

## 城市环境下基于拓扑特性的车辆自组网建模\*

张丽丽, 陈浩, 李臣明, 谭国平

(河海大学 计算机与信息工程学院, 江苏 南京 210098)

通讯作者: 张丽丽, E-mail: lilzhang@hhu.edu.cn

**摘要:** 低碳生活和低能耗是当今的热门话题,对“绿色交通”的期待使得车辆自组网(vehicular ad hoc network,简称 VANET)受到越来越多的关注和研究.而无线通信技术的快速发展和车辆的普及使车辆自组网的研究变得更加迫切和必要.提出以车辆自组网本身拓扑特点出发,通过对某些城市 VANET 的实证研究来获得通用的网络特征和网络模型,进而解释网络行为和物理含义的新思路.基于此,利用 4 000 多辆出租车收集的实时数据,分析了城市环境下车辆自组网的度分布、聚类系数、特征路径长度等拓扑特性.数据分析结果表明,城市环境下车辆自组网节点度服从幂率分布,且网络的整体和局部都具有较高的聚类系数.从分析结果出发结合复杂网络理论,建立了一种车辆自组网的网络模型,该模型从规则图出发,应用无标度网络和小世界网络的特性,将随机重连和优先连接原则应用于模型中,并设置模型的外部接口对网络模型进行控制和分析.最后,仿真验证了所建模型的有效性.为建立更有效的车辆自组网仿真平台提供了理论模型,同时有助于更好地控制网络拓扑.

**关键词:** 车辆自组网;拓扑特性;复杂网络;网络模型;有效性

中文引用格式: 张丽丽,陈浩,李臣明,谭国平.城市环境下基于拓扑特性的车辆自组网建模.软件学报,2013,24(Suppl.(1)): 51-61. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13007.htm>

英文引用格式: ZHANG Li-Li, CHEN Hao, LI Chen-Ming, TAN Guo-Ping. Modeling the vehicular ad hoc networks based on topology characteristics in urban scenario. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl.(1)): 51-61 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13007.htm>

## Modeling the Vehicular Ad Hoc Networks Based on Topology Characteristics in Urban Scenario

ZHANG Li-Li, CHEN Hao, LI Chen-Ming, TAN Guo-Ping

(College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Corresponding author: ZHANG Li-Li, E-mail: lilzhang@hhu.edu.cn

**Abstract:** Nowadays, low-carbon life and low energy consumption are popular topics as more and more people are looking for "green transport". With the rapid development of wireless communication technology and the widespread adoption of vehicles in daily life, Vehicular ad hoc Network (VANET), as a new research hot spot, has attracted much attention. This paper proposes a new method to analyze VANET and explain network behavior with its physical meaning. Firstly, this paper models the VANET based on the topology characteristics which will be analyzed based on the real data collected by more than 4 000 taxis in Shanghai. The topology characteristics include degree distribution, clustering coefficient, characteristic path length and so on. The statistical analyses show the degree distribution follows the power law which is the classic characteristics of scale-free network in complex networks. It also reveals high clustering coefficient of VANET. Through combining the complex network theory and applying the small world model and scale free model, The paper builds a VANET model and create external interface to control the network. The simulations prove the effectiveness of our model, which helps us to build capable simulation platform of VANET with better network control.

**Key words:** vehicular ad hoc network; topology characteristics; complex network; network model; effectiveness

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61003224, 61001068)

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

随着人口增多和城市化加剧,交通问题越来越严重,其解决也迫在眉睫.目前,车辆自组网的快速发展和研究的深入使交通问题的解决成为可能.车辆自组网是随着车辆的普及和移动 ad hoc 网络技术的不断发展而出现的新兴应用型无线网络<sup>[1]</sup>.它在交通信息预警,行车安全,车辆之间通信及车辆 Internet 访问等方面具有良好的应用前景<sup>[2]</sup>.另外,它在城市监测,路况监测,交通流量监测,数据收集等方面也有广阔的应用舞台<sup>[3,4]</sup>.具体来说,车辆自组网就是综合现有电子信息技术,将每辆汽车作为一个信息源,通过无线通信手段接入到互联网中,进而实现对交通流和交通信息的管理和有效利用.因此,车辆自组网的研究对交通问题的解决具有重要意义.另外,复杂网络研究作为一门新兴学科,正渗透到数理学科,生命学科和工程学科等众多不同的领域,对复杂网络的定量与定性特征的科学理解,已成为网络时代科学研究中一个极其重要的挑战性项目,甚至被称为网络的新科学<sup>[5]</sup>.而城市环境下车辆组成的通信系统是一个复杂系统,由于客观世界中复杂系统都可以用网络进行直观刻画.所谓的网络就是由许多节点与连接两个节点的一些边组成的,其中节点代表系统中不同的个体,边则表示个体间的关系.两个节点之间具有特定的关系则连一条边,有边相连的两个节点被看作是相邻的<sup>[6]</sup>.在车辆自组网中我们将单独的车辆作为一个节点,用边来表示车辆之间的通信连接关系,这样就构成了一个网络.由于车辆自组网具备结构复杂、连接多样性、动力学复杂性、节点多样性等复杂网络的特点,所以借鉴复杂网络理论对其进行理论研究,建立网络模型并研究网络动力学行为进而揭示网络特征的形成机制.另一方面,车辆自组网也属于无线移动网络的一部分,在无线移动网络中,数据的传输依赖于路由的设计,路由的设计受限于网络的结构及动态变化.针对车辆自组网,由于其频繁的拓扑变化,所以基于复杂网络理论对其拓扑特性和网络模型动态变化的研究就显得尤为重要.本文首先基于 4 000 多辆出租车得到的数据进行实证研究,分析车辆自组网的拓扑特性,包括节点的度分布,聚类系数,特征路径长度等,进而建立城市环境下有效的车辆自组网模型.这对深入认识车辆自组网提供理论基础,为建立更有效的车辆自组网仿真平台提供理论模型,也对路由协议的设计和验证起指导作用.

## 1 车辆自组网的发展历程及相关工作

日本首先在 20 世纪 80 年代初开始车辆间通信的研究,现如今,车辆自组网的研究已经受到世界各国研究机构和科研人员的关注.在 2003 年国际电信联盟远程通信标准化组(ITU Telecommunication Standardization Sector ITU-T)的汽车通信标准化会议上,各国专家提出车辆自组网技术有望在 2010 年将交通事故带来的损失降低 50%;2003 年,美国的联邦通信委员会专门为车辆间通信划分了专用频段,协议 DSRC(Dedicated Short Range Communication)成为了第 1 个车辆自组网通信标准;2009 年,IETF 制定了由 802.11 标准扩充的 WAVE(wireless access in vehicular environments),又称 IEEE 802.11p,为车辆自组网通信提供了新的标准.

目前,VANET 的研究主要涉及网络架构,物理层技术,媒体访问机制,路由协议,安全技术等,针对车辆自组网的拓扑结构及模型的理论研究不多且不深入.如文献[7]仅对节点间的连通性进行研究,文献[8]研究了不同移动模型下节点度分布,节点通信持续时间,聚类系数,簇的大小等.它们都是首先假设车辆自组网中的车辆遵从某种移动模型,其次基于输入的具体数据或假设的数据进行网络拓扑特征的研究.这些文献主要对某些统计特征进行分析,没有对统计特征的形成机制进行建模,缺乏网络模型,没有通过模型再现真实世界,揭示统计特征的形成机制.文献[9]基于复杂网络的理论,以公交停靠站点为节点,公交线路作为网络边,构成一个复杂的城市公交网络,研究该城市公交网络的一些统计特征.对网络的度分布,聚类系数,最短路径长度等做了复杂性分析.验证了城市公交网络的无标度特性,但并没有对公交网络进行建模,且统计特性的分析也不够精炼和深入.而文献[10]先从理论上对基于 RWP 的 Ad hoc 网络的度分布和聚类系数进行分析.然后对基于 RWP 的各种移动场景下 Ad hoc 网络复杂统计特性进行了初步探究,并得出这样的移动场景下 Ad hoc 网络在条件具备的情况下是可能具有小世界效应和无标度性质的.但是,真实情况下 Ad hoc 网络是否是一个小世界网络,是否具备无标度性质,这些都没有进行分析.文献[11]建立了北京市公交站点网络,北京市公交换乘网络和北京市公交线路网络 3 种公交网络模型.利用相关的算法将北京公交线路站点信息转化为相应的邻接矩阵和最短路径距离矩阵.并通过 MATLAB 程序设计,编写程序计算出北京市 3 个公交网络模型的度,最短路径长度和聚类系数等指标,分析了

3种公交网络模型的无标度和小世界特性。但是,以上3种模型并没有把车辆之间的无线通信考虑进去,而这是建立车辆自组网模型的关键。目前使用模型仿真器来生成真实的车辆自组网的移动模型也是比较流行的做法,原因就在于其简单和易操作性。比如文献[12]就首先描述了基于一个公共仿真器 SUMO 的 MOVE 工具来快速生成车辆自组网的真实移动模型,并验证了交通灯的存在,行驶路线的选择,驾驶员的超车行为对仿真结果的影响。而文献[13]基于车辆自组网仿真器 VNSIM,加入社会网络的理论设计了一个符合多种场景的真实的移动模型,进而反映网络中所有节点的真实移动性。以上文献从微观的角度建立了移动模型来揭示车辆自组网的运动规律,但是都没有从网络模型的宏观角度对网络的结构及复杂行为进行理论研究,也就没有办法揭示整体网络的统计特性。而本文将城市车辆组成的通信系统作为一个整体网络,考虑系统内部的相互作用模式对系统整体行为的影响。打破了原有的模型分析局限(主要是从网络的运动轨迹出发构建微观模型),预示了系统的整体行为。

总体来看,现有研究主要是基于真实数据分析网络的微观几何特征,无法反映网络结构的演化过程,也无法系统地研究网络结构和网络性能之间的相互影响。另外,复杂网络虽然可以成为研究车辆自组网结构和行为的新视角,但现有的复杂网络模型缺乏对车辆自组网独特性的刻画,所以建立符合车辆自组网特征的网络模型才能揭示车辆自组网特有的宏观现象。因此本文则基于真实数据获得的网络拓扑特性,结合复杂网络理论,建立车辆自组网的理论模型,并对其有效性从理论和仿真两个角度分别验证。而这种从车辆自组网自身拓扑结构去分析城市车辆通信系统的方法也为城市公共交通通信系统的网络研究提供了新思路。

## 2 车辆自组网拓扑特性分析

对于一个网络,网络管理是系统正常运行的关键,而掌握网络拓扑行为的演化规律是网络管理的基础。所谓的网络拓扑是指不依赖于节点的具体位置和边的具体形态就能表现出来的性质,相应的结构被称为网络的拓扑结构<sup>[6]</sup>。大量的研究都表明,网络所具有的特性在很大程度上是由网络的拓扑来决定的,不同的拓扑结构会导致网络性能的差异。所以本文结合车辆自组网本身的特点应用复杂网络的理论对拓扑行为加以研究,从而得到网络演化的规律。

在已有关于车辆自组网网络拓扑特性的研究中,文献[14]对城市环境下车辆自组网的动态拓扑特性进行了分析研究,其中着重分析了密度,通信半径与网络连通性的关系,得到了它们之间的重要对应关系。具体来说:如果车辆密度较大则对应的网络连通性较好;反之,当车辆密度较小时网络连通性也比较弱。最后得出城市环境下通信半径是影响网络连通性的主要参数。而文献[15]则在以上分析的基础之上利用 GPS 及导航系统等提供的信息,结合节点的位置及网络连通性提出了基于位置和连通性的可靠路由算法。该算法主要是通过推断道路车辆密度,根据车辆密度与连通性之间的关联,及道路长度计算道路权值,从而选择出有效的数据转发路径;再根据车辆移动速度和方向设计扩展的数据贪心转发策略,从而实现数据的可靠传输。可以说已有的这些研究都为我们的分析提供了很好的思路,本节在已有研究的基础之上对车辆自组网的拓扑特性进行分析和验证。

为了定量描述网络拓扑特征,表征网络的拓扑结构,本文主要研究了车辆自组网网络节点的度分布,聚类系数,特征路径长度等基本拓扑特性。而本节基于 4 000 多辆出租车收集的数据对车辆自组网的以上拓扑特性进行统计分析。车辆收集的数据包括以下 7 项内容:车号,时间,经度,纬度,速度,方向,是否有乘客。首先,对收集到的数据进行去噪处理;其次,基于统计方法分析车辆自组网的基本拓扑特性,主要包括节点度分布,聚类系数,特征路径长度等。

### 2.1 节点度分布分析

先考虑网络最基本也是最简单的局部特征——度分布。所谓节点度分布即度为  $k$  的节点所占总节点数的比例,即  $P(k) = \frac{n(k)}{N}$ ,其中  $n(k)$  表示度为  $k$  的节点数, $N$  表示整个网络的节点数。其中节点度是指一个节点的邻居节点数目。无标度网络的特点是节点度服从幂律分布,即节点度为  $k$  的节点数目与  $k$  的关系可以近似表示为幂函数  $P(k) = \alpha k^{-\gamma}$ 。其中  $k$  为节点度, $\alpha$  为常数, $\gamma$  为度分布指数。

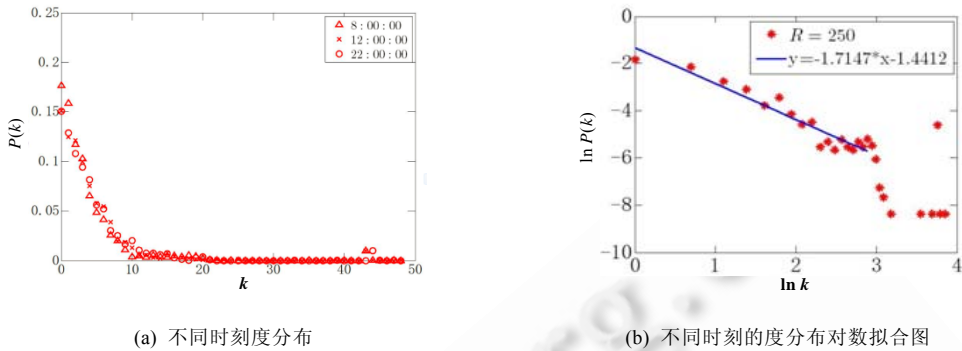


Fig.1 Degree distribution when R is 250

图 1 R=250 时的度分布示意图

图 1(a)为车辆自组网在通信半径 $R=250$ 时不同时刻下 $P(k)$ 与节点度 $k$ 之间的关系示意图.为了直观,图 1(b)将节点度 $k$ 和概率值 $P(k)$ 分别取对数,并用直线拟合其变化规律.这说明网络中节点度基本服从幂率分布,即网络具有无标度特性.同时,图 1(b)还出现了厚尾现象,这是因为电脑的计算能力有限造成的.为了验证结论的普遍性,对多个时刻不同通信半径下的度分布进行了类似的仿真验证,其度分布的基本变化规律都和图 1(a)相同,且都可以像图 1(b)那样通过直线的拟合得到网络的节点度服从幂率分布(具体数据见表 1).

Table 1 The corresponding relationship among  $N, k$ , and  $p(k)$

表 1 不同半径不同时间点的节点数,节点度, $P(k)$ 的对应关系

(a)  $R=500$  时不同时刻节点数,节点度, $P(k)$ 的对应关系

8点			12点			22点		
$k$	$N$	$P(k)$	$k$	$N$	$P(k)$	$k$	$N$	$P(k)$
0	300	0.069719	0	256	0.069493	0	283	0.065768
1	205	0.047641	1	143	0.033233	1	166	0.038578
2	200	0.046479	2	157	0.036486	2	143	0.033233
3	175	0.040669	3	136	0.031606	3	141	0.032768
4	210	0.048803	4	144	0.033465	4	148	0.034395
5	216	0.050198	5	137	0.031838	5	143	0.033233
6	203	0.047176	6	170	0.039507	6	150	0.034859
7	172	0.039972	7	182	0.042296	7	158	0.036719
8	204	0.047409	8	185	0.042993	8	141	0.032768
9	163	0.037881	9	177	0.041134	9	159	0.036951
10	175	0.040669	10	169	0.039275	10	160	0.037183
11	124	0.028817	11	143	0.033233	11	141	0.032768
12	140	0.032535	12	170	0.039507	12	166	0.038578
13	115	0.026726	13	151	0.035092	13	121	0.02812
14	107	0.024866	14	144	0.033465	14	134	0.031141
15	92	0.02138	15	118	0.027423	15	108	0.025099
16	81	0.018824	16	95	0.022078	16	109	0.025331
17	57	0.013247	17	95	0.022078	17	106	0.024634
18	57	0.013247	18	74	0.017197	18	106	0.024634
19	51	0.011852	19	73	0.016965	19	92	0.02138
20	59	0.013711	20	51	0.011852	20	93	0.021613
21	47	0.010923	21	59	0.013711	21	58	0.013479
22	40	0.009296	22	60	0.013944	22	45	0.010458

(b)  $R=750$  时不同时刻节点数,节点度, $P(k)$ 的对应关系

10点			14点			18点		
$k$	$N$	$P(k)$	$k$	$N$	$P(k)$	$k$	$N$	$P(k)$
0	158	0.036744	0	164	0.03814	0	178	0.041366
1	99	0.023023	1	88	0.020465	1	121	0.02812
2	98	0.02279	2	96	0.022326	2	85	0.019754
3	68	0.015813	3	70	0.016279	3	69	0.016035
4	81	0.018837	4	60	0.013953	4	70	0.016268
5	60	0.013953	5	50	0.011628	5	50	0.01162
6	68	0.015813	6	49	0.011395	6	75	0.01743
7	65	0.015116	7	63	0.014651	7	59	0.013711
8	67	0.015581	8	51	0.01186	8	60	0.013944
9	87	0.020232	9	53	0.012326	9	65	0.015106
10	79	0.018372	10	61	0.014186	10	80	0.018592
11	76	0.017674	11	82	0.01907	11	71	0.0165
12	87	0.020232	12	11	0.02558	12	84	0.019521
13	82	0.019069	13	84	0.019535	13	82	0.019056
14	63	0.014651	14	95	0.022093	14	73	0.016965
15	88	0.020465	15	84	0.019535	15	85	0.019754
16	79	0.018372	16	86	0.02	16	90	0.020916
17	67	0.015583	17	79	0.018372	17	79	0.018359
18	77	0.017906	18	78	0.01814	18	84	0.019521
19	77	0.017906	19	84	0.019535	19	81	0.018824
20	79	0.018372	20	78	0.01814	20	98	0.022775
21	93	0.021627	21	76	0.017674	21	90	0.020916
22	65	0.015116	22	71	0.016512	22	91	0.021148

为了验证车辆自组网具有普遍的无标度特性,分别使用真实数据对不同时刻不同通信半径条件下的车辆自组网进行了数据分析和仿真验证.其中,表 1 是比较有代表性的例子,表 1(a)分别提取了 $R=500$ 时 8 点,12 点,22 点的度值对应的节点个数和 $P(k)$ .分析其中的具体数据不难看出 $P(k)$ 与 $k$ 的变化规律和图 1(a)基本一致,开始最大之后逐渐下降.而表 1(b)则选取了 $R=750$ 时 10 点,14 点,18 点的度值对应的节点个数和 $P(k)$ .我们发现数据具有和表 1(a)同样的规律.同时,作者也做了大量的数据分析和仿真,但由于篇幅所限就不一一列举出来了.最终,经过验证可以得到车辆自组网具有普遍的无标度特性.

## 2.2 聚类系数分析

网络的聚类系数描述了网络局部聚集特征,是对网络中节点倾向于形成集团的一种度量.在城市环境下的车辆自组网中,它实际反映了车辆通信网络的局域连通性和密集程度.聚类系数越大车辆自组网的局域连通性

和密集程度就越高.可见车辆自组网的聚类系数对通信信息的可达性,整体网络的稳定都有很大的影响.

节点  $i$  的聚类系数定义为  $C_i=2t_i/(k_i(k_i+1))$ ,其中  $k_i$  为节点  $i$  的邻居个数(即节点  $i$  的度),  $t_i$  为邻居点之间存在的实际边数.整个网络的聚类系数为各节点聚类系数均值,即  $C_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$ .

以文献[16]对网络演化模型高聚类系数的验证分析为依据可以得到以下结论.图 2(a)为节点数  $N=4000$  时主要时刻  $C_a$  随通信半径增加而变化的曲线,可以看到随着半径的增加  $C_a$  略有下降,但总体保持了一个很高的聚类系数,说明了车辆自组网整体的高聚类性.图 2(b)反映了 12 点时  $C_a$  与节点数  $N$  之间的关系,可以看出大部分的情况下网络具有高聚类性.当然,为了验证结果的普遍性,分别对多个不同的时间点,不同的节点个数和半径长度的情况进行了仿真验证,验证的结果虽然在具体数值上有一定的差别,但最后的变化趋势都和图 2 相同,并且结果都在高聚类系数的范围之内(具体情况见表 2).综上所述,车辆自组网整体具有普遍的高聚类特性.

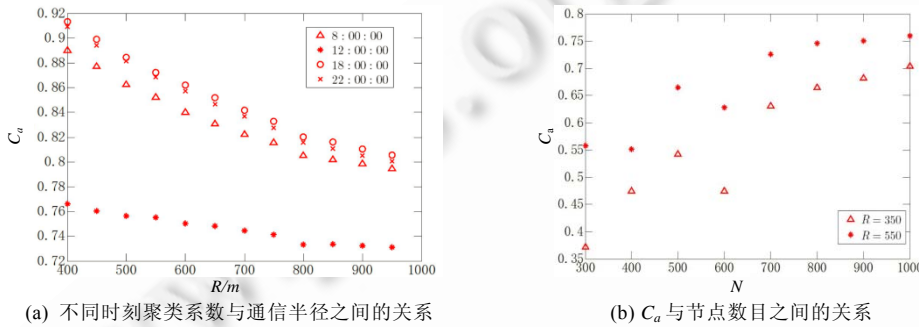


Fig.2 Empirical analysis of the clustering coefficient

图 2 聚类系数实证分析

Table 2 The comparison of clustering coefficient with different radius and different regions

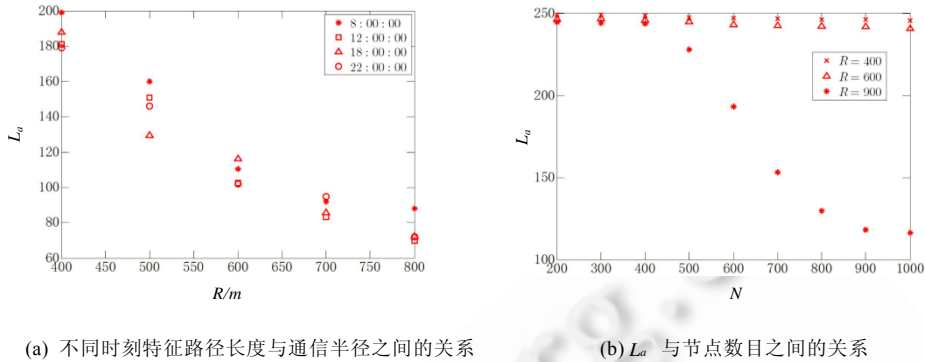
表 2 不同区域不同半径下聚类系数的对比

Area	$N$	$C_a(R=300)$	$C_a(R=400)$	$C_a(R=600)$	$C_a(R=800)$
pudong	116	0.771195	0.771859	0.758288	0.741698
suburbs	32	0.766852	0.769215	0.758557	0.741056
Shanghai	4305	0.764213	0.766082	0.756543	0.739513

为了验证结果的普遍性,分别选择了上海市浦东区的一部分,郊区的一部分和上海整体进行聚类系数的对比.截取的区域坐标(精度和维度)分别为,浦东:左上( $x=121.4908333,y=31.24673611$ ),左下( $x=121.4908333,y=31.2321111$ ),右上( $x=121.5105972,y=31.24673611$ ),右下( $x=121.5105972,y=31.2321111$ ).郊区:左上( $x=121.3340861,y=31.09506389$ ),左下( $x=121.3341194,y=31.09445278$ ),右上( $x=121.3424556,y=31.09506389$ )和右下( $x=121.3425944,y=31.09746667$ ).通过表 2 的对比分析不难发现无论节点数目和区域如何变化其聚类系数始终维持在一个很高的数值,这也就证明了车辆自组网全局和局部的高聚类特性.

### 2.3 特征路径长度

特征路径长度是指每个节点  $i$  到其他节点的最短路径长度的均值,即式  $L_a = (2/(N(N-1))) \sum_{i>1} d_{ij}$ . 其中,  $N$  表示网络中节点数目,  $d_{ij}$  表示节点  $i, j$  之间的最短路径长度.若网络兼具较小的特征路径长度和较大的聚类系数,则该网络为小世界网络<sup>[17]</sup>.特征路径长度是一个从全局角度出发描述网络中任意两个节点间距离的特征参数.显然,  $L_a$  越小车辆之间的通信越畅通,车辆自组网的可达性越好.



(a) 不同时刻特征路径长度与通信半径之间的关系

(b)  $L_a$  与节点数目之间的关系

Fig.3 Empirical analysis of the characteristic path length

图3 特征路径长度实证分析

图3(a)中固定节点个数为4000,仿真实验验证了不同时刻通信半径与特征路径长度的对应关系.由图可知,随着通信半径的增大特征路径长度逐渐减小.依据参考文献[16,17]中关于特征路径长度大小的分析,发现在整个通信半径的变化过程中 $L_a$ 经历了从大到小的过程.而图3(b)则验证了 $L_a$ 与节点个数的关系,可以发现在通信半径为400和600时节点个数的变化并不会影响特征路径长度的变化.但是当通信半径增大到900, $N$ 的增加将会导致 $L_a$ 的迅速下降.通过对多组数据不同情况的验证发现其结果的变化趋势大致如此.从中不难看出,通信半径的增大对特征路径长度的影响较大.为了验证车辆自组网是否具有小世界特征,在节点个数和通信半径的选择上分别和图2对应.最终发现车辆自组网并不具有普遍的小世界特征.

综上所述,本节在城市环境下基于真实数据仿真验证得到车辆自组网网络节点的度分布,网络的聚类系数和特征路径长度,并找到了节点度服从幂率分布且网络具有比较高的聚类系数这样的普遍规律.

通过前文的论述可以得到,利用复杂网络分析车辆自组网时,将一个装载有GPS的车辆看作网络的一个节点而将车辆之间的通信连接关系作为网络的一个边.基于此利用实时数据中关于车辆以及通信连接关系的信息就可以构成一个车辆自组网.利用复杂网络中的网络分析方法对此网络进行分析,因此需要从3个最基本的影响因素出发.其分别为最基础也是最简单的度分布,描述网络聚集特征的聚类系数和描述网络通达性的最短路径长度.本节的分析已经发现了度分布和聚类系数的普遍规律,所以下一节我们将基于度分布和聚类系数这两个基本的影响因素验证建立模型的有效性.

### 3 基于复杂网络理论和拓扑特性分析的网络模型

#### 3.1 建模分析

通过前文基于真实的实时数据对拓扑特征的验证,可以发现车辆自组网度分布和聚类系数的普遍规律.因此希望按照一定的规律构建模型使得其可以满足车辆自组网的基本拓扑特征.

实时数据的仿真结果可以发现车辆自组网局部和全局的聚类系数都很大,即网络比较容易形成集团,集团内部连接非常紧密,这便符合局部高聚类性.整体的高聚类性是小集团聚集的结果,因此网络中具有较高聚类系数的小集团的数量必须比较多.另外,整体网络的无标度特性也需要保持.基于以上分析,利用复杂网络建立模型用以模拟车辆自组网的拓扑变化是研究的主要目的.复杂网络的已有模型中,无论是小世界模型还是无标度模型都不符合车辆自组网的真实情况.因此,需要建立新的模型,但已有模型的建立思想可以适当借鉴.整体保持无标度的前提下要有更多具有高聚类性的小集团,故此开始阶段设置很多孤立的局域,局域内部是全局耦合的,这就首先保证了局域的初始状态是高聚类的.通过加点来促进网络的增长,点先加入局域并在局域内部进行连接,当然这种连接依然是在保证局域高聚类性的前提下所进行的局域间连接,这其中可以引进无标度网络模型构建中的优先连接机制,保证整体的无标度性.在网络的增长过程中,控制不力导致网络结果不正确或者不准确始终是建模的一大问题.所以这里引出了很多的外部接口,它们对应不同的控制参数,通过调整这些参数就可

以得到与真实车辆自组网比较接近的模型.

### 3.2 局域无标度模型

基于车辆自组网拓扑特性的分析,首先假定车辆自组网是由很多个小世界通过稀疏连接而形成的,总体上体现出无标度特性并具有较高的聚类系数,因此,将建立的模型称为局域无标度模型.模型的建立主要分 3 个过程,初始化过程,增长过程和优先连接过程.

初始化过程: $m$  个互不连通的局域  $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m\}$ , 每个局域都是全局耦合的规则图,即任意两点之间两两相连,且每个局域都包含  $m_0$  个节点 ( $m_0 \geq 1$ ), 本文用  $k(\Omega_i) = \max\{k(v) | v \in \Omega_i, i=1, 2, \dots, m\}$  表示局域的度,即局域中节点的最大度值.

增长过程:首先,以概率  $u$  将一个新节点加入到一个已知的局域中,并对该局域进行标记,其中  $u = d(\Omega) / \sum_j d(\Omega_j)$ . 其次,随机将该点与该局域中的  $m_1$  个节点连接 ( $m_1 \leq m_0$ ). 其中规定任意两个不同的节点之间至多只能有一条边,并且每一个节点都不能有边与自身相连,即不能出现环和重边.

优先连接过程:首先,在除标记局域之外的所有的局域中随机选择  $m_2$  个局域作为与标记局域之间建立连接的局域;其次,在随机选择的任意局域中选择一个节点(设为  $k_i$ )与标记局域中的最大度点(设为  $k_j$ )之间以概率  $q$  连接,其中概率  $q = \frac{k_i}{k_j}$ .

### 3.3 模型的程序化设计

为了描述清晰,采用流程图对模型的设计过程进行说明(如图 4 所示).具体来说,设置初始网络有  $m$  个孤立的局域,每个局域有  $m_0$  个节点,总的节点个数为  $N$ . 使用 MATLAB 来设计网络的生成并进行拓扑特性的验证.主函数中设置外部接口参数  $m, m_0, m_1, m_2, k_{\max}$ . 其中  $k_{\max}$  表示局域度的最大值,  $N$  表示的是整体网络节点个数. 首先让每个局域内部进行全连接,初始时每个局域都构成全局耦合的规则图.模型的生成过程始终保证网络的总的节点个数小于  $N$ . 总体来看,模型的生成过程为两部分.首先是局域之内的连接,首先调用任意连接函数模块通过固定的公式找到度最大的局域,并对区域进行标记.加入节点并与局域内部的节点进行  $m_1$  次连接.其次调用任意连接函数模块找到度最大的局域中度最大的节点,让它与在标记区域之外的所有局域中任意选择出的  $m_2$  个局域中的点进行连接.在固定的  $k_{\max}$  和  $N$  之内,经过循环生成网络.调用公式  $P(k) = \frac{n(k)}{N}$  和  $C_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$  计算并通过统计和仿真得到度分布和聚类系数与节点个数的仿真关系图.

### 3.4 模型的度分布

由于将网络分成了若干个局域,且每个局域生成后,局域之间的边主要利用度作为优先连接原则添加.因此,从理论上讲网络是具有无标度特性的,即度越大的节点个数越少.以下针对不同情况进行仿真验证.

在仿真过程中,首先将参数  $m, m_0, m_1, m_2$  设置为  $m=100, m_0=3, m_1=2, m_2=50$ . 为了验证网络规模大小对网络拓扑特性的影响,分别验证了网络节点总数为  $N=800, N=1000$  和  $N=1500$  时的度分布,仿真结果如图 5(a)所示.其次,验证参数  $m_0$  和  $m_1$ , 验证过程为在取定参数  $N=200, N=20, m_2=15$  的情况下,观察参数  $m_0$  和  $m_1$  的改变对度分布的影响,仿真结果如图 5(b)所示.再次,在  $N=400, m_0=3, m_1=2$  的情况下,观察参数  $m$  和  $m_2$  的改变对度分布的影响,仿真结果如图 5(c)所示.图 5(a)~图 5(c)的结果对比明显,网络规模和网络中参数的变化对度分布的影响较小,且表明由我们的模型生成的网络节点度服从幂率分布,这与实证研究结果相吻合.

### 3.5 模型的聚类系数分析

网络的聚类系数依赖于网络中节点的聚类系数,如果每个节点的聚类系数比较高,则网络的聚类系数也会比较高.在模型建立过程中,由于初始化的局域世界是以全局耦合规则图出发,所以其节点的聚类系数会保持比较高的趋势,从而使得网络的聚类系数不会骤减.

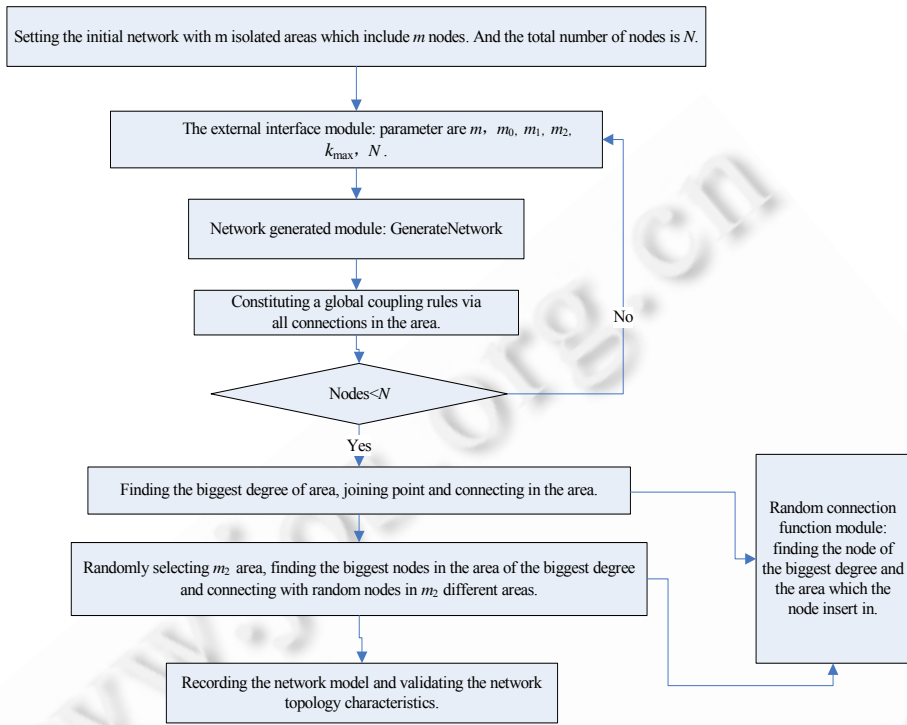


Fig.4 Model construction algorithm flowchart

图 4 模型构造算法流程图

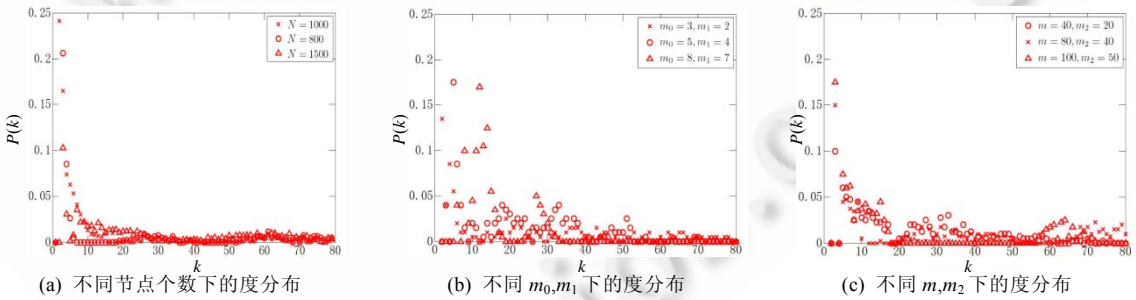


Fig.5 Degree distribution of the model

图 5 模型度分布仿真分析示意图

图 6(a)为将参数设定为  $m=80, m_0=3, m_1=2, m_2=40$  时网络的聚类系数  $C_a$  随节点数目的变化情况;图 6(b)为固定  $N=300$  时不同的聚类系数值  $C_a$  对应的节点数目.由图 6(a)可知,通过模型建立的网络聚类系数随着节点数目的变化先减小再增加,但大部分情况下网络具有较高的聚类系数,与实证研究结果相吻合.同时,图 6(b)显示出 246 个节点的聚类系数超过 0.5,占网络规模的 82%,这说明由我们的模型建立的网络局部具有较高的聚类系数.网络单个节点聚类系数比较高也会使整体网络的聚类系数增高.从这个角度分析,我们的模型在局部和整体都符合车辆自组网的特性.



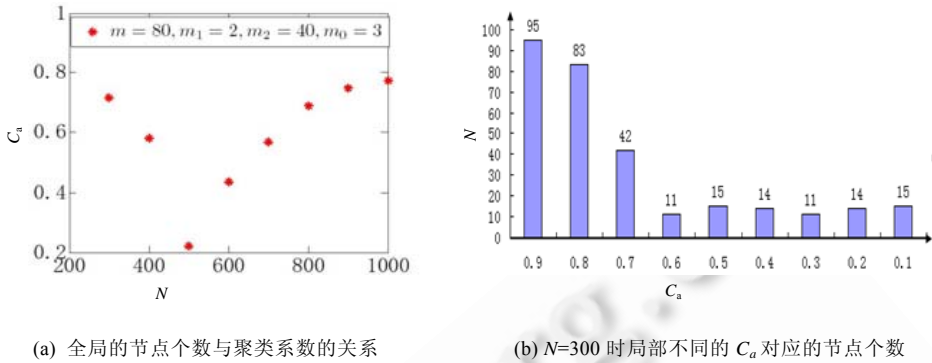


Fig.6 Clustering coefficients of the model

图 6 模型的聚类系数仿真结果

3.6 模型与实证情况的对比分析

在以上关于模型度分布和聚类系数分析讨论的基础之上,现在在同样的实际参数情况下将模型的仿真结果和实证结果进行对比分析,验证模型的有效性.在这里分别验证了真实车辆自组网与该模型在度分布和聚类系数上与节点数目变化的对应关系.

从图 7(a)为在节点个数  $N=1500$  的条件下,12 点时车辆自组网在  $R=250$  和  $R=500$  时的节点度分布与模型的仿真结果在同样条件下进行了对比.对比结果显示,其度分布虽然在数值上略有差别,但是总体的变化趋势是基本一样的.而模型外部接口参数随时可以根据情况进行调整,保证了模型可以高度模拟真实的车辆自组网的度分布.而图 7(b)是在 12 点时分别仿真了  $R=350$  和  $R=550$  两种情况下节点个数  $N$  与聚类系数  $C_a$  的关系,并与模型的仿真结果在同样的条件下进行了对比.结果显示,大部分情况下模型和真实的车辆自组网在聚类系数随节点个数  $N$  的变化情况上是相同的,并且都具有高聚类特性.当然,为了验证模型的普遍性,通过模型参数的设置也与不同时刻的不同的通信半径下拓扑特性进行了对比分析,结果显示我们的模型可以模拟车辆自组网的无标度和高聚类系数特性.

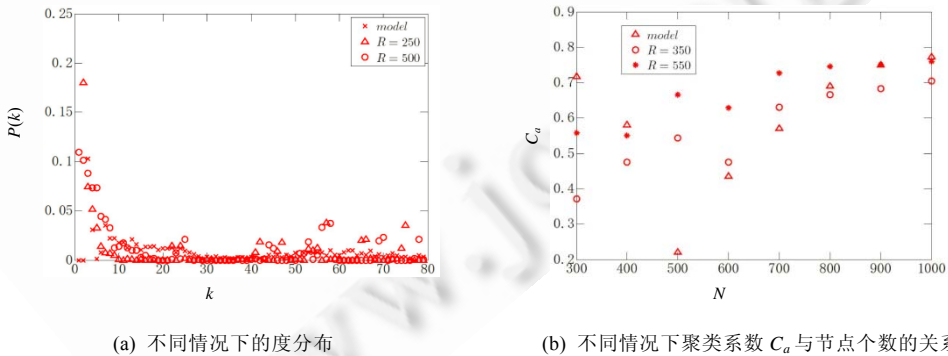


Fig.7 The comparison of model and case study

图 7 模型与实证在仿真结果上的对比图

模型的创新之处主要有以下几点:1) 在模型的建立过程中,为了保证模型的正确性,采用了由真实的数据分析得到车辆自组网的拓扑特征,根据拓扑特征建立网络模型,通过网络模型对比验证网络的拓扑特性.这就形成了一个循环互补的过程.保证了最后的模型是符合车辆自组网基本特征规律的.达到了由认识系统到服务系统的目的.2) 对模型拓扑特征的验证上突出重点,由复杂网络理论出发根据车辆自组网的实际特点,对模型的拓扑特征的验证是完全按照实际需要进行的,从第 2 节的分析中知道度分布和聚类系数既是复杂网络理论分

析网络问题的基本出发点,也是车辆自组网拓扑特性中基本的影响因素,而且通过对数据的多次验证分析发现在所有对车辆自组网拓扑特性有影响基本因素中它们是目前唯一可以找到普遍规律的因素.所以在模型的验证时对比分析这两个量来验证网络模型的有效性.3) 为模型设置了很多的外部接口参数,通过控制这些参数,可以达到调节新加节点在局域中以及局域之间连接方式和连接概率的作用.当然,也可以根据网络的实际需要增加或者减少度小节点或者孤立节点在网络演化中被连接的概率,这相比以往的模型是一种进步,也使得模型的真实性强.4) 在模型的建立中使用了复杂网络中随机重连和优先连接的部分理论,这样的假设是根据车辆自组网的度分布,聚类系数的实际特征,其中由于网络的局域和全局的聚类系数都很高,因此得到的网络更加倾向于形成集团,所以假设了不同局域.而模型的增长过程中很重要的一点是对局域的选择过程,根据度大优先的原则进行选择连接保证了网络可以形成高聚类性的集团,而参数的设置保证了集团化的程度.初始状态局域内部设置为规则图以便于以后通过参数的调整来达到观察网络拓扑特性变化并得到模型的最佳配置的目的.由于车辆自组网具有无标度特性,所以在局域间的连接上采用了保证整体网络无标度特性的优先连接机制.

#### 4 结论和未来工作

为了更深入地理解车辆自组网的网络行为,本文基于收集的真实数据对车辆自组网的拓扑特性进行实证研究,结合复杂网络理论以建立通用的网络模型.首先,基于真实的数据仿真验证了车辆自组网网络节点的度分布,网络的聚类系数和特征路径长度,得到节点度服从幂率分布且网络具有比较高的聚类系数这样的普遍规律.因此,基于车辆自组网拓扑特性的分析,结合复杂网络理论可知,车辆自组网具有无标度特性,并且网络的聚类系数比较高.基于分析得到的拓扑特性,结合复杂网络中的已有模型及其拓扑特性,本文提出了一种适用于车辆自组网的网络模型.理论分析和仿真实验都说明由该模型生成网络的节点度服从幂率分布且聚类系数较高,与实证分析的拓扑特性相吻合,即说明了模型的有效性.另外,模型在设计时增加了很多外部接口参数来控制不同的功能模块,这样就可以很灵活地修改参数和完善模块的功能,多次验证保证结果的准确性.

本文所做的分析主要基于交通道路上部分节点收集的数据,同时构造的网络模型主要体现网络的生成过程.因此,如何将此网络推广到大规模网络,同时在网络模型中体现网络的动态变化是下一步我们研究的主要内容之一.在车辆自组网拓扑特性的分析中,本文列举了 3 个基本的拓扑特性,下一步将分析这些拓扑特性的临界值以及其他拓扑特性对车辆自组网的影响,从而达到对网络演化过程的全面认识.同时,本文仅仅将复杂网络理论应用到车辆自组网中,以后的研究也将增加交通流和社会网络等理论知识的应用,以达到更加精确的构造模型的目的.另外,针对车辆自组网的动态网络模型,需要涉及车辆的加入模型,退出模型等.所以,基于智能交通领域的理论和已有理论模型,建立车辆自组网的动态网络模型是未来工作之一.

#### References:

- [1] Li F, Wang Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2007,2(2):12-22.
- [2] Willke TL, Tientrakool P, Maxemchuk NF. A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009,11(2):3-20.
- [3] Zhu YM, Li ML, Ni MX. Research on vehicular sensor networks. *ZTE Technology Journal*, 2009,15(5):28-32 (in Chinese with English abstract).
- [4] Arbabi MH, Weigle MC. Using vehicular networks to collect common traffic data. In: *Proc. of the 6th ACM Int'l Workshop on Vehicular Internet working (VANET 2009)*. New York: ACM, 2009,8(12):117-118.
- [5] Wang XF, Li X, Chen GR. *Complex Network Theory and its Application*. Beijing: Tsinghua University Press, 2006 (in Chinese).
- [6] Du CF. Research on computer network topology based on complex network model. *Computer Science*, 2009,36(4B):167-169 (in Chinese with English abstract).
- [7] Ho IWH, Leung KK, Polak JW, Mangharam R. Node connectivity in vehicular ad hoc networks with structured mobility. In: *Proc. of the 32nd IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN)*. Dublin: LCN, 2007. 635-642.

- [8] Fiore M, Härril J. The networking shape of vehicular mobility. In: Proc. of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2008. 261–272.
- [9] Huang JZ, Yu GW. Research on complex network of city public transportation. Computer Technology and Development, 2012, 22(6):234–238 (in Chinese with English abstract).
- [10] Tong C, Long X, Gao XP. Complexity statistical characteristics for ad hoc network based on random waypoint model. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008,34(10):1236–1242 (in Chinese with English abstract).
- [11] Yang J. Analysis of complex networks of Beijing public transportation network [MS. Thesis]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [12] Lan KC, Chou CM. Realistic mobility models for vehicular ad hoc network (VANET) simulations. In: Proc. of the 8th Int'l Conf. on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST). 2008. 362–366.
- [13] Gainaru A, Dobre C, Cristea V. A realistic mobility models on social networks for the simulation of VANETs. In: Proc. of the 69th Int'l Conf. on Vehicular Technology Conf. (VTC). Barcelona: VTC, 2009. 1–5.
- [14] Zheng Y, Zhang LL, Xie HW, Tan GP, Wang HB. Topology structure in vehicular ad-hoc network based-on urban scenarios. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2012,4(6):137–144.
- [15] Zhang LL, Zheng Y, Chen H. Position-Based and connectivity aware routing algorithm in vehicular ad hoc networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2012,23(Suppl.1):141–148 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12016.htm>
- [16] Chen SH. Weighted networks with the high clustering. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2013,29(1): 20–24 (in Chinese with English abstract).
- [17] Gao ZH, Li MC, Chen ZJ, Li FX, Sun D. Research on small world characteristic of urban road network. Geography and Geo-Information Science, 2007,23(4):97–101 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [3] 朱燕民,李明禄,倪明选. 车辆传感器网络研究. 中兴通讯技术, 2009,15(5):28–32.
- [5] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 北京:清华大学出版社, 2006.9–46.
- [6] 杜彩凤. 基于复杂网络模型的计算机网络拓扑结构研究. 计算机科学, 2009,36(4B):167–169.
- [9] 黄加增,余国伟. 城市公交复杂网络研究. 计算机技术与发展, 2012,22(6):234–238.
- [10] 童超,龙翔,高小鹏. 基于随机路径点模型的 Ad hoc 网络复杂统计特性. 北京航空航天大学学报, 2008,34(10):1236–1242.
- [11] 杨进. 北京市公交网络的复杂网络特性分析[硕士学位论文]. 北京:北京交通大学, 2010.
- [15] 张丽丽,郑莹,陈浩. 基于位置及连通性的车辆自组网可靠路由算法. 软件学报, 2012,23(增刊1):141–148. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12016.htm>
- [16] 陈盛辉. 具有高聚类系数的加权网络演化模型. 福建师范大学学报(自然科学版), 2013,29(1):20–24.
- [17] 高中华,李满春,陈振杰,李飞雪,孙电. 城市道路网络的小世界特征研究. 地理与地理信息科学, 2007,23(4):97–101.



张丽丽(1977—),女,山东淄博人,博士,副教授,主要研究领域为无线移动自组网与复杂网络,复杂系统建模.

E-mail: lilzhang@hhu.edu.cn



李臣明(1969—),男,副教授,主要研究领域为复杂系统建模与仿真.

E-mail: lcm@hhu.edu.cn



陈浩(1988—),男,硕士,主要研究领域为车辆自组网,复杂网络.

E-mail: tjcdch@163.com



谭国平(1975—),男,副教授,主要研究领域为无线通信系统与网络.

E-mail: gptan@hhu.edu.cn