

通信网 阻塞控制 信度网模型 专家系统 (10)

# 41-4517 用于通信网阻塞控制的信度网模型

## The BN Model for Congestion Control of Communication Network

王宽全

7W913.2

(西南师范大学计算机科学系 重庆 400715) (重庆大学计算机研究所)

**Abstract** In this paper the belief network model for congestion control of communication network is presented after analyzing the causes of congestion of communication network. Also the algorithm of constructing belief network and calculating probability of nodes are presented. The reasoning and learning of belief network are discussed. At last this model is applied in management of telecommunication network and the congestion can be effectively predicted, which will be sound grounds of controlling of telecommunication network.

**Keywords** Communication Network, Congestion, Belief Network, Probabilistic Reasoning

### 1. 引言

阻塞是通信网中的一种常见现象。网络由于信息流特性的可变性和网络结点的特性,使得信息在通过结点时产生滞留现象,从而造成信息的时延增大和信息丢失率上升。

这种由于网络结点吞吐率下降而引起的信息聚集于一些结点的缓冲区中,网络时延极大增加的现象即为网络的阻塞现象。

当网络中一个结点处于阻塞状态,那么与该结点相邻的其他结点,由于信息无法及时通过阻塞结点进行传播,有可能导致这些相邻结点部分或全部进入阻塞状态,这种现象称为阻塞传染现象<sup>[1]</sup>。

网络阻塞会引起网络通信能力下降,即网络吞吐能力降低。如果能对这种现象加以有效控制,阻塞对网络所产生的不利影响也将会得到控制,否则网络局部的阻塞,可能会引起整个网络瘫痪。

在通信网中,当一个结点发生阻塞,一般的解决方法是该结点将阻塞消息通过信令信道传送给周边结点,接到阻塞消息的结点将减少传送到阻塞结点的流量,直到阻塞消除,这种控制称为反映性控制。

陶洋博士在其博士论文中提出了阻塞传染模型及诊断算法<sup>[2]</sup>,可以有效地在网络中判定阻塞结点、阻塞链路、关键阻塞结点以及首阻塞结点。通过解决首阻塞结点及关键阻塞结点的阻塞,可以较快地解决整个网络的阻塞,恢复网络的正常运行。

以上方法都是在网络阻塞后,通过一定手段来消除阻塞,仍是一种反映性控制。如果能够预测某结点的阻塞趋势,及早地防止网络进入阻塞,对提高整个网络的性能极有意义。本文提出通信网阻塞的信度网模型,使用信度网推理方法计算出各结点出现阻塞的概率变化趋势,即可在结点进入阻塞前进行有效的控制。

信度网是表示不确定知识的一种最有效的方法<sup>[3-5]</sup>,在含有不确定知识表示和推理的专家系统中应用甚广。同时,信度网在信息检索方面也有很多应用<sup>[6]</sup>。

在通信网中不确定因素很多。对网络结点来说,其输入流量不是固定不变的,一般可用一个泊松分布来近似。此外,结点由于其自身软硬件错误或功能失调而产生故障,同样可导致网络的阻塞,它也是一个不确定因素。因此,对通信网阻塞问题建立数学模型的方法非常复杂,而且在应用中受到诸多限制。使用信度网模型实际上是引入了专家系统的基于知识的模型,它是通过领域专家对通信网运行历史的统计获得关于网络阻塞的知识,再将这种知识用信度网模型存储起来。我们相信,这种用信度网的方法来解决通信网的阻塞问题是一件很有意义的事情。

信度网通过网络结构提供一个简单而有效的在专家系统中表示知识的方法。它是一个有向无环图,其中结点是一个随机变量,表示了一个命题,弧表示了相连两个命题的依赖关系。用概率表示不同命题

的可信度,命题之间的依赖关系用条件概率表示。考虑图 1 所示例子,结点 A、B、C、D 和 E 分别表示五个不同的命题,两个结点之间的弧表示了两个事件是相互依赖的因果关系。弧尾对应的结点表示原因,弧头所指结点表示结果。结点 A 和 B 是结点 C 的父结点,这意味着事件 A 和 B 是 C 的直接原因,在 C 结点中将存储事件 A、B 取不同值的各种组合条件下,对应于 C 为真的条件概率。如果两个结点之间无弧,表示这两个结点不直接相关,它们的相关性通过连接路径上的中间结点间接体现。

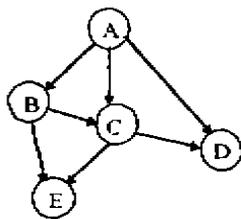


图 1 信度网举例

信度网表示了随机变量集  $X_1, X_2, \dots, X_n$  上的一个联合分布  $P(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。根据链规则(chain-rule),联合分布可表示为条件分布的乘积形式:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = P(X_1) \prod_{i=2}^n P(X_i | X_1, \dots, X_{i-1}) = \prod_{i=1}^n P(X_i | F(X_i)) \quad (1)$$

其中  $F(X_i)$  是可作为  $X_i$  的条件的随机变量集,实际上就是  $X_i$  的父结点集。例如,图 1 的信度网可以表示成:

$$P(A, B, C, D, E) = P(A)P(B|A)P(C|AB)P(D|AC)P(E|BC) \quad (2)$$

从以上分析可知,要建立一个信度网,首先需定义代表命题的随机变量集,随机变量取值的样本集,待弄清各随机变量的直接因果关系后即可建立信度网的结构;其次是定义信度网各结点的先验概率以及条件概率,这样就建立起了信度网。

## 2. 信度网模型

### 2.1 信度网结构

2.1.1 通信网结点阻塞模型 一个典型的通信网拓扑结构如图 2 所示。

任取通信网中的一个结点  $k$ ,分析产生阻塞的各种原因。

定义 1 通信网中结点  $k$  的阻塞态  $B(k)$  是一个随机变量,取值 0 或 1,分别表示结点  $k$  处于非阻塞

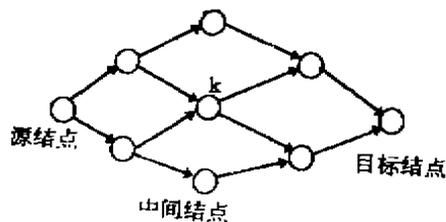


图 2 典型通信网拓扑结构

状态或阻塞状态。

下面我们分析结点  $k$  产生阻塞的直接原因。不失一般性,设结点  $k$  有  $n$  条输入链路,有  $m$  条输出链路,如图 3 所示。

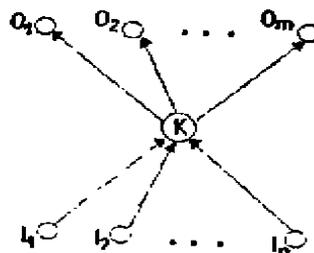


图 3 通信网结点  $k$  的阻塞模型

对于结点  $k$ ,有以下三个方面的直接原因可令其阻塞:

- 结点  $k$  自身的故障引起的阻塞:当结点  $k$  内部发生故障,它不能及时将输入信息传到输出端,自然会引起结点  $k$  的阻塞。
- 输入流量超过结点  $k$  的负荷承载能力:对任一通信结点,在设计时都给予了一个负荷承载上限。一般情况下,输入到该结点的流量总和不超过这一承载上限。但有时输入结点出现某些特殊情况,产生出大量的突发流量,致使输入流量之和超过结点  $k$  的承载上限而引起结点  $k$  性能大量下降,从而造成阻塞。
- 输出链路受阻引起结点  $k$  的阻塞:由于前方某一个或多个结点阻塞,导致结点  $k$  的一条或多条输出链路受阻,大量的信息积压于结点  $k$  的缓冲区内,从而造成结点  $k$  的阻塞,这就是所谓的阻塞传染问题。

2.1.2 信度网结点 通过上面的分析,我们知道通信网中结点的阻塞有三方面的直接原因,其中由输入流量引起的阻塞可以不区分来自哪一条链路,因此用输入流量的总和来表示这一因素。

定义 2  $F(k)$  为一随机变量,表示通信网结点

k 的故障,  $F(k)$  取值 0 或 1, 分别表示结点 k 无故障或有故障。

定义 3  $BI(k)$  为一随机变量, 表示通信网结点 k 的输入流量总和超过该结点承载能力,  $BI(k)$  取值 0 或 1, 分别表示结点 k 的输入流量总和未超过结点承载能力或已超过结点承载能力。

定义 4  $BO(k, i)$  为一随机变量, 表示通信网结点 k 的第 i 条输出链路是否阻塞,  $BO(k, i)$  取值 0 或 1, 分别表示结点 k 的第 i 条输出链路未阻塞或已阻塞。

那么, 通信网结点 k 的阻塞状态  $B(k)$  作为信度网的一个结点, 与其直接原因  $F(k)$ ,  $BI(k)$  和  $BO(k, i)$  的关系如图 4 所示。

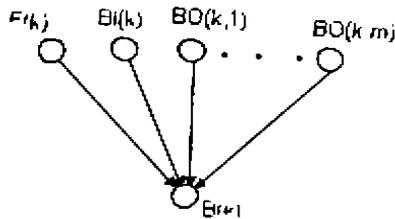


图 4 通信网结点 k 对应的信度网结点

2.1.3 通信网转换为信度网阻塞模型举例  
 设某通信网如图 5(a) 所示, 那么其信度网阻塞模型如图 5(b) 所示。

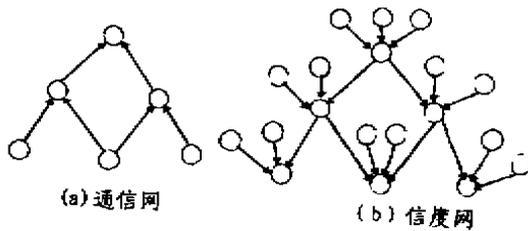


图 5 通信网转换为信度网阻塞模型示例

2.1.4 信度网结点建立算法

- 对通信网每一结点 k, 建立信度网结点  $B(k)$ , 以及  $F(k)$ ,  $BI(k)$ , 并依据结点 k 输出结点的多少分别建立  $BO(k, 1), \dots, BO(k, m)$
- 对每一个结点 k, 建立  $F(k) \rightarrow B(k), BI(k) \rightarrow B(k), BO(k, 1) \rightarrow B(k), \dots, BO(k, m) \rightarrow B(k)$  连线
- 对每一结点 k, 如果有 m 个输出结点  $k_1, k_2, \dots, k_m$ , 则分别连线  $B(k_1) \rightarrow BO(k, 1), B(k_2) \rightarrow BO(k, 2), \dots, B(k_m) \rightarrow BO(k, m)$
- 化简, 消除所有有父结点的  $BO(k, i)$ , 直接

将  $BO(k, i)$  的父结点连到  $B(k)$  (理由见本文 2.2.3)

2.2 信度网结点的概率分析

2.2.1 故障概率  $P(F(k))$  对通信网结点 k, 其故障概率  $P(F(k))$  与结点 k 所用产品的质量有关, 通常可根据产品的平均无故障时间进行估计, 此外, 任何产品随着使用时间的增加, 产品的元器件会逐渐老化, 产生故障的可能性亦随之增加, 因此, 在估计结点 k 的故障概率时, 除了考虑产品所标称的平均无故障时间外, 还应考虑产品所使用的时间, 作出一个综合考虑, 从而产生一个结点 k 的先验故障概率  $P(F(k))$ 。

除了以上方法, 我们还可以采用统计的办法获取故障概率。例如统计一年内该结点发生故障的时间, 那么发生故障的时间与统计总时间之比即可作为该结点故障概率的粗略估计值。

2.2.2 输入流量总和超过结点 k 承载能力的概率  $P(BI(k))$  设结点 k 能承载的最大流量为  $Max(k)$ , 输入到结点 k 的流量为  $I_i(k)$ , 一般情况下, 当输入流量低于  $Max(k)$  时不会引起结点 k 的阻塞; 当输入流量等于或稍大于  $Max(k)$  时, 结点 k 的性能开始下降, 随着输入流量的继续增大, 结点 k 进入阻塞状态的可能性加大。当输入流量大于  $Max(k)$  的两倍时, 结点 k 完全处于阻塞状态, 因此  $P(BI(k))$  可用下式计算:

$$P(BI(k)) = \begin{cases} 0 & \text{当 } \Sigma I_i(k) < Max(k) \\ \frac{\Sigma I_i(k) - Max(k)}{Max(k)} & \text{当 } Max(k) \leq \Sigma I_i(k) < 2Max(k) \\ 1 & \text{当 } \Sigma I_i(k) \geq 2Max(k) \end{cases} \quad (3)$$

因为输入流量  $I_i(k)$  在通信网中是随时间变化的, 因此  $BI(k)$  也是一个随时间变化的随机过程。对于  $I_i(k)$  可以通过统计而获得, 在网管数据库中存有每一个结点的每个时间段的流量参数, 从而可获得  $I_i(k)$ 。在通信网中, 流量变化都有一定周期, 例如电话网取 24 小时为周期, 可获得  $BI(k)$  在 24 小时内的分布规律。

2.2.3 结点 k 的输出链路阻塞概率  $P(BO(k, i))$  根据定义,  $BO(k, i)$  是结点 k 的第 i 条输出链路的阻塞状态, 显然与该链路对应的结点的阻塞有关。如果对应的结点未阻塞, 那么该链路上的流量可以继续流入那个结点; 相反, 对应的结点已阻塞, 那么该链路上的流量不能进入那个已阻塞的结点, 因此该链路也阻塞了。所以, 结点 k 的输出状态  $BO(k, i)$  应等于对应的输出结点 k' 的阻塞状态  $B(k')$ 。

如果最末结点为整个通信网的目标结点,它不再输出到其它结点,那么相应的BO(k)可以视为0,从而将这一因素从信度网中取消。

如果我们研究的仅是一个通信网子网,结点k为该通信子网的最末一个结点,那么它的父结点不在讨论范围内,我们为其输出链路状态BO(k),根据对该结点的输出阻塞情况的长期统计指定一先验概率。

2.2.4 条件概率 P(B(k) | Parents(B(k)))

对通信网结点k,对应的信度网结点B(k)及其直接原因结点如图4所示。

从前面的讨论可知,F(k),BI(k)不再有父结点,因此不再有条件概率表,其先验概率计算在前面已讨论过。由于B(k)仅与其父结点相关,而独立于其它结点,根据概率独立性原理,B(k)的条件概率用下式表示:

$$P(B(k) | F(k), BI(k), BO(k,1), \dots, BO(k,m)) \quad (4)$$

在信度网中,通常用表格形式表示B(k)的条件概率,如表1所示。

表1 B(k)的条件概率表

F(k)	BI(k)	BO(k,1)	...	BO(k,m)	P(B(k))
0	0	0	...	0	0
0	0	0	...	1	0. xxx
...	...	...	...	...	...
1	1	1	...	0	0. xxx
1	1	1	...	1	1.000

表1的左边为B(k)的父结点的所有不同的组合,右边为每种组合对应的B(k)的概率P(B(k))。表中P(B(k))由专家通过经验以及分析统计数据确定。

$$\begin{aligned} P(B(k) | E_{B(k)}^+) &= P(B(k), F(k) | E_{B(k)}^+) + P(B(k), BI(k) | E_{B(k)}^+) + \sum_u P(B(k), u | E_{B(k)}^+) \\ &= P(B(k) | F(k))P(F(k)) + P(B(k) | BI(k))P(BI(k)) + \sum_u P(B(k) | u) \prod_{i=1}^m P(u_i | E_{B(k)}^+) \\ &= P(B(k) | F(k))P(F(k)) + P(B(k) | BI(k))P(BI(k)) \left[ \sum_u P(B(k) | u) \prod_{i=1}^m P(u_i | E_{u_i, B(k)}^+) \right] \end{aligned}$$

注:u=(B(u<sub>1</sub>), B(u<sub>2</sub>), ..., B(u<sub>m</sub>))为B(k)父结点的取值向量。

同理,我们可计算出P(E<sub>B(k)</sub><sup>-</sup> | B(k)),此处略,读者可参阅有关信度网推理的资料。

2.4 信度网学习问题

信度网的学习问题包括条件概率的学习和信度网结构的学习。Sumit Sarkar使用I-Divergence测量的方法从数据库中挖掘信度网的结构<sup>[7]</sup>。Herskovitz和Cooper开发了一个称为Kutato的算法,

2.3 信度网的推理

不失一般性,我们任取前面建立的信度网模型中的一结点B(k),它具有如图6所示结构,

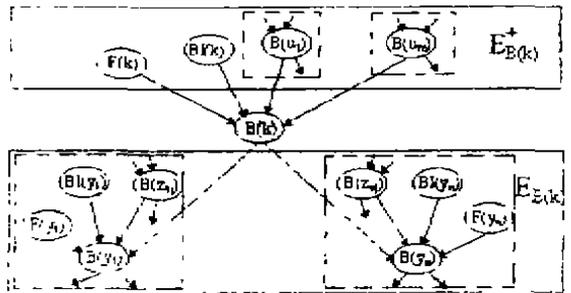


图6 信度网中结点B(k)及其相关结点示意图

所谓推理就是根据已知条件(证据),推出网络中每一个未知结点的概率。图6为网中任一未知结点B(k)及其相邻结点的连接情况。对B(k)来说,就是根据证据E推出P(B(k) | E)。

证据E根据与B(k)的连接关系,划分为E<sub>B(k)</sub><sup>+</sup>和E<sub>B(k)</sub><sup>-</sup>,E<sub>B(k)</sub><sup>+</sup>是B(k)的祖先结点,E<sub>B(k)</sub><sup>-</sup>为B(k)的子孙结点,如图6所示。

应用贝叶斯(Bayes)公式,保持E<sub>B(k)</sub><sup>+</sup>固定,可得

$$\begin{aligned} P(B(k) | E) &= P(B(k) | E_{B(k)}^+, E_{B(k)}^-) \\ &= \frac{P(E_{B(k)}^- | B(k), E_{B(k)}^+) P(B(k) | E_{B(k)}^+)}{P(E_{B(k)}^- | E_{B(k)}^+)} \\ &= \frac{P(E_{B(k)}^- | B(k)) P(B(k) | E_{B(k)}^+)}{P(E_{B(k)}^- | E_{B(k)}^+)} \\ &= \alpha P(E_{B(k)}^- | B(k)) P(B(k) | E_{B(k)}^+) \end{aligned}$$

再分别计算P(B(k) | E<sub>B(k)</sub><sup>+</sup>)和P(E<sub>B(k)</sub><sup>-</sup> | B(k)),充分应用贝叶斯公式及条件独立性,在信度网中简化计算可得:

可从数据库的数据中确定最少结点的网络结构。信度网的一般性学习问题比较复杂,已超出了本文的范围,读者可参考有关资料。

在这里,我们仅对本文提出的信度网模型的学习问题做一简单的讨论,对各结点条件概率的学习,我们采用周期性分析网管数据库中的相关数据,逐步修正各结点的条件概率。

关于信度网结构,由前面的分析可知,结点的相互关系非常明确,没有必要作大的修改。不过,为了简化信度网结构,提高推理速度,对于某些小概率事件的一些因素,可以考虑去掉。例如,对于新建的通信网结点,由于出故障的概率非常小,那么建立相应的信度网结点时可以下考虑故障这一因素的影响,从而在信度网中减少一个原因结点。此外,为了研究阻塞传染问题,也可以将输入流量这一因素去掉,更加简化了信度网的结构。

### 3 在电信网阻塞预测中的应用

随着电信网络的迅猛发展,电信网的管理日益重要,国际电联(ITU-T)提出了电信管理网(TMN)的概念和一系列标准。NOMA 系统是我国邮电部软件技术中心根据 TMN 的原则开发的用于本地电信网集中监控与维护的网管系统。它使用 HP 小型机作服务器,运行 Sybase 数据库。在 NOMA 系统的数据库中存在有所覆盖的本地电信网的大量数据,自然也包含各通信结点每天 24 小时的流量数据,阻塞数据,故障数据。我们利用这些数据很容易建立起前面提出的信度网模型。图 7 是我们实施网管系统的四川某市本地电话网简化网络示意图。

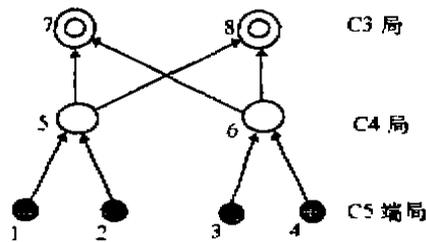


图 7 电话网示意图

根据前面介绍的信度网模型,可得其信度网结构如图 8 所示。

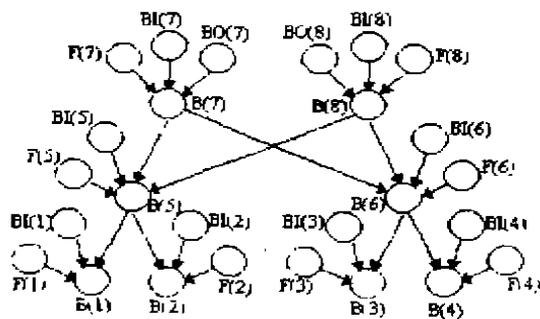


图 8 电话网的信度网模型

$F(1)$  到  $F(8)$  八个随机变量分别表示各结点是否出现故障,其概率可通过分析各结点设备使用情况 & 统计数据而定。

$BI(1)$  到  $BI(8)$  八个随机变量分别表示各结点的输入流量是否超过其承载的最大负荷,根据网管系统的统计可获得其随时间变化的分布函数。

$B(1)$  到  $B(8)$  八个随机变量分别表示各结点是否阻塞,其条件概率可通过领域专家分析网管数据库而确定。

$BO(7)$  和  $BO(8)$  两个随机变量分别表示此二结点的输出链路是否阻塞。因为我们这里所考虑的通信网仅为一子网,所以结点 7 和 8 的输出结点不在考虑范围内,那么  $BO(7)$  和  $BO(8)$  的概率应根据统计数据获得一先验概率。

在图 8 的信度网结构中,如果已知某些结点的取值(例如  $F(5)=1, BO(8)=1$ ),那么根据前面介绍的推理算法,可以计算出  $P(B(i)), i=1 \dots 8$ ,显然可确定通信网中哪一结点出现阻塞的概率最高,达到预测网络结点阻塞的目的。根据预测结果,网管系统可对电信网进行控制,重新分配资源,避免网络阻塞,达到提高通信效率的目的。

我们在进行推理时,不必知道每个随机变量的取值,只需部分随机变量的取值(即使不知所有随机变量的取值,根据其先验概率也可进行推理),即可获得推理结果,可见信度网在表达缺省知识方面具有很强的能力。

**结束语** 信度网不但具有很好的语法和语义,而且善于表达现实世界中的不确定知识,在专家系统及其它基于知识的系统中应用甚广。由于通信网络的复杂性,且存在多种不确定因素,用传统的数学建模的方法来解决阻塞及阻塞传染问题,不能取得满意的结果。本文将信度网这一有力工具应用于通信网,提出了通信网阻塞的信度网模型,较好地解决了通信网阻塞的诊断和预测问题。

### 参考文献

- 1 陶洋 网间控制关键技术研究:[博士论文],重庆大学,1997-12
- 2 Cooper G F. NESTOR: A computer-based medical diagnostic aid that integrates causal and probabilistic knowledge:[PhD dissertation], Stanford Univ, Palo Alto, Calif., 1984
- 3 Henrion M. Propagating uncertainty in Bayesian

(下转第 17 页)

$$\frac{P \downarrow \beta}{P \downarrow \beta} \quad \frac{P \rightarrow Q \quad Q \downarrow \beta}{P \downarrow \beta} \quad \square$$

定义 6 一个测试 (test) 由任意闭进程  $R$  和 barb  $\beta$  组成, 记为  $(R, \beta)$ 。当且仅当  $(P|R) \downarrow \beta$  时称闭进程  $P$  通过测试  $(R, \beta)$ 。对任意两个闭进程  $P$  和  $Q$ , 有测试等价关系  $\cong$ :

$P \cong Q \equiv$  对任意测试  $(R, \beta), (P|R) \downarrow \beta$  当且仅当  $(Q|R) \downarrow \beta$   $\square$

由测试等价关系我们可以定义保密性 (security):

定义 7 安全协议系统  $Sys(M)$  ( $M$  是系统中传送的数据) 中, 对任意  $M, M'$ , 如果  $F(M) \cong F(M')$  则有  $Sys(M) \cong Sys(M')$ , 称安全协议系统  $Sys(M)$  具有保密性。  $\square$

2.1 节用 Spi 演算描述的 Wide Mouthed Frog 协议系统  $Inst(M)$  中, 对任意  $M$  有且仅有 barb 集合  $B = \{C_{AB}, \overline{C_{AB}}, C_{AS}, \overline{C_{AS}}, C_{SB}, \overline{C_{SB}}\}$ , 因此对任意测试  $(R, \beta) (\beta \in B \cup B_R, B_R$  是  $R$  所展示的 barb 的集合), 通过对  $Inst(M)$  的每个反应及 barb 的展示的推导可以证明: 对任意  $M, M'$ , 如果  $F(M) \cong F(M')$  则有  $Inst(M) \cong Inst(M')$ , 也就是说, Wide Mouthed Frog 协议系统具有保密性。

结论 通过对 pi 演算和 Spi 演算的介绍可以看出, 标准的 pi 演算不能很好地描述现有的基于密码学的安全协议。通过在 pi 演算中加入支持基于共享密钥的密码系统描述的原语, Spi 演算不仅实现了对安全系统的描述, 而且通过测试等价的定义提供了验证安全系统安全性的形式而简洁的方法。并且通过对 Wide Mouthed Frog 安全协议系统的描述和验证, 充分说明了 Spi 演算的描述能力和简洁的语义, 虽然这个例子很小, 但对更为复杂的安全系统的 Spi 演算描述也是很直观的。

本文所述的 Spi 演算是针对基于共享密钥的密

码学系统的。目前的密码学系统还有哈希函数法、基于公共密钥的密码系统、数字签名等<sup>[6]</sup>。我们对 Spi 演算进一步研究将主要集中在两个方面: 一是对 Spi 进行进一步扩展便能描述更多的数据加密标准, 实现对复杂安全协议系统的描述; 二是对 Spi 的语义进行更深入的研究, 实现更为直观和精确的语义描述, 并且提供密码学协议系统安全性验证的更简单、更形式化的证明方法

### 参考文献

- 1 Milner R, Parrow J, Walker D. A Calculus of Mobile Processes, parts 1 and 1. Information and Computation, Sept. 1992; 1~40 and 41~77
- 2 Abadi M, Gordon A D. A Calculus for Cryptographic Protocols: The Spi Calculus. In: the Proc. of the Fourth ACM Conference on Computer and Communications Security, April 1997
- 3 Abadi M, Gordon A D. Reasoning about Cryptographic Protocols in the Spi Calculus. In: the Proc. of CONCUR'97, Aug. 1997
- 4 Liebl A. Authentication in Distributed Systems. A Bibliography. ACM Operating Systems Reviews, 1993, 27 (4): 31~41
- 5 Burrows M, Abadi M, Needham R M. A Logic of Authentication. In: the Proc. of the Royal Society of London A, 426, 1989: 233~271
- 6 Milner R. Communication and Concurrency. Prentice-Hall International, 1989
- 7 Milner R. Functions as Processes. Mathematical Structures in Computer Science, 1992, 119~141
- 8 Schneider B. Applied Cryptography Protocols, Algorithm and Source Code in C. John Wiley & Sons, Inc., 1994

(上接第 45 页)

networks by probabilistic logic sampling, Uncertainty in Artificial Intelligence, North Holland, Amsterdam, 1988

- [4] Lauritzen S L, et al. Local computation with probabilities in graphical structures and their applications to expert system. J. Royal Statistical Society B, 1988, 50(2)
- [5] Pearl J. Fusion, propagation, and structuring in belief

networks. Artificial Intelligence, 1986, 29

- [6] Ribeiro Berthier A N. A Belief Network Model for IR. Proc. of 19th Ann. Intl. ACM SIGIR Conf. on Research and Development in Information Retrieval, Zurich, Switzerland, August, 1996
- [7] Sarkar Sumit. Constructing Efficient Belief Network Structures With Expert Provided Information, IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 1996, 8 (1)