

复杂系统在城市交通网络中的应用

刘铭, 闫亚美, 黄炎

长春工业大学基础科学学院, 长春 130012

摘要 面对日益严重的城市交通问题, 分析和研究城市交通复杂网络的特性, 对解决城市交通相关问题和合理规划城市布局具有十分重要的实际意义。本文首先介绍了复杂系统相关知识, 包括复杂系统研究中常用的几种统计特性和不同拓扑结构下的复杂网络的发展历程; 然后从交通流问题、不同拓扑结构对交通网络的影响、网络中心节点、级联失效现象和网络稳定性5个方面分析了复杂网络在城市交通系统中的应用; 最后对复杂系统在城市交通网络中的未来研究方向和发展趋势进行了展望。

关键词 城市交通系统; 复杂网络; 统计特性; 复杂性; 复杂系统

城市交通系统作为城市所有交通活动的物质基础, 影响着整个城市乃至国家的人民生活、经济发展和社会进步。近年来, 国民经济不断快速发展, 加快了城市化的进程, 随之而来的是城市人口和道路交通量的急剧增加, 进而引起了交通拥堵、交通事故增加和环境污染加剧等问题。这些日益严重的城市交通问题, 不仅影响了人们的生活, 也导致城市交通发展遇到瓶颈。因此对城市交通系统进行研究, 改善交通系统的性能, 保证城市效能的正常发挥, 具有重要意义。

城市交通系统是一个复杂系统, 涵盖了多个学科和多个领域的知识, 涉及多个工程学科以及包括经济、人口、生态、资源和法律等在内的社会科学知识。城市交通系统不是纯工程系统或者纯社会系统, 而是介于二者之间。

20世纪40年代末, 贝塔朗菲最早开始研究系统科学, 他指出对系统科学的研究本质上就是对复杂性科学的研究。而复杂系统就是复杂性科学的研究对象。一方面, 以系统科学的视角来观察, 复杂网络可以看作是一类复杂系统, 其中复杂网络的节点就是复杂系统中的子系统, 复杂网络的边是子系统之间的连接关系; 另一方面, 复杂系统又可以当作复杂网络来研究, 其中复杂系统的构成单元映射成复杂网络的节点, 单元间的相互作用映射成复杂网络的边。所以通常情况下复杂系统都被抽象描述成复杂网络, 然后再利用相关网络理论知识来探究其结构和行为特性以及特性间的关系。

1 复杂网络

关于复杂网络的定义, 学者们提出了很多种说法, 但目

前并没有一个标准的、准确的定义。其中钱学森对复杂网络的定义受到了普遍认可, 他认为: 如果一个网络具有自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度中的部分性质或者全部性质, 则将该网络称之为复杂网络^[1]。

1.1 复杂网络的统计特性

复杂网络包含了许多统计特性, 几种重要的参量包括: 点的度数、度分布、度相关性、平均路径长度、介数、聚集系数、小世界效应和无标度特性等。

1) 点的度数、度分布和度相关性。

在复杂网络中, 节点的度可以定义为与该节点直接相连的边的数量, 通常情况下, 一个节点的度越大, 可以认为该节点在网络中越重要。由于网络中所有节点的度并不一定都相等, 所以计算出网络中所有节点度的和, 然后取其平均值作为整个网络的度。节点 k 的度分布 $P(k)$ 则表示在网络中任意选出一个点的度值为 k 的概率。度的相关性则是指度为 k 的节点所有邻近节点度的均值与 k 的关系, 体现出了节点之间相互匹配的一致性^[2]。

2) 平均路径长度和介数。

在复杂网络中, 将连接两节点的最短路径上的边的数量作为节点间的距离。整个网络的平均路径长度则是网络中所有节点间距离的平均值, 反映了网络中节点间的距离水平, 从全局方面体现了网络的特性。

介数分为节点介数和边介数。节点介数指的是经过该点最短路径的数量占网络中所有最短路径数量的比例, 可以用来测度点的中心性。同样地, 边的介数指的是通过该边的

收稿日期: 2017-01-18; 修回日期: 2017-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61503150)

作者简介: 刘铭, 副教授, 研究方向为智能计算与数据挖掘, 电子信箱: jlcclm@163.com

引用格式: 刘铭, 闫亚美, 黄炎. 复杂系统在城市交通网络中的应用[J]. 科技导报, 2017, 35(14): 27-33; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.14.003

最短路径数量占网络中所有最短路径数量的比例。一个节点或边的介数能够反映它们对网络的影响程度。

3) 聚集系数。

在网络中,一个节点可能与多个节点相连接,该节点的聚集系数指的是该节点实际相连的边数值和该节点相连的边数的最大可能值的比值。整个网络的聚集系数则是网络中所有节点的聚集系数的平均值。聚集系数反映的是节点间的聚集程度,体现的是网络的内在特性。

4) 小世界效应。

在复杂网络中,度分布、平均路径长度和聚集系数只是3个最基本的结构特性,大量实证研究发现,真实网络几乎都具有小世界效应。网络具有小世界效应是指网络同时具有较小的平均路径长度和较大的聚集系数这2个特性。其中较小的平均路径长度是指其随网络规模的大小呈对数增长。

5) 无标度特性。

复杂网络介于完全规则网络和完全随机网络之间,由于度分布的区间间隔非常小,这意味着从该网络随机移除部分的节点不会破坏该网络,则其平均度可以看作是网络节点度。如果网络中的节点度服从幂律分布(节点数为 d),就将该幂律分布称为此网络的无标度特性。

1.2 复杂网络的拓扑结构

按照拓扑结构的不同,复杂网络可以分为规则网络、随机网络、小世界网络、无标度网络和复杂加权网络等。区分复杂网络和一般网络的2个重要指标就是网络的小世界效应和无标度特性。

1.2.1 规则网络和随机网络

网络研究的早期工作主要是聚焦于规则网络的研究。规则网络是节点按确定的规则连线得到的,因此其拓扑结构简单,也容易精确求解。

然而,真实网络常常具有某种随机性,并非都能用完全的规则网络来描述。在20世纪50年代,研究者就已经常用随机网络描述大规模网络。20世纪60年代,匈牙利数学家Erdos和Rényi^[3]提出了ER随机图模型,简称ER模型,成为复杂网络的理论来源。随机网络的发现开启了人们对复杂网络的认识,在之后的近40年时间里,它一直作为复杂网络的理论基础被用来描述多种网络。

1.2.2 小世界网络和无标度网络

之后的研究表明,真实网络也并非完全随机,规则网络拥有聚类特性但不具有小世界特性,不能完全体现各种真实复杂网络。因此,1998年Watts和Strogatz提出了小世界网络模型,即WS小世界模型^[4]。小世界模型具有小的平均路径长度和大的聚集系数,是介于随机网络与规则网络之间的混合网络,图1为小世界网络拓扑结构示意图。

1999年,根据大量真实网络的点度分布服从幂律分布的研究结果,Barabási和Albert^[5]提出了无标度网络演化模型。由于无标度网络中的度服从幂律分布,所以无标度网络既具增长性,又存在偏好依附性,反映了真实网络常见的特征,从

而促进了复杂网络发展。图2为无标度网络拓扑结构示意图。

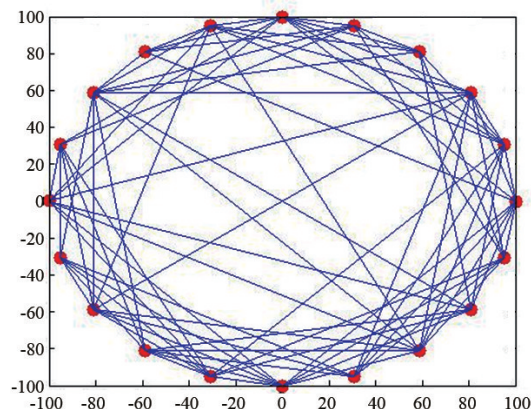


图1 小世界网络拓扑结构示意图
Fig. 1 Small world network topology

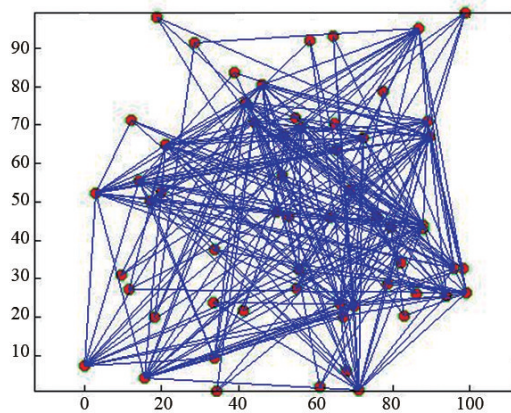


图2 无标度网络拓扑结构示意图
Fig. 2 Topology of scale-free network

1.2.3 复杂加权网络

在加权网络中,每一条边都有一个实值作为权值,然后用边的权值描述节点间相互作用的强度。由于许多网络中边的权值不同,所以它们被称为复杂加权网络。复杂加权网络可以更确切地反应现实生活中的复杂网络世界,也可以作为一种数学工具来帮助人们探知现实中复杂网络特性和复杂行为。

2 城市交通网络

2.1 城市交通网络的描述

城市交通系统包括道路系统、流量系统和管理系统3部分,它其实是一个复杂巨系统,可以抽象成1个复杂网络^[6]。城市交通系统由交叉路口和连接路口的街道两部分组成。由于车辆在不同的道路上行驶时所花费的时间不同,将其映射为边上的权值(即边的权值)不同,此时城市交通网络就映射为一个复杂加权网络。

当前,有2种方法可以将城市交通网络映射为复杂网络^[7]:1) 将交叉路口映射为网络的节点,将道路映射为网络的边,该方法被称为原始法;2) 将道路映射为网络的节点,将道路间的交叉路口映射为节点间的边,该方法被称为对偶法。图3和图4分别是来源于相关资料的北京和上海的城市交通系统结构示意图。

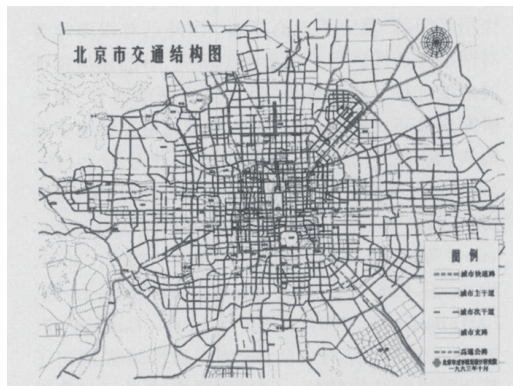


图3 北京交通系统结构示意图

Fig. 3 Beijing traffic system structure



图4 上海交通系统结构示意图

Fig. 4 Shanghai traffic system structure

2.2 城市交通网络的基本特性

城市交通网络主要体现了大多数复杂加权网络的基本特性^[8]。

1) 行为统计性:针对大城市而言,由于其网络节点数规模庞大,所以其城市交通网络行为基本都具有统计特性。

2) 连接稀疏性:如果一个复杂网络包含 N 个节点且全连接,则该网络的节点连接数目为 $O(N^2)$,而城市交通网络相当于一个稀疏的复杂网络,其连接数目通常为 $O(N)$ 。

3) 结构多样性:城市交通网络的结构更具有多样化,介于复杂网络的非完全规则和非完全随机之间。

4) 时空复杂性:城市交通网络在时间和空间上都呈现出复杂性,能够体现现实的分岔和混沌等复杂行为。

3 复杂系统理论在城市交通网络中的应用

城市交通网络可以被映射为一个复杂网络,然后利用复杂网络理论知识对城市交通网络进行研究,从而得到了城市交通复杂系统的各种特性。

3.1 城市交通网络的复杂性

城市交通网络的复杂性体现在以下多个方面。

1) 城市交通网络拓扑结构复杂。城市道路网络包括大量的节点及道路,虽然具有规则网络的一些特性,但针对具体研究对象与研究目的不同,可以按照不同的网络拓扑结构对城市交通网络进行抽象化,从而表现出复杂的拓扑特性。

2) 动力学行为复杂。城市交通网络在貌似规则的平面道路网络上存在着复杂的统计动力学特性,如流量分配、拥堵传播与扩散以及级联失效现象。

3) 网络交通流复杂。因为城市交通网络体现了人、车、路和环境等多方面的特点,所以城市交通网络是一个开放的复杂网络系统。由于城市的用地布局调整,居民出行方式的改变均会对整个城市的交通行为产生影响,所以其交通网络的拓扑结构会影响整个交通网络的出行阻抗、流量分布和其他动力学过程。

3.2 城市交通复杂系统的相关研究主题

3.2.1 交通流相关问题

1) 交通配流问题。

在城市交通网络中的交通行为方面,国内外许多学者都对不同拓扑结构的复杂网络中顶点的介数分布、流量负载分布等进行了统计学研究^[9-11]。2007年,Zheng等^[12]研究了无标度网络上拥挤效应的流量动态特性。Wu等^[13]则对不同拓扑结构网络上的拥挤动态模型进行了研究。

在交通系统中的流量逐渐演化至平衡态时,交通流的平衡分配就成了交通流研究中的基本问题。交通流分配问题实际上是给复杂网络中的每条边分配交通需求量的问题,分配过程需要按照特定的路径选取规则,分配后得到各条边上的交通流量。均衡配流的概念于1952年由Wardrop提出^[14]。在此基础上,Beckmann等^[15]于1956年建立了静态均衡状态下的交通配流规划模型。1975年,LeBlanc^[16]成功应用了非线性规划中的Frank-Wolfe算法对该模型进行求解,从而得到了现在的实用解法。这3点突破也成为了当前交通配流问题的研究基础。

1985年,Sheffi^[17]研究发现,在多数情况下与均衡条件等价的数学规划模型是不存在的。面对这种情况,Smith^[18-19]提出用变分不等式来解决均衡条件的等价问题。针对城市交通平衡配流问题,国内外学者又进行了大量研究。Patriksson^[20]建立了有限路段能力约束下的平衡配流模型,Yang和Yagar^[21]则提出了涉及配流和控制措施的组合模型。2004年,Gao等^[22]则对公交网络配流模型进行了扩充。这些大多数都是静态交通配流模型。为了描述网络交通流动态特征,进而对动态路径进行诱导作用,对动态平衡配流模型进行研究具有非常重要的实际意义^[23]。

2) 交通拥堵问题。

日益严重的城市交通拥堵不仅给人们的生活出行带来了不便,也严重影响了城市的建设和发展,目前,城市交通拥堵已成为一个关键的城市交通问题。

1998年,Wright等^[24]较早开始研究交通网络拥堵的特性,并在一个理想化的环境下建立了由单瓶颈引起的交通拥堵的传播模型。2002年,Moreno等^[25]对交通网络拥堵中的点和边在拥堵网络中的扩散进行了研究,从而发现了网络中存在临界值的问题。

在国内,张毅媚等^[26]结合经济学理论从3个方面分析了城市交通拥挤的产生机理。吴建军等^[27-28]在研究了小世界网络和复杂网络中的交通拥堵传播模型后,又根据不同交通网络拓扑结构对交通拥堵程度的影响,建立了针对复杂交通网络拥堵问题的动态模型^[29-30]。2007年,郑建凤等^[31]建立了结合交通拥堵情况的级联失效模型,并探讨了不同网络拓扑结构下的复杂交通网络的拥堵程度。吴建军等^[32]利用级联故障模型模拟了不同流量引发的相变问题。

3) 交通瓶颈问题。

随着城市化进程的加快,城市道路交通需求量逐渐增大,交通问题也成为了人们谈论的焦点问题之一。对于一些大城市来说,交通压力更为突出。

日本学者 Sugiyama 等^[33]研究发现,交通瓶颈的存在是交通拥堵的触发器^[37]。2008年,Long等^[34]利用网络交通流传播模型对交通网络瓶颈的识别方法进行了研究,分析了交通网络瓶颈的形成和交通需求的关系。1998年Wright等^[35]提出交通瓶颈是城市交通问题的根源,即交通网络中最薄弱的环节。交通瓶颈一个显著的特点是易发生交通堵塞,对人们的出行和生活造成了非常大的影响,如出入匝道口,车辆汇集地段易发生交通事故等。Long等^[36]做了更详细的研究。当交通网络中车流量大于该路段的通行能力时,就极易造成交通拥堵,更易发生交通事故,文中所说的交通瓶颈指的就是这些通行能力差的路段。

从1990年开始至今,国内外许多学者们都对交通瓶颈的特性、优化、识别等进行了细致的研究^[37-43]。但是这些并不能完整地描述交通网络的复杂行为,所以需要通过新的视角来研究交通瓶颈。

3.2.2 拓扑结构对交通网络的影响

网络拓扑结构与交通均衡最优状态的关系,在Braess悖论(Braess Paradox)^[44-45]中已经有过初步的探讨。Guimerà等^[46]研究发现了交通拥挤情况下性能最优的交通网络是星状结构。Mondragón^[47]研究发现随着出行需求的增大最优网络结构变成环状结构。2007年,Youn Hyejin^[48]给出了系统最优和用户均衡之间的差距指标在交通出行中的变化规律。而Roughgarden^[49-50]则证明了两者的差距和网络拓扑结构无关,只与成本函数相关。Zhao等^[51-52]在交通网络达到均衡状态时,比较了网络成本在4种不同拓扑结构下对拥挤现象的影响。

Tadić等^[53]和Guimera等^[54]的研究表明,网络的动力学过程主要依赖于网络的拓扑结构,但网络结构和功能之间的相互依赖关系并未被完全揭示。因此,国内外许多学者对网络拓扑结构与功能之间的优化关系也进行了研究。2001年,Latora等^[55]对如何提高网络的效率进行了研究。之后,许多学者在降低网络损失^[56-58]和缓解交通堵塞程度^[59-60]方面进行了研究。2005年,Gao等^[61]在不考虑网络鲁棒性的情况下,从优化费用的角度分析了网络的阻塞程度。

3.2.3 网络中心节点研究

近年来,存在于自然和社会中的大型网络所受到的关注度日益增加,通信、生物、输运等领域均存在大型网络。

随之而来,研究者开始考虑复杂网络的隐含秩序和特征,从而促进了网络理论的进一步成熟。在提出网络骨架的概念之后,Kim等^[62]在2006年对网络的分形结构做的分析中运用到了这种概念。同期,Song等^[63]对网络的自相似组织采用了粗粒化方法进行研究,Yook等^[64]对网络自相似组织的规律进行了进一步完善。2006年,Dorogovtsev等^[65-66]对网络节点在网络中的深度进行了研究,并引入了 k -核分解。2004年,Zhou等^[67]发现网络中的少量节点却连接了大量的边,而且节点之间连接紧密,所以提出了Rich-Club现象。但该工作具有局限性,忽略了节点之间边数目在网络的所有边中所占的比例,从统计学角度来说,没有充分认识到Hub节点的隐含特征。图5标示点即为城市网络的一个中心节点。



图5 网络中心节点示例

Fig. 5 An example of network center node

3.2.4 网络级联失效现象研究

研究表明无标度网络具有鲁棒但又脆弱的特性,当无标度网络存在5%~10%的失效中心节点,就有可能引起网络溃散^[68-70]。城市交通网络就体现了该特性,当交通网络中一个或多个节点发生故障时,会通过边引发其相邻节点失效,从而导致连锁效应最终造成整个网络的崩溃。研究者将该现象称为级联失效(相继故障)。为提高城市交通网络的稳定性,对级联失效的研究已成为一项重要课题。

2002年,Moreno等^[71]首先研究了复杂网络上的级联失效问题,发现为了阻止无标度网络的极度崩溃,必须考虑系统自身抵抗失效的鲁棒性和提前预知系统产生崩塌的可能

性。同年, Motter等^[72]的研究指出, 无标度网络中度较大或者负载较大的节点发生故障时会引起网络结构功能发生很大变化, 而随机选择的节点故障则几乎不会引起变化。2003年, Echenique等^[57]研究了BA网络中边堵塞引发的相继故障。2007年, Zheng等^[73]引入阻塞效应研究了阻塞条件下的网络级联失效。吴建军等^[74]的研究证明导致整个城市交通网络崩溃的影响因素主要是由度较大的节点和负荷高的节点故障引起的。所以, 建立研究城市交通网络的级联失效模型具有重要的科学意义。

3.2.5 网络结构的稳定性和可靠性

1) 网络的稳定性。

网络结构的稳定性是指复杂网络承受意外故障和恶意攻击的能力, 包括鲁棒性和脆弱性两方面。研究网络结构的稳定性对保护网络和预防应急事件具有重要作用。

2000年, Albert等^[68]研究了复杂网络的抗毁性, 比较了随机网络和无标度网络在随机攻击和蓄意攻击中的响应, 得出了无标度网络在随机攻击中具有更强的抗毁性, 但在蓄意攻击中抗毁性特别弱。同年, Broder等^[75]发现在Internet网中只要删除所有度数大于5的节点就能破坏其连通性。此后众多学者都得到了与Albert等一致的研究结果。2003年, Holme等^[56]在节点删除和边删除的基础上, 进行了边介数和节点介数的攻击策略研究。

2) 网络的可靠性。

一般来说, 在规定的条件下和时间内完成特定功能的能力被称为网络的可靠性, 否则称为网络故障。可靠性分析研究的是产品实现某种功能的稳定程度。在城市交通网络系统中, 主要从连通可靠性、时间可靠性和容量可靠性3个方面对可靠性进行研究。

连通可靠性的概念于1982年由日本学者Mine和Kawai^[77]首次提出, 他将网络节点间保持连通的概率称为连通可靠性, 但是其研究内容只局限于道路的两种状态, 所以应用范围受到限制。之后Bell等^[78]扩展了道路的这种二元状态, 让管理者主观定义道路的连通状态。1991年, Asakura等^[79]提出时间可靠性, 它反映了出行时间的稳定性。1999年, Asakura^[80]又给出了一个时间可靠度的计算方法。Chen等^[81]将道路网络在规定条件下满足交通需求的概率称为容量可靠性。连通可靠性反映了城市交通网络的稳定性, 时间可靠性和容量可靠性则反映城市交通网络的功能和能力。

4 结论

对于城市交通系统这样一个复杂巨系统来说, 将其作为复杂网络然后运用相关复杂网络理论知识来研究仍是之后研究工作的方向。一方面可以继续从实证角度出发来研究城市交通系统的复杂性, 另一方面利用已经得出的网络理论知识来指导和解决实际城市交通网络中的问题。目前, 随着城市交通情况的日益繁杂, 解决城市当前规划下的交通拥堵问题具有十分重要的实际意义, 基于复杂系统的城市拓扑结

构、中心节点和结构稳定性的研究则对提高交通网络运行能力、合理设计城市交通网络、管控城市交通建设和科学发展城市交通具有重大影响。

参考文献 (References)

- [1] 何平. 具有时变耦合时滞的复杂网络外同步研究[D]. 沈阳: 东北大学信息科学与工程学院, 2014.
He Ping. Investigation of outer synchronization of complex networks with time-varying coupling delay[D]. Shenyang: College of Information Science and Engineering, Northeastern University, 2014.
- [2] 胡一竑, 朱道立, 李阳, 等. 成本驱动的加权网络演变模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6(2): 26-32.
Hu Yihong, Zhu Daoli, Li Yang, et al. Cost-driven weighted network evolution model[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2009, 6(2): 26-32.
- [3] Erdos P, Rényi A. On the evolution of random graphs[J]. Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1960, 5(1): 17-60.
- [4] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [5] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [6] 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.
Gao Ziyu, Zhao Xiaomei, Huang Haijun, et al. Research on problems related to complex networks and urban traffic systems[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 6(3): 41-47.
- [7] 胡一竑. 基于复杂网络的交通网络复杂性研究[D]. 上海: 复旦大学管理学院, 2008.
Hu Yihong. Research on traffic network complexity based on complex network[D]. Shanghai: School of Management, Fudan University, 2008.
- [8] 陈关荣. 复杂网络的研究——新世纪科学技术前沿的战略性课题之一[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(2): 3-4.
Chen Guanrong. Complex network: Research on system architecture[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2015, 12(2): 3-4.
- [9] Goh K I, Kahng B, Kim D. Universal behavior of load distribution in scale-free networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(27): 278701.
- [10] Bernardo M D, Garofalo F, Manfredi S, et al. Load distribution in small world networks[C]//International Conference Physics and Control. New York: IEEE, 2005: 100-105.
- [11] Yang H, Zhao F, Zhou T, et al. Load Distribution on Small-world Networks[J]. arXiv preprint cond-mat/0509354, 2005.
- [12] Zheng J F, Gao Z Y, Zhao X M. Clustering and congestion effects on cascading failures of scale-free networks[J]. Europhysics Letters, 2007, 79(5): 58002.
- [13] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J, et al. Congestion in different topologies of traffic networks[J]. Europhysics Letters, 2006, 74(3): 560.
- [14] Wardrop J G. Road paper some theoretical aspects of road traffic research[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1952, 1(3): 325-362.
- [15] Beckmann M, McGuire C B, Winsten C B. Studies in the economics of transportation[R/OL]. [2017-03-31]. <https://supernet.isenberg.umass.edu/visuals/Boyce-bmw.pdf>.
- [16] LeBlanc L J. An algorithm for the discrete network design problem[J]. Transportation Science, 1975, 9(3): 183-199.

- [17] Sheffi Y. Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [18] Smith M J. The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1979, 13(4): 295-304.
- [19] Smith M J. Two alternative definitions of traffic equilibrium[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1984, 18(1): 63-65.
- [20] Patriksson M. The traffic assignment problem: Models and methods[M]. Mineola, NY: Courier Dover Publications, 2015.
- [21] Yang H, Yagar S. Traffic assignment and traffic control in general free-way-arterial corridor systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1994, 28(6): 463-486.
- [22] Gao Z, Sun H, Shan L L. A continuous equilibrium network design model and algorithm for transit systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2004, 38(3): 235-250.
- [23] 高自友, 任华玲. 城市动态交通流分配模型与算法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Gao Ziyu, Ren Hualing. Model and algorithm of urban dynamic traffic flow assignment[M]. Beijing: People's Communications Press, 2005.
- [24] Wright C, Roberg P. The conceptual structure of traffic jams[J]. Transport Policy, 1998, 5(1): 23-35.
- [25] Moreno Y, Gómez J B, Pacheco A F. Instability of scale-free networks under node-breaking avalanches[J]. Europhysics Letters, 2002, 58(4): 630.
- [26] 张毅媚, 晏克非. 城市交通拥挤机理的经济解析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 359-362.
Zhang Yimei, Yan Kefei. Traffic congestion mechanism analysis based on economic theory[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2006, 34(3): 359-362.
- [27] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J. Simulation of traffic congestion with SIR model[J]. Modern Physics Letters B, 2004, 18(30): 1537-1542.
- [28] Sun H J, Wu J J. Urban traffic congestion spreading in small world networks[J]. International Journal of Modern Physics B, 2005, 19(28): 4239-4246.
- [29] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J, et al. Congestion in different topologies of traffic networks[J]. Europhysics Letters, 2006, 74(3): 560.
- [30] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J. Model for dynamic traffic congestion in scale-free networks[J]. Europhysics Letters, 2006, 76(5): 787.
- [31] Zheng J F, Gao Z Y, Zhao X M. Modeling cascading failures in congested complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 385(2): 700-706.
- [32] Wu J J, Sun H J, Gao Z Y. Cascading failures on weighted urban traffic equilibrium networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 386(1): 407-413.
- [33] Sugiyama Y, Fukui M, Kikuchi M, et al. Traffic jams without bottlenecks: Experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam[J]. New Journal of Physics, 2008, 10(3): 033001.
- [34] Long J C, Gao Z Y, Ren H L, et al. Urban traffic congestion propagation and bottleneck identification[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2008, 51(7): 948-964.
- [35] Wright C, Roberg P. The conceptual structure of traffic jams[J]. Transport Policy, 1998, 5(1): 23-35.
- [36] Long J C, Gao Z Y, Ren H L, et al. Urban traffic congestion propagation and bottleneck identification[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2008, 51(7): 948-964.
- [37] Gazis D C, Herman R. The moving and "phantom" bottlenecks[J]. Transportation Science, 1992, 26(3): 223-229.
- [38] Newell G F. A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part I: General theory[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1993, 27(4): 281-287.
- [39] Daganzo C F, Laval J A. Moving bottlenecks: A numerical method that converges in flows[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(9): 855-863.
- [40] Jenelius E, Petersen T, Mattsson L G. Importance and exposure in road network vulnerability analysis[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2006, 40(7): 537-560.
- [41] 姜锐. 交通流复杂动态特性的微观和宏观模式研究[D]. 合肥: 中国科技大学工程科学学院, 2002.
Jiang Rui. Study on the complex dynamic properties of traffic flow from the micro and macro modeling[D]. Hefei: College of Engineering Science, University of Science and Technology of China, 2002.
- [42] 田琼, 黄海军, 杨海. 瓶颈处停车换乘logit随机均衡选择模型[J]. 管理科学学报, 2005, 8(1): 1-6.
Tian Qiong, Huang Haijun, Yan Hai. Stop at the bottleneck logit stochastic equilibrium selection model[J]. Journal of Management Science, 2005, 8(1): 1-6.
- [43] 李乐园, 张小宁, 张红军. 基于交通瓶颈的动态交通分配模型[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(4): 125-129.
Li Leyuan, Zhang Xiaoning, Zhang Hongjun. A model of dynamic traffic assignment based on traffic bottleneck with varying capacity[J]. System Engineering Theory & Practice, 2006, 26(4): 125-129.
- [44] Braess D, Nagurney A, Wakolbinger T. On a paradox of traffic planning[J]. Transportation Science, 2005, 39(4): 446-450.
- [45] Nagurney A, Boyce D. Preface to "on a paradox of traffic planning"[J]. Transportation Science, 2005, 39(4): 443-445.
- [46] Guimerà R, Díaz-Guilera A, Vega-Redondo F, et al. Optimal network topologies for local search with congestion[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(24): 248701.
- [47] Mondragón C R J. Optimal networks, congestion and Braess' paradox [C]//Proceedings from the 2006 Workshop on Interdisciplinary Systems Approach in Performance Evaluation and Design of Computer & Communications Systems. New York: ACM, 2006.
- [48] Youn H, Gastner M T, Jeong H. Price of anarchy in transportation networks: efficiency and optimality control[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(12): 128701.
- [49] Roughgarden T. The price of anarchy is independent of the network topology[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2003, 67(2): 341-364.
- [50] Roughgarden T. Selfish routing and the price of anarchy[M]. Cambridge: MIT Press, 2005.
- [51] Zhao X M, Gao Z Y. Topological effects on the performance of transportation networks[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(1): 283.
- [52] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J, et al. Congestion in different topologies of traffic networks[J]. Europhysics Letters, 2006, 74(3): 560.
- [53] Tadié B, Thurner S, Rodgers G J. Traffic on complex networks: Towards understanding global statistical properties from microscopic density fluctuations[J]. Physical Review E, 2004, 69(3): 036102.
- [54] Guimera R, Arenas A, Díaz-Guilera A, et al. Dynamical properties of model communication networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(2): 026704.
- [55] Latora V, Marchiori M. Efficient behavior of small-world networks[J]. Physical review letters, 2001, 87(19): 198701.
- [56] Holme P. Congestion and centrality in traffic flow on complex networks

- [J]. *Advances in Complex Systems*, 2003, 6(2): 163–176.
- [57] Echenique P, Gómez-Gardenes J, Moreno Y. Dynamics of jamming transitions in complex networks[J]. *Europhysics Letters*, 2005, 71(2): 325.
- [58] Ashton D J, Jarrett T C, Johnson N F. Effect of congestion costs on shortest paths through complex networks[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(5): 058701.
- [59] Guimerà R, Díaz-Guilera A, Vega-Redondo F, et al. Optimal network topologies for local search with congestion[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(24): 248701.
- [60] Moreno Y, Pastor-Satorras R, Vázquez A, et al. Critical load and congestion instabilities in scale-free networks[J]. *Europhysics Letters*, 2003, 62(2): 292.
- [61] Gao Z Y, Wu J J, Sun H J. Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2005, 39(6): 479–495.
- [62] Kim D H, Noh J D, Jeong H. Scale-free trees: The skeletons of complex networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 70(4): 046126.
- [63] Song C, Havlin S, Makse H A. Self-similarity of complex networks[J]. *Nature*, 2005, 433(7024): 392–395.
- [64] Yook S H, Radicchi F, Meyer-Ortmanns H. Self-similar scale-free networks and disassortativity[J]. *Physical Review E*, 2005, 72(4): 045105.
- [65] Dorogovtsev S N, Goltsev A V, Mendes J F F. *K*-core architecture and *K*-core percolation on complex networks[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2006, 224(1): 7–19.
- [66] Dorogovtsev S N, Goltsev A V, Mendes J F F. *K*-core organization of complex networks[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(4): 040601.
- [67] Zhou S, Mondragón R J. The rich-club phenomenon in the internet topology[J]. *IEEE Communications Letters*, 2004, 8(3): 180–182.
- [68] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Attack and error tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406(6794): 378–382.
- [69] Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D, et al. Resilience of the internet to random breakdowns[J]. *Physical review letters*, 2000, 85(21): 4626.
- [70] Callaway D S, Newman M E J, Strogatz S H, et al. Network robustness and fragility: Percolation on random graphs[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(25): 5468.
- [71] Moreno Y, Gómez J B, Pacheco A F. Instability of scale-free networks under node-breaking avalanches[J]. *Europhysics Letters*, 2002, 58(4): 630.
- [72] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(6): 065102.
- [73] Zheng J F, Gao Z Y, Zhao X M. Modeling cascading failures in congested complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, 385(2): 700–706.
- [74] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J. Cascade and breakdown in scale-free networks with community structure[J]. *Physical Review E*, 2006, 74(6): 066111.
- [75] Broder A, Kumar R, Maghoul F, et al. Graph structure in the web[J]. *Computer Networks*, 2000, 33(1): 309–320.
- [76] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟, 等. 复杂网络抗毁性研究综述[J]. *系统工程*, 2006, 24(10): 1–5.
- Tan Yuejin, Wu Jun, Deng Hongzhong, et al. A review of studies on the destruction resistance of complex networks[J]. *Systems Engineering*, 2006, 24(10): 1–5.
- [77] Mine H, Kawai H. *Mathematics for reliability analysis*[M]. Tokyo: Asakura-shoten, 1982.
- [78] Bell M G H, Iida Y. *Transportation network analysis*[M]. United States: Wiley, 1997.
- [79] Asakura Y, Kashiwadani M. Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow[C]//19th PTRC Summer Annual Meeting. Brighton: University of Sussex, 1991.
- [80] Asakura Y. Reliability measures of an origin and destination pair in a deteriorated road network with variable flows[M]. *Transportation Networks: Recent Methodological Advances*. Amsterdam: Elsevier, 1999.
- [81] Chen A, Yang H, Lo H K, et al. Capacity reliability of a road network: An assessment methodology and numerical results[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002, 36(3): 225–252.

Complex system and its application in urban transportation network

LIU Ming, YAN Yamei, HUANG Yan

School of Basic Sciences, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China

Abstract In view of the increasingly serious urban traffic problems, it is of great significance analyzing and studying the characteristics of the complex urban transportation network to solve urban traffic problems and rationally plan the city layout. This paper firstly introduces the relevant theories of complex systems, including several statistical properties commonly used in the study of complex systems and the development of complex network based on different topologies. Then, the applications of complex network in the urban transportation system are elaborated by analyzing the traffic flow, the influence of different topologies on the transportation network, the network center node, the cascade failure phenomenon and the network stability, respectively. Finally, the future research direction and the development trend of the complex systems in the urban transportation network are pointed out.

Keywords urban transportation system; complex network; statistical characteristic; complexity; complex system

(责任编辑 刘志远)