

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2013.06.012

# 基于复杂网络指标的 轨道线网线路评价

李 伟

(同济大学交通运输工程学院 上海 201804)

**摘 要** 介绍复杂网络的基本统计指标,包括点的度、最短距离、网络有效性和介数。在复杂网络理论的基础上,分析新建线路将给整体网络带来的影响,如度的增加引起网络抗攻击性的下降和介数增大引起级联失效现象的加剧,基于度和介数指标的统计来设计新建线路辅助评价模型。根据上海轨道交通 2008 年线网进行案例分析,统计网络的度和介数指标,说明新建线路应当避免在网络 Hub 节点换乘,并尽量避免同站多线换乘,从而达到均衡整个网络压力的目的。

**关键词** 城市轨道交通;复杂网络指标;线网;新建线路;评价

**中图分类号** U231      **文献标志码** A

**文章编号** 1672-6073(2013)06-0048-04

目前,城市轨道交通发展迅猛,部分大型城市(如上海)的轨道交通线路多达十几条,运营里程达到 400 多 km,车站数量有 300 余个,其轨道交通系统的规模庞大。随着轨道交通线路的增多,城市轨道交通逐步形成了一个巨大的网络结构,以轨道交通车站为节点,以车站间线路为边,构成了一个错综复杂的庞大系统,这使得研究城市轨道交通网络存在一定的困难。

但是,学者们在研究中发现,轨道交通网络表现出与其他复杂网络类似的现象,如线路间的关联、延误在网络中的传播,网络的可靠性与网络结构和功能相互影响等。交通界学者对复杂网络的研究起步比较晚,但近几年的发展也十分迅速,在公共交通网络的特征和运行可靠性等方面已经取得了一些初步的成果<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期:2012-11-16    修回日期:2013-09-30

作者简介:李伟,男,博士研究生,从事交通运输规划与管理, aliweib1@126.com

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071112)

Sen 等(2003)研究了印度铁路网络的小世界特征<sup>[4]</sup>。Latora 等(2002)对波士顿地铁的小世界网络特性进行了初步研究,从研究数据中得知整个地铁系统运行质量较好,具有复杂网络的小世界效应<sup>[5]</sup>。陈菁菁(2008)运用复杂网络理论,对城市轨道交通网络可靠性进行研究,引入复杂网络的可靠性测度指标<sup>[6]</sup>。王焱、杨超(2008)运用复杂网络理论,对上海城市轨道交通近期规划网络拓扑结构进行了分析,证明该网络为小世界网络,其小世界网络特性在 P 空间中更加显著<sup>[7]</sup>。王志强、徐瑞华(2009)基于复杂网络特征,对上海市 2020 年远景规划网络的连通可靠性进行了仿真研究,分析了线网的安全可靠性能<sup>[8]</sup>。

综上所述,国内外学者在研究中发现,轨道交通乃至城市轨道交通网络表现出的复杂网络特征十分明显。为此,在对轨道交通的研究中,可以借助复杂网络理论,运用复杂网络数据的统计指标,评价新建的线路对该网络的影响。

## 1 复杂网络指标

复杂网络的定义有很多种,但一直没有一个精确、严格的科学定义,大致上包含以下几层意思:首先,它是大量真实复杂的拓扑抽象,是大量真实复杂系统的抽象;其次,至少在感觉上比规则网络和随机网络复杂;最后,应该是具备自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度中的部分或全部性质的网络。下面是常用的几个复杂网络统计指标<sup>[9]</sup>。

### 1.1 点的度

度  $k_i$  是刻画和衡量一个节点特性的最简单,同时也是最重要的概念,它表示点  $i$  拥有边的数量。换句话说,一个节点的度越大,它在网络中的重要性就越高。一般而言,度数大的前几个节点称为 Hub 节点。

## 1.2 平均最短距离

在网络研究中,一般定义两节点间的距离为连接两者的最短路径的边的数目;网络的平均最短距离是所有节点对之间距离的平均值,描述了网络中节点间的分离程度,即网络有多大。平均最短距离  $l$  是网络中节点对之间的平均距离,定义为

$$l = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in V} d_{ij} \quad (1)$$

式中: $d_{ij}$ 为节点  $i$  到  $j$  的最短距离,  $i \neq j$ 。

## 1.3 有效性

有效性是用以衡量网络通行能力的指标,对研究网络的抗攻击性和鲁棒性具有非常重要的意义,其定义为

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in V} \frac{1}{d_{ij}} \quad (2)$$

式中: $d_{ij}$ 为节点  $i$  到  $j$  的最短距离,  $i \neq j$ 。

## 1.4 介数

介数分为边介数和节点介数。节点介数定义为网络所有最短路径中经过该节点的路径数目占最短路径总数的比例,边介数定义为网络所有最短路径中经过该边的路径数目占最短路径总数的比例。介数反映了相应的节点或者边在整个网络中的作用和影响力,是一个重要的全局几何量,具有很强的现实意义。点  $i$  的介数  $B_i$  可以用下式计算,即

$$B_i = \sum_{j,k \in V} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (3)$$

式中, $n_{jk}$ 是连接点  $j$  和  $k$  最短路径的数量,而  $n_{jk}(i)$  是连接点  $j$  和  $k$  且经过点  $i$  最短路径的数量。节点介数的概念可以推广到边介数,定义为通过该边顶点对的最短路径的数量。

在本研究中,大致采用以上4个统计指标,最短路径用于计算网络中各节点和各边的介数,平均最短距离和网络有效性用于评价网络的实际效率,点的度分布以及介数分布用于确定网络中的流量潜在压力。

# 2 线路评价模型

## 2.1 模型建立的理论基础

### 2.1.1 网络结构中的 Hub 节点

王焱、杨超(2008)和王志强(2009)分别证明,上海城市轨道交通近期规划网络具有小世界网络和无标度网络的特征<sup>[7-8]</sup>。在计算模型分析中,将上海城市轨道交通网络看成是具有无标度特性的小世界网络。由于无标度网络对意外故障具有惊人的强韧性,去除一些不

重要的节点不会对网络拓扑结构产生重大的影响,但是如果蓄意对城市轨道交通的 Hub 节点进行攻击和破坏,就可能会对网络产生巨大影响,甚至会导致整个网络的瘫痪。所以,新建轨道交通线路时应重点考虑网络中的 Hub 节点,旨在尽量均衡网络中各 Hub 节点的重要程度,提高轨道交通网络的抗攻击性。

### 2.1.2 网络介数负载影响下的级联失效

在复杂网络中,如果少数几个节点发生故障,会通过节点之间的连接关系引起其他节点发生故障,这样就会产生连锁效应,最终导致网络大面积故障甚至造成整个网络崩溃。这种现象称为级联失效(cascading failure),通常与网络中流量较大或者介数较大的边点有关。同样,城市轨道交通中也存在着级联失效行为,如列车在某个车站或某个区间发生延误或者故障,势必会引起线路区间中其他列车的相继延误,严重者甚至有可能导致整条线路瘫痪。另外,列车延误也可能引起车站站内站台客流的滞留,继而影响车站站内旅客的人身安全,导致地铁车站功能失效。

在城市轨道交通中,理解和运用级联失效行为是为了更好地发现控制级联失效的方法。在以往研究级联失效的文献中,通常只考虑两种边的去除方式,即去除流量最大的边或介数最大的边,这两种边对城市交通系统的性能具有重要影响,但有时两者却都不是网络的关键边。有学者于2007年独立进行了50次不同去除策略条件下线网全局有效性的实验,发现混合去除策略对城市交通系统造成的损害程度最小,去除介数最大的边对系统造成的损害最大<sup>[10]</sup>。由此,笔者在研究评价整体时,选取介数作为研究网络可靠性的重要因素。

综上所述,在评价模型中,考虑到整体网络拓扑结构中 Hub 节点的重要性,以及级联失效中介数最大的节点和边对整个网络具有重要影响,将网络中度最大的节点及介数最大的节点或边作为评价新线的重要指标。

## 2.2 新建线路的评价模型建立

以现实网络的物理拓扑结构为基础,将轨道交通网络中的车站抽象为网络中的节点,车站之间的线路区间映射为两节点的边,建立整个城市轨道交通网络拓扑模型,用于对整体网络性能进行全面分析。关于两节点之间边的长度取值,这里考虑本地乘客选择出行路径主要取决于路径走行时间,外地乘客是比较乘坐经过的车站数量加上换乘线路的次数。为便于统计最短距离,这里取两个相邻车站的连线长度为1个单

位车站数。关于换乘站的处理,是将其拆分为若干节点,站间的连线长度为换乘时间,取 0.1 个单位车站数,同时乘上换乘惩罚系数作为其换乘站的换乘阻抗。这样,就可以构建轨道交通网络,并大致保留原来的基本拓扑特征;可以通过这个网络拓扑结构来讨论其复杂的网络统计特征,如度分布、网络平均距离、网络有效性、介数等,进而研究轨道交通网络的性质。

由于网络结构的复杂性,本研究采用统计学的方法作为模型基础,统计网络中节点的度以及边和节点的介数。将统计结果作为新建线路的决策因素,继而将线路新建前后的统计结果(介数、网络平均最短路径以及网络的全局有效性)进行对比,将这些结果反馈给决策者,以评价新建线路的优劣。

3 实验案例分析

为实验案例分析方便起见,这里以上海市 2008 年轨道交通线网为例,其中包含 8 条线路(2、8、9 号线部分站台还未使用)。将轨道交通线网映射为线网拓扑结构,其中包括 171 个节点、192 条边。经过计算,得到网络结构中各节点介数和各边介数,如图 1 所示。其中,红色表示介数较高,而绿色表示介数较低。

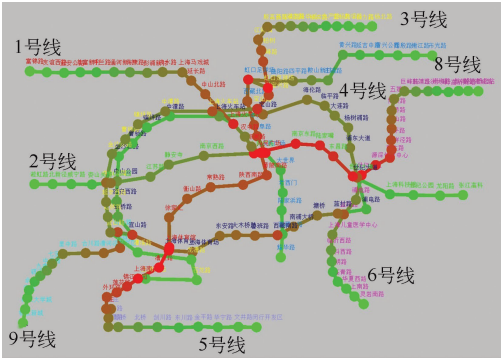


图 1 2008 年网络介数密度

根据统计结果,得到介数较大的节点和边如表 1、2 所示。可以看出,介数比较大的点是换乘站,并且普遍高于非换乘站的介数。其中,世纪大道站和人民广场站由于是 3 线换乘,介数较大;上海南站是 5 号线和全线网衔接的重要车站,因而介数也较大。这几个车站可以看成是线网的核心节点,在线网中的位置较为重要,需要重点关注。在边介数方面,可以看出 1 号线上海站到人民广场、到上海南站以及 2 号线人民广场到世纪大道这些区段中介数较大,意味着这些线路区段较为重要,在平时的日常运营维护中需要重点关注。在新建线路中,应当平衡这些区段的重要性,避免今后影响整个网络的效率。

表 1 节点介数

排序	节点名称	线路	度	节点介数
1	人民广场	1、2、8 号线	3	0.372 273 8
2	世纪大道	2、4、6 号线	3	0.325 421 4
3	上海体育馆	1、4 号线	2	0.288 441 7
4	上海火车站	1、3、4 号线	3	0.280 667 4
5	虹口足球场	3、8 号线	2	0.267 836 2

表 2 边介数

排序	边名称	线路	边介数
1	上海体育馆—漕宝路	1 号线	0.189 301 7
2	漕宝路—上海南站	1 号线	0.180 220 2
3	人民广场—南京东路	2 号线	0.174 269
4	源深体育中心—世纪大道	6 号线	0.170 622 6
5	南京东路—陆家嘴	2 号线	0.168 352 2

此外,还可以统计得到整个线网的评价指标。这些数据表明,2008 年上海轨道交通线网在整体上是令人满意的(见表 3)。

表 3 线网评价指标

平均最短距离	全局有效性	平均换乘次数
13.53 站	0.123	1.38

为实现新建线路的计算分析,在上述线网条件下新增一条 7 号线,并完善 2、8、9 号线的其他站台,形成新的轨道交通线网,然后将其映射为线网拓扑结构(见图 2),其中共包含 9 条线路、233 个节点、268 条边。

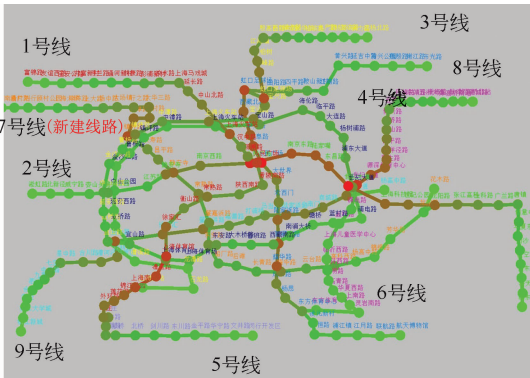


图 2 新建 7 号线网络介数密度

经过计算,得到线网中较大的节点介数和边介数,如表 4、5 所示。和 2008 年线网相比,各个关键车站的节点介数都有所下降:世纪大道站从 0.33 下降为 0.31,人民广场从 0.37 降为 0.32,同时由于 7 号线的



加入,原先镇坪路站由原 2 线共线变为 3 线换乘,车站的介数增加,车站的重要性也随之上升,这点在表 4 的节点介数中可以看出。边介数方面,由于 7 号线和 9 号线的加入,缓解了 1 号线人民广场到上海南路的压力,但是对 2 号线世纪大道到人民广场和 1 号线人民广场到上海站的路段介数没有显著的影响。另外,从网络拓扑结构中可以看出,7 号线和 1、2、3、4、6、8、9 号线均有换乘,且大都是多线两站换乘,表明 7 号线的修建对上海轨道交通网络的形成具有积极重要的影响。从这个案例可以看出,在新建线路的规划中,应当避免同站多线换乘,鼓励多站双线换乘,并尽量使线路穿过边介数较大的区段,缓解网络的整体压力。

表 4 节点介数

排序	车站名称	线路	节点度	节点介数
1	人民广场	1、2、8 号线	3	0.322 184 4
2	世纪大道	2、4、6、9 号线	4	0.312 028 3
3	上海火车站	1、3、4 号线	3	0.214 462 8
4	镇坪路	3、4、7 号线	3	0.206 600 6
5	虹口足球场	3、8 号线	2	0.202 956 2

表 5 边 介 数

排序	边名称	线路	边介数
1	上海体育馆—漕宝路段	1 号线	0.142 888 9
2	漕宝路—上海南路段	1 号线	0.135 711 1
3	人民广场—南京东路段	2 号线	0.131 141 8
4	曲阜路—人民广场段	8 号线	0.129 513 8
5	源深体育中心—世纪大道段	6 号线	0.128 459 4

同样,可以得到修建后的网络评价指标,平均最短距离增加到 13.63 站,平均换乘次数增加到 1.43,全局网络有效性稍微降低到 0.119。这说明,新建 7 号线后,整个线网的长度增加,线网的换乘比例增大,但是网络整体的鲁棒性有所降低(见表 6)。

表 6 网络评价指标

平均最短距离	全局有效性	平均换乘次数
13.63 站	0.119	1.43

4 结语

笔者从复杂网络拓扑特征方面对轨道交通网络进行评价分析,为轨道交通网络的新建线路评价打下了基础。下一步需要研究的内容是网络中车站间区段权重的取值选择,包括换乘惩罚效应、网络级联失效中 3 种不同去除策略(流量去除、介数去除和混合去除)的选取对新建线路评价的差异等。

参考文献

[1] 沈波,刘云.城轨网络对北京公共交通的影响研究[J].都市快轨交通,2008,21(1):34-36,43.

[2] 顾前,杨旭华,王万良,等.基于复杂网络的城市公共交通网络研究[J].计算机工程,2008,34(20):266-268.

[3] Sienkiewicz J, Holyst J A. Public transport system in Poland: from Bialystok to Zielona Gora by bus and tram using universal statistics of complex networks[J]. Physics, 2005, 99(3): 1771-1778.

[4] Sen P, Dasgupta S, Chatterjee A, et al. Small world properties of the Indian railway network[J]. Physical Review, 2003, 67(3):1-5.

[5] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small world network[J]. Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, 2002, 314:109-113.

[6] 陈菁菁.基于复杂网络的城市轨道交通网络可靠性研究[J].都市快轨交通,2010,23(2):18-21.

[7] 王焱,杨超.上海市轨道交通网络的复杂网络特性研究[J].城市轨道交通研究,2009,12(2):33-36.

[8] 王志强,徐瑞华.基于复杂网络的轨道交通路网可靠性仿真分析[J].系统仿真学报,2009,10(21):6670-6674.

[9] 王云琴.基于复杂网络理论的城市轨道交通网络连通可靠性研究[D].北京:北京交通大学,2008:34-35.

[10] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J. Effects of the cascading failures on scale-free traffic networks[J]. Physica A, 2007,387:505-511.

(编辑:郭洁)

Evaluation of Rail Network and Lines Based on Complex Network Indexes

Li Wei

(School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804)

**Abstract:** This paper presents several statistical indicators of complex network. Based on the theory, the influence of new lines on the whole network was analyzed, such as decrease in network anti-aggression caused by increase in degree and intensified cascading failure phenomenon caused by increase in betweenness. A model about auxiliary decision for building new lines was designed by adopting statistics of degree and betweenness. Conclusions were summerized according to Shanghai urban rail transit in 2008 that new lines should avoid crossing the hub of the whole network, and also that three or more lines should not converge into one station to balance the pressure in the whole network.

**Key words:** urban rail transit; complex network index; network; new lines; evaluation