第 20 卷 第 6 期
1994 年 11 月

自 动 化 学 报
ACTA AUTOMATICA SINICA

Vol. 20, No. 6
Nov., 1994

自动制造系统异常情况 Petri 网控制器的形式化设计方法[1)]

崔亚军 王君英
(清华大学国家 CIMS 工程研究中心 北京 100084)

摘 要

CIMS, FMS 等自动制造系统的控制器一般由有序控制器和异常情况处理控制器两个部分组成. 两者都可以用 Petri 网来实现.这里讨论用于异常情况处理的 Petri 网控制器的形式化设计方法,其基本思想是利用状态表作为异常情况处理的规格说明语言,然后将状态表形式化描述为 MOORE 自动机,最后给出构造与 MOORE 自动机行为等价的 Petri 网控制器的形式化设计方法. 并且用一个实例说明其设计过程. 该方法也适用于 Petri 网的自动建模.

关键词: 自动制造系统,异常情况, Petri 网,控制器.

1 引言

CIMS (计算机集成制造系统), FMS (柔性制造系统)在发达国家, 如美国、日本等已得到迅速发展, 其中一个主要原因是由于工业自动化技术得到了飞跃性的发展. 低成本和高可靠性的可编程控制器 (PLC) 技术就是其中的主要技术之一.

PLC 不仅可以控制高度自动化设备的基本执行机构, 例如电机、气缸, 而且可以对具有多台机器的制造系统进行同步、并发、协调控制. 随着设备的自动化程度大幅度提高,除了正常的顺序控制外,对于制造系统的高效控制和安全而言, 异常情况处理及故障矫正最为重要. Gini 等人通过观察指出[1]: 在一个有机器人的环境中,处理传感器和故障的程序约占机器人任务程序的 80%, Giacobbc 也支持这一论点[2],并指出在简单的生产过程中,用于自动故障矫正的程序甚至占系统程序的 90%. 以往, PLC 的程序都是采用梯形图 (LD) 设计的,但是 LD 仅可以表示继电器开关的逻辑条件,工程技术人员很难理解其所表述的顺序过程,并且设计过程复杂,特别是用于异常情况处理的控制程序更难于设计,而且无法仿真系统的动态特性. 然而, Petri 网却非常适合于描述异常情况处理及故障矫正的动态行为和实现其控制. 但是,由于没有形式化的设计方法, Petri 网异常情况处理控制器的设计几乎都是人工试凑, 而且动态特性难以得到保证. 鉴于异常情况处理在自动制造系统的重要性, 研究异常情况处理 Petri 网控制器的形式化设计方法就显得尤为重要.

本文于 1992 年 6 月 3 日收到.
1) 国家自然科学基金资助课题.

Petri 网的形式化设计现已引起国际上的广泛注意，例如 1991 年在英国 Swansen 举行的“第五届国际控制系统计算机辅助设计会议”及 1990 年在美国 Ohio 举行的 “IEEE 机器人与自动化”国际会议上，都将 Petri 网设计及利用 Petri 网设计逻辑控制器列为重要议题之一。但据文献[3—5]报导，目前该领域还没有理论上的重大突破。

本文研究自动制造系统异常情况 Petri 网控制器的形式化设计方法，其基本思想是利用状态表作为异常情况处理的规格说明语言，然后将状态表形式化描述为 MOORE 自动机，最后给出构造与 MOORE 自动机行为等价的 Petri 网控制器的形式化设计方法。实质上，异常情况处理属于无序系统的范围。这里讨论的是全无序系统的 Petri 网控制器的形式化设计方法，即该控制器能使系统从当前任一状态转移到所指定状态。

2　状态表的 MOORE 自动机形式化表示

状态表是电气控制工程中常用的一种设计、说明控制要求的方法。下面讨论 MOORE 自动机的定义与状态表的关系及性质。

一个 MOORE 自动机可以用六元组表示，即 $M=(Q,\Sigma,\delta,\Delta,\lambda,q_0)$，其中 Q 是一个有穷的状态集；Σ 是一个有穷输入字母表；$q_0\in Q$，是初始状态；δ 是转移函数，$\delta:Q\times\Sigma\to Q$；$\Delta$ 是一个输出字母表；$\lambda:Q\to\Delta$，输出映射。

用 MOORE 自动机形式化表示状态表，一般有 $Q=\{1,2,\cdots,n\}$，n 为状态表的状态个数；$\Sigma=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$，对应于输入主令信号集合；$\Delta=\{o_1,o_2,\cdots,o_m\}$，对应于输出信号集合，$o_i\in\{0,1\}$，$i=1,2,\cdots m$。

在异常情况处理中，用于形式化表示状态表的 MOORE 自动机具有下列性质：

1）$|\Sigma|=|Q|=n$，即 Σ 与 Q 有相同的基数，$x_1,x_2,\cdots,x_n$ 由不同元件提供，一个 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 确定一个状态 $q_i(j=1,2,\cdots,n)$。

2）如果 o_i 在状态 q_j 中的逻辑值为 1，记为 $o_i\in q_j$。

如果 o_i 在状态 q_j 中的逻辑值为 0，记为 $o_i\notin q_j$。

$$i\in 1,\cdots,m,\ j\in 1,\cdots,n.$$

3）$q_i=\delta(x_i,q)$

q 为 CIMS, FMS 中任一状态，即要求能够从任一状态在主令信号 x_i 发生后，到达指定状态 q_i，$q_i\in Q$。

4）λ 可以表示为 $o_1=\lambda(1,2,5)$，它表示 o_1 在状态 1, 2, 5 中为逻辑 1.

下面，用一个实例来说明上述关系。

例. 某一 FMS 异步情况处理系统要求：

1）当行程开关 x_1 动作，则执行元件 o_1，o_2，o_3 同时得电.

2）当按钮 x_2 动作，则执行元件 o_1 失电，o_2，o_3 得电.

3）当按钮 x_3 动作，则执行元件 o_1，o_2 失电，o_3 得电.

4）当复位按钮 x_4 动作，则 o_1，o_2，o_3 全失电.

即只要 $x_1,\cdots,x_4$ 中任一信号动作，不管系统处于何种状态，都能将系统转移到相应状态，且保持至下一个主令信号出现.

上述要求，我们可以用状态表 1 表示，对应的 MOORE 自动机关系如下：

$M=(Q,\Sigma,\delta,\Delta,\lambda,q_0)$,

$Q=\{1,2,3,4\}$,

$\Sigma=\{x_1,x_2,x_3,x_4\}$,

$\Delta=\{o_1,o_2,o_3\}$,

$o_1=\lambda(1)$, $o_2=\lambda(1,2)$, $o_3=\lambda(1,2,3)$,

$1=\delta(x_1,q)$, $2=\delta(x_2,q)$, $3=\delta(x_3,q)$, $4=\delta(x_4,q)$. q 为任一状态.

状态表 1

状态序号	执行元件			输入信号			
	o_1	o_2	o_3	x_1	x_2	x_3	x_4
1	1	1	1	1 0			
2	0	1	1		1 0		
3	0	0	1			1 0	
4	0	0	0				1 0

3 Petri 网的有关概念

为了讨论自动制造系统异常情况 Petri 网控制器的形式化设计方法，先将涉及到 Petri 网有关概念给予定义:

1) Petri 网的定义

Petri 网可以用四元组来描述,即

$$PN=(P,T,F,M_0).$$

其中 P 是有限位置集合，T 是有限变迁集合，$P\cup T\neq\varphi$，$P\cap T=\varphi$；M_0 为初始标识; F 为流关系，$F\subseteq T\times P\cup P\times T$；$\varphi$ 为空集.

2) Petri 网控制器定义

将 F 划分为两部分:

$$F=F_n\cup F;$$

$$F_n\subseteq P(\Delta)\times T_\Sigma\cup T_\Sigma\times P(\Sigma).$$

其中 $P(\Delta)$ 是对应输出元件的位置集合；$P(\Sigma)$ 是对应输入主令信号的位置集合；T_Σ 是描述 Δ 与 Σ 之间的自然逻辑关系的变迁集合,在实际系统中，这种自然逻辑关系是指，Δ 为执行元件, Σ 为传感元件, Σ 反映了 Δ 的状态行为. 或者说, Σ 可以作为进一步控制 Δ 的反馈信号.

$$F_c\subseteq P(\Sigma)\times T_{\Sigma'}\cup T_{\Sigma'}\times P(\Delta).$$

这里 $T_{\Sigma'}$ 为反映 $P(\Sigma)$ 与 $P(\Delta)$ 之间的人为逻辑关系的变迁集合. 这种人为逻辑关系是指设计者所设计的 Δ 与 Σ 之间的关系，即系统动态变化规律. 所以，F_c 称之为 Petri

网控制器，或把整个 Petri 网称为控制器。

所谓 Petri 网控制器设计是指 F_c 的构造过程。Petri 网控制器可以通过 PLC 来实现对物理过程的控制[6]。

3）输入函数和输出函数

$I:T \rightarrow 2^P$ 称为输入函数。对于某一个 $t \in T$，其输入函数记为 $I(t)$，是指所有为 t 的输入位置元素的集合。

$O:T \rightarrow 2^P$ 称为输出函数。对于某一个 $t \in T$，其输出函数记为 $O(t)$，是指所有为 t 的输出位置元素的集合。

4）触发规则与状态方程

（1）t 可触发，当且仅当 $p \in I(t)$ 及 $M(p) \geqslant 1$，简记为：$M(t\rangle$。

（2）变迁 t 的触发可得到一个新的标识 M'，记为 $M(t\rangle M'$，或 $M' = M(t\rangle$，且对 $p \in P$，M' 的取值为

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) + 1, & \text{若 } p \in O(t) \text{ 且 } p \notin I(t), \\ M(p) - 1, & \text{若 } p \in I(t) \text{ 且 } \notin O(t), \\ M(p), & \text{其它.} \end{cases}$$

也可以用状态方程表示触发关系。

F 可以用关联矩阵 C 来表示:

$$C_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{若 } p_i \in I(t_j), \\ 1, & \text{若 } p_i \in O(t_j), \\ *, & \text{若 } p_i \in I(t_j) \cap O(t_j), \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

状态方程表示为 $M' = M_0 + C \cdot T$.

其中 C 为关联矩阵，T 为变迁向量，M 为初始标识，M' 为触发后的标识向量。

Petri 网的更进一步的概念见文献[7]。

4　异常情况处理 Petri 网控制器的形式化设计方法

为了建立 MOORE 自动机与 Petri 网之间的形式化关系，必须定义一些相关的概念。

4.1　定义

1）性能矩阵

性能矩阵 $D_{n\times m}$ 反映了 MOORE 自动机转移关系的本质内容。设计者一旦给出 D，根据后面的定理就可以设计出 Petri 网控制器。

$$D_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{若 } o_j \in q_i, \\ -1, & \text{若 } o_j \notin q_i, \end{cases}$$

$$i \in 1,\cdots,n,\ j \in 1,\cdots,m.$$

由于 $o_j \in q_i$ 与 $o_j \notin q_i$ 是逻辑互补关系，故 $D_{n\times m}$ 必为非零矩阵。

2）单位行扩张矩阵 $I'_{(n\times m)\times n}$

$$I'_{ij}=\begin{cases}1, & 若\ (j-1)\cdot m<i\leqslant j\cdot m,\\ 0, & 否则,\end{cases}$$

$$i\in 1,2,\cdots,n\times m,\ j\in 1,\cdots,n.$$

3) D转置列扩张阵 $D^{T_r}_{m\times(n\times m)}$

$$D^{T_r}_{ij}=\begin{cases}D^{T}_{IJ'} & 若\ i=I,(J-1)\cdot m<j\leqslant J\cdot m\ 且\ j=i+(J-1)\cdot m,\\ 0, & 否则.\end{cases}$$

$i,I\in 1,\cdots,m$. $j\in 1,2,\cdots,m\times n$. $J\in 1,2,\cdots,n$. D^T 为D的转置矩阵.

4) 单位对角方阵 I

$$I=\begin{cases}1, & 若\ i=j,\\ 0, & 否则.\end{cases}$$

5) 自环阵 $Z^-_{m_I\times(n\times m)}$, $Z^+_{m\times(n\times m)}$

$$Z^-_{ij}=\begin{cases}*, & 若\ D_{IJ}=-1\ 且\ i=I,(J-1)\cdot m<j\leqslant J\cdot m\ 且\ j=i+(J-1)\cdot m,\\ 0, & 否则,\end{cases}$$

$$Z^+_{ij}=\begin{cases}*, & 若\ D^{T}_{IJ'}=1\ 且\ i=I,\ (J-1)\cdot m<j\leqslant J\cdot m\ 且\ j=i+(J-1)\cdot m,\\ 0, & 否则.\end{cases}$$

$i,I\in 1,\cdots,m$. $j\in 1,2,\cdots,m\times n$. $J\in 1,2,\cdots,n$. D^T 为D的转置矩阵.

6) Petri 网定义的变形

为了说明 Petri 网控制器的概念，前面曾采用 Petri 网定义为 $\mathrm{PN}=(P,T,F,M_0)$. 为方便下述定理的说明,采用关联矩阵C来表示F,因而 Petri 网的定义变形为:

$$\mathrm{PN}=(P,T,C,M_0).$$

4.2 形式化设计方法

定理. 对于能从任一状态转移到指定状态的 MOORE 自动机,可以构造一个 Petri 网 $\mathrm{PN}=(P,T,C,M_0)$, 其动态行为与此 MOORE 自动机一致.

1) $P=\{P(\Sigma),\ P(\Gamma),\ P(\Delta),\ P(\Delta^-)\}$

其中, $P(\Gamma)$为$m\times n$个辅助位置元素, $P(\Delta^-)$ 为 $P(\Delta)$ 的补集,且有

$$M(P(o_i\in\Delta))+M(P(o_i^-\in\Delta^-))=1,\ i=\in 1,2,\cdots,m.$$

2) $T=\{T',T\}$, $T'=\{t'_1,t'_2,\cdots,t'_n\}$, $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_{n\times m}\}$, $|T|=m\cdot n+n$.

$$C=\begin{bmatrix}-I_{n\times n} & 0_{n\times(n\times m)} & 0_{n(n\times m)}\\ I'_{(m\times n)\times n} & -I_{(m\times n)\times(n\times m)} & 0_{(m\times n)\times(n\times m)}\\ 0_{m\times n} & D^{T_r}_{m\times(n\times m)} & Z^+_{m\times(n\times m)}\\ 0_{m\times n} & -D^{T_r}_{m\times(n\times m)} & Z^-_{m\times(n\times m)}\end{bmatrix}.$$

C为 $[n+m(n+2)]\times[n(2\cdot m+1)]$ 维矩阵. $0_{n\times(n\times m)}$, $0_{m\times n}$ 表示元素为0的矩阵.

3) M_0为任意标识,但要满足:

$$M(P(\Delta_i))+M(P(\Delta_i^-))=1.$$

4) 证明

从构成的C阵来看,根据 $-I_{n\times n}$ 及 $0_{n\times(n\times m)}$, $P(\Sigma)$ 中的每个位置元素当且仅当分别为转移 $t'_i(i=1,2,\cdots,n)$ 的输入位置元素;又根据 $-I_{n\times n}$ 及 $I'_{(m\times n)\times n}$ 阵,$t'_i(i=1,2,$

$\cdots,n$) 分别有 m 个辅助输出位置元素；再根据 $-I_{(m\times n)\times(n\times m)}$ 的性质(对角阵)，$n\times m$ 个辅助输出位置元素又分别为 $t_i(i=1,2,\cdots,n\times m)$ 的 $n\times m$ 个辅助输入位置元素。也就是说，一旦 $P(\Sigma)$ 中任一元素中有一个 token，$t_i'(i\in 1,2,\cdots,n)$ 触发后，导致 m 个位置元素中都有一个 token。再之，根据 $D^T_{m\times(n\times m)}$ 及 $-D^T_{m\times(n\times m)}$，每个 $t_i(i=1,2,\cdots,n\times m)$ 对应两个位置元素 O_i 及 O_i^-。由 D 阵的性质及相应的 C 阵，可以看出，如果在 $p(x_i)$ 建立的状态中，要求 O_i 为 0，那么则 O_i 为输入位置元素，O_i^- 为输出位置元素；反之，要求 O_i 为 1，那么则 O_i 为输出位置元素，O_i^- 为输入位置元素。一旦要建立相应的状态，其相应的 m 个辅助位置元素便具有一个 token。如果 O_i 原来为 1，而 x_i 动作要求 O_i 也为 1，那么在 O_i^- 中缺乏 token，相应的转移便不能触发，故可保持 O_i 为1。反之，如果 O_i 原来为 0，而 x_i 动作建立的状态要求 O_i 为 1，则 O_i^- 及辅助位置元素都有 token，故可以触发，使之 O_i 为 1，O_i^- 为零。$P(\Gamma)$ 中没有触发的位置元素中的 token，由 Z^+、Z^- 构成的自环负责消耗完，为下次状态转移作好准备。因此不论原 O_i 为任何状态，都可以根据 D 的要求建立与 X_i 相对应的状态。故该 Petri 网与 MOORE 自动机的行为一致。

证毕。

下面，用上例来设计其相应的 Petri 网。

状态表 1 中，$m=3$，$n=4$。

$$I_{4\times4}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix},\quad D_{4\times3}=\begin{bmatrix}1&1&1\\-1&1&1\\-1&-1&1\\-1&-1&-1\end{bmatrix},$$

$$I'_{(3\times4)\times4}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\1&0&0&0\\1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&1&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&1&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\\0&0&0&1\\0&0&0&1\end{bmatrix},$$

$$D^T_{3\times(3\times4)}=\begin{bmatrix}1&0&0&-1&0&0&-1&0&0&-1&0&0\\0&1&0&0&1&0&0&-1&0&0&-1&0\\0&0&1&0&0&1&0&0&1&0&0&-1\end{bmatrix},$$

$$Z^+_{3\times(3\times4)}=\begin{bmatrix}*,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0\\0,&*,&0,&0,&*,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0\\0,&0,&*,&0,&0,&*,&0,&0,&*,&0,&0,&0\end{bmatrix},$$

$$Z^-_{3\times(3\times4)}=\begin{bmatrix}0,&0,&0,&*,&0,&0,&*,&0,&0,&*,&0,&0\\0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&*,&0,&0,&*,&0\\0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&0,&*\end{bmatrix}.$$

由上面的矩阵可构成 Petri 网的总阵，如图 1 所示。

可以用 PLC 实现 Petri 网控制器，其基本方法是将 $P(\Gamma)$ 及 $P(\Delta)$ 用辅助继电器表示，根据 C 构造逻辑方程，然后用 PLC 程序实现[6]。其主要物理限制在于 PLC 的 I/O 点数与内部辅助继电器的个数。I/O 点限制 $P(\Sigma)$ 及 $P(\Delta)$ 的个数，内部辅助继电器的个数限制 $P(\Gamma)$ 的个数。

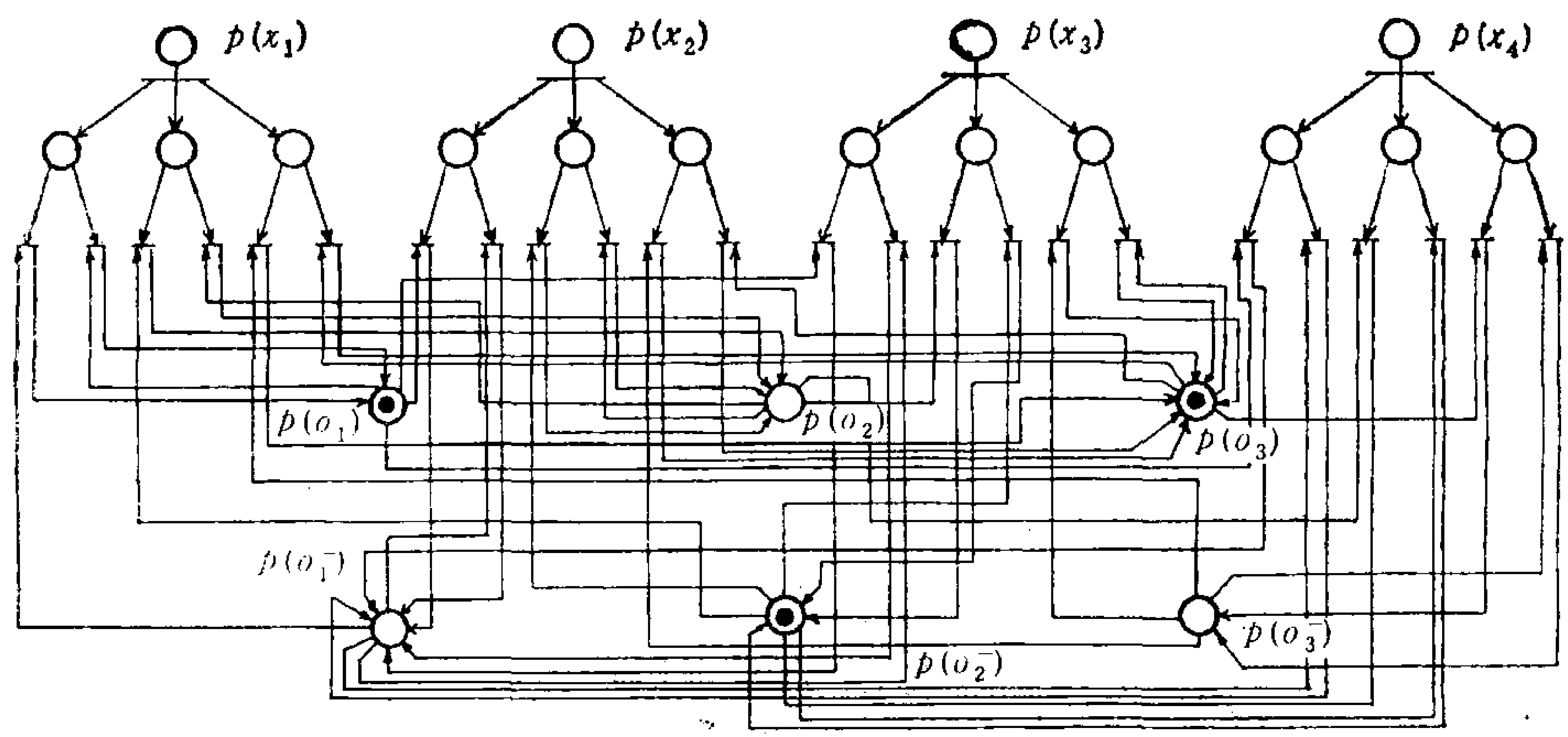


图 1

5 结束语

本文研究了 CIMS, FMS 中用于异常情况处理的全无序 Petri 网控制器的形式化设计方法，用该方法设计的控制器能使系统从目前任一状态转移到所指定状态. 进一步研究的方向是局域无序系统的 Petri 网控制器的形式化设计. 这种方法与 OCCAM 并行处理语言相结合,可用于可编程控制器程序自动设计.

参 考 文 献

[1] Gini, Maria, Richard S. Reliable realtime robot operation employing intelligent forward recovcry. Tcchnical Report of the Computcr Science Dcpartment of the University of Minncsota, Mincapolis, MNTR 85-30(1985).

[2] Giacobbe A. Diskette labeling and packaging system features sophisticated robot handling. *Robotics Today*, 1984(6): 73—75.

[3] Masaki Hasegawa, Masayuki Takata, Takashi Temmyo, Hideo Matsuka. Modelling of exception handling in manufacturing Cell control and its application to PLC programming. Proc. of IEEE Int. conf. ON Robotics and Automation, 1990 514—519.

[4] Z Banazak. Perspectives of automatic real-time program synthesis. Preprints of the 14th IFAC IFID Workshop on Real-Time Programming, Hungary: 1986,19—26.

[5] 王秀峰. 智能控制系统与软件. 国际学术动态,1991,(6): 34—35.

[6] 崔亚军,吴凤高. 柔性制造系统控制程序自动生成的 Petri 网方法. 国际机电一体化学术会议论文集,北京: 1991,400—405.

[7] Peterson JL. Petri net theory and the modelling of systems. Prentice-Hall, NJ;1981.

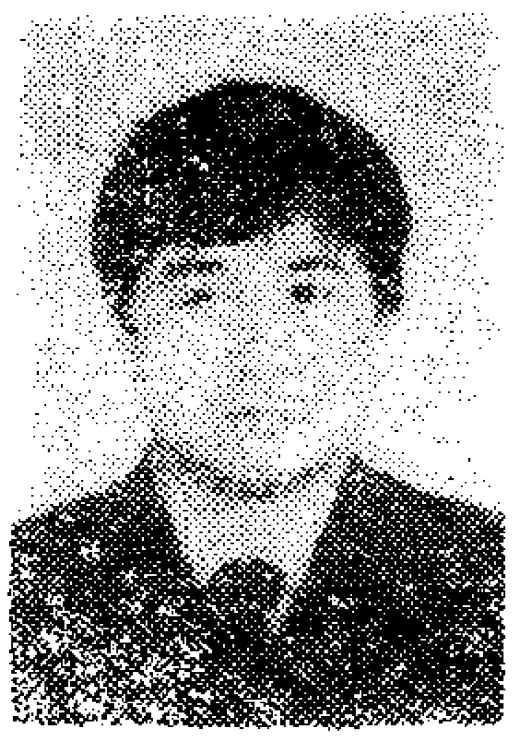
A FORMAL DESIGN METHOD OF PETRI NET CONTROLLER FOR EXCEPTION HANDLING IN AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEM

Cui Yajun　Wang Junying
(CIMS/ERC, Tsinghua University, Beijing 100084 P. R. China)

ABSTRACT

Controllers in CIMS, FMS, etc. are divided into two classes: sequential controllers and exception handling controllers. Both can be realized by the Petri net. A formal design method of Petri net controller for exception handling is dealt with in this paper. The basic idea is as follow. The state table is used as the specification of exception handling at first, then the state table is described as a MOORE automation and finally, the formal design method for the Petri net controller equated with the MOORE automation is constructed. An example is given to illustrate the design procedure for this method. This method is also suitable for automated generation of Petri nets.

Key words: Automated manufacturing system, exception handling, Petri net, controllers.



崔亚军　1962 年出生，1984 年获无线电设备结构设计专业学士学位，1987 年获伺服系统硕士学位，并留校任教. 1993 年获机电控制及其自动化博士学位. 现在清华大学国家 CIMS 工程技术研究中心做博士后. 主要研究领域和兴趣：伺服系统、测角系统、Petri 网、可编程控制器、计算机控制和数控技术.

王君英　1960 年出生，1984 年获无线电设备结构设计专业学士学位，1989 年获机电一体化专业硕士学位. 研究领域：系统工程，CIMS，机电一体化.