的1个有效变迁覆盖.若 $\theta' \in \Theta_u \setminus \Gamma_u$ 满足如下条件:

$$\sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} \xi_\theta > \sum_{\Gamma_u(\theta')} M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta']), \quad (1)$$

其中 $\Gamma_u(\theta') \subseteq \Gamma_u$ 为 θ' 在 Γ_u 中的有效覆盖,则 $\forall M \in R(CN_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_{u0}}), M((\circ)\mathfrak{S}[\theta'] \cup P_u[\theta']) < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta'])$ 且 $M((\circ)\mathfrak{S}[\theta'] \cup P_{uu}[\theta']) < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta'])$.

证明 $\forall M \in R(CN_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_{u0}})$,由定义8, $\forall \theta \in \Gamma_u, M((\circ)\mathfrak{S}[\theta] \cup H(\mathfrak{R}[\theta] \cap R_u)) < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta])$.根据 $P_u[\theta]$ 和 $P_{uu}[\theta]$ 符号的定义, $P_u[\theta]$ 和 $P_{uu}[\theta]$ 中的托肯可以理解为在对应操作库所里面.从而得到 $M((\circ)\mathfrak{S}[\theta] \cup$

$P_u[\theta]) < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta])$ 且 $M((\circ)\mathfrak{S}[\theta] \cup P_{uu}[\theta]) < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta])$.由于 $\Gamma_u(\theta')$ 为 θ' 的有效覆盖,由定义6, $\mathfrak{S}[\theta'] \subseteq$

$$\begin{aligned} & \bigcup_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} \mathfrak{S}[\theta], \mathfrak{R}[\theta'] \subseteq \bigcup_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} \mathfrak{R}[\theta], \text{从而有} \\ & ((\circ)\mathfrak{S}[\theta'] \cup H(\mathfrak{R}[\theta'] \cap R_u)) \subseteq \\ & \left(\bigcup_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} ((\circ)\mathfrak{S}[\theta]) \right) \cup \left(\bigcup_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} (H(\mathfrak{R}[\theta] \cap R_u)) \right) = \\ & \bigcup_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} ((\circ)\mathfrak{S}[\theta] \cup H(\mathfrak{R}[\theta] \cap R_u)), \end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned} & M((\circ)\mathfrak{S}[\theta'] \cup H(\mathfrak{R}[\theta'] \cap R_u)) \leq \\ & \sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} M((\circ)\mathfrak{S}[\theta] \cup H(\mathfrak{R}[\theta] \cap R_u)) \leq \\ & \sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} (M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - \xi_\theta). \end{aligned}$$

由式(1)可知

$$\sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} (M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - \xi_\theta) < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta']).$$

则 $M((\circ)\mathfrak{R}[\theta'] \cup H(\mathfrak{R}[\theta'] \cap R_u)) < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta'])$,从而 $M((\circ)\mathfrak{S}[\theta'] \cup P_u[\theta']) < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta'])$ 且 $M((\circ)\mathfrak{S}[\theta'] \cup P_{uu}[\theta']) < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta'])$. \square

定理2 (N_u, M_{u0})为标识 S^3PR_u, R_u 为不可靠资源集, Γ_u 为 (N_u, M_{u0}) 的1个有效变迁覆盖, $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$ 为基于 Γ_u 设计的Petri网控制器.则有

- 1) $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$ 是存在的;
- 2) $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$ 是鲁棒的.

证明: $\forall \theta \in \Gamma_u$,由 $I[\theta] \neq \emptyset, O[\theta] \neq \emptyset$,故 $W_i[\theta] \neq \emptyset, i \in N_3$,从而 C_θ 的结构是存在的,即 $\{c_\theta\}, T_\theta, F_\theta$ 均存在.因此,若要说明 $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$ 的存在性,则只需证明 M_θ 有意义即可.换言之,只需证明满足条件(1)和定义7中约束条件“ $1 \leq \xi_\theta \leq M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - 1$ ”的控制变量 ξ_θ 是有解的.

取 $\xi_\theta = M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - 1$,显然 ξ_θ 满足定义7的约束条件.另一方面,有

$$\begin{aligned} \sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} \xi_\theta &= \sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} (M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - 1) = \\ & \sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} (M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta])) - |\Gamma_u(\theta')|. \end{aligned}$$

其中: $\Gamma_u(\theta')$ 为 θ' 在 Γ_u 中的有效覆盖, $|\Gamma_u(\theta')|$ 为 $\Gamma_u(\theta')$ 中极大完备资源变迁回路的个数.由定义6, $|\Gamma_u(\theta')| < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta'])$,从而

$$\sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} \xi_\theta > \sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta']),$$

满足条件(1).综上所述, ξ_θ 是有解的, $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$ 是存在的.

下面证明无论资源是否发生损坏,受控系统均能

够顺利完成生产,即 $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$ 是鲁棒的. 只需证明 $\forall t \in T$, 若 t 是过程使能的, 即 $M^{(c)}t > 0$, 则 t 是活的. 假设存在过程使能 $t \in T, M \in R(CN_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_{u0}}), t$ 在 M 下不是活的, 则 $M^{(r)}t = 0$ 或 $M^{(c)}t = 0$.

假设 $M^{(r)}t = 0$, 则 $D(N_u, M) \neq \emptyset$ 或 $B(N_u, M) \neq \emptyset$. 若 $D(N_u, M) \neq \emptyset$, 则由引理1可知, 存在 $\theta \in \Theta_u$, 使得 θ 在 M 下是I型饱和的. 根据定义3, $M^{(c)}\mathfrak{S}[\theta] \cup P_u[\theta] = M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta])$. 若 $B(N_u, M) \neq \emptyset$. 则由引理2可知, 存在 $\theta \in \Theta_u$, 使得 θ 在 M 下是II型饱和的. 根据定义4, $M^{(c)}\mathfrak{S}[\theta] \cup P_{uu}[\theta] = M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta])$. 由上述关于 $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$ 的存在性”的证明过程可知, $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$ 中满足条件(1)的 ξ_θ 是存在的, 由引理3可知, $\forall M'' \in R(CN_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_{u0}})$ 及 $\theta'' \in \Theta_u, M''^{(c)}\mathfrak{S}[\theta''] \cup P_u[\theta''] < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta''])$ 且 $M''^{(c)}\mathfrak{S}[\theta''] \cup P_{uu}[\theta''] < M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta''])$, 与上述说法矛盾. 故 $M^{(r)}t > 0$, 只能 $M^{(c)}t = 0$. 令 $^{(c)}t = c$, 则 $M(c) = 0. \forall t' \in \bullet c$, 根据定义7, $^{(c)}t' = \emptyset$, 从而 $M^{(r)}t' = 0$, 否则 t' 在 M 下可以引发, 从而 t 在 M 下也可以引发, 与假设矛盾. 对 t' 作类似于 t 的讨论得到同样的矛盾. 综上所述, $M^{(c)}t > 0, t$ 在 M 下是活的, 从而证明无论资源是否发生损坏, 系统均能够顺利完成生产. □

根据定义8和定理2, 给出如下基于变迁覆盖的鲁棒控制策略.

算法1 基于变迁覆盖的鲁棒控制策略.

输入: 给定标识 $S^3PR_u(N_u, M_{u0}), R_u$ 为不可靠资源集;

输出: 鲁棒控制器 $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$.

step 1: 删除 N_u 中所有与操作库所、闲置库所以及修复库所相关的变迁及弧, 得到系统子网(称为资源变迁网).

step 2: 利用文献[4]在资源变迁网中计算 (N_u, M_{u0}) 的1个有效变迁覆盖 Γ_u .

step 3: 基于定义7, 对 Γ_u 中每个极大完备资源变迁回路 θ 添加合适的控制库所, 控制变量的值 ξ_θ 由 step 5 求得.

step 4: $\forall \theta' \in \Theta_u \setminus \Gamma_u$, 利用文献[4]计算其在 Γ_u 中对应的有效覆盖 $\Gamma_u(\theta')$, 得到条件(1).

step 5: 建立如下整数线性规划问题(ILP)并求解:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{\theta \in \Gamma_u} \xi_\theta. \\ \text{s.t.} & 1 \leq \xi_\theta \leq M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - 1; \\ & \sum_{\theta \in \Gamma_u(\theta')} \xi_\theta > \sum_{\Gamma_u(\theta')} M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta]) - M_{u0}(\mathfrak{R}[\theta']). \end{aligned} \quad (2)$$

step 6: 输出控制器 $(C_{\Gamma_u}, M_{\Gamma_u})$.

由上述分析可知, 基于变迁覆盖的鲁棒控制算法输出的控制器是鲁棒的. 进一步, 由文献[4]可知, 有

效变迁覆盖中极大完备资源变迁回路的个数不超过 N 中变迁个数的2倍, 因此, 添加的控制库所的个数也不超过 N 中变迁个数的2倍, 从而所设计的控制器结构简单, 与系统结构呈多项式增长关系.

4 实例分析

例2 重新考虑图2所示的标识 $S^3PR_u(N_u, M_{u0})$. 该网包含3个极大完备资源变迁回路:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= r_1 t_{23} r_2 t_{12} r_1, \\ \theta_2 &= r_2 t_{22} r_3 t_{13} r_2, \\ \theta_3 &= r_1 t_{23} r_2 t_{22} r_3 t_{13} r_2 t_{12} r_1. \end{aligned}$$

令 $\Gamma_u = \{\theta_1, \theta_2\}, \Gamma_u$ 为 (N_u, M_{u0}) 的1个有效变迁覆盖, 也是 θ_3 在 Γ_u 中的1个有效覆盖. 易计算 $I[\theta_1] = \{t_{11}, t_{22}\}, O[\theta_1] = \{t_{12}, t_{24}\}, W_1[\theta_1] = \{t_{11}, t_{21}\}, W_2[\theta_1] = \{t_{12}, t_{24}\}$. 同理, $I[\theta_2] = \{t_{12}, t_{21}\}, O[\theta_2] = \{t_{14}, t_{22}\}, W_1[\theta_2] = \{t_{11}, t_{21}\}, W_2[\theta_2] = \{t_{14}, t_{22}\}, W_3[\theta_1] = W_3[\theta_2] = \emptyset$. 由定理2计算如下ILP:

$$\begin{aligned} \min & \xi_{\theta_1} + \xi_{\theta_2}; \\ \text{s.t.} & 1 \leq \xi_{\theta_1} \leq 2, \\ & 1 \leq \xi_{\theta_2} \leq 3, \\ & \xi_{\theta_1} + \xi_{\theta_2} \geq 2. \end{aligned} \quad (3)$$

求得控制变量 $\xi_{\theta_1} = \xi_{\theta_2} = 1$. 从而由定义8得到如表1所示的结构简单的鲁棒控制器.

表1 图2所示 S^3PR_u 基于 Γ_u 的鲁棒控制器

c_θ	$\bullet c_\theta$	c_θ^\bullet	$M_{\Gamma_u}(c_\theta)$
c_{θ_1}	t_{12}, t_{24}	t_{11}, t_{21}	2
c_{θ_2}	t_{14}, t_{22}	t_{11}, t_{21}	3

例3 考虑文献[2]给出的一个经典柔性制造系统. 假设该系统中有两类不可靠资源 r_3 和 r_6 . 由定义2得到如图3所示标识 $S^3PR_u(N_u, M_{u0})$, 其中4个修复库所及相关变迁和弧如虚线所示.

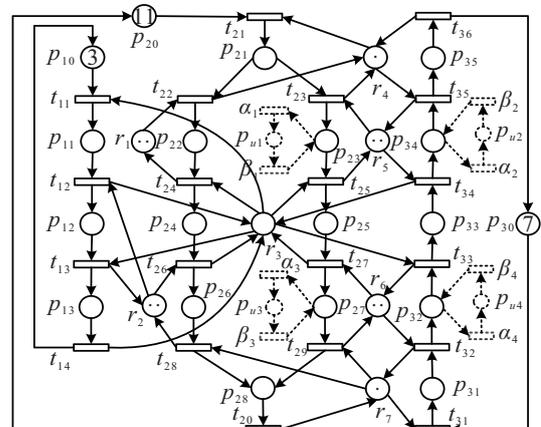


图3 标识 $S^3PR_u(N, M_0)$

在 (N_u, M_{u0}) 中有18个极大完备资源变迁回路, 分别为

$$\begin{aligned} \theta_1 &= r_5 t_{34} r_3 t_{25} r_5, \theta_2 = r_3 t_{33} r_6 t_{27} r_3, \\ \theta_3 &= r_6 t_{32} r_7 t_{29} r_6, \theta_4 = r_3 t_{13} r_2 t_{26} r_3 t_{13} r_2 t_{12} r_3, \\ \theta_5 &= r_1 t_{22} r_4 t_{35} r_5 t_{23} r_4 t_{35} r_5 t_{34} r_3 t_{25} r_5 t_{34} r_3 t_{24} r_1, \\ \theta_6 &= r_3 t_{33} r_6 t_{27} r_3 t_{33} r_6 t_{32} r_7 t_{29} r_6 t_{32} r_7 t_{28} r_2 t_{26} r_3 \rightarrow \\ &\leftarrow t_{13} r_2 t_{12} r_3, \\ \theta_7 &= \theta_1 \cup \theta_2, \theta_8 = \theta_1 \cup \theta_4, \\ \theta_9 &= \theta_1 \cup \theta_6, \theta_{10} = \theta_2 \cup \theta_3, \\ \theta_{11} &= \theta_2 \cup \theta_4, \theta_{12} = \theta_2 \cup \theta_5, \\ \theta_{13} &= \theta_4 \cup \theta_5, \theta_{14} = \theta_5 \cup \theta_6, \\ \theta_{15} &= \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3, \theta_{16} = \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_4, \\ \theta_{17} &= \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_5, \theta_{18} = \theta_2 \cup \theta_4 \cup \theta_5. \end{aligned}$$

令 $\Gamma_u = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6\}$, 则 Γ_u 为 (N_u, M_{u0}) 的 1 个有效变迁覆盖.

由算法 1 得到如下 ILP:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^6 \xi_{\theta_i}. \\ \text{s.t.} & 1 \leq \xi_{\theta_i} \leq 2, i = 1, 2, 3, 4; \\ & 1 \leq \xi_{\theta_i} \leq 5, i = 5, 6; \\ & \xi_{\theta_1} + \xi_{\theta_i} \geq 2, i = 2, 4, 6; \\ & \xi_{\theta_2} + \xi_{\theta_3} \geq 3; \\ & \xi_{\theta_2} + \xi_{\theta_i} \geq 2, i = 4, 5; \\ & \xi_{\theta_5} + \xi_{\theta_i} \geq 2, i = 4, 6; \\ & \xi_{\theta_1} + \xi_{\theta_2} + \xi_{\theta_3} \geq 4; \\ & \xi_{\theta_1} + \xi_{\theta_2} + \xi_{\theta_4} \geq 3; \\ & \xi_{\theta_2} + \xi_{\theta_3} + \xi_{\theta_5} \geq 4; \\ & \xi_{\theta_2} + \xi_{\theta_4} + \xi_{\theta_5} \geq 3. \end{aligned} \tag{4}$$

利用 LINGO 11 得到 $\xi_{\theta_1} = \xi_{\theta_3} = \xi_{\theta_4} = \xi_{\theta_5} = \xi_{\theta_6} = 1$, $\xi_{\theta_2} = 2$ 或 $\xi_{\theta_1} = \xi_{\theta_2} = \xi_{\theta_4} = \xi_{\theta_5} = \xi_{\theta_6} = 1$, $\xi_{\theta_3} = 2$. 根据定义 7, 添加在 θ_2 和 θ_3 的控制库所其输入变迁集均为 $\{t_{22}, t_{29}, t_{33}\}$, 输出变迁集均为 $\{t_{21}, t_{31}\}$. 由此将约束相对宽松的控制库所删掉. 基于上述讨论, 利用两组控制变量的解得到的两个鲁棒控制器是完全一样的, 如表 2 所示.

表 2 图 3 所示 S^3PR_u 基于 Γ_u 的鲁棒控制器

c_{θ}	$\bullet c_{\theta}$	c_{θ}^{\bullet}	$M_{\Gamma_u}(c_{\theta})$
c_{θ_1}	t_{22}, t_{25}, t_{35}	t_{21}, t_{31}	2
c_{θ_2}	t_{22}, t_{29}, t_{33}	t_{21}, t_{31}	1
c_{θ_4}	t_{13}, t_{23}, t_{26}	t_{11}, t_{21}	2
c_{θ_5}	t_{24}, t_{25}, t_{35}	t_{21}, t_{31}	5
c_{θ_6}	$t_{13}, t_{28}, t_{29}, t_{33}$	t_{11}, t_{21}, t_{31}	5

显然, 该控制器大大缩减了受控系统结构规模. 文献 [15] 也讨论了该例, 但该文献只假设 r_5 是不可靠资源, 与其相比, 所设计的控制器不仅结构规模进一步降低 (文献 [15] 添加了 6 个控制库所), 而且控制器的鲁棒性有了明显提高.

5 结论

本文讨论了具有不可靠资源的柔性制造系统在生产过程中可能发生的死锁和堵塞现象, 利用 Petri 网图形结构为系统建立了一种新的鲁棒控制器, 保证系统在不同类型、不同个数的资源发生损坏时, 只要不同类型的资源中至少有 1 个加工单元还在正常工作, 系统生产便会顺利完成. 所设计的控制器允许不同类型、不同个数的资源同时发生损坏, 故其鲁棒性较强. 另一方面, 只对有效变迁覆盖中极大完备资源变迁回路添加合适的控制库所及相关弧, 而有效变迁覆盖中极大完备资源变迁回路的个数不超过网中变迁个数的 2 倍, 因此所设计的控制器结构简单.

在上述设计过程中, 为保证受控系统的鲁棒性, 将控制库所的输出弧延伸到源变迁. 这种添加方式相对严格, 从而导致所设计的控制器只对部分系统容许性能较优. 在保证强鲁棒性的前提下, 如何提高系统的容许性能, 是下一步要讨论的问题.

参考文献 (References)

- [1] Fanti M P, Zhou M C. Deadlock control methods in automated manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 2004, 34(1): 5-22.
- [2] Ezpeleta J, Colom J M, Martinez M J. A Petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(2): 173-184.
- [3] Xing K Y, Zhou M C, Liu H X, et al. Optimal petri-net-based polynomial-complexity deadlock-avoidance policies for automated manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 2009, 39(1): 188-199.
- [4] Liu H X, Xing K Y, Zhou M C, et al. Transition cover-based design of petri net controllers for automated manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2014, 44(2): 196-208.
- [5] Liu H X, Wu W M, Su H Y, et al. Design of optimal Petri-net controllers for a class of flexible manufacturing systems with key resources[J]. Information Sciences, 2016, 363: 221-234.
- [6] 胡核算, 李志武, 王安荣. 基于信标的柔性制造系统的优化死锁预防策略[J]. 控制与决策, 2006, 21(12): 1343-1348. (Hu H S, Li Z W, Wang A R. Optimal deadlock prevention

- policy in FMS using siphons[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(12): 1343-1348.)
- [7] Du N, Hu H S, Zhou M C. A survey on robust deadlock control policies for automated manufacturing systems with unreliable resources[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, 17(1): 389-406.
- [8] Luo J C, Liu Z Q, Wang S G, et al. Robust deadlock avoidance policy for automated manufacturing system with multiple unreliable resources[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(3): 812-821.
- [9] Wang X J, Hu H S. A robust control approach to automated manufacturing systems allowing multitype and multiquantity of resources with petri nets[J]. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics: System*, 2020, 50(10): 3499-3514.
- [10] Liu G Y, Li P, Li Z W, et al. Robust deadlock control for automated manufacturing systems with unreliable resources based on petri net reachability graphs[J]. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics: System*, 2019, 49(7): 1371-1385.
- [11] Feng Y X, Xing K Y, Zhou M C, et al. Robust deadlock prevention for automated manufacturing systems with unreliable resources by using general petri nets[J]. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics: System*, 2020, 50(10): 3515-3527.
- [12] Liu G Y, Li Z W, Barkaoui K, et al. Robustness of deadlock control for a class of Petri nets with unreliable resources[J]. *Information Sciences*, 2013, 235: 259-279.
- [13] Wu Y C, Xing K Y, Luo J C, et al. Robust deadlock control for automated manufacturing systems with an unreliable resource[J]. *Information Sciences*, 2016, 346/347: 17-28.
- [14] Wang F, Xing K Y, Zhou M C, et al. A robust deadlock prevention control for automated manufacturing systems with unreliable resources[J]. *Information Sciences*, 2016, 345: 243-256.
- [15] Feng Y X, Xing K Y, Gao Z X, et al. Transition cover-based robust petri net controllers for automated manufacturing systems with a type of unreliable resources[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(11): 3019-3029.
- [16] Wu Y C, Xing K Y, Zhou M C, et al. Robust deadlock control for automated manufacturing systems with a single type of unreliable resources[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(5): 168781401877241.
- [17] Feng Y X, Xing K Y, Liu H X, et al. Two-stage design method of robust deadlock control for automated manufacturing systems with a type of unreliable resources[J]. *Information Sciences*, 2019, 484: 286-301.
- [18] Liu H X, Wu W M, Yang H Y. Strong controllable siphonbasis-based robust deadlock control for manufacturing systems with multiple unreliable resources[J]. *IEEE Access*, 2019, 8: 269-277.
- [19] 康苗苗, 邢科义, 郜振鑫. 柔性制造系统的改进粒子群无死锁调度算法[J]. *控制与决策*, 2014, 29(8): 1345-1353.
(Kang M M, Xing K Y, Gao Z X. Deadlock-free modified particle swarm optimization scheduling algorithm for flexible manufacturing systems[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(8): 1345-1353.)
- [20] 吴秀丽, 孙琳. 智能制造系统基于数据驱动的车间实时调度[J]. *控制与决策*, 2020, 35(3): 523-535.
(Wu X L, Sun L. Data-based real-time scheduling in smart manufacturing[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(3): 523-535.)
- [21] Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77(4): 541-580.

作者简介

刘慧霞(1979—), 女, 副教授, 博士, 从事制造系统优化控制、Petri网建模等研究, E-mail: huixialiu@126.com;

李俊红(1980—), 女, 教授, 博士, 从事复杂系统建模与优化等研究, E-mail: missjunhong@163.com;

王红梅(1986—), 女, 讲师, 博士, 从事信息系统、图像处理等研究, E-mail: wanghognmei@ntu.edu.cn;

张雷(1992—), 男, 讲师, 博士, 从事SiC MOSFET性能测试与应用、新能源发电系统建模与控制等研究, E-mail: nttzzl@ntu.edu.cn.

(责任编辑: 魏冰)