

基于复杂网络理论的北京公交网络拓扑性质分析*

郑啸¹⁾²⁾ 陈建平^{1)2)†} 邵佳丽¹⁾ 别立东¹⁾²⁾

1) (中国地质大学, 地球科学与资源学院, 北京 100083)

2) (中国地质大学, 国土资源与高新技术研究中心, 北京 100083)

(2012年2月7日收到; 2012年4月5日收到修改稿)

为分析公交复杂网络的拓扑性质, 本文以北京市为例, 选取截止到2010年7月的北京全市(14区、2县)的1165条公交线路和9618个公交站点为样本数据, 运用复杂网络理论构建起基于邻接站点的有向加权复杂网络模型. 该方法以公交站点作为节点, 相邻站点之间的公交线路作为边, 使得网络既具有复杂网络的拓扑性质同时节点(站点)又具有明确的地理坐标. 对网络中节点度、点强度、强度分布、平均最短路径、聚类系数等性质的分析显示, 公交复杂网络的度和点强度分布极为不均, 网络中前5%和前10%节点的累计强度分布分别达到22.43%和43.02%; 点强度与排列序数、累积强度分布都服从幂律分布, 具有无标度和小世界的网络特点, 少数关键节点在网络中发挥着重要的连接作用. 为分析复杂网络中的关键节点, 本文通过承载压力分析和基于“掠夺”的区域中心节点提取两种方法, 得到了公交复杂网络中两类不同表现的关键节点. 这些规律也为优化城市公交网络及交通规划发展提供了新的参考建议.

关键词: 复杂网络, 拓扑性质, 城市公交网络

PACS: 05.90.+m, 01.75.+m

1 引言

20世纪90年代, 随着复杂网络的小世界效应^[1]及无标度性^[2]的提出, 掀起了一股研究复杂网络的热潮. 其主要思想是将真实系统的各个要素及要素间的关系转化为网络的节点和边, 以网络的形式描述真实系统中各部分之间的关系, 强调系统结构的拓扑性质, 揭示现实系统的本质特征, 复杂网络为复杂性科学的研究提供了一种理论方法. 复杂网络引起了图论、计算机网络、统计物理学、生态学、社会学、经济学等多领域研究者的兴趣^[3-6], 将复杂网络应用于网络病毒传播^[7]、虚拟社区^[8]、温度变化^[9]、灾害蔓延^[10]、生物系统^[11]等方面的研究工作, 取得了大量的成果. 虽然这些在自然和社会领域中的大型网络功能结构不尽相同, 但却表现出一些共同特征, 如小世界效应、无标度特性、等级特性等.

同时复杂网络理论也吸引了广大交通学者. 交通系统作为一个复杂巨系统, 复杂网络为其提供了重要的研究工具, 也为深入研究交通网络的动力学过程及各种特性, 网络拓扑结构及其相互作用等问题, 奠定了理论基础. 大量学者应用复杂网络统计物理学开展了相关研究, 对城市交通网络的研究主要集中在城市道路网络和公共交通网络两个方面. Sienkiewicz等分析了波兰22个城市的公共交通网络的拓扑结构, 发现所有的网络都展现了小世界特性, 网络的度分布服从幂率分布或指数分布^[12]. Kalapala在研究美国、英国、丹麦三国的道路网络拓扑时, 建立了度分布指数与分形维数间的关系模型^[13]. 徐新平等建立了中国三城市公交运输网络的加权复杂网络, 研究了网络的结构特性和小世界效应^[14]. 这些研究都有利于探寻真实复杂系统中尚未被认识的宏观性质. 网络的无标度性和流量集中性问题, 是复杂网络研究的基础科学问题之一. 目前, 对无标度网络研究的一个重点在于优先

* 北京市教育委员会科学研究与研究教育项目(批准号: JD104910556)和中国地质调查局基础调查类研究项目(批准号: 200415100002)资助的课题.

† E-mail: 3s@cugb.edu.com

连接和网络中关键节点的形成. 关键节点在不同的网络中也被称为枢纽节点、中心节点、Hub 节点等, 在大型网络如 Internet 网络、蛋白质网络、合作关系网络、交通网络中, 关键节点对于维持网络功能、影响网络效率方面至关重要. 如何寻找网络中的关键节点仍是研究的一个难点. 文献 [15] 研究了 Internet 网络中 Hub 节点的组织特征, 但工作仅限于统计节点间的边数. 而在公交网络中, 网络又具有自己的特性, 公交网络本身是动态实体, 负荷在网络上传播表现出动态性和随机性, 同时在某一时段又表现出明显的方向性. 出行者本身具有智能性, 能感知周围环境并做出反应, 因而网络又具有自组织、自适应的能力. 网络的传输效率收到多种因素影响. 高自友等研究了公交网络的无标度性, 给出了基于平衡配流的思想寻找公交网络 Hub 节点的初步方案 [16], 也取得了一定成果. 本文应用承载压力分析, 引入“掠夺算法”探讨了网络中两类不同影响因素的关键节点的提取方法, 进一步引入新的统计参数来度量这些性质.

公交系统在城市交通中无疑起到了非常重要的作用, 研究公交网络对城市交通具有重要的现实意义. 以北京市为例, 北京市面积 16411 km^2 , 其中市区面积 1368 km^2 . 截止到 2010 年, 北京市常住人口达到 2200 万人, 人口密度 1341 人/km^2 , 北京公交网络的站点数量, 线路设置, 日客流量, 均具有典型代表性. 本文以北京市公交线路和站点为例构建了复杂网络模型, 统计了节点度, 点强度, 强度分布, 平均最短路径, 网络直径, 聚类系数等等多个指标. 并结合公交复杂网络自身特点, 讨论了网络中关键节点的提取, 使用承载压力分析, 提出考虑了城市路网复杂性影响下的潜在易拥堵节点; 通过“掠夺”算法, 提取区域子网络的中心节点. 从关键节点入手, 从提高网络鲁棒性、优化网络能力的角度提出公交网络的优化方案.

2 公交复杂网络的构建

2.1 北京市公交线路基本数据

公交线路有其自身特点, 行驶线路受限于实际城市道路交通网, 停靠站点对于同一条线路的上下行也可能出现差异. 因此本文在数据建库整理时, 对每条公交线路按照实际情况分为上行和下行 (环线按照内环和外环) 分别处理. 对于公交车不同的支线、快车视为不同的线路. 将相同站名视为同一

站点, 忽略不同线路停靠位置的差别. 本文使用的数据为 2010 年 7 月北京全市 (14 区、2 县) 公交线路 1165 条和公交站点 9618 个.

2.2 基于邻接站点的网络模型构建方式

根据以上公交站点和线路数据, 本文建立起基于邻接站点的公交复杂网络模型. 拓扑中做如下基本假设:

- 1) 将公交站点视为复杂网络中的节点, 相邻站点之间的公交线路作为边, 边上的权值为两站点间通过的公交线路条数, 整个网络抽象为有向加权网络;
- 2) 若两个邻接站点 A, B 间, 有一趟线路上行依次连续经过 A, B, 则视 A 到 B 有一条边连接, 若该线路下行也依次连续经过 B, A 则同样视 B 到 A 有一条边连接;
- 3) 不考虑发车频率、车型、载客数量、票价、邻站间的距离, 视每条公交线路具有相同的运输能力, 在相邻站点间产生相同的权重.

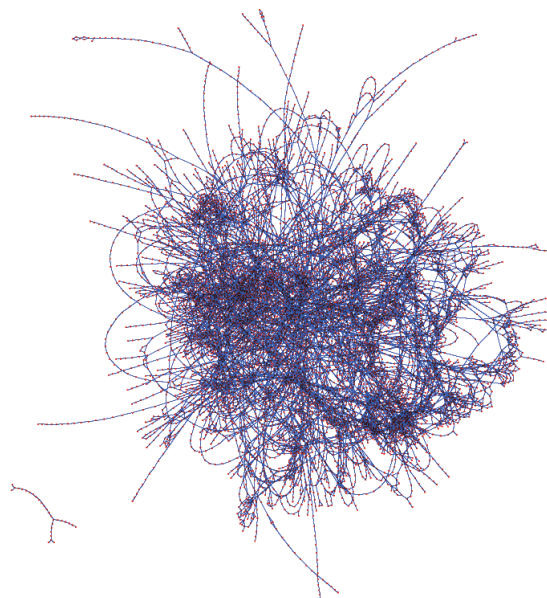


图 1 基于邻接站点的北京公交复杂网络模型示意图

以公交站点为节点, 建立的基于邻接站点的网络模型具有如下特点: 1) 网络节点具有明确的空间位置和地理坐标; 2) 受城市道路限制, 邻接站点式网络接近于自然形成的路网结构; 3) 网络中单一节点所能连接的边的数目受到物理空间因素的限制, 从而会影响到网络的度分布; 4) 站点 (节点) 间的长程连接需要考虑空间距离、成本和线路利用效率,

这一特性直接影响着公交网络的小世界行为.

最终构建的邻接站点式复杂网络模型有节点 9618 个, 边 57008 条, 整个网络模型示意图如图 1 所示, 图中点为网络中的节点, 连线代表网络中的边.

3 公交复杂网络的拓扑性质与相关特征研究

本文所建立的公交复杂网络的边具有方向性, 节点度分为入度和出度, 入度是指由其他节点连向该节点的边数, 出度是指该节点连向其他节点的边数. 网络中除少数因交通管制等原因引起的节点出入度不一, 绝大多数节点的连入与连出是相等的, 因此以节点的出度作为本文的研究对象, 文中所统计和列出的度均指出度.

3.1 度、强度与强度分布

对于无权复杂网络, 节点度表示一个节点与其他节点的连接边数. 邻接站点式网络构成的是加权复杂网络, 忽略边上的权值, 统计节点的度; 作为加权网络模型考虑时, 将权重参与到计算中, 对应得到的是节点强度. 本文分别对节点度、强度与强度分布做了研究.

3.1.1 网络的度

对于邻接站点式网络上任意节点 i , 其度值 k_i 反映了站点 i 直接相接的公交站点数量, 即忽略节点间连接上的权值, 只关注连接本身. k_i 值越大说明节点具有较高的连通度. 在实际地理空间上具有较好的交通条件, 也可能是实际公交网络中的枢纽或换乘站. 本文公交复杂网络中节点度统计如表 1 所示, 其中有 5 个节点出度为 0, 主要是由于终点与再次发车时起点变化导致, 如西直门北站.

表 1 北京公交复杂网络节点度数排序统计表

节点度	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
节点数	5	804	5095	1227	1036	547	360	209	116	70	54
所占比例/%	< 0.1	8.4	53.0	12.8	10.8	5.7	3.7	2.2	1.2	0.7	0.6
节点度	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
节点数	29	24	14	11	6	2	4	2	1	1	1
所占比例/%	0.3	0.2	0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

表 2 北京公交网络中部分高度值站点及其连接度

序号	站名	度	序号	站名	度	序号	站名	度	序号	站名	度
1	北京西站	21	14	通州北苑路口东	15	27	草桥	14	40	白家庄	13
2	顺义东大桥环岛	20	15	东直门	15	28	马甸桥西	14	41	四惠站	13
3	六里桥东	19	16	北太平桥西	15	29	孙河	13	42	大北窑西	13
4	三元桥	18	17	德胜门	15	30	火神营	13	43	城铁龙泽站	12
5	三元桥(地铁)	18	18	前门	14	31	王各庄	13	44	双井桥北	12
6	密云鼓楼	17	19	昌平西关	14	32	密云汽车站	13	45	望京花园西区	12
7	南法信	17	20	陈各庄	14	33	木林	13	46	闫村	12
8	官庄道口	17	21	高米店	14	34	首都机场	13	47	密云县医院	12
9	六里桥北里	17	22	李桥	14	35	良乡西门	13	48	城铁回龙观站	12
10	平各庄	16	23	东风小学	14	36	静安庄	13	49	胡庄	12
11	崇文门西	16	24	良乡北关	14	37	良乡苏庄	13	50	东庄	12
12	昌平南大街	15	25	昌平南口	14	38	广安门内	13			
13	昌平东关	15	26	北京站东	14	39	广安门北	13			

分析得出北京市公交复杂网络中节点的度最高为 21, 均值为 2.96, 说明平均 1 个站点与 3 个站直接相连. 度值在 5 以下的节点占到总数 84.9%, 说

明邻接节点分布极为不均, 大部分节点度都比较小, 极少数节点发挥着重要的连接作用, 度值在 10 以上的站点仅占总数的 1%, 将度值最高的 50 个站点

列出(表 2). 从该分析结果可以看到表 2 中包括了北京西站、六里桥、北京站、首都机场、四惠等, 均是铁路、公路、航空重要客运站点, 其他主要是地铁换乘站, 市中心区和周边郊区交通相对发达的点. 由于节点度在公交复杂网络中关注于连接本身, 这些站点更多的表现出道路通达性好, 路网发达的地理优势, 因而可与更多周边站点产生联系.

3.1.2 节点强度

考虑加权网络边带有的权重, 将点强度 s_i 定义为 [17]

$$s_i = \sum_{j \in N_i} w_{ij}. \quad (1)$$

将点强度分布 $P(s)$ 定义为

$$p(s) = \frac{s_i}{N}, \quad (2)$$

其中, N 表示所有节点强度的总和. 将节点按强度大小在图中以不同面积的点表示, 得到节点强度在复杂网络模型中的示意图(图 2).

节点强度的统计结果如表 3 所示. 它在公交复杂网络中更多的描述了节点之间的关联程度, 既考

虑了节点间的连接(直接相连站点数量), 又考虑了边的权重(相邻站点间线路通行密度). 点强度、强度分布越大则表示实际公交线路通行密度越高, 承载和运输能力越强, 对应实际公交网络中一些人员流动密集、换乘集中的场所.

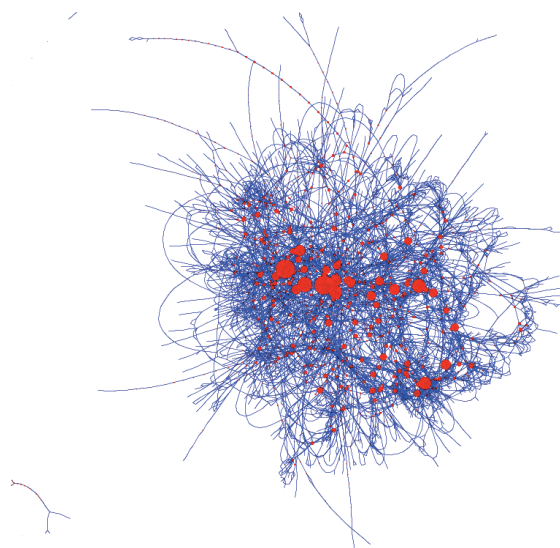


图 2 节点强度在复杂网络模型中的示意图

表 3 北京公交复杂网络节点强度数排序统计表

节点强度	0	1	2	3	4	...	30	31	32	33	34
节点数	5	692	3875	196	1401	...	35	7	37	21	24
所占比例/%	0.05	7.19	40.29	2.04	14.57	...	0.36	0.07	0.38	0.22	0.25
节点强度	35	36	37	38	39	...	73	75	84	85	90
节点数	14	23	8	23	3	...	2	2	1	1	1
所占比例/%	0.15	0.24	0.08	0.24	0.03	...	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01

表 4 北京公交网络中部分高强度值站点及其强度

序号	站名	强度	序号	站名	强度	序号	站名	强度	序号	站名	强度
1	六里桥北里	90	14	刘家窑桥西	66	27	木樨园桥东	61	40	动物园	57
2	顺义东大桥环岛	85	15	大兴长途站	65	28	西坝河	61	41	于家园	56
3	畅观楼	84	16	北大地	64	29	大山桥东	61	42	万寿寺	56
4	左家庄	75	17	夏家胡同	64	30	昌平南大街	60	43	广宁村	56
5	六里桥南	75	18	北太平桥西	64	31	玉泉营桥西	60	44	草桥	56
6	三元桥	73	19	京顺路丽都饭店	63	32	清河	60	45	水闸	56
7	金顶南路	73	20	六里桥东	63	33	木樨园桥西	59	46	延庆南菜园	56
8	良乡西门	72	21	三元桥(地铁)	63	34	孙河	59	47	怀柔汽车站	55
9	静安庄	70	22	城子	62	35	通州北苑路口东	59	48	火神营	54
10	北京西站	69	23	东风小学	62	36	西局	58	49	马甸桥东	54
11	昌平东关	68	24	老公安局	62	37	洋桥西	58	50	麻峪北口	54
12	公主坟南	68	25	城子大街南口	62	38	侯庄子	58			
13	亮马桥	68	26	安贞桥西	62	39	平谷区医院	57			

分析得到北京市公交网络中节点强度最高达到了 90, 均值为 6.77, 说明平均 1 个站点约有 7 条线路经过. 考虑到每个站点平均与 3 个站点相连, 可以得出在两个相邻站点间平均强度为 2, 即有两条线路可供选择. 强度在 10 个以下的节点占到总数 82.7%, 强度最高的 1% 的节点强度均在 45 以上, 分布极其不均. 同样将分析结果中强度最高的 50 个站点列出 (表 4).

3.1.3 强度分布

网络节点强度与累积强度分布关系如图 3 所示. 在邻接站点式公交复杂网络的 9618 个节点中, 前 10% 节点的点强度值较大, 累积强度分布达到了 43.02%; 而前 5% 的节点的累积强度分布就已达到 22.43%. 由此可以看出, 这些节点在整个公交复杂网络中对维持网络的连通性以及满足运输能力方面发挥了的作用. 点强度在 5 以下的节点有个 6168, 占总节点数的 64.13%, 而累积强度分布仅为 22.47%, 说明大部分的节点在网络中只是作为一般站点, 在这类节点出现换乘的概率较小, 相对客流也较少, 但这些站点也具有重要意义, 它们大大提高了公交网络的覆盖范围和覆盖密度, 增加出行的便利性.

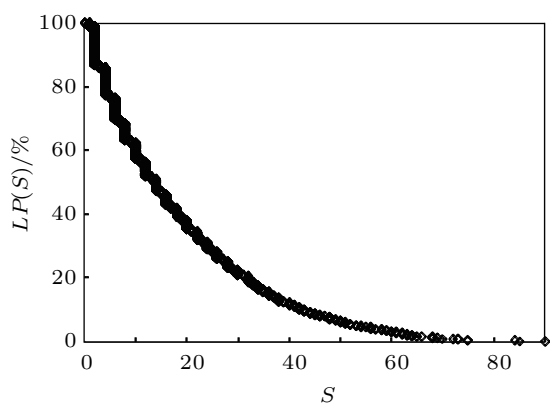


图 3 公交复杂网络强度和累积强度分布关系

计算点强度与点强度降序排列序数 R 的对数, 在双对数坐标中利用线性回归得到方程 $y = -0.8985x + 8.7297$, 回归系数 $R^2 = 0.9$, 说明邻接站点式公交复杂网络整体上服从幂律分布, 如图 4 所示.

对点强度与累积强度分布作双对数, 如图 5 所示. 利用线性回归得到方程 $y = -0.4489x + 0.2878$, 回归系数 $R^2 = 0.719$, 因此点强度与强度分布也是服从幂律分布的.

通过以上分析, 基于邻接站点的北京公交复杂网络的点强度与排列序数、累积强度分布都服从幂律分布, 具有无标度网络特点. 说明承担主要流通、分流、转换压力的节点为网络中极少部分节点, 体现了公交网络的复杂性和内在动力学本质特征.

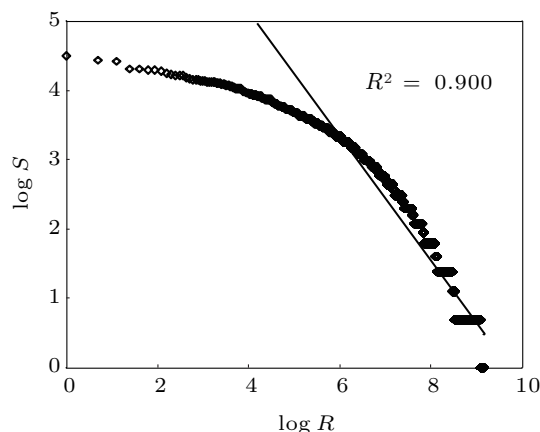


图 4 点强度与排序数双对数散点图

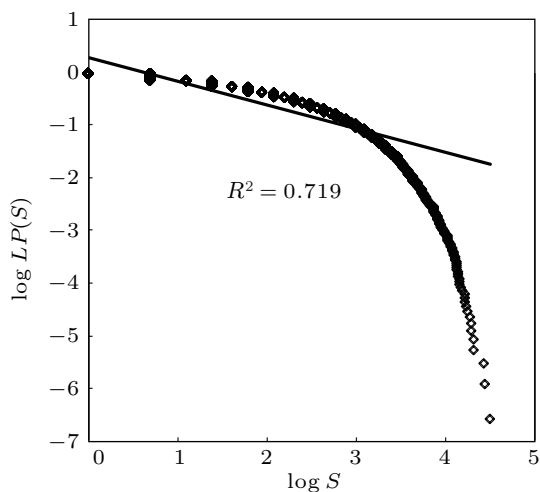


图 5 点强度与累积强度分布双对数散点图

3.2 承载压力分析

前文研究中得出的表 2 与表 4 中节点的排序发生了较大变化. 这主要是由于节点度与节点强度分别关注于网络复杂性的不同方面. 节点度关注于路网通达性, 代表实际道路交通便利程度; 节点强度在公交复杂网络中则更关注于客流量, 即运输负荷. 对于客流量大, 运输负担重的站点会表现出较高的节点强度. 对比可以发现大部分三环内的因交通便利可达性好而出现在表 2 中的节点没有在

表 4 中出现. 表 2 中其他一些节点如北京站、首都机场、四惠、东直门等, 在表 4 中也均未出现, 主要原因是这些地点更多的由地铁、专线等方式来满足运力需求. 这也印证了前文对节点度与节点强度所关注的网络复杂性不同方面的分析.

由于公交复杂网络具有明确的研究对象, 而其连接要依托于城市路网, 在这种情况下, 空间是有限的, 路网不可能随意连接. 建立节点间的长程连接往往要付出很高的成本, 因此将路网承载能力考虑其中提出一类关键节点的提取.

通过前文分析, 表 4 相对于表 2 中新出现的一些节点应尤其予以关注, 这类节点所代表的站表现出高运力需求, 但由于地理条件(城市路网)等原因, 站点通达性可能并不太好, 太密集的线路压力容易产生拥堵; 或路网呈直线, 不易分散压力, 给路网本身造成了较大压力. 考虑路网复杂性对公交复杂网络造成的影响, 可以用节点强度与节点度的比值来表现公交复杂网络中路网对线路的承载压力.

承载压力 CC 可定义为

$$CC_i = k_i/s_i. \quad (3)$$

公交复杂网络是以城市路网为载体, 承载压力分析体现了公交复杂网络与城市路网限制之间的复杂关联性. 将承载压力最高的 50 个节点列出, 如表 5 所示. 由于网络节点为公交站点, 具有明确的地理位置和坐标, 通过将站点还原到实际地理空间中(图 6), 可以发现: 从地理位置看, 这些节点多位于五环外, 表现了北京周边及区县与市区间紧密联系; 从需求分析看, 其中包含了众多的五环外居住的市民每日往返于住所与工作地的出行需求. 从承载的路网看, 这类公交线路主要依托于连接在市区与周边区县的主干道、城市快速路等. 这类运力需求总量大, 变化快, 峰值高, 是容易造成拥堵产生的节点. 节点的承载压力从一定程度上反映了出行需求、路网建设和城市资源分布(居住、就业)等综合因素为公交复杂网络带来的复杂性的表现和内在动力学特征.

表 5 北京公交网络中部分承载压力较高的站点

序号	站名	承载压力	序号	站名	承载压力
1	石景山火车站	24.5	26	怀柔招商局	12.5
2	地铁苹果园站西	20	27	城子	12.4
3	梅园	19	28	麻峪	12.25
4	望和桥东	18.5	29	野溪	12
5	龙泉雾	18	30	龙泉雾北口	12
6	琉璃渠	18	31	嬉水湾	12
7	顺义公路分局	17	32	檀州家园	12
8	陇驾庄东口	17	33	雁翅	12
9	二六八	17	34	河南台	12
10	和义农场	16	35	平房西口	12
11	城子大街南口	15.5	36	安家庄	12
12	保健路北口	15.3	37	卫校路口	12
13	石古岩	14	38	京西十八潭	12
14	色树坟	14	39	龙泉花园	11.7
15	落坡岭	14	40	动物园	8.1
16	密云环保局	14	41	团河路西口	11.3
17	大坎	14	42	水闸	11.2
18	花园小区南门	14	43	广宁村	9.3
19	密云工会	14	44	安华桥西	11
20	色树坟派出所	14	45	延庆八中	11
21	王平村	14	46	南韩继	11
22	宝城客运	14	47	周口村	11
23	王平村电厂	14	48	密虹公园	11
24	圆明园东门	13	49	龙宝峪	11
25	通州西门路口东	10.4	50	房山北街	11

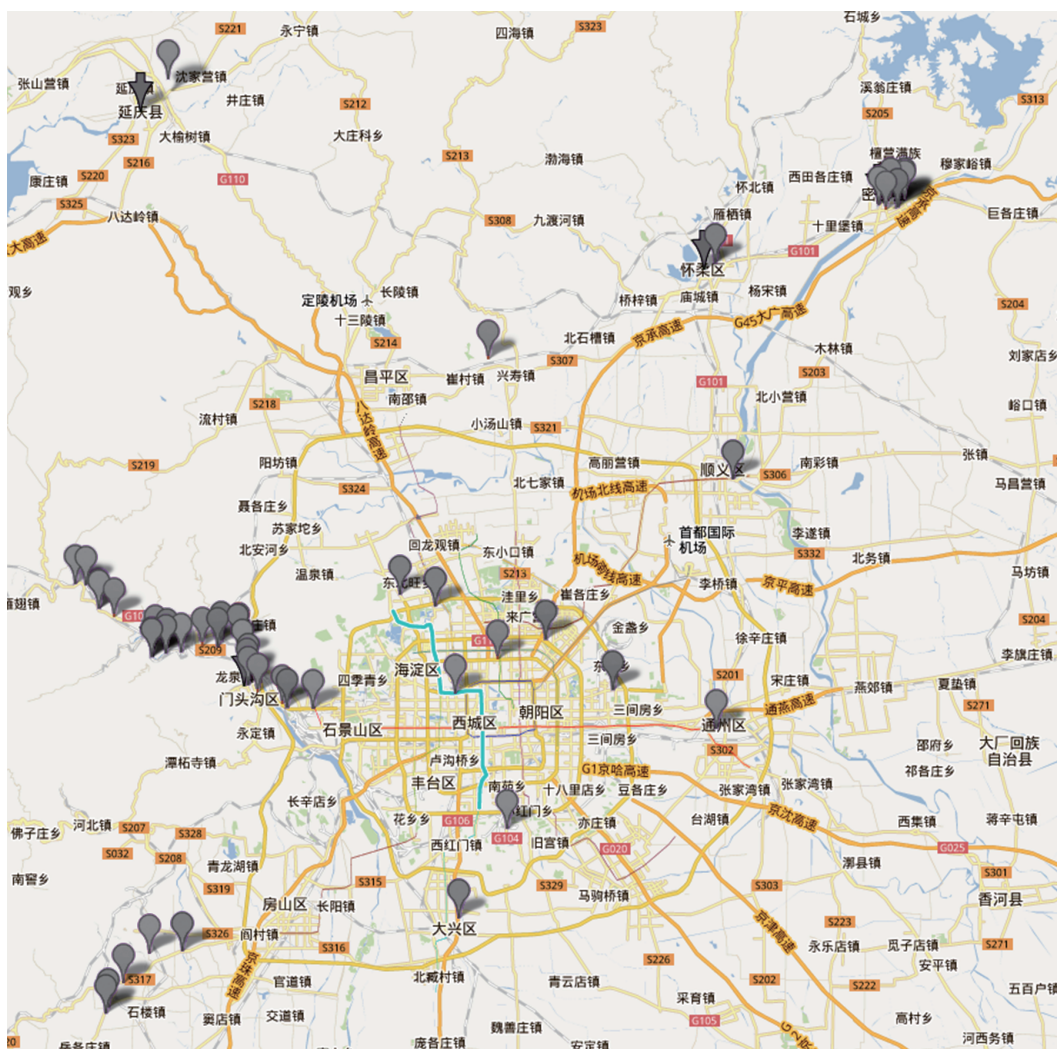


图6 北京公交网络部分承载压力较高的站点分布图

3.3 区域中心节点

在公交复杂网络中,一个节点的服务范围是有限的,影响是有限的.同时交通会受到道路分级、行政、商业圈、城市规划的多方面影响,使交通表现出地域性.在公交复杂网络中表现为网络中可能存在多个小的子网络,客流量在每个子网络上汇集,汇集到子网络的某个或某几个节点上,再由该节点上的连通实现子网络间长程客流的传输.这类节点成为其 n 邻域内的枢纽,作为关键节点并承载了绝大多数运力.相关研究也表明网络关键节点倾向于连接具有较少连接的节点而不是其他关键节点,具有相互排斥的特征,关键节点通过优先连接那些连接较少的节点来增长,以获得网络更强的鲁棒性^[18].据此,本文使用一种基于“掠夺”的区域中心节点算法以寻找这类关键节点:

- 1) 首先根据网络中节点的度为相应节点赋值;
- 2) 节点从比它度值低的邻居中“掠夺”度;
- 3) “虚弱”节点的度被其各邻居节点按度值分配掠夺.

按照此算法重新分配度后各节点度值体现出巨大的差异性,最高值达到了 2507.2,而排序二、三位的度值也达到 831.1 和 769.3,整体分布统计如表 6.

通过将前 50 个站点还原在地图上,其中五环内的站点如图 7 所示,图中星号代表提取的度值高的节点.可以看到 50 个站点中 24 个分布于四环以内,并且呈现出沿环线道路分布趋势,二环上有 4 个站点,三环上 8 个站点,四环上 4 个,可见环线路网对于北京公交网络有重要的影响.此外更多节点集中在城市的东部和北部,并沿国道延伸,主要的站点集中分布于海淀和朝阳两区,这与北京主要的

高校企业密集区和人口居住区分布一致. 另外有 9 个节点分布在地铁站范围 500 m 内, 地铁对城市公交网络可达性具有明显的改善作用. 体现了城市不

同区域功能划分、道路分级、人口密度对公交复杂网络的交叉影响.

表 6 “掠夺”法分配后节点度值分布统计表

节点度	$K = 0$	$0 < k \leq 10$	$10 < k \leq 50$	$50 < k \leq 100$	$k > 100$
节点数	6898	1864	633	121	102
所占比例/%	71.72	19.38	6.58	1.26	1.06
度分布/%	0	14.36	25.78	14.71	45.16

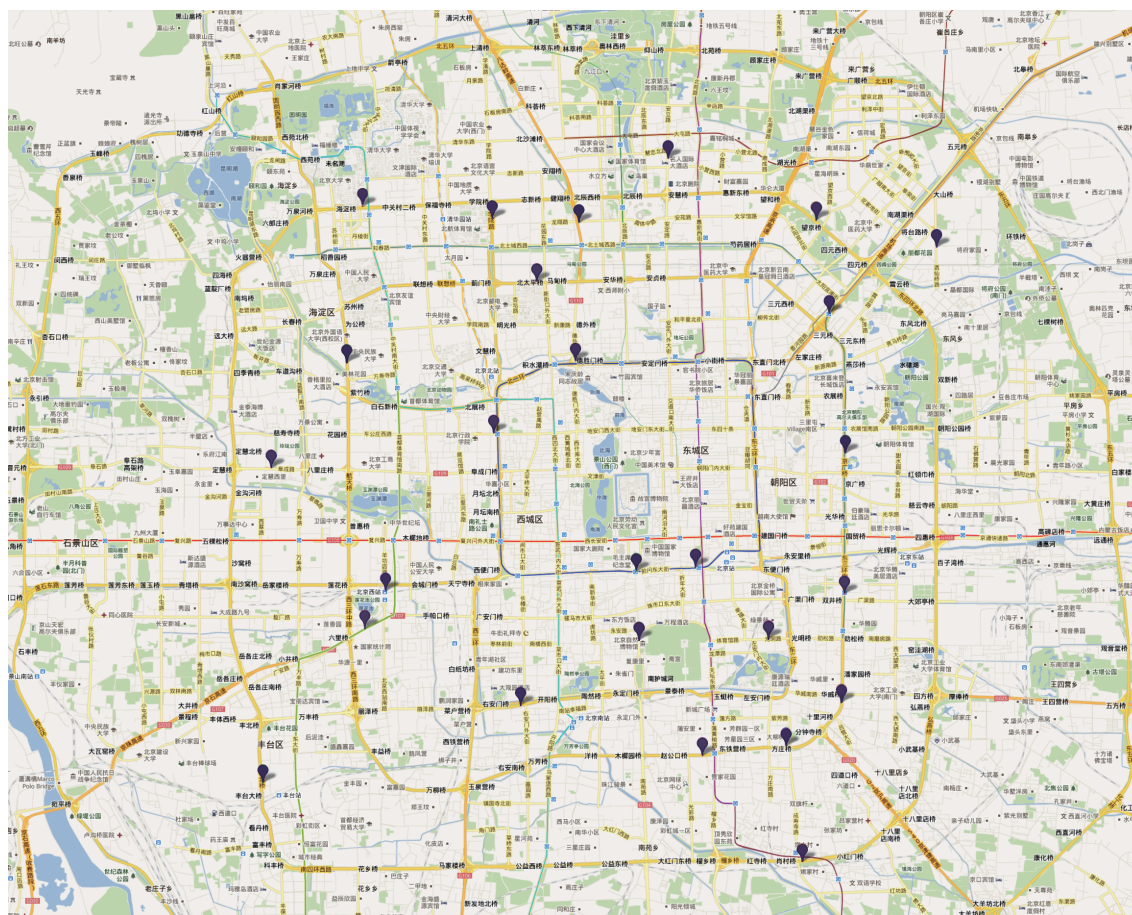


图 7 北京市公交复杂网络五环内区域中心节点分布图

3.4 平均最短路径长度

最短路径表示从某节点出发到另一节点的过程中经历边数最少的一条路径, 网络的平均最短路径为网络中所有节点两两间最短路径的平均值. 在基于邻接站点的网络模型中, 反映出公交网络中任意两个站点之间平均有多少个站点, 是评价公交网络模型便利性的一个重要的指标. 根据计算, 网络的平均最短路径为 15.425, 即市民出行平均需要乘坐 15 站即可到达目的地. 网络表现出小世界的网

络特征.

另一个参数网络直径 D 表示复杂网络中所有最短路径中的最大值. 对基于邻接站点的公交复杂网络, 直径 D 反应了乘客一次出行可能乘坐的最多站数, 是网络中的一种极限情况, 具有一定参考意义. 经计算网络中最长距离 $D = 76$. 由于本次研究数据范围包含北京周边在内的 14 区 2 县, 远途站点间距离可能超过百公里, 网络直径 $D = 76$ 还是可以接受的. 当然, 对于这种极端情况, 在实际情况下基本不会发生.

3.5 聚类系数

聚类系数分析可以识别出网络中的密集和稀疏区域,反映出邻近节点之间的集团性质,从而发现全局的分布模式和数据间的相互关系.对网络中一个节点 i 与其他 k_i 个节点连通,称这 k_i 个节点为节点 i 的邻居.这 k_i 个节点间最多可能有 $k_i(k_i - 1)/2$ 条连边.而这 k_i 个节点之间实际存在的边数 $E_1(i)$ 和理论上最多可能存在的边数 $k_i(k_i - 1)/2$ 之比定义为节点 i 的聚类系数

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)}. \quad (4)$$

整个网络 G 的聚类系数 C 定义为所有节点 i 的聚类系数的平均值

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i \in G} C_i. \quad (5)$$

节点聚类系数的高低,也从一定意义上反映了该节点在网络中的主导地位.聚类系数是针对无向图而言的,因为它研究是节点邻居之间的连接紧密程度,因此不必考虑边的方向.对于有向图,将其当成无向图来处理.网络聚类系数大,说明节点与附近各个节点连接紧密度越高,即实际站点的公交线路越密集.在一些客流量大的地区,站点的聚类系数越大,越便于市民乘车.计算得到北京公交复杂网络的聚类系数为 0.12,相对较低,说明网络较为稀疏,还有较大的发展空间.

3.6 网络的优化

公交网络的稳定性是需要解决的关键问题之一,网络的局部故障会增加网络其他部分的负担,尤其是关键节点和高负荷节点,它们的故障极有可能导致整个网络的崩溃.网络结构对交通拥堵及其传播具有较大的影响^[19],公交网络整体的稳定性由于其无标度性表现出的异质性而存在鲁棒性和脆弱性.一方面表现为对网络节点随机拥堵的鲁棒性,另一方面关键节点一旦拥堵如不及时解决有可能造成整个网络的崩溃,因而网络具有“既稳定又脆弱”的特性.关键节点对于整个网络的连通性具有至关重要的作用,体现了公交网络的复杂性和内在动力学特征.相关文献也证实,提高关键节点的能力,是提高整个网络能力的重要入手点^[20,21].

对于承载压力高的节点,简单的增开线路,增加发车频率往往不能有效提高运载能力,甚至导致交通拥堵.同时站点间线路密度过大也会导致公交

车排队等候进出站的状况.这些都会降低线路运行效率.从根本上讲更需要加强这些地区路网建设.从复杂网络的角度考虑,相关文献指出拆分区域中心站点,使原来由一个节点承担的工作由几个互相连接的节点共同完成,以这种简单的操作方式对网络的结构进行一个小的扰动,使得网络的同步能力得到显著的增强^[22].因此分散原有单个站点,间隔百米左右设立新站点,将停靠的公交线路加以分流,维护进出站秩序,减少公交车进站排队等候,增强网络运输能力.

对于区域中心节点,文献[18]也提出关键节点通过优先连接那些连接较少的节点来增长,以获得网络更强的鲁棒性.在早晚高峰期开辟的公交专用道,实际上增强了路网能力,建议采用“大站快车”、“专线”的方式,建立城市周边居民区到市内换乘站点的直达临时线路,即依靠在网络上建立临时的节点间长程连接来优化网络的小世界性,提高效率,及时消化客流,减少在网络上的运输中转次数.

4 讨论和结论

本文以北京为例建立了邻接站点式公交复杂网络模型,运用复杂网络原理进行分析,得出以下结论:

1. 研究表明公交复杂网络节点度及强度分布极为不均,大部分节点度和强度都比较小,极少数节点发挥着重要的连接作用.强度与排列名次、累积强度分布的关系均服从幂律分布,网络呈现出无标度网络特性,反映了公交网络的复杂性和内在动力学本质特征.

- 北京公交复杂网络中强度排序前 10% 的节点累积强度分布达到 43.02%,而排序前 5% 的节点累积强度分布就已达 22.43%.网络直径为 76,网络的平均最短路径长度为 15.425,聚类系数 0.12,北京公交网络规模相对于上万平方公里服务范围,还有较大发展空间.

2. 公交复杂网络中,节点度与节点强度排序之间表现出一定的差异性,这种差异性从一定程度上反映出路网与客流压力之间的矛盾性.节点度更多反映路网发达的地理优势;而节点强度则注重于客流压力.

3. 通过公交网络的承载压力分析以及通过“掠夺”算法寻找区域性的中心节点,探讨两类不同影

响因素关键节点的提取方法. 体现了出行需求、路网建设、道路分级和城市资源分布(居住、就业)、人口密度、城市规划等综合因素对公交复杂网络所产生的多重影响.

4. 从关键节点入手, 以优化网络能力为目的, 提出提高关键节点运输能力, 优化公交网络的可行策略, 也为增加公交出行便捷性提供参考.

公交系统是一个较为复杂的系统, 但结合整个城市的交通体系来说将形成一个更为复杂的系统. 本文以北京公交网络为例开展了公交复杂网络研

究, 分析了拓扑特征, 探讨了关键节点的提取方法, 通过对承载压力和掠夺算法所得到的统计结果进行分析, 发现结果基本反映出在多重城市外部因素影响下的公交复杂网络的特征, 认为该方法是可行的, 有效的, 并从优化关键节点的角度提出了网络的优化建议. 但还有一些问题没有得到研究, 例如不同网络结构与网络规模对承载能力的影响, 在智能性前提下的最优传输网络结构, 不同拓扑特征以及网络规模的大小对关键节点位置的影响, 都是今后要深入研究的内容.

- [1] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [2] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [3] Albert R, Barabasi A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [4] Wu J S, Di Z R 2004 *Prog. Phys.* **24** 18 (in Chinese) [吴金闪, 狄增如 2004 物理学进展 **24** 18]
- [5] 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]
- [6] Chen Q H, Shi D H 2006 *Phys. A* **360** 121
- [7] Xu D, Li X, Wang X F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1313 (in Chinese) [许丹, 李翔, 汪小帆 2007 物理学报 **56** 1313]
- [8] Zhang L, Liu Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5419 (in Chinese) [张立, 刘云 2008 物理学报 **57** 5419]
- [9] Zhou L, Zhi R, Feng A X, Gong Z Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6689 (in Chinese) [周磊, 支蓉, 冯爱霞, 龚志强 2010 物理学报 **59** 6689]
- [10] Weng W G, Ni S J, Shen S F, Yuan H Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1938 (in Chinese) [翁文国, 倪顺江, 申世飞, 袁宏永 2007 物理学报 **56** 1938]
- [11] Marco A J, Brian H W, Jenny L, 2000 *Nick Abel Ecological Modelling* **131** 249
- [12] Julian S, Janusz A H 2007 <http://arxiv.org/abs/physics/0506074>
- [13] Vamsi K, Vishal S, Aaron C, Cristopher M 2006 arXiv:0510198
- [14] Xu X P, Hu J H, Liu F, Liu L S 2007 *Phys. A* **374** 441
- [15] Zhou S, Mondragon R J 2004 arXiv:0308036
- [16] Gao Z Y, Wu J J, Mao B H, Huang H J 2005 *J. Tran. Sys. Eng. & Info. Tech.* **5** 79 (in Chinese) [高自友, 吴建军, 毛保华, 黄海军 2005 交通运输系统工程与信息 **5** 79]
- [17] Yook S H, Jeong H, Barabási A L, Tu Y 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5835
- [18] Song C M, Havlin S, Makse H A 2006 *Nature Physics* **2** 275
- [19] Li S B, Wu J J, Gao Z Y, Lin Y, Fu B B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050701 (in Chinese) [李树彬, 吴建军, 高自友, 林勇, 傅白白 2011 物理学报 **60** 050701]
- [20] Holme P 2002 *Phys. Rev. E* **66** 036119
- [21] Yin C Y, Wang B H, Wang W X, Zhou T, Yang H J 2006 *Physics Letters A* **351** 220
- [22] Zhao M 2007 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [赵明 2007 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]

Analysis on topological properties of Beijing urban public transit based on complex network theory*

Zheng Xiao¹⁾²⁾ Chen Jian-Ping^{1)2)†} Shao Jia-Li¹⁾ Bie Li-Dong¹⁾²⁾

1) (China University of Geosciences School of the Earth Sciences and Resources, Beijing 100083, China)

2) (The Institute of High and New Techniques applied to Land Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

(Received 7 February 2012; revised manuscript received 5 April 2012)

Abstract

To analyze the topological properties of Beijing public transport network, until July 2010, we have collected 1165 bus lines and 9618 bus stops of Beijing City (14 districts and 2 counties) as the sample data to build up a directed and weighted complex network model based on neighboring stops by applying the complex network theory. In this model, bus stops are considered as nodes of the complex network, while bus lines connecting two neighboring stops as edges. Consequently, the network has the topological properties of a complex network and meanwhile the nodes (bus stops) have clear geographic coordinates. The complexity of Beijing public transport is then verified through analyzing the topological properties of node degree, node strength, strength distribution, average shortest path, clustering coefficient in the complex network. We find that the distributions of node degrees and node strengths are extremely uneven and the cumulative strength distributions of the top 5% and 10% nodes reach 22.43% and 43.02% respectively. The results also show that the node strength, ordinal number and cumulative strength distribution of the nodes all follow the power-law distribution, showing the network characteristics of scale-free and small world. Some “key nodes” play an important role in network connection. We find two kinds of “key nodes” by using high carrying pressure node analysis and extract regional central analysis. These rules provide new references for optimizing the urban transport network, managing traffic congestion and planning and developing the traffic.

Keywords: complex network, topological properties, urban public transit network

PACS: 05.90.+m, 01.75.+m

* Project supported by the Beijing Municipal Education Commission Science Research and Research Education Program (Grant No. JD104910556), and the China Geological Survey Basic Investigative Research Projects (Grant No. 200415100002).

† E-mail: 3s@cugb.edu.com