

可调聚类系数加权无标度网络建模及其 拥塞问题研究*

王丹[†] 金小峥

(沈阳大学装备制造综合自动化重点实验室, 沈阳 110044)

(2012年1月6日收到; 2012年6月4日收到修改稿)

针对实现网络特征的真实情况, 提出了一类可调聚类系数的加权无标度网络模型, 该模型能够重现现实网络权重和节点度呈幂律分布的统计特性. 特别是聚类系数与度之间的非线性关系, 恰好符合某些现实网络聚类系数与度之间的平头关系特征. 最后研究了可调聚类系数加权网络模型中的拥塞问题. 采用基于强度优先传递的局部路由策略, 分析了网络中的流量传输问题.

关键词: 无标度网络, 加权网络, 聚类系数, 拥塞

PACS: 89.75.Fb, 05.90.+m, 02.50.-r

1 引言

现实生活中, 复杂网络的例子比比皆是, 如 Internet^[1]、交通网、科学合作网^[2]、社会网^[3]、生物网^[4]等等. 人们也从不同的角度出发, 提出了各种各样的复杂网络模型, 其中最为著名的是 Erdős 和 Rényi 研究的随机图^[5]、Watts 和 Strogatz 提出的小世界网络模型^[6]以及 Barabási 和 Albert 提出的无标度网络模型^[7]. 现有的大多数针对复杂网络的研究主要属于无权网络的范畴, 即网络的节点与节点之间只用是否有连接表示, 而不管这种连接关系的强弱. 但是, 现实世界的许多网络都不是无权网络. 例如, 在交通网中连接重大城市之间的高速公路在交通网络里的重要性要远远大于连接一般乡村之间的低级公路; Internet 网络中路由器以及路由器之间不同的信息量传输; 航空网络中飞机运载不同数量的乘客; 科学合作网络中, 两个学者合作的文章的数量可以用来代表这两个学者之间合作的密切程度. 因此, 有必要通过给节点与节点之间赋予一定的权值来描述它们之间的

关系, 这样就形成了加权网络. 最近, 加权网络模型研究受到越来越多学者的重视^[8-15].

研究表明, 不少实际的加权网络的度和节点权重都满足幂律分布. 依据这一特性, Barrat, Barthélemy 和 Vespignani 提出了一个加权无标度网络模型, 称为 BBV 模型^[16]. 该模型综合考虑了网络结构和节点的权重等因素来研究网络的动态演化情况. BBV 模型具有结构简单且易于作理论分析的特点. 随着模型规模的增大, BBV 模型网络的度、边权值和节点的权重都呈现无标度特性. BBV 模型给加权网络的研究奠定了良好的基础. 但现实的许多网络, 特别是社会网络, 除了满足上述规律之外, 还具有大聚类系数的特点. 也就是在社会网络里相邻的节点之间是非常紧密地连接在一起. 大聚类系数反映的是社会网络里“物以类聚, 人以群分”的特性. 尽管 BBV 模型自身可以通过原有参数的调节来控制聚类系数的大小, 但是调节的能力有限, 尤其是不能产生较大的聚类系数. 因此, 构造一个既符合 BBV 模型的特点, 同时又可以产生大聚类系数的加权网络模型是十分必要的.

最近, 一些加权网络模型相继被提出^[8-21], 其

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61203152, 61104029) 和辽宁省博士科研启动基金 (批准号: 20121040) 资助的课题.

[†] E-mail: wangdan0307@126.com

中一部分文献 [9 – 13] 也研究了拓扑结构和权值不断演化的网络模型, 但是这些演化机理描述的是新加入的节点和旧节点之间建立连接. 在实际网络中, 新边的建立也可能出现在旧节点之间. 本文提出一种加权网络模型, 其中新的连边可以建立在新节点和旧节点之间, 同样可以建立在旧节点之间. 在加权网络模型基础上, 提出了节点强度优先选择的局部路由算法, 达到了提高网络流量传输效率的目的.

2 具有可调聚类系数的加权无标度网络模型的构建

基于 Holme 等提出的聚类系数可调的无权网络模型的思想 [22], 将三角连接机理引入到 BBV 模型中, 并在 BBV 模型原有优先连接机理中加入一个控制参数 α , 用来调节新节点与旧节点的连接强弱. 构造出一个既能保持原来 BBV 模型特性, 又能使聚类系数大范围可调, 并且拓扑结构和网络权值都是随着时间不断演化的加权网络模型. 为简单起见, 本文仅研究无向网络. 模型演化机理如下:

1) 初始网络: 网络初始状态含有 m_0 个完全连接的节点. 所有边的初始权值设定为 $w_0 = 1$.

2) 加入新节点: 按照概率 p , 网络中加入一个新节点 v , 其中 $p \in [0, 1]$. 每一个新加入的节点具有 m 条边与网络中已经存在的节点相连. 连接节点的选择按照如下权重优先选择进行, 即一个旧节点 i 被选择的概率为

$$\Pi_{v \rightarrow i} = \frac{s_i^\alpha}{\sum_l s_l^\alpha}, \quad s_i = \sum_{j \in \Gamma(i)} w_{ij}, \quad (1)$$

其中, s_i 为节点 i 的强度, 这个强度优先选取的连接机理代表了新节点的加入更倾向于与网络中强度大的节点相连接. α 为可调参数, 当 α 较大时, 强度很大的节点就会很容易与新的节点进行连接, 网络的“贫富差距”就会很大; 当 α 较小时, 网络中节点与新节点连接的概率就会接近相等, 网络趋向于“共同富裕”. 网络中原有节点连接新节点的概率与节点 i 的强度 s_i 成非线性, 这种关系在无权网络 KRL 模型中 [23] 也曾出现过, 只是在 KRL 模型中连接概率是与节点 i 的度 k_i 成非线性关系.

假设每一个新边 (v, i) 的初始值设定为 $w_0 = 1$. 新边的产生会带来网络中局域流量的变化, 这里考虑新边 (v, i) 的产生会对节点 i 与其邻节

点 $j \in \Gamma(i)$ 之间的权值增加, 按照下式所示的规则:

$$w_{ij} \rightarrow w_{ij} + \Delta w_{ij} = w_{ij} + \delta \frac{w_{ij}}{s_i}, \quad (2)$$

其中, $\delta > 0$.

3) 加入新边: 按照概率 $1 - p$, 网络不增加新的节点, 仅增加 m_t 条边. 新增加边的两个端点按照三角结构的机理选取. 图 1 演示了三角结构的选取机理. 首先, 随机选取网络中的一个边 (i, j) , 然后选取节点 j 的另外一个邻节点 (排除节点 i), 设其为 k . 选取节点 k 时按照概率 Π_k 进行选取, 即按照边的权值的大小选取.

$$\Pi_k = w_{jk} / (s_j - w_{ij}), \quad (3)$$

其中, w_{jk}, w_{ij} 分别为边 (j, k) 和边 (i, j) 的权值. 如果在节点 i 和 k 之间不存在连接, 则建立新边, 如果存在连接, 则权值增加 σ . 在两种情况下, 边 w_{ij}, w_{jk} 的权值都增加 σ . 图 1(a) 表示网络中边 (i, j) 被选中, (b), (c) 分别对应节点 k 选为不同节点情况下网络权值和网络结构的变化. 其中, $\sigma = 1$.

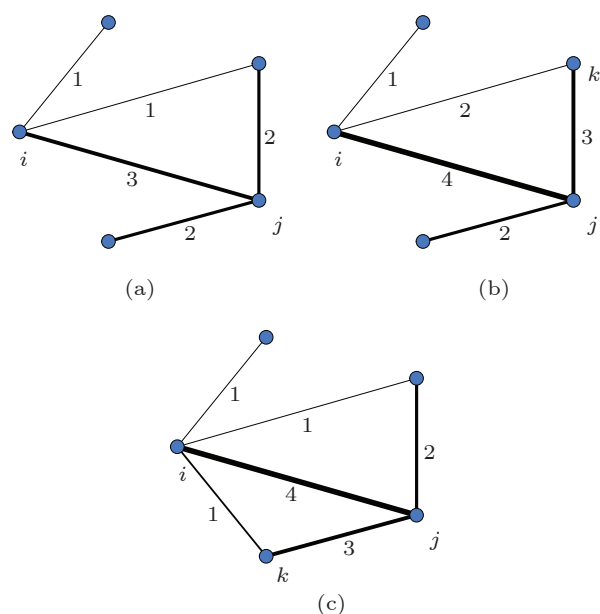


图 1 三角结构选择机理的示意图

3 网络模型演化的仿真结果及分析

许多真实网络中度、强度、权值都是服从幂律分布的. 以下我们对强度、度和权值的统计性质进行数值模拟, 还包括度和强度之间的相关性. 这些性质已经被认为是描述权重网络最重要的统计性质. 本文主要基于仿真实例, 通过运用统计物理

学方法, 采用 Matlab 软件进行数值模拟, 分析本文所提出的模型是否具有真实网络结构的特性. 模型的演化时间由加入网络中的节点数量来衡量, 即 $t = N - N_0$, 并且模型自然的时间标度为网络的规模 N . 网络的规模选取 $N = 1000$, 其中, $m_0 = 4$, $m = 3$, $m_t = 2$, $\delta = 1$, $\sigma = 1$. 研究不同参数 p 和 α 对所生成的网络拓扑结构特性的影响. 数值模拟结果中的每一个数据点由 20 个不同网络模型平均而得.

首先分析三角连接机理的加入对网络特征的影响, 即参数 p 对网络结构的作用. 加权网络的结构特性除了网络的度分布外, 还包括网络的强度分布和权值分布. 图 2—4 分别研究了三角结构对网络的强度分布、度分布、权值分布的影响. 由图 2—4 可以看出当参数 p 选取不同值时, 网络的强度分布, 度分布和权值分布均服从幂律分布, 即 $P(s) \propto s^{-\gamma_s}$, $P(k) \propto k^{-\gamma_k}$, $P(w) \propto w^{-\gamma_w}$. 通过调节 p 值, 可以使分布指数 γ 在 1.3 到 3 之间转变, 而绝大多数的真实网络的分布指数恰好都在这一区域, 这说明本文所建立的加权网络模型符合真实网络的特性, 也就是说我们的模型对于模拟真实的权重网络具有很好的普适性.

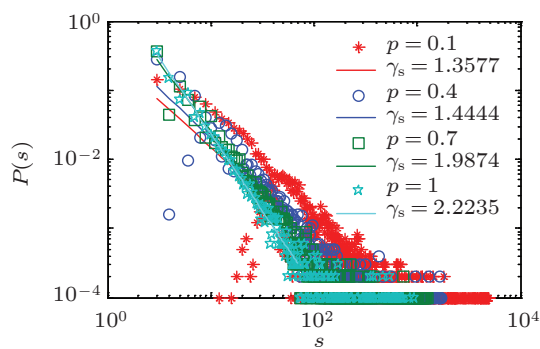


图 2 对数坐标下的强度分布 $P(s)$ 随参数 p 变化曲线

除了强度、度和权值的分布外, 我们接着对网络平均强度 $S(k)$ 与度 k 的相关性进行研究. 以前的研究表明, 真实网络中大多数情况下平均强度 $S(k)$ 与度 k 都服从幂律分布 [23], 两者之间符合 $S(k) \propto k^\gamma$, 其中 $\gamma > 1$. 而在 BBV 模型中, 指数 $\gamma = 1$. 图 5 给出了网络平均强度与度相关性曲线. 从图 5 的仿真可以看出, 当三角连接机理概率 $p = 0.1, 0.5, 0.9, 1$ 时, 网络中平均强度和度相关性均服从幂律分布, 且幂律指数 $\gamma > 1$, 说明本文所提出的网络模型与 BBV 模型相比较, 其更符合真

实网络模型的特性. 因为 $S(k) = \langle w(k) \rangle k$, $\langle w(k) \rangle$ 表示度数为 k 的节点的平均权值, 节点的度越大, 它边的平均权值就越大. $\gamma > 1$ 显示出了权重的增长速度比拓扑的增长要快, 这说明网络中节点的强度比节点的度增加的速度快. 这时与度数大的节点相连接的边所具有的权值要比随机选取的一个边的权值大. 以航空网络为例, $\gamma > 1$ 可以解释为, 规模大的机场航班比普通小机场的航班具有更大的运载能力.

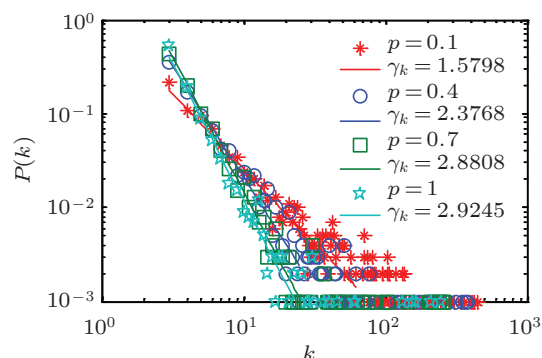


图 3 对数坐标下的度分布 $P(k)$ 随参数 p 变化曲线

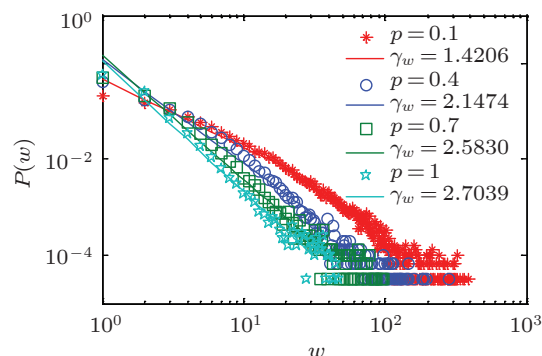


图 4 对数坐标下的权值分布 $P(w)$ 随参数 p 变化曲线

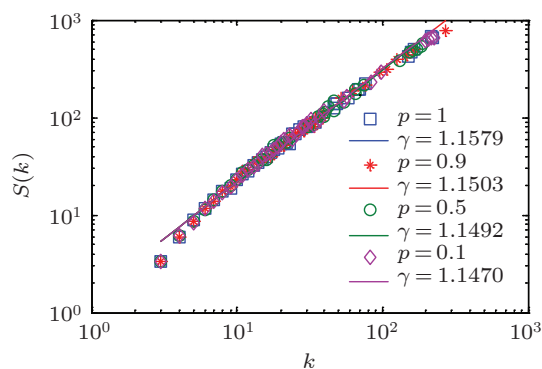


图 5 对数坐标下平均强度与度的关系随参数 p 变化曲线

网络的结构特性除了度分布、强度分布之外还包括聚类系数特性,之前提出的很多演化网络模型聚类系数都非常小,例如 BA 无标度网络模型及其各种扩展模型.但是在真实网络中,往往是小世界现象和无标度特性同时存在的,即网络既具有小的平均最短路径又具有大的平均聚类系数,同时还服从幂律分布. BBV 模型得到的网络虽然服从幂律分布,具有小的平均最短路径,但是其聚类系数却很小,这不符合真实网络的特征.

网络的平均聚类系数可以用来测量网络中三角结构连接的密度.平均聚类系数的定义就是对网络所有节点的聚类系数 C_i 取平均值,即 $C = N^{-1} \sum_i C_i$,其中 N 表示网络的节点数.研究平均聚类系数 C 与度 k 之间的关系可以更准确地得到网络的结构特性.图 6 研究了三角连接对网络的平均聚类系数的影响,在参数 p 取不同值时,得到 $C(k)$ 与 k 的关系曲线.当所选取的参数 p 越小,三角结构所占比重越大,网络的平均聚类系数也越大.当 $p = 1$ 时, $C = 0.1556$; $p = 0.9$

时, $C = 0.2383$; $p = 0.5$ 时, $C = 0.4812$; $p = 0.1$ 时, $C = 0.7295$.因此本文提出的权重网络模型是聚类系数可调的网络模型.从图 6 中可以看到,当参数 p 值较大时,平均聚类系数 $C(k)$ 服从网络节点度的幂律分布, $C(k) \propto k^{-\gamma_c}$.而当参数 p 值较小时,在聚类度相关性曲线首部出现了平头 (flat head) 特征,这一特征正好与真实网络数据结构相符合.

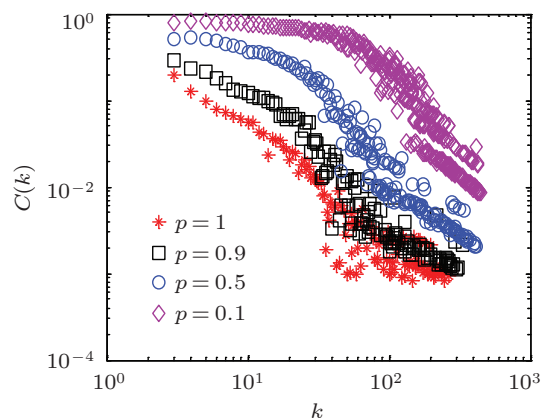


图 6 对数坐标下平均聚类系数 $C(k)$ 与度的关系随参数 p 变化曲线

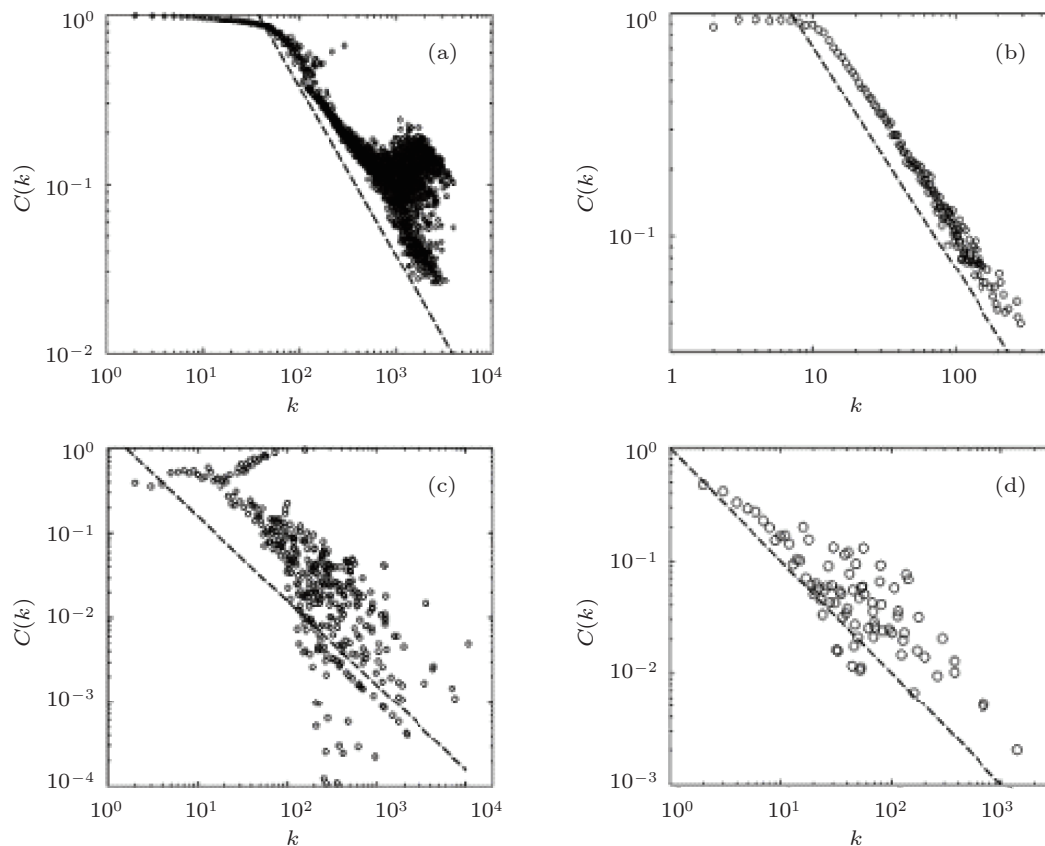


图 7 真实网络中 $C(k)$ 与 k 相关性曲线^[23] (a) 演员合作网; (b) 语义网; (c) 万维网; (d) Internet 网络中自治层网络

图 7 是根据演员合作网、语义网、万维网和 Internet 网络自治层网络中的真实数据刻画聚类系数与节点度相关性曲线 [24,25]. 从图 7(a), (b) 可以看出这两个真实网络中的聚类系数和度的相关性都具有平头特征. 从图 6 可以清楚地看到, 在我们所建立的模型中, 当参数 p 取值较小时所得到的结果与实证数据相当符合. 之前学者提出的模型也能够得到聚类系数与度相关性尾部的幂律特性, 但是很少能给出真实网络中观察到的平头特征, 而我们的模型成功地重现了这一特征. 这一特征在文献 [26] 中也得到了验证.

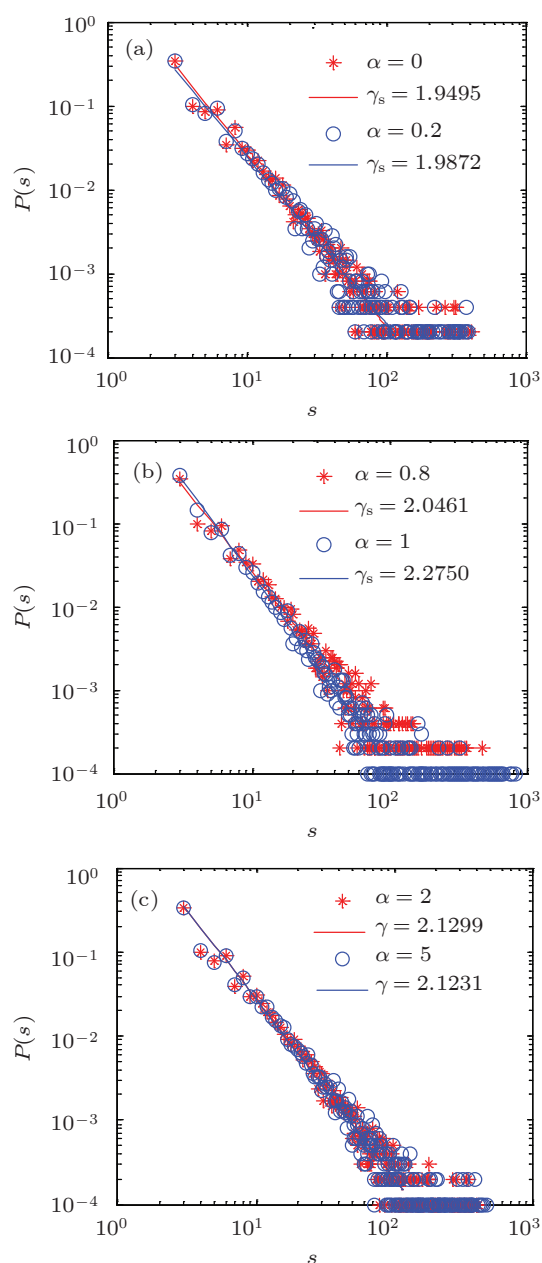


图 8 对数坐标下的强度分布 $P(s)$ 随参数 α 变化曲线

以上研究的是三角连接机理对网络拓扑结构特性的影响, 从仿真结果可看出强度、度和权值的分布可以由参数 p 进行调节. 下面讨论优先连接机理中调节参数 α 对网络结构特性的影响.

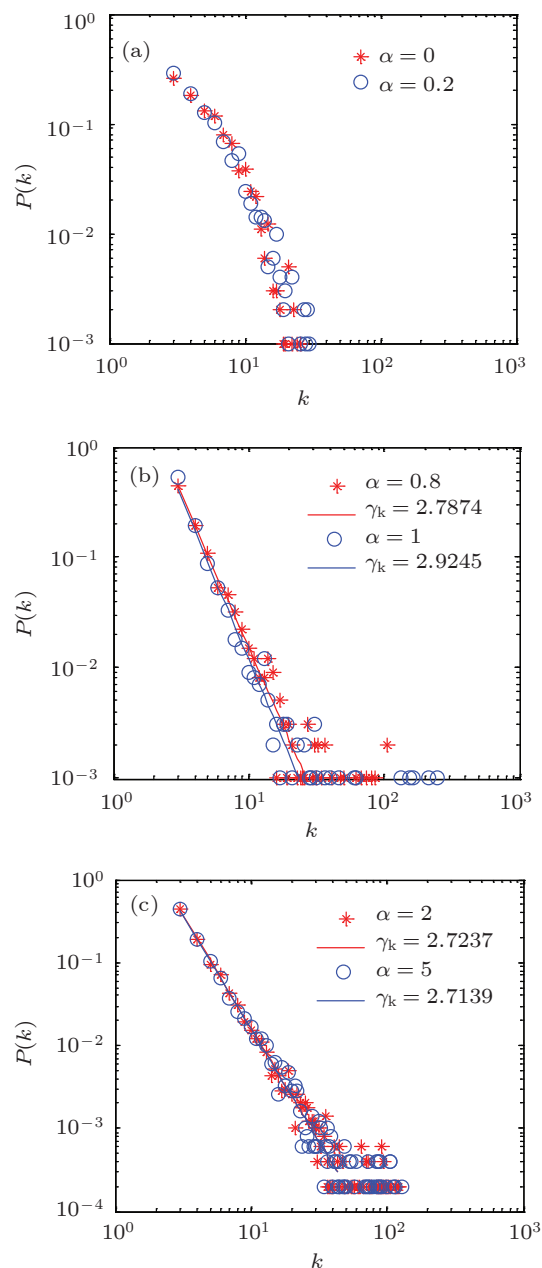


图 9 对数坐标下的度分布 $P(k)$ 随参数 α 变化曲线

将 α 的取值范围分为三个区间进行讨论, 第一个区间 $\alpha \in [0, 0.5]$, 第二个区间 $\alpha \in (0.5, 1]$ 和第三个区间 $\alpha \in (1, 5]$. 如图 8—10 所示, 当 α 在第一个区间时, 强度和权值分布服从幂律分布, 而度分布则符合扩展指数形式; 当 α 在第二个区间时, 强度分布, 度分布和权值分布均服从幂律分布; 当 α 在

第三个区间时, 强度和度分布服从幂律分布, 而权值分布则符合扩展指数形式.

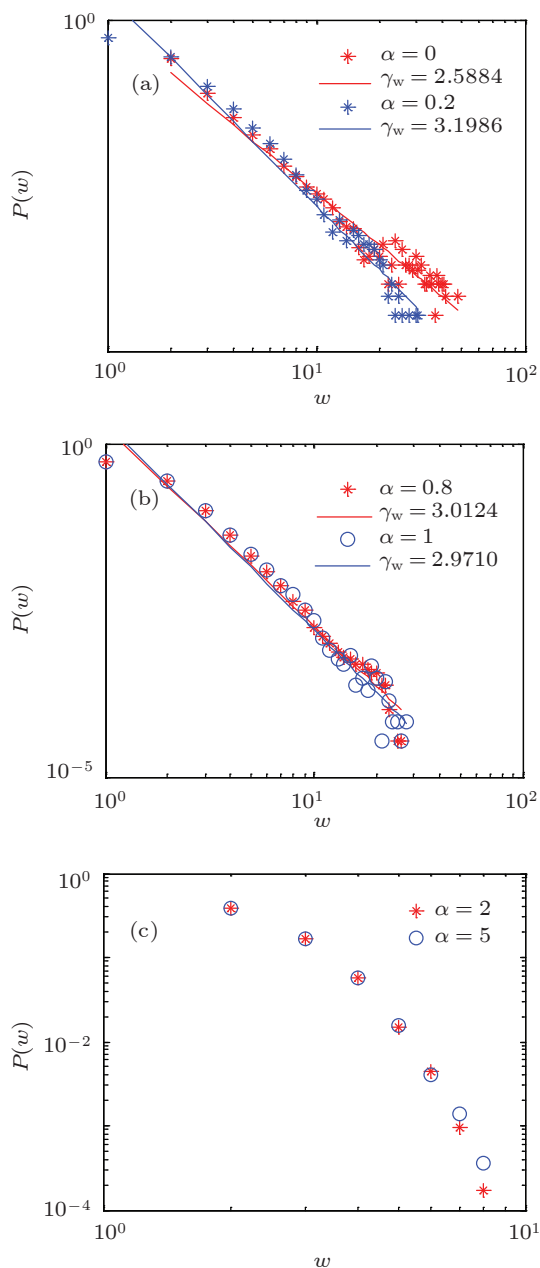


图 10 对数坐标下的权值分布 $P(w)$ 随参数 α 变化曲线

图 11 显示的是网络平均强度 $S(k)$ 与度 k 的相关性随参数 α 的变化曲线. 从图中我们能看出, 无论 α 的取值在那个区间, 网络的强度与度都成 $S(k) \propto k^\gamma$ 关系, 且指数 $\gamma > 1$, 这种关系也符合真实网络结构特征.

接着讨论 α 在不同区间下的聚类系数与度的相关性, 即 $C(k)$ 与 k 的关系. 从图 12 的三组图中,

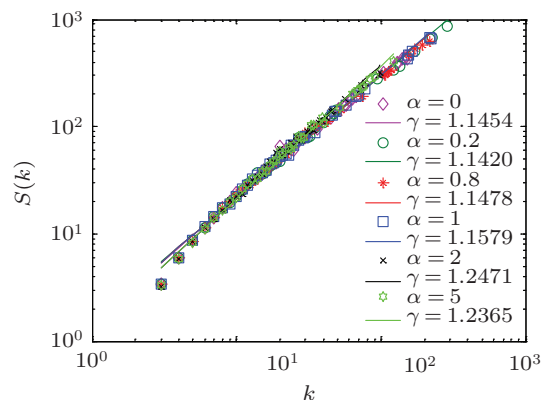


图 11 对数坐标下平均强度与度的关系随参数 α 变化曲线

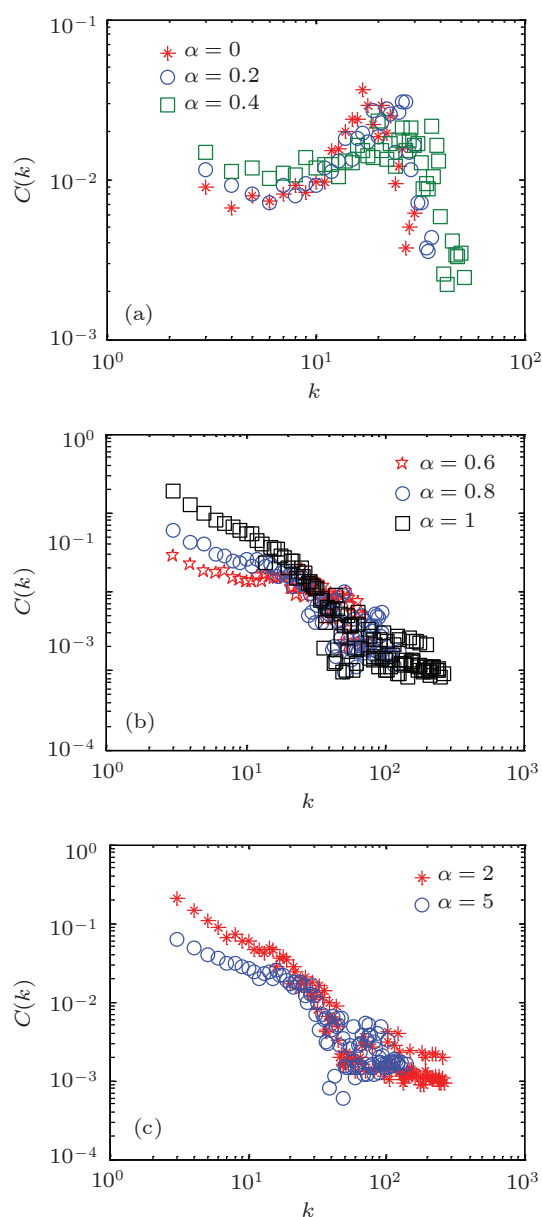


图 12 对数坐标下平均聚类系数与度的关系随参数 α 变化曲线

可看到, α 在不同区间中, 聚类系数与度的相关性是不同的. 图 12(a) 中显示, 当 α 在第一区间时, 平均聚类系数与度呈现正态分布关系, 这说明此时网络中的聚类属性较均匀, 此时的模型不适合描述集群现象明显的网络. 图 12(b) 中显示, 当 α 在第二区间时, 平均聚类系数与度近似服从幂律分布, 其中当 $\alpha = 1$ 时, 此时该模型就变为了 **BBV** 模型, 平均聚类系数与度完全服从幂律分布. 图 12(c) 中显示, 当 α 在第三区间时, 此时的平均聚类系数与度还是近似服从幂律分布, 此时由于 $\alpha > 1$, 模型中先出现的旧节点几乎和网络中所有节点都有连接. 值得注意的是, 图 7 中描述的真实网络模型的聚类系数与度的关系也不是完全符合幂律分布. 真实网络中总是有自身的结构特点, 通过调节 α 值的大小, 可以得到更加符合真实网络结构的模型.

4 加权网络模型的拥塞分析

本节我们关注加权网络上信息流的动力学特性, 从自由态到阻塞态的连续相变过程. 通过拥塞相变的方法, 提出了基于节点强度信息的局部路由策略, 以提高网络吞吐量.

4.1 路由策略设计

以往其他学者的研究通常假设每个节点的数据包处理能力为常数或者正比于节点的连接度^[27], 但是显然在实际通讯网络中, 节点的容量和处理能力都是有限的, 并且因节点而异, 在很多情况下, 这些限制将会成为引发信息堵塞的关键因素.

从通信系统的自组织机理考虑, 如果一个路由器非常重要, 通常承担繁重的信息负荷, 那么它就可能更新其传送和处理信息的能力以适应和调节该路由器处交通拥挤的情况. 因此, 在通讯网络的演化过程中, 每一节点处的传送信息能力各不相同, 比较繁忙的通信量通常都出现在比较重要的节点处. 在这里我们把所有节点都当作主机和路由器来处理, 假设节点 i 每一时间步最多可以处理的数据包能力为: $c_i = \max(s_i, 1)$, 其中 s_i 为节点的强度.

系统按如下步骤进行并行规则演化:

第一步: 增加新的数据包. 假设网络从无负载开始, 每一时间步网络产生 R 个数据包, 并且随机选择源节点和目标节点.

第二步: 路由规则. 每个节点采用局域路由规

则. 首先每个节点传递数据包时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, 则根据下面给定的优先选择概率确定下一个节点:

$$\Pi_{l \rightarrow i} = \frac{s_i^\beta}{\sum_{j \in g(l)} s_j^\beta}, \quad (4)$$

其中, s_i 为节点的强度; $g(l)$ 为节点 l 所有邻居节点的集合; β 为一个可以调节的参数, 用来控制选择下一节点的传输权重. 这种假设考虑的是网络规模很大的情况, 每个节点不可能知道网络的全局信息.

第三步: 传递数据包. 把数据包传递给被选中的节点, 数据包到达目标节点后将在网络中消失. 每一节点上等候发送的信息包数目可以是无限的, 亦即在每一节点处的信息包排队长度可以是无限长. 排在每一队列中等候发送的信息包按照先进先出 (first in first out, FIFO) 的规则按次序发出.

4.2 仿真分析

通信网络性能可以通过整个网络对于信息包的处理和传递能力进行衡量, 然而网络的通信能力并不等同于单个节点的通信能力. 在这里某个节点 i 的通信能力为 c_i , 但整个网络的通信能力则用临界的数据包产生量 R_c 来度量, 即在临界数据包产生量 R_c 处, 发生从自由态到拥塞态的连续相变. 自由态是指在同一时间步内所产生的数据包数目可以与达到目标节点的数据包个数相抵消. 而若系统进入拥塞态, 则不断产生的数据包中仅有一小部分数据包可以到达各自的目标点, 从而能够从系统中除去, 而大部分数据包将在系统中不断积累, 最终导致系统的全局拥塞甚至瘫痪. 为了描述网络中的拥塞转变, 采用参数 H 刻画网络的吞吐量和数据传输的效率,

$$H(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{W(t)}{Rt}, \quad (5)$$

其中, $W(t)$ 为 t 时刻网络中总的数据包个数. 当 $R < R_c$ 时, 网络中产生的数据包和到达终点的数据包个数几乎相等, 此时 $H \approx 0$ 网络处于稳定状态; 当 $R > R_c$ 时, 网络中产生的数据包个数要大于到达终点的数据包个数, 这将最终导致网络发生拥塞, 此时 H 值随数据包产生数量的增大而增加, 当 $H > 0$ 时网络发生拥塞, 并且 H 值越大, 拥塞越明显. 当 $H = 1$ 时, 网络完全处于拥塞状态, 即传输到网络中的数据包一个都没有传出去. 因此可以认

为拥塞转变发生在 $R = R_c$ 时, R_c 是可以度量通讯网络系统的最大通讯能力.

在图 13 中模拟了不同参数下系统的相变行为, 图中的相变点就是网络在自由流状态下允许的最大信息产生量. 信息包产生速率只要不超过这一阈值, 网络上的信息流就可以畅通无阻, 通讯网络可以处理和传递其上的所有信息包. 所以, 临界的信息产生速率可以衡量通讯网络系统的最大通讯能力. 从图 13 中我们发现, 随着参数 β 的不同取值, 相变点的位置也不同. 当 $\beta \leq 0$ 时, 相变值 R_c 较小, 网络的传输能力很差. 当 $\beta > 0$ 时, 相变值 R_c 逐渐增加, 直到 $\beta = 1$ 时, 网络的通信能力达到最大, $R_c = 160$. 而当 $\beta = 2$ 时, 相变值 R_c 又略有减小. 因此 $\beta = 1$ 就是我们本次模拟仿真中参数的最优值.

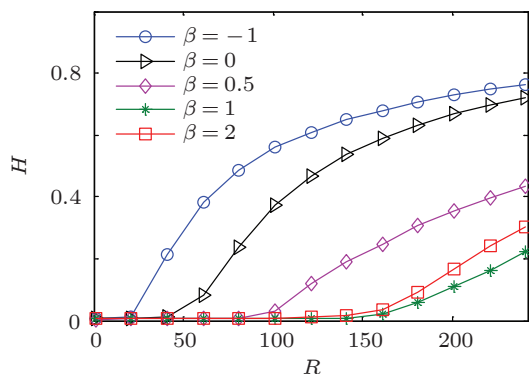


图 13 根据强度优先选择概率, 状态参数 H 随 R 的变化曲线

上面分析中假设节点处理数据包的能力是与节点的强度相关的, 即 $c_i = \max(s_i, 1)$, 并且路由算法是按节点的强度概率进行选择的. 如果在相同的网络结构中, 路由算法采用按节点的度进行概率选择, 那么得到的结果又将如何呢? 图 14 给出了按照度优先选择得到的状态参数 H 随 R 变化的曲线, 并假设节点处理数据包的能力与度成比例, 即 $c_i = \max(k_i, 1)$. 在该算法中网络的最大相变值

为 $R_c = 82$, 此时最优参数值 $\beta = 0.5$. 按照节点度的比例进行路由选择的方法得到的最大相变值比上面提出的按照节点的强度优先选择得到的相变值小了一倍. 可见, 这种方法没有按照节点强度优先选择的方法好. 因为加权网络更符合真实网络的结构属性, 所以在设计路由策略时应更注重节点强度大小对网络通信能力的影响. 根据通信量不断增长的情况, 适时地加大路由器的传输能力有利于网络通信能力的提高.

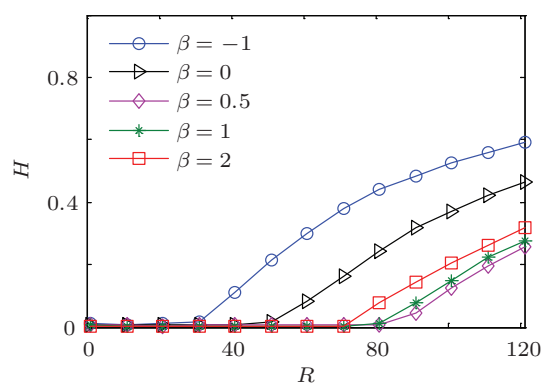


图 14 根据度优先选择概率, 状态参数 H 随 R 的变化曲线

5 结论

本文所建构的加权网络模型不仅同 **BBV** 模型一样, 符合度、强度和权值的幂律分布规律, 同时还能具有较高的聚类系数, 其更符合实际的网络特性. 特别地, 当选择三角连接机理的概率 p 值较小时, 网络中的平均聚类系数和度是具有平头特性的非线性关系. 这种非线性关系完全符合现实网络的统计特性, 例如演员合作网和语义网. 这说明本文所建立的加权网络模型能够很好的描述某些真实网络结构特性. 在加权网络模型的基础上, 提出了基于局部节点强度信息的路由算法. 比较分析了基于节点强度信息和节点度信息的路由算法对网络传输能力的影响.

[1] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C 1999 *Comp. Comm. Rev.* **29** 251
 [2] Redner S 1998 *Eur. Phys. J. B* **4** 131
 [3] Barabasi A L, Jeong H, Neda Z, Ravasz E, Schubert A, Vicsek T 2002 *Physica A* **311** 590
 [4] Jeong H, Mason S P, Barabasi A L, Oltvai Z N 2001 *Nature* **411** 41

[5] Erdős P, Rényi A 1959 *Publ. Math.* **6** 290
 [6] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
 [7] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
 [8] 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]
 [9] Yakubo K, Korošak D 2011 *Phys. Rev. E* **83** 066111

- [10] Ferretti L, Cortelezzi M 2011 *Phys. Rev. E* **84** 016103
 [11] Gao J X, Chen Z, Cai Y Z, Xu X M 2010 *Phys. Rev. E* **81** 041918
 [12] Chakraborty A, Manna S S 2010 *Phys. Rev. E* **81** 016111
 [13] Baronchelli A, Castellano C, Pastor-Satorras R 2011 *Phys. Rev. E* **83** 066117
 [14] Geng X M, Wen G H 2007 *Int. J. Mod. Phys. C* **18** 1435
 [15] Wen G H, Duan Z S, Chen G R, Geng X M 2011 *Physica A* **390** 4012
 [16] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 228701
 [17] Xie Z, Li X, Wang X F 2008 *Comm. Theor. Phys.* **50** 261
 [18] Kagawa Y, Takamatsu A 2009 *Phys. Rev. E* **79** 046216
 [19] Fagiolo G, Reyes J, Schiavo S 2009 *Phys. Rev. E* **79** 036115
 [20] Garlaschelli D, Loffredo M I 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 038701
 [21] Furuya S, Yakubo K 2008 *Phys. Rev. E* **78** 066104
 [22] Holme P, Kim B J 2002 *Phys. Rev. E* **65** 026107
 [23] Krapivsky P L, Redner S, Leyvraz F 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4629
 [24] Albert R, Jeong H, Barabai A L 1999 *Nature* **401** 130
 [25] Ravasz E, Barabasi A L 2003 *Phys. Rev. E* **67** 026112
 [26] Wang W X, Wang B H, Hu B, Yan G, Ou Q 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 188702
 [27] Wang D, Yu H, Jing Y W, Jing N, Zhang S Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6802 (in Chinese) [王丹, 于灏, 井元伟, 姜因, 张嗣瀛 2009 物理学报 **58** 6802]

On weighted scale-free network model with tunable clustering and congestion*

Wang Dan[†] Jin Xiao-Zheng

(Key Laboratory of Manufacturing Industrial Integrated Automation, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

(Received 6 January 2012; revised manuscript received 4 June 2012)

Abstract

We propose an evolutionary model for weighted network with tunable clustering coefficient according to characteristics of real network. The model gives power-law distributions of degree, weight, and strength, as confirmed in many real network. In particular, the weighted model has a nonlinear correlation between average clustering coefficient and degree, which is in good agreement with flat head real weighted technological network. Moreover, the effect of the weighted network structure on traffic delivery is studied. The packet traffic flow on the weighted scale-free network is investigated based on the local routing strategy using node strength, and the delivering ability of node is controlled by node strength. The simulations show that the traffic dynamics depends strongly on the controlled parameter.

Keywords: scale-free network, weighted network, clustering coefficient, congestion

PACS: 89.75.Fb, 05.90.+m, 02.50.-r

* Project support by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61203152, 61104029), and the Scientific Research Foundation for Doctor of Liaoning Province of China (Grant No. 20121040).

[†] E-mail: wangdan0307@126.com