

基于节点流量及路径评估网络节点重要性的优化算法^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: 如何合理有效地评估通信网络中各节点的重要性, 对整个网络的设计至关重要. 在以往相关理论研究的基础上, 提出了一种基于网络传输流量和网络节点间两两最短距离的新算法—DFC 算法(Combination of transmission flow and shortest path distance). 该算法从每个节点在通信网络中所占的通信流量, 及节点失效后两两间最短距离的变化出发, 来反映该节点对整个通信网络的重要程度. 通过实验仿真, 并与目前最通用有效的节点删除法相比, 证明该方法具有更高的精确性, 是一种有效的方法.

关键词: 通信网; 节点重要性; DFC; 网络传输特性; 最短距离

A Method about Node Importance Evaluation Based on Flow and Path for Network

ZHANG Pin, DONG Zhi-Yuan, SHEN Zheng

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

Abstract: How to evaluate the importance of each node effectively in the network, is very important to the design of the whole network. A new algorithm based on transmission flow and the shortest distance between two nodes in the network is proposed in this article—DFC algorithm. This method takes the flow of each node and the shortest distance between two nodes into account, evaluating each nodal importance to the network of the whole communication. Through the experimental simulation and the comparison with the general effective delete node method, this method is proved to have higher accuracy and more effective.

Key words: communication network; the importance of node; DFC; transmission characteristics; shortest path distance

1 引言

在通信网络的设计和维护过程中, 网络的生存周期和可靠性是评价网络的重要指标, 而节点是网络的核心部分, 故需对网络节点重要性进行评估. 节点失效, 轻则可以引起通信网络性能的下降, 重则可能造成网络的局部瘫痪, 故在国内外, 怎样对通信网络中节点的重要性进行评价, 对研究通信网络的可靠性有着重要的意义^[1-10]. 文献[1,2]提出一种可靠的算法——节点删除法, 该算法通过对删除通信网中每个节点, 计算该节点删除后子网络最小生成树数目的变化来判断该节点对整个网络的重要性, 与原主网络变化越大,

则该节点越重要, 实验证明该算法是一种有效的评价方法. 文献[3]则从不同的角度分析网络节点的重要性, 计算分析节点删除后节点数目变化, 及节点间最短距离变化, 并结合高斯分布原理设计一个三角模型公式定义节点的重要性, 实验证明与节点收缩法相比更具有有效性. 文献[4]认为往往传统算法只从单一的标准评估节点的重要性, 这是不全面的, 该文献通过设计多条标准, 结合多项因素例如从网络节点的度、节点间最短距离等因素考虑, 综合分析评估节点的重要性. 文献[5]则在以往算法的基础上, 结合网络最小生成树和节点间最短距离两个因子, 并通过适当公式处理作

^① 收稿时间:2012-04-29;收到修改稿时间:2012-06-22

为评估每条链路对整个通信网络的重要性,对评估节点的重要性有一定的参考价值.

对各文献进行参考总结,发现传统算法往往只单一考虑一种因子,虽然可以有效的评估各节点的重要性,但有时对一些复杂网络仍不能精确地区分开.本文在文献[3]的基础上,从新的角度分析节点的重要性,结合网络节点的流量和节点失效后网络节点间最短距离总和两个因子,并对其作适当的公式化处理,提出了一种评价通信网节点重要性的新方法——DFC算法.该算法从新的角度来研究节点的重要性,可以有效的评估每个节点的重要性,还能够更容易区分开那些在网络中被视为同等重要的节点,与节点删除法相比具有更高的精确性.

2 网络模型与理论基础

2.1 网络模型

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,每一行和每一列都表示一个顶点.当 G 是无向图时,其邻接矩阵 A_c 中的元素 a_{ij} 定义如下:

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

G 的全顶点完全关联矩阵 $B_c=(b_{ij})_{n \times m}$ 由 n 行和 m 列组成,每一行表示一个顶点,每一列表示一条链路.当 G 是有向图时,完全关联矩阵 B_c 中的元素 b_{ij} 定义如下^[2]:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{顶点 } i \text{ 是弧 } j \text{ 的起点} \\ -1, & \text{顶点 } i \text{ 是弧 } j \text{ 的终点} \\ 0, & \text{顶点 } i \text{ 和弧 } j \text{ 不关联} \end{cases} \quad (2)$$

对网络模型做如下假设:

- 1) 通线网的拓扑结构固定不变,节点之间不能够相互备份^[2];
- 2) 所有节点的损坏概率相同,均 $p(0 < p < 1)$ ^[2]

3) 网络中的节点只有两种状态:正常工作和失效,且每个节点的故障发生是相互独立的,通信链路不会发生故障^[2].

2.2 理论基础

MatrixTree 定理^[2] 设 G 为无向连通图, B 是由 G 的每条链路任意标定方向后所得到的有向图的关联矩阵,则:

$$\tau(G) = \det((BB^T)_{n-1}) \quad (3)$$

其中 τ 为图 G 的生成树数目, $(BB^T)_{n-1}$ 为 BB^T 的任意 $n-1$ 阶主子式.

Dijkstra 算法^[5] 在无向图 $G=(V,E)$ 中,假设每条边的权值已知,找出任意节点到其余各节点的最短路径距离. (4)

3 DFC算法

3.1 DFC 算法设计分析

通常,通信网络中节点间以最短路径形式进行数据通信,以便节约节点能量从而延长网络寿命,故可以通过计算分析通过每个节点的流量,来评价网络节点的重要性^[3].因此,基于节点间的传输特性来判断节点重要性是一种可行的方法,定义节点传输流量特性(TF)的公式如下:

$$t_i = \sum_{m < n} \frac{f_{mn}}{\sum_{j=1}^{f_{mn}} f_{mni}(j)} / f_{mn} \quad (5)$$

f_{mn} 指网络节点间最短路径的总路径数;若节点 v_m 到节点 v_n 存在最短路径通过节点 v_i ,则 $f_{mni}(j) = 1$, 否则 $f_{mni}(j) = 0$. t_i 定义为第 i 个节点的重要程度, t_i 越大则该节点越重要.

对于一个给定权值的网络,节点的位置和连接状况可以很好地反映网络的拓扑特性.当一个节点失效后,而网络节点间最短距离总和的变化可以很好地反映网络节点的重要性.因此,基于节点失效后的最短路径距离(DS),定义节点重要性的公式如下:

$$d_i = \text{sum}_i / n_i * m \quad (6)$$

sum_i 指第 i 个节点失效后网络节点间最短距离的总和, n_i 指节点失效后网络总的节点数, m 表示节点失效后网络节点间最短距离路径的总路径数; d_i 定义为第 i 个节点的重要性, d_i 越大则该节点越重要.

$$\text{sum}_i = \sum_{i \neq j \in V} d_{ij} \quad (7)$$

d_{ij} 指节点 v_i 到节点 v_j 的最短距离。

在通信网中, 节点失效可能造成整个网络断裂成为数个子网, 而子网络间不能通信, 则该节点最重要^[2], 此时造成公式(7)中 sum_i 为无穷大, 则 d_i 为无穷大, 当有多个这样的节点时, 不易区分节点的重要性. 而且由于不知 TF 和 DS 在网络中的重要性所占的比重, 为了更有效的评价网络节点的重要性, 在 TF 和 DS 的基础上, 作适当的公式化处理, 提出如下公式:

$$R_i = t_i / (t_1 + t_2 + \dots + t_n) + d_i / (d_1 + d_2 + \dots + d_n) \quad (8)$$

R_i 定义为第 i 个节点重要性, R_i 值越大则该节点越重要; t_i 指 TF 计算结果中第 i 个节点重要性; d_i 指 DS 计算结果中第 i 个节点重要性. 当 d_i 为无穷大时, 定义 $d_i / (d_1 + d_2 + \dots + d_n)$ 为 1, 则此时其 DS 为最大, R_i 主要由网络传输特性决定; 当 d_i 不为无穷大时, 若网络中存在 d_i 为无穷大的节点, 则 $d_i / (d_1 + d_2 + \dots + d_n)$ 的结果为 0, 否则将小于 1 大于 0, 其重要性将小于 d_i 为无穷大的点.

令通信网络的抽象模型为无自环连通图 G .

输入: 图 G 的邻接矩阵和关联矩阵.

输出: 按重要性的大小输出每个节点的重要性归一化后的结果.

- 1) 输入 G 的邻接矩阵和关联矩阵.
- 2) 计算图 G 的每个节点的传输流量即 TF.
- 3) 删除需要评估的节点.
- 4) 计算每个节点 i 删除后, 由邻接矩阵计算图全部节点两两之间最短距离的总和 d 、网络节点总数目以及路径数的总和, 求得 DS; 由关联矩阵计算网络的最小生成树数目.
- 5) 根据公式(8)计算每个节点的重要性.
- 6) DFC 算法与及节点删除法的比较.

3.2 算法复杂度分析

算法通过 $n * n$ 的邻接矩阵实现, 计算两点间最短距离的路径的时间复杂度为 $O(n^4)$, 因而计算 TF 的时间复杂度为 $O(n^5)$. 计算两点间最短距离矩阵的时间复杂度为 $O(n^3)$, 因而计算 DS 的时间复杂度为 $O(n^4)$. 最后, 根据计算节点的重要性的公式, 将 TF 与 DS 相加, 则整个算法的时间复杂度为 $O(n^5)$. 而文献[1]的节点删除法复杂度则为 $O(n^2)$, DFC 算法的复杂度高于节点删除法的复杂度, 但是

DFC 算法的精确度却高于节点删除法. 文献[11]是另一种评估网络节点重要性的新算法—节点孤立法, 对于 n 个节点, m 条链路的无向图 G , 需先计算获得一个新的 $n * n$ 矩阵, 新矩阵的每个元素需要 n 次 1 位的二进制逻辑与及 $n-1$ 次 1 位运算, 整个算法需进行 $C * n^4$ 次 1 位逻辑与和 $C * n^3 (n-1)$ 次 1 位逻辑或运算, 则算法总的时间复杂度为 $O(C * n^4)$, $C=1$ 对应全连通网络, $C=n$ 对应网络完全断开. 所以本算法的时间复杂度小于节点孤立算法. 文献[11]算法则对每个节点需要计算 $n * (n-1) / 2$ 个节点对间的最短距离, 每次最短距离搜索需要 n^2 次十进制加法运算, 则算法总的时间复杂度为 $O(n^5)$, 与本算法时间复杂度一样. 算法采用 Matlab(版本 7.0.0)语言编写, 在 1.69GHZ 主频的 AMD 处理器的微机上运行, 如图 3 所示. 对于全连通网络 $G(V, E)$, 其总链路数为 $L = n * (n-1) / 2$, 对具有不同链路数的网络, 其运行时间如图 1 所示. 从图 1 可以发现对于越复杂的网络, 本算法的运算时间反而减小, 这体现了本算法理想的计算能力, 其更适合于复杂网络.

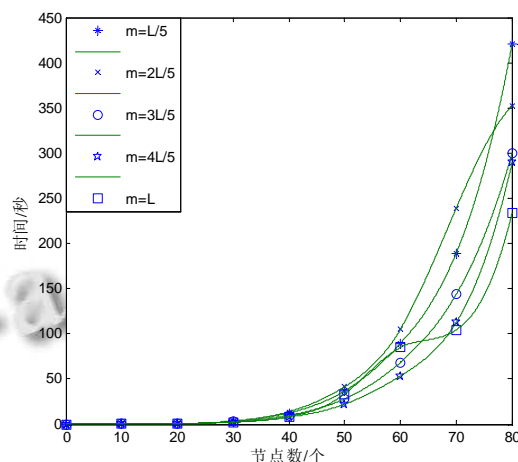


图 1 不同节点下的网络的运行时间

4 实验仿真及结果分析

对算法进行说明如图 2 所示. 图 2(a)为系统随机产生的一个无向图, 本算法主要基于图 2(a)计算的. 图 2(b)为在图 2(a)的基础上任意标定方向后的有向图, 主要用于计算节点删除法. 运用本文算法对图 1 进行节点重要性的评估, 并对比文献 1 和文献 2 的节点删除法, 结果如表 1 所示.

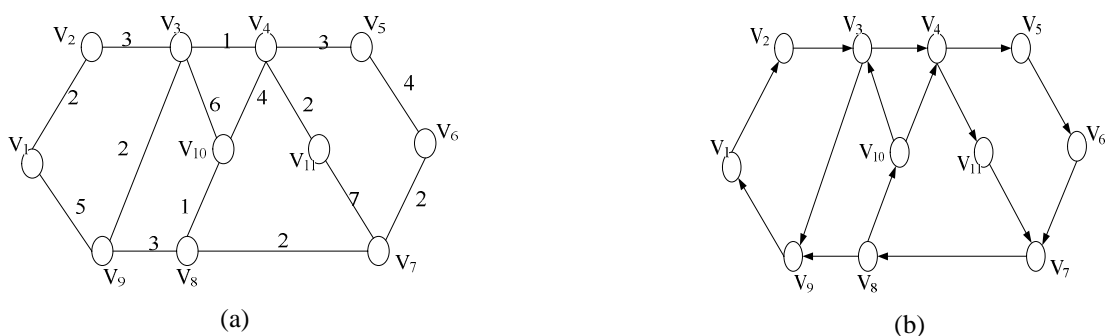


图 2 节点无向/有向图 G

表 1 通信网络中不同方法对节点重要性比较

节点	本算法			节点删除法
	t_i	d_i	R_i	
V_1	0.0817	0.2317	0.1430	0.7289
V_2	0.1128	0.2471	0.1705	0.7289
V_3	0.1907	0.2746	0.2352	0.9694
V_4	0.2179	0.2855	0.2583	0.9781
V_5	0.1128	0.2343	0.1657	0.7522
V_6	0.0934	0.2337	0.1519	0.7522
V_7	0.1167	0.2427	0.1716	0.9402
V_8	0.1673	0.2467	0.2085	0.9125
V_9	0.1440	0.2292	0.1857	0.9155
V_{10}	0.1089	0.2355	0.1635	0.8557
V_{11}	0.0817	0.2404	0.1462	0.6924

对表 1 的数据进行大小比对分析可知，值越大，则该节点越重要，则得如表 2 所示。

表 2 各种算法对节点重要性排序

TF	$V_4 > V_3 > V_8 > V_9 > V_7 > (V_5 = V_2) > V_{10} > V_6 > (V_{11} = V_1)$
DS	$V_4 > V_3 > V_2 > V_8 > V_7 > V_{11} > V_{10} > V_5 > V_6 > V_1 > V_9$
DFC	$V_4 > V_3 > V_8 > V_9 > V_7 > V_2 > V_5 > V_{10} > V_6 > V_{11} > V_1$
节点删除法	$V_4 > V_3 > (V_7 = V_8) > V_9 > V_{10} > (V_5 = V_6) > (V_1 = V_2) > V_{11}$

通过观察比较表 2 中的数据可知，TF 良好的反映了节点重要性的变化，但不能完全区分开这些节点。而 DS 虽然可以区分节点的重要性，但是其存在一些不足，例如在某些关键位置，网络节点在网络中处于重要作用，例如图 3 所示，由 DS 算法和常识可知 v_3 、 v_4 节点起连接左右两个网络的作用，在网络中占重要地位，节点删除后单纯由 DS 算法也不能区分开 v_3 、 v_4 节点的重要性。DFC 算法良好的结合了 TF 和

DS 的优缺点，并作适当的公式化处理，具有更高的精确性，其大致曲线和节点删除法、TF 算法是一致的。在节点删除法中，节点 v_1 与 v_2 、节点 v_5 与 v_6 的归一化结果相同，说明它们的重要性相同，而在 DFC 算法中，节点 v_2 的重要性大于节点 v_1 的重要性，节点 v_5 的重要性大于节点 v_6 的重要性，说明它们的重要性是不同的。因此，与节点删除法相比，DFC 算法具有更高的精确度。

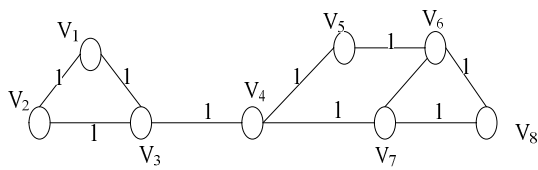


图 3 DS 实例图

5 结语

网络的传输特性和节点间最短距离是判断网络节点重要性的两个重要因素. 本文结合这两个因素, 提出了一种评价网络中节点重要性的新方法, 并给出了公式化的表达式. 通过比较各节点的通信流量和节点失效后网络间最短距离总和的变化, 可以有效地区分网络中任意节点的相对重要性. 与节点删除法相比, 具有更高的实用性、精确性, 是一种可靠的节点重要性评价方法.

参考文献

- 1 Chen Y, Hu AQ, Yip KW, Hu J, et al. Finding the most vital node with respect to the number of spanning trees. *IEEE Int. Conf. neural Networks & Signal Processing*, 2003, 12: 1670–1673.
- 2 陈勇, 胡爱群, 胡骏. 通信网中最重要节点的确定方法. *高技术*

术通讯, 2004, 14(1): 21–24.

- 3 Wu RZ, Hu XY, Tang LR. Node Importance Evaluation Based on Triangle Module for Optical Mesh Networks. *IEEE Conferences*. 2011, 7: 1–4.
- 4 Hu J, Wang B, Lee DY. Evaluating Node Importance with Multi-criteria. *IEEE Conferences*. 2010, 12: 792–797.
- 5 董志远, 张品, 陈磊. 一种基于两测度的无线链路重要性评价方法. *杭州电子科技大学学报*, 2011, 31(5): 159–162.
- 6 王建伟, 荣莉莉, 郭天柱. 一种参数可调的网络节点重要性度量方法. *科研管理*, 2009, 30(4): 74–79.
- 7 张品, 陈磊, 姜亚光. 无线网络中节点重要性的研究. *电子器件*, 2011, 34(4): 395–397.
- 8 姜禹, 胡爱群, 潘婷婷. 一种评价通信网节点重要性的新方法——节点孤立法. *高技术通讯*, 2008, 18(7): 673–678.
- 9 王延庆. 复杂网络节点重要性评估. *网络安全技术与应用*, 2008, 3(3): 59–61.
- 10 赫南, 李德毅, 朱熙, 等. 复杂网络中重要性节点发掘综述. *计算机科学*, 2007, 34(12): 1–5.
- 11 Kubat P. Estimation of reliability for communication/ computer networks simulation/analytic approach. *IEEE Trans. on Communication*, 1989, 37(9): 927–9.

(上接第 112 页)

参考文献

- 1 Rivoire S, Shah MA, Ranganathan P, Kozyrakis C. JouleSort: A Balanced Energy-Efficiency Benchmark. *ACM SIGMOD Conference*, 2007: 365–376.
- 2 Knuth DE. *The Art of Computer Programming. Sorting and Searching*. 2nd ed, Addison-Wesley, 1998, 3.
- 3 Cormen TH, Leiserson CE, Rivest RL, Stein C. *Introduction to Algorithms*. 2nd ed., MIT Press, 2001.
- 4 Graefe G. Query Evaluation Techniques for Large Databases. *ACM Computing Survey*, 1993, 25(2): 73–169.

- 5 Campillo IA, Green TJ, Gupta A, Onizuka M. XMLTK: An XML toolkit for scalable XML stream processing. *Proc. of PLAN-X: Programming Language Technologies for XML*, 2002: 1–10.
- 6 Silberstein A, Yang J. NEXSORT: Sorting XML in External Memory. *Proc. of the 20th International Conference on Data Engineering*. 2004: 695–707.
- 7 Koltsidas I, Müller H, Viglas S. Sorting hierarchical data in external memory for archiving. *Proc. of the VLDB Endowment Archive*, 2008, 1(1): 1205–1216.

(上接第 195 页)

ECU 通讯协议编写后续的数据分离程序, 便可以得到发动机各个参数的实时数据, 本系统在汽车发动机台架试验监测具有一定的参考价值.

参考文献

- 1 廖明明, 林伟建. 发动机台架试验浅析. *装备制造技术*, 2010: 167–169.
- 2 余淼, 刘胜龙, 朱李晰, 等. 汽车发动机 ECU 的可靠性试验研

究. *内燃机工程*, 2010, 22(11–1): 90–93.

- 3 陈锡辉, 张银鸿. *LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通*. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- 4 张亿雄, 顾海明. 基于调用 DLL 的 LabVIEW 数据采集的实现. *微计算机信息*, 2008, 24(12–1): 78–90.
- 5 秘晓元, 张严斌, 薛德庆, 等. LabVIEW 中利用 LabSQL 访问数据库. *微计算机信息*, 2004, 20(10): 53–54.