

城市轨道交通网络的拓扑结构分析

高天智¹, 陈宽民¹, 李凤兰²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 河南省城乡规划设计研究总院有限公司, 河南 郑州 450044)

摘要:基于图论及复杂网络理论,选取中国 10 个典型城市的轨道交通网络结构,并对其网络拓扑结构进行分析,其中将复杂度、连通度及其延伸性作为宏观特性表征指标,度、度分布、最短路径长度及其分布、聚类系数作为微观特性表征指标,网络稳定性则以网络效率和最大联通子图作为表征指标。研究表明:中国轨道网络的宏观特征为大部分城市的轨道网络处于初期发展阶段,节点的三角形布局形式及大型换乘站设置对轨道网络的整体效率有显著影响;中国轨道网络微观特性为城市轨道网络具有无标度及小世界的特性,大型换乘站点是影响轨道交通发展模式的核心要素;轨道交通网络在应对随机攻击时稳定性较强,但应对蓄意攻击时稳定性相对较弱,仅通过改变轨道网络规模无法显著提高其整体稳定性,大型换乘站对增强网络的稳定性同样具有重要作用。

关键词:交通工程;轨道交通网络;无标度网络特性;小世界网络特性;稳定性

中图分类号:U231;U491

文献标志码:A

Topology analysis of urban rail transit network

GAO Tian-zhi¹, CHEN Kuan-min¹, LI Feng-lan²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Henan Urban Planning Institute & Corporation, Zhengzhou 450044, Henan, China)

Abstract: Based on graph theory and complex network theory, ten typical cities urban rail transit network in China were selected, and their topology characteristics were analyzed. And in which the complexity, connectivity, and extensibility of rail transit network were used to characterize the macroscopic traits, network degree, distribution of network degree, length of the shortest path and its distribution, and clustering coefficient were considered as the microscopic trait variables, and network efficiency and the maximum connection sub-graph were chosen as the stability index. The results show that the rail transit network in most cities of China were in the primary stage of development, and the “triangle” structure and large transfer station contributed significantly to the efficiency of the whole network. In view of the macroscopic characteristics, the structure of the transit network studied had scale-free and small-world network features, and the large transfer stations were the key factor that affected the development pattern of the network. While analyzing the network stability, it can found that rail transit network stable while dealing with random attacks, but becomes weak in deliberate attacks, so it is nearly

收稿日期:2018-01-21

基金项目:中国博士后科学基金项目(2016M590915);陕西省交通科技项目(14-29R);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821172002,310821172201);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JM5013)

作者简介:高天智(1979-),男,辽宁盖州人,讲师,工学博士研究生,E-mail:gaotz06@chd.edu.cn。

通讯作者:陈宽民(1957-),男,河南灵宝人,教授,博士研究生导师,E-mail:chenkm@yeah.net。

impossible to improve the network stability by increasing its size. The large transfer station can also help improve the stability of the entire rail transit network. 6 tabs, 12 figs, 27 refs.

Key words: traffic engineering; rail transit network; scale-free network; small world network; stability

0 引言

城市轨道交通具有便捷、高效、环保等优点,成为中国各大城市缓解交通拥堵、治污减霾战略的首选,但不同城市轨道交通网络的结构特征差异较大,运输效率也不尽相同,因而针对城市轨道交通网络结构分析其拓扑结构特征至关重要,其理论基础为图论和复杂网络理论。

在图论理论早期研究方面,学者主要将其与轨道网络特征结合来确定分析指标,进而分析其拓扑结构^[1-3]。Daganzo 根据轨道网络形态,将其分为棋盘、放射及混合形,通过分析各类网络的形态特征,证实了混合形网络可达性最优^[4]。换乘站作为 2 条甚至多条线路的交点,对网络结构至关重要,诸多研究者将网络抽象为换乘站和起始站的结构模型,并提出分析指标,给出每类网络的特点^[5-6]。何宁等通过分析 5 个城市的轨道网络拓扑结构,归纳总结了其结构特性和演化规律,并将其用于南京地铁网络的方案比选中^[7]。

在复杂网络方面,目前主要是通过构建地铁网络的 P 空间或 L 空间模型,统计网络的度及其分布、最短路径及其分布和聚类系数 3 种指标,并对指标进行分析,研究发现地铁网络具有小世界特性^[8-12]。有学者通过构建广州地铁网络的 L 空间模型,并对其复杂网络的基本指标进行统计分析,结果表明广州地铁网络具有随机网络的特性^[13-14],但以上研究均基于某一城市轨道网络,其结果有一定局限性。Sienkiewicz 等构建了 22 个城市公交网络的 P 空间模型,发现绝大多数公交网络表现出显著的无标度特性和小世界特性,且有 15 个城市的累计度分布指数不小于 3^[15]。随着对复杂网络在地铁网络等抽象网络方面中应用研究的逐步深入,有学者发现小世界网络特性有重要理论价值^[16]。耿丹阳等通过将深圳轨道交通运营网络、2020 年和 2030 年规划网络与东京网络对比,发现深圳规划网络尚有诸多值得进一步改进完善的地方^[17]。

随着轨道交通网络规模的逐步增大,其在城市交通中的地位愈发举足轻重,车站或线路偶然失效会致使整个城市交通系统瘫痪,故轨道网络的抗毁

性即稳定性显得尤为重要。网络的稳定性是在研究互联网时首次被提出,通过使网络部分节点失效,统计分析其指标变化情况^[18]。Angeloudis 等通过分析大规模的地铁网络,得出连通度高且平均度较低的网络受到蓄意攻击时,稳定性高于无标度网络,且规模相当的网络,其专线网络的稳定性高于共线网络^[19]。已有研究结果均表明,城市轨道交通网络在部分站点失效后仍能保持其原功能,在受到随机攻击时稳定性较强,受到蓄意攻击时其稳定性较弱^[20-22]。

由以上文献可知,轨道网络的拓扑结构对于轨道运营的成本和换乘效率有重要影响。为了进一步分析网络结构的特征,本文选取了中国 10 个城市(有 3 条以上的轨道交通网络)的网络结构,分析其网络特性指标,并对网络稳定性进行讨论,以便从网络形态与结构 2 个层面对中国城市轨道交通网络的规划建设提供技术依据。本文所研究的城市轨道交通网络只包括地铁和轻轨,其他形式的城市轨道交通不包括在内。

1 轨道交通网络结构分析

目前,中国城市轨道交通快速发展,一些大城市轨道交通建设已经形成网络,然而,其规划技术还有一些容易忽略的问题:如在规划过程中以定性为主、量化水平分析不足;在网络简化过程中容易忽略网络特征,对网络本身的拓扑结构分析不足等,与轨道交通网络的高速发展不相匹配。本文从宏观和微观两方面构建基于拓扑结构的网络分析指标体系,将图论的相关理论在轨道交通发展中应用,梳理轨道交通发展的一般规律。为此,构建轨道交通网络结构分析的指标体系如图 1 所示。

本文结合图论构建了基于拓扑结构的轨道交通网络分析指标体系,从宏观、微观和稳定性方面对轨道交通网络发展程度、形态和效率提出量化分析指标,结合实例数据,对这些指标进行计算,寻找轨道交通网络发展的一般规律,为中国城市轨道交通规划建设提供参考及建议。

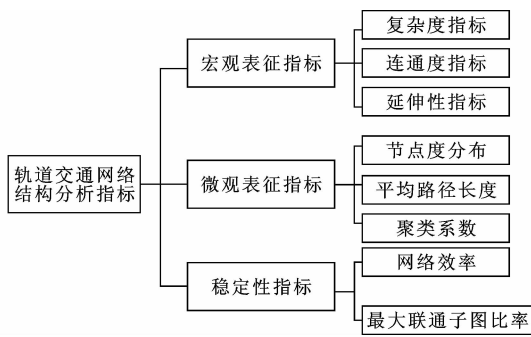


图 1 轨道交通网络结构分析指标

Fig. 1 Analysis indexes of rail transit network structure

2 轨道交通网络结构分析指标

采用图论对轨道交通网络进行简化,即以车站作为网络节点、以区间线路作为网络的边,构建轨道交通网络拓扑结构 space-L 模型,包括宏观和微观 2 个层面的表征指标。

2.1 宏观表征指标

城市轨道交通网络宏观表征指标反映网络整体发展程度及模式:发展程度指网络发展的阶段,其指标为复杂度 β 和连通度 γ ^[2];发展模式与城市发展策略相关,其指标为延伸性指标 η ,对于轨道网络而言,其规模可用车站数量表征,同时城市发展状况亦可推动网络规模的发展,故需结合车站和区间线路 2 种因素综合分析。

2.1.1 复杂度 β

不同轨道网络节点数不同,为便于比较,引入量化指标复杂度 β ^[1],即网络的实际边数 e 与网络内车站数量 N 之比,有

$$\beta = \frac{e}{N} \quad (1)$$

2.1.2 连通度 γ

指标连通度 γ 定义为轨道网络的实际边数 e 与网络理论最大边数 e_{\max} 的比值^[1],计算式为

$$\gamma = \frac{e}{e_{\max}} = \frac{e}{3N-6} \quad (2)$$

显然, $\gamma \in (0, 1)$, 对既定轨道网络来说, γ 值和网络的发展程度成正比关系, γ 越大网络的发展程度相对越高, 乘客出行越便利。

2.1.3 延伸性指标

本文将网络的延伸性指标(发展模式指标)定义为半径的平方与网络规模的比值,计算式为

$$\eta = \frac{R^2}{N} \quad (3)$$

式中: R 为轨道网络辐射半径, $R = \min\{d_i\}$, $d_i =$

$\max\{d_{ij}\}$, d_{ij} 为地铁网络中从车站 i 到达车站 j 要经过的区间数。

2.2 微观表征指标

2.2.1 节点度 k_i 、度分布 $P(k)$

节点度 k_i 指与该节点相连接的边数,而网络平均度 K 则指轨道网络中所有节点度的均值。若网络 G 的结构矩阵记为 $\mathbf{a}_{ij} (N \times N)$, 则节点度 k_i 与网络平均度 K 满足

$$k_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (4)$$

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (5)$$

且 K 与网络中边数 e 符合以下关系

$$K = \frac{2e}{N} \quad (6)$$

度分布 $P(k)$ 表征轨道网络的基本拓扑特征,其实质为节点度 k_i 的概率分布函数,表示节点 i 处有 k 条连接边的概率,其值等于节点度为 k_i 的节点数与网络内所有节点的数量之比。

2.2.2 平均路径长度 L_{APL}

平均路径长度 L_{APL} 为轨道网络中所有节点对间最短距离的平均值,其中,最短距离是网络中的节点 i 到节点 j 所需要经过的最小边数,其所有节点对间最短距离的最大值就是网络的直径,即

$$L_{\text{APL}} = 1 + \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V} d_{ij} \quad (7)$$

式中: V 为网络中节点的集合。

2.2.3 聚类系数 C_i

聚类系数 C_i 表征轨道网络节点间联系的密切程度。若节点 i 有 k_i 个节点与之直接连接,假设与节点 i 相连的所有 k_i 个节点间又两两相连,那么这些相邻节点间共有 $\frac{1}{2}k_i(k_i-1)$ 条边,此情况下网络边数最多。但实际轨道网络中,节点 i 的 k_i 个相邻节点间不一定两两相连,若仅有 e_i 条边互相连接,那么节点 i 的聚类系数即定义为其相邻节点间的边数 e_i 与最大连接边数的比值

$$C_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i-1)} \quad (8)$$

当节点 i 的度为 1 或 0 时, $C_i = 0$; 当节点 i 的 k_i 个节点间互相连接时, $C_i = 1$; 当节点 i 的 k_i 个连接点间无连接时, $C_i = 0$ 。

地铁整个网络的聚类系数 C 就是全部节点即站点的聚类系数的平均

$$C=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^NC_i$$

(9)

2.3 稳定性指标

2.3.1 网络效率 $E(G)$

网络效率 $E(G)$ 是衡量轨道网络不同节点间信息传输的效率^[23],体现了网络的整体连通性,其满足

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

(10)

式中: \in_{ij} 为节点 i,j 间的效率函数,其值为节点 i,j 间最短路径 d_{ij} 的倒数; G 为网络,对于某一轨道网络而言,存在 $N(N-1)$ 个节点对,故节点对间的效率均值即为该网络的效率。

本文定义 E 为衡量轨道网络受到攻击后网络效率的变化情况, E 越小表示攻击对网络效率的影响越大。本文中所提到的攻击指的是轨道交通中的节点即车站失效,不能正常运营,即

$$E=\frac{E'(G)}{E(G)}$$

(11)

式中: $E'(G)$ 为网络受攻击后的效率。

2.3.2 最大联通子图比率 C_{LCC}

轨道网络被攻击后被分成 2 个或多个子网络,且彼此间不连通,其中面积最大者为最大联通子图,反映了该网络的整体连通性强弱。最大联通子图比率定义为网络受到攻击后的最大联通子图的节点数与初始节点数的比值,即

$$C_{LCC}=\frac{S}{S_0}$$

(12)

式中: S 为网络受到攻击后最大联通子图的节点数; S_0 为网络初始节点数。

3 典型城市轨道网络特征分析

3.1 宏观特征

截至 2017 年底,中国已有 34 个城市开通轨道交通并投入运营,轨道交通通车里程达到了 3 884 km。目前,大多数城市还处于轨道交通线路建设发展中,还没有形成网络,为了更好地分析轨道交通网络的拓扑结构,进一步说明其网络特性,本文选择了中国 10 个典型城市的数据进行分析,这 10 个城市中,通车的地铁线路均在 3 条以上,通车里程最大的为上海,为 617 km,最小的为杭州,通车里程 82 km。将这 10 个典型城市的轨道交通网络进行

拓扑结构分析,将拓扑结构矩阵 a_{ij} 输入 Pajek 软件得到基本指标。其中, N_L 为线路的数目, L_n 为换乘站点数, D 为网络的直径, Γ 为连通度。根据式(1)~式(11)计算各评价指标,如表 1 所示。

表 1 中国典型城市轨道交通网络的拓扑结构宏观表征指标

Tab. 1 Macroscopic indexes of urban rail transit networks in China

城市	基本指标					发展程度指标		发展模式指标
	N_L	N	L_n	e	D	β	Γ	η
北京	18	291	54	325	49	1.12	0.37	1.38
上海	14	304	51	347	41	1.14	0.38	2.06
广州	10	163	24	177	46	1.09	0.37	1.84
深圳	8	166	28	190	35	1.14	0.39	2.25
武汉	5	123	12	130	32	1.06	0.36	2.28
南京	7	128	10	132	44	1.03	0.35	3.36
天津	5	104	7	107	35	1.03	0.35	4.22
重庆	4	120	9	123	45	1.03	0.35	2.54
成都	4	81	6	83	32	1.02	0.35	2.46
杭州	3	50	5	49	37	0.98	0.34	6.85

3.1.1 发展程度分析

由 10 个典型城市的轨道网络边数与站点数间关系的回归结果可知:

中国城市轨道网络边数与车站数基本成正比关系,每增加 1 个车站,网络中会相应增加 1.18 条连接边。将式(1)进一步拓展, $\beta=\frac{e}{V}=\frac{aN-b}{N}=a-\frac{b}{N}$,其中, V 为网络中站点的数目, $a、b$ 为与网络边数相关的参数。可知,随着网络规模增大,即 N 足够大时, β 将趋近于常数 a ,本研究中 β_{\max} 趋近于 1.18。对于平面网络,理论上 e_{\max} 等于 $3N-6$,所以由式(1)可知, β_{\max} 理论上应趋近于 3,表明此 10 个典型城市的轨道网络整体上较为稀疏。

轨道网络复杂度随着网络规模的扩大逐步增长,网络整体发展水平提高。北京、上海的城市轨道网络规模大于日本东京的,基本与法国巴黎的相当,但其网络复杂度均小于这 2 个典型国际化大都市的,说明中国城市轨道交通的网络化建设仍有较大提升空间。

由式(2)可知, $\gamma=\frac{e/V}{3-6/V}=\frac{\beta}{3-6/V}$,随着轨道网络规模扩大,其连通度趋近于 0.39,即占平面完全图的 39%,其原因可能是轨道网络建设成本较高,规划设计阶段倾向于利用较少的边来保证整个网络的连通性。

一般来说城市轨道交通网络的发展过程可划分为 4 个阶段^[24],如表 2 所示,若 β 、 γ 两个指标都在分界线上则属于后一个阶段。图 2 给出了中国典型城市轨道交通网络拓扑结构发展与东京、巴黎发展状况的比较结果。

表 2 城市轨道交通网络发展的 4 个阶段

指标	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	第 4 阶段
β	(0.98,1.07]	(1.07,1.13]	(1.13,1.18]	(1.18,1.22]
γ	(0.34,0.36]	(0.36,0.38]	(0.38,0.40]	(0.40,0.42]

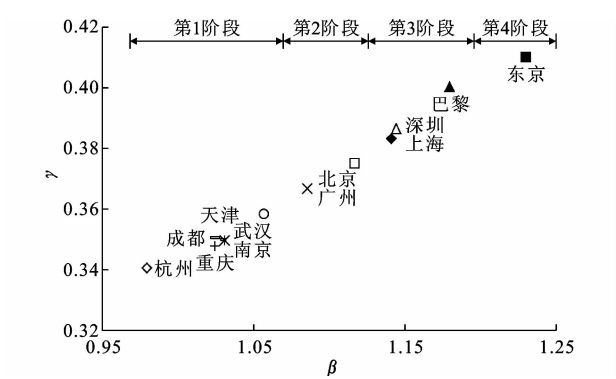


图 2 中国典型城市轨道交通网络拓扑结构与东京、巴黎发展状况的比较

Fig.2 Topological structure development comparisons between typical urban rail network in China and Tokyo and Paris

由图 2 可知,东京的城市轨道交通处于第 4 阶段,尽管其整体网络规模不大,但密集程度高,其网络带动了整个大东京地区的快速发展。深圳与上海的地铁网络的发展阶段为第 3 阶段,发展程度相对较高,广州与北京的地铁网络发展程度处于第 2 阶段,网络复杂度和连通度均都有明显提高,闭合回路初步形成,边数随着节点数增加而快速增长,速率为 1.12。天津、成都、武汉等仍处于第 1 阶段,网络规模较小,站点总数少于 100,连通度和复杂度分别集中于 0.35 和 1 左右,原因在于其轨道网络换乘站较少,致使连通度和复杂度较低。

深圳轨道网络规模远小于北京,但其发展水平高于北京,因其网络体系中存在一定数量的大型换乘站点,且线路间形成大量的三角形结构。东京、巴黎的轨道网络中同样设置了大量多线相交的大型换乘站,提高了网络的整体连通度。部分轨道换乘站与铁路车站有机结合,共同服务于城市副中心。通过计算可以看出,这 10 个城市的网络复杂度和连通度分别趋近 1.18 与 0.39,表明中国大部分城市的轨道网络目前还处于发展的初级阶段,其城市网络的发展战略分为区域通达型和中心密集型,今后应

借鉴较为成熟网络的构架,加强车站及其线路间的连接。

3.1.2 发展模式指标

城市轨道交通的发展模式受到如城市居民的出行特征、地理条件、城市发展空间特征等因素的影响,一般来说城市轨道交通网络的发展模式可以分为整合型、中心密集型、区域通达型,其对应的指标与特点如表 3 所示。中国各城市对应的类型如图 3。

表 3 各类型网络指标及特点

类型	规模	η	特点
区域通达型	$N < 145$	> 3.16	优先将城市的各区域联系起来
中心密集型	$N < 145$	< 2.67	强调对市中心的服务
整合型	$N > 145$	$1.21 \sim 2.81$	整个城市的网络构架已形成

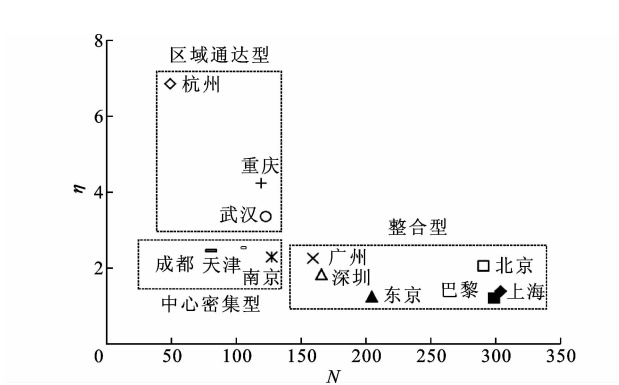


图 3 样本城市轨道交通网络拓扑结构所属发展类型

Fig.3 Development patterns of urban rail networks

由图 3 可知:北京、上海、广州、深圳已经发展为较为成熟的整合型网络;重庆、杭州、武汉网络的发展模式为区域通达型,这是因为这几个城市的发展策略为多中心发展,所以为了适应其城市发展策略,轨道交通要优先将各中心连接起来,从而致使网络中线路长度较长,延伸性较高,换乘站特别是大型换乘站所占比例较低;南京、天津、成都网络的发展模式为中心密集型,由城市的轨道网络及其发展布局可以看出,其先在市中心成网且城市布局一般为首先单中心发展,然后逐渐向外扩张。

对于所有城市轨道交通来说,其最终目标都是整合型网络,从而满足各个圈层的居民出行。东京作为圈层特性最为显著的城市,可以借鉴其网络的构建形式:市郊铁路与地铁相互配合;大小交路与支线适当设置。

3.2 微观特性

3.2.1 网络平均度 K 、度分布 $P(k)$

表 4 给出了轨道网络拓扑结构的微观特征分析

结果。

表 4 中国典型城市轨道交通网络的拓扑结构微观特征指标

Tab. 4 Microscopic indexes of urban rail transit networks in China

城市	微观特征		
	K	C	L_{APL}
北京	2.23	0.006	15.63
上海	2.29	0.009	14.99
广州	2.17	0.000	13.75
深圳	2.29	0.003	14.50
武汉	2.11	0.004	12.97
南京	2.06	0.000	15.10
天津	2.06	0.000	12.13
重庆	2.05	0.000	13.66
成都	2.05	0.000	11.61
杭州	1.96	0.000	13.27

由表 4 可知,网络平均度集中在 1.9~2.3,与 Roth 等的研究结果一致^[25]。轨道线路的平均路径长度在 11~15,表明从网络某一站点到任意其他站点需历经 11~15 个车站。

图 4 给出了中国 10 个典型城市轨道交通网络的度分布情况。可见,中国地铁网络的拓扑结构的度分布趋近于泊松分布,度较大的节点比较少,即大型换乘站较少。

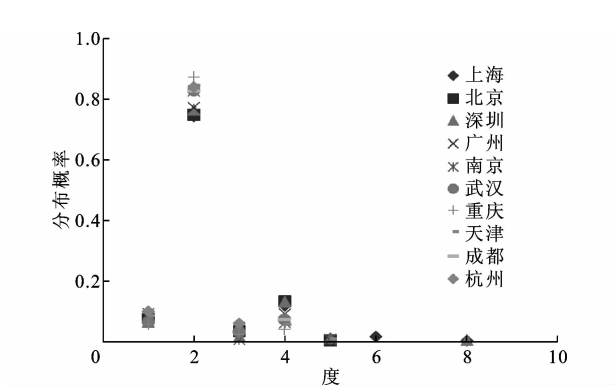


图 4 中国典型城市轨道交通网络拓扑结构的度分布统计

Fig. 4 Distributions of topological structures of typical urban rail networks in China

假定城市轨道交通网络站点累计度的分布符合幂指数函数形式,拟合结果见表 5。图 5 给出了中国典型城市轨道交通网络累计度分布与幂函数对比结果。

由表 5、图 5 可见,轨道网络站点的幂指数函数分布并不显著,且度为 1 的站点对函数拟合效果有较大影响,故把此站点舍弃,重新拟合。

由表 5 可知,经过幂率截尾后幂函数拟合优度在 0.9 以上,表明轨道车站的累计度分布尾部呈幂率分布,也再次验证了中国城市轨道交通网络具有

无标度特性^[26]。图 6 给出了中国典型城市轨道交通网络的幂率截尾示意, x 、 x_1 均为拟合变量。

表 5 中国典型城市轨道交通网络站点累计度的分布

Tab. 5 Distributions of cumulative degrees of urban rail networks in China

城市	优化前		优化后	
	拟合函数	拟合优度	拟合函数	拟合优度
北京	$2.537x^{-2.957}$	0.667	$54.762x_1^{-4.415}$	0.900
上海	$2.653x^{-2.742}$	0.865	$21.483x_1^{-3.859}$	0.944
广州	$2.277x^{-2.825}$	0.746	$34.407x_2^{-4.225}$	0.925
深圳	$2.259x^{-2.624}$	0.857	$16.176x_2^{-3.915}$	0.935
武汉	$1.488x^{-3.051}$	0.784	$10.685x_2^{-5.787}$	0.917
南京	$2.047x^{-2.869}$	0.807	$21.790x_2^{-4.496}$	0.915
天津	$2.026x^{-2.781}$	0.818	$17.509x_2^{-4.508}$	0.911
重庆	$1.633x^{-3.489}$	0.781	$18.624x_2^{-5.876}$	0.921
成都	$1.491x^{-1.877}$	0.780	$9.2707x_2^{-4.723}$	0.929
杭州	$1.494x^{-3.301}$	0.643		

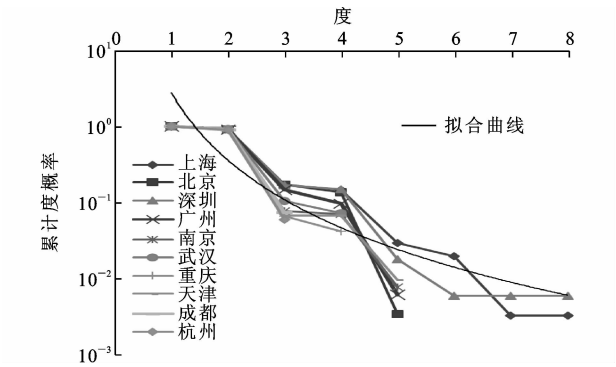


图 5 中国典型城市轨道交通网络累计度分布与幂函数对比

Fig. 5 Comparisons of cumulative distributions and power function of typical urban rail networks in China

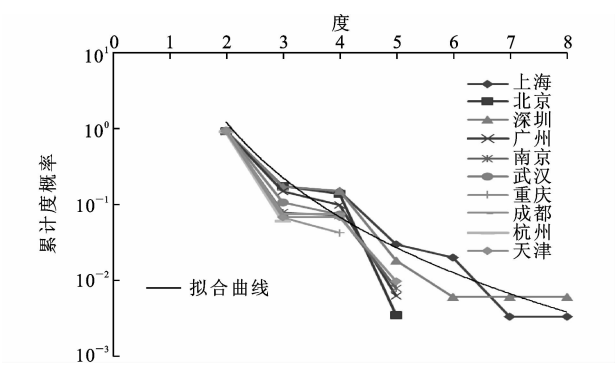


图 6 城市轨道交通网络拓扑结构的幂率截尾示意

Fig. 6 Power rate of topological structure of urban rail transit networks

显然,幂指数 λ 决定了幂率分布的尾部缓和程度, λ 越大其尾部下降速度越快,表明具有较高度值的车站数越少。表 6 给出了各轨道网络换乘站所占的比例与优化后幂指数的对应关系。

表 6 中国典型城市轨道交通网络换乘站比例与幂指数
Tab. 6 Ratios and power indexes of urban rail networks in China

城市	N	换乘站比例/%				幂指数
		两线	三线	四线	合计	
北京	291	18.22	0.34		18.56	4.415
上海	304	13.93	2.55	0.30	16.78	3.859
广州	163	14.11	0.61		14.72	4.225
深圳	166	15.67	1.20		16.87	3.915
武汉	123	9.76	0.00		9.76	5.787
南京	128	7.03	0.78		7.81	4.496
天津	104	5.77	0.96		6.73	4.508
重庆	120	7.50			7.50	5.876
成都	81	7.41			7.41	4.723

由表 6 可知,随着网络规模增大,其幂指数逐步下降,且 λ 值与网络发展程度相关,而同等网络规模时,网络发展程度越高,换乘站比例越大, λ 值越小。 λ 值与网络的发展模式有一定关系,中心密集型网络,强调在中心集中换乘,度较大的站点所占比例较高,其 λ 值较小,由此可看出,换乘站也是网络发展模式的影响因素。因此,网络规划阶段应多设置换乘站,适量设置多线换乘。

3.2.2 平均路径长度 L_{APL} 、聚类系数 C

由表 4 可知,地铁网络的平均路径长度并不符合直观认知,网络规模越大其平均路径长度也会随之增大,其最短路径长度分布如图 7 所示。

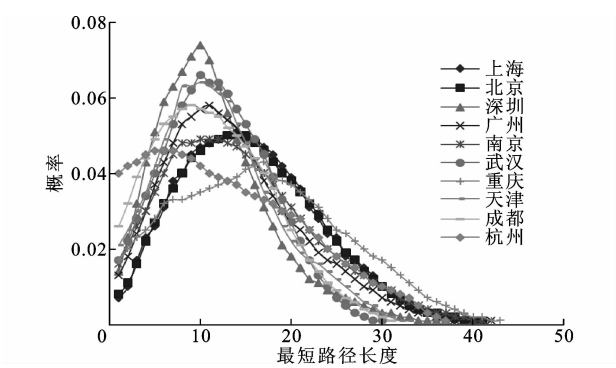


图 7 中国典型城市轨道交通网络拓扑结构的最短路径长度分布
Fig. 7 Distributions of shortest path length of urban rail networks in China

由图 7 可以看出,城市轨道交通网络接近小世界网络的特性^[27],即平均路径长度会随着网络规模的对数呈线性增长。

城市轨道交通网络拓扑结构因为网络的平面特性,相同规模的小世界网络的 L_{APL} 小于轨道网络,但 2 种网络的变化规律相似。图 8 给出了按小世界网络布局的中国典型城市轨道交通网络拓扑结构。

由图 8 可知,随着网络规模增加,换乘站将网络

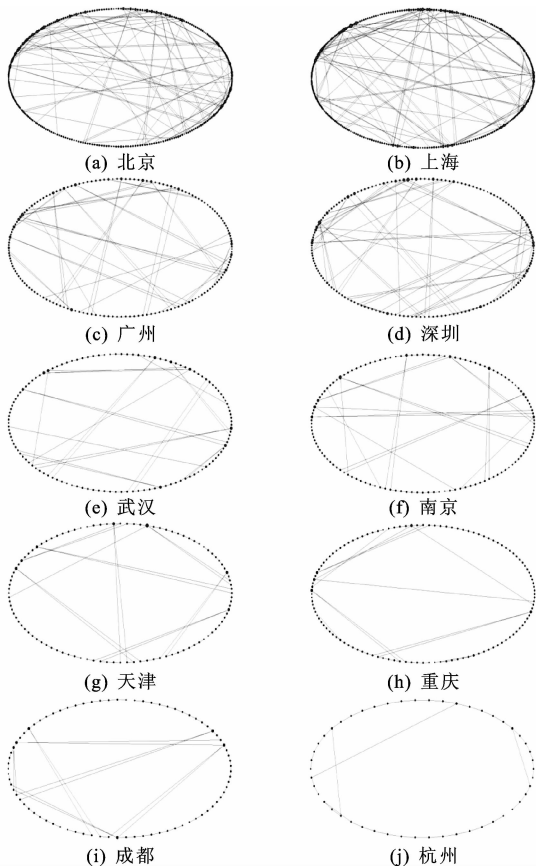


图 8 中国典型城市轨道交通网络的小世界布局示意

Fig. 8 Layout of small world of urban rail networks in China
中各站点间连通,使网络的结构功能得到实现,换乘站对提高网络整体效率意义重大。

城市轨道交通车站均依托线路设置,3 个相邻站点极少呈三角形布局形式,致使城市轨道交通的聚类系数大部分为 0,见表 4,但并不说明其聚类特征不显著^[27]。

3.3 稳定性

运用 Pajek 软件对所选择的 10 个典型城市的轨道网络拓扑结构进行随机攻击、蓄意攻击试验。本文中节点失效,即删除节点及其所连接的边。那么随机攻击就是无目标的删除,每次取 20 次删除的平均值作为其 1 次试验值,由于随机攻击指标变化较慢,需要试验的次数过多,所以设置当指标下降为 50% 时试验停止。而蓄意攻击则反之,有选择的对度最大的节点进行删除,若最大值相同则随机选取删除的点。

本文提出的这种攻击方式是在节点被破坏后一直处于失效状态的基础上进行的,以便观测其拓扑结构的稳定性,并统计网络效率变化率及最大连通子图比率的变化情况。

3.3.1 随机攻击

中国典型城市轨道交通网络在随机攻击状态下各指标变化如图 9、图 10 所示,失效比例即为受攻击节点的比例。

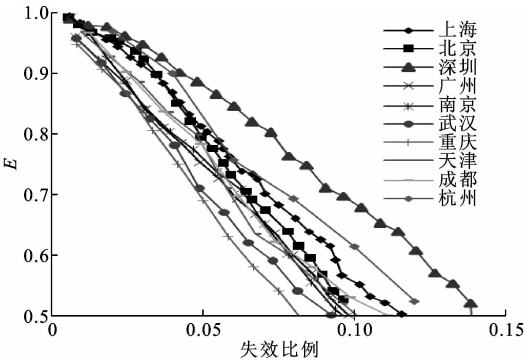


图 9 随机攻击状态下城市轨道交通网络结构效率

Fig. 9 Structural efficiencies of urban rail networks under random attack

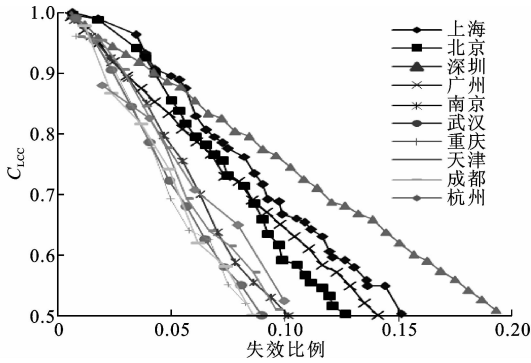


图 10 随机攻击状态下城市轨道交通网络最大连通子图比率

Fig. 10 C_{LCC} of urban rail networks under random attack

由此可见,城市轨道交通网络结构在随机攻击状态下稳定性良好。网络的结构效率变为原来的 50% 时,大部分网络的失效节点数为原始网络的 10%。当网络的连通度变为原来的 50% 时,网络中失效的站点数达原网络的 20%。这是因为地铁网络的平面性,小部分的节点被删除其对结构效率的影响要大于对连通性的影响。

轨道网络在随机攻击时的稳定性与其规模关系不大,但规模较大的轨道网络同样具有良好的整体稳定性。深圳市城市轨道交通网络的稳定性优于北京市,尽管其网络规模较后者要小,表明发展程度较高的轨道网络能增强其网络的整体稳定性。

3.3.2 蓄意攻击

中国典型城市轨道交通网络在蓄意攻击状态下各指标变化如图 11、图 12 所示。

由图可知,蓄意攻击时城市轨道交通网络的结构效率迅速下降,其特征值变为 0 时,删除的节点数仅为

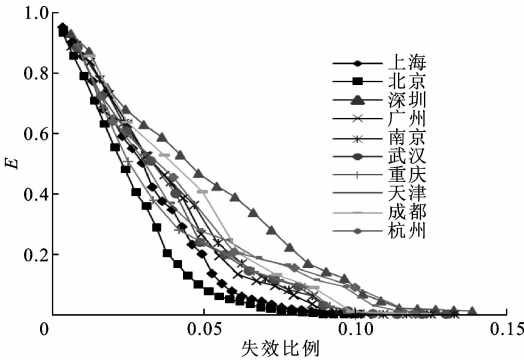


图 11 蓄意攻击状态下城市轨道交通网络结构效率

Fig. 11 Structural efficiencies of urban rail networks under deliberate attack

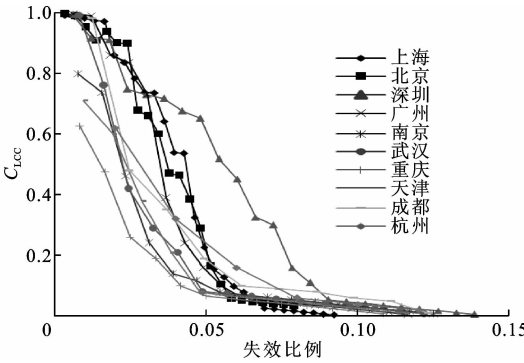


图 12 蓄意攻击状态下城市轨道交通网络最大连通子图比率

Fig. 12 C_{LCC} of urban rail networks under deliberate attack

原网络的 10%。在面对蓄意攻击时,网络的整体效率稳定性并没有随网络规模的增加而增强。如网络效率降低 50% 时,深圳市轨道网络移除 5% 的节点,而北京需移除 2.2% 的节点。

与轨道网络结构效率的变化类似,规模较小的网络在受到蓄意攻击时,其最大连通子图值迅速下降;但当网络规模较大时,由于其平面特性,当删除起初的几个节点时,最大联通子图值并没有明显的变化,当受破坏的节点数累积到一定数量时其最大连通子图值一样会快速降低,这意味着蓄意攻击同样对轨道网络完整性造成严重破坏。

4 结 语

(1)幂函数拟合优度在 0.9 以上,表明轨道车站的累计度分布尾部呈幂率分布,说明中国城市轨道交通网络拓扑结构具有小世界特性和无标度特性,对大型换乘站的态度是网络发展模式的影响因素;通过对中国 10 个典型城市轨道交通网络的度分布计算,发现其分布趋近于泊松分布,度比较大的节点比较少,即大型换乘站较少。

(2)选取中国 10 个典型城市的网络复杂度和连

通度分别趋近 1.18 与 0.39,表明中国大部分城市的轨道网络目前还处于发展的初级阶段,且城市网络的发展战略分为区域通达型和中心密集型,在今后的发展中应借鉴较为成熟的网络构架,加强车站及其线路间的连接。

(3)当网络的连通度变为原来的 50%时,网络中失效的站点数达原网络的 20%。表明城市轨道交通网络在受到随机攻击时具有较好的稳定性;受蓄意攻击时城市轨道交通网络的结构效率迅速下降,其特征值变为 0 时,删除的节点数仅为原网络的 10%,网络稳定性与网络的规模并没有直接关系。

(4)三角带区域、大型换乘站建设对网络的发展程度、发展模式及其稳定性具有重要的影响,在今后的网络规划中应做好换乘站的规划和预留。

(5)下一步将在网络拓扑结构的基础上引入客流的影响,对城市轨道交通网络的加权网络进行研究。

参考文献:

References:

- [1] GARRISON W L, MARBLE D F. Factor-analytic study of the connectivity of a transportation network [J]. Papers of the Regional Science Association, 1964,12(1):231-238.
- [2] VUCHIC V R, MUSSO A. Theory and practice of metro network design[J]. Public Transport International, 1991,40(3):91-98.
- [3] GATTUSO D, MIRIELLO E. Compared analysis of metro networks supported by graph theory[J]. Networks and Spatial Economics, 2005,5(4):395-414.
- [4] DAGANZO C F. Structure of competitive transit networks[J]. Transportation Research Part B, 2010,44(4):434-446.
- [5] DERRIBLE S, KENNEDY C. Characterizing metro networks: State, form, and structure[J]. Transportation, 2010,37(2):275-297.
- [6] 孙壮志. 城市轨道交通网络规划若干理论问题研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2002.
SUN Zhuang-zhi. Some theoretical problems in urban rail transit network planning [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2002.
- [7] 何宁,李杉. 城市快速轨道的网络分析和规划 [J]. 城市规划汇刊, 1997(3):59-63.
HE Ning, LI Shan. Network analysis and planning of urban express rail[J]. Urban Planning Review, 1997(3):59-63.

- [8] LATORA V, MARCHIORI M. Efficient behavior of small-world networks[J]. Physical Review Letters, 2001,87(19):18-23.
- [9] LATORA V, MARCHIORI M. Is the Boston subway a small-world networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2002,314(1/2/3/4):109-113.
- [10] SEATON K A, HACKETT L M. Stations, trains and small-world networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2004,339(3/4):635-644.
- [11] 刘锐,严宝杰,黄志鹏. 城市公共交通网络的复杂性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009,9(3):17-22.
LIU Rui, YAN Bao-jie, HUANG Zhi-peng. Complexity analysis of urban public transit network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009,9(3):17-22.
- [12] 赵伟,何红生,林中材,等. 中国铁路客运网网络性质的研究[J]. 物理学报, 2006,55(8):3906-3911.
ZHAO Wei, HE Hong-sheng, LIN Zhong-cai, et al. The study of properties of Chinese railway passenger transport network[J]. Acta Physica Sinica, 2006,55(8):3906-3911.
- [13] 刘志谦,宋瑞. 基于复杂网络理论的广州轨道交通网络可靠性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010,10(5):194-200.
LIU Zhi-qian, SONG Rui. Reliability analysis of Guangzhou rail transit with complex network theory [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010,10(5):194-200.
- [14] 吴璐. 广州轨道交通网络的复杂网络特性研究 [J]. 交通运输研究, 2011,21(12):118-122.
WU Lu. Characteristics of complex network in Guangzhou urban rail transit [J]. Transport Research, 2011,21(12):118-122.
- [15] SIENKIEWICZ J, HOLYST J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. Physical Review E, 2005,72(4):67-78.
- [16] CRUCITTI P, LATORA V, PORTA S. Centrality measures in spatial networks of urban streets[J]. Physical Review E, 2006,73(3):25-37.
- [17] 耿丹阳,郭兰兰,李博. 基于复杂网络理论的深圳和东京地铁网络系统对比分析[J]. 公路交通科技, 2015,32(8):126-132.
GENG Dan-yang, GUO Lan-lan, LI Bo. Comparative analysis of Shenzhen and Tokyo metro systems based on complex network theory[J]. Journal of Highway

- and Transportation Research and Development, 2015, 32(8):126-132.
- [18] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6794):378-382.
- [19] ANGELOUDIS P, FISK D. Large subway systems as complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2006, 367(3/4):553-558.
- [20] 何胜学, 范炳全. 从公交网络的生成机理看复杂网络的多样性[J]. 系统工程学报, 2007, 22(6):599-606.
HE Sheng-xue, FAN Bing-quan. From urban transit networks to various complex networks[J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 22(6):599-606.
- [21] 吴贤国, 黄艳华, 张立茂, 等. 地铁网络抗毁性优化分析[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(12):87-92.
WU Xian-guo, HUANG Yan-hua, ZHANG Li-mao, et al. Survivability optimization analysis of metro network[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(12):87-92.
- [22] 吴贤国, 黄艳华, 刘惠涛, 等. 基于复杂网络理论的地铁网络脆弱性分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 35(6):93-99.
- WU Xian-guo, HUANG Yan-hua, LIU Hui-tao, et al. Vulnerability analysis of subway network based on complex network theory[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2016, 35(6):93-99.
- [23] MUELKEN O, BLUMEN A. Efficiency of quantum and classical transport on graphs[J]. Physical Review E, 2006, 263(8):382-387.
- [24] 张晋. 城市轨道交通网络结构特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
ZHANG Jin. Structural characteristic studies of urban rail transit network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [25] ROTH C, KANG S M, BATTY M, et al. A long-time limit for world subway networks[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2012, 75(9):2540-2550.
- [26] BARABASI A, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439):509-512.
- [27] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684):440-442.

(上接第 96 页)

- [22] 刘燕, 秦焕美, 潘小松, 等. 北京市停车换乘需求调查与分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2011, 9(3):118-124.
LIU Yan, QIN Huan-mei, PAN Xiao-song, et al. Investigation and analysis of Beijing park & ride demand[J]. Journal of Transportation Engineering & Information, 2011, 9(3):118-124.
- [23] 云美萍, 刘贤玮, 陈震寰, 等. 通勤出行中停车换乘选择行为分析与建模[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(12):1825-1830.
YUN Mei-ping, LIU Xian-wei, CHEN Zhen-huan, et al. Analysis and modeling of park and ride choice behavior in commuting travel[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(12):1825-1830.
- [24] BUTTON K. The political economy of parking charges in "first" and "second-best" worlds[J]. Transport Policy, 2006, 13(6):470-478.
- [25] 李轶舜, 徐建闽, 卢凯. 区域拥挤收费与停车换乘的组合措施[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(10):100-104.
LI Yi-shun, XU Jian-min, LU Kai. Measures for combining area-based congestion pricing with park and ride[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(10):100-104.
- [26] JOHNSON E J, MEYER R J, et al. Compensatory choice models of noncompensatory processes: The effect of varying the context[J]. Journal of Consumer Research, 1984, 11(1):528-541.
- [27] 赵颢, 陆建, 张文珺, 等. Logit 模型下的道路拥堵收费策略改善效果分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3):80-85.
ZHAO Yi, LU Jian, ZHANG Wen-jun, et al. Improvement effect analysis of congestion pricing using Logit mode[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3):80-85.