

文章编号: 2095-2163(2019)04-0205-04

中图分类号: TP393.02

文献标志码: A

# 上海市地铁网络拓扑结构性分析

郑苏江

(上海工程技术大学 管理学院, 上海 201620)

**摘要:** 本文基于复杂网络理论,将上海市现运行的16条地铁线路在Space-L方法下建立模型,通过Ucinet软件初步绘制了地铁网络的拓扑结构图。根据站点邻接矩阵,运用Matlab计算得出:绝大多数站点的度值为2,站点的度分布基本与泊松分布相似;超过97%的站点聚类系数为0,所有站点的平均聚类系数极小,平均路径长度值为15.12,不具有小世界网络的特性;在双对数坐标下的站点累计度分布基本符合幂率分布,具有无标度网络的特性。

**关键词:** 复杂网络; Space-L; 上海市地铁网

## Analysis of the topological structure of Shanghai metro network

ZHENG Sujiang

(School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** Based on the complex network theory, this paper establishes the model of 16 metro lines in Shanghai under the Space-L method, draws the preliminary topological structure diagram of the metro network through Ucinet, and calculates by using Matlab according to the adjacency matrix of stations; the degree distribution of most stations is 2, the degree distribution of stations is basically similar to that of Poisson distribution; the clustering coefficients of more than 97% stations are 0, and the result shows that the degree distribution of most stations is similar to that of Poisson distribution. The average clustering coefficient of stations is very small, and the average path length is 15.12, which does not have the characteristics of small world network. The cumulative degree distribution of stations in double logarithmic coordinates basically conforms to the power distribution and has the characteristics of scale-free network.

**[Key words]** complex network; Space-L; Shanghai metro network

## 0 引言

自20世纪末以来,伴随网络科学的飞速发展,尤其是在复杂网络的“小世界特性”以及“无标度特性”方面,世界范围内的专家学者开始对网络科学产生了浓厚的研究热情。随着研究范围的层层深入,很多专家学者也逐渐将研究兴趣指向了城市交通网络的复杂网络特性之中。

Jiang<sup>[1]</sup>对比分析了不同城市的公路分布情况以及城市公路网络的小世界网络特性; Sienkiewicz<sup>[2]</sup>实证研究了22个城市的交通网络拓扑特性,研究结果表明那些城市的网络度分布不是服从幂律分布就是服从指数分布; Latora<sup>[3]</sup>以美国波士顿地铁为例,初步研究了该网络的小世界网络特性,并首次提出了一种网络构造法则,定义了网络效率等于2个地铁站(节点)之间距离的倒数,同时根据网络效率对其有效性和容错性作出衡量。在国内,郭露露<sup>[4]</sup>等对北京市地铁网络使用Space L方法构建拓扑网络模型,针对连通OD对和出行效率2

个因素评估了该地铁网络的脆弱性,并对今后北京市地铁运营时防护措施的制定给予相关建议;李进<sup>[5]</sup>研究了国内多个大型城市的地铁网络拓扑特性,在总结这些城市的地铁网络共性的同时,与北京市地铁网络的鲁棒性进行对比研究;高天智<sup>[6]</sup>等以国内10个典型城市作为研究样本,基于复杂网络理论对比分析了其网络拓扑特性,对微观及宏观特性表征指标进行了重点研究并总结出国内地铁网络的相关特征;孙军艳等<sup>[7]</sup>对西安市的公交网络、地铁网络及二者综合构成的复杂网络以Space-L的方式建立模型,对比分析了3类网络的统计特征及网络拓扑特性。

本研究中涉及的上海市地铁网络具有节点(站点)数目较多、网络结构复杂等特点。因此,本文基于Space-L模型运用Ucinet、Matlab、Origin等软件,初步绘制了上海市地铁网络拓扑结构图,计算了431个地铁站点的度、度分布、聚类系数、平均路径长度等相关拓扑参数,分析了部分参数之间的相互关系,同时对上海市地铁网络的小世界性及无标度

**作者简介:** 郑苏江(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:管理科学、复杂网络。

**收稿日期:** 2019-04-25

性做了简要分析,基本了解了上海市地铁网络在L空间下的网络特性,为今后上海市地铁线路的规划建设与日常维护提供决策支持。

### 1 研究模型

Space L方法将地铁站点作为网络节点,网络中各站点只与相邻站点有连边,该连边实际上是2个相邻站点之间的地铁线路,且该站点不会受到相邻站点的影响。

由于上海市地铁线路多、网络较为复杂,本文选取1号线和8号线的部分站点来说明站点邻接矩阵的构造过程,如图1所示。将地铁1号线静安寺、南京西路、人民广场、南京东路、陆家嘴等站点依次标号为1、2、3、4、5。将地铁8号线中兴路、曲阜路、大世界、老西门等站点依次标号为6、7、8、9。可以用邻接矩阵 $A_L$ 来表示图1中的网络,若节点*i*和节点*j*之间有边相连,则 $a_{i,j} = 1$ ,若2个节点之间没有连边,则 $a_{i,j} = 0$ ,令 $a_{i,i} = 0$ 即没有自环,最终可以得到邻接矩阵 $A_L$ :

$$A_L = \begin{matrix} \begin{matrix} \hat{e} \\ \hat{e} \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \end{matrix}$$

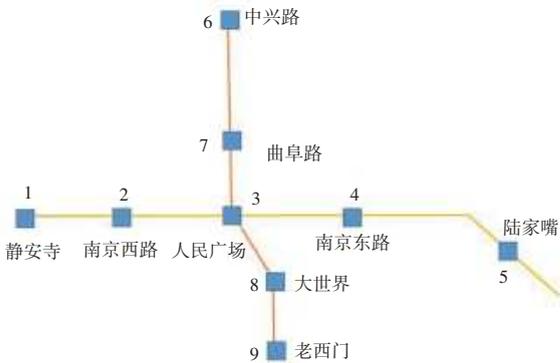


图1 L空间示意图  
Fig. 1 Space-L schematic diagram

### 2 上海市地铁网络复杂性分析

根据2018年底上海市地铁运行线路图(包括规划建设的线路),在Excel中建立地铁站点的邻接矩阵,其中站点数目为431,进而得到一个431×431的

实对称矩阵,并用数字0和1来表示各站点之间的连通性(0表示不是相邻站点,1表示相邻站点)。然后,运用Ucinet软件生成地铁网络的拓扑结构图,把刚才建立的整个上海市地铁网络431×431邻接矩阵导入Ucinet软件,可以得到上海市地铁网络的拓扑结构如图2所示。这样有利于实现数据的可视化,同时可使得数据的分析更为便捷。在得出的拓扑结构图中,每个蓝色的正方形代表一个地铁站点,旁边数字表示该地铁站的名称(如:数字1号就代表爱国路地铁站)。



图2 上海市地铁网络拓扑结构图

Fig. 2 Topological structure map of Shanghai metro network

#### 2.1 站点度及度分布

在L空间下,地铁站点的度值则用来表示该站点周围相邻站点的数目。例如:在人民广场地铁站,可以换乘8号线到达曲阜路和大世界地铁站、换乘1号线到达新闸路和黄陂南路地铁站、换乘2号线到达南京东路和南京西路地铁站。可见,在人民广场地铁站周边有6个地铁站相邻。因此,人民广场站点的度值就为6。通过站点邻接矩阵运用Excel2016计算得出431个站点的度值,表1中汇总了部分代表性站点的度值,为了更好地突出地铁站点的换乘便捷性,表中大部分选取了度值大于2的站点,其大部分站点都具有较高的换乘便捷性(如大型换乘枢纽人民广场站和世纪大道站)。

经过计算得出整个上海市地铁网络的平均度为2.16,这表明平均每个站点周边大约有2~3个站点可以直接到达,乘坐地铁的出行便捷性相对较高。为了更好地量化上海市各地铁站点度值的概率分布情况,运用Origin软件绘制了站点度的分布,如图3所示。度值为2的站点概率高达81%,这表明上海市地铁并不单是依靠大型换乘站点来给予乘客较多的换乘选择,而是依靠较多的小型站点(度值是2)来为更多乘客提供搭乘地铁的便利。另外,该站点度分布近似服从泊松分布,图中出现了2个峰值,第一个峰值是度值为2的站点刚才已经分析,另一个峰值出现在度值

为 4 的站点,这预示着上海市地铁的未来线路规划是更加倾向于建立一些中小型换乘站(度值为 4),这样

不仅可以惠及更大范围的乘客,而且可以联通原有地铁线路,使得乘客的换乘便捷性也随之提升。

表 1 部分站点的度值

Tab. 1 The degree of partial stations

站点编号	站点名称	站点度	站点编号	站点名称	站点度
1	爱国路	2	119	巨峰路	4
2	安亭	2	137	龙溪路	3
6	宝山路	3	138	龙阳路	5
12	曹杨路	4	175	人民广场	6
13	漕宝路	4	179	陕西南路	6
20	成山路	4	192	上海体育馆	4
39	东方体育中心	5	202	世纪大道	7
65	汉中路	5	248	徐家汇	6
77	虹桥 2 号航站楼	3	288	中山公园	4
78	虹桥火车站	3	364	世博大道	2
117	静安寺	4	430	青浦新城	2

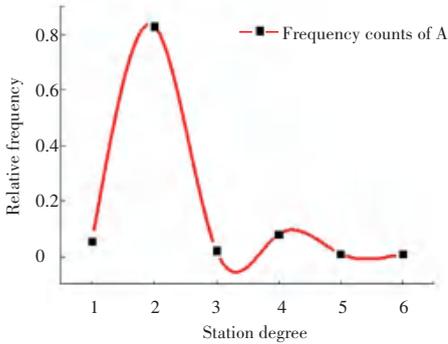


图 3 地铁站点度分布

Fig. 3 The degree distribution of metro network

2.2 平均路径长度

在 L 空间下,2 个地铁站点之间的最短距离是指在网络拓扑图中该最短路径中的连边数目。将已建立的站点邻接矩阵导入 Matlab 并编程计算得出上海市地铁网络各站点之间的最短距离矩阵(以 Excel 表格形式呈现),平均路径长度为 15.12,网络直径为 41。将该矩阵在 Excel2016 中转换成一个列向量,再运用 Origin 软件绘制站点间最短距离的频数分布图(如图 3 所示)。这里的最短距离并不是指现实世界中的 2 站点之间的实际距离,而是基于 L 空间的地铁网中最短路径所连接的边数,也就是乘客实际乘坐地铁经过的站点数目。根据图 4 中的分布情况会发现,最短距离在区间 10~20 的频数相比于其它几个区间都要大。这就表明一般情况下随机选定一个乘客,其搭乘地铁出行到达目标站点有很大的概率需要乘坐 10~20 站左右,这样的频数分布情况也与平均路径长度为 15.12 的计算结果相吻合。

铁站点周围站点之间的紧密程度,整个网络的聚类系数就是网络中所有节点聚类系数的平均值。根据每个站点聚类系数的计算结果,可以发现上海市地铁网络在 L 空间下大部分站点的聚类系数是 0,整个地铁网络的平均聚类系数非常小。根据聚类系数定义,只有某个地铁站点周边邻近站点与该站点在网络图中构成三角形,才能体现出该站点在网络中的聚类特性。为了探究大部分站点聚类系数为 0 的原因,分析了上海市地铁的运行线路图就会发现:每个站点的邻近站点之间大部分不存在连边,只有很小一部分存在连边(构成三角形)。因此,可以得出“上海市地铁网络在 L 空间下基本没有聚类特性”的研究结论。

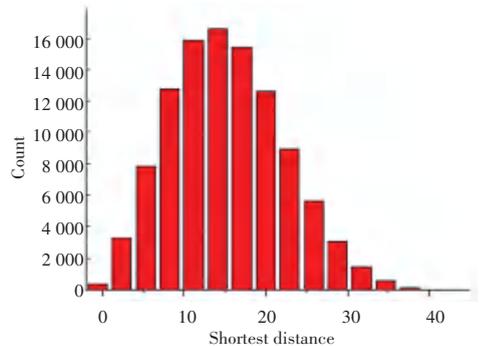


图 4 最短距离频数分布

Fig. 4 Shortest distance frequency distribution

2.4 无标度性分析

为了分析上海市地铁网络基于 Space-L 模型下的无标度特性,将地铁网络的累计度分布绘制了双对数对标下的累计度分布,如图 5 所示。图中横坐标为站点度值取对数,纵坐标表示大于相应站点度值的概率取对数。从图中可以发现:样本站点在双对数坐标下下降较为缓慢,呈现出小部分无标度区,

2.3 聚类系数分析

基于 L 空间,某站点的聚类系数 C 反映了该地

该地铁站点累计度分布图基本符合幂律特性。由此可得,上海市地铁网络在 L 空间下可由幂率分布大致描述站点度分布。

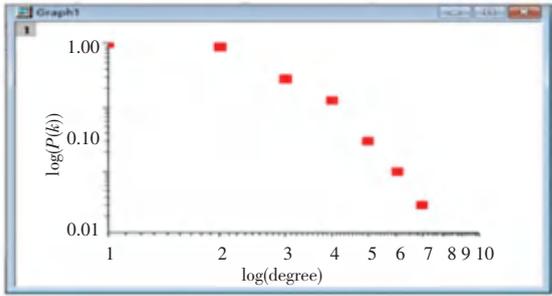


图5 双对数坐标下的累计度分布

Fig. 5 Cumulative degree distribution in double logarithmic coordinates

### 3 结束语

本文基于复杂网络理论在 L 空间下对上海市地铁网络进行了实证研究并分析了相关复杂网络性质得出以下结论:各地铁站点的度值大部分为 2,平均度为 2.16,站点度值最大为 7,度分布近似服从泊松分布,整个地铁网中大型换乘枢纽(度值大的站点)相对较少;各站点的聚类系数大部分为 0,网络的平均聚类系数非常低,因此整个地铁网络基本没

有聚类特性;地铁网络直径为 41、平均路径长度为 15.12,说明上海市地铁的覆盖范围较为广阔,乘客搭乘地铁出行的便利性较高,当随机选定起止站点时需要经过 10~20 站到达目标站点的概率最大;在双对数坐标下的站点累计度分布基本符合幂率分布,表明该地铁网络具备一定的无标度特性。

### 参考文献

- [1] JIANG Bin. A topological pattern of urban street networks: Universality and peculiarity [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, 384(2): 647-655.
- [2] SIENKIEWICZ J, HOYST J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland [J]. *Physical Review E, Statistical, nonlinear and soft matter physics*, 2005, 72(4): 46-127.
- [3] LATORA V, MARCHIORI M. Is the Boston subway a small world network [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, 314(1-4): 109-113.
- [4] 郭露露, 苏国锋, 路堃, 等. 基于复杂网络理论的北京地铁网络脆弱性评估[J]. *工业安全与环保*, 2017, 43(11): 30-34.
- [5] 李进, 马军海. 城市地铁网络复杂性研究[J]. *西安电子科技大学学报(社会科学版)*, 2009, 19(2): 51-55.
- [6] 高天智, 陈宽民, 李凤兰. 城市轨道交通网络的拓扑结构分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(3): 97-106.
- [7] 孙军艳, 牛亚儒, 吴冰莹, 等. 西安公共交通系统的网络特性和鲁棒性分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(2): 148-155.
- [8] 孙军艳, 牛亚儒, 吴冰莹, 等. 西安公共交通系统的网络特性和鲁棒性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [9] MOURATIDIS K, YIU M L, PAPADIAS D, et al. Continuous nearest neighbor monitoring in road networks [C]// *Proceedings of the 32<sup>nd</sup> International Conference on Very Large Data Bases*. Seoul, Korea: dblp, 2006: 43-54.
- [10] GUO Long, SHAO Jie, AUNG H H, et al. Efficient continuous top - k spatial keyword queries on road networks [J]. *GeoInformatica*, 2015, 19(1): 29-60.
- [11] FAN Ping, LI Guohui, YUAN Ling. Continuous K - nearest neighbor processing based on speed and direction of moving objects in a road network [J]. *Telecommunication Systems*, 2014, 55(3): 403-419.
- [12] SHEN Bilong, ZHAO Ying, LI Guoliang, et al. V - tree: Efficient kNN search on moving objects with road - network constraints [C]// *2017 IEEE 33<sup>rd</sup> International Conference on Data Engineering (ICDE)*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2017: 609-620.
- [13] BOK K, PARK Y, YOO J. An efficient continuous k - nearest neighbor query processing scheme for multimedia data sharing and transmission in location based services [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(5): 5403-5426.
- [14] ZHONG Ruicheng, LI Guoliang, TAN K L, et al. G - tree: An efficient index for KNN search on road networks [C]// *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ACM International Conference on Conference on Information & Knowledge Management*. San Francisco, California, USA: ACM, 2013: 39-48.
- [15] KOLAHDOUZAN M, SHAHABI C. Voronoi - based k nearest neighbor search for spatial network databases [C]// *Proc. the 30<sup>th</sup> VLDB*. Toronto: VLDB Endowment, 2004: 840-851.
- [16] HUANG Xuebing, JENSEN C S, ALTENIS S. The island approach to nearest neighbor querying in spatial networks [C]// *BAUZER M C, EGENHOFER M J, BERTINO E. Advances in Spatial and Temporal Databases. SSTD 2005. Lecture Notes in Computer Science, Berlin/ Heidelberg: Springer, 2005, 3633: 73-90.*
- [17] HUANG Xuegang, JENSEN C S, LU Hua, et al. S - grid: A versatile approach to efficient query processing in spatial networks [C]// *PAPADIAS D, ZHANG D, KOLLIOS G. Advances in Spatial and Temporal Databases. SSTD 2007. Lecture Notes in Computer Science, Berlin/ Heidelberg: Springer, 2007, 4605: 93-111.*
- [18] 彭勃. 大数据环境下道路网 Top - k 查询优化技术研究 with 实现

(上接第 204 页)