时延约束下公共信道信令网络的可靠性分析

冯海林，刘三阳
(西安电子科技大学应用数学系，陕西西安 710071)

摘　要：本文给出一种新的网络可靠性评估法. 该方法通过修正 GENERATE 算法，以状态概率不增的次序生成了网络的最大概值有效状态，构成网络状态空间的满足给定范围概率的子空间. 通过在子空间上做时延分析，获得了网络运行的动态可靠性指标和稳态可靠性指标. 最后以此方法评估了公共信道信令网络的运行性能.

关键词：时延；网络可靠性；公共信道信令网络
中图分类号：TN168；TP393.02　**文献标识码**：A　**文章编号**：0372-2112 (2002) 08-1142-03

Reliability Analysis of Common Channel Signaling Network under Delay Constraint

FENG Hai-lin, LIU San-yang
(Dept. of Applied Mathematics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: This paper presents a new method for calculating network reliability. By improving GENERATE Algorithm, we generate the most probable effective states in order of non-increasing probability and form a subspace with some coverage probability. Through the delay analysis in the subspace, we obtain the dynamic and steady reliability indexes of the network. Finally, using the method we calculate the performability of a CCSN.

Key words: delay; network reliability; Common channel signaling network

1　引言

传送 ISDN 的内部交换信息和 IN 的呼叫控制等的主干网——公共信道信令网络(common channel signaling network，简记为 CCSN)，需要比支持正常交通负载高得多的信令交通能力，因此 CCSN 具有相当高的可靠性及性能要求. 而关于 CCSN 的性能分析已有大量文献讨论，如文[1]利用 $M/G/1$ 模型研究了 CCSN 的排队时延，文[2]分析了 CCSN 的生存性等. 由于网络元件的失效所引起的严重后果不一定是网络的不运行，而是网络性能的下降(如时延增大，甚至网络过负荷等)，CCSN 的可靠性直接影响着网络的 QoS(服务质量)，因此评估网络的运行情况应综合考虑可靠性与性能. 但这方面的研究还很少，而许多传统的网络可靠性评估方法，由于计算复杂，也只适用于小规模的网络. 本文采用一种新的评估方法，即改进文[3]中的 GENERATE 算法，利用改进后的算法按状态概率不增的顺序生成网络的最大概值有效状态，构成网络状态空间的子空间使子空间的范围概率达到给定要求值，一般在 90 %以上. 然后根据网络的实际时延要求确定时延的近似计算方法，从而获得了动态评价网络可靠运行的公式及时延约束下网络可靠运行的概率. 该方法既考虑了网络的连通性，又考虑了网络部件存在失效率时的时延特性，同时又大大减少了计算量，可应用于大型网络的可靠性评估.

2　CCSN

简言之，基于 No. 7 信令系统的公共信道信令网(CCSN)是由信令端点(signaling end point(s) 简记 SEP)、信令转接点(signaling transfer point(s) 简记 STP)以及连接它们的信令链路组成，SEP 是信令消息的源点和目的地点，它可以是各种交换局，也可以是各种运行，管理，维护中心等. STP 是公共信道信令网络的主要部分，它是将一条信令链路上的信令消息转发至另一条信令链路上去的信令转接中心. 信令链路是信令网中连接信令点的最基本部件，目前，基本上是 64kbit/s 的数字信令链路.

3　一种新的网络可靠性分析方法

设网络由 n 个部件组成，部件 i 的寿命及修理时间分别服从参数为 λ_i 和 μ_i 的负指数分布，且寿命和修理时间相互独立，则在任一时刻 t，部件 i 的可靠性和可用性分别为

$$r_i(t) = e^{-\lambda_i t}, i = 1, 2, \cdots, n$$

$$A_i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}, i = 1, 2, \cdots, n$$

而部件 i 的稳态可用性为

$$p_i = \mu_i / (\lambda_i + \mu_i), i = 1, 2, 3, \cdots, n$$

收稿日期：2001-09-03；修回日期：2002-05-08
基金项目：国家自然科学基金(No. 69972036)；陕西省自然科学基金(No. 2000SL03)

易知,稳态下系统的状态概率为

$$p = \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \right)^{x_i} \left(1 - \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \right)^{1 - x_i}$$

其中 $x_i = 1$ 表示部件 i 正常, $x_i = 0$,表示部件 i 失效 $(i = 1,2, \cdots, n)$. 对于网络的每一状态 s,网络要么是连通的,要么是不连通的,因此若网络在状态 s 下是连通的则称状态 s 为网络的有效状态. 为此令

$$E_s = \begin{cases} 1, & \text{状态 } s \text{ 为网络的有效状态} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

则网络在时刻 t 的瞬时可用性可表示为

$$A(t) = \sum_{s \in \Omega} E_s \left[\prod_{i=1}^{n} A_i(t)^{x_i} (1 - A_i(t))^{1 - x_i} \right] \tag{1}$$

其中 Ω 为网络的状态空间,网络的稳态可用性为

$$A = \sum_{s \in \Omega} E_s \cdot p \tag{2}$$

由于网络部件的随机失效会使信息传递的路由发生改变,这极易导致网络时延过大而失去信息传输的意义,因此网络在实际运营时,都有严格的时延要求,若设时延的最大阈值为 a,令

$$T_s = \begin{cases} 1, & \text{状态 } s \text{ 为网络的有效状态且时延 } \le a \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

则在一定时延约束下网络的瞬态可用性为

$$P_s(t) = \sum_{s \in \Omega} T_s \left[\prod_{i=1}^{n} A_i(t)^{x_i} (1 - A_i(t))^{1 - x_i} \right] \tag{3}$$

时延约束下稳态可用性为

$$P_s = \sum_{s \in \Omega} T_s \cdot p \tag{4}$$

以上公式,虽然只针对网络的有效状态,但当网络的规模很大时,其有效状态数仍然很大. 本文针对 CCSN 的拓扑结构改进文[4]中的 GENERATE 算法,生成最大概值有效状态,再用以上公式评估 CCSN 的运行性能.

4　GENERATE 算法的修正

设在任一时刻部件 i 处于正常或失效两种状态,相应概率为 p_i, $q_i = 1 - p_i$ $(i = 1,2, \cdots, n)$,由于部件通常为高可靠的,可设

$$p_i > q_i,\ i = 1,2, \cdots, n, \quad \frac{1}{2} \le p_1 \le p_2 \le \Lambda \le p_n \le 1 \tag{5}$$

令 $H_i = q_i / p_i$, $i = 1,2, \cdots, n$,则有

$$1 \ge H_1 \ge H_2 \ge \Lambda \ge H_n \ge 0 \tag{6}$$

任一时刻系统状态 s 可表示为 $S = (x_1, x_2, \cdots x_n)$,记状态 s 故障部件集为 F_s,正常部件集为 W_s,则系统在任一状态 s 的概率还可表示为

$$P(s) = \prod_{i \in W_s} p_i \prod_{j \in F_s} q_j = \prod_{i=1}^{n} p_i \prod_{j \in F_s} H_j = \left(\prod_{i=1}^{n} p_i \right) H(s) \tag{7}$$

其中 $H(s) = \prod_{j \in F_s} H_j$ 称为状态 s 的 H 值,给定范围概率 $1 - \varepsilon$,则要生成网络状态空间的子空间 Ω_ε 使:

$$\Omega_\varepsilon = \left\{ S_k \mid k = 1,2, \Lambda m \quad \sum_{k=1}^{m-1} p(S_k) < 1 - \varepsilon \le \sum_{k=1}^{m} p(S_k) \right\}$$

其中 s_k 为有效状态 $(k = 1,2, \cdots, m)$,并且满足 $p(S_1) \ge p(S_2) \ge \Lambda \ge p(S_m)$. 由文献[3]知网络的所有状态集形成一个偏序集. 利用式(7)可定义状态间的序关系,并且关系(5)满足的条件下,对 $p(z_i)$ 与 $p(z_j)$ 的比较等价于关系(6)满足的条件下,对 $H(z_i)$ 与 $H(z_j)$ 的比较. 因此利用 H 值可确定一个 Hasse 图. 在 Hasse 图中,各元素的标号为系统状态中失效部件号,由小到大排列,弧表示各元素间的序关系. 任一元素的入度为进入该元素的弧数. 因为任何偏序集,至少有一个元素的入度为 0,它对应着系统的最大概值状态. 当该元素从 Hasse 图中移去时,仍至少有一元素在余下的 Hasse 图中入度为 0. 一般而言,当 k 个最大概值元素从 Hasse 图中移去时仍将有一些元素在余下的 Hasse 图中入度为 0,而这样的两个元素可通过比较其相应的 H 值,便可决定下一个最大概值状态. 然后由网络的拓扑结构判断该状态是否有效,即可逐渐生成子空间 Ω_ε. 令 A 为 Hasse 图中某元素被移去后与它相邻的后继元素组成的集合, B 为 Hasse 图中入度为 0 的元素集合,给定 ε,算法如下:

Step1　$B = \{0\}$, $A = \Phi$, $Sum := 0$.

Step2　若 $Sum \ge 1 - \varepsilon$,则停,否则,从 B 中删除具有最大 H 值的元素 s,转 Step3.

Step3　若 s 有效,则置 $Sum = Sum + p(s)$,否则移去 s 转 Step2.

Step4　将 s 的后继者置入 A 中,并更新其入度,再将 A 中入度为 0 的元素转入 B 中,转 Step2.

5　CCSN 的时延计算

在 CCSN 中,通常会包括多种排队系统,由文献[4]可知,将排队站点近似为 $GI/G/1$ 模型,则网络状态为 s 时,端到端平均时延为

$$ED(s) = \sum_{l \in L} r_l \cdot ED_l(s) \tag{8}$$

$$ED(s) = \sum_{k \in R_l} D_k(s) \tag{9}$$

$$D_k(s) = \frac{1}{u_j} \left(1 + \frac{v_j}{u_j - v_j} \cdot \frac{I_j^2 + C_j^2}{2} \right) \tag{10}$$

其中 L 为网络路径集, r_l 为信息通过路径 l 的比例, R_l 为路径 l 上的站点集, μ_j 为站点 j 的平均服务率, C_j^2 为站点 j 服务时间的平方变异系数, I_j^2 为站点 j 的交替到达时间的平方变异系数. $D_j(s)$ 为站点 j 的平均等待时间, $ED_l(s)$ 为信息路径上站点的平均等待时间之和.

有时为计算方便,当网络达到稳定运行状态时各站点时延可视为相同常数. 时延可用信息所经过的路径长(链路数)来计算即

$$ED(s) = \sum_{l \in L} d r_l l_e \tag{11}$$

l_e 为信息所经过的路径 l 的长度, d 为比例常数.

另外还可用 Kleinrock's 模型[5]来计算网络平均时延.

$$ED(s) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{m} \frac{f_i}{\mu C_i - f_i} \tag{12}$$

其中 λ 是外部到达率之和，$\frac{1}{\mu}$ 为信息的平均分组长度，f_i 为链路 i 上的负载，C_i 为状态 s 下链路 i 的容量.

6 算例

考虑一个由 16 条链路，4 个 SEP，4 个 STP 组成的简单的 CCSN（如图 1）. SEP 的排队网络由一个 MTP-L3 处理器，一个 ISDN-UP 处理器和几个传输器组成；STP 的排队网络由一个 MTP-C3 处理器和几个传输器组成. 每个处理器/传输器都是单队单服务员器的排队系统. 假设所有 SEP 及链路均可靠，其它网络元件的失效率相同，修复率相同. 设 $1/\mu_i = 1/\mu = 11.25\text{min}$，$a = 0.025\text{sec.}$，每一 SEP 的呼叫到达率为 60calls/sec. 给定 $\varepsilon = 0.01$，各网络部件的可靠度为 0.94 时，4 个 STP 的 Hasse 图如图 2. 图中圆圈内的数字表示对应的部件为失效部件，如 13 表示部件 STP1 和 STP3 均失效，0 表示无部件失效. 由所给 CCSN 的拓扑结构易知，如果出现 12 或 34，则网络不连通.

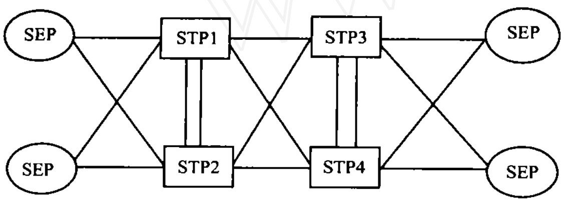


图 1 信令网示意图

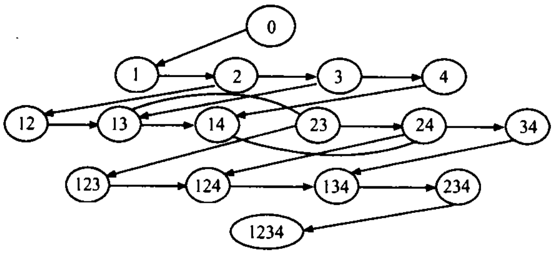


图 2 Hasse 图

由第 4 节算法生成状态空间的子空间为 $\Omega_{0.01} = \{(1\ 1\ 1\ 1)\ (0\ 1\ 1\ 1)\ (1\ 0\ 1\ 1)\ (1\ 1\ 0\ 1)\ (1\ 1\ 1\ 0)\ (0\ 1\ 0\ 1)\ (0\ 1\ 1\ 0)\ (1\ 0\ 1\ 0)\ (1\ 0\ 0\ 1)\}$

利用公式 (8)～(10) 可算得满足时延的状态为

$S1 = (1\ 1\ 1\ 1)$　$S2 = (0\ 1\ 1\ 1)$　$S3 = (1\ 0\ 1\ 1)$　$S4 = (1\ 1\ 0\ 1)$　$S5 = (1\ 1\ 1\ 0)$

于是 CCSN 在满足时延要求下能正常运行的概率为：$\sum_{i=1}^{5} P(s_5) = 0.98$.

7 结束语

本文针对 CCSN 的最大概值有效状态，并利用严格的数学公式分析了网络的运行性能，GENERATE 算法能以概率不增次序生成网络的最大概值状态，但不一定为网络的有效状态，修正后的算法考虑了网络的时延要求和连通性并使生成的状态成为网络的有效状态. 一般当网络部件数 $n \geq 30$ 且各部件的可靠度在 0.90 以上，算法只需生成网络状态总数的 0.013 %个状态，即可使这些状态的概率之和达到 90 %以上，大大减少了计算量. 关于 CCSN 的性能，文献[6]等中采用分层性能模型分析了 CCSN 点对点时延，呼叫建立时延等，文献[7]等在排队论的基础上，采用仿真模拟模型，很好地表示了 CCSN 的动态运行行为. 但文献中关于信令网络的性能分析通常是将网络各性能单独考虑的，本文的评估方法联合考虑了时延和连通性这两个重要性能指标. 因此算法适用于对各类 CCSN 的运行性能的评估，由于通信网的可靠性、可用性及生存性等极其重要[8]，所以值得进一步研究的问题是如何针对一般的网络拓扑结构和网络类型生成有效状态，从而实现对各种类型网络的性能评估.

参考文献：

[1] R A Skoog. Study of clustered arrival processes and signaling link delay [J]. Teletraffic and Datatraffic, 1991, ITC-13: 61 - 66.

[2] M M Mostrel. Issues on the design of survivable CCSN [J]. IEEE J Selected Areas in Communications, 1994, 12(3): 526 - 532.

[3] Douglas R Shier. Network Reliability and Algebraic Structures [M]. Oxford: Clarendon Press. 1991.

[4] Min Young Chung. Tae Uck You, Dan Keum Sung. Performability analysis of common-channel signaling networks, based on signaling system #7 [J]. IEEE TRANS. on Reliability, 1999, 48(3): 224 - 233.

[5] Z Kleinrock. Queuing System, vol. Ⅱ: Computer Applications [M]. Wiley. New York: 1976.

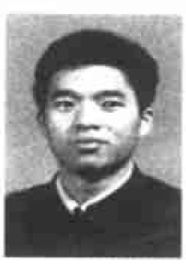
[6] G Willmann, P J Kuehn. Performance modeling of signaling system No. 7 [J]. IEEE Communication Mag, 1990, 28(7): 44 - 48.

[7] B W Unger, D J Goetz, S W Maryka. Simulation of an SS7 common channel signaling [J]. IEEE Communication Mag, 1994, 32(3): 52 - 66.

[8] 周联红，伍翔，等. 一种光纤通信系统可用性的算法及分析 [J]. 电子学报, 2001, 29(12): 12: 1713 - 1716.

作者简介：

冯海林 女，1966 年 4 月生于陕西米脂，现为西安电子科技大学博士研究生，主要研究网络优化和网络可靠性等.



刘三阳 男，1959 年 11 月生于陕西临潼，博士，教授，博士生导师，西安电子科技大学应用数学系主任，主要从事优化，网络算法，路由算法和网络可靠性等方面的研究.