

有界 Petri 网的最小化化简

张继军^{1,2} 吴哲辉²

(山东农业大学信息学院 泰安 271018)¹ (山东科技大学信息学院 青岛 266510)²

摘要 给出了 Petri 网的语言等价性概念和有界 Petri 网的最小化概念;证明了有限状态自动机、有界 Petri 网、正规文法的等价性,给出了它们之间等价转换的算法;分析了有界 Petri 网的化简过程,并给出了有界 Petri 网最小化化简的算法,为有界 Petri 网的自动化化简提供了方法。

关键词 Petri 网,语言等价,最小化,化简

Minimization of Bounded Petri Net Simplification

ZHANG Ji-Jun^{1,2} WU Zhe-Hui²

(College of Information, Shandong Agriculture University, Taian 271018)¹

(College of Information, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510)²

Abstract The concepts of language equivalence of Petri net and of minimization of bounded Petri net are presented. The equivalences of bounded Petri net, finite automaton and regular grammar is proofed, the algorithms of equivalence transition are given. The process of bounded Petri net simplification is discussed, the algorithm of simplification of bounded Petri net is given. A basic method to automated simplify the bounded Petri net is provided.

Keywords Petri net, Language equivalence, Minimization, Simplification

1 引言

Petri 网作为系统模拟与分析的工具已在众多的领域得到应用,为了有效的对系统进行建模和分析,在保持网的某些性质不变的情况下,对网进行化简、合成、分解等运算的研究是目前研究的重要课题。文[1]从 Petri 网语言方面对合成运算的封闭性进行了讨论,文[2]提出了 Petri 网并操作,讨论了并操作后,网的可重复性、相容性、有界性、守恒性,公平性保持的条件,文[3]定义了 P/T 网加法、笛积和叠加运算,并讨论了它们对系统结构性质的保持条件,文[4]引入 Petri 网的同步合成和共享合成操作,提出动态不变性概念,揭示了系统综合过程中,保持行为和状态不变性的有关条件,文[5]对 Petri 网运算进行了综述,定义并给出了 Petri 网有关操作的形式定义和操作的有关性质,特别是就保持网系统的活性和有界性不变的化简,并给出了化简方案;对 Petri 网的某些子类,例如,标识 T-图、标识加权 T-图、标识自由选择网的保持性化简进行了讨论和研究^[6~8]。这些工作为系统的建模、分析提供了很好的途径,具有一定的作用和应用;但是对 Petri 网在语言等价的情况下,对 Petri 网进行操作的研究至今尚未见到,本文,从 Petri 网语言的等价性,在保持语言不变的情况下,对 Petri 网进行等价转换,实现了 Petri 网的简化化简。

可达标识图、可达树分析方法是 Petri 网的重要分析手段^[5,9],一个有界 Petri 网的可达图与相应的有限自动机的状态转换图同构^[10],也就是说,对有界 Petri 网的某些问题的研究,可以转化为相应的有限自动机的问题进行研究。有限状态自动机是正规语言的识别系统,同时,有限自动机可以进行确定化及最小化化简^[11],降低有限自动机的复杂性,利用最简的确定有限自动机,可以更简单、容易分析对应的正规语言的性质。借助于这一思想,可以对有界 Petri 网进行最小化化

简,降低 Petri 网的复杂程度。

本文首先给出了 Petri 网的有关概念和结论,定义了 Petri 网语言的等价性,在此基础上,讨论了有界 Petri 网、正规文法、有限状态自动机的等价性,并给出了它们之间等价转换的构造算法,然后,讨论研究了有界 Petri 网的化简过程,给出了有界 Petri 网最小化化简的算法,最后给出了有界 Petri 网化简的应用实例。

2 Petri 网的基本概念和有关结论

这里对本文所涉及到的有关 Petri 网的基本概念、术语、记号和已有结论做一简述,以便于后面的讨论,其它的有关内容,可参考文[1,5,9]。

设 $\Sigma=(S, T; F, M_0)$ 为一个 Petri 网, Γ 是一个字母表,映射 $\varphi: T \rightarrow \Gamma \cup \{\epsilon\}$ 为变迁 T 的一个标注函数(ϵ 表示空串),满足:

$$\forall x, y \in T^* : \varphi(xy) = \varphi(x)\varphi(y), FM \subseteq R(M_0)$$

我们称:

$$L = \{\varphi(\sigma) \in \Gamma^* \mid \sigma \in T^*, \exists M \in FM; M_0[\sigma > M]\}$$

为 Σ (在标注函数 φ 下) 确定的一个 Petri 网语言,记为 $L(\Sigma, \varphi)$ 。

对于 $\forall s \in S$, 若存在正整数 B , 使得 $\forall M \in R(M_0) : M(s) \leq B$, 则称库所 s 是有界的, 如果对每个 $s \in S$ 都是有界的, 则称 Petri Σ 是有界的。

文[1]指出,任何一个 Petri 网语言都可以由一个标准的 Petri 网产生。

一个带标注的标准 Petri 网^[12] 是一个六元组 $\Sigma=(S, T; F, i, o, \Gamma, \varphi)$, 它满足条件:

- 1) $N=(S, T; F)$ 是一个网系统;
- 2) $i, o \in S; i = \emptyset, o' = \emptyset$;
- 3) Σ 的初始标识 M_i 为:

$$M_i(s) = \begin{cases} 1 & \text{当 } s=i \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

4) $\forall x \in S \cup T; (i, x) \in F^* \wedge (x, o) \in F^*$ 其中 F^* 表示 Σ 的流关系 F 的自反传递闭包。

5) $\varphi: T \rightarrow \Gamma \cup \{\epsilon\}$ 是一个标注函数, Γ 是字母表, 假定 $\epsilon \notin \Gamma$ 。

由带标注的标准 Petri 网 Σ (在标注函数 φ 下) 确定的语言 L 是指:

$$L = L(\Sigma, \varphi) = \{\varphi(\sigma) \mid \sigma \in T^*, M_i[\sigma > M_f]\}$$

其中 M_f 是 Σ 的终止标识, 它满足

$$M_f(s) = \begin{cases} 1 & \text{当 } s=0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

为简便起见, 在本文的讨论中, 以标准 Petri 网作为基本模型进行研究, 但正如文[1]所指出, 所得到的结论适用于一般的 Petri 网。

3 Petri 网的语言等价性

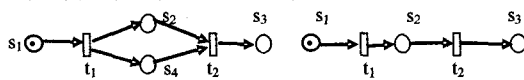
定义 1 (Petri 网的语言等价性) 两个带标注的标准 Petri 网:

$$\Sigma_1 = (S_1, T_1; F_1, i_1, o_1, \Gamma_1, \varphi_1)$$

$$\Sigma_2 = (S_2, T_2; F_2, i_2, o_2, \Gamma_2, \varphi_2)$$

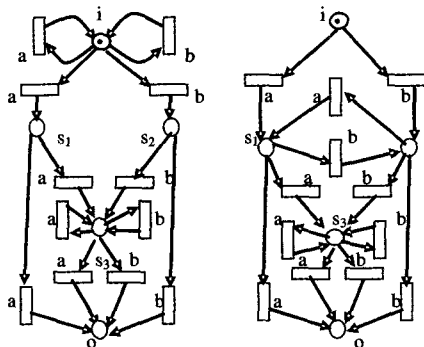
称为语言等价的, 当且仅当: $L(\Sigma_1, \varphi_1) = L(\Sigma_2, \varphi_2)$ 。

图 1 所示的两个 Petri 网 Σ_1 和 Σ_2 , 虽然结构不同, 但在语言上是等价的, 所产生的语言都为: $t_1 t_2$ 。



(a) Petri 网 Σ_1 (b) Petri 网 Σ_2

图 1 语言等价的两个 Petri 网



(A) Petri 网 Σ_3 (B) Petri 网 Σ_4

图 2 语言等价的两个 Petri 网 Σ_3 和 Σ_4

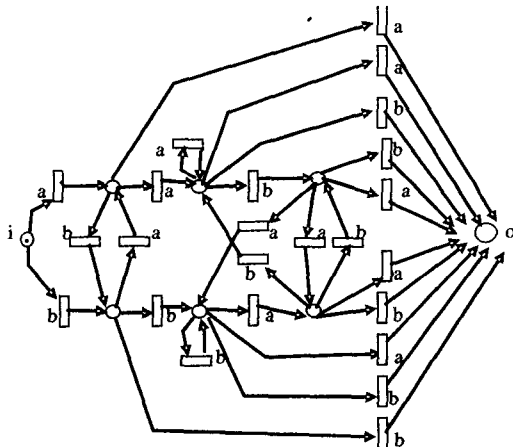


图 3 与图 2 语言等价的 Petri 网 Σ_5

图 2 所示的是较复杂的两个 Petri 网 Σ_3 和 Σ_4 , 所产生的语言都为: $(a+b)^* (aa+bb)(a+b)^*$, 语言是等价的。

图 3 所示 (图中库所没有标记) 是一个更复杂的 Petri 网 Σ_5 , 但所产生的语言与图 2 所示的两 Petri 网是等价的。

4 有界 Petri 网、正规语法、有限自动机的等价性

定义 2^[1] 一个有限自动机是一个五元组 $M = (Q, \Gamma, \delta, q_0, F)$, 其中这里 Q, Γ 和 F 都是有限集合, 并且: ① Q 是状态集合; ② Γ 是输入字母表; ③ 是栈字母表; ④ $\delta: Q \times \Gamma \rightarrow Q$ 是转移函数; ⑤ $q_0 \in Q$ 是起始状态; ⑥ $F \subseteq Q$ 是接受状态集。

定义 3^[5] 设 $\Sigma = (S, T; F, i, o, \Gamma, \varphi)$ 为一个带标注的有界标准 Petri 网, Σ 的可达标识图是一个三元组 $RG(\Sigma) = (R(M_i), E, P)$, 其中:

$$E = \{(M_i, M_j) \mid M_i, M_j \in R(M_i), \exists t_k \in T: M_i[t_k > M_j]\}$$

$$P: E \rightarrow T, P(M_i, M_j) = t_k, \text{ 当且仅当 } M_i[t_k > M_j]$$

称 $R(M_i)$ 为 $RG(\Sigma)$ 的顶点集, E 为 $RG(\Sigma)$ 的弧集, 若 $P(M_i, M_j) = t_k$, 则称 t_k 为弧 (M_i, M_j) 的旁标。

定理 1 任意一个带标注的有界标准 Petri 网 $\Sigma = (S, T; F, i, o, \Gamma_1, \varphi)$, 都存在一个有限自动机 $M = (Q, \Gamma_2, \delta, q_0, F)$, 使得: $L(\Sigma, \varphi) = L(M)$ 。

证明: 设带标注的有界标准 Petri 网 $\Sigma = (S, T; F, i, o, \Gamma_1, \varphi)$ 的可达标识图是 $RG(\Sigma) = (R(M_i), E, P)$, 现利用 $RG(\Sigma)$, 构造有限自动机 $M = (Q, \Gamma_2, \delta, q_0, F)$ 。其构造过程如下:

① 令 $q_0 = M_i; F = \{M_f\}$;

$Q = R(M_i); \Gamma_2 = \Gamma_1$;

② 对于 P 中的任意一个元素: $P(M_i, M_j) = t_k$, 使得: $\varphi(t_k) \in \Gamma_1$ 和 $\delta(M_i, \varphi(t_k)) = M_j$;

通过上面两步的构造, 形成有限自动机 $M = (Q, \Gamma_2, \delta, q_0, F)$, 并且 $L(\Sigma, \varphi) = L(M)$ 。

定理 2 任意一个右线形文法 $G = (V, \Gamma_1, P, R)$, 都存在一个带标注的有界标准 Petri 网 $\Sigma = (S, T; F, i, o, \Gamma_2, \varphi)$, 使得: $L(G) = L(\Sigma, \varphi)$ 。

证明: 利用构造证明法:

对于右线形文法 $G = (V, \Gamma_1, P, R)$, 其中的任意一个非终结符 A , 只有两种形式的产生式:

$$A \rightarrow aB \text{ 或 } A \rightarrow a$$

其中 B 为非终结符, a 为终结符。

其处理过程如下:

(1) 对形如“ $A \rightarrow a$ ”的产生式, 进行修改

① 引入一个非终结符 $X (X \notin V)$, 并使 $V = V \cup X$, 并添加产生式: $X \rightarrow \epsilon$;

② 将所有形如“ $A \rightarrow a$ ”的产生式, 替换为 $A \rightarrow aX$; 从而将所有的产生式 (除 $X \rightarrow \epsilon$ 外), 都统一为 $A \rightarrow aB$ 的形式。

(2) 将产生式 $A \rightarrow aB$ 变换为 Petri 网模型

图 4 表示了产生式 $A \rightarrow aB$ 变换为 Petri 网的方式, 其中: t 为变迁, 而 a 为变迁 t 的标注。

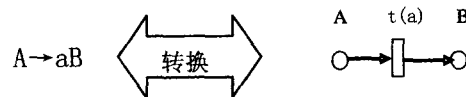


图 4 产生式到 Petri 网的转化

(3) 构造带标注的有界标准 Petri 网

对于文法 G , 可以构造出一个带标注的有界标准 Petri 网

$\Sigma=(S, T; F, i, o, \Gamma, \varphi)$, 使得 $L(G)=L(\Sigma, \varphi)$, 其构造过程为:

① 对产生式集合 P 中的每个产生式(除 $X \rightarrow \epsilon$ 外), 按图 4 的转换方法, 构造出其相应的 Petri 网模型;

② 将①中所有的 Petri 网, 进行共享合成^[5](同名的库所合并), 形成一个新网 PN; 由于每个产生式对应的 Petri 网是有界的, 所以, 共享合成的网 PN 也是有界的。(文[5]已经证明, 共享合成运算, 有界性保持不变);

③ 令 $S=V, \Gamma_2=\Gamma_1, i=R, o=X$ 。显然, $i, o \in S$, 并且只有 i, o 使得 $i=\emptyset, o'=\emptyset$;

④ 对网 PN 的所有变迁, 依次进行编号(1、2、3、……), 并用 $N(k)$ 存放第 k 个变迁的名称(标注); 然后对它们重新依次命名为 t_1, t_2, \dots , 形成集合 T ; 并对于任意 $t_k \in T$, 让 $\varphi(t_k)=N(k)$, 同时给出流关系 F 。

通过上面处理及构造过程, 就形成一个带标注的有界标准 Petri 网 $\Sigma=(S, T; F, i, o, \Gamma, \varphi)$ 。

利用归纳法, 可以验证 $L(G)=L(\Sigma, \varphi)$ 。

上面的证明过程, 实际上给出了一个由右线形文法构造带标注的有界标准 Petri 网的算法。

5 有界 Petri 网的最小化及其最小化算法

设 $\Sigma=(S, T; F, i, o, \Gamma, \varphi)$ 是一个带标注的有界标准 Petri 网, 其可达标识状态元素个数记为: $|RG(\Sigma)|$ 。

定义 4(有界 Petri 网的最小化) 设 $\Sigma_1=(S_1, T_1; F_1, i_1, o_1, \Gamma_1, \varphi_1)$ 是一个带标注的有界标准 Petri 网, 对于任意另外的带标注的有界标准 Petri 网 $\Sigma_2=(S_2, T_2; F_2, i_2, o_2, \Gamma_2, \varphi_2)$, 使得:

$$L(\Sigma_1, \varphi_1)=L(\Sigma_2, \varphi_2)$$

并且都有 $|RG(\Sigma_1)| \leq |RG(\Sigma_2)|$

则称 Petri 网 $\Sigma_1=(S_1, T_1; F_1, i_1, o_1, \Gamma_1, \varphi_1)$ 是在语言等价的基础上最小化的 Petri 网, 简称最小化有界 Petri 网。

下面给出有界 Petri 网最小化化简算法(见算法 1)。

算法 1 有界 Petri 网最小化化简算法

输入: 有界 Petri 网 $\Sigma_1=(S_1, T_1; F_1, i_1, o_1, \Gamma_1, \varphi_1)$;

输出: 最小化 Petri 网 $\Sigma_2=(S_2, T_2; F_2, i_2, o_2, \Gamma_2, \varphi_2)$

算法步骤:

(1) 对有界 Petri 网 $\Sigma_1=(S_1, T_1; F_1, i_1, o_1, \Gamma_1, \varphi_1)$, 构造其对应的可达图 $RG(\Sigma_1)$; (其构造算法见文[1]);

(2) 由可达图 $RG(\Sigma)$, 利用定理 1, 构造有限状态自动机 M ;

(3) 对有限状态自动机 M , 利用最小化化简算法(见文[11]), 进行化简, 生成最小有限状态自动机 M' ;

(4) 对有限状态自动机 M' , 构造其对应的右线形文法 G (构造算法见文[13]);

(5) 由右线形文法 G , 利用定理 2, 重新构造一个新 Petri 网 $\Sigma_2=(S_2, T_2; F_2, i_2, o_2, \Gamma_2, \varphi_2)$

(6) 算法结束。

定理 3 有界 Petri 网 $\Sigma_1=(S_1, T_1; F_1, i_1, o_1, \Gamma_1, \varphi_1)$ 经算法 1 处理后, 生成的新 Petri 网:

$$\Sigma_2=(S_2, T_2; F_2, i_2, o_2, \Gamma_2, \varphi_2)$$

使得 $L(\Sigma_1, \varphi_1)=L(\Sigma_2, \varphi_2)$, 且 Σ_2 是最小化的。

证明: 算法 1 中的每一步变换处理, 都是在语言等价条件下的等价变换, 所以对 Petri 网 Σ_1 和 Petri 网 Σ_2 , 必有: $L(\Sigma_1, \varphi_1)=L(\Sigma_2, \varphi_2)$;

同时, 算法 1 中的处理步骤(3), 使状态数目最小, 从而, 所构造的新 Petri 网

$$\Sigma_2=(S_2, T_2; F_2, i_2, o_2, \Sigma_2, \varphi_2)$$

使其可达标识状态元素个数是最少的, 所以 Petri 网 Σ_2 是最小化的。

例 1 利用算法 1 对图 3 所示的 Petri 网 Σ_5 进行最小化化简。

其化简处理过程:

(1) 构造图 3 的 Petri 网 Σ_5 所对应的可达图 $RG(\Sigma_5)$, 见图 5 所示; (为了标注简单, 图中的节点, 直接使用了状态编号, 没有使用可达标识, 状态“0”为初始标识, 状态“7”为终止标识。)

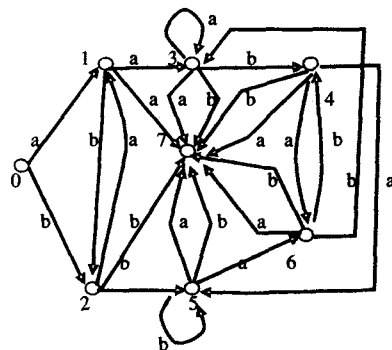


图 5 图 3 的 Petri 网 Σ_5 可达图 $RG(\Sigma_5)$

(2) 由图 5 的可达图 $RG(\Sigma_5)$, 构造有限状态自动机 M ; (其状态图与图 5 一样, 只是将状态 0 作为初态, 状态 7 作为终态);

(3) 对有限状态自动机 M , 进行化简, 形成最小有限状态自动机 M' (其状态图见图 6, 其中: 0 为初态, 3 为终态);

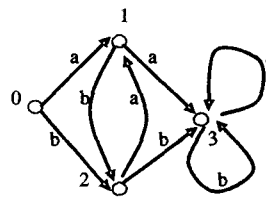


图 6 图 5 状态图的最小化状态图

(4) 对有限状态自动机 M' , 构造其右线形文法 $G=(V, \Gamma, P, S)$; 其中:

$$V=\{S, A, B, C\}; \Gamma=\{a, b\};$$

$$P=\{S \rightarrow aA | bB\};$$

$$A \rightarrow aC | bB | a;$$

$$B \rightarrow aA | bC | b;$$

$$C \rightarrow aC | bC | a | b;$$

并且状态与非终结符之间的对应关系为: $0 \leftrightarrow S, 1 \leftrightarrow A, 2 \leftrightarrow B, 3 \leftrightarrow C$ 。

(5) 由右线形文法 G , 构造新的 Petri 网(见图 2(B))。

结束语 有界 Petri 网的最小化化简, 在语言等价的条件下, 实现了有界 Petri 网的简化, 其主要内容:

(1) 定义了 Petri 网语言等价性概念, 证明了有界 Petri 网、正规文法、有限状态自动机的等价性;

(2) 给出了有界 Petri 网最小化概念, 并进一步给出了有

(下转第 61 页)

程序进行实际的 DPA 攻击实验,在 10^6 个明文样本的条件下,成功获得了 DES 第 16 轮加密的 48 位密钥。在验证仿真方法正确性的同时进一步证明了 DES 加密实现面对 DPA 攻击的脆弱性。

下一步工作包括两个方面:一是改进 DES 加密算法,使其能够防护 DPA 攻击,并通过仿真和实验平台对防护方法进行验证;二是对高级加密标准(advanced encryption standard, AES)实现进行 DPA 仿真和实验攻击,研究其面对 DPA 攻击的脆弱性,并提出防护措施。

参考文献

- 1 Kocher P, Jaffe J, Jun B. Differential power analysis. In: Wiener M, ed. *Advances in Cryptology: Proceedings of CRYPTO'99* [C]. Santa Barbara, CA, USA, Springer-Verlag, 1999. 388~397
- 2 Messerges T S, Dabbish E A, Sloan R H. Examining SmartCard Security under the Threat of Power Analysis Attacks. *IEEE Transactions on Computers*, 2002, 5: 541~552
- 3 den Boer B, Lemke K, Wicke G. A DPA attack against the modular reduction within a CRT implementation of RSA. In: Kaliski

- B S, Koç Ç K, Paar C, eds. *Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES 2002, Lectures Notes in Computer Science (LNCS)*[C], Springer-Verlag, 2002
- 4 Akkar M L, Bevan R, Dischamp P, et al. Power analysis, what is now possible. In: Okamoto T, ed. *Lectures Notes in Computer Science (LNCS)*, Springer-Verlag, 2000
- 5 Joye M, Paillier P, Schoenmakers B. On Second-order Differential Power Analysis. In: Rao B S J R, ed. *Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES 2005* [C], Edinburgh, UK: Springer-Verlag, 2005. 293~308
- 6 Chari S, Rao J R, Rohatgi P. Template attacks. In: Kaliski B S, Koç Ç K, Paar C, eds. *Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES 2002, Lectures Notes in Computer Science (LNCS)*[C], Springer-Verlag, 2002
- 7 NSA tempest series. <http://cryptome.org/#NSA---TS>
- 8 Canovas C, Clédière J. What do S-boxes Say in Differential Side Channel Attacks? <http://cecile.canovas@cea.fr>. 2004
- 9 Federal Information Processing Standards Publication 46-3 (FIPS PUB 46-3); Data Encryption Standard
- 10 陈开颜,赵强,张鹏,等. DES 加密实现的差分功耗分析仿真. *机械工程学院学报*, 2006, 3: 41~43

(上接第 28 页)

界 Petri 网最小化化简的算法,为有界 Petri 网自动化化简提供了方法。

参考文献

- 1 Peterson J L. *Petri 网理论与系统模拟*(吴哲辉译)[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1989
- 2 王培良,蒋昌俊. Petri 网的并操作[J]. *西北大学学报*, 1997, 27(s):111~114
- 3 Jiang Changjun, Wu Zhehui. Net Operations [J]. *Journal of Comput. Sci. & Technol*, 1992, 7(4):333~344
- 4 蒋昌俊. Petri 网的行为理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2003
- 5 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 机械工业出版社,2006
- 6 许安国,吴哲辉. 加权 T-图的保性变换[J]. *计算机学报*, 1997, 20(11):1038~1043
- 7 许安国,蒋昌俊. 带标识的加权 T-图化简[J]. *电子科学学报*, 1998, 20(5):655~662
- 8 蒋昌俊. 加权 T-图的几种化简运算[J]. *通讯学报*, 1994, 15(2):97

(上接第 55 页)

- 33 Zerkle D, Levitt K. NetKuang - A Multi-Host Configuration Vulnerability Checker. In: *Proceedings: 6th USENIX Security Symposium*, San Jose, California, The USENIX Association, 1996. 195~201
- 34 Staniford-Chen S, Cheung S, Crawford R, et al. GrIDS - A Graph-based Intrusion Detection System for Large Networks. In: *Proceedings: 19th National Information Systems Security Conference*, Baltimore, Maryland, National Institute of Standards and Technology and National Computer Security Center, 1996. 361~370
- 35 Ou Xinming, Boyer W F, McQueen M A. A Scalable Approach to Attack Graph Generation. In: *Proceedings of the 13th ACM conference on Computer and Communications Security*, 2006. 336~345
- 36 Li W. An Approach to Graph-based Modeling of Network Exploitations; [Ph D Dissertation]. Department of Computer Science and Engineering, Mississippi State University, Mississippi State, Mississippi, 2005

~102

- 9 Murata T. Petri nets; Properties Analysis and Applications [J]. *Proc. Of The IEEE*, 1989, 77(4)
- 10 吴哲辉,蒋昌俊. 有界 Petri 网的可达图到网图的转换算法[J]. *软件学报*, 1992, 3(1):23~29
- 11 Hopcroft J E, Ullman J D. *Introduction to Automata Theory, Languages and Computation* [M]. Addison-Wesley, 1979
- 12 吴哲辉. Pumping 引理的 petri 网描述—Petri 网语言属型的一组判定条件[J]. *计算机学报*, 1994, 17(11):853~858
- 13 陈火旺,等著. *程序设计语言编译原理(第三版)*[M]. 国防工业出版社,2000
- 14 张立昂,等译. *计算理论导引*[M]. 机械工业出版社,2000
- 15 张继军,吴哲辉. 下推自动机的状态转换图与下推自动机的化简[J]. *计算机科学*, 2006, 33(3):271~274
- 16 张继军,吴哲辉. Petri 网的分层递归模型[J]. *系统仿真学报*, 2003, 15(s):89~92
- 17 蒋昌俊. 离散事件动态系统的 PN 机理论[M]. 北京:科学出版社,2000
- 18 袁崇义. *Petri 网原理与应用*[M]. 电子工业出版社,2005

- 37 林崇颐. 适应于多量弱点资讯之智慧型攻击图形产生器:[学位论文]. 中原大学, 2003
- 38 Helmer G, Wong J, Slagell M, et al. Software Fault Tree and Colored Petri Net-based Specification, Design and Implementation of Agent-based Intrusion Detection System. *Requirements Engineering*, 2000, 7(4):207~220
- 39 McDermott J. Attack Net Penetration Testing. In: *Proceedings: 2000 New Security Paradigms Workshop (NSPW'00)*, Cork, Ireland, ACM/SIGSAC, 2000. 15~21
- 40 Steffan J, Schumacher M. Collaborative Attack Modeling. In: *Proceedings: 2002 ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2002)*, Madrid, Spain, ACM/SIGAPP, 2000. 253~259
- 41 Ou X, Govindavajhala S, Appel A W. MulVAL: A logic-based network security analyzer. In: *14th USENIX Security Symposium*, Baltimore, MD, USA, August 2005
- 42 Noel S, Jajodia S. Managing attack graph complexity through visual hierarchical aggregation. In: *Proceedings of the 2004 ACM Workshop on Visualization and Data Mining for Computer Security*, 2004. 109~118