第 12 卷第 6 期　　控制理论与应用　　Vol. 12, No. 6
1995 年 12 月　　CONTROL THEORY AND APPLICATIONS　　Dec., 1995

基于结构无竞争 Petri 网的 DEDS 的状态可达性可控性及其控制

赵正义　宋文忠
(东南大学自动化研究所·南京,210096)

摘要:本文给出了依靠代数递推计算判断结构无竞争 Petri 网的状态可达性的一种方法;提出了动态子网的概念,提高了判断速度;研究了结构无竞争 Petri 网的可达状态控制问题,给出了控制序列的设计方法.

关键词:DEDS; Petri 网; 状态可达性; 状态可控性

1 引　言

状态可达性是网论中的一个长期研究的课题. Murata, T.[1]在 1977 年借用电路理论的方法对可达性问题作了研究,但其结果只适用于标识图. Ichikawa, A.[2]等于 1985 年在单弧(single arc)无竞争 Petri 网上就这一问题作了继续研究,并进一步提出了对可达状态的控制问题. 所谓单弧 Petri 网是指所有弧上的权均为 1 的 Petri 网. 与此对应,存在大于 1 的权函数的 Petri 网称为多弧 Petri 网. 单弧 Petri 网与多弧 Petri 网尽管形式上很相像,但在内容上却有很大区别. 文[2]对单弧结构无竞争 Petri 网的研究结果在多弧 Petri 网上不再成立,这是因为多弧 Petri 网在改造成与自己行为等价的单弧 Petri 网时已不再是结构无竞争网. 本文不再区分是单弧还是多弧 Petri 网,本文的结果可适用于任意一种结构无竞争 Petri 网.

2 结构无竞争 Petri 网的状态可达性

设一个容量函数为无穷的结构无竞争 Petri 网为 $\Sigma(P,T,E,W,M^0)$,其矩阵向量表示为:$A_\Sigma=(A_{tp},A_{pt},X^0)$[4,5].

定义 1　如果存在一个可发生的变迁多重集[5,6]序列 $\eta(0),\eta(1),\eta(2),\cdots,\eta(N)$ 使 Σ 由状态 M^0 转移到状态 M^t,则称 M^t 是从 M^0 可达的.

设 $\eta(0),\eta(1),\eta(2),\cdots,\eta(N)$ 为系统 Σ 在状态 M^0 下所发生的变迁多重集序列,这一变迁多重集序列的发生使 Σ 由状态 M^0 转移到了状态 M^t. 令

$$z=\sum_{k=0}^{N}\eta(k) \tag{1}$$

称 z 为变迁计数向量. 其元数 $z(i)$ 表示相应的变迁 t_i 在这一变化过程中总共发射的次数. 若用 A 表示 $A_{pt}-A_{tp}^{\mathrm{T}}$, ∇X 表示 X^t-X^0(X^t 与 X^0 分别为与 M^t, M^0 对应的向量),则 z 满足下述方程:

$$\nabla X=Az. \tag{2}$$

本文于 1993 年 9 月 28 日收到. 1995 年 1 月 25 日收到修改稿.

反之,若满足方程(2)的非负整数向量 z 可表示成(1)且 $\eta(k), k=0,1,2,\cdots,N$. 递推地满足不等式 $X(k) \geqslant A_{tp}^{\mathrm{T}}\eta(k)$ 和方程 $X(k+1)=X(k)+A\eta(k)$,(其中 $X(0)=X^0$),则称 z 为从 M^0 可发生的变迁计数向量.

方程(2)的非负整数解可表示成:

$$z_a = S_a + \sum_i k_i h_i, \quad a = 1,2\cdots. \tag{3}$$

其中 S_a 为方程(2)的最小非负整数解,k_i 为任意正整数,h_i 为齐次方程 $Az=0$ 的非负整数解.

可达性问题的关键是检验方程(2)的整数解 z_a 是否可以发生. 下面的定义实际上是用代数递推计算来检验 z 是否可以发生的一种方法.

定义 2　函数 $f_{x^0}(z)$ 的值为下述迭代过程 Test 的输出 f_{x^0}:

Test:

1) $X = X^0$;

2) $u = A_{tp} \triangle X \oplus z, \quad X = X + Au, \quad z = z - u$;

3) 如果 $u=0$ 或 $z=0$,则输出 $f_{x^0}=z$; 否则,转 2).

定义中的符号"△"和"⊕"的意义可参见文[4][5]或[7]. 可以证明 Test 可在有限步内结束,因此函数 $f_{x^0}(z)$ 的定义是合理的.

定理 1　状态 M^t 是从 M^0 可达的,当且仅当方程(2)存在一个最小非负整数解 S,S 满足 $f_{x^0}(S)=0$.

限于篇幅,证明从略.

上述迭代过程 Test 解决了变迁计数向量 z 的可发生性的检验问题. 为了进一步提高 Test 的检验速度,下一定理将指出 Test 可在某个真子网上进行. 为此,先给出如下定义.

定义 3　由计数变迁向量 z 决定的子 Petri 网为:$(P,T,E,W,M^0)_z \triangleq (P_z,T_z,E_z,W_z,M_z^0)$,其中 $T_z=\{t_i \mid \text{for } i: t_i \in T \wedge z_i > 0\}$,$z_i$ 表示 z 的第 i 个分量,$P_z=\{p_i \mid p_i \in P, \text{such that}, \nexists j \in \{1,2,\cdots,|T|\}, t_j \in p_i^{\cdot} \wedge z_j = 0\}$;$E_z \subseteq T_z \times P_z \cup P_z \times T_z$,$W_z=\{W(f): f \in E_z\}$,$M_z^0=\{M^0(p_i): p_i \in P_z\}$. 简称这样的网为 z 子网.

若原网的矩阵向量表示为 $(A_{tp},A_{pt},X(0))$,设 $z=Q[z^{*\mathrm{T}},0]^{\mathrm{T}}$,其中 z^* 表示 z 中非零元组成的子向量,Q 为换位矩阵,令 $QA_{tp}=[A_{t^1p}^{\mathrm{T}} \mid A_{t^2p}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$,设 $A_{t^1p}^{\mathrm{T}}=[\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_{|t'|}]$,$A_{t^2p}^{\mathrm{T}}=[\alpha_{|t'|-1},\alpha_{|t'|+2},\cdots,\alpha_{|T|}]$,取 $\alpha=\sum_{i=1}^{|t'|}\alpha_i$,(若 $|t'|>|T|/2$,可取 $\beta=\sum_{i=|t'|+1}^{|T|}\alpha_i$);令 $\alpha^{\mathrm{T}}=[*,0]Q'$,(或 $\beta^{\mathrm{T}}=[0,*]Q'$);其中 Q' 为另一个换位矩阵,$*$ 为非零元组成的子向量. 由于 A_{tp} 的每列最多只有一个非零元,因此不难证明:

$$QA_{tp}Q' = \left[\begin{array}{c:c} A_{t^1p^1} & 0 \\ \hdashline 0 & A_{t^2p^2} \end{array}\right].$$

设

$$Q'A_{pt}Q = \left[\begin{array}{c:c} A_{p^1t^1} & A_{p^1t^2} \\ \hdashline A_{p^2t^1} & A_{p^2t^2} \end{array}\right], \quad Q'X(0) = \left[\begin{array}{c} X_{p^1}(0) \\ \hdashline X_{p^2}(0) \end{array}\right].$$

则 z 子网的矩阵向量表示为:$(A_{t^1p^1},A_{p^1t^1},X_{p^1}(0))$.

定理 2　向量 z 在原网上从 M^0 可发生的充要条件是 z^* 在 z 子网上从 M_z^0 可发生.

限于篇幅,证明从略.

有了定理 2,Test 可在 z 子网上进行. 不仅如此,Test 的每一步迭代均可在 z_k 子网上进行. 由于 z_k 是不断减小的,因此 z_k 子网也是不断减小的动态子网. 下面就给出这样的检验程序 Test*:

Test*:

1) $N = |T|, X = X^0$;

2) $\alpha = [0], N' = N$, For $i = 1$ to N', do:

2.1) 若 $z(i) = 0$, 则 $\alpha = \alpha + A_{tp}(i)$; 删除 z 的第 i 个元素; 删除 A_{tp}, A 的第 i 行; $N = N - 1$;

3) 删除 A_{tp}, A, X 中与 $\alpha(j) = 1$ 对应的第 j 列或第 j 个元素;

4) $u = A_{tp} \triangle X \oplus z, \quad X = X + Au, \quad z = z - u$;

5) 如果 $u = 0$ 或 $z = 0$, 则输出 $f_{X^0} = z$, 停止; 否则, 转 2).

注　算法中 $z(i), A_{tp}(i)$ 分别表示 z 的第 i 个元素和 A_{tp} 的第 i 行.

3　结构无竞争 Petri 网的状态控制

设一个带输入控制 V 的无竞争 Petri 网为 $\Sigma = (P, T, E, W, M^0, V)$, $T = T_c \dot{\cup} T_u$, T_c 和 T_u 分别为受控和不受控变迁集, V 为对系统的输入控制: $V: \{M\} \to \{0,1,2,\cdots\}^{T_c}$, $\{M\}$ 为 Σ 的可能的状态集. 所谓输入控制是指:假设在每个受控变迁 $t_i \in T_c$ 上增加一个输入库所 q_i, 弧 (q_i, t_i) 上的权为 1. 在状态 M 将 $V(M)(t_i)$ 个托肯放入 q_i 中. 如果认为每个 $t_j \in T_u$ 上也有一个输入库所 q_j, 但在任意状态 M, q_j 中的托肯数均为 $V(M)(t_j) = \omega$, (ω 是一个很大的正整数, 可相当于 $+\infty$), 则 V 便成为: $V: \{M\} \to \{0,1,2,\cdots\}^T$.

定义 4　给定状态 M^t, 如果存在一个控制 V, 使系统由初始状态 M^0 到达并保持在 M^t, 则称该系统对状态 M^t 可控.

定理 3　在 Σ 中, 给定状态 M^t. 假定 $T_t \subset T$ 为 Σ 在 M^t 下可发生的变迁集. 则系统对 M^t 是可控的, 当且仅当存在一个控制 V 使 M^t 是从 M^0 可达的且 $T_t \subseteq T_c$.

限于篇幅, 证明可参见[5].

由定理 3 可得控制序列的设计步骤如下:

1) 计算 $\eta = A_{tp} \nabla X^t$, 令 $T_t = \{t_i | i \in \{1,2,\cdots,|T|\}, \eta(i) > 0\}$, 如果 $T_t \nsubseteq T_c$, 则 M^t 不可控, 否则:

2) 解方程 $\nabla X = X^t - X^0 = Az$; 如果该方程无最小非负整数解, 则 M^t 不可控, 否则设最小非负整数解 $S_a = \{S_1, S_1, \cdots\}$;

3) 用 Test* 检查是否存在 $S \in S_a$ 满足 $f_{X^0}(S) = 0$; 如果不存在这样的 S, 则 M^t 不可控;

4) 令 $V(M^0)$ 的第 i 个分量为

$$V(M^0)(i) = \begin{cases} S(i) & \text{当 } \eta(i) > 0 \text{ 且 } t_i \in T_c; \\ \omega, & \text{其它}. \end{cases}$$

令

$$V(M) = [0], \quad \text{当 } M \neq M^0.$$

4 例 子

如图1所示的Petri网为结构无竞争Petri网，$T_c = T, T_u = \varphi$，图上未标出的权均为1.

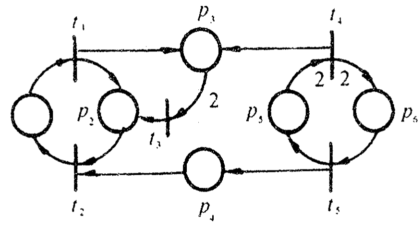

图1 一个DEDS的Petri网结构

问题1 当初态为$M^0 = (0\ 1\ 0\ 0\ 2\ 0)$时，$M^t = (1\ 1\ 3\ 0\ 1\ 1)$是否可控？

因方程(2)无最小非负整数解，故M^t不可控.

问题2 当系统初态为$M^0 = (0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0)$时，$M^t = (1\ 1\ 3\ 0\ 1\ 0)$是否可控？

方程(2)有唯一最小非负整数解$S = (3\ 4\ 1\ 2\ 4)$，但用Test* 检验后知$f_{X^0}(S) \neq 0$，故M^t也不可控.

问题3 当系统初态为$M^0 = (0\ 1\ 1\ 2\ 2\ 0)$时，$M^t = (1\ 1\ 2\ 0\ 1\ 1)$是否可控？

方程(2)有一最小非负整数解$S = (2\ 3\ 1\ 1\ 1)$，且经Test* 检验后知$f_{X^0}(S) = 0$，故系统在初态M^0下对M^t可控. 控制序列为：$V(M^0) = (2\ \omega\ 1\ \omega\ 1)$，$V(M|_{M \neq M^0}) = [0]$.

5 结束语

可达性问题对Petri网来说是最重要的问题之一[3]. 本文仅为无竞争Petri网的状态可达性问题提供了一种解法. 对一般Petri的状态可达性问题目前还没有较好的答案. 可控性问题是随着DEDS控制理论的发展而提出来的. 本文对单个状态的控制可进一步发展为对整条状态序列的控制.

参 考 文 献

[1] Murata, T.. Circuit Theoretic Analysis and Synthesis of Marked Graphs, IEEE Trans. On Circuit and Systems, 1977, CAS24-7, 400—405

[2] Ichikawa, A. et al.. Reachability and Control of Discrete Event Systems Represented by Conflict-free Petri Nets. Proc. of ISCAS 85, 1985, 487—488

[3] Peterson, J. L.. Petri Net Theory and the Modeling of Systems. NJ: Prentice-Hall, 1981

[4] 赵正义，宋文忠. DEDS的代数模型. 控制理论及其应用年会论文集，1993

[5] 赵正义. 代数Petri网DEDS控制理论的研究. 东南大学博士学位论文，1994

[6] 袁崇义. Petri网理论. 南京：东南大学出版社，1989

[7] 赵正义，宋文忠. 离散事件动态系统的代数模型及其控制器的分析计算. 控制理论与应用，1994，11(2)：187—191

[8] Landweber, L. H.. Properties of Conflict-free and Persistent Petri Nets, J. ACM., 1978, 25(3): 352—364

State Reachability, Controllability and the control of DEDS Represented by No-Competing Petri Nets

ZHAO Zhengyi and SONG Wenzhong

(Institute of Automation, Southeast University · Nanjing, 210096, PRC)

Abstract: A deterministic way which depends on algebraic recursive computations is developed to judge the state reachability for no-competing Petri Nets. The idea of dynamic subnets is proposed to make the judgement faster. The problem of state control is studied and a program to design the control is given.

Key words: DEDS; Petri net; state reachability; state controllability

本文作者简介

赵正义 1962 年生,分别于 1983,1989 年和 1994 年获东南大学学士、项士和博士学位,于 1983 年至 1986 年和 1989 年至 1991 年分别在国家建材局秦皇岛玻璃设计院和镇江船舶学院工作,现在东南大学做博士后研究.目前的主要研究方向为离散事件动态系统和智能制造系统的组合优化.

宋文忠 1936 年生,1960 年毕业于南京工学院动力工程系,现任东南大学自动化研究所教授、博士生导师,从事生产过程自动化及计算机集成制造系统的研究.

1996 年中国智能自动化学术会议(CIAC'96)
征文通知

1996 年中国智能自动化学术会议(CIAC'96)定于 1996 年 8 月 26 日至 29 日在呼和浩特市举行.大会由中国自动化学会智能自动化专业委员会、中国人工智能学会计算机视觉及智能控制学会、IEEE 控制系统学会北京分会、中国系统工程学会模糊数学与模糊系统委员会、内蒙古电力学院主办,有关事宜如下:

征文范围

·智能自动化系统理论、方法和技术 ·神经网络控制 ·模糊控制 ·基于规则的控制 ·分层递阶智能控制 ·学习控制 ·自适应控制 ·变结构控制 ·机器人规划与控制 ·智能管理与智能决策 ·智能信息处理 ·遗传算法 ·智能设计 ·智能建模与仿真 ·智能制造 ·智能故障诊断 ·智能通讯与网络 ·智能人机界面及多媒体技术 ·虚拟现实技术 ·智能自动化仪表及传感器 ·智能自动化装置与执行机构 ·智能自动化在电力、冶金、化工、航空及航天部门的应用 ·大系统及智能自动化 ·其它有关问题

论文要求

·在国内外杂志或会议上未发表过.

·篇幅一般不超过 A4 纸 6 页,论文后面请附不超过 200 字的主要作者简介.

本次会议将评选出 1—2 篇优秀论文,除颁发获奖证书外,每篇获奖论文奖励人民币 1000 元.

为方便论文作者赴会,会议期间将在北京设立中转站.

关键日期

·1996 年 4 月 30 日之前投送符合清稿要求的全文两份(不论录用与否,恕不退还).

·1996 年 5 月 30 日之前发出录用通知.

注

·欲投稿者,请向联系人索要清稿规格与要求.

·1995 年中国智能自动化学术会议的论文集尚有少量剩余,欲购者请与联系人联系.

联系人:钱宗华

通信地址:北京清华大学计算机系 100084

电　话:2594895(O)　2561144—2266(O)　2594458(H)

传真:2562463