

# 交通流驱动的含权网络<sup>\*</sup>

汪秉宏<sup>†</sup> 王文旭 周涛

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

**摘要** 文章对含权复杂网络研究的最近进展给予了评述,特别报道了文章作者最近提出的一个交通流驱动的含权技术网络模型.这一模型能够同时给出网络连接度分布的幂函数律、网络强度分布的幂函数律、网络权重分布的幂函数律,以及高聚集性和非相称混合性等五大特征,因此成功地刻画了真实技术网络的无尺度性质和小世界效应.

**关键词** 含权网络,交通流驱动,技术网络,小世界效应,无标度网络,幂函数律

## A weighted complex network model driven by traffic flow

WANG Bing-Hong<sup>†</sup> WANG Wen-Xu ZHOU Tao

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** We review recent progress in the research on weighted complex networks. In particular, we present our recent model of a traffic flow driven weighted technological network. This model can show simultaneously five characteristics of a real network such as the power law distribution for the degree of connection, strength, weighting, as well as the large clustering coefficient and non-assortative mixing property. Hence, this model describes successfully scale-free behavior and small-world effects of real technological complex networks.

**Keywords** weighted networks, driven by traffic flow, technological network, small world effect, scale-free network, power law

### 1 引言

最近,普遍存在的网络系统诸如互联网(Internet)<sup>[1]</sup>、万维网(world wide web)<sup>[2]</sup>、科学家合作网<sup>[3,4]</sup>和全球航空网<sup>[5,6]</sup>等等成为人们的研究热点.这些网络系统被统称为复杂网络,因为人们发现,几乎所有的复杂系统都具有网络的结构.对于复杂系统和复杂性科学的研究已经成为本世纪的重大科学研究问题,因而复杂网络的研究自然成为当前科学前沿的一个研究焦点.揭示、刻画和理解复杂网络的各种普适性质及其内在动力学相互作用机制就成为物理学家当前面临的一个重要挑战<sup>[7,8]</sup>.

人们已经发现大量真实网络既非规则网络,亦非完全随机网络,而是介于两者之间的具有小世界特征和无尺度统计特征的网络.表1列出各种网络

最主要的三种结构特征.其中涉及的一些关于网络模型和特征的基本概念与定义可以参阅文献[8].

表1 各种网络主要拓扑特征一览

	平均距离	簇系数	度分布
规则网络	大	大	函数
随机网络	小	小	泊松分布
WS小世界网络	小	大	指数分布
BA无标度网络	小	小	幂律分布
很多真实网络	小	大	近似幂律分布

真实网络的新统计特性的发现提出两个重要的科学问题:一是如何解释这种新的统计特征出现的

\* 国家自然科学基金(批准号:10472116, 70271070, 10532060, 10547004)、中国科学院院长基金特别支持项目计划、高等教育博士点专项基金(SRFDP 20020358009)资助项目

2005-07-28收到初稿,2005-09-26修回

† 通讯联系人. Email: Bhwang@ustc.edu.cn

潜在机制;二是这些新的特征将如何影响网络上的动力学行为.规则网络和随机网络都只能符合真实网络的某种特性.1998年,Watts和 Stogatz通过以某一小值概率  $p$  切断规则网络中原始的边,并随机选择新的端点重新连接,构造出了一种介于规则网络和随机网络之间的网络(WS网络),它同时具有大的簇系数和小的平均距离,这类网络被称为小世界网络<sup>[9]</sup>.1999年,Barabási和 Albert给出了构造无标度网络的演化模型<sup>[10]</sup>.他们把真实系统通过自组织生成无标度的网络归功于两个主要因素:生长和优先连接.而他们的模型(BA网络)正是基于这两个关键机制设计的.WS网络和BA网络分别能符合真实网络的两种特征.WS小世界网络模型和BA无标度网络模型的提出立即掀起复杂网络演化机制研究的热潮.

一个自然的问题是可否设计一个简洁的模型同时再现真实网络的三大特征.最早尝试回答这一问题的是Dorogovtsev - Mendes - Samukin<sup>[11]</sup>,但是他们的模型仅仅是在原有的BA机制上强行加上一种与次近邻点连边的机制,对其物理意义无法给出更清楚的阐明.随后,Klemm和Eguiluz建立了一个可以得到大簇系数的模型<sup>[12]</sup>,这个模型开启了对于老化网络的研究,但是当网络规模趋于无穷时,该网络并不是小世界的.最早成功尝试的网络模型是Holme - Kim网络<sup>[13]</sup>,它是BA机制的一种推广,既可以得到大而且连续可调的簇系数,又同时保持短的平均距离和结点度的幂率分布.Szabo等人进一步得到了这一模型的解析结果<sup>[14]</sup>.中国科学技术大学复杂系统研究组最近研究了一类随机阿波罗网络,可以证明这一网络也同时具有这三种特征<sup>[15-18]</sup>.

对真实网络统计特性的进一步研究向网络建模提出了新的要求.比如,Newman发现社会网络往往具有正的度度相称配合性,而技术生物网络却具有负的度度相称配合性<sup>[19]</sup>,其中的原因到底是什么,现在仍然没有人能够给出满意的回答.又如Ravasz和Barabási发现很多真实网络中结点簇系数与结点度之间存在负相关,被称为分层结构的幂律关系<sup>[20]</sup>.尽管很多网络模型(例如随机阿波罗网络)能够再现与真实网络相似的簇度相关性,但是这种相关性出现的机制并未得到清楚的理解.再如,Amaral等人认为结点具有老化特征,即随着结点加入网络的时间变长,它吸引新结点的能力也会减弱<sup>[21]</sup>.

Klemm和Eguiluz已经给出一个科学引文网络结点老化的实证<sup>[12]</sup>.各种各样有关老化网络的理论模型

也被提出,如幂函数形式老化<sup>[22]</sup>,指数形式老化<sup>[23]</sup>,生长老化机制同时存在情形<sup>[24]</sup>等等.这些老化模型的一个共同的问题就是当网络规模趋于无穷时,老化效应会使得网络的平均距离增长趋势变得与网络规模增长趋势线性相关,而这一特征是与实证不符合的.小世界效应与老化机制之间的矛盾如何调和?这是当前复杂网络研究中的一个人们关注的问题.

迄今为止的复杂网络研究主要集中在不含权重的网络图上.最近越来越多的实证数据表明,仅仅将实际系统抽象成布尔网络是远远不够的<sup>[4]</sup>.单纯的拓扑结构将忽略很重要的客观存在的物理信息,这就使含权网络的引入成为必然.含权网络定义了结点权和连边权两个超越纯拓扑结构的概念,分别用来表示结点的重要程度和结点之间的作用强度.边权表示的个体之间的相互作用可以是多种多样的.例如在科学家合作网中,边权可以表示两个科学家合作发了多少篇文章;在互联网中可以表示两个路由器或两个域之间的交通量;在蛋白质相互作用网络中,可以表示酶之间化学物质交换的流量.由此可见,含权网络不仅能够反映实际网络的拓扑结构,而且能够反映真实网络上的动力学特征.近两年来,由于越来越多的含权网络实证数据的获得,使得系统地研究含权网络成为可能.关于含权网络的近期有影响力的工作是由Barrat - Barthelemy - Vespignani (BBV)完成的<sup>[6, 25]</sup>.他们提出了一个含权演化网络模型,可以同时得到点权、点度和边权的power-law分布,此三种分布的斜率仅随一个参数变化可调.这一模型的解析理论证明,幂函数律之斜率处在2与3之间.这一结果与绝大部分真实网络是符合的<sup>[26]</sup>.但BBV模型不能够显示真实网络所具有的许多其他特性,例如大的簇系数,相称混合性问题和度权非线性相关的现象.我们知道,由于连接性的偏好可以分为正负相称两种类型,实际网络可以被分为两大类,社会网络是正相称的(assortative),技术网络和生物网络是负相称的(disassortative)<sup>[19]</sup>.所以有必要将这两类网络分开研究.我们注意到了技术网络和生物网络中共同具有的流(信息流、交通流或者化学物质流)这个物理量,于是尝试提出流量增长和网络的自适应性是决定技术网络和生物网络演化的根本机制,希望这一机制能够解释为什么技术网络和生物网络具有负相称性而与社会网络有本质区别.

我们最近发表在物理评论快报上的工作<sup>[27]</sup>提

出一个交通流量驱动的含权网络模型. 这一模型通过引入拓扑结构和网络中的流的相互作用, 成功地再现了度、点权和边权同时满足幂函数律分布、以及大的可调的簇系数和可调的负的相称度诸多技术网络和生物网络所具有的真实统计特征, 并给出平均场理论的解析. 迄今为止我们看到的任何一个非含权网络模型, 都不能够同时得到如此多的与实际网络符合的性质, 因此这一工作揭示了权重在网络演化中起着不可或缺的非常重要的作用. 本文介绍这一工作的主要内容.

## 2 含权网络的一些基本性质及其刻画

以下给出关于含权网络的一些基本性质的定量描述. 一个含权网络可以用网络的连接权重矩阵  $w_{ij}$  表示, 其中  $i, j=1, \dots, N$ , 这里  $N$  为网络的大小, 即结点总数. 可以拿全球航空网为例, 边的权重  $w_{ij}$  表示机场  $i$  和  $j$  之间直飞航班的机舱座位数目, 也就是两个机场之间的航空交通流量. 本文只考虑非定向连接图, 因而权重矩阵是对称的:  $w_{ij} = w_{ji}$ . 真实网络的度分布 (一个结点具有度为  $k$  的概率  $P(k)$ ) 通常呈现出幂函数律特征<sup>[5,6]</sup>:

$$P(k) \sim k^{-\gamma}, \quad (1)$$

其中  $2 < \gamma < 3$ . 边的权重分布 (一条边具有权重为  $w$  的概率)  $P(w)$  则是含权网络的另一个重要特征. 可以发现真实网络的  $P(w)$  也具有幂函数律特征, 在横跨几个数量级的范围内遵从幂函数律, 但具有胖尾<sup>[28]</sup>.

非含权网络的结点的连接度的概念对于含权网络的自然推广是结点的强度:

$$s_i = \sum_j w_{ij}, \quad (2)$$

其中求和是对于结点  $i$  的所有相连邻居结点的集合  $(i)$ . 结点强度的概念包含了结点的连接度的信息, 同时也包含了所有与其相连的边的权重信息. 例如, 航空网络的结点强度反映了某个机场的实际航空交通的总吞吐量, 因此是该机场的大小和重要性的最好度量. 真实含权网络的实证统计表明, 结点强度的分布  $P(s)$  也类似于度分布具有带胖尾的幂函数律特征. 更进一步的研究发现: 结点强度与结点连接度是关联的, 通常呈现出无标度的关联性<sup>[29, 30]</sup>:

$$s \sim k. \quad (3)$$

网络的平均最短距离为

$$d = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j} d_{ij}, \quad (4)$$

其中  $d_{ij}$  是连接结点  $i$  与结点  $j$  的最短路径长度.

网络的平均簇系数为

$$C = \frac{1}{N} \sum_i c_i, \quad (5)$$

其中

$$c_i = \frac{1}{k_i(k_i-1)} \sum_{j,h} a_{ij} a_{ih} a_{jh} \quad (6)$$

是第  $i$  结点的簇系数. 这里  $a_{ij}$  为连接矩阵元:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若结点 } i \text{ 与结点 } j \text{ 相连接;} \\ 0, & \text{若结点 } i \text{ 与结点 } j \text{ 不连接.} \end{cases}$$

网络的相称混合程度 (assortative mixing):

在社会网络中, 人们之间的连接关系往往可以用语言或者人种来划分. 例如对于性伙伴关系的统计显示, 人们倾向于与同种族的人结成性伙伴. 社会网络的这种性质称为相称混合 (assortative mixing)<sup>[31]</sup>. 但是混合也可以是非相称的 (disassortative), 亦即网络中的结点偏好于跟与其不同的结点连接. Newman 定义了相称系数 (assortative coefficient)  $r$  作为区分这两种类型混合性质的度量. 而如果考虑以结点连接度的混合, 则显示出一种惊人的模式: 几乎所有研究过的社会网络都显示出正的相称系数, 而所有其他网络包括技术网络和生物网络, 都显示出负的相称系数. 这种性质是否为普适的? 两类网络有区别的原因是什么? 这些问题至今未有答案.

按照结点度的混合性质考虑的相称系数特别称为度相称系数或者度-度关联系数. 文献 [31] 给出的计算公式是:

$$r = \frac{M^{-1} \sum_{i,j} k_i k_j - \left[ \frac{1}{2} M^{-1} \sum_i (k_i^2 + K_i) \right]^2}{\frac{1}{2} M^{-1} \sum_i [(k_i)^2 + (k_i)^2] - \left[ \frac{1}{2} M^{-1} \sum_i (k_i + K_i) \right]^2}, \quad (10)$$

这里把网络中的所有连边编号:  $i=1, \dots, M$ ,  $M$  为网络中的边的总数. 所有的连边是有向的,  $k_j$  表示第  $i$  条边所指向的结点的余度 (入余度),  $k_i$  表示发出第  $i$  条边的结点的余度 (出余度). 所谓余度即是该结点的连接度减去这条边本身, 亦即:  $k_j = k_j - 1$ . 上述计算公式当然也适用于一般的非定向网络. 因为对于非定向网络, 每一条边可以分成两条指向相反的有向边, 即可按上式计算.

## 3 我们的网络模型

迄今为止的生长网络模型都认为, 按照连接度

或者强度的优先接触机制是造成网络的无尺度分布特性的原因,但是这一机制仅仅考虑新增结点与老结点之间的相互作用.事实上,这种相互作用也应该存在于老结点之间.表达这一相互作用的最合理和最简单的一种可能方式,就是相连接点的强度耦合,亦即结点  $i$  和结点  $j$  之间边权的增长速度与强度乘积  $s_i s_j$  成正比.

我们来回顾 BA 网络模型:每一时步,一个新的结点  $n$  加入到网络中,它发出  $m$  条边以连接度概率优先连接原则与老的结点相连,这一规则可以表示为连接度的乘积形式:

$$P_{ni}^{BA} = \frac{k_i}{k_j} = \frac{k_n k_i}{k_n k_j} \quad (11)$$

类似地,在 BBV 网络中,新结点  $n$  与老结点  $i$  的优先黏结原则是强度耦合概率

$$P_{ni} = \frac{s_i}{s_j} = \frac{s_n s_i}{s_n s_j} \quad (12)$$

我们的主要观点是:相互作用也以上面的相同方式存在于所有老结点之间,这种相互作用是被网络中的逐渐增长的交通量所驱动的,并且反过来对于网络中的交通流有显著的影响.这就是说:在老结点之间也要允许产生新的连边,同时,已经存在的沿着连边的交通流将随着网络的生长而不断更新.我们的这一思想来源于真实网络的如下启示:结点之间的物理相互作用对于网络在动力学演化过程中的拓扑结构的确定至关重要.实际上, Dorogovtsev - Mendes 早在 2000 年就提出一类非含权网络模型,其中新连边可以加在老结点之间,存在的边亦可被撤除<sup>[32]</sup>. 所以我们也从他们的工作中得到部分启发.

我们希望构建这样的动态演化(生长)网络模型:它既允许新结点的加入,又允许老结点之间边权(流量)的增长,以及由于流量的增长而导致的网络内部的重新联边过程.我们将以强度相乘作用机制来统一新点的加入和老点的演化.为了实现网络的功能,新加进的结点应该偏好于与强度大的老结点相连,这样可以尽可能地分担其他结点与新点之间的交通流量.强度大的老结点之间流量增长得快,所以它们之间的连结和交通必须优先建立以尽可能保持网络中的交通畅通.

下面叙述我们的网络模型.网络的初始位形中有  $N_0$  个结点,所有已经存在的连边均被赋予初始权重  $w_0$

拓扑生长(新结点加入及连边规则):每一时步

网络生长出一个新结点,与已有网络中的老结点连  $m$  条新边,连边的偏好概率与(12)式相同,即按照结点强度优先黏结.每一条新边的权重亦设定为  $w_0 = 1$ .

强度耦合动力学(老结点之间的连边含权规则):在每一时步,所有可能的(存在或者尚未存在)的连边均按照如下强度耦合机制更新:

$$w_{ij} \begin{cases} w_{ij} + 1, & \text{以概率 } W P_{ij}, \\ w_{ij}, & \text{以概率 } 1 - W P_{ij} \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$P_{ij} = \frac{s_i s_j}{s_a s_b} \quad (14)$$

是结点  $i$  与结点  $j$  之间的连边按照强度耦合(交通流量)排序的优先概率,由它确定权重  $w_{ij}$  的增量.如果结点  $i$  与结点  $j$  不相连,则  $w_{ij} = 0$ . 边权的总增量由

$$\sum_{i < j} w_{ij} = W \quad (15)$$

控制,为简单起见,我们设定为常数.显然,参数  $W$  反映了整个网络的总交通负荷的增长速率.例如,对于通信系统,  $W$  反映了总的信息流的增长速率.持续增长的交通需求对于网络的演化起着驱动力的作用.

当初始结点数目  $N_0$  很小时,(13)式中的概率  $W P_{ij}$  可能会超过 1,在这种情况下,我们就自动地把它限定为 1.这样的处理也许会影响网络的初始演化,但是这对于我们讨论统计意义上的网络性质并不重要,因为网络的统计性质几乎与网络的初态无关.

我们的网络模型就以上面两条彼此影响的机制,亦即拓扑生长和强度耦合的同步并进来定义.这一网络提供了各种各样动力学过程可能出现的平台.

## 4 解析讨论

在每一时步生长一个新结点的情况下,模型的演化时间就可以用新生长的结点总数来度量:  $t = N - N_0$ . 所以,网络的大小  $N$  就成为模型动力学的自然的时间标度.对于一个技术网络,假定整个网络的交通需求和实际的交通负荷随着网络规模的扩大而同步增长,应该是合理的.这正是我们假设  $W$  参数为常数的原因.这一假设也给我们对于模型的解析

讨论带来方便.

采用连续近似,可以把结点度  $k$ , 连边权重  $w$ , 结点强度  $s$ , 和时间  $t$  全都处理为连续变量<sup>[1, 33]</sup>. 于是,我们可以从 (13) 式得到边权的变化率为

$$\frac{dw_{ij}}{dt} = \frac{2W s_i s_j}{s_a s_b} = \frac{2W s_i s_j}{s_a s_b} \quad (16)$$

对于结点  $i$  的强度  $s_i$  来说,它的增加既可能是因为一个新增的结点与结点  $i$  的连接 (拓扑生长动力学),也可以是因为与结点  $i$  的 (已经存在或者尚未存在的) 相连边的权重的更新 (强度耦合动力学). 所以强度的变化率应该是两项之和:

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{W s_i}{s_i} + \frac{m s_i}{s_i} \quad (17)$$

注意到强度总和随时间的增长为  $\sum_i s_i(t) = 2(m + W)t$ , 因而

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{2W + m}{2W + 2m} \cdot \frac{s_i}{t} \quad (18)$$

于是可以解析地得到强度分布满足幂函数律<sup>[25, 33]</sup>:  $P(s) \sim s^{-\alpha}$ , 其中指数  $\alpha = 2 + m / (m + 2W)$ . 显然,当  $W = 0$ , 我们的模型就拓扑等价于 BA 网络,指数值恢复为  $\alpha = 3$ . 对于更大的  $W$  值,分布将变宽,当  $W \rightarrow \infty$  时,  $\alpha \rightarrow 2$ .

### 5 数值模拟结果

我们固定  $N_0 = 3, m = 3$  及  $W_0 = 1$ , 但选取不同的  $W$  值来执行网络的数值模拟. 模拟结果表明,我们的网络模型的无尺度性质几乎与初始条件无关. 数值模拟结果与上面解析讨论的理论预期是一致的.

图 1 给出了网络结点强度的概率分布  $P(s) \sim s^{-\alpha}$  及平均强度与连接度之间的幂函数律关联  $s \sim k$ , 这些结果均与理论预测符合得相当好. 注意到 BBV 网络只能给出标度指数  $\alpha = 1$ , 而在我们的模型中,标度指数  $\alpha$  随参数  $W$  有非平庸的变化 [见图 1 (b)], 因此给出平均强度与连接度之间的幂函数律关联是非平庸的. 更进一步,这里的强度 - 度的关联图也反映出我们的模型与 DM 网络之间的主要区别<sup>[32]</sup>. 虽然 DM 网络也允许内边的生成, 但因为它是含权网络,因而无法模拟已经存在的连接性的增强. 强度与度之间的非平庸关联  $s \sim k$ , 也说明加在已经存在的连边的权重增量实际上在网络的演化中

起重要的作用,所以,我们的模型对于网络上交通流的模拟来说更为合理. 事实上,将  $s \sim k$  与  $P(s) \sim s^{-\alpha}$  两式结合,可以得到度分布的无尺度性质:  $P(k) \sim k^{-\beta}$ , 这是可以进行检验的. 考虑到  $P(k) dk = P(s) ds$ , 可知度分布的标度指数  $\beta = (\alpha - 1) + 1$ .

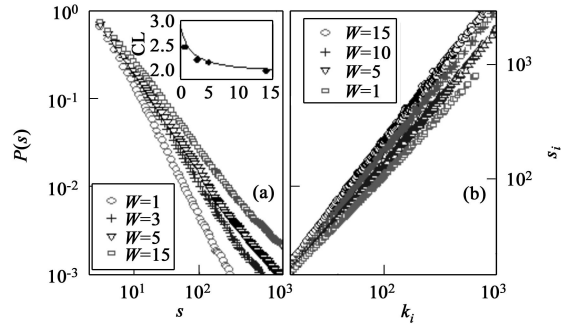


图 1 (a) 网络结点强度的概率分布  $P(s)$ , 模拟结果遵从幂函数律行为  $s^{-\alpha}$ . 在右上角的嵌入小图中, 实心圆显示数据拟合所得到的  $\alpha$  值, 曲线显示解析表达式  $\alpha = 2 + m / (m + 2W)$ . 这里的模拟数据是对于大小为  $N = 5000$  的 20 个网络的平均结果; (b) 在不同参数  $W$  下, 结点强度  $s_i$  作为结点连接度  $k_i$  的函数 (纵横坐标双对数标度). 数据的线性拟合对于  $W = 1, 5, 10, 15$ , 得到的斜率分别为 1.04, 1.17, 1.25, 1.30, 从而证实强度与连接度之间的幂函数律关联:  $s \sim k$

图 2 显示了对于结点度分布和连边权重分布标度律的验证. 这一模拟结果证实我们的网络模型对于结点的连接度分布和强度分布以及对于所有连边的权重分布都呈现出非平庸的幂函数标度律.

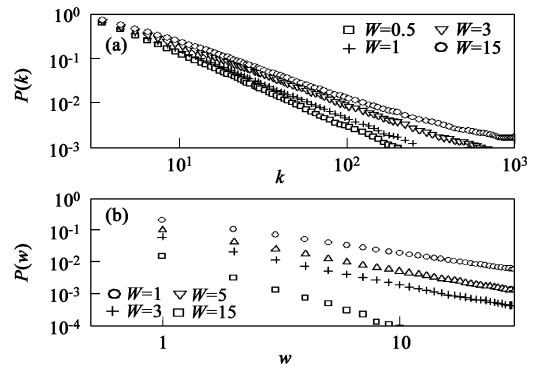


图 2 (a) 网络结点连接度的概率分布  $P(k) \sim k^{-\beta}$ ; (b) 网络连边权重的概率分布  $P(w) \sim w^{-\gamma}$ . 模拟数据是对于大小为  $N = 5000$  的 20 个网络的平均结果

图 3 显示了本网络的簇系数  $C$  和度度关联系数  $\gamma$  的计算结果. 我们知道, 对于 BA 网络, 簇系数几乎为零, 与呈现出各种小世界效应的实际网络相距甚远. 而我们的网络, 显示出簇系数  $C$  随参数  $W$  的变化, 当  $W \rightarrow \infty, C \rightarrow 1$ , 即交通总负荷增长得越快

的网络,它的小世界效应越显著.这一特征得到大量真实网络经验数据的支持.模拟结果给出负值的度关联系数  $r$ ,印证了我们对于技术网络模型的构思.以交通流驱动的含权网络必定属于技术网络,其中结点的连接偏好属于不相称混合,它们的相称系数应该为负值.

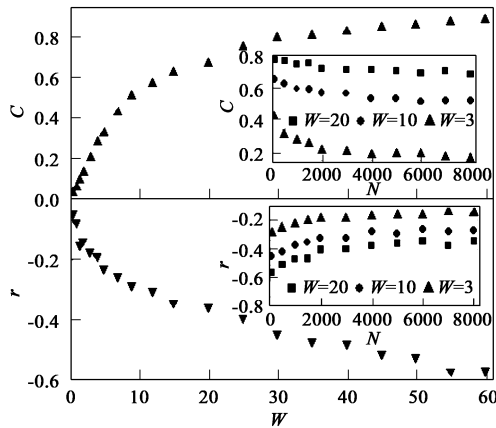


图3 (a)簇系数  $C$  随参数  $W$  的变化.嵌入小图中显示簇系数  $C$  的时间演化(亦即簇系数  $C$  随  $N$  的变化),可以看到收敛性很好.(b)度关联系数  $r$  随参数  $W$  的变化.嵌入小图中显示  $r$  的时间演化,显现出很快的收敛性

## 6 讨论与结论

我们的交通流驱动含权网络模型同时再现了许多真实技术网络的无尺度性质和小世界效应.仅用一个参数 ( $W$ ) 的调控,我们可以构造各种交通负荷增长速率的技术网络,它们呈现出网络连接度 ( $k$ )、网络强度 ( $s$ )、网络权重 ( $w$ ) 分布的非平庸的幂函数律,并显示出明显的聚集性和非相称的混合性,刻画网络聚集性的簇系数  $C$  和刻画网络的非相称混合程度的相称系数  $r$  均随控制参数  $W$  有非平庸的变化.

我们的工作揭示出网络结点强度与网络系统内部的交通需求的相互作用是普遍存在的,这种普适性的相互作用对于技术网络的结构演化将起决定性的作用.我们所建议的交通驱动机制可以导致技术网络的各种各样无标度行为、小世界效应和非相称混合的性质,这些性质呈现出对于总交通需求增长速度的非平庸的依赖关系.我们的网络模型的模拟结果得到大量真实技术网络经验数据的验证和支持.所以,我们所建议的交通驱动含权网络模型对于

包含物理权重的技术网络的结构、功能、内在的相互作用及整体的动力学演化机制提供了新的理解,并且显示出对于互联网、航空网和交通运输网等一大类实际网络的可能应用价值.

然而还有许多重要的问题等待解决,例如,为何社会网络是正相称混合的而技术网络和生物网络却是负相称混合的<sup>[34]</sup>? 寻找这些问题的答案可能需要对含权网络作进一步深入研究.但是已经很明显,含权网络所具有的物理内涵远远超出非含权网络.关于含权网络的丰富的物理内容有待于人们进一步揭示和研究.含权网络的结构、功能、动力学及演化机制的深入理解已经成为称之为信息物理的一个新领域的重要基础问题.所以对于含权网络的研究既有深刻的理论意义,又有广阔的应用前景.

本文是对于我们在文献 [27] 中所发表工作的介绍,文中的图 1, 图 2, 图 3 均取自这一文献,特此说明.

## 参考文献

- [1] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Evolution and Structure of the Internet: A Statistical Physics Approach. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- [2] Albert R, Jeong H, Barabási A-L. Nature, 1999, 401: 130
- [3] Newman M E J. Phys Rev E, 2001, 64: 016132
- [4] Barabási A-L, Jeong H, Nedetzka Z *et al*. Physica A, 2002, 311: 590
- [5] Guimera R, Mossa S, Turtschi A *et al*. cond-mat/0312535
- [6] Barrat A, Barthélemy M, Pastor-Satorras R *et al*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2004, 101: 3747
- [7] 周涛, 傅忠谦, 牛永伟等. 自然科学进展, 2005, 15(5): 513 [Zhou T, Fu ZQ, Niu YW *et al*. Progress in Natural Science, 2005, 15(5): 513 (in Chinese)]
- [8] 周涛, 柏文洁, 汪秉宏等. 物理, 2005, 34(1): 31 [Zhou T, Bai W J, Wang B H *et al*. Wuli (Physics), 2005, 34(1): 31 (in Chinese)]
- [9] Watts D J, Strogatz S H. Nature, 1998, 393: 440
- [10] Barabási A-L, Albert R. Science, 1999, 286: 509
- [11] Dorogovtsev S N, Mendes J F F, Samukin A N. Phys Rev E, 2001, 63: 062101
- [12] Klemm K, Eguiluz V M. Phys Rev E, 2002, 65: 057102
- [13] Holme P, Kim B J. Phys Rev E, 2002, 65: 026107
- [14] Szabó G, Alava M, Kertész J. Phys Rev E, 2003, 67: 056102
- [15] Andrade Jr J S, Herrmann H J, Andrade R F S *et al*. Phys Rev Lett, 2005, 94: 018702
- [16] Doye J P K, Massen C P. Phys Rev E, 2005, 71: 016128
- [17] Zhou T, Yan G, Wang B H. Phys Rev E, 2005, 71: 046141
- [18] Zhou T, Yan G, Zhou P-L, *et al*. arXiv: cond-mat/0409414

- [19] Newman M E J. Phys Rev Lett, 2002, 89: 208701  
 [20] Ravasz E, Barabási A-L. Phys Rev E, 2003, 67: 026112  
 [21] Amaral L A N, Scala A, Barthélemy M *et al* PNAS, 2000, 97: 11149  
 [22] Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Phys Rev E, 2000, 62: 1842  
 [23] Zhu H, Wang X-R, Zhu J-Y. Phys Rev E, 2003, 68: 056121  
 [24] Jiang P-Q, Wang B-H, Zhou T. Chin Phys Lett, 2005, 22(5): 1285  
 [25] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A. Phys Rev Lett, 2004, 92: 228701  
 [26] Newman M E J. SIAM Review, 2003, 45: 167  
 [27] Wang W-X, Wang B-H, Hu B *et al* Phys Rev Lett, 2005, 94: 188702  
 [28] Li W, Cai X. Phys Rev E, 2004, 69: 046106  
 [29] Goh K-I, Kahng B, Kim D. cond-mat/0410078  
 [30] Pastor-Satorras R, Vazquez A, Vespignani A. condmat/0105161  
 [31] Newman M E J. Phys Rev E, 2003, 67: 026126  
 [32] Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Europhys Lett, 2000, 52: 33  
 [33] Albert R, Barabási A-L. Rev Mod Phys, 2002, 74: 47  
 [34] Caldarelli G, Erzan A, Vespignani A. Eur Phys J. B, 2004, 38: 143

· 书评和书讯 ·

## 科学出版社物理类新书推荐

书 名	作 (译) 者	定 价	出版日期	发行号
微分几何入门与广义相对论 (上, 第二版)	梁灿彬, 周彬	59.00	2005年 12月	O - 2363
液晶物理与液晶显示	王新久	68.00	2005年 12月	
量子信息物理原理	张永德	59.00	2005年 12月	O - 2347
相互作用的规范理论	戴元本	68.00	2005年 6月	O - 2148
计算物理学	马文淦	37.00	2005年 5月	O - 2147
计算电磁学要论	盛新庆	32.00	2005年 3月	O - 1900
窄禁带半导体物理学	褚君浩	120.00	2005年 5月	O - 2093
计算声学——声场的方程和波	李太宝	38.00	2005年 1月	O - 2016
半导体量子器件物理	傅英, 陆卫	50.00	2005年 1月	O - 2004
现代声学理论基础	马大猷	48.00	2005年 1月	O - 1830
物理学家用微分几何 (第二版)	侯伯元, 侯伯宇	98.00	2005年 3月	O - 1976
数学物理方程及其近似方法	程建春	58.00	2005年 2月	O - 1952
准晶物理学	王仁卉	45.00	2004年 8月	O - 1802
非平衡凝固新型金属材料	陈光, 傅恒志	42.00	2004年 8月	O - 2027
金属陶瓷薄膜及其在光电子技术中的应用	孙大明, 孙兆奇	56.00	2004年 7月	O - 1942
软 X射线射线与极紫外辐射的原理和应用	张杰	59.00	2003年 9月	O - 1682
现代压电学 (上中下)	张福学	99.00	2003年 5月	
拉曼布里渊散射——原理及应用	程光照	48.00	2003年 5月	O - 1301
应用力学对偶体系	钟万勰	42.00	2003年 3月	O - 1542
广义相对论和引力场理论	胡宁	15.00	2003年 3月	O - 1157

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书. 如果您有出版意向, 请和我们联系. 凡购书者均免邮费, 请按以下方式和我们联系:

电 话: 010 - 64017957 64033515 电子邮件: mlhukai@yahoo.com.cn 或 dpyan@cspg.net

通讯地址: 北京东黄城根北街 16号 科学出版社 邮政编码: 100717 联系人: 胡凯 鄢德平

欢迎访问科学出版社网址: <http://www.sciencep.com>

### 更 正

本刊 2006年 35卷第 3期第 181页, 右栏倒数第 4行“俞启威即黄敬的遗孀”应为“俞启威即黄敬的遗孀”, 特此更正, 并对由此给作者和读者带来的不便致以歉意.

《物理》编辑部

2006年 4月