离散事件系统的协调反馈控制*

原忠虎　徐心和

(东北大学自动控制系·沈阳,110006)

摘要：本文探讨以 Petri 网为模型的离散事件系统 (DES) 的某种禁止状态避免问题，提出了以 Petri 网 N 为基网，设计具有外部输入位置 Petri 网 (PNIP)，对 N 进行协调反馈控制的方法. 由 N 现行状态反馈决定的 PNIP 的控制状态，既保证 N 避免禁止状态，又使 N 具有最大自由度.

关键词：离散事件系统(DES)；Petri 网；具有外部输入位置的 Petri 网(PNIP)；禁止状态；协调反馈控制

1 引　言

DES 研究十年来取得了很大的进展，人们从不同的角度以不同的方法和模型提出和解决了一批各种各样的问题. 以 Petri 网为模型研究 DES 问题的方法，已越来越引起人们的重视. 某种禁止状态的避免问题是 DES 研究中的一个重要问题. Petri 网在 DES 禁止状态避免问题的应用中已取得了一些结果[1~4]. DES 的特点之一是具有异步、并发行为. 并发既有利于加快系统运行节奏、充分利用资源，同时也易于导致禁止状态的出现. 用外部施加控制的方法避免系统出现禁止状态时，应坚持两点原则：一是避免禁止状态出现，二是应使系统保留最大自由度.

Petri 网是描述异步、并发系统的有力工具[5]，许多具有并发特性的 DES 可用 Petri 网描述. 本文主要探讨以 Petri 网为模型的 DES 的某种禁止状态避免问题. 要解决的问题是：对于给定的禁止状态要求，1) 应对哪些转移施加外部控制？2) 限制转移发生的反馈控制律应如何确定？3) 所采取的控制策略是否在满足避免禁止状态的前提下，使原系统保留了最大自由度？

2 预备知识

2.1 Petri 网[5]

多元组 $N=(P,T,B_-,B_+,M)$ 称为 Petri 网(图 1). 其中 $P=\{p_1,\cdots,p_l\}$ 为位置集，$T=\{t_1\cdots,t_r\}$ 为转移集. B_-,B_+ 分别为输入、输出关联矩阵，其元素的值为 0 或 1. M 为状态集. 令 $Z_r=\{1,\cdots,r\}$，若 $\alpha\subseteq Z_r$，则 $T_\alpha=\{t_i|\forall\ i\in\alpha\}$ 为 T 的一子集，称为一个转移元. $|T_\alpha|$ 表示 T_α 中所含转移的个数. $V_\alpha=(v_\alpha^1,\cdots,v_\alpha^r)^{\mathrm{T}}$ 称为 T_α 的标志向量，若对 $\forall\ i\in Z_r$ 满足：$i\,\overline{\in}\,\alpha, v_\alpha^i=0$；$i\in\alpha, v_\alpha^i=1$. 称 $T^*=\{T_\alpha|\forall\ \alpha\subseteq Z_r\}$ 为 T 的幂集. 本文中假设 N 不含伴随位置.

引理 2.1[4]　T_α 在给定状态 m 下使能(能并发)的充要条件是 $m\geqslant B_-V_\alpha$，若 T_α 发生，

---

* 863高技术与博士点基金资助.

本文于1993年5月4日收到. 1994年4月13日收到修改稿.

后继状态 $m'=m+(B_+-B_-)V_a$.

我们用 $m[T_a>m'$ 表示 T_a 在 m 下使能，且 m' 为 m 经 T_a 发生后的状态. 对给定的初始状态 m^0，用 $R(N)$ 表示 m^0 在 N 中的能达集.

引理 2.2　若 $T_a=T_\beta\cup T_\gamma, T_\beta\cap T_\gamma=\varnothing$，且 $m[T_a>m'$，则 $m[T_\beta>m'', m''[T_\gamma>m'$ 成立.

注　由于篇幅所限，本文略去所有简单引理的证明.

2.2　Petri 网逆网[6,7]

多元组 $N^{-1}=(P,T,B'_-,B'_+,M)$ 称为 Petri 网 N 的逆网，如果 $B'_-=B_+, B'_+=B_-$.

引理 2.3[6]　给定 Petri 网 N 及状态 m，若 $m[T_a>m'$，则在 N^{-1} 中 $m'[T_a>m$.

引理 2.4[6]　给定 Petri 网 N 及状态 m，若 $m'\in R(m,N)$，则在 N^{-1} 中，$m\in R(m',N^{-1})$. $R(m,N)$ 表示 N 中状态 m 的能达集.

2.3　具有外部输入位置 Petri 网(PNIP)[7,8]

多元组 $NI=(N,Q,C,GQ,f)$ 称为 PNIP(图 2). 其中：$N=(P,T,B_-,B_+,M)$ 为一 Petri 网，称为 NI 的基网. $Q=\{q_1,\cdots,q_n\}$ 为外部输入位置. C 为 Q 的状态集，$c=(c(q_1),\cdots,c(q_n))^{\mathrm{T}}\in C$ 为 NI 的控制状态. $Gq_i=\{$所有以 q_i 为输入的转移$\}$称为 q_i 的后接转移元，$1\leqslant i\leqslant n$. $GQ=\{Gq_i|\forall\ q_i\in Q\}$称为 Q 的后接转移元集. f 表示 M 到 C 的一个映射(反馈)，即任给 $m\in M$，$c=f(m)\in C$. $m\in M$ 称为 NI 的过程状态.

对任给的过程状态 $m\in M$，由 m 反馈决定的控制状态 $c=f(m)$，有：

定义 2.1　$E(m)=\{T_a|m\geqslant B_-V_a\}$为过程使能集，$E(c)=\{T_a|c(q_i)\geqslant|Gq_i\cap T_a|,\forall\ q_i\in Q\}$为控制使能集，$E=E(m)\cap E(c)$为(完全)使能集.

规则 2.1　在 NI 中，T_a 能发生的充要条件是 $T_a\in E$. 若 T_a 发生，后继过程状态 $m'=m+(B_+-B_-)V_a$，后继控制状态为 $c'=f(m')$.

若用 $R(N)$，$R_N(NI)$分别表示 N 及 NI 中的过程状态在相同初始条件下的能达集，则显然有 $R(N)\supseteq R_N(NI)$.

定义 2.2　给定一子集 $M^\lambda\subset R(N)$，若 1) $R_N(NI)\cap M^\lambda=\varnothing$，2) 对任意 $m\notin M^\lambda, m'\notin M^\lambda$，由 $m[T_a>m'$ 在 N 中成立，有 $m[T_a>m'$ 在 NI 中也成立，则称 NI 使 N 避免 M^λ 且有最大自由度.

3　禁止状态，临界状态，关键变迁元

3.1　禁止状态

本文中考虑这样一类禁止状态 M^λ，其中 $\lambda\subset Z_l=\{1,\cdots,l\}$，$\beta_i(i\in\lambda)$表示一固定正整数，$M^\lambda=\{m|m=(m_1,\cdots m_l)^{\mathrm{T}}$ 满足：对$\forall\ i\in\lambda, m_i=\beta_i\}$.

记 $M^a=\{m|m=(m_1,\cdots,m_l)^{\mathrm{T}}$ 满足：对$\forall\ i\in\lambda, m_i\leqslant\beta_i$，且$\exists\ j\in\lambda, m_j<\beta_j\}$.

记 $M^b=\{m|m=(m_1,\cdots,m_l)^{\mathrm{T}}$ 满足：$\exists\ j\in\lambda, m_j>\beta_j\}$.

对任给的 N,M^λ，均假设初始状态 $m^0\in M^a$，$M^\lambda\subset R(N)$，$R(N)\cap M^b=\varnothing$.

3.2　临界状态，关键转移元

任给一状态 m，若存在 $T_a\in T^*$，$m[T_a>m'$，则称 m' 为 m 的一步转移状态，称 $R_1(m)=\{m'|\exists\ T_a\in T^*$ 使 $m[T_a>m'\}$为 m 的一步能达集.

定义 3.1　称状态 m^k 为临界状态，如果 $m^k\in M^a$，$R_1(m^k)\cap M^\lambda\neq\varnothing$. 所有临界状态之集称为临界状态集，记做 M^k.

$\cdot p_i, p_i^\cdot$ 分别表示位置 p_i 的前、后集[6]，令 $\cdot P_\lambda=\bigcup_{i\in\lambda}\{\cdot p_i\}, P_\lambda^\cdot=\bigcup_{i\in\lambda}\{p_i^\cdot\}, T_\lambda^1=\cdot P_\lambda-P_\lambda^\cdot, T_\lambda^2=P_\lambda^\cdot, T_\lambda^3=T-T_\lambda^1-T_\lambda^2$.

引理 3.1 对任意 $T_a\subset T_\lambda^3, m\in M^a$，若 $m[T_a>m'$，则 $m'\in M^a$.

对任意 $m^k\in M^k$，若 $m^k[T_k>m\in M^\lambda$，有：

引理 3.2 $T_k\cap T_\lambda^2=\varnothing$.

引理 3.3 设 $T_\beta=T_k\cap T_\lambda^1$，则 1) $T_\beta\neq\varnothing$. 2) $m^k[T_\beta>m'\in M^\lambda$. 3) 对 T_β 的任意真子集 $T_a(T_a\subset T_\beta$ 且 $T_a\neq T_\beta)$，有 $m^k[T_a>m''\in M^a$.

定义 3.2 $T_a\in T^*$ 为一转移元，若存在 $m^k\in M^k, m^k[T_a>m\in M^\lambda$，且对 T_a 的任意真子集 T_β 有 $m^k[T_\beta>m'\in M^a$，则称 T_a 为一关键转移元. 所有关键转移元之集，称为关键转移元集，记做 KT.

4 协调反馈控制综合

对于给定的 N 及 M^λ，我们设计一个以 N 为基网的 NI，确定一个反馈控制律 $c=f(m)$，对关键转移元中的转移进行协调控制，使 NI 中的 N 避免 M^λ 且有最大自由度.

4.1 确定 KT 与 M^k

设 N^{-1} 为 N 对应的逆网，T_λ^* 表示 T_λ^1 的幂集，$E^{-1}(M^\lambda)=\{T_k\in T^*\mid\exists\ m^\lambda\in M^\lambda$，在 N^{-1}，$m^\lambda[T_k>m\in M^a\}$.

定理 4.1
$$KT=E^{-1}(M^\lambda)\cap T_\lambda^*.$$

证 由逆网性质和引理 3.2，3.3 以及定义 3.2，此定理可证. 证毕.

对任意 $T_a\in KT$，令 $R^{-1}(T_a)=\{m\in M^a\mid\exists\ m^\lambda\in M^\lambda$ 在 N^{-1} 中使 $m^\lambda[T_a>m\}$，$R^{-1}(KT)=\bigcup_{T_a\in KT}R^{-1}(T_a)$.

定理 4.2 $M^k=R^{-1}(KT)$.

证 由引理 2.3，3.3 及定义 3.2，此定理可证. 证毕.

本节定理表明，对于给定的 N 及 M^λ，可由 N^{-1} 及 T_λ^* 确定出 KT 与 M^k.

4.2 设计目标模型 NI

对于给定的 N 及 M^λ，已知：$KT=\{T_a^1,\cdots,T_a^n\}, \mu_i=|T_a^i|, 1\leqslant i\leqslant n; M^k=\bigcup_{i=1}^n(M^k)^i, (M^k)^i=R^{-1}(T_a^i)$. 我们给出目标模型 NI 的设计方法.

1) 在 N 上增加外部输入位置 $Q=\{q_1,\cdots,q_n\}$，其中 $Gq_i=T_a^i$.

2) 确定反馈控制律 $f(m)$. 令 $f_i(m)=\mu_i-1+g_i(m)$，其中当 $m\in(M^k)^i$ 时，$g_i(m)=0$，否则 $g_i(m)\geqslant1, 1\leqslant i\leqslant n$. 控制状态 $c=(c(q_1),\cdots,c(q_n))^{\mathrm T}=f(m)=(f_1(m),\cdots,f_n(m))^{\mathrm T}$.

如上设计的 $NI=(N,Q,C,GQ,f)$ 称为 N 避免 M^λ 的目标模型.

定理 4.3 N 的目标模型 NI 满足：1) $R_N(NI)\cap M^\lambda=\varnothing$. 2) 对任意 $m\overline{\in}M^\lambda, m'\overline{\in}M^\lambda$，由 $m[T_\beta>m'$ 在 N 中成立，有 $m[T_\beta>m'$ 在 NI 中成立，即 NI 使 N 避免 M^λ 且有最大自由度.

证 1) 反证. 设 $m=R_N(NI)\cap M^\lambda$，即在 NI 中存在 $m^k\in M^k, T_k\in T^*, m^k[T_k>m\in M^\lambda$. 令 $T_j=T_k\cap T_\lambda^1$，则 $T_j\neq\varnothing, T_j\in KT, m^k[T_j>m'\in M^\lambda$ 在 NI 中成立. 设 $T_j=T_a^i$，则 $m^k\in R^{-1}(T_a^i)=(M^k)^i$. 由设计方法，$g_i(m^k)=0, f_i(m^k)=\mu_i-1=|T_j|-1$. 此时，$c(g_i)<|T_j\cap Gq_i|=|T_j|$，由规则 2.1，因 $T_\beta\overline{\in}E(c)$，$T_\beta$ 在 m^k 下不能发生，与 $m^k[T_\beta>m'$ 在 NI 中成立矛盾.

2）由 $m[T_\beta>m'$ 在 N 中成立，有 $T_\beta\in E(m)$. 若 $m\overline{\in}M^\lambda$，则 $c(q_i)=f_i(m)=\mu_i-1+g_i(m)\geqslant\mu_i$，$c(q_i)\geqslant|T_\beta\cap Gq_i|$ 对所有 $1\leqslant i\leqslant n$ 成立，$T_\beta\in E(c)$. 设 $m\in M^\lambda$；若 $m\overline{\in}(M^\lambda)^i$，同前证，$c(q_i)\geqslant|T_\beta\cap Gq_i|$，若 $m\in(M^\lambda)^i$，由 $m'\overline{\in}M^\lambda$，有 $T_\beta\cap Gq_i\neq Gq_i$，此时尽管 $g_i(m)=0$，但 $c(q_i)=\mu_i-1\geqslant|T_\beta\cap Gq_i|$，所以 $T_\beta\in E(c)$. 由规则 2.1，$m[T_\beta>m'$ 在 NI 中成立.　　证毕.

5 应用实例

图 1 表示一并行互斥制造系统[9]所对应的 Petri 网 N. 可以证明[2]，只有当 $m_3=m_{10}=1$，$m_4=m_8=2$ 时，系统出现死锁. 为避免死锁，依本文结果，设计 NI 如图 2 所示. 其中

$$c=(c(q_1),c(q_2),c(q_3))^{\mathrm{T}}=f(m)=(f_1(m),f_2(m),f_3(m))^{\mathrm{T}},$$

$$f_i(m)=\mu_i-1+g_i(m),\quad \mu_1=\mu_2=1,\quad \mu_3=2,$$

$$g_1(m)=|m_1-1|+|m_4-2|+|m_8-2|+|m_{10}-1|,$$

$$g_2(m)=|m_2-1|+|m_3-1|+|m_4-2|+|m_8-2|,$$

$$g_3(m)=|m_1-1|+|m_2-1|+|m_4-2|+|m_8-2|.$$

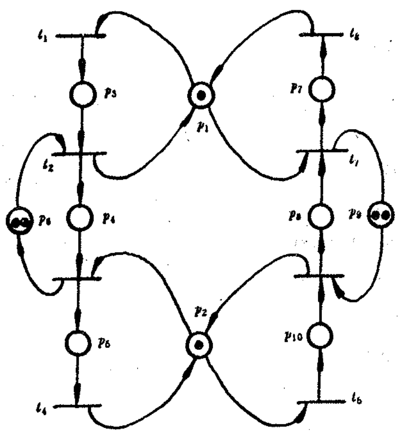

图 1　一制造系统的 Petri 网 N

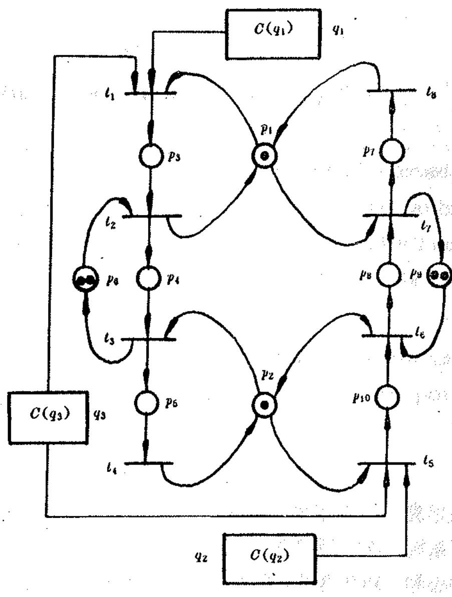

图 2　图 1 所示系统的目标模型 NI

6 结束语

在 DES 的分析与设计中，经常遇到某种禁止状态的避免问题. 本文研究以 Petri 网为模型 DES 的某种禁止状态避免问题. 对于给定的 Petri 网 N 及禁止状态 M^λ，给出了设计目标模型 NI 的方法，按此方法设计的 NI 满足：N 避免禁止状态且有最大自由度.

参 考 文 献

[1] Banaszak, Z. A. and Krogh, B. H.. Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems with Concurrently Competing Process Flows. IEEE Trans., 1990, RA-6(6):724—734

[2] Seich, W., Abel, D., Rake, H.. Analysis and Synthesis of Discrete Event Distributed Systems Using Petri Nets. Proc. of 11th IFAC World Conf., 1990, 6:267—272

[3] Holloway, L. E. and Krogh, B. H.. Synthesis of Feedback Control Logic for a Class of Controlled Petri Nets. IEEE Trans. Automat. Contr., 1990, AC-35(5):514—523

[4] 原忠虎，徐心和．多CPN相互干涉下的反馈控制综合．全国控制理论及应用年会论文集，南京，1992，281—284

[5] Peterson, J. L.. Petri Nets Theory and the Modelling of Systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentic-Hall, 1981

[6] Yang, S. L., Zhuo, J. and Gao, J.. Inverse Petri Nets: Properties and Application. Proc. of 1991 IFAC Work-Shop on DES, Shenyang, P. R. China, 1991, 91—95

[7] Ichikawa, A. and Hiraishi, K.. Analysis and Control of Discrete Event Systems Represented by Petri Nets. in Discrete Event Sysetms: Models and Applications, LNCIS, New York: Springer-Verlag, 1988, 103: 115—134

[8] Vshio, T.. Maximally Permissive Feedback and Modular Control Synthesis in Petri Nets with External Input Places. IEEE Trans. Automat. Contr., 1990, AC-35(7): 844—848

[9] Zhou, M. C. and Dicesare, F.. Parallel and Sequential Mutual Exclusions for Petri Net Modelling of Manufacturing Systems with Shared Resources. IEEE Trans., 1991, RA-7(4): 515—527

The Feedback Control Logic of Coordination in Discrete Event Systems

YUAN Zhonghu and XU Xinhe

(Department of Automatic Control, Northeastern University • Shenyang, 110006, PRC)

Abstract: In this paper, the problem of some kinds of forbidden states avoidance in discrete event systems modeled by Petri nets is discused. A method, that designs a petri net with external input places (PNIP) which is based on Petri net N and implements feedback control logic of coordination on N, is presented. The control state of PNIP decided by N's current state ensures that N avoides forbidden states and has permissive maximally freedom.

Key words: discrete event systems (DES); Petri nets; Petri net with external input places (PNIP); forbidden states; feedback control logic of coordination

本文作者简介

原忠虎 1962年生．现为沈阳工业学院自动控制系讲师，东北大学自动控制系博士生．主要研究方向为离散事件动态系统，Petri网理论与应用等．

徐心和 1940年生．现为东北大学研究生院副院长，教授，博士生导师．长期从事控制理论教学和科研工作．主要学术方向为离散事件动态系统，系统仿真与计算机控制等．