

无标度网络上队列资源分配研究*

濮存来[†] 裴文江 缪瑞华 周思源 王 开

(东南大学信息科学与工程学院, 南京 210096)

(2009 年 12 月 3 日收到; 2010 年 1 月 22 日收到修改稿)

研究了节点队列资源有限的条件下, 无标度网络上的信息流动力学过程, 发现了网络由自由流通到拥塞的相变现象, 提出了一种基于节点度的队列资源分配模型. 模型的核心是使节点 i 的队列长度与 k_i^β 成正比 (k_i 为节点 i 的度, β 为分配参数). 仿真结果表明, 在网络使用最短路径算法进行信息包传送的条件下, β 近似等于 1.25 时队列资源分配最合理, 网络容量最大, 且该最佳值与队列总资源多少以及网络的规模无关.

关键词: 无标度网络, 队列, 网络容量, 路由

PACC: 0560, 0570F

1. 引 言

近年来, 自然界和人类社会的各种各样的复杂网络受到了来自物理学、社会学、生态学以及工程技术等领域众多学者的密切关注^[1-8]. 网络的拓扑结构特征对其上发生的动力学过程具有重要影响, 这一结论已被证实并为人广泛接受. 例如, 网络的无标度特性使得病毒传播的阈值随着网络规模的增加而不断减小^[9], 也使得网络具有较强的抗随机攻击的能力, 但是对蓄意攻击却表现出脆弱性^[10]. 网络度分布越均匀, 平均路径长度越小, 聚类系数越小对网络同步过程越有利^[11].

人类社会对因特网、万维网和电话网等通信网络的依赖不断增强. 加速增加的业务流量对网络的传输延时和承载能力也提出了更高的要求. 信息的传播作为通信网络上最重要的动力学过程, 对其研究具有十分重要的现实意义. Arenas 等人^[12]引入包生成速率, 无限队列资源, 以及序参数来研究信息流动力学过程, 观察到了网络由自由流通状态到拥塞状态的相变现象, 并给出了一种讨论网络容量的一般方法. 此后学术界展开了对复杂网络容量的研究. 该类研究通常从网络拓扑结构、节点处理能力和路由策略三个方面入手. 研究显示网络中节点度

分布越均匀, 网络容量越大^[13]. 节点的发送能力越强, 网络容量也越大^[14,15]. Zhang 等人^[16]研究发现, 删除网络中易拥塞的边网络容量会有明显增大. 此外, 大量的研究都集中在寻找能减轻网络拥塞的路由策略上. 路由策略可以分为全局路由和局部路由两类. 全局路由包括最短路由^[17]、有效路由^[14]以及优化介数^[18]等, 该类研究主要是通过最小化某种代价函数(例如路径中的跳数和、路径节点的度数和、网络最大介数等)来选择信息包传输的最佳路径. 局部路由包括随机行走^[19,20]、一阶邻居搜索^[21]、二阶邻居搜索^[22]、局部信息与动态信息结合行走^[15]等等.

到目前为止, 关于信息流方面的研究通常都是假设网络节点的队列无限长, 从而忽略了队列长度对信息流动力学的影响. 然而, 实际通信网络中的存储队列资源总是有限的^[23,24], 网络中节点的队列也是有限长的, 可储存信息包的数量总是有限的. 节点的队列长度对信息流动力学有何影响, 如何合理的分配队列资源, 这两个问题还没能得到很好的回答. 本文研究了节点队列资源有限的信息流动力学过程, 发现了网络由自由流通到拥塞的相变现象. 此外, 本文提出了一种基于节点度的队列资源分配模型, 并通过仿真实验得出了最佳的队列资源分配方式.

* 国家自然科学基金(批准号:60672095, 60972165), 国家高技术研究发展计划(863)(批准号:2007AA11Z210), 江苏省自然科学基金(批准号:BK2008281)资助的课题.

[†] E-mail: pucunlai@yahoo.cn

2. 有限队列信息流动力学过程

现实世界中的复杂网络尤其是通信网络大都为无标度网络^[1]. 本文选用最典型的 BA 无标度网络作为承载信息流的网络拓扑. BA 模型^[25]按如下两条机理生成:

1) 拓扑生长. 从含有 m_0 个初始节点的网络开始, 每一时间步向网络中加入一个新节点. 该新节点以 m 条边连入网络.

2) 优先连接. 新节点的每条边与网络中任一旧

节点 i 相连的概率 $p_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$, $\sum_j k_j$ 表示当前网络中

所有节点的度的总和.

本文假设生成的无标度网络中所有节点兼有路由器和主机的功能. 网络队列资源总长度为 L . 所有节点的存储能力即队列长度都为有限值. 节点生成信息包的速率为 R , 包的目的地地址随机分配. 包生成以后被存储到节点队列的末端, 发送时按照先进先出的原则处理. 当节点的队列存满数据包时节点处于拥塞状态, 此时节点既不生成也不接收信息包. 本文采用经典的最短路由算法来传送信息包, 当包到达目的地后即被丢弃. 为了方便讨论, 本文设节点发送信息包的能力为节点队列的长度, 从而仅研究节点队列对信息流动力学过程的影响.

2.1. 实验结果

实验中 BA 无标度网络的节点数 $N = 1000$, $m_0 = m = 3$. 本小节的实验所有节点的队列长度相等. 从图 1 中可以看出, 当包的生成速率 R 较小时, 随着时间的推移网络中拥塞的节点数目始终为零. 当 R 较大时, 网络中拥塞的节点数目迅速增大, 随后趋于平稳, 最终网络中所有的节点都发生拥塞. R 越大, 网络中的节点拥塞也越快. 从图中可以推断, 必定存在一个临界的包生成速率 R_c , 当 $R < R_c$ 时, 网络处于自由流通状态. 当 $R > R_c$ 时, 随着时间的推移网络中必定有节点会发送拥塞, 并最终导致整个网络拥塞. 因此 R_c 有效地衡量了网络容量的大小.

通过改变包的生成速率 R , 并统计网络中拥塞节点数目(对应每一个 R 值, 运行 10000 个时间步)可以估算 R_c . 从图 2 中可以得出该网络包的临界生成速率为 $R_c \approx 0.2$.

为了更清晰地观察拥塞现象, 计录下了网络中

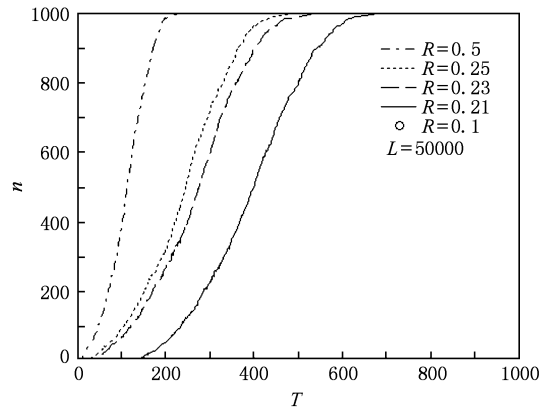


图 1 拥塞节点数目 n 随时间步 T 的变化

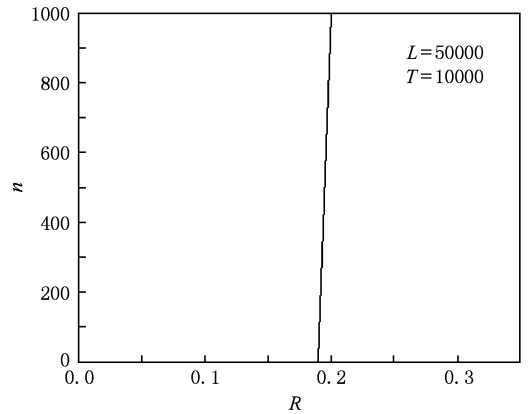


图 2 拥塞节点数目 n 与包生成速率 R 的关系

每一时刻发生拥塞的节点的平均度. 从图 3 中可以看出度大的节点首先发生拥塞, 随后度小的节点也迅速拥塞. 可以推断, 网络中度大的节点承载了更大的信息流量. 在队列长度相等的条件下, 显然度大的节点首先发生拥塞.

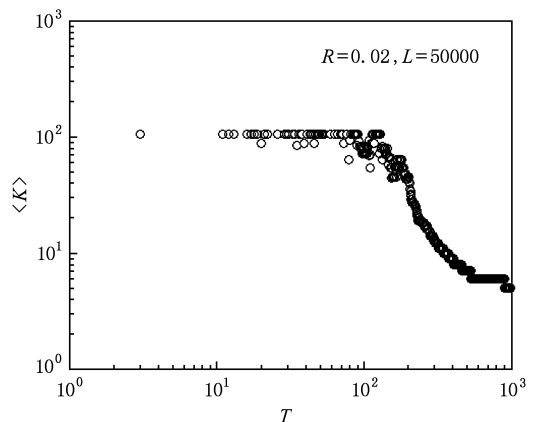


图 3 拥塞节点的平均度 $\langle K \rangle$ 随时间步 T 的变化

3. 队列资源分配模型

在上文有限队列信息流过程的研究中,所有节点的队列长度都相等.那么在队列总资源有限的前提下,是否可以通过合理地分配队列资源来达到提高网络容量的目的,针对该问题本文给出了一种队列资源分配模型.该模型令网络中节点的队列长度与节点度的 β 次方成正比,即节点 i 的队列长度为

$$l_i = L \frac{k_i^\beta}{\sum_j k_j^\beta}, \quad (1)$$

式中 L 为队列资源的总长度, β 为可调参数.

3.1. 仿真结果

通过选择不同的 β 值,得到多种队列资源分配方式,然后将各种队列资源分配方式应用到上文的信息流动力学过程中,记录下各自对应的信息包的临界生成速率 R_c .其中最大的 R_c 意味着最大的网络容量,必然对应着最佳的队列分配方式,从而得到最佳的 β 值.

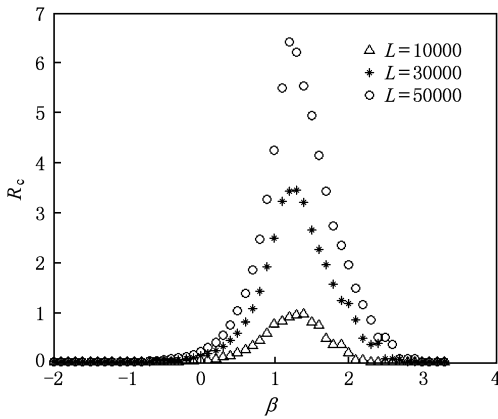


图4 拥塞临界值 R_c 与参数 β 的关系(计算10次后取平均值的结果,网络节点数 $N = 1000, m_0 = m = 3$)

从图4中可以看出 R_c 随着 β 的增大而迅速增大,到达峰值后迅速下降. β 约等于1.25时 R_c 取最大值,此时网络的容量最大.随着网络队列总资源 L 的增大, R_c 相应地增大,但是峰值的位置不变.

接着研究网络规模的增长对该分配模型的影响.从图5中可以看出,随着BA网络节点数的增长,虽然网络容量在不断增加, β 约等于1.25时的分配方式仍然是最合理的队列资源分配.由此可以推断网络规模对该分配模型几乎没有影响,从而体

现了该模型的优越性.

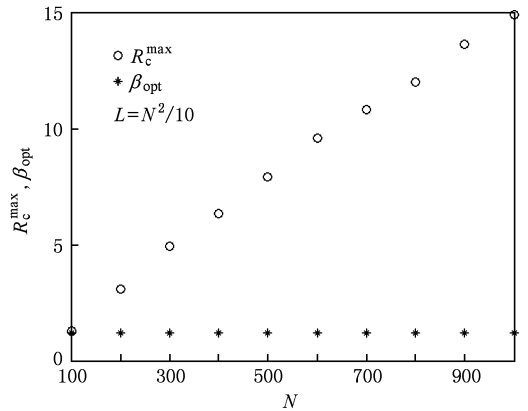


图5 最大拥塞临界值 R_c^{\max} 及其对应的 β_{opt} 与网络节点数 N 的关系(计算10次后取平均值的结果)

为了讨论 β 的最佳值 β_{opt} 约等于1.25的原因,计算出了使用最短路径算法得到的网络中所有节点的介数.网络中任一节点 v 的介数^[26,27]定义如下:

$$g(v) = \sum_{s \neq d} \frac{\sigma_{sd}(v)}{\sigma_{sd}}, \quad (2)$$

式中 σ_{sd} 为 s 点与 d 点之间的最短路径的数目, $\sigma_{sd}(v)$ 表示从 s 点到 d 点的最短路径中,包含 v 点的最短路径的数目.节点介数可以用来估算节点的负载.在无标度网络中,节点的介数和节点的度之间遵循幂律关系,即 $g(k) \sim k^\mu$.可以看出度大的节点比度小的节点承载了更大的流量.从图6中可以看出幂指数 μ 为1.242,与 β_{opt} 近似相等.也就是说节点的介数越大所需的队列资源也越多,两者近似成正比关系.可以推测,本文提出的分配模型与网络中所使用的路由算法相互紧密结合.只有当队列资源

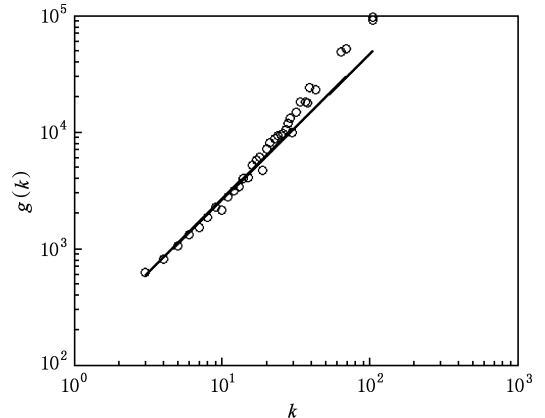


图6 节点的介数 $g(k)$ 与节点度 k 的关系(拟合得到的斜率为1.242,网络参数与图4相同)

的分布与由所使用的路由算法得到的网络负载的分布相一致时,网络的容量达到最大,此时队列长度的分布为最佳的队列资源分配结果.

4. 结 论

目前关于复杂网络上的信息流动力学的研究,通常都是基于 Arenas 等人提出的无限队列信息流模型来讨论网络容量. 本文从客观实际出发,研究

了无标度网络上有限队列资源的信息流动力学过程. 并通过仿真实验观察到了网络由自由流通状态到拥塞状态的相变现象. 接着基于给出的有限队列动力学过程,首次讨论了队列资源的分配问题,提出了一种基于节点度的队列资源分配模型. 仿真结果表明,当队列资源分布与信息包的路由负载分布相同时,网络的容量最大,此时队列资源分配最合理. 该模型得到的结果不受网络的规模和总队列资源数量的影响.

-
- [1] Barabási A L, Albert R 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [2] Newman M E J 2003 *SIAM Review* **45** 167
- [3] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, Chavez M, Hwang D U 2006 *Phys. Rep.* **424** 175
- [4] Li J, Wang B H, Jiang P Q, Zhou T, Wang W X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4051 (in Chinese) [李季、汪秉宏、蒋品群、周涛、王文旭 2006 *物理学报* **55** 4051]
- [5] Huang W, Jiang R, Hu M B, Wu Q S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1306
- [6] Lü L, Zhang C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1462 (in Chinese) [吕翎、张超 2009 *物理学报* **58** 1462]
- [7] Xu D, Li X, Wang X F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1313 (in Chinese) [许丹、李翔、汪小帆 2007 *物理学报* **56** 1313]
- [8] Zhao M, Wang B H, Jiang P Q, Zhou T 2005 *Prog. in Phys.* **25** 273 (in Chinese) [赵明、汪秉宏、蒋品群、周涛 2005 *物理学进展* **25** 273]
- [9] Pastor-Satorras R, Vespignani A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3200
- [10] Albert R, Jeong H, Barabási A L 2000 *Nature* **406** 6794
- [11] Nishikawa T, Motter A, Lai Y C, Hoppensteadt F 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 014101
- [12] Arenas A, Diaz-Guilera A, Guimera R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3196
- [13] Chen Z Y, Wang X F 2006 *Phys. Rev. E* **73** 036107
- [14] Yan G, Zhou T, Hu B, Fu Z Q, Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **73** 046108
- [15] Wang W X, Yin C Y, Yan G, Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **74** 016101
- [16] Zhang G Q, Wang D, Li G J 2007 *Phys. Rev. E* **76** 017101
- [17] Zhou T 2008 *Physica A* **387** 3025
- [18] Danila B, Yu Y, Marsh J A, Bassler K E 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046106
- [19] Noh J D 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 11
- [20] Yang S J 2005 *Phys. Rev. E* **71** 016107
- [21] Wang W X, Wang B H, Yin C Y, Xie Y B, Zhou T 2006 *Phys. Rev. E* **73** 026111
- [22] Yin C Y, Wang B H, Wang W X, Yan G, Yang H J 2006 *Eur. Phys. J. B* **49** 205
- [23] Wu Z X, Wang W X, Yeung K H 2008 *New Journal of Physics* **10** 023025
- [24] Wang W X, Wu Z X, Jiang R, Chen G R, Lai Y C 2009 *Chaos* **19** 033106
- [25] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [26] Newman M E J 2001 *Phys. Rev. E* **64** 016132
- [27] Zhao L, Lai Y C, Park K, Ye N 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026125

Study on queue resource allocation in scale-free networks^{*}

Pu Cun-Lai[†] Pei Wen-Jiang Miao Rui-Hua Zhou Si-Yuan Wang Kai

(*School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

(Received 3 December 2009; revised manuscript received 22 January 2010)

Abstract

In this article, information traffic dynamics in scale-free networks with limited queue resource is investigated firstly. It is found that the network transits from a free flow state to full congestion state with the increase in the packet generation rate. Then, a queue resource allocation model based on node degree is proposed. The core of this model is to make the queue length of node i proportional to k_i^β (k_i being the degree of node i and β being an allocation parameter). Simulations show that the capacity of the scale-free network is maximal when β is about 1.25 for the shortest path algorithm used to transfer information. Furthermore, the optimal value of allocation parameter β is irrelevant to the network size and the amount of queue resource.

Keywords: scale-free network, queue, network capacity, routing

PACC: 0560, 0570F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60672095 and 60972165), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA11Z210), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant No. BK2008281).

[†] E-mail: pucunlai@yahoo.cn