

# 基于感知流量算法的复杂网络拥塞问题研究\*

王 丹<sup>†</sup> 于 灏 井元伟 姜 囡 张嗣瀛

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

(2008 年 9 月 22 日收到 2009 年 3 月 3 日收到修改稿)

研究了在具有感知流量的路由策略下,复杂网络的拓扑结构对网络中传输流量的影响.为了描述数据包传输过程的有效性,通过引入一个状态参数,利用由稳态到拥塞的指标流量相变值来刻画网络的吞吐量.基于每个节点的数据包处理能力与该节点的度或介数成比例提出两种模型并进行仿真.仿真结果表明,平均度相同的情况下,模型 I 中,WS 小世界网络比 ER 随机网络和 BA 无标度网络更容易产生拥塞.模型 II 中,所有网络容量都得到较大的提高,尤其是 WS 小世界网络.但当网络的基本连接参数改变时,哪种模型更利于网络的流量传输,还要依据网络本身的结构特性.

关键词:复杂网络,无标度网络,感知流量,拥塞

PACC:0520,0560,0570J

## 1. 引 言

复杂网络广泛存在于自然界、生物界、工程界和人类社会界<sup>[1-3]</sup>.如地震网络、食物链网络、蛋白质网络、新陈代谢网络、基因调控网络、Internet、万维网、电力网、航空网、铁路网、高速公路网、演员合作网、科学家合作网、科学引文网、朋友关系网、电子邮件网以及金融网络等<sup>[4,5]</sup>.深入研究复杂网络,可以揭示隐藏在自然界、生物界、工程界和人类社会界中多种关乎国计民生的复杂系统中的共同规律.这种一般性规律的揭示对于把握复杂系统的宏观特征和调节复杂网络上的动力学行为都将具有重要意义.

拥塞现象是现实网络中常见的一种动态特性的表现形式.许多实际网络,比如因特网和交通网络等经常会发生拥塞,由此导致信息传输时间的显著增加以及网络整体性能的急剧下降.近来有许多文献对这一网络特性进行了研究<sup>[6-9]</sup>.网络节点产生的大量数据流特别是并发的数据流,是导致网络产生拥塞的主要原因,而且网络本身所具有的一些特性也会对拥塞的产生及蔓延起到一定的作用,比如网络中节点的容量、节点处理数据包的速度、通讯链路的带宽以及网络的拓扑结构等.

衡量通信网络性能的标准之一就是如何在降低传输时延以及降低网络丢包率的同时,使得网络的

吞吐量尽可能的最大化.已有的研究表明,网络拓扑结构的局部或者全局特性以及流量传输的动态过程都会对网络的整体性能产生影响,并且其关系具有耦合性.特别地,如何有效避免拥塞也是网络保持良好通信能力的条件之一.网络拓扑结构特性、动态路由算法以及网络性能三者之间的关系是本文的研究重点.

早期的很多研究都将网络的拓扑结构和网络上发生的动态过程分别进行研究,直到最近才有一些文献开始研究两者之间的耦合关系<sup>[10-14]</sup>.大多数研究都发现在不同的网络拓扑结构上,相似的动态机制却表现出相异的动态行为.另外也有一些文献从优化的角度来研究如何设计最优的拓扑结构,使得网络的数据传输效率最高,并以此来指导现实网络拓扑结构的设计准则<sup>[15,16]</sup>.然而值得注意的是,大多数通信网络都已经具有固定的拓扑结构,因此对其拓扑结构进行任何改动都需要花费巨大代价,甚至有时这种改动是无法实现的.相对来讲,改变现实网络中的动态机制较为可行,比如设计更好的路由算法<sup>[17]</sup>.

本文针对三种网络模型,通过一个最短路径信息和局部拥塞状态相结合的感知流量路由算法,研究了网络拓扑结构和节点处理数据包能力对网络动态流量传输的影响.并引入一个调节参数控制节点处理数据包的能力,根据不同的网络节点数据包处

\* 国家自然科学基金(批准号 62074009)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: wangdan0307@126.com

理能力,提出了两种传输模型.最后通过分析随机网络和无标度网络在不同参数情况下度和介数的分布情况来讨论不同的网络结构的属性是如何对网络拥塞产生影响的.

## 2. 网络结构

### 2.1. ER 随机网络

经典的 ER 随机图模型早在文献 [18] 中就已提出.它的构造方式如下:给定  $N$  个节点并随机加入  $M$  条边,每条边以一致概率  $p$  从  $C_{[N(N-1)/2]}^M$  条可能的边中随机选取. ER 随机图的平均度记为  $k$ ,其值为  $p(N-1) \approx pN$ . 设  $L_{ER}$  为 ER 随机图的平均路径长度,有  $L_{ER} \sim \ln N / \ln k$ . 这种平均路径长度是网络规模对数增长函数的特性,就是典型的小世界特征.在 ER 随机图中,两个节点之间不论是否具有共同的邻居节点,其连接概率均为  $p$ . 因此,其聚类系数是  $C = p = k / N \ll 1$ ,这意味着大规模的稀疏 ER 随机图没有聚类特性.而实际的复杂网络一般都具有明显的聚类特性,也就是说,实际的复杂网络的聚类系数要比相同规模的 ER 随机图的聚类系数高得多. ER 随机图的度分布可用如下 Poisson 分布来表示:

$$P(k) = \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k} \approx \frac{k^k e^{-k}}{k!}. \quad (1)$$

因此, ER 随机图也称为“Poisson 随机图”.

尽管 ER 随机图作为实际复杂网络的模型存在着明显的缺陷,在 20 世纪的后 40 年中, ER 随机图理论一直是研究复杂网络拓扑的基本理论,其中的一些基本思想在目前的复杂网络理论研究中仍然很重要.

### 2.2. WS 小世界网络

Watts 和 Strogatz<sup>[19]</sup>于 1998 年提出了小世界网络模型,称为 WS 小世界模型.该模型可以看作是从规则网络向随机网络的过渡过程,其构造算法如下:给定含有  $N$  个点的最近邻耦合网络,其中每个节点都与它左右相邻的各  $K/2$  个节点相连,以概率  $p$  随机地重新连接网络中的每条边.在 WS 模型中, $p = 0$  对应于完全规则网络, $p = 1$  则对应于完全随机网络,通过调节  $p$  值就可以控制从完全规则网络到完全随机网络的过渡. ER 随机图和 WS 小世界模型的一个共同特征就是网络的连接度分布满足 Poisson 分布.然而,实际的统计数据表明现实中很多网络服

从的是幂律形式的度分布.

### 2.3. 无标度网络

1999 年,Barabási 和 Albert<sup>[20]</sup>提出了一个无标度网络模型,此模型的连接度分布函数具有幂律形式,即  $P(k) \sim k^{-\gamma}$ .但是在 BA 无标度网络模型中,网络的聚类特性没有得到反映,因此本文将采用 Holme 提出的可变聚类无标度网络<sup>[21]</sup>来讨论网络结构对传输流量的影响.该模型在 BA 网络模型的基础上增加了三角连接,描述如下:初始网络具有  $m_0$  个节点,没有任何边相连;每一步加入一个节点  $v$  和  $m$  条边,以概率  $1-q$  进行优先连接,以概率  $\mathbb{I}(k_i) = k_i / \sum_j k_j$  将新加入边的一端和网络中已经存在的节点  $i$  相连,以概率  $q$  进行三角连接,如果节点  $v$  和  $w$  在前一步已经通过优先连接相连,那么随机选择节点  $w$  的一个邻居节点,并将其和节点  $v$  相连;如果  $w$  的所有节点都已经和  $v$  有边相连,那么  $v$  仍旧进行优先连接.显然,如果取  $q = 0$ ,那么该算法和 BA 算法是等价的.

## 3. 路由算法及动态过程

现实网络中的路由器都具有固定的存储容量和计算速度,因此它每一步只能处理一定数量的数据包.当网络中瞬间出现大量的并发数据流时,不可避免地会导致有些数据包不能被及时处理从而在节点累积,导致拥塞.假设网络从无负载开始,每一时间步产生  $R$  个数据包,并且随机选择源节点和目标节点.每个节点处理数据包的能力通过  $c_i$  赋值,在单位时间内每个节点最多只能传递  $c_i$  个数据包到它的下一个路由节点.数据包产生后,被加入到队列的尾端,该节点队列同时包含产生的数据包和其他节点到达的数据包.这里,假设节点的队列长度是无限的.每个节点在传递数据包时,首先是在邻节点内进行搜索,如果邻节点中有目标节点,则直接传递给目标节点;如果没有,则根据给定的路由算法将它传递到下一个节点.数据包到达目标节点后将在网络中消失.

为了快速缓解网络中的数据流量,设计一个高效的路由算法是非常必要的.对于一个给定的路由算法来说,其执行效率既和底层的网络结构有关,又和网络的不同拥塞状态有关.一个好的路由算法应该具有某种感知拥塞的能力以及可调节性,使得它能够及早检测出网络是否发生拥塞,并且及时调节

路由策略以便尽早进行控制。

最短路径路由策略是指数据包总是沿着离目标节点最近的路径进行传递. 该算法从不考虑网络是否处于拥塞状态, 即使路由所经过的节点由于大量数据包的累积导致性能急剧下降, 以至于无法及时传递它所接收到的数据包, 最短路径路由策略也没有提供一种机制可以重新为数据包选择新的路由路径. 由于最容易产生拥塞的节点多数情形下恰恰是位于多条最短路径的交汇处, 换句话说, 这些节点都具有相对较大的介数, 因此最短路径路由算法将会使得拥塞的节点更拥塞, 从而导致网络性能进一步下降<sup>[22-24]</sup>. 于是, 本文提出一个具有局部拥塞感知能力的改进的路由策略.

假设数据包要从源节点  $s$  传递到目标节点  $t$ . 首先该算法需要计算节点  $s$  的所有邻居节点的权值  $d_i$ , 对于邻居节点  $i$  来说, 权值可通过下式计算:

$$d_i = \alpha l_i + (1 - \alpha) \frac{q_i}{\beta c_i} \quad (0 \leq \alpha \leq 1), \quad (2)$$

其中  $l_i$  是节点  $i$  到目标节点  $t$  的最短路径长度;  $\alpha$  是一个可以调节的参数, 其范围位于 0 和 1 之间, 用来调节最短等待时间和最短传输路径之间的权重;  $q_i$  ( $\beta c_i$ ) 可以看作数据包将要在节点  $i$  的等待时间;  $q_i$  是节点  $i$  当前所存储的数据包的个数,  $c_i$  是节点  $i$  单位时间内可以处理的数据包的最大个数.

在节点权值计算公式(2)中,  $\beta$  是一个控制参数, 可以对节点的数据包处理能力进行调节. 根据网络中拥塞状态的不同, 可以选择不同的  $\beta$  进行控制. 控制  $\beta$  就相当于控制网络中各个节点的传输能力. 当网络中出现较大拥塞时, 通过增大  $\beta$ , 相当于增加了网络的带宽, 在不改变路由算法的前提下, 可以很大程度地提高网络的吞吐能力. 当网络处于空闲状态时, 可以通过减小  $\beta$  释放网络资源.

现实通信网络中重要的路由器节点一般都具有更强的性能, 处理数据包的能力也更大, 因此可以通过  $c_i$  的值来反映这种情形.  $c_i$  的值根据节点在网络中所处的重要性不同赋予不同的值. 在模型 I 中  $c_i = k_i$ ,  $k_i$  是节点  $i$  的度; 在模型 II 中  $c_i = b_i$ ,  $b_i$  是节点  $i$  的介数.

得到节点  $s$  的所有邻居节点的权值  $d$  之后, 选取具有最小权值的节点作为下一个路由节点. 如果具有最小权值的节点有多个, 那么随机选取其中一个. 接下来的每一步都重复以上的过程, 并根据当前网络的局部信息动态计算  $d_i$  的值. 当参数  $\alpha = 1$  时, 该算法即为最短路径路由算法.

为了描述网络中的拥塞转变, 我们采用参数  $H$  进行刻画, 有

$$H(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{R} \frac{W(t)}{t}, \quad (3)$$

其中  $W(t)$  是  $t$  时刻网络中总的数据包个数. 当  $R < R_c$  时,  $W(t)$  在某个恒定值上下波动, 当  $R > R_c$  时,  $W(t)$  随着时间的增长逐步增加并将最终导致网络发生拥塞. 因此拥塞转变发生在  $R = R_c$  时,  $R_c$  是使网络保持在稳定状态的最大值.

## 4. 仿真结果及分析

下面将进一步研究网络吞吐量和网络结构的关系. 在仿真中, 首先根据第二部分介绍的网络产生方法生成 3 种网络, 它们的节点数均为 100. 第一个网络是 ER 随机网络, 连接概率  $p = 0.08$ ; 第二个是 WS 小世界网络,  $K = 4$ ,  $p = 0.02$ ; 第三个是原始 BA 无标度网络, 初始节点  $m_0 = 4$ . 在仿真中, 对每个网络模型取 50 次平均, 每次实现都运行 5000 步, 此时可以认为网络的数据流量基本处于稳态, 因此可以确定  $R_c$  的值, 最终结果取最后 1000 步的平均值. 对每种网络结构均采用感知流量路由方式, 取  $\alpha = 0.75$ . 图 1 为模型 I 中,  $k = 8$ ,  $\beta = 0.5, 1.0, 1.5$ , 在 3 种不同网络结构下, 状态参数  $H$  随  $R$  的变化情况.

由图 1 的仿真结果可以看出, 当  $R < R_c$  时,  $H$  值接近为 0, 而当  $R > R_c$  时,  $H$  值会迅速增加. 同时, 还可以看出相变值  $R_c$  随  $\beta$  值的增加而增大, 这说明提高节点处理数据包的能力可以推迟拥塞的出现. 这是因为度数大的节点出现拥塞的可能性更大, 提高这些重要节点的容量自然可以减轻拥塞的出现, 从而提高了网络的吞吐量. 图 1 显示, 对于相同的  $\beta$  值, 例如  $\beta = 1.0$ , 在 ER 随机网络中,  $R_c = 320$ ; 在 WS 小世界网络中,  $R_c = 120$ ; 在 BA 无标度网络中,  $R_c = 300$ . 这表明在模型 I 中, WS 小世界网络比随机网络和无标度网络更容易产生拥塞, 这是因为 WS 小世界网络在随机重连概率  $p$  比较小时, 存在介数较大且度数较小的节点. 这一结论与文献[25]的结果一致, 其研究结果显示, 网络的流量相变值  $R_c = C_{L_{\max}}(N-1)/B_{L_{\max}}$ , 其中  $C_{L_{\max}}$  是网络中所有节点处理数据包能力最大的值,  $B_{L_{\max}}$  是网络中处理数据包能力最大节点的介数.

在模型 II 中, 每个节点处理数据包的能力与该节点的介数成比例. 图 2 为在模型 II 中, 不同网络结构和不同  $\beta$  值下, 状态参数  $H$  随  $R$  的变化情况. 从

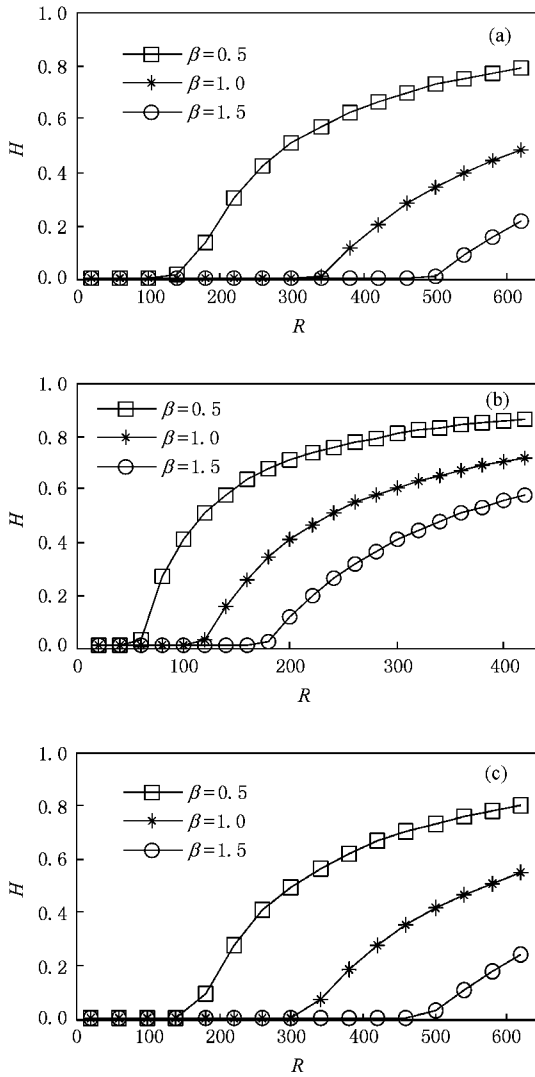


图 1 对模型 I 在不同网络结构和不同  $\beta$  值下状态参数  $H$  随  $R$  的变化情况 (a)ER 随机网络,  $p = 0.08$  (b)WS 小世界网络,  $p = 0.02$  (c)BA 无标度网络,  $m_0 = 4$

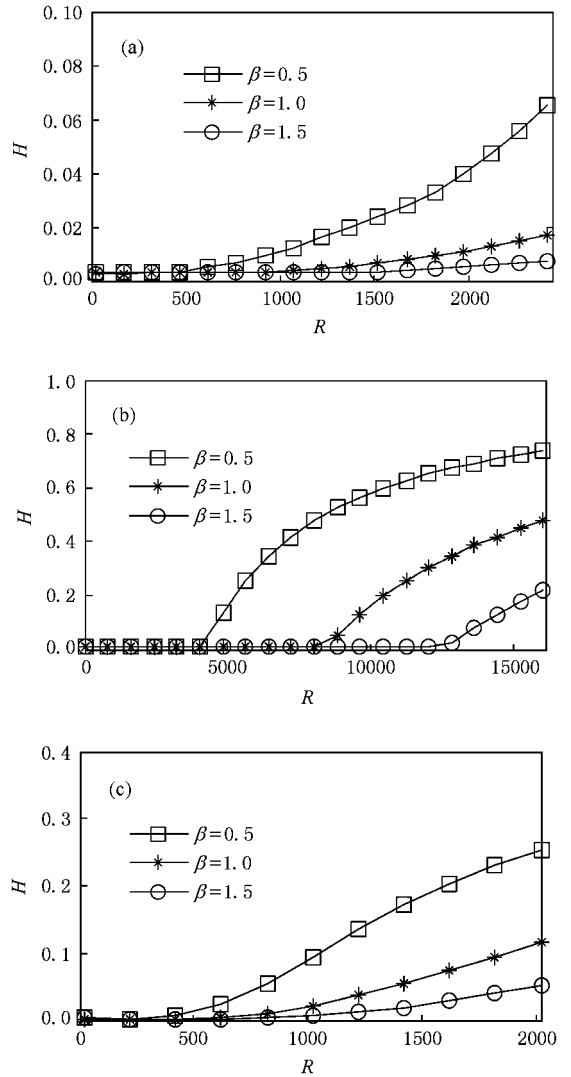


图 2 对模型 II 在不同网络结构和不同  $\beta$  值下状态参数  $H$  随  $R$  的变化情况 (a)ER 随机网络,  $p = 0.08$  (b)WS 小世界网络,  $p_0 = 0.02$  (c)BA 无标度网络,  $m_0 = 4$

图 2 的仿真结果可以看出,当采用模型 II 时,随机网络和无标度网络中出现拥塞的过程比较缓慢,并且拥塞程度较小,而在小世界网络中网络的吞吐量得到了显著提高.由此可见,在所有网络平均度相同的情况下,基于模型 II 的路由策略对延迟拥塞的能力更好.那么是否对于所有的网络拓扑结构,基于模型 II 的路由策略效果均优于模型 I?

图 3 表示在  $\beta = 1$  时,对模型 I 和模型 II,在 3 种网络拓扑结构下,状态参数  $H$  随  $R$  的变化情况.仿真结果显示,在 WS 小世界网络中,随机连接概率  $p$  值较小时,节点的数据包处理能力与节点的介数成比例,网络的传输能力明显较大;而连接概率  $p$  值较大时,节点的数据包处理能力与节点的度成比例,网络的传输能力明显较大.在 ER 随机网络中,也

存在同样的情况.而对于无标度网络,无论可调聚类参数多大,网络的传输能力在模型 II 中都是最大的.但在相同情况下,聚类系数越大,网络的传输能力越小.下面我们通过分析随机网络和无标度网络在不同参数情况下度和介数的分布情况来讨论这种结果.

从图 4 的仿真结果来看,除了图 4(c)中的度分布服从幂律形式外,其他 3 个图的分布形式均为 Poisson 分布.图 4(a)为在 ER 随机网络中连接概率  $p$  分别为 0.08 和 0.8 的度分布情况.由仿真结果可见,在  $p = 0.08$  时,度分布主要集中在 8 附近,而在  $p = 0.8$  时,度分布主要集中在 80 附近,正好说明对模型 I,在  $p = 0.8$  的随机网络中的传输能力比在  $p = 0.08$  的随机网络中的强很多.图 4(b)为在 ER 随机网络中连接概率  $p$  分别为 0.08 和 0.8 的介数分布

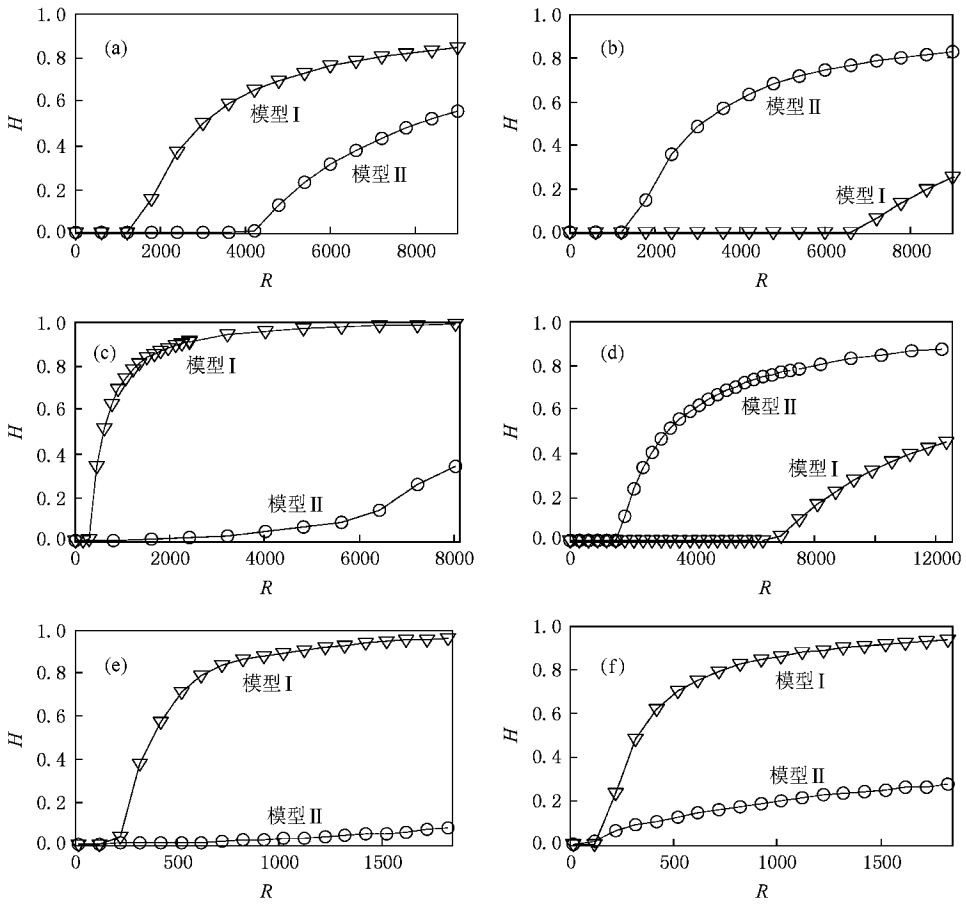


图 3 对模型 I 和 II 在不同网络结构下状态参数  $H$  随  $R$  的变化情况 (a)WS 小世界网络,  $p=0.2, K=4$  (b)WS 小世界网络,  $p=0.8, K=4$  (c)ER 随机网络, 连接概率  $p=0.08$  (d)ER 随机网络,  $p=0.8$  (e)无标度网络, 初始节点  $m_0=3$ , 三角连接概率  $q=0$  (f)无标度网络,  $m_0=3, q=0.8$

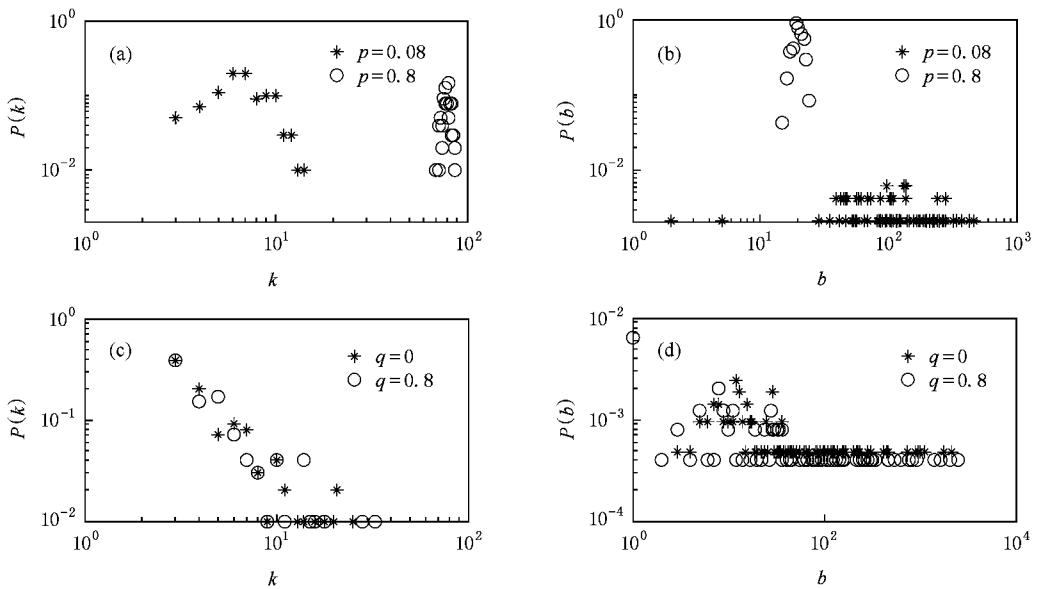


图 4 随机网络和无标度网络在不同参数情况下度和介数的分布 (a)ER 随机网络度分布 (b)ER 随机网络介数分布 (c)无标度网络度分布 (d)无标度网络介数分布

情况.由仿真结果可见,在  $p = 0.8$  时,介数分布主要集中在 80 附近,其网络中流量的相变值如图 3(b) 所示;而在  $p = 0.08$  时,介数分布在 50—500 附近,对模型 II 而言,节点的传输能力与其介数成比例,介数平均值越大,单个节点处理数据包的能力越强,最终导致网络整体容量的提高,因此在  $p = 0.08$  的随机网络中采用模型 II 比模型 I 网络的传输能力强.图 4(c)(d)为在无标度网络中可调参数  $q$  分别为 0 和 0.8 的度和介数分布情况.从图 4(c)(d)的仿真结果可以看出,无论可调参数  $q$  值为何,无标度网络度分布都是幂律形式,而介数分布却是 Poisson 分布,并且在  $q = 0.8$  网络中的平均介数比原始 BA 网络(即  $q = 0$ )要小.因此,在模型 II 中,节点处理数据包的平均能力也相对低,这就直接导致前者比后者的网络传输能力弱.从以上的分析来看,采用何种模型来延迟网络中的拥塞现象,要根据具体网络模型特性而定.

## 5. 结 论

本文重点研究了复杂网络的拓扑结构对网络中流量传输产生的影响.基于网络中各个节点处理数据包能力的不同提出两种模型,讨论了网络结构、数据包产生率、节点处理数据包的能力三者对网络容量的影响.对每一种模型,研究了三种网络结构:随机网络、小世界网络和无标度网络.在第一种模型中,每个节点处理数据包的能力与该节点的度成比例,而在第二种模型中,每个节点处理数据包的能力与该节点的介数成比例.仿真研究结果显示,在平均度相同的情况下,网络的传输能力第二种模型比第一种模型强,但当 ER 随机网络和 WS 小世界网络中的连接概率增大时,结果正好相反.即相同的路由算法在不同网络拓扑结构上所表现出的性能差异是很明显的.因此在设计路由算法时,应该充分了解网络的拓扑结构特性,这样才能设计出更好的路由策略.

- [ 1 ] Dorogovtsev S N , Mendes J F 2002 *Adv. Phys.* **51** 1079
- [ 2 ] 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 ]
- [ 3 ] 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 ]
- [ 4 ] Guo J L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 756( in Chinese )[ 郭进利 2008 物理学报 **57** 756 ]
- [ 5 ] Wang X F , Chen G R 2003 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **1** 3 6
- [ 6 ] Yin C Y , Wang B H , Wang W X , Zhou T , Yang H J 2006 *Phys. Lett. A* **351** 220
- [ 7 ] Woolf M , Arrowsmith D K , Mondragón-C R J , Pitts J M 2002 *Phys. Rev. E* **66** 046106.
- [ 8 ] Wen U P , Wang W C , Yang C B 2007 *Omega* **35** 671
- [ 9 ] Li M , Liu F , Ren F Y 2007 *Phys. Rev. E* **75** 066115
- [ 10 ] Toroczkai Z , Bassler K E 2004 *Nature* **428** 716
- [ 11 ] Zhao L , Lai Y C , Park K , Ye N 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026125
- [ 12 ] Park K , Lai Y C , Zhao L , Ye N 2005 *Phys. Rev. E* **71** 065105
- [ 13 ] Krause W , Glauche I , Sollaicher R , Greiner M 2004 *Physica A* **338** 633
- [ 14 ] Glauche I , Krause W , Sollaicher R , Greiner M 2004 *Physica A* **341** 677
- [ 15 ] Ohkubo J , Horiguchi T 2006 *Physica A* **353** 649
- [ 16 ] Krause W , Greiner M , Greiner M 2006 *Physica A* **361** 707
- [ 17 ] Pablo E , Jesús G G , Yamir M 2005 *Eur. Lett.* **71** 325
- [ 18 ] Erdős P , Rényi A 1959 *Publicationes Mathematicae ( Debrecen )* **6** 290
- [ 19 ] Watts D J , Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [ 20 ] Barabási A L , Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [ 21 ] Holme P , Kim B J 2002 *Phys. Rev. E* **65** 026107.
- [ 22 ] Pablo E , Jesús G G , Yamir M 2004 *Phys. Rev. E* **70**056105
- [ 23 ] Chen Z Y , Wang X 2006 *Physica A* **364** 595
- [ 24 ] Wang D , Jing Y W , Zhang S Y 2008 *Physica A* **387** 3001
- [ 25 ] Guimera R , Diaz-Guilera A , Vega-Redondo F , Cabrales A , Arenas A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 248701

# Study on the congestion in complex network based on traffic awareness algorithm<sup>\*</sup>

Wang Dan<sup>†</sup> Yu Hao Jing Yuan-Wei Jiang Nan Zhang Si-Ying

( College of Information Science and Engineering , Northeastern University , Shenyang 110004 , China )

( Received 22 September 2008 ; revised manuscript received 3 March 2009 )

## Abstract

We investigate the influence of complex network topological structure on the traffic delivery by the traffic awareness routing strategy. In order to characterize the efficiency of the packet delivery process , we introduce an order parameter to measure the network capacity by the critical value of phase transition from free flow to congestion. Here , we present two kinds of models , based on its degree or its betweenness that the delivery capacity of each node is proportional to. Simulation results show that , in the case of identical average degree , WS small-world network is significantly more susceptible to traffic congestion than ER random networks and BA scale-free networks in the first model , while the capacities of all kinds of networks are enhanced greatly in the second model , especially for WS small-world network. Finally , it is worth noting that which of the two models will be best suitable for handling traffic delivery depends on the structural characteristics of networks .

**Keywords** : complex network , scale-free network , traffic awareness , congestion

**PACC** : 0520 , 0560 , 0570J

<sup>\*</sup> Project support by the National Natural Science Foundation of China( Grant No.62074009 ).

<sup>†</sup> E-mail : wangdan0307@126.com