

# 轨道交通网络的可达性及其网络结构分析

李旭东, 刘建国

(上海理工大学 管理学院 复杂系统科学研究中心, 上海 200093)

**摘要:** 以分析轨道交通网络结构为目的, 利用可达性对上海3个不同时期的轨道交通网络的通行效率进行了分析. 实证分析结果显示, 可达性会随着地铁网络规模的增大呈下降趋势. 为了阐释出现这种现象的原因, 随后对各时期的网络进行结构分析. 分析结果显示, 3个网络的平均距离和平均最短路径对网络的可达性影响极小, 而作为轨道交通网络特有的度分布现象对其影响较大. 同时, 分别将3个网络与保持度分布不变的随机网络进行了可达性和网络效率的对比, 结果表明, 轨道交通网络的便利性与网络效率仍有很大的提高空间.

**关键词:** 轨道交通网络; 网络效率; 可达性

**中图分类号:** U 491.1      **文献标志码:** A

## Accessibility of the Subway Transportation Network and Its Network Structure Analysis

LI Xudong, LIU Jianguo

(Research Center of Complex Systems Science, Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Accessibility is one of the indicators to measure the efficiency of network. The purpose here is to analyze the rail transit network structure, and the networks of Shanghai subway transportation during three different periods were chosen for accessibility analysis. The empirical analysis results show that the accessibility is declined with the increasing of subway network scale. In order to explain the reasons, the network structure of each period was analyzed. It turns out that the degree distribution of subway transportation networks play a greater role than the average distance and average path length do. After comparing with the random networks which have the same degree distribution, there's still a large space which can be improved in the convenience and efficiency of the network.

**Key words:** subway transportation network; network efficiency; accessibility

城市轨道交通具有大容量、快捷、准点等优势, 已成为公共交通建设的重点. 随着我国城市化进程

的加速, 城市轨道交通建设有望迎来黄金发展期, 如何提高轨道交通网络的可达性<sup>[1]</sup>与便利性, 解决客

收稿日期: 2014-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61374177, 71371125, 71171136); 上海市一流学科建设资助项目(XKTX2012)

第一作者: 李旭东(1989-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 复杂网络. E-mail: lxd266@163.com

通信作者: 刘建国(1979-), 男, 教授. 研究方向: 复杂网络、知识管理、在线社会网络分析. E-mail: liujg004@ustc.edu.cn

流拥堵问题是当务之急.城市轨道交通与其它城市交通网络(如城市公交网络、城市铁路网络等)相比,在网络的拓扑性质上有明显的不同,所以,深入研究城市轨道交通网络显得越来越重要. Latora 等<sup>[2]</sup>研究了波士顿地铁网络特征,并提出网络构造法则. Seaton 等<sup>[3]</sup>分析了维也纳和波士顿地铁网络的小世界特性. Angeloudis 等<sup>[4]</sup>分别从地铁成网过程和网络类型等方面进行了研究. 李树彬等<sup>[5]</sup>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. 李进等<sup>[6]</sup>分析了国内外多个城市地铁网络拓扑特性,并对北京地铁鲁棒性进行研究. 姚佼等<sup>[7]</sup>梳理城市交通控制随交通信息发展的脉络,结合车路协同环境下交通信息采集的特点,综述分析单点控制、协调控制的研究现状. 郑雪琳等<sup>[8]</sup>利用上海出行者交通方式选择意向调查数据,对包括轨道交通在内的多种交通方式的选择行为进行了分析与建模. 这些研究主要集中在网络规划、运营组织和管理上,相对而言,对城市轨道交通网络流的分析和优化方面的研究还没有完全展开,对其中的一些关键问题和基本规律的把握还不够充分,不能准确地反映随着现代化程度的加快、城市轨道交通规模的扩大和延伸给整个网络性质带来的变化. Rosvall 等<sup>[1]</sup>以城市街道网络为研究对象,并用可达性来度量整个网络的效率. 所谓可达性即在确定的初始节点下到达目标节点的难易程度,针对每次路径的选择将其量化为需要掌握信息量的大小,需要的信息量越小,表示越容易到达. Rosvall 成功地区分了城市街道网络中的枢纽节点和难以到达的点,并且此方法也被学者们运用到多个领域<sup>[9-10]</sup>. 针对交通网络,可达性的高低并不能直接说明网络的好坏. 网络中某一点的可达性越高,说明该点具有较高的换乘优势,能够更加快捷地到达目的地;可达性低则说明该点到目标节点之间会遭遇更多可换乘的站点,需要掌握更多的信息量,反映的是更为复杂的、换乘站点更多的交通网络. 本文以上海城市轨道交通为例,分别对现行的轨道线路网络以及 2020 年和 2030 年的线路规划网络进行研究,以它们的网络可达性<sup>[7]</sup>变化规律为主要研究对象,分析网络结构和网络效率.

## 1 研究方法

### 1.1 可达性简介

“Search Information(搜索信息)”是一种衡量网络中节点可达性的方法. 在进行网络分析时,网络

中的节点代表两条路的交叉口,边代表两交叉口间的道路. 需要掌握多少信息量才能从你所在的位置  $s$  到目的地  $t$ ,所需的信息量越少,表明  $s$  所代表的网络节点具有越高的可达性,但同时意味着面临较少的选择性,表明该节点可到达目的地的多样性较小. 所以,可达性值越小,表示可达性越高.

如图 1(a)所示,若从  $b, c, d, e$  中任一点出发到达  $a$ ,需要的信息量为 0,因为,只有一条选择的道路. 而从  $a$  点出发,欲到达其余 4 个中某个节点,就需要掌握相对较多的信息量:选择每条路径的概率是  $\frac{1}{4}$ ,则所需信息量  $S = -\log_2 \frac{1}{4} = 2$ . 每到达一个路口都会面临一次信息的搜寻,概率即是一个累积的结果. 从另一个方面可以看出,所需信息量较高的点在确定的步长下能够到达的区域更广泛. 因此,  $S$  的大小与整条路径上各点的度  $k$  的大小有关. 为此,沿着任意一条最短路径搜寻目的节点的可能性被定义为

$$p[p(s, t)] = \frac{1}{k_s} \prod_{j \in p(s, t)} \frac{1}{k_j - 1} \tag{1}$$

式中,  $k_s$  和  $k_j$  分别表示点  $s$  和点  $j$  的度;  $p(s, t)$  表示  $s$  与  $t$  点间的任意一条最短路径;  $k_j - 1$  表示当到达  $j$  点,需要的是剩下的各条岔路的信息.

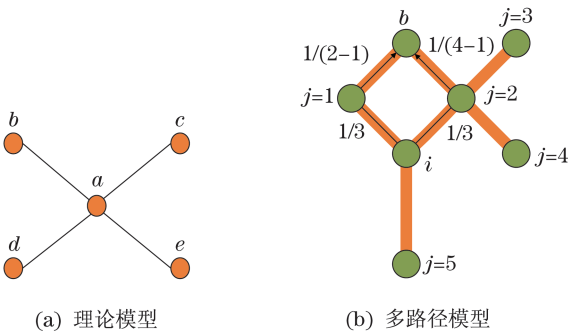


图 1 简单网络模型

Fig.1 Simple network models

当两点间有多条最短路径时,其概率  $P(s, t) = \sum_{\{p(s, t)\}} P[p(s, t)]$ ,即各条最短路径的概率和. 综上,从  $s$  到  $t$  总共所需的信息量

$$S(s \rightarrow t) = -\log_2 \sum_{\{p(s, t)\}} P[p(s, t)] \tag{2}$$

如图 1(b)所示的网络模型,  $i, j, b$  分别表示网络中的节点,由式(2),从  $i$  到  $b$  的  $S = \log \frac{9}{4}$ . 得出整个网络的平均可达性值

$$\bar{S} = \frac{1}{N^2} \sum_{s=1}^N \sum_{t=1}^N S(s, t) \tag{3}$$

式中,  $N$  为网络节点数.

1.2 网络效率、度分布和平均距离

网络效率<sup>[11-12]</sup>是用来表示网络连通性好坏的指标,网络的连通性越好,则网络效率越高.网络效率

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \tag{4}$$

式中, $d_{ij}$ 为任意两点间的最短距离.

$E$ 的取值范围为 $[0,1]$ , $E=1$ ,表示网络连通性最好.网络中某点的度即为该节点的邻边数.在连接站点式的交通网络中,通常认为重要的节点有着更多的相邻节点<sup>[13]</sup>,如交通网络中的枢纽. $k$ 为网络中的节点度,度分布定义为在一个网络中任意选一个节点,它的度正好为 $k$ 的概率.它反映的是整个网络中度为不同值的节点的分布情况.在交通网络中,通过度分布可以查找枢纽节点在整个网络中所占的比例.平均距离为网络中所有节点对它们之间最短路径长度的平均值.平均最短路径条数定义为网络中所有节点对之间最短路径条数的平均值.

2 上海轨道交通可达性分析

2.1 网络模型构建

上海是我国最早开始实施城市轨道交通工程的城市之一,目前拥有我国最大规模的轨道交通网络.这里将正在使用的轨道交通网络(2013)、2020年的规划网络、2030年的规划网络抽象成平面图.

假设网络中的节点分别代表地铁网络中的各个站点,站点与站点之间的连边由平面网络中的各条边表示.如图2所示,节点的颜色由浅到深依次表示2013,2020,2030年的上海轨道交通网络.3个时期网络的基本层性如表1所示.

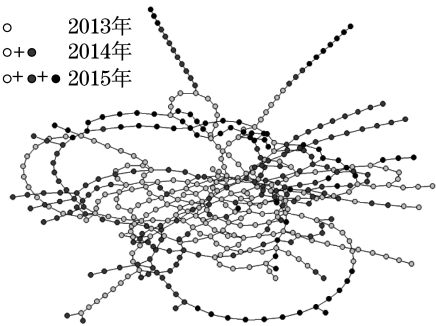


图2 不同时期网络规模图  
Fig.2 Network size in different periods

2.2 可达性分析

分别计算3个时期的城市轨道交通网络中各节

表1 各时期网络基本属性

Tab.1 Basic properties of each period network

| 年份   | 点   | 边   | 网络效率    |
|------|-----|-----|---------|
| 2013 | 240 | 262 | 0.100 7 |
| 2020 | 407 | 498 | 0.094 4 |
| 2030 | 481 | 596 | 0.093 8 |

点的平均可达性值 $A_s$ .

$$A_s = \frac{1}{N} \sum_t S(s \rightarrow t) \tag{5}$$

式中, $t$ 表示网络中除起点 $s$ 之外的所有点.

结合式(2)和式(5),得到3个时期网络中可达性值按从低到高的顺序排序的前5个节点,即交通枢纽,如表2所示.从排序中看到,可达性的排序与人们所熟知的经常用来换乘的站点基本一致,即可达性值的方法能够有效地找出网络中的重要节点,具有可行性.对于后面2个时期的网络节点排序,其分布情况也是未来城市发展布局的走势.

表2 3个时期站点可达性值排序

Tab.2 Orders of station accessibility in three periods

| 排序 | 2013年 | 2020年 | 2030年 |
|----|-------|-------|-------|
| 1  | 世纪大道  | 新村路   | 场中路   |
| 2  | 常熟路   | 场中路   | 七宝站   |
| 3  | 人民广场  | 桂林公园  | 桂林公园  |
| 4  | 老西门   | 徐家汇   | 碧云路   |
| 5  | 上海火车站 | 陕西南路  | 淞虹路   |

根据计算所得的可达性值,作出如图3所示(见下页)的累积分布. $P(<A_s)$ 表示网络中的节点可达性值小于 $A_s$ 的分布比例.图3中显示,2013年整个轨道交通网络的可达性值要明显小于2020和2030年的,意味着现行的地铁网络具有较高的可达性.相比较后面2个阶段的网络规模,现行的网络规模较小,更容易掌握全局信息,另一方面也反映了各站点到达其它站点的多样性比较单一.同时,随着规模的增大,2030年的网络可达性值高于2020年的网络可达性值,原因在于增加了节点数量的同时,相对添加了更多的边,从而使从起始节点出发有多条路径能够到达目的节点的概率增大,减少了所需掌握的信息量.

从式(1)和可达性的定义可以看出,一个节点到达网络中另一个节点的可达性值与途经节点的度、两点间的最短路径和最短路径条数相关.对3个网络的相关性质作了分析,并对3个网络的平均最短距离 $\langle l \rangle$ 和平均最短路径条数 $\langle c \rangle$ 进行对比,如图4(a)所示(见下页).尽管平均距离有略微上升的

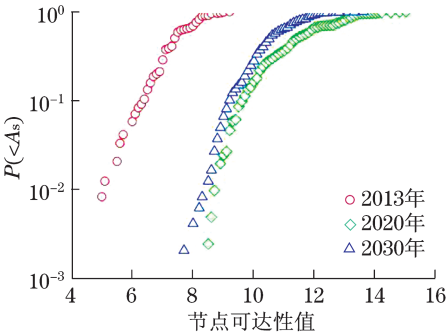


图3 各时期可达性累积分布

Fig.3 Accessibility cumulative distribution in different periods

趋势,但是,差距甚小,平均最短路径的条数也保持在1.0~1.2之间,说明有极少数的节点对有2条或以上的最短路径.以此推断平均距离和平均最短路径条数对可达性值的影响非常的小.  $\bar{S}_r, \epsilon_r$  分别表示相同规模随机网络的网络平均可达性值和网络效率.  $\langle P \rangle$  是度为  $k$  的节点在网络中所占的比例. 在图4(b)给出的度分布图中可以看到轨道交通网络特有的现象,总的来说,节点的度偏小,最大的只有7,而尤其突出的是  $k=2$  的节点,特别是在2013的网络中,其节点所占的比例将近80%. 这种现象表明,在真实的轨道交通网络中,大多数的站点只是起到连接2个站点的作用,而能够作为枢纽站点的节点即度大的点很少. 为此当连续通过这些度小的点的时候,乘客基本不需掌握多少信息,往往只有1条路可以走. 所以,导致了2013年的网络可达性要明显优于2020年和2030年的网络可达性. 从另一个方面反映了现行的轨道交通网络从某一点出发往往只能单一地到达某条特定路径上的站点,而很少有选择换乘的机会. 由于存在网络规模的差异,为此定义一个新的变量  $\sigma$  来比较不同规模网络的可达性.

$$\sigma = \frac{\bar{S}}{\log_2 N}$$

(6)

式中,  $\sigma$  表示  $\bar{S}$  除以网络规模后得到的网络可达性值,因此,可以用来比较不同网络规模的网络平均可达性.

为了对各网络的  $\bar{S}$  进行评估,用随机重连的方法,分别构造了3个网络在保持度分布不变的情况下的随机网络. 与原网络对比后,由图4(c)看出,在3个真实网络之间的比较中,依然是2013年的网络具有更有效的组织结构. 此外,除了2013年的值与其随机网络略为接近以外,2020年和2030年都存在较大差异,而且普遍的网络可达性都劣于其随机

网络的. 轨道交通的特殊性,促成了其网络呈现触角状的现象,而触角越多,越会增加网络的可达性值. 随着网络规模的增加,网络的复杂度也加大,触角的数量减少,即更多的站点有了更多的选择通向其它站点,为此可达性值降低. 为了整体度量网络效率,真实网络与随机网络的对比如图4(d)所示. 可以看到,即使是随机网络,网络效率也都在0.15之下. 这也说明了轨道交通网络其特有的网络结构限制着网络的连通性,今后的规划应当在满足地域需求的基

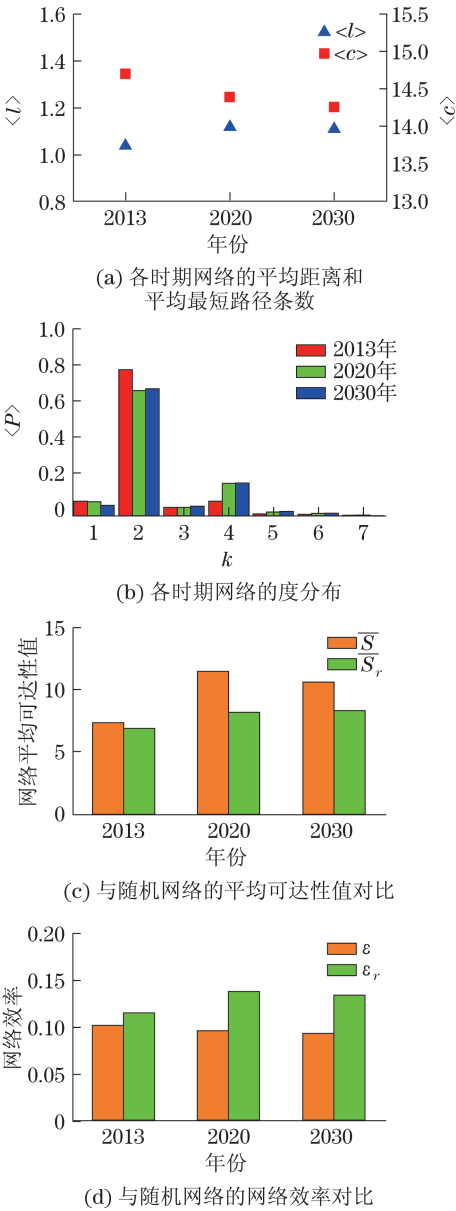


图4 不同时期网络平均距离、平均最短路径条数、度分布及可达性值示意图

Fig.4 Average distance, the number of shortest path, degree distribution and accessibility values of network in different periods



础上完善网络的连通性,使网络效率得到提高,增加居民出行的便利性.

3 结 论

以不同时期的上海轨道交通网络为例进行可达性和网络结构分析,得到以下结论:

a. 由于 2013 年的轨道交通网络规模较小,因此,更容易被掌握全局信息.说明现行的地铁网络的结构比较简单,站点数较少,可达范围和区域相对较小.

b. 在考察了 3 个网络的网络效率、平均距离和平均最短路径条数之后,发现 3 个网络的 3 种拓扑性质相差无几.说明在经过 20 a 和 30 a 的规划之后,网络的规模和复杂程度虽然增加了,但是,网络连通性和效率并没有大幅变化,说明在规划的同时很好地把握了网络结构的建设.可以看到,与相同规模的随机网络相比,网络效率还有很大的提升空间.

c. 作为轨道交通网络的一个特殊现象, $k = 2$  的节点在整个网络节点所占的比例普遍高于  $2/3$ .一方面,这些节点所代表的站点仅仅是起到衔接的作用;另一方面,乘客在通过这样的站点时没有多余的选择,没有可以换乘的站点.所以,减少这些节点的比例,会大幅增加网络的连通性和效率.在 2020 年和 2030 年的网络中,虽然节点比率有所降低,但是,依然不明显,所以,网络效率并没有多大的改善.

本文仅仅是从网络可达性方面,选取具有代表性的上海轨道交通网络为研究对象,分析网络效率,这其中一定有各城市存在的共性,同时也会因为地理和历史等因素存在着差别,有待通过实验去验证更准确的可达性度量指标.

参考文献:

[1] Rosvall M, Trusina A, Minnhagen P, et al. Networks and cities: an information perspective [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(2): 028701 – 028705.

[2] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small-world network? [J]. Physica A, 2002, 314(1): 109 – 113.

[3] Seaton K A, Hackett L M. Stations, trains and small-world networks [J]. Physica A, 2004, 339(3): 635 – 644.

[4] Angeloudis P, Fisk D. Large subway systems as complex networks [J]. Physica A, 2006, 367: 553 – 558.

[5] 李树彬, 吴建军, 高自友, 等. 基于复杂网络的交通拥堵与传播动力学分析 [J]. 物理学报, 2011, 60(5): 140 – 148.

[6] 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): 50 – 55.

[7] 姚佼, 杨晓光. 车路协同环境下城市交通控制研究 [J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(4): 397 – 403.

[8] 郑雪琳, 干宏程. 居民交通方式选择行为影响因素分析 [J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(6): 563 – 566.

[9] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics [J]. Physics Reports, 2006, 424(4/5): 175 – 308.

[10] Costa L F, Rodrigues F A, Travieso G, et al. Characterization of complex networks: a survey of measurements [J]. Advances in Physics, 2007, 56(1): 167 – 242.

[11] Vragović I, Louis E, Diaz-Guilera A. Efficiency of informational transfer in regular and complex networks [J]. Physical Review E, 2005, 71(3): 036122.

[12] Latora V, Marchiori M. A measure of centrality based on network efficiency [J]. New Journal of Physics, 2007, 9(6): 188.

[13] 刘建国, 任卓明, 郭强, 等. 复杂网络中节点重要性排序的研究进展 [J]. 物理学报, 2013, 62(17): 178901.

(编辑: 石 瑛)