

基于复杂网络的交通拥堵与传播动力学分析*

李树彬^{1) 2)} 吴建军³⁾ 高自友^{1)†} 林勇²⁾ 傅白白⁴⁾

1) (北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

2) (山东省科学院自动化研究所, 济南 250014)

3) (轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学), 北京 100044)

4) (山东建筑大学建筑城规学院, 济南 250014)

(2010年7月6日收到; 2010年7月28日收到修改稿)

本文运用改进的中观交通流模型, 研究了网络拓扑结构对交通拥堵的影响, 进而分析复杂网络上的交通传播动力学特征和传播规律. 结论有助于提出消除交通拥堵的有效控制策略以及交通规划的合理方案.

关键词: 复杂网络, 交通流, 交通拥堵, 传播特性

PACS: 07.05.Tp, 46.40.Cd, 47.90.+a, 89.75.Fb

1. 引言

复杂性科学是系统科学和非线性科学的进一步发展、充实和深化, 是系统科学研究的最新、最前沿的领域. 近几年发展起来的复杂网络方法, 为我们研究系统复杂性提供了一个新视角、新方法. 1998和1999年 Nature 和 Science 上分别发表了两篇复杂网络文章^[1,2], 其中的小世界效应与无标度特性的科学发现掀起了对复杂网络结构及其动力学行为的研究热潮^[3-9], 提高了人们对现实世界的科学认识. 随着研究的深入, 对于复杂网络的探讨已经渗透到包括生物学、物理学、经济学、计算机机科学以及交通运输等各领域. 特别是随着学科之间的相互交叉和融合趋势不断加强, 促进了对复杂网络共有特征和性质的揭示. 城市交通系统是一个复杂巨系统, 它的一个重要特点是具有时空复杂性, 从理论上分析城市交通网络时空分布复杂性及其上流量演化的动力学行为, 是研究复杂交通网络的关键所在, 同时也是城市交通网络研究的关键性基础理论问题之一.

众所周知, 交通运输系统是一切交通活动的载体, 是整个交通活动赖以存在和发挥效能的物质基

础. 从图论的角度来看, 城市交通网络是由线与点以及它们之间的关系组成的, 线是指交通网络中的路段, 点是指交通网络中连接路段的节点, 包括道路出入口, 交叉口等. 随着我国城市化进程的飞速加快, 城市的规模以及结构发生了巨大的变大, 主要体现在两个方面: 第一, 网络节点和路段数的不断增多; 第二, 网络节点与路段之间的相互作用变得更为复杂. 同时交通网络又是一个受环境影响的开放系统, 交通问题涉及到人、车、路、环境四者之间的关系, 又与政策、法规、管理和控制等密切相关, 使得城市交通运行规律变得极其复杂^[10]. 近几年来, 复杂网络的兴起为交通运输系统的研究提供了一个崭新的研究视角, 国内外学者应用复杂网络理论对铁路、城市交通、航空等网络进行了大量的实证研究, 结果表明它们都具有无标度或小世界特性, 除了大量的实证研究外, 利用复杂网络理论, 在交通网络动力学行为分析、交通网络级联失效、交通阻塞传播以及交通网络演化建模等方面也取得了一定的研究成果. 研究复杂网络理论的实际目的是通过研究实际复杂系统的特殊结构形式, 为掌握其上的动力学行为及运行机理提供科学支持. 以前的工作主要是交通的增长如何驱动网络结构的演化, 另一些工作则研究不同种类的网络拓扑结构如

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号: 2006CB705500), 国家自然科学基金(批准号: 70801005, 70871009), 北京市自然科学基金(批准号: 8102029), 公安部应用创新计划项目(批准号: 2007YYCXSDST057), 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2009JBM053)和山东省自然科学基金(批准号: Y2008F14, ZR2009FM038)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zygao@center.bjtu.edu.cn

何影响发生于其上的交通动力学. 因此, 对于城市交通系统来说, 研究不同网络拓扑结构对交通流运行的影响就有着非常重要的意义.

虽然应用复杂网络理论对城市交通网络进行了相关的研究, 但就搞清交通网络的复杂性机理还相差甚远, 特别还缺乏对交通动力学行为深层次的研究. 研究城市交通动力学行为(这里主要研究交通阻塞的影响因素、形成机理及传播过程)的主要原因是帮助我们了解城市交通阻塞的传播以实施可能的控制^[11-13].

研究城市交通网络的复杂性, 不仅要考察城市交通网络拓扑本身的结构特征, 更重要的是通过考虑城市交通所具有的特性, 分析网络结构对城市交通网络上流量、费用以及阻塞的影响, 以便更好的为交通管理部门规划、设计和管理提供科学的理论指导, 进而为缓解交通拥堵、制定阻塞疏导方案, 完善交通网络结构和进行有效地交通控制服务. 同时通过这些研究, 可以反推交通网络的演化机理, 揭示其时空和行为复杂性, 为建立基于网络的复杂动力学模型提供底层拓扑, 从而为交通规划、控制和管理策略提供决策依据.

2. 中观交通动力学模型

用智能交通系统来解决交通堵塞问题已成为交通发展的趋势, 而研究交通系统最有效的手段是对交通状况进行仿真. 对交通模型的研究近年来引起了诸多学者的兴趣^[14-23], 从总体上讲, 交通流理论模型大体上可划分为概念上不同的两类或者三类描述方法, 即微观方法和宏观方法, 或者微观、宏观、中观方法. 中观交通仿真动力学模型既能满足精度的要求又具有较好的实时性, 因此迅速的成为智能交通领域研究的热点.

2.1. 队列模型

队列中第 i 辆车的排队延误为

$$\frac{i}{c}, \quad (1)$$

其中 c 代表车道组的输出容量(如排队车辆消散率, 交通控制信号对车流的影响可反映在 c 的改变上); ct 为时间 t 内离队的车辆数; 若某移动车辆在时刻 t 到达队尾, 则其位置为

$$q(t) = q(0) + l(ct - m), \quad (2)$$

其中, $q(0)$ 是 $t = 0$ 时刻车队末端的位置, $l = 1/\rho_{\text{jam}}$

是车辆的平均长度, ρ_{jam} 是为拥挤密度; m 是 $t = 0$ 时刻在考察的车辆与队列末端车辆之间正在运行的车辆数. 实际上是先于该被考察车辆加入队列的车辆数.

值得注意的是: 该模型的适用条件是 $0 < q(t) < L; q(t) < 0$ 不可能发生的, $q(t) \geq L$ 也就意味着没有赶上排队; 其中 L 是节段长度.

2.2. 速度模型

在中观交通仿真器中, 交通网络被划分为连接线、节点和载入点. 每条连接线又被划分为若干条节段, 以反映连接线上地形和交通状况的变化. 每条节段包含运动单元和排队单元. 其中, 车辆在运动单元内的速度由速度-密度模型确定. 该模型的建立基于以下假设: 节段的上游部分速度保持恒定, 其下游部分包含一个减速区域, 区域中车辆的速度随位置线性变化(如图 1 所示). 其中 v_u 是节段上游端点的车速, v_a 是节段下游端点的车速, L_s 是减速区域的长度. L_s 与路段的地形特征和交通状况有关.

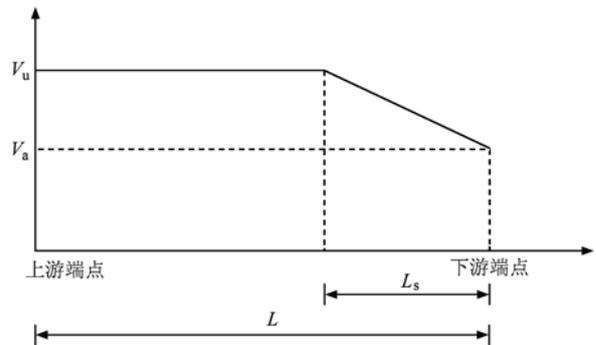


图 1 速度变化图

将路段的上游端点定为位置 0 点, 设路段长度为 L , 则路段的下游末端为位置 L 点, 由此建立速度与位置之间的关系式^[24]

$$v(z) = \begin{cases} v_u & (0 \leq z \leq L - L_s), \\ \lambda(z - L) + v_d, & (L - L_s < z \leq L), \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\lambda = \frac{v_d - v_u}{L_s}, \quad (4)$$

如果节段上不存在车辆排队现象, 则节段下游端点处的车速受其下游节段交通状况的影响. 如果节段上存在车辆排队现象, 则其下游端点处的速度

由排队消散率(即输出通行能力)确定. 节段上游端点的速度 v_u 是节段运动单元上平均密度的函数

$$v_u = \begin{cases} v_f, & \rho \leq \rho_{\max}, \\ v_f \left[1 - \left(\frac{\rho - \rho_{\max}}{\rho_{\text{jam}}} \right)^\alpha \right]^\beta, & \rho > \rho_{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

其中, v_f 为自由流车速; ρ_{\max} 为自由流情况下的允许最大车流密度; ρ 为车流密度; ρ_{jam} 为拥堵密度; α, β 为模型参数, 根据实测交通数据获得.

2.3. 车辆移动模型^[25]

在节段的运动部分, 车辆移动的速度由速度-密度关系模型决定, 车辆基于该固定速度前进. 到了减速区, 如果没有排队, 假设 $t = 0$ 时, 车辆位于 z_0 , 则车辆在时间 $t(z)$ 到达位置 z , 由下式给出:

$$t(z) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} \log \frac{\lambda_{z+z_u}}{\lambda_{z_0+v_u}}, & v_u \neq v_d, \\ \frac{z - z_0}{v_u}, & v_u = v_d, \end{cases} \quad (6)$$

这里的 λ 的定义同(4)式.

假设时间 $t = 0$ 时, 车辆位于 z_0 , 那么时间 t 时的位置为

$$z(t) = \begin{cases} e^{\lambda t} \left(z_0 + \frac{v_u}{\lambda} \right), & v_u \neq v_d, \\ v_u t + z_0, & v_u = v_d. \end{cases} \quad (7)$$

如果在位置 $z(t)$ 存在排队, 那么任意时刻 t 车辆的位置由下式给出:

$$z(t) = e^{\lambda(t)t} \left(z_0 + \frac{v_u}{\lambda(t)} \right) - \frac{v_u}{\lambda(t)}, \quad (8)$$

这里

$$\lambda(t) = \frac{-v_u}{q_0 + l(ct - m)}, \quad (9)$$

q_0, l, c, m 定义同(2)式.

3. 中观交通仿真流程

用 T 表示整个仿真时间区间, Δt_{update} 为“更新阶段”时间步长, $\Delta t_{\text{advance}}$ 为“前进阶段”时间步长. 更新阶段主要是更新交通流参数, 如节段车流密度、车道组容量模型等; 前进阶段主要是移动网络中所有车辆的位置, 可以有更小的时间步长. 将整个仿真时间区间 T 分成 k_u 个长度为 Δt_{update} 的更新间隔; 而每个长度为 Δt_{update} 的更新间隔又被分为 k_A 个长度为 $\Delta t_{\text{advance}}$ 的前进间隔. 因此,

$$T = k_u \Delta t_{\text{update}},$$

$$\Delta t_{\text{update}} = k_A \Delta t_{\text{advance}}.$$

中观交通仿真器的一般流程如图 2 所示.

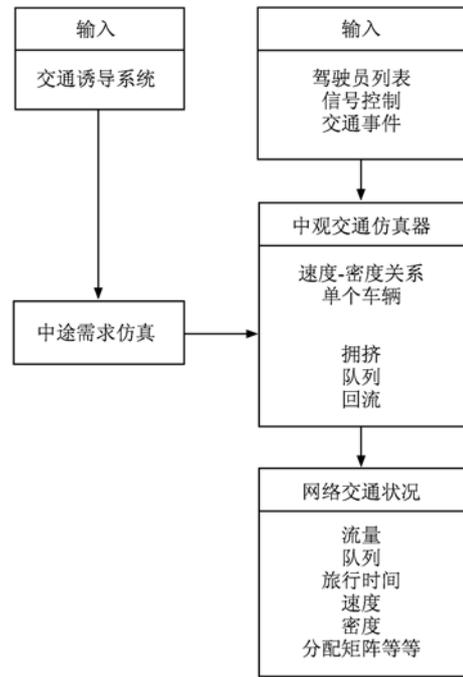


图 2 仿真流程

初始化:

1) 当前在网络中的所有车辆在时间 $t = 0$ 调入到路网中其现有位置上;

2) 对网络中所有节点进行拓扑排序;

3) 初始化更新阶段计数器: $j = 0$.

一个仿真循环:

1) 更新阶段算法用于当前时间段;

2) 更新阶段计数器加 1: $j = j + 1$.

仿真终止准则检查:

1) 当所有的更新阶段都已完成时, 算法终止, 此时 $j = k_u$.

输入仿真器需要如下输入信息:

1) 网络描述;

2) 仿真时间范围(区间);

3) 仿真开始时所有车辆信息的描述, 包括: 它们在网络中的位置、它们的目的地; 它们的当前旅行路径.

对于每个更新间隔, 需要

1) OD 流量;

2) 所有节段的容量;

3) 如果有交通事件, 需输入事件的位置、严重

程度和预计持续时间.

中观仿真器输出:

1) 连接线旅行时间: 仿真器产生一个包含连接线旅行时间的阻抗, 容纳如下旅行时间值: 对每条连接线的每个下游转弯方向、对每个更新时间隔;

2) 交通流量, 在检测器位置处, 以便比较仿真输出与实际检测器获得的流量之间的差异;

3) 队列长度: 产生排队车辆数, 针对: 网络中每条节段、与节段相关联的每一个下游转弯方向、每个更新时间间隔;

4) 分配矩阵: 对每一条连接线和每个时间间隔, 针对每辆车的如下信息均会被记录下来: 出行起点、出行目的地、出发时间.

4. 路径生成与路径存储数据结构

在中观交通仿真器中, 每辆车都必须沿着特定的路径从其当前位置移动到其目的地, 路径的产生与表示是重要的设计问题. 本文设计中一个关键的思路是预先定义好车辆能够行驶的所有路径. 在系统运行时, 并不调用通常采用的一些路径搜索算法(如最短路径、 k -最短路径、多准则路径). 因为对于大规模网络, 这些算法会带来巨大的计算负荷, 极大地降低系统的实时性能. 为此, 采用离线计算方法, 即当仿真器针对特定的交通网络进行设置时, 离线产生所有车辆能够行驶的路径并对这些路径进行周期性地更新. 离线计算的结果存放在一个特殊设计的数据结构中, 其中的路径数据可以被行为模型组件、供给仿真组件(中观交通仿真器)、诱导产生组件以及系统中其他的一些组件有效地引用.

系统容许从路网中的任一点到目的地有多条可通行的路径, 其离线路径产生算法采用了许多辅助的方法为路径诱导和行为模型组件产生路径. 这个处理过程中最终产生的路径在本文中叫做“有效路径”, 即网络中所有的车辆只在这些有效路径上运动.

4.1. 路径产生

路径的产生分两步: 首先, 在正常交通状况下产生一套有效路径, 然后, 增加的路径, 即在存在严重交通事件情况下车辆可绕行的路径也添加到该路径几何当中.

4.1.1. 正常交通状况

针对几个相应的路径阻抗函数定义, k -最短路

径算法被用到网络路径搜索过程当中. 对于每个阻抗函数, 其相对应的路径几何定义为 P_i , 例如, 可考虑如下的路径阻抗函数定义:

- 1) 自由流行程时间;
- 2) 早高峰的行程时间;
- 3) 晚高峰的行程时间;
- 4) 路径上左转弯数量;
- 5) $\alpha_1 \times$ 快速路长度 + $\alpha_2 \times$ 其他道路长度;
- 6) 路径的信号交叉口数量;
- 7) 其他.

最终产生的所有路径全部存放在可行路径集中(针对正常交通状况), 即 $P_h = U_i P_i$ 注意, k -最短路径集合中 k 的值依赖于路网的拓扑结构.

4.1.2. 严重交通事件

为保证任意一个 OD 对间即使在发生严重交通事件时仍存在一条路径, 在 P_h 中所有路径上的连接线被依次从网络中删除. 针对每一个修改后的网络和每一个阻抗函数(4.1.1中定义), 运用 j -最短路径搜索算法, 产生的路径被增加到集合 P_h 当中, 最终生成所有的可行路径几何 P . 同样需要注意, 在 j -最短路径搜索算法中的 j 同样依赖于网络的拓扑结构.

4.2. 算法设计

4.2.1. 路径集生成过程

第1步 置有效路径集合 $P = \varphi$.

第2步 得到正常条件下的有效路径集合并入 P : $P = P \cup k$ -shortest(G).

第3步 令临时路径集 $P_h = P$, 对 P_h 中的任意一条路径 p , $\forall p \in P_h$ 执行下面操作:

对于中 p 任意一条边 l , $\forall l \in p$, 如果 l 没有被处理过, 执行

- 1) 标识为处理过;
- 2) 得到 G 去掉边 l 的子图: $G^* = G \setminus l$;
- 3) 产生 G^* 的有效路径集, 并且并入 P : $P = P \cup j$ -shortest(G^*).

4.2.2. 有效路径满足“嵌套”特征

如果 $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$ 是从连接线 L_1 到目标节点 D 的有效路径, 则 $L_2 \rightarrow L_3 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$ 一定是从 L_2 到 D 的有效路径.

一条路径的连接线(弧段)序列可采用如下两个字段递归地枚举出来: 当前连接线的下游连接线标识号、从该下游连接线的下游端点离开的路径标

识号.

完整地描述一条路径仅需 3 个信息项: 当前连接线 ID、目标节点 ID 和路径 ID. 详细描述参阅文献[26].

5. 仿真研究

5.1. 网络拓扑构建

城市交通网络呈现出复杂网络的特征^[27], 这也引起了诸多的学者对复杂网络的研究兴趣, 深入了

解交通网络上的宏观动力学特征, 拓扑行为, 统计特性以及结构演变等是复杂网络理论研究的主要方向. Gao 等^[28]证实了基于 GIS 技术的城市网络具有小世界特征, Wu 等^[29]指出了北京市公交网络的无标度特性.

定义 $G = (V, E)$ 为拓扑网络, 其中 V 是节点的集合, E 是边的集合, G 可以描述为一个 $N \times N$ 的相关矩阵 $\{e_{ij}\}$, N 表示网络的大小, 如果节点 i 和节点 j 之间存在连接关系, 则定义 e_{ij} 为 1, 否则 e_{ij} 为 0. 根据 ER^[30], SW^[1] 算法构建网络, 如图 3 所示.

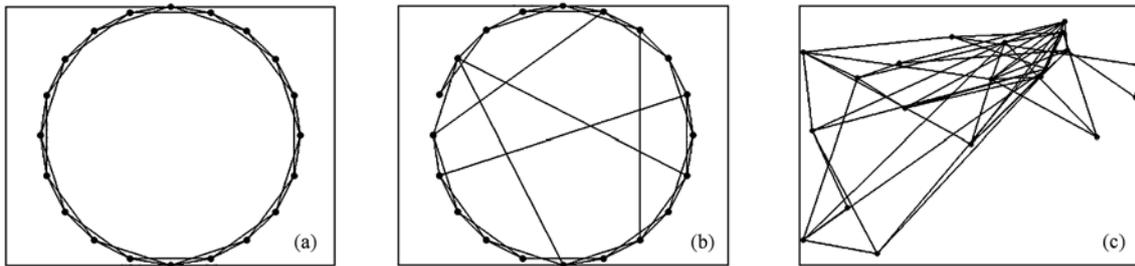


图 3 三种典型的网络拓扑

为了研究的方便本文中取节点为 100, p 为概率分别取 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95 等 20 个值. 这样就生成 20 个不同拓扑结构的网络. 其中 $p = 0$ 为规则网络, $p = 1$ 为完全随机网络. 统一将两节点间距定义为 500 m, 节点间采用单向连接, 默认为两车道, 每条路段均定义为一个节段. 并排列成 10×10 的方阵形式, 每个节点均定义为交通小区. 每个网络中共有 400 条路段.

5.2. 仿真环境

本研究中由于重点研究网络拓扑结构对交通拥堵规律的影响, 因此我们统一设置相同的其他参数, 以便于观察动态的网络结构演变对问题的本质揭示. 定义阻塞密度为 0.1150 pcu/m/l, α 为 1.9420, β 为 0.5040, 节段的输入输出能力统一一定以为 0.611 v/s. 由于本研究主要针对城市路网, 故设计最高时速为 60 km/h. 仿真时段定义为 15 min, 共仿真 3 h 的时间段, 即共有 12 个时段. 网络 OD 需求加载形式使用周期性封闭边界条件. 由于本文研究的侧重点不同, 交通网络拓扑结构也是根据复杂网络随机产生的, 因而缺少真实的 OD 数据, 但可以假定 OD 量. 当所有 OD 对的需求设置为 1 时, 20 个网络均没有出现拥堵现象. 当 OD 对均设置为 2 时,

大部分网络出现拥堵, 网络中加载的车辆出现显著差异, 其中最大的网络加载近 10 万辆车, 而最小的只有不到一万辆, 当需求增加到 4 时, 几乎所有的网络均陷于全线拥堵状态. 因此本文选取 OD 为 2 时的交通需求进行研究.

5.3. 仿真结果以及分析

首先以整个网络为研究对象, 观察 12 个节段所有路段的平均密度、速度、流量与概率选取的关系, 得到如下基本图(图 4 至图 6).

明显看到, 随着概率 p 的增大, 网络中的密度流

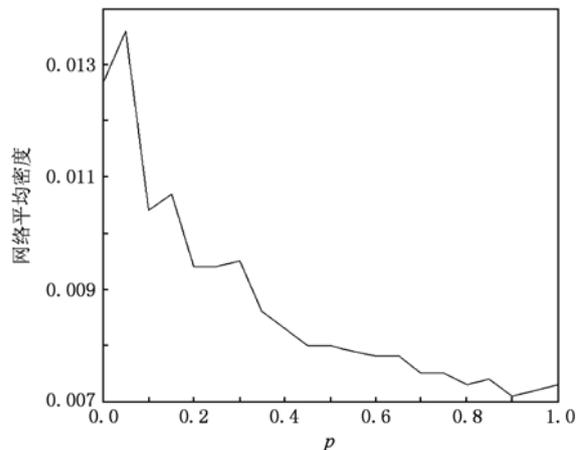


图 4 网络平均密度与 p 关系图

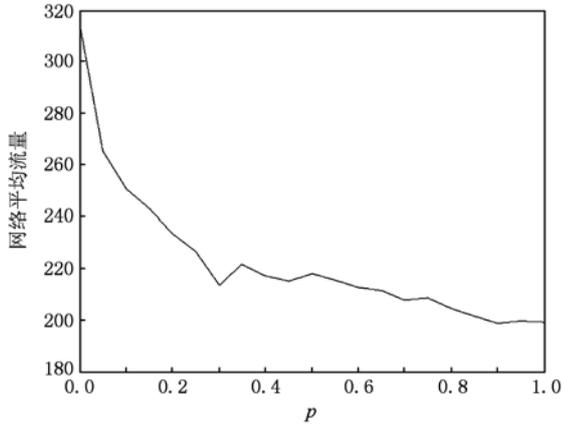


图5 网络平均流量与 p 关系图

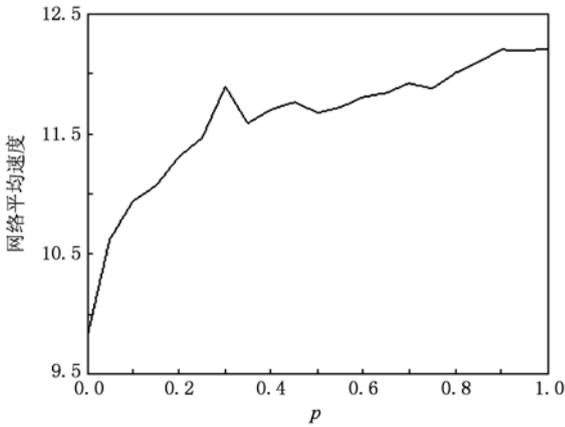


图6 网络平均速度与 p 关系图

量都呈下降趋势,而速度呈上升趋势.明显可以观察到,规则网络容易发生交通拥堵.网络结构的改变可以改变交通拥堵的发生,就复杂网络而言,概率选取越大网络越不容易发生拥堵.这很容易理解,当概率选取越大时,连接边的节点越具有不确定性,当选取到排列较远的节点时,其节点间的路段变长,这也意味着通行能力得到了提高,从而缓解了交通拥堵.

下面具体分析复杂交通的拥堵特性与规律,选取 p 为 0, 0.5, 1 时的网络中每个时段每个路段的流量速度密度为研究对象,下面给出其时空图(图 7 至图 9).

以上为规则网络即 p 为 0 时的时段节段与速度密度流量的关系时空图.下面依次给出 p 为 0.5 和 1 时的时空图(图 10 至图 15).

从以上时空图可以看出,同一 OD 需求下不同概率的选取对交通流量速度密度的影响巨大,流量

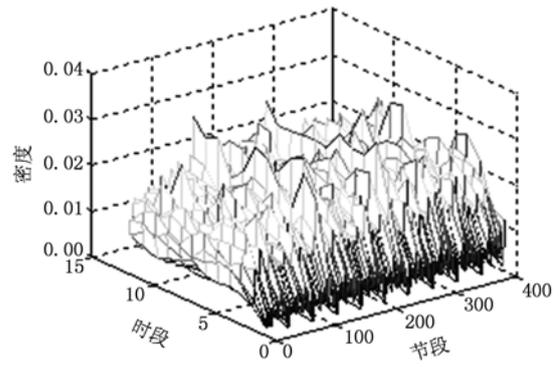


图7 规则网络时节段时段密度图

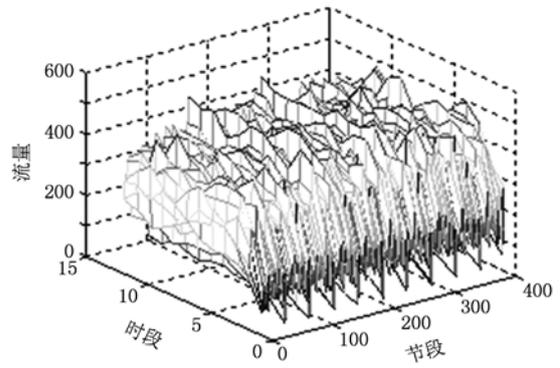


图8 规则网络时节段时段流量

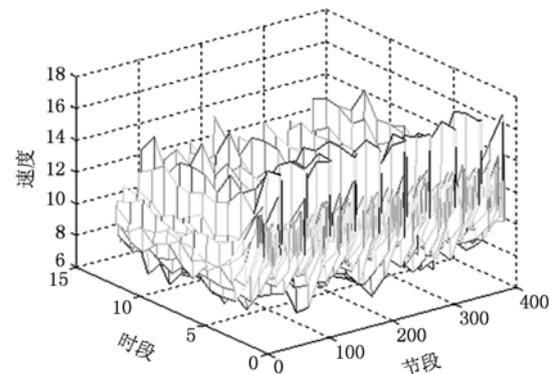


图9 规则网络节段时段速度图

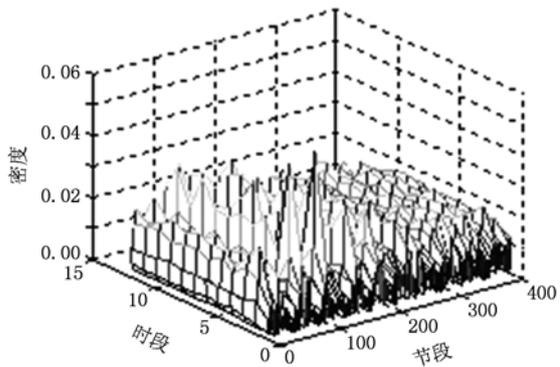


图10 $p=0.5$ 时节段时段密度图

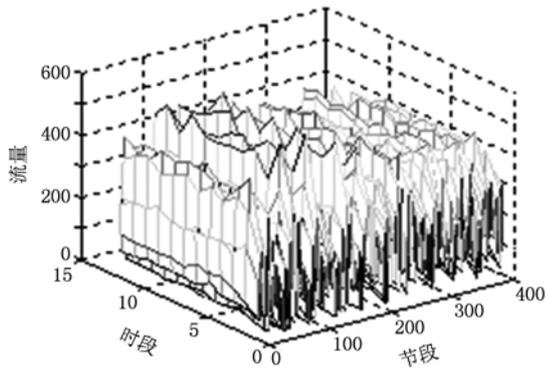


图 11 $p=0.5$ 时节段时段流量图

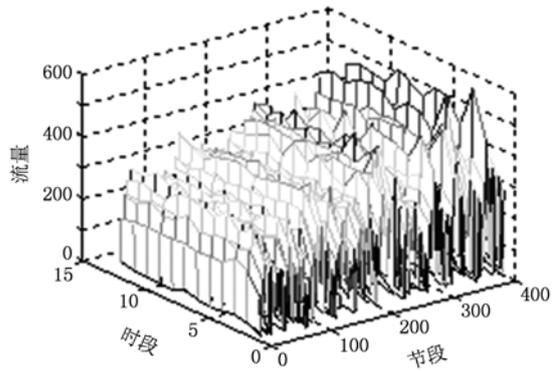


图 14 $p=1$ 时节段时段流量图

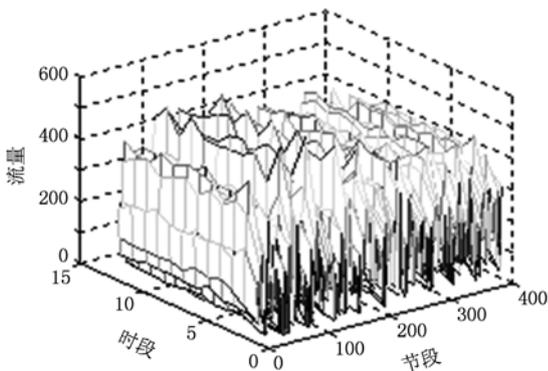


图 12 $p=0.5$ 时节段时段速度图

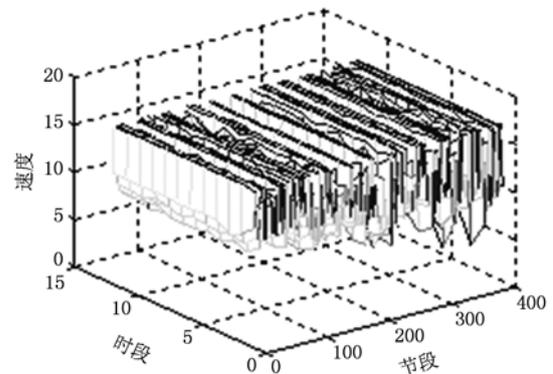


图 15 $p=1$ 时节段时段速度图

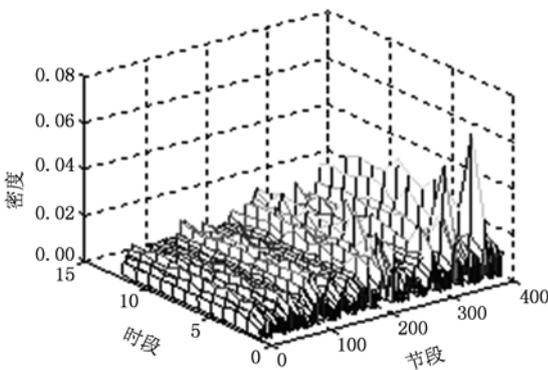


图 13 $p=1$ 时节段时段密度图

在网络中的分布也不尽相同,但通过观察 60 个时空图以及相关数据,可以发现,密度最大的路段都是网络中介数较大的边^[31],也就是这样的路段容易发生交通拥堵,这些边都位于 OD 对之间的实时最短路径上.一旦这样的路段发生突发事件或其他形式

的交通拥堵将会对整个网络造成严重的影响,因此可以适当提高这样路段的通行能力,或实行临时性的交通诱导以及分流等措施可以缓解交通拥堵.

6. 结 论

本文从复杂网络的角度出发,研究了不同网络的拓扑结构对交通拥堵规律的影响,运用改进的中观交通仿真模型模拟了车辆在网络中运动,进而分析复杂网络上的交通动力学特征及传播规律.仿真结果表明,复杂网络中介数较大边上容易发生交通拥堵,而且网络结构对交通拥堵及其传播具有较大的影响.本文的研究还有诸多的不足之处,如过于理想化的网络设置,假定的 OD 需求,也未考虑交叉口的信号,而信号优化也是缓解交通拥堵的一个重要手段等,这也是笔者以后努力的方向.

- [1] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* (London) **393** 440
- [2] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [3] Cui D, Gao Z Y, Zhao X M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1703
- [4] Zhang Z, Fu Z Q, Yan G 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2209
- [5] Cui D, Gao Z Y, Zheng J F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 516
- [6] Du H F, Li S Z, Marcus W F, Yue Z S, Yang X S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6886 (in Chinese)
- [7] 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]
- [8] Zhao M, Wang B H, Jiang P Q, Zhao T 2005 *Progress in Physics* **25** 273 (in Chinese) [赵明、汪秉宏、蒋品群、周涛 2005 物理学进展 **25** 273]
- [9] Luo Q, Wu W, Li L, Yang Y X, Peng H P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1529 (in Chinese) [罗群、吴薇、李丽香、杨义先、彭海朋 2008 物理学报 **57** 1529]
- [10] Wang B H, Wang W X, Xu B M 2006 *Complex Networks* (Volume 12) (Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Press) p247—261 (in Chinese) [汪秉宏、王文旭、许伯铭 2006 复杂网络 (第十二章) (上海:上海科技教育出版社) 第247—261页]
- [11] Ling X, Hu M B, Jiang R, Wu Q S 2010 *PRE* **81** 016113
- [12] Danilia B, Yu Y, Marsh J A, Bassler K E 2006 *PRE* **74** 046106
- [13] Yan G, Zhou T, Hu B, Fu Z Q, Wang B H 2006 *PRE* **73** 046108
- [14] Tang T Q, Huang H J, Wong S C, Jiang R 2009 *Chin. Phys. B* **18** 0975
- [15] Xie D F, Gao Z Y, Zhao X M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4440
- [16] Hu S X, Gao K, Wang B H, Lu Y F 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1863
- [17] Jiang R, Jin W L, Wu Q S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 829
- [18] Gao K, Wang B H, Fu C J, Lu Y F 2007 *Chin. Phys. B* **16** 3483
- [19] Tang C F, Jiang R, Wu Q S 2007 *Chin. Phys. B* **16** 1570
- [20] Li X B, Wu Q S, Jiang R 2001 *Phys. Rev. E* **64** 066128
- [21] Knospe W, Santen L, Schadschneider A, Schreckenberg M 2000 *J. Phys. A* **33** L477
- [22] Jiang R, Wu Q S 2003 *J. Phys. A: Math. Gen.* **36** 381
- [23] Eissfeldt N, Wagner P 2003 *Eur. Phys. J. B* **33** 121
- [24] Jiang Z, Li S B, Huang Y X 2008 *TSEIT* **8**(1) 55 [江竹、李树彬、黄永宣 2008 交通运输系统工程与信息 **8** (1) 55]
- [25] Ben-Akiva M, Bierlaire M, Burton D, Koutsopoulos H, Mishalani R 2001 *NASE* **1** (3/4)
- [26] Li S B, Gao Z Y, Lin Y, Wu J J, Li K, Xu Z X, Ding Q Y 2009 *TSEIT* **9** (5) 141 [李树彬、高自友、林勇、吴建军、李珂、许兆霞、丁青燕 2009 交通运输系统工程与信息 **9** (5) 141]
- [27] Jiang B, Claramunt C 2004 *EPB* **31** 151
- [28] Gao Z Y, Li K P, Li X G, Huang H J, Mao B H, Zheng J F 2007 *Physica A* **380** 577
- [29] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J 2004 *Mod. Phys. Lett. B* **74** 560
- [30] Erdős P, Rényi A 1960 *On the evolution of random graphs. Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci.* **5** 17
- [31] Wu J J 2008 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [吴建军 2008 博士学位论文 (北京: 北京交通大学)]

The analysis of traffic congestion and dynamic propagation properties based on complex network*

Li Shu-Bin¹⁾²⁾ Wu Jian-Jun³⁾ Gao Zi-You^{1)†} Lin Yong²⁾ Fu Bai-Bai⁴⁾

1) (School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (Institute of Automation Shandong Academy of Sciences, Shandong Jinan 250014, China)

3) (State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China)

4) (School of Architecture and Urban Planning, Shandong Jianzhu University, Jinan 250014, China)

(Received 6 July 2010; revised manuscript received 28 July 2010)

Abstract

The complexity science, as a new crossing discipline, have infiltrated many areas of traffic study. In recent years, studying the problem of urban traffic system with complex network theory offers a new perspective to investigate the generation and propagation of traffic congestion. This paper studies the impact of the network topology on traffic congestion by the improved mesoscopic traffic flow model, and analyzes properties of the occurrence of traffic congestion, which can raise the effective elimination of traffic congestion control strategy as well as make reasonable transportation planning.

Keywords: complex network, traffic flow, traffic congestion, propagation property

PACS: 07.05.Tp, 46.40.Cd, 47.90.+a, 89.75.Fb

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705500), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 70801005, 70871009), the National Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 8102029), the Application and Innovation Projects of the Ministry of Public Security of China (Grant No. 2007YYCXSDST057), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2009JBM053) and the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant Nos. Y2008F14, ZR2009FM038).

† Corresponding author. E-mail: zygao@center.bjtu.edu.cn