

复杂网络加边扩容策略研究*

赵焱鑫, 李黎, 王小明

(陕西师范大学 计算机科学学院, 西安 710062)

摘要: 网络扩容策略是近年来复杂网络的研究热点, 目前针对网络删边扩容研究已经颇为成熟, 但加边扩容的研究还较为匮乏。根据网络容量与网络节点介数的最大值成反比的结论, 提出了一种复杂网络加边扩容的策略, 并与最低度添加边和最长最短路径添加边策略进行分析比较。实验表明: 在添加边数目相同的条件下, 提出的添加边策略不仅能有效减少网络平均最短路径, 还可以最大化提高网络的容量。

关键词: 复杂网络; 加边扩容; 网络容量; 介数

中图分类号: TP393.02

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2015)06-1839-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2015.06.053

Effective strategy of adding links for maximizing traffic capacity of complex networks

Zhao Yanxin, Li Li, Wang Xiaoming

(School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: The strategies to improve the traffic capacity of networks have become one of the hot topics in the field of complex networks recently. By far, the strategies to enhance the traffic capacity via removing links have been researched a great deal in previous studies while strategies to improve the traffic capacity via adding links have been considered rarely. This paper proposed an efficient strategy to enhance traffic capacity via the process of links increment based on the theory that the maximum node betweenness was inversely proportional to the traffic capacity of networks. The obtained results indicate that the proposed strategy of adding links can not only effectively reduce the average shortest path, but also mostly enhance the traffic capacity of networks compared with the lowest degree strategy and the longest shortest path strategy when the same number of links are added.

Key words: complex network; capacity improvement via adding links; traffic capacity; betweenness

0 引言

随着互联网等大规模通信网络的增长, 如何有效提高网络的传输性能已经成为一个重要的研究领域, 受到越来越多研究人员的关注。迄今为止, 已有大量研究表明, 真实网络往往具有小世界特征^[1]、无标度特征^[2], 因而许多研究人员基于上述特征建立复杂网络模型对复杂网络传播特征、本质属性等加以研究。社团结构是继小世界和无标度特性之后发现的最普遍和最重要的拓扑结构属性之一^[3]。通过网络节点之间紧密程度将节点划分为不同的簇类, 从而可以将规模巨大的网络简化成小规模网络加以研究。

目前, 针对网络扩容的研究已经颇为丰富。大概可以分为两种: 对网络路由策略的优化^[4-9]和改善网络拓扑结构^[10-13]。基于网络路由策略优化被认为是一种“软”策略, 因为这种策略往往不需要对网络拓扑结构进行改变。比较典型的路由策略有最短路径路由^[4, 5]、基于非中间节点传输路由^[6]、集合静态拓扑结构和动态传输信息的路由^[7, 8]以及局部路由策略^[9]等。另外一种基于改善网络拓扑结构以增大网络容量的策略

被称为“硬”策略。比如, Liu等人^[10]提出的高度优先策略, 通过关闭具有较大连接度节点之间的链路以提高网络的负载容量。类似地, Zhang等人^[11]提出关闭高介数节点之间的链路以提高网络负载容量。Huang等人^[12]基于上述研究提出一种更加有效的边移除策略。后来, 蔡君等人^[13]基于删边对社团特性贡献度的大小提出了一种无标度网络上的容量管理策略。

然而, 考虑到添加边的成本, 上述研究更多只是基于删边策略考虑网络的扩容效果。随着社会的快速发展, 现实中通信网络规模的不断扩大, 网络规划中往往需要考虑加边策略对网络的扩容效果。据笔者所知, 目前对复杂网络加边策略的研究少之甚少, 只有Huang等人^[14]提出一种基于最长最短路径添加边和点的策略。因此, 本文基于上述研究的不足, 提出一种复杂网络更加有效的加边策略。

本文提出的加边策略主要是在文献[14]的基础上, 基于网络负载容量和节点最大介数成反比的思想而提出来的。首先在最长最短路径的节点对中添加边, 由于最短路径往往经过网络中的hub节点(度数较大), 当对网络中最短路径添加边以后, 能够有效缓解hub节点负担, 从而提高网络负载容量; 其

收稿日期: 2014-04-02; 修回日期: 2014-05-14 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61173094, 61373083, 61303092); 陕西省自然科学基金计划资助项目(2014JQ8305)

作者简介: 赵焱鑫(1990-), 男, 浙江江山人, 硕士, 主要研究方向为可生存性网络、复杂系统(js. zyx2008@163.com); 李黎(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为可生存性网络、复杂系统; 王小明(1964-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为社会网络、网络信息系统安全、普适计算和复杂系统等。

次,由于网络容量与网络中节点最大介数成反比,所以在最长最短路径节点对中选择一对节点添加边,使得网络节点的最大介数在所有节点对中最小,从而最大化地提高网络容量。通过仿真实验证明,在添加边数相同的条件下,本文提出的添加边策略相比于之前最低度添加边和最长最短路径添加边策略,不仅能够有效减少网络平均最短路径,还能最大化提高网络容量。

1 网络模型

为了分析和验证复杂网络中本文提出的加边扩容策略的有效性,本章引入了被广泛使用的 Watts-Strogatz (WS) 小世界网络^[1]、Barabási-Albert (BA) 无标度网络^[2]模型和网络流量模型,并给出了网络容量的定义。

1.1 WS 和 BA 网络模型

WS 小世界网络是具有较高聚集系数和较短平均路径长度的网络模型。由 Watts 等人在 1998 年提出,构造算法为:先将 N 个节点排列成一个环,且每个节点都与离它最近的 k 个节点相连,从而得到一个规则网络;然后以概率 p 随机重连网络中的每条边,其中 $p \in [0, 1]$ 。

BA 无标度网络是节点度异质化程度较高的网络模型,比如 Internet、Facebook 等社交网络。其节点度服从幂律分布 $p(k) \sim k^{-\gamma}$,其中 k 表示节点度数, γ 是常数。BA 网络包含两个主要特征: a) 增长性,即网络规模是不断扩大的; b) 优先连接特性,即新的节点更倾向于与那些具有较高连接度的节点相连接。其构造算法为:初始网络 m_0 个两两相连的节点;每一步加入一个节点与 m ($m < m_0$) 个节点以概率 $\Pi(k_i) = k_i / \sum_j k_j$ 相连,其中 k_i 表示节点 i 的度。

1.2 流量模型

本文采用的是在文献[11, 15]中使用的流量模型,具体描述如下:把一个具有 N 个节点的网络的每个节点看做主机和路由器的结合体,同时具有产生、转发、接收数据包的能力;每个时间步全网中产生数据包的速率为 R ;每个节点 i 数据包处理能力为 C_i ;节点拥有无限长的缓冲队列,在缓冲队列的数据包将按照先入先出原则进行处理;新产生的数据包选择源节点和目标节点都是随机的;数据包一旦到达目标节点就从网络中删除。

1.3 容量定义

当网络中产生新数据包的速率 R 逐渐增加时,网络会从自由态(非拥塞态)相变为拥塞状态,这个临界的数据包产生速率即可用来度量通信网络系统的最大通信能力,把这个相变点对应的临界数据包产生速率 R_c 称为网络的吞吐能力,即网络容量,它是自由态下允许的最大数据包产生的速率。只要数据包产生的速度不超过 R_c 这个阈值,网络上的信息流就畅通无阻,网络处于有效状态。为了表征网络状态的迁移,准确描述从自由态到拥塞态的相变临界点,需要引入序参量(order parameter)的概念^[16]。

$$\mu(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle \Delta W \rangle}{R \Delta t} \quad (1)$$

其中: $\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t)$ 表示从时刻 t 到 $t + \Delta t$ 网络中累积的数据包个数, $W(t)$ 是时刻 t 网络中存在的数据包个数, $\langle \Delta W \rangle$ 表示对时间窗口 Δt 对应的 ΔW 求平均。因此,序参量

$\mu(R)$ 表示了发包速率 R 下网络累积的数据包与产生的数据包的比率。当 $R \leq R_c$ 时, $\langle \Delta W \rangle = 0$, 序参量 $\mu = 0$, 网络处于畅通自由的状态;当 $R > R_c$ 时,序参量为非零正值,网络将处于拥塞状态。根据文献[15, 17]可知

$$R_c = \min_{i \in V} \frac{C(i) N(N-1)}{B^F(i)} \quad (2)$$

其中:

$$B^F(i) = \sum_{u \neq v} \frac{\delta_{(i)}^F(u, v)}{\delta^F(u, v)} \quad (3)$$

$\delta^F(u, v)$ 表示在路由策略 F 下节点 u 和 v 候选路径数目, $\delta_{(i)}^F(u, v)$ 表示在路由策略 F 下节点 u 和 v 经过节点 i 的候选路径数目。因此,由式(2)可推断出网络容量理论值:

$$R_c = \frac{C(i) N(N-1)}{\max_i B^F(i)} \quad (4)$$

即网络容量值 R_c 与网络中节点在路由策略 F 下的最大介数有关。

2 加边扩容算法

通常一个网络可以用集合 $G = (V, E)$ 表示,其中 V 是顶点集合, E 是所有连接边的集合。针对网络容量值 R_c 与节点最大介数之间的关系,本文提出一种加边扩容的策略,记为 OS,具体步骤如下:

- 计算网络中未连接的任意两个节点之间的最短路径,存储于矩阵 Q 。
- 在矩阵 Q 中找到最长的最短路径及对应的节点对集合 E_k 。
- 依次选择添加边 $(u, v) \in E_k$, 并计算网络节点介数最大值 $B_{\max}(u, v)$ 。
- 在所有 $(u, v) \in E_k$ 中选择 (u_m, v_m) 添加边,使得 $B_{\max}(u_m, v_m) = \min\{B_{\max}(u, v) | (u, v) \in E_k\}$ 。
- 重复上述过程添加边,直到添加边数目达到 f_d 。

上述算法实质是在最短路径最长的节点对中,选择一对节点添加边,使得网络节点最大介数相比于对其他节点对之间进行添加边是最小的。由于网络中最短路径往往经过网络中的 hub 节点,所以在最短路径的节点对之间添加边能够有效促进数据包在转发过程中避开 hub 节点,从而缓解 hub 节点的负担并提高网络负载容量。而选择在最长的最短路径节点对之间添加边能够有效减少网络中平均最短路径有利于网络数据包的传输;其次,根据式(2),网络容量与网络节点最大介数成反比,因此本文算法在满足最长最短路径节点对中选择一对节点添加边,使得网络节点最大介数是最小的,从而最大化地提高网络容量。

由于在最短路径节点对中每次计算网络节点介数采用 Dijkstra 算法,若视该算法的时间复杂度为 1,则上述算法时间复杂度为 $O(|E_k| \times f_d)$ 。然而,对每个顶点求最短路径采用 Dijkstra 算法复杂度为 $O(N^2)$,若对整个网络采用 Dijkstra 算法,其时间复杂度为 $O(N^3)$ 。因此,可知该算法的时间复杂度是较高的,不适合计算大规模的网络。目前基于复杂网络聚类研究产生的聚类算法^[18-20],可以将大规模的网络根据节点之间的紧密程度划分为不同簇类。因此可以将大规模网络映射到较小规模网络上并加以研究,而上述算法就是基于较小规模网络进行研究的,其具有较高的研究和应用价值。

3 仿真实验

在仿真实验中,针对平均最短路径 L_{av} 和网络容量 R_c 两个指标,将本文提出的添加边策略(记为 OS)和最低度添加边(记为 DS)与最长最短路径添加边^[14](记为 LS)进行比较。不失一般性,设置 WS 网络节点数 $N=100$, $k=3$, 重连概率 $p=0.02$; BA 网络节点数 $N=100$, 初始节点数 $m_0=5$, 每次引入新节点生成边数 $m=1$ 。此外假定每个节点转发数据包的能力均为 1, 即 $\forall i=1, 2, \dots, N, C_i=1$, 在最短路径路由策略下^[4, 5]对三种添加边策略进行比较。每组实验将在 50 种不同网络下分别运行 100 次实验。

首先,针对网络节点之间的平均最短路径 L_{av} 指标进行分析,如图 1 和 2 所示。由图可以发现,OS 和 LS 添加边策略对减少网络中节点之间平均最短路径 L_{av} 效果差不多,且效果比 DS 添加边策略更显著。

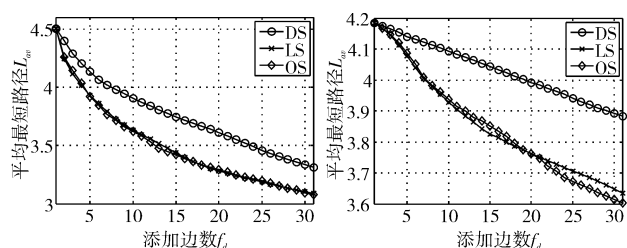


图1 WS网络添加边数目 f_d 与平均最短路径 L_{av} 的关系

图2 BA网络添加边数目 f_d 与平均最短路径 L_{av} 的关系

其次,针对网络容量 R_c 指标进行分析,如图 3 和 4 所示。由图可以发现,在 WS 和 BA 网络中随着添加边数目的增加,上述三种添加边策略都可以提高网络容量 R_c , 且在添加边数目相同的条件下,三种添加边策略对网络容量提升满足 $OS > LS > DS$ 。

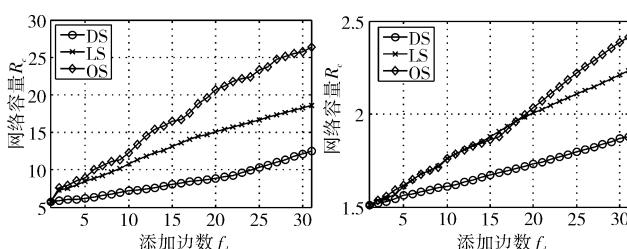


图3 WS网络添加边数目 f_d 与网络容量 R_c 的关系

图4 BA网络添加边数目 f_d 与网络容量 R_c 的关系

通过上述仿真实验可以发现,相比于最低度添加边和最长最短路径添加边策略,在添加边数相同的条件下,本文提出的添加边策略不仅可以有效改善网络节点之间的平均最短路径,而且可以最大程度地提高网络容量。

4 结束语

复杂网络删边扩容近年来已经有较多的研究,然而加边扩容策略研究却一直处于空白。针对复杂网络加边扩容研究的不足,本文提出一种基于通过减少网络节点最大介数提高网络容量的添加边策略,并分别在 WS 小世界网络和 BA 无标度网络中,与其他添加边策略进行比较。结果表明,在添加边数相同的条件下,本文提出的添加边策略不仅能够有效地减少网络平均最短路径,而且能够最大化地提高网络容量。

参考文献:

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small-world networks [J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [2] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [3] 袁辉辉,曹玉林,王小明. 基于边聚类的多层社会网络社团发现算法[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(2): 351-353.
- [4] Goh K I, Kahng B, Kim D. Universal behavior of load distribution in scale-free networks [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(27): 278701.
- [5] Zhao Liang, Lai Yingcheng, Park K, et al. Onset of traffic congestion in complex networks [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(2): 026125.
- [6] Guimera R, Arenas A, Diza-Guilera A. Communication and optimal hierarchical networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2001, 299(1): 247-252.
- [7] Chen Zhenyi, Wang Xiaofan. Effects of network structure and routing strategy on network capacity [J]. *Physical Review E*, 2006, 73(3): 036107.
- [8] Wang Wenxu, Yin Chuanyang, Yan Gang, et al. Integrating local static and dynamic information for routing traffic [J]. *Physical Review E*, 2006, 74(1): 016101.
- [9] Wang Wenxu, Wang Binghong, Yin Chuanyang, et al. Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network [J]. *Physical Review E*, 2006, 73(2): 026111.
- [10] Liu Zhe, Hu Maobin, Jiang Rui, et al. Method to enhance traffic capacity for scale-free networks [J]. *Physical Review E*, 2007, 76(3): 037101.
- [11] Zhang Guoqing, Wang Di, Li Guojie. Enhancing the transmission efficiency by edge deletion in scale-free networks [J]. *Physical Review E*, 2007, 76(1): 017101.
- [12] Huang Wei, Chow T W S. An efficient strategy for enhancing traffic capacity by removing links in scale-free networks [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2010, 2010(1): P01016.
- [13] 蔡君,余顺争. 一种有效提高无标度网络负载容量的管理策略[J]. *物理学报*, 2013, 62(5): 58901-058901.
- [14] Huang Wei, Chow T W S. Effective strategy of adding nodes and links for maximizing the traffic capacity of scale-free network [J]. *Chaos: an Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2010, 20(3): 033123.
- [15] 张国清,程苏琦. 小世界网络中的删边扩容效应[J]. *中国科学: 信息科学*, 2012, 42(2): 151-160.
- [16] Arenas A, Diaz-Guilera A, Guimera R. Communication in networks with hierarchical branching [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(14): 3196-3199.
- [17] Guimera R, Diaz-Guilera A, Vega-Redondo F, et al. Optimal network topologies for local search with congestion [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(24): 248701.
- [18] 蔡君,余顺争. 基于随机聚类采样算法的复杂网络社团探测[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(12): 3560-3563.
- [19] 李峻金,向阳,牛鹏,等. 一种新的复杂网络聚类算法[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(6): 2097-2099.
- [20] Guimera R, Amaral L A N. Functional cartography of complex metabolic networks [J]. *Nature*, 2005, 433(7028): 895-900.