

基于网络拓扑评估网络可靠性的新算法^①

张 品, 董志远, 沈 政

(杭州电子科技大学 通信学院, 杭州 310018)

摘 要: 现代网络技术飞速发展, 致使通信网络得到深入研究, 而网络的可靠性是评估网络好坏的重要标准之一。在以往研究理论和实践的基础上, 根据节点删除法/链路收缩法, 分别对节点/链路的重要性进行评估, 作适当处理, 基于网络固有的拓扑结构, 并结合网络传输特性, 提出了评估通信网络可靠性的新方法——TNL 算法 (Combined with the importance of Nodes, Link and Transmission flow)。该方法有效地评估了在具有不同网络拓扑结构的通信网络的可靠性, 实验证明该方法优于二元决策图法, 具有高可靠性。

关键词: 通信网络; 网络可靠性; TNL; 网络传输特性; 节点; 链路

Evaluation Method for the Network Reliability Based on the Network Topology

ZHANG Pin, DONG Zhi -Yuan, SHEN Zheng

(Institute of communication, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: With the rapid development of modern network technology, communication network has been further researched, and the reliability of network is one of the major criteria to evaluate the performance of network. With the previous theories researches and practice about network, this paper evaluates the importance of node and link state according to the node deletion and link contraction method respectively, then make appropriate adjustments, we propose a new method—TNL algorithm based on the inherent network topology, combined with transmission characteristics. This method evaluates the reliability of network with different network topologies effectively, experimental results demonstrate the efficiency of the proposed algorithm which is better than BDD algorithm.

Key words: communication network; reliability; TNL; transmission characteristics; node; link

1 引言

近年来, 随着片上系统、无线通信和低功耗嵌入式等科学技术的深入研究与发展, 通信网络得到了飞速蓬勃的发展, 被广泛应用在商业、医疗、军事、抢险救灾等各种领域^[1-11]。通信网络由大量节点组成, 通过有线或无线方式通信进行数据传播, 网络是否长期稳定可靠对整个网络来说举足轻重, 而如何合理设计网络拓扑, 提高网络的生存性和可靠性, 是当前网络研究的重要方向。据统计, 目前对网络可靠性的研究占网络总的研究的比重偏低, 但一个网络是否长期稳定, 其可靠性评估至关重要。因此, 如何合理地评价各网络的可靠性与合理建模网络是当前通信网络研究

的热点之一。

文献[1]通过指数分布定义节点及链路的重要性, 并引入链路重要性权重对跳面节点法进行改进, 来评价网络的可靠性。另外, 有国内外学者则通过设计二元决策图法^[2]或熵原理法^[3]来设计评估网络的可靠性。文献[5]基于网络传输特性, 文献[6]则将网络假想为一个黑盒, 使用串联系统和并联系统合理划分网络, 并作不同运算进行评估。

评价通信网络的可靠性可以从抗毁性、生存性、有效性三个指标来作分析考虑, 而本文主要从网络的抗毁性方面考虑。抗毁性是指在拓扑结构完全确定的网络中, 在理想的破坏方案作用下, 网络能够保持连

^① 基金项目:浙江省自然科学基金人才项目(R105473)

收稿时间:2012-04-29;收到修改稿时间:2012-06-15

通的能力. 对于一个网络, 网络的抗毁性是指至少需要破坏几个节点或几条链路才能中断部分节点之间的联系. 抗毁性的指标是确定的, 仅仅和网络的拓扑结构有关, 起初的指标仅仅指连接度和粘聚度. 本文在以往文献的基础上, 从文献[3]中得到启发, 从新的角度分析网络的抗毁性, 通过节点删除法/链路收缩法, 分别计算节点的重要性的和链路的重要性, 并作适当处理, 同时结合网络传输特性, 分别计算每个节点的可靠性, 再对整个网络节点的可靠性求均值, 所得结果作为整个网络的可靠性, 实验结果证明了该方法的有效性.

2 TNL算法

2.1 相关概念和假设

通信网络可以用图 $G=(V, E)$ 来表示, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_{n-1}, v_n\}$ 代表顶点的集合, 图的顶点对应网络中的节点, $E=\{e_1, e_2, \dots, e_{m-1}, e_m\}$ 代表边的集合, 图的边对应网络中的链路, 其中每条边赋予相应的权值, 设 G 为有 n 个节点和 m 条边的无自环无向连通图^[2].

G 的全顶点邻接矩阵 $A_c=(a_{ij})_{n \times n}$ 由 n 行和 n 列组成, 每一行和列都表示一个顶点. 当 G 是无向图时, 其邻接矩阵 A_c 中的元素 a_{ij} 定义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{若 } i = j \\ 1, & \text{若 } i \neq j, \text{ 顶点 } v_i \text{ 与 } v_j \text{ 有连边} \\ \infty, & \text{若 } i \neq j, \text{ 顶点 } v_i \text{ 与 } v_j \text{ 无连边} \end{cases} \quad (1)$$

节点的传输路径指一个节点到另一个节点所经过的链路数(一个节点到另一个节点的路由路径可能不止一条).

MatrixTree 定理^[11] 设 G 为无向连通图, G 的所有不同的生成树的个数等于其 **Kirchhoff** 矩阵任意一个 $n-1$ 阶主子式的行列式的绝对值. 即:

$$\tau(G) = \det(C_j) \quad (2)$$

再做假设: 假设网络中所有节点都不发生故障; 网络中所有链路的故障率相同, 均为 $p(0 < p < 1)$, 但不需要知道其具体数值, 链路只有两种状态: 正常和故障状态, 各链路的故障发生统计独立互不相关^[1].

2.2 节点删除法和链路收缩法

所谓节点删除法即当网络节点被删除后, 其网络

的生成树数目发生变化, 通过对网络的生成树进行归一化处理, 来判断各节点的重要性, 即:

$$r_i = 1 - \tau(G - v_i) / \tau(G) \quad (3)$$

其中, r_i 是指第 i 个节点的重要性, r_i 越大, 则该节点越重要; $\tau(G - v_i)$ 是指删除节点 v_i 后网络的生成树数目; $\tau(G)$ 是指网络完整时的生成树数目.

所谓链路收缩法即通过收缩每条链路, 将链路两端的节点合为一个节点, 两节点对应的链路合为这一新节点的链路, 其余链路不变, 通过观察网络生成树数目的变化, 对各链路重要性进行判断, 即:

$$s_j = \tau(G - e_j) \quad (4)$$

其中, s_j 为第 j 条链路的重要性, $\tau(G - e_j)$ 为收缩链路 e_j 后网络的生成树数目.

2.3 TNL 算法

为了便于统计计算通信网络的可靠性, 对节点删除/链路收缩法所得的各节点和链路的重要性进行归一化处理, 即:

$$P_{v_i} = r_i / \sum_{i=1}^n r_i \quad (5)$$

$$P_{e_j} = s_j / \sum_{j=1}^m s_j$$

其中, P_{v_i} 为节点 v_i 的重要性, P_{e_j} 为链路 e_j 的重要性.

有了节点/链路的重要性, 依据网络的拓扑结构, 计算网络的可靠性. 定义 S_{v_i} 为第 i 个节点以不同传输路径到达其他各节点的可靠性总和. 则:

$$S_{v_i} = \sum_{j=1}^n S_{v_{ij}} \quad (6)$$

式中, $S_{v_{ij}}$ 为第 i 个节点到第 j 个节点的可靠性测度, 由于第 i 节点可以以不同的传输路径到达第 j 个节点, 因此, 定义 $S_{v_{ij}}$ 为:

$$S_{v_{ij}} = \sum_{k=1}^{P_{\max}} P_{v_i} * L_{ijk} \quad (7)$$

其中, P_{\max} 为节点 v_i 到节点 v_j 的传输总路径数. L_{ijk} 为节点 v_i 到节点 v_j 的第 k 条传输路径, 由于一条传输路径可以由不同的链路组成, 每条链路具有其相应的重要性 P_{e_o} , 因此, 定义 L_{ijk} 为:

$$L_{ijk} = \sum_{o=1}^{f_{\max}} P_{e_o} \quad (8)$$

式中, P_{e_o} 为节点 v_i 到节点 v_j 的第 k 条传输路径中的第 o 条链路的重要性, f_{\max} 指节点 v_i 到节点 v_j 的第 k 条传输路径的总链路数.

由以上一系列的公式可得 S_{v_i} , 即得到节点 v_i 的可靠性测度. 最后, 可得网络 $G(V, E)$ 的可靠性测度 S , 为:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{v_i} \quad (9)$$

根据以上的描述, 设计可靠性评估算法流程图, 如图 1 所示.

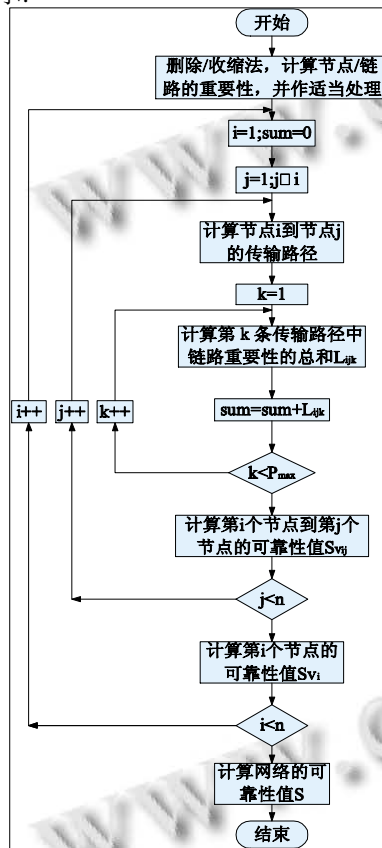


图 1 TNL 算法流程图

2 算法复杂度

对于 n 个节点, m 条链路的无向连通图 $G(V, E)$, 通过 n^2 次计算得到各节点相互间的传输路径, 再通过 n^3 次计算得到每个节点到其他节点的可靠性测度值, 最后对整个网络的节点的可靠性测度值求均值, 则可知本算法的复杂度为 $O(n^5)$. 文献[3]和文献[9]中提及 BDD 算法^[2]是目前最有效的可靠性算

法, 其时间复杂度为 $O(m * F_{\max} * 2^{F_{\max}} * BF_{\max})$, 其中 F_{\max} 与网络拓扑的线性宽度有关, 随着网络规模的增加而增加. BF_{\max} 是 F_{\max} 节点集的 Bell 数, BF_{\max} 随着 F_{\max} 增长成指数增长. 而同时文献[3]提及的基于熵的算法, 其时间复杂度为 $O(n^{2.376})$, 复杂度优于本算法, 但本算法从新的角度提出评估基于抗毁性的网络的可靠性, 仍有其存在的价值.

对这几种算法进行时间复杂度比较, 结果如表 1 所示. 其中 F_n 表示 n 个节点的全连通无向图.

表 1 BDD 算法、熵算法及 TNL 算法时间复杂度比较

网络	F_8	F_{10}	F_{12}
BDD 算法时间复杂度	$1 * 10^7$	$8 * 10^8$	$9.7 * 10^8$
熵 算法时间复杂度	$5 * 10^3$	$1 * 10^4$	$2.8 * 10^4$
TNL 算法时间复杂度	$3.3 * 10^4$	$1 * 10^5$	$2.5 * 10^5$

从表 1 的结果可以看出, 对于全连通网络, 本算法的时间复杂度远低于 BDD 算法, 当网络规模较小时, 本算法更优, 而熵算法算法复杂度优于这两种算法.

3 实验仿真

利用图 2 给出的树状网络对本算法进行说明. 算法采用 Matlab(版本 7.0.0)语言编写, 在 1.79GHZ 的 AMD 处理器的微机上运行. 通过增加 4 条链路, 其中图(a)、(b)、(c)所连接的链路方式不一样, 计算各个网络的可靠性测度值, 并与原来的网络 $G1$ 的可靠性测度值比较, 分析各网络拓扑, 增加的链路用虚线表示. TNL 算法和 BDD 算法的结果如表 2 所示.

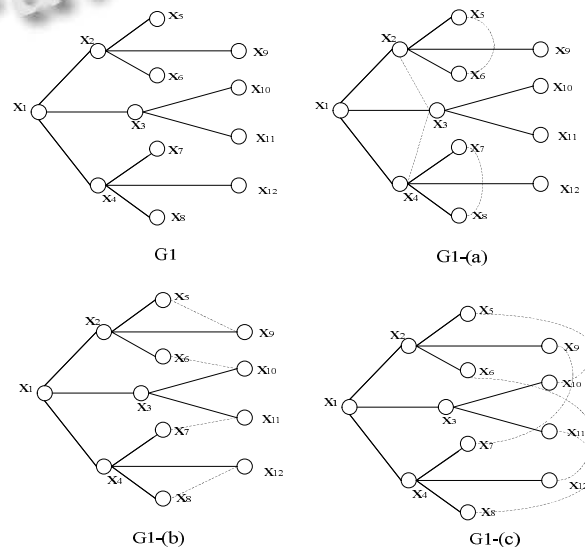


图 2 树状网络 G1 及其改进网络

表 2 树状网之 BDD 算法、熵算法及 TNL 算法可靠性结果比较

算法	G_1	$G_1-(a)$	$G_1-(b)$	$G_1-(c)$
BDD 算法	0.313	0.605	0.84	0.883
熵 算法	1.643	2.061	2.248	2.249
TNL 算法	0.006	0.158	0.159	0.308

全网可靠性值 S 越大, 则该网络越可靠. 由表 2 结果可知网络可靠性结果为 $S_{G_1-(c)} > S_{G_1-(b)} > S_{G_1-(a)} > S_{G_1}$, 而 BDD 算法、熵算法及 TNL 算法得到相同的比较结果, 证明本算法的正确性.

为了进一步验证本算法的有效性, 分析 ARPA 网络, 图 3 为 ARPA 网络的 6 中拓扑结构, 对比分析, 结果如表 3 所示.

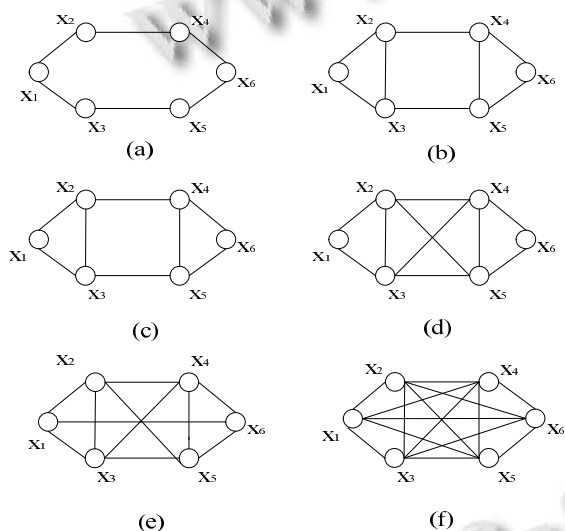


图 3 ARPA 网不同链路的网络拓扑

表 3 ARPA 网之 BDD 算法、熵算法及 TNL 算法可靠性结果比较

算法	图3(a)	图3(b)	图3(c)	图3(d)	图3(e)	图3(f)
BDD 算法	0.886	0.964	0.975	0.979	0.988	0.990
熵 算法	1.556	1.674	1.7227	1.764	1.817	1.954
TNL 算法	0.083	0.158	0.210	0.293	0.505	1.450

由表 3 结果可知, 各 ARPA 网网络的可靠性结果为 $S_{(f)} > S_{(e)} > S_{(d)} > S_{(c)} > S_{(b)} > S_{(a)}$, BDD 算法、熵算法及 TNL 算法得到相同的比较结果, 证明本算法的有效性.

4 结语

网络是由节点和链路组成的, 通过合理的算法可以评估各节点和链路的重要性, 基于这些特性, 并结合网络传输特性来评估基于抗毁性的网络可靠性是实际合理可行的. 由 TNL 算法的计算过程可知, 本文对网络的可靠性计算综合考虑到网络节点的重要性、链路的重要性与网络的传输特性的关系, 得到的可靠性是一个归一化结果, 其合理有效地评估了通信网络的可靠性, 与 BDD 算法相比具有更优的运算效率.

参考文献

- 1 刘伟,张胜,杨帅.军事信息网络的系统可靠性评估技术研究. 2010 通信理论与技术新发展——第十五届全国青年通信学术会议论文集.北京:国防工业出版社, 2010,8:90-92.
- 2 Hardy G, Lucet C, Linnios N. K-Terminal Network Reliability Measures With Binary Decision Diagrams. IEEE Transactions on reliability. 2007,9,56(3): 506-515.
- 3 Jiang Y, Hu AQ, He M. Evaluation Method for the Network Reliability Based on the Entropy Measures. International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009,5(2):423-426.
- 4 He FG, Qi H. A Method of estimating network reliability using an artificial neural network. IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application,2009,1(2):57-60.
- 5 Wang L, Wang Q. Regional Logistics Network Reliability Evaluation and Optimization. IEEE Intelligent Systems and Applications,2011,6:1-4.
- 6 Lin CM, Teng HK, Yang CC, et al. A Mesh Network Reliability Analysis Using Reliability Block Diagram. IEEE Industrial Informatics, 2010,8: 975-979.
- 7 何明,权冀川,郑翔,等.基于二元决策图的网络可靠性评估. 控制与决策,2011-6,26(1):31-36.
- 8 薛鹏.基于网络链路性能测量的网络可靠性分析系统的设计与实现.国防科学技术大学,2007,4:1-65.
- 9 姜禹.通信网的可靠性与重要性研究[博士学位论文].南京:东南大学,2009.1-113.
- 10 邱丽娟,姜宇,胡成全.无线传感器网络可靠性研究进展.传感器与微系统,2011,30(10):1-3.
- 11 陈勇,胡爱群,胡骏.通信网中最重要节点的确定方法.高技术通讯,2004,14(1):21-24.