

节点容量资源限制下的复杂网络传输过程分析

于 灏¹, 王新华¹, 王 晨^{1,3}, 马 妍², 单林栋⁴

(1. 山东科技大学 经济管理学院, 山东 青岛 266590; 2. 青岛理工大学 经济与贸易学院, 山东 青岛 266520;
3. 煤炭工业规划设计研究院有限公司, 北京 100120; 4. 青岛东软科创软件科技有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要:研究了网络节点容量资源限制下的复杂网络传输问题。通过构建带有节点容量限制的复杂网络传输流量模型,分析三种节点容量分配方式:平均分配节点容量,根据节点度分配节点容量,根据节点介数分配节点容量。考虑网络总节点容量固定情况下,分别应用三种节点容量分配方式,通过两种路由策略,在三种复杂网络的传输过程中进行仿真对比,发现根据节点介数分配节点容量的方式所获得的网络传输性能最优,同时,根据节点度的分配方式优于平均分配的节点容量分配方式。

关键词:复杂网络;节点容量限制;节点容量分配;介数;负载

中图分类号:N941; TP11

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)04-0067-05

Traffic Dynamics of Complex Network with Limited Vertex Resources

Yu Hao¹, Wang Xinhua¹, Wang Chen^{1,3}, Ma Yan², Shan Lindong⁴

(1. College of Economics and Management, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. School of Economy and Tradition, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;

3. Planning & Design Research Institute of Coal Industry Co. Ltd, Beijing 100120, China;

4. Qingdao Neusoft Kechuang Software Technology Co. Ltd, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract: The network traffic performance with limited vertex resources was researched. By establishing the complex traffic flow model with limited vertex resources, three types of vertex capacity allocation methods, namely, homogeneous allocation, allocation based on degree, allocation based on betweenness, were analyzed. The three vertex capacity allocation methods were respectively applied when the total network vertex capacity were fixed. After the simulated comparison of the traffic dynamics in three different complex networks by means of two routing strategies, it has been found that the network has the optimal traffic performance under the allocation based on betweenness, and that the allocation based on vertex degree is superior to homogeneous allocation.

Key words: complex networks; limited vertex capacity; the allocation of vertex capacity; betweenness; load

考虑任何现实系统时都不能忽略资源的有限性,在网络系统传输问题上也不例外。现实网络系统传输发生拥堵的主要原因来自于网络资源的限制。网络传输中的资源限制主要包括两个方面:①网络节点资源的有限性。节点资源包括节点处理能力和节点容量^[1-2]两个方面,即网络节点单位时间处理数据包的能力和缓冲区内存储待处理数据包数量的上限,如通信网络路由器的转发能力和缓冲区的队列长度限制,交通网络

收稿日期:2015-05-12

基金项目:青岛市科技计划项目(13-5-2-34-pt);青岛市博士后应用研究项目(20140928)

作者简介:于 灏(1978—),男,黑龙江五常人,讲师,博士,主要从事复杂系统建模与优化、复杂网络传输动力学方向的研究。
E-mail: yh2001v20@163.com

王新华(1960—),男,山东平度人,教授,博士生导师,主要从事复杂系统理论、系统评价理论与技术等方向的研究,本文通信作者。E-mail: xinhua wang163@tom.com

中交通枢纽站点的转运能力和容纳能力等。②网络中连接边的容量(带宽)资源的有限性。主要是指网络中连接边在单位时间运送数据包的能力^[2-4],如通信网络的传输带宽限制、交通道路上承载车流量的能力等。

本研究主要分析网络传输过程中,网络节点资源有限条件下的网络传输负载能力。在所有复杂网络传输研究中都会考虑节点处理能力的问题,而为了简化研究,多数研究都把节点容量假设为无限大^[1-8],因此,本研究中节点资源约束主要从节点容量资源有限方面考虑。为了着重突出节点容量资源限制对复杂网络传输的影响,暂不考虑连接边的带宽限制。

1 节点容量资源限制下的复杂网络流量模型

为研究节点资源限制下的网络传输性能,构建带有节点容量限制的流量模型。这个模型中,网络中所有节点被看作是主机和路由器的结合体。假设网络传输从零负载开始,每单位时间内新加入 R 个数据包,每个新加入的数据包随机地在网络中选择出发节点和目的节点,到达目的节点后的数据包自动从网络上移除。每个节点处理数据包的能力为 C_i 。假设网络中总的节点容量为 L_q ,节点 i 所能容纳的数据包的最大缓冲队列长度为 L_q^i 。当某一节点中的数据包数量达到该节点的缓冲区队列长度上限时,则该节点不再产生新的数据包,同时也不再接收其他数据包的进入,直到该节点有数据包传出,腾出缓冲队列空间。在每个节点缓冲队列中等待发送的数据包都是按照先入先出(first in first out, FIFO)的规则按顺序进行处理。节点间连接边的运送能力不受限制。

2 节点容量的分配方式

网络中总节点容量固定情况下,节点容量分配方式分为两类。

1) 匀质化节点容量分配(平均分配),是指把具有 N 个节点的网络的总节点容量平均分配给每个节点,即:任意节点 i 的容量为

$$L_q^i = \frac{L_q}{N} \quad (1)$$

2) 异质化节点容量分配,即把节点容量按照下面两种方式分配。

① 根据网络中节点的度 k 分配节点容量:

$$L_q^i = \frac{k_i}{\sum_{j=1}^N k_j} L_q \quad (2)$$

② 根据网络节点的介数 g ^[4-5,9] 分配节点容量:

$$L_q^i = \frac{g_i}{\sum_{j=1}^N g_j} L_q \quad (3)$$

3 仿真分析

采用不同的节点容量分配方案,对复杂网络传输问题进行研究。分别选取 Erdős-Rényi (ER) 随机网络^[10]、Watts-Strogatz (WS) 小世界网络^[11] 和 Barabási-Albert (BA) 无标度网络^[12] 作为网络仿真的拓扑平台。网络规模都为 $N = 100$ 个节点,平均度 $\langle k \rangle = 4$,每个节点的处理能力 $C_i = 10$,网络总的节点容量 $L_q = 1000$ 。仿真数据结果取 50 次独立实验结果的平均值。

仿真中的具体流量模型描述如下:网络中的每个节点仍被看作具备主机和路由器的功能,具有产生、接收和转发数据包的能力;每个节点处理数据包能力为 C_i ;网络中总的节点容量为 L_q ,节点 i 的容量为 L_q^i (分别为式(1)、式(2)、式(3)),当节点达到其容量上限时,数据包在该节点既不会产生也不会流入,直到有数据包流出,腾出缓冲区空间;数据包传递仍然遵循 FIFO 原则。路由策略分别采用最短路径路由(shortest path routin, SPR)策略和文献[4]中基于全局和局部信息(G-L)的路由策略,其中 $\alpha = 0.7$ 。

网络传输过程中的流量状态变化使用状态相变参数 η 来描述^[13-14]：

$$\eta(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\Delta W(t)}{R} \quad (4)$$

其中, $W(t)$ 为 t 时刻网络中总的数据包数量。在网络流量状态由自由流状态向拥塞状态转变过程中, 存在一个数据包产生率的临界值 R_c 。当 $R < R_c$ 时, 网络系统中产生的数据包和到达目标节点的数据包数量基本相抵, 此时 η 值近似为零, 网络传输系统处于稳定的自由流状态; 当 $R > R_c$ 时, 网络传输系统不能及时、完全地消化新产生的数据包, 此时网络传输系统进入拥塞状态, 且 η 值伴随着数据包产生速率 R 的增加而增大, 同时 η 值越大, 显示拥塞程度越高。最终 $\eta = 1$ 时, 网络传输系统处于完全堵塞状态, 此时代表网络中新产生的数据包一个都不能传出, 全部滞留在网络中。网络传输性能的关键指标值仍然用流量状态相变临界值 R_c 来衡量。

1) 节点容量资源匀质化分配时, 即 $L_q^i = L_q/N$ 。

图 1 是分别采用最短路径路由策略 (SPR) 和 G-L 路由策略时, ER 随机网络上数据包产生率反映的流量状态变化情况。图 2 是分别采用 SPR 和 G-L 路由策略时, WS 小世界网络上数据包产生率反映的流量状态变化情况。图 3 是分别采用 SPR 和 G-L 路由策略时, BA 无标度网络上数据包产生率反映的流量状态变化情况。

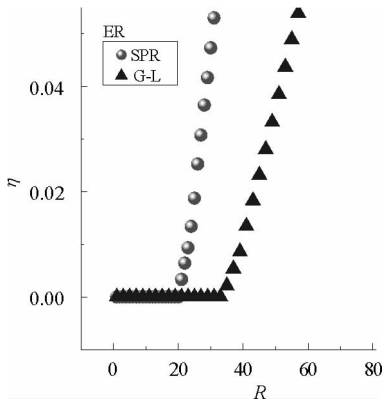


图 1 “平均”分配方式下 ER 网络流量

Fig. 1 Using “equal division” allocation, traffic in ER network

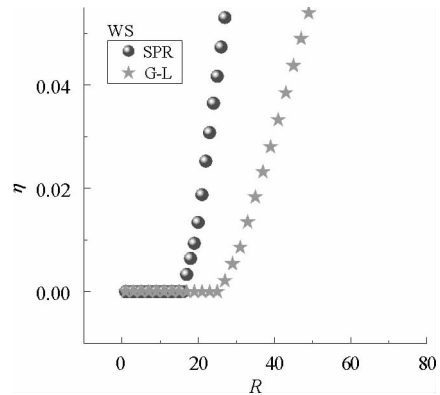


图 2 “平均”分配方式下 WS 网络流量

Fig. 2 Using “equal division” allocation, traffic in WS network

2) 节点容量资源根据节点度进行分配时, 即 $L_q^i = L_q k_i / \sum_{j=1}^N k_j$ 。

图 4 是分别采用 SPR 和 G-L 路由策略时, ER 随机网络上数据包产生率反映的流量状态变化情况。图 5 是分别采用 SPR 和 G-L 路由策略时, WS 小世界网络上数据包产生率反映的流量状态变化情况。图 6 是分别采用 SPR 和 G-L 路由策略时, BA 无标度网络上数据包产生率反映的流量状态变化情况。

3) 节点容量资源根据节点度进行分配时, 即 $L_q^i = L_q g_i / \sum_{j=1}^N g_j$ 。

图 7 是分别采用 SPR 和 G-L 路由策略时, ER 随

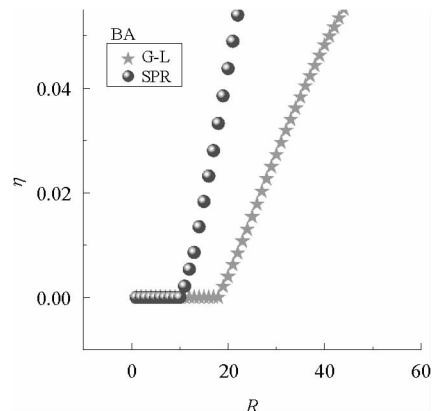


图 3 “平均”分配方式下 BA 网络流量

Fig. 3 Using “equal division” allocation, traffic in BA network

机网络上数据包产生率反映的流量状态变化情况。图 8 是分别采用 SPR 和 G-L 路由策略时,WS 小世界网络上数据包产生率反映的流量状态变化情况。图 9 是分别采用 SPR 和 G-L 路由策略时,BA 无标度网络上数据包产生率反映的流量状态变化情况。

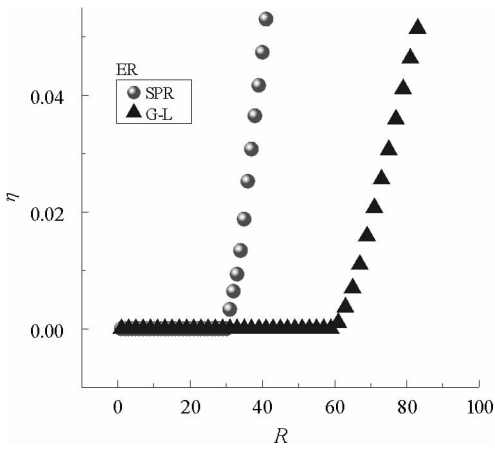


图 4 “度”分配方式下 ER 网络流量
Fig. 4 Using “degree” allocation,
traffic in ER network

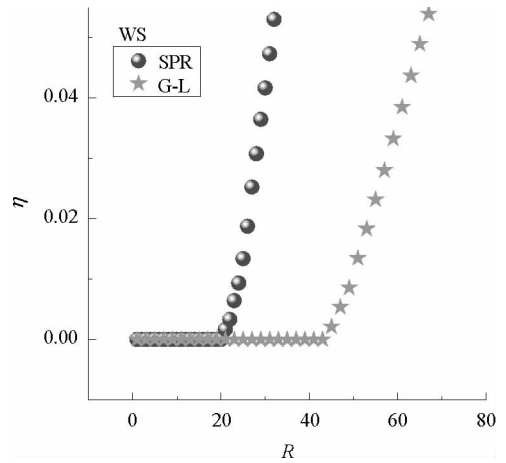


图 5 “度”分配方式下 WS 网络流量
Fig. 5 Using “degree” allocation,
traffic in WS network

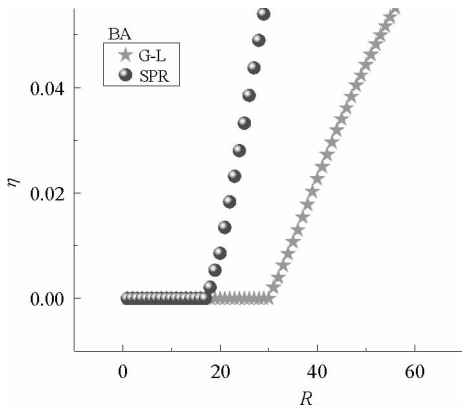


图 6 “度”分配方式下,BA 网络流量
Fig. 6 Using “degree” allocation,
traffic in BA network

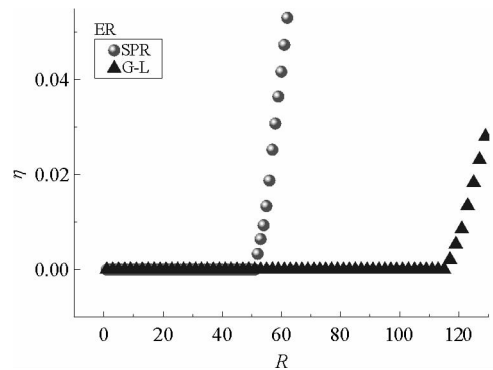


图 7 “介数”分配方式下 ER 网络流量
Fig. 7 Using “betweenness” allocation,
traffic in ER network

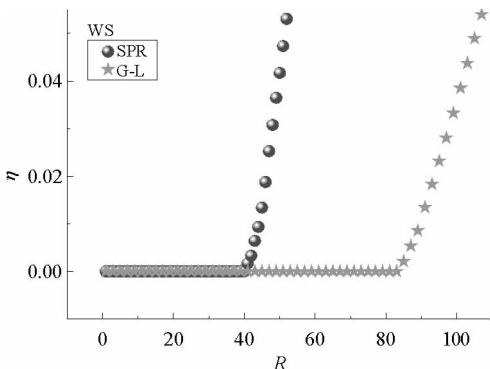


图 8 “介数”分配方式下,WS 网络流量
Fig. 8 Using “betweenness” allocation,
traffic in WS network

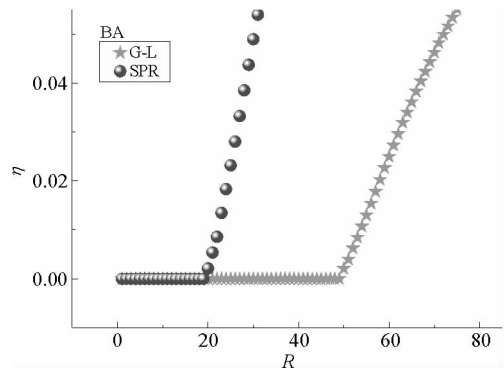


图 9 “介数”分配方式下,BA 网络流量
Fig. 9 Using “betweenness” allocation,
traffic in BA network

对比三种节点容量资源分配方案可以看出,无论在何种网络中,相同节点容量分配时采用 G-L 路由策略的网络负载能力都要优于采用最短路由策略(SPR)的网络负载能力。对比 ER 随机网络下分别采用三种节点容量分配方案的网络最大负载能力(如图 1、图 4、图 7)发现,当采用同一种路由策略时,节点容量资源根据网络节点介数分配时网络负载能力最大,其次是根据网络节点度来分配节点容量资源,而根据网络节点容量资源平均分配时最小。同样,在 WS 小世界网络和 BA 无标度网络中,也存在同样的情况。因此,比较这三种节点容量资源分配方式,根据网络节点介数分配节点容量资源的方案是使得网络传输性能最优的最佳方案。

4 结束语

节点容量的限制是造成传输不畅、产生网络拥塞的主要原因之一。考虑节点容量受限条件下的传输以及合理分配节点容量,对缓解网络传输拥塞、提高网络负载能力具有重要意义。

重点研究网络节点容量资源限制下的复杂网络传输问题,构建了带有节点容量限制的复杂网络传输流量模型。根据模拟结果,得出基于节点介数的节点容量分配方案对提高网络传输性能具有优势的结论。

在实际应用中,介数作为一种既定网络规模下的全局信息,在网络规模巨大或是动态时变网络结构的环境中,不易精确地获取,因此,在进一步的研究工作中,选取对应实际系统的“有效介数”替代理论介数将是一项有意义的工作。

参考文献:

- [1] Yan G, Zhou T B, Hu B H. Efficient routing on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2006, 73: 064108.
- [2] Ling X, Hu M B, Du W B, et al. Bandwidth allocation strategy for traffic systems of scale-free network[J]. *Physics Letters A*, 2010, 374(48): 4825-4830.
- [3] 于灏, 周玉成, 井元伟, 等. 固定带宽下的无标度网络数据传输流量分析[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(9): 1226-1229.
Yu Hao, Zhou Yu Cheng, Jing Yuanwei, et al. Dynamic analysis of scale-free network traffic with fixed bandwidth[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2010, 31(9): 1226-1229.
- [4] 于灏, 周玉成, 井元伟, 等. 异质化带宽分配下的复杂网络数据流负载问题研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(8): 080502.
Yu Hao, Zhou Yu Cheng, Jing Yuanwei, et al. Study on traffic dynamics of the complex networks with the heterogeneous bandwidth allocation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 080502.
- [5] 于灏, 马妍, 王新华, 等. 随机带宽分配对复杂网络传输性能的影响分析[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2015(1): 80-84.
Yu Hao, Ma Yan, Wang Xinhua, et al. Impact of random bandwidth allocation on transmission of complex networks[J]. *Complex System Complexity Science*, 2015(1): 80-84.
- [6] Chen Z Y, Wang X F. A congestion awareness routing strategy for scale-free networks with tunable clustering[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 364: 595-602.
- [7] 王丹, 于灏, 井元伟, 等. 基于感知流量算法的复杂网络拥塞问题研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 6802-6808.
Wang Dan, Yu Hao, Jing Yuanwei, et al. Study on the congestion in complex network based on traffic awareness algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 6802-6808.
- [8] Wang D, Jing Y W, Zhang S Y. Traffic dynamics based on a traffic awareness routing strategy on scale-free networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2008, 387: 3001-3007.
- [9] 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.
Zhang Guoqing, Cheng Suqi. Enhancing network capacity effects of edge-removal in small-world networks[J]. *Science China: Information Sciences*, 2012, 42(2): 151-160.
- [10] Erdős P, Rényi A. On random graphs[J]. *Publicationes Mathematicae*, 1959, 6: 290-297.
- [11] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [12] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [13] Arenas A, Cabrales A, Diaz-Guilera A, et al. Search and congestion in complex networks[J]. *Lecture Notes in Physics*, 2003, 625: 175-194.
- [14] Arenas A, Danon L, Diaz-Guilera A, et al. Local search with congestion in complex communication networks[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, 3038: 1078-1085.