

复杂网络理论在城市交通网络分析中的应用

Application of Complex Network Theory to Urban Transportation Network Analysis

赵月¹ 杜文¹ 陈爽²

(1.西南交通大学交通运输学院,四川 成都 610031;2.西南科技大学土木工程与建筑学院,四川 绵阳 621010)

Zhao Yue¹, Du Wen¹ and Chen Shuang²

(1.College of Traffic & Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2.Institute of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

摘要: 介绍了复杂网络的基本概念并详细分析了城市交通网络的特性。列举了2种将城市交通网络抽象为复杂网络的方法,探讨了各自存在的不足。从网络实证、网络演化机制、网络演化性质、网络动力学和网络结构稳定性5个方面总结了复杂网络理论在城市交通网络分析中的研究进展,指出了目前存在的问题。最后给出了城市交通网络复杂性研究的几个可能方向。

Abstract: This paper starts with an introduction of the definition of complex networks, and further elaborates the characteristics of urban transportation systems. Then the paper proposes two approaches to extracting urban transportation systems as complex networks, and discusses their shortcomings, respectively. Based on a summary of the applications of the above methods from 5 aspects, such as practice, evolution mechanism and features, network dynamics and structure stability and so on, the paper identifies existing issues in the applications. Finally, the paper indicates prospective research directions in complex networks of urban transportation.

关键词: 交通规划; 复杂网络; 演化机制; 网络动力学; 城市交通网络

Keywords: transportation planning; complex network; evolution mechanism; network dynamics; urban transportation network

中图分类号: U491.1³ 文献标识码: A

收稿日期: 2008-02-28

作者简介:赵月,男,博士研究生,主要研究方向:复杂交通网络拥堵机理。E-mail:zhuyue1021@126.com

0 引言

复杂网络理论研究始于20世纪60年代由著名数学家Erdos和Renyi提出的ER随机图模型。此后40年里,该模型一直是复杂网络的基本模型,直到1998年,两篇具有开创性的论文相继发表^[1~2],科学家冲破了随机网络理论的禁锢,掀起了一股研究复杂网络的热潮。

与此同时,复杂网络的神奇魅力也吸引了广大交通学者,他们通过大量的实证研究发现,交通运输网络和其他网络一样,具有复杂网络的结构特性^[3~8],这一发现,为深入研究交通网络的特性与拓扑结构之间的相互作用奠定了坚实基础。但是,交通网络的空间实体性又使其与社会网络等抽象网络不同,这一点在城市道路网络中表现尤为明显,因此,有必要以新的视角来审视城市交通网络。

1 复杂网络的统计参数

人们在研究复杂网络结构的统计特性时提出了许多概念,其中有3个基本概念:平均路径长度、聚类系数、度分布。而后,基于研究具体问题的需要又提出了效率、集中性等概念。

1.1 平均路径长度(Characteristic path length)

网络 G 中两个节点 i 和 j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接这两个节点的最短路径的边数。对于一个无向网

络, 定义平均路径长度 L 为网络中节点对之间距离 d_{ij} 的平均值:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i,j \in G, i \neq j} d_{ij}, \quad (1)$$

式中: N 为网络节点数。网络的平均路径长度也称为网络的特征路径长度, 用来衡量网络节点间的离散程度。研究表明, 尽管许多实际网络的节点数巨大, 但网络的平均路径长度 L 相对于 N 来说却很小, 这种现象称之为“小世界效应”^[1]。

1.2 聚类系数(Clustering coefficient)

一般地, 假设网络 G 中一个节点 i 有 e_i 条边和其他 k_i 个节点相连, 这 k_i 个节点就称为节点 i 的邻居。显然, 这 k_i 个节点间最多可能有 $k_i(k_i-1)/2$ 条边, k_i 个节点之间实际存在的边数 E_i 与总的可能边数的比值定义为节点 i 的聚类系数 C_i , 网络中所有节点 i 的聚类系数的平均值就是网络的聚类系数, 用 C 表示, 即:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}, \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i \in G} C_i. \quad (3)$$

节点 i 的聚类系数也可定义为^[9]:

$$C_i = \frac{\text{包含节点 } i \text{ 的三角形的个数}}{\text{以节点 } i \text{ 为中心的三点组的个数}}, \quad (4)$$

式中: 以节点 i 为中心的三点组是指包括节点 i 的3个节点, 并且至少存在从节点 i 到其他2个节点的2条边, 如图1所示。

根据式(4)可得: 图1(a)中节点 i 的聚类系数

$C_i = 1$; 图1(b)中节点 i 的聚类系数 $C_i = 0$ 。

1.3 度及度分布(Degree and degree distribution)

图论中节点 i 的度 k_i 定义为与该节点连接的其他节点的数目, 从直观上, 一个节点的度越大就意味着这个节点在某种意义上越重要。一般来说, 并不是所有的节点都具有相同的度, 通常用分布函数 $P(k)$ 来描述网络中节点的度分布情况, $P(k)$ 表示一个随机选定节点的度恰好为 k 的概率。节点度的分布特征是网络的重要几何性质, 规则网络中各节点的度值相同, 符合 Delta 分布, 随机网络的度分布可近似为 Poisson 分布, 大量的实际网络存在幂律形式的度分布, 称为无标度网络^[10-11], 同时在现实中还有很多网络的度分布服从指数分布。

1.4 效率(Efficiency)

网络的效率是用来衡量网络中信息传递有效程度的指标, 可代替平均路径长度和聚类系数来分析网络的小世界行为。网络中节点 i 和 j 之间的效率 ε_{ij} 可用 i 和 j 两点间的距离 d_{ij} 的倒数来计算, 即: $\varepsilon_{ij} = 1/d_{ij}$, 如果 i 和 j 之间不可达, 则 d_{ij} 趋于 $+\infty$, 对应的 $\varepsilon_{ij} = 0$ 。对整个网络而言, 将所有节点对效率的平均值定义为全局效率, 用 E_{global} 表示^[12-13]。

$$E_{global} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in G, i \neq j} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in G, i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}. \quad (5)$$

考虑到非连通图的情况, 可通过计算局部子图 G_i (由从节点 i 出发可达的所有节点构成) 的平均效率 E_{local} 来表征网络的局部特性。 E_{local} 与聚类系数 C 相对应, 可用来分析在去除节点 i 的情况

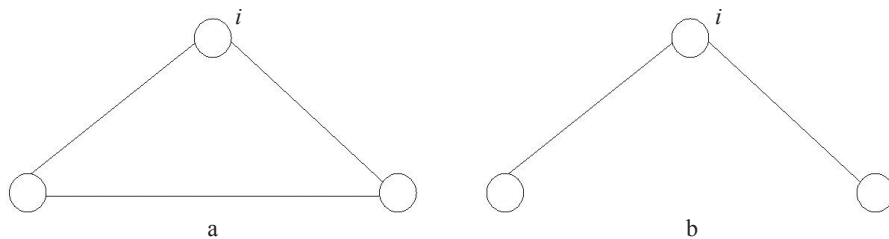


图1 以节点 i 为中心的三点组的可能形式

Fig.1 Two possible types of node i - centered connected triples

下, 其相邻节点间信息传递的有效性^[12~13]。

$$E_{local} = \frac{1}{N} \sum_{i \in G} E(G_i), \quad (6)$$

$$E(G_i) = \frac{1}{k_i(k_i - 1)} \sum_{l, m \in G_i, l \neq m} \frac{1}{d_{lm}}, \quad (7)$$

式中: d_{lm} 为子图 G_i 中节点 l 和 m 间的最短路径长度。

1.5 集中性(Centrality)

集中性指标是一系列指标的集合, 可用来衡量节点在网络中的地位。通过对复杂网络集中性指标的计算能够在规模庞大、结构复杂的网络中迅速地发现集中节点。对于不同的网络, 需要用不同的指标来衡量其集中性, 典型的集中性指标包括度指标 (Degree centrality)、紧密度指标 (Closeness centrality)、介数指标 (Betweenness centrality)、信息集中性指标 (Information centrality) 等, 指标的具体计算方法可参照文献 [14~15]。

2 复杂网络在城市交通系统中的应用

2.1 城市交通网络的特性

城市交通网络除具有绝大多数复杂加权网络的特征外^[16~18], 作为空间网络还具有不同于抽象网络的特性, 这些特性决定了城市交通网络的拓扑性质。具体可归纳为^[19~20]: ①城市交通网络的节点(无论其代表路段还是交叉口)存在于二维地理空间, 且有明确的位置; ②城市交通网络中的边是一种实体连接, 具有明确意义, 并不是抽象空间中所定义的关系; ③城市交通网络中节点的长程连接需要一定成本, 这一特性直接影响着城市交通网络出现小世界行为的可能性; ④城市交通网络中单一节点所能连接的边的数目受到物理空间的限制, 这种限制会影响到网络的度分布。

2.2 城市交通网络的描述

城市交通网络结构因交通模式、演化阶段及发展水平的不同会产生明显差异, 经济技术的发

展时刻改变着交通网络结构。交通网络时空演化的复杂性吸引了经济、地理、城市规划、数学等领域的学者对其拓扑分析方法的研究。文献[21]对交通网络拓扑分析常用的6种方法进行了详细的比较分析, 这6种方法分别是地理信息系统 (Geographic information system)、图论 (Graph theory)、复杂网络 (Complex networks)、数学规划 (Mathematical programming)、模拟仿真 (Simulation)、基于代理商的模型 (Agent-based modeling)。相比较而言, 复杂网络理论作为一种新兴的理论方法表现出了旺盛的生命力, 吸引了众多学者的关注。

将城市交通网络抽象为复杂网络的方法有2种: ①原始法(primal approach)。该方法比较直观, 它将交叉口视为网络的节点, 将路段视为连接节点的边^[22]; ②对偶法(dual approach)。它是一种变换方法, 是在原始图(primal graph)的基础上, 将道路视为网络的节点, 将交叉口视为网络的边^[23]。

在城市交通网络的拓扑分析方面, 原始法比较简单、明了, 相关数据可以直接通过地理信息系统获得, 还可以使用地理学上的米制距离, 而对偶法仅能使用拓扑距离^[22]。但是, 在应用原始法分析城市交通网络的统计性质时仍然存在着一些问题。因为城市交通网络是存在于二维地理空间的实体网络, 网络的一些特性无法通过传统的参数(平均路径长度、度分布)分析获得。为研究该问题, 必须探寻新的统计参数, 这方面的研究已经取得了一定成果^[3,14,22]。

在网络拓扑分析方面, 对偶法优于原始法。在对偶法中, 道路被视为网络的节点, 交叉口被视为边, 事实上, 一条道路可以存在很多个交叉口, 即一个节点可以有大量的边与其相连, 这就使得城市交通网络与其他抽象网络(节点度不受地理空间限制的网络)之间具有可比性^[23]。尽管如此, 对偶法还是存在一系列问题, 如: 对偶法没有考虑道路的地理长度, 忽视了城市交通网络作为空间网络的特性; 为了获得对偶图(dual graph), 需要对道路进行合并处理, 处理的方法

通常有两种,而这两种方法也存在一定的问题^[8]。

2.3 主要研究进展及存在的问题

过去几年里,复杂网络理论在基础科学研究和实际应用上都取得了惊人的进展,但关于城市交通网络的复杂性研究才刚刚开始,有很多问题需要去探索。文献[18]和[24]指出了城市交通网络复杂性问题的研究方向,这对城市交通系统复杂性的研究具有重要指导意义,但本文将以与不同的角度来分析城市交通网络复杂性的研究。

2.3.1 网络的实证研究

网络的实证研究有利于探寻真实复杂系统中尚未被发现的宏观性质,进一步定义新的统计参数来度量这些性质。目前,对城市交通网络的实证研究主要集中在城市道路网络和公共交通网络两个方面。

1) 城市道路网络

文献[25]对德国20个大城市的道路网络研究发现,道路交通量服从幂律分布,并说明了道路的分级特性;文献[23]对具有不同形态和历史背景的6个城市的道路网络(1平方英里范围)进行拓扑分析后发现,它们的网络均为无标度网络,并表现出了小世界特性;文献[8]对美国40个城市的道路网络做了大范围的分析也发现了类似的性质;更为值得关注的是文献[14]的结果,作者将所研究的城市分为自组织城市和规划型城市,然后采用4个集中性指标(紧密度指标、介数指标、直线度指标、信息集中性指标)对其道路网络进行分析,结果显示,自组织城市的路网展现了几乎和非空间网络一致的无标度特性。

2) 公共交通网络

与城市道路网络的研究相比,公共交通网络的研究相对简单,资料更易获得,研究也较为深入。文献[26]对中国4个大城市的公共汽车网络进行分析,结果显示,公共汽车网络的度分布表现为指数形式,同时模拟了公共汽车网络的演化进程,模拟结果与调查拟合良好;文献[7]在分析了波兰22个城市的公共交通网络后发现,所有的网络都展现了小世界特性,网络的度分布有

的符合幂律分布,有的符合指数分布。类似的研究还有很多,如文献[24, 27~28]。

网络的不同表现形式以及针对不同统计参数的分析,对网络拓扑性质的研究具有很大影响。上文已经介绍了城市交通网络的描述方法及一些常用的统计参数,但仅有这些还不够,还需要寻找更好的描述方法、更为有效的统计参数来刻画、分析城市交通网络的复杂性。

2.3.2 网络演化机制

网络演化机制研究是探索具有特定统计性质的网络形成机理的重要手段,主要涉及网络演化中的5类事件:加点、加边、重连、去边、去点,对这方面的研究,W-S小世界网络模型^[11]和B-A无标度网络模型^[12]具有开创性意义。此后,涌现了大量关于网络演化机制的研究^[29~37],为发现复杂网络形成机理以及进一步研究复杂网络上的动力学行为奠定了坚实的基础。就城市交通网络而言,主要研究网络无标度性和流量集中性两个方面。

1) 网络无标度性

目前,对无标度网络的演化机制研究主要集中在优先连接和hub节点形成^[38]两个方面,这些研究主要针对抽象网络,具体到空间网络特别是城市交通网络的研究还不多见。文献[39]通过建立模型将优先连接和距离选择联系起来,从而搭建了无标度性与空间网络的桥梁;文献[40]提出了一种基于预期效用最大的加点模型,并深入分析了地理信息的引入对网络度分布、聚类系数和匹配方式的影响;此外,对于无标度网络的演化机制研究,文献[41]的部分研究结果也可借鉴。

2) 流量集中性

对城市交通网络的实证分析发现,小部分的主干路承担了路网中大部分的交通量^[8,25],文献[44]在进行了大量路网演化模拟实验(基于具有不同参数的规则网络)后指出:交通网络中道路等级的涌现是路网本身固有的性质^[42~45]。这一发现打破了交通网络研究的传统观念(道路等级涌现是有意识设计的结果),同时也带来了一系列疑问,如:是什么原因导致了交通网络道路等级的

涌现? 如何在复杂网络的理论框架下模拟城市交通网络中的流量集中性? 对于一个特定的城市交通网络而言, 是否存在特定时期内的最优等级结构? 如何将一系列结果应用于路网规划设计?

近年来, 学界相继出现了一些基于自组织理论的网络演化模型^[38,46-47], 这些模型为研究上述两种现象的形成机制提供了新思路。城市发展是一种自组织过程, 城市交通网络作为城市形态的重要表现形式, 其发展过程也是自组织的^[48-49]。要解决的问题是: 如何应用自组织理论建立刻画城市交通网络演化的模型? 如何寻找城市交通网络演化中的序参量并以此控制城市交通网络的演化? 利用计算机模拟检验城市交通网络的演化, 在此基础上是否还能表现出无标度性和集中性? 这些研究将对城市交通网络的规划设计方法及城市交通的可持续发展产生深远影响。

2.3.3 网络演化性质

网络演化性质是指实际网络演化过程中的统计规律, 可用来检验网络演化机制模型^[50]。以往在研究网络演化机制模型时, 主要关心统计性质的再现, 而忽略了网络演化过程的统计特征, 这就忽视了网络的时间演化性质和网络动力学过程间的相互作用。如人与人之间接触网络上的传染病传播, 其演化过程是在网络这一舞台上发生的, 但也会在一定程度上改变网络^[51]。由于网络演化的时间序列包含大量数据, 因而难以获得。目前, 网络演化性质的研究还主要集中在合作者网络^[52]和WWW(World Wide Web, 万维网)网络^[53]。

对城市交通网络时空演化的研究表明, 城市交通网络作为一种自相似性的等级结构, 具有分形性质, 且其分形维数随着时间的变化而变化^[54-55]。与此相对应, 文献[4]在研究美国、丹麦和英国3个国家的路网时, 建立了网络度分布指数与分形维数之间的关系模型。利用这一模型, 结合分形维数的时间演化特征, 可以得到网络度分布指数随时间变化的趋势, 进而可以分析引起度分布指数变化的原因、度分布指数的变化所表征的路网生长过程以及不同度分布指数的路网具有的不同性质。

2.3.4 网络动力学

文献[56]指出, 研究网络结构的最终目的是为了理解和解释构建于这些网络之上的系统运作方式^[56]。就城市交通网络而言, 主要是研究网络拓扑结构对网络能力以及网络交通流的影响。文献[57]在研究了网络结构转变过程中(随机网络→无标度网络)网络负荷的变化情况后指出, 随着网络拓扑结构的转变, 网络的表现力逐步恶化, 负荷趋于局部化; 文献[58]则通过研究网络的平均连通度来判断网络对交通拥堵的易感染程度, 结果显示, 当平均连通度小于10时, 对于平均连通度相同的网络, 无标度网络较随机网络更易产生交通拥堵。

现在的问题是: 如何避免大范围交通拥堵的发生? 要解决这一问题, 有必要研究大范围交通拥堵产生的机理。文献[59-60]研究了B-A无标度网络中由点的拥堵和边的拥堵引发的网络相继故障(拥堵的扩散)后发现, 无论是哪种拥堵都存在一个关于负荷的临界值(与网络的拓扑结构有关), 即当点(边)的负荷超过这一临界值时, 网络便发生大面积的拥堵。进一步研究发现, 网络中节点的自修复时间、拥堵延迟时间、内部噪声强度也存在临界值^[61-62]。由此便可得到3种防范拥堵的措施: ①提高网络能力; ②通过交通诱导合理分配交通流(最优路径选择); ③及时修复问题节点。

提高网络能力可以从提高点的能力和边的能力两方面入手, 文献[63]的研究结果说明应该着重提高点的能力。无标度网络具有相对较小的平均路径长度, 其原因在于无标度网络中存在一些数量度值较大的点。由于这些点的存在, 使网络的大部分交通流集中在这些点, 在点的能力受限的条件下, 便发生了交通拥堵。因此, 可以通过提高大度节点(hub节点)的能力来提高网络的能力, 一些文献研究也证明了这一点^[64-66]。最优路径选择一直是一个热点问题, 在这方面, 中国科技大学的一些学者做了大量研究, 并取得了丰硕成果^[67-71]。对问题节点的及时修复, 可从实时监控重要节点(特别是交通负荷大的节点)和制定响

应策略两方面入手。

2.3.5 网络结构的稳定性

网络结构的稳定性包括鲁棒性和脆弱性两方面,是指网络对各种攻击方式的响应,其研究对设计新网络和保护现有网络有重要意义。对网络的攻击一般有随机攻击和选择性攻击两种,研究发现,随机网络对随机攻击和选择性攻击具有相似的耐受性,无标度网络因其异质性的存在表现出对随机攻击的鲁棒性和对选择性攻击的脆弱性^[72~73]。

城市交通网络的稳定性是城市可持续发展需要解决的关键问题之一,因为网络的局部故障会增加网络其他部分的负担,尤其是hub节点和负荷高的节点,它们的故障极有可能导致整个网络的崩溃^[73~74]。要解决的问题是:如何识别hub节点,并进行重点监测保护?在网络局部失效后如何制定补救方案?

如何寻找hub节点是研究的一个难点,而用定量分析方法识别城市交通网络中hub节点的研究也不多见。文献[24]以公交网络平衡配流为基础,给出了寻找公交网络hub节点的初步方案,这一方案为解决该问题提供了重要思路。

由2.3.4节可知,网络中节点的自修复时间和拥堵延迟时间都存在临界值,也就是说,若城市交通网络中某一节点发生故障后没有及时得到解决,整个网络的拥堵也极有可能发生。因此,需要制定积极有效的补救方案来防止大范围交通拥堵的发生,在这方面,已经有了相关研究^[75~77]。

3 结语

本文介绍了城市交通网络的特性和将其抽象为复杂网络的方法,以及复杂网络理论在城市交通网络分析中的应用情况。城市交通网络复杂性的研究刚刚开始,还有很多问题需要解决,下面是几个可能的研究方向:

1) 城市交通网络和城市土地利用之间存在互动关系,如何应用两者之间的关系建立城市交通网络的演化机制,或者说如何建立网络的演化机制

来刻画城市交通网络和土地利用之间的互动关系?

2) 对一个给定的城市交通网络,如何寻找网络中的hub节点以及最优的道路层次结构?

3) 研究通行能力及交通控制方案对交通网络相变临界值的影响,寻找建立相变临界值与网络拓扑结构的函数关系的方法。

4) 研究预防和控制交通拥堵的方法,在此基础上建立相应的决策支持系统。

参考文献

- 1 Watts D J and Strongatz S H. Collective Dynamics of 'Small-world' Networks [J]. *Nature*, 1998, 393 (6684): 440-442
- 2 Barabasi A L and Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512
- 3 Vito Latora and Massimo Marchiori. Is the Boston Subway a Small-world Network? [J]. *Physica A*, 2002, 314: 109-113
- 4 Vamsi Kalapala, Vishal Sanwalani, Aaron Clauset, et al. Scale Invariance in Road Networks [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/physics/0510198>
- 5 Parongama Sen, Subinay Dasgupta, Arnab Chatterjee, et al. Small-world Properties of the Indian Railway Network [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0208535>
- 6 Guimera R, Mossa S, Turttschi A, et al. The Worldwide Air Transportation Network: Anomalous Centrality, Community Structure, and Cities' Global Roles [J]. *LAN Amaral - Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005 - *National Acad Sciences*, 2005, 102(22): 7794-7799
- 7 Julian Sienkiewicz and Janusz A Holyst. Statistical Analysis of 22 Public Transport Networks in Poland [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/physics/0506074>
- 8 Bin Jiang. A Topological Patterns of Urban Street Networks: Universality and Peculiarity [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/physics/0703223>
- 9 Steven H Strogatz. Exploring Complex Network [J]. *Nature*, 2001, 410(3): 268-276

- 10 Ablert R, Barabasi A L. Statistical Mechanics of Complex Networks [J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47-97
- 11 Dorogovtsev S N and Mendes J F F. Evolution of Networks [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0106144v2>
- 12 Vito Latora and Massimo Marchiori. Efficient Behavior of Small-World Networks [J]. Physical Review, 2001, 87(11): (198701-1)-(198701-4)
- 13 Vito Latora and Massimo Marchiori. Economic Small-World Behavior in Weighted Networks [J]. Eur. Phys. J. B, 2003, 32(2): 249-263
- 14 Paolo Crucitti, Vito Latora and Sergio Porta. Centrality Measures in Spatial Networks of Urban Streets [J]. Phys. Rev. E, 2006, 73(3): (036125-1)-(036125-5)
- 15 Vito Latora and Massimo Marchiori. A Measure of Centrality Based on the Network Efficiency [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0402050>
- 16 陈关荣. 复杂动力网络的研究将是新世纪科学技术前沿的战略性课题之一[A]. 上海理工大学. 复杂网络 - 系统结构研究论文集 (第二集) [C]. 上海: 上海理工大学, 2004. 115-116
- 17 方锦清, 汪小帆, 刘曾荣. 略论复杂性问题和非线性复杂网络系统的研究[J]. 科技导报, 2004, 2: 9-12
- 18 高自友, 赵小梅, 黄海军, 等. 复杂网络理论与城市交通系统复杂性问题的相关研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(3): 41-47
- 19 Gastner M T, Newman M E J. The Spatial Structure of Networks [J]. Eur. Phys. J. B, 2006, 49: 247-252
- 20 Alessio Cardillo, Salvatore Scellato, Vito Latora, et al. Structural Properties of Planar Graphs of Urban Street Patterns [J]. Phys. Rev. E, 2006, 73: (066107-1)-(066107-8)
- 21 Kubly M, Tierney S, Roberts T, et al. A Comparison of Geographic Information Systems, Complex Networks, and Other Models for Analyzing Transportation Network Topologies[EB/OL]. [2005-08-28]. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050082846_2005082801.pdf
- 22 Sergio Porta and Paolo Crucitti, Vito Latora. The Network Analysis of Urban Streets: A Primal Approach [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/physics/0506009>
- 23 Sergio Portaa, Paolo Crucittib and Vito Latora. The Network Analysis of Urban Streets: A Dual Approach [J]. Physica A, 2006, 369: 853-866
- 24 高自友, 吴建军, 毛保华, 等. 交通运输网络复杂性及其相关问题的研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(2): 79-84
- 25 Stefan Lammer, Bjorn Gehlsen and Dirk Helbing. Scaling Laws in the Spatial Structure of Urban Road Networks [J]. Physica A, 2006, 363: 89-95
- 26 Chen Yongzhou, Li Nan, He Daren. A Study on Some Urban Bus Transport Networks [J]. Physica A, 2007, 376: 747-754
- 27 C von Ferber, Yu Holovatch and Palchykov V. Scaling in Public Transport Networks [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0501296>
- 28 Xu Xiping, Hu Junhui, Liu Feng, et al. Scaling and Correlations in Three Bus-transport Networks of China [J]. Physica A, 2007, 374: 441-448
- 29 Newman MEJ, Watts D J. Renormalization Group Analysis of the Small-world Network Model [J]. Phys. Lett. A, 1999, 263: 341-346
- 30 Francesc Comellas. Deterministic Small-World Networks [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0111194>
- 31 Zhang Zhongzhi, Rong Lili and Francesc Comellas. Evolving Small-world Networks with Geographical Attachment Preference [J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 2006, 39: 3253-3261
- 32 杨波, 陈忠, 段文奇. 基于个体选择的小世界网络结构演化[J]. 系统工程, 2004, 22(12): 1-5
- 33 常云峰, 孙亮, 蔡勖. 竞争行为所导致的小世界网络产生[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2006, 40(1): 33-35
- 34 Albert-László, Barabási, Erzsébet Ravasz, et al. Deterministic Scale-Free Networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2001, 299

- (3-4): 559-564
- 35 Li Xiang and Chen Guanrong. A Local-world Evolving Network Model [J]. *Physica A*, 2003, 328: 274-286
 - 36 Chen Qinghua and Shi Dinghua. The Modeling of Scale-free Networks [J]. *Physica A*, 2004, 335: 240-248
 - 37 Zheng Jianfeng, Gao ZiYou and Zhao Hui. Properties of Asymmetrical Evolving Networks [J]. *Physica A*, 2007, 376: 719-724
 - 38 Beom Jun Kim, Ala Trusina, Petter Minnhagen, et al. Self Organized Scale-Free Networks from Merging and Regeneration [J]. *The European Physical Journal B-Condensed Matter*, 2005, 43(3): 369-372
 - 39 M Barthélemy. Crossover from Scale-free to Spatial Networks [J]. *Europhys. Lett.*, 2003, 63(6): 915-921
 - 40 赵小梅, 高自友, 黄海军. 复杂网络的时空建模法 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2006, 6 (6): 53-57
 - 41 Gastner M T and Newman M E J. The Spatial Structure of Networks [J]. *Eur. Phys. J. B*, 2006, 49 (2): 247-252
 - 42 Bhanu M Yerra and David M Levinson. The Emergence of Hierarchy in Transportation Networks [J]. *The Annals of Regional Science*, 2005, 39(3): 541-553
 - 43 Xie Feng and David Levinson. The Topological Evolution of Road Networks[EB/OL]. [2007-1-25]. <http://pubsindex.trb.org/document/view/default.asp?lbid=801245>
 - 44 David Levinson and Bhanu Yerra. Self-Organization of Surface Transportation Networks [J]. *Transportation Science*, 2006, 40(2): 179-188
 - 45 Xie Feng and David Levinson. Topological Evolution of Surface Transportation Networks [EB/OL]. [2008-01-07]. <http://nexus.umn.edu/Papers/TopologicalEvolution.pdf>
 - 46 Evans T S. Scale Free Networks from Self-Organisation [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0411390>
 - 47 Yan Gang, Zhou Tao, Jin Yingdi, et al. Self-Organization Induced Scale-Free Networks [EB/OL]. [2004-8-28]. <http://arxiv1.library.cornell.edu/abs/cond-mat/0408631>
 - 48 陈彦光. 中国城市发展的自组织特征与判据——为什么说所有城市都是自组织的? [J]. *城市规划*, 2006, 30(8): 24-30
 - 49 陈涛, 陈森发. 城市道路交通系统耗散结构特性的研究[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(1): 74-77
 - 50 Jeong H, N'eda Z and Barab'asi A L. Measuring Preferential Attachment in Evolving Networks [J]. *Europhys. Lett.*, 2003, 61(4): 567-572
 - 51 吴金闪, 狄增如. 从统计物理学看复杂网络研究 [J]. *物理学进展*, 2004, 3(24): 18-46
 - 52 Barab'asi A L, Jeong H, N'eda Z, et al. Evolution of the Social Network of Scientific Collaborations [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, 311: 590-614
 - 53 Jean-Loup Guillaume and Matthieu Latapy. The Web Graph: an Overview [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://citeseer.nj.nec.com/guillaume02web.html>
 - 54 刘妙龙, 黄佩蓓. 分形理论在城市交通网络时空演变特征研究中的应用——以上海市为例[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2003, 28(12): 749-753
 - 55 Lu Yongmei and Tang Junmei. Fractal Dimension of a Transportation Network and its Relationship with Urban Growth: a study of the Dallas - Fort Worth area [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design* 2004, 31: 895-911
 - 56 Newman M E J. The Structure and Function of Complex Networks [J]. *SIAM R EVIEW*, 2003, 45 (2): 167-256
 - 57 David Arrowsmith, Mario di Bernardo and Francesco Sorrentino. Effects of Variations of Load Distribution on Network Performance [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cs/0503090>
 - 58 Kwangho Park and Lai Yingcheng. Jamming in Complex Gradient Networks [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(6): (065105-1)-(065105-4)
 - 59 Moreno Y, Gomez J B and Pacheco A F. Instability of Scale-free Networks under Node-breaking Avalanches [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0106136>
 - 60 Yamir Moreno, Romualdo Pastor-Satorras, Alexei Vazquez, et al. Critical Load and Congestion

- Instabilities in Scale-free Networks [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0209474v1>
- 61 Lubos Buzna, Karsten Peters and Dirk Helbing. Modelling the Dynamics of Disaster Spreading in networks [J]. *Physica A*, 2006, 363: 132-140
 - 62 翁文国, 倪顺江, 申世飞, 等. 复杂网络上灾害蔓延动力学研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(4): 1938-1943
 - 63 Holme P. Edge Overload Breakdown in Evolving networks [J]. *Physical Review E*, 2002, 66(3): (036119-1)-(036119-7)
 - 64 陈振毅, 汪小帆. 无尺度网络中的拥塞及其控制 [J]. *系统工程学报*, 2005, 20(4): 132-138
 - 65 Yin Chuanyang, Wang Binghong, Wang Wenxu, et al. Efficient Routing on Scale-free Networks Based on Local Information [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/physics/0506204>
 - 66 Wang Wenxu, Yin Chuanyang, Yan Gang, et al. Integrating Static and Dynamic Information for Routing Traffic [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/physics/0605237>
 - 67 Yan Gang, Zhou Tao, Hu Bo, et al. Efficient Routing on Complex Networks [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0505366>
 - 68 Wang Wenxu, Wang Binghong, Yin Chuanyang, et al. Traffic Dynamics Based on Local Routing Protocol on a Scale-free Network [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, 73(2): (026111-1)-(026111-7)
 - 69 Wang Wenxu, Yin Chuanyang, Yan Gang, et al. Integrating Local Static and Dynamic Information for Routing Traffic [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, 74(1): (016101-1)-(016101-5)
 - 70 Hu Maobin, Wang Wenxu, Jiang Rui, et al. The Effect of Bandwidth in Scale-free Network Traffic [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/physics/0612095>
 - 71 Jiang Rui, Hu Maobin, Wang Wenxu, et al. Traffic Dynamics of Packets Generated with Non-homogeneously Selected Sources and Destinations in Scale-free Networks [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/physics/0701309>
 - 72 Albert R, Jeong H and Baabasi A L. Attack and Error Tolerance in Complex Networks [J]. *Nature*, 2000, 406: 387-482
 - 73 Paolo Crucitti, Vito Latora, Massimo Marchiori, et al. Error and Attacktolerance of Complex Networks [J]. *Physica A*, 2004, 340: 388-394
 - 74 Paolo Crucitti, Vito Latora and Massimo Marchiori. A Model for Cascading Failures in Complex Networks [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0309141>
 - 75 Adilson E Motter. Cascade Control and Defense in Complex Networks [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2004, 93(9): (098701-1)-(098701-4)
 - 76 Eduardo G Altmann, Sarah Hallerberg and Holger Kantz. Reactions to Extreme Events: Moving Threshold Model [J]. *Physica A*, 2006, 364: 435-444
 - 77 Lubos Buzna, Karsten Peters, Hendrik Ammoser, et al. Efficient Response to Cascading Disaster Spreading [EB/OL]. [2007-10-27]. <http://arxiv.org/abs/physics/0611244>

(上接第 56 页)

参考文献

- 1 上海市城市综合交通规划研究所. 上海市综合交通年度报告(2006年)[R]. 上海: 上海市城市综合交通规划研究所, 2006
- 2 Group Transport Planning and Policy. London Travel Report 2005[EB/OL]. [2008-09-06]. <http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-travel-report-2005-final.pdf>
- 3 上海市城市综合交通规划研究所. 上海市综合交通年度报告(2008年)[R]. 上海: 上海市城市综合交通规划研究所, 2008
- 4 陆锡明. 城市交通战略[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- 5 Group Transport Planning and Policy. London Travel Report 2006[EB/OL]. [2008-09-06]. <http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-travel-report-2006-final.pdf>