

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201804083



西安公共交通系统的网络特性和鲁棒性分析

孙军艳¹, 牛亚儒¹, 吴冰莹¹, 都成明¹, 韩雯²

(1. 陕西科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 西安思源学院 商学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 基于复杂网络理论,构建西安市公交、地铁及两者综合构成的复合网络的 Space L 模型,对比分析 3 类网络的统计特性,并从蓄意攻击和随机攻击两方面对 3 类网络的鲁棒性进行对比评价.结果表明:3 类网络均不属于小世界网络,网络效率较低;地铁网的度近似服从泊松分布,公交网和复合网络的度服从幂律分布;地铁网的度和介数具有较强的正相关性,公交网则基本没有相关性,复合网络具有较弱的相关性;3 类网络对随机攻击具有较好的鲁棒性,对蓄意攻击表现出较大的脆弱性.

关键词: 公共交通系统; 复杂网络; 鲁棒性; Space L 模型; 西安市

中图分类号: U 491.17(41) 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2019)02-0148-08

Research on Complex Network Characteristics and Robustness of Xi'an City Public Transport System

SUN Junyan¹, NIU Yaru¹, WU Bingying¹,
DU Chengming¹, HAN Wen²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. School of Business, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The Space L model of subway network, bus network and bus-subway interdependent network of Xi'an City were established based on the complex network theory. The statistical characteristics of three networks were analyzed. The robustness of three networks were compared and evaluated from two aspects: deliberate attack and random attack. The results show that the efficiency of three networks is low and they don't belong to small-world network. The degree of subway network is approximately poisson distribution, and the degree of bus network and interdependent network conform to power-law distribution. The correlation between degree and betweenness of the subway network has a strong positive correlation, the interdependent network has a weak correlation, and the bus network is basically no correlation. Three networks have good robustness to random attacks, and show serious vulnerability to deliberate attacks.

Keywords: public transport system; complex network; robustness; Space L model; Xi'an City

收稿日期: 2018-04-25

通信作者: 孙军艳 (1978-), 女, 副教授, 博士, 主要从事供应链与物流系统的规划与优化、复杂系统的建模与仿真, 以及物流信息资源管理与信息系统的研究. E-mail: sunjunyan@sust.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072192); 陕西省科技计划项目(2013K07-08); 陕西省工业科技攻关项目(2018GY-026); 陕西科技大学博士科研启动基金资助项目(2018BJ-12); 国家级大学生创新创业训练计划项目(12145)

公共交通系统是由大量的停靠站点、运营线路构成的复杂网络. 公共交通网络站点间的连接密度(度分布)、站点间的运行时间(网络效率)、枢纽站点的影响评估(介数)等网络特性, 以及站点因突发事件停止工作后系统的运行能力(鲁棒性)同人们的日常生活息息相关, 是人们关注和研究公共交通的热点. Derrible 等^[1]分析了世界上 33 个城市地铁的网络特性, 指出小规模网络建立换乘站, 大规模网络在城市外围建设中转站可有效提高网络的鲁棒性. Wang 等^[2]设计 10 个指标综合评价地铁网络的整体鲁棒性, 研究表明东京地铁网的鲁棒性最好. Yang 等^[3]以北京地铁网络为例, 探讨随机故障和恶意攻击时地铁网络的鲁棒性. 曾小舟等^[4]对中国国内航空网络结构进行实证分析, 发现中国航空网络是一个小世界网络, 在介数与度的分布呈正相关趋势下, 会出现较大的波动性. 叶彭姚^[5]研究发现我国城市道路网的拓扑结构具有较小的平均距离和较大的聚类系数, 其度分布服从幂律分布, 具有小世界网络和无标度网络的特性. 余曼等^[6]基于 Space L 和 Space P 研究地铁网络的小世界、无标度及指数分布特性. 鲍登等^[7]研究地铁-公交复合网络的鲁棒性. 目前的公共交通网络研究^[1-10]多是针对某一类网络(如公交网、地铁网、航空网)进行分析, 却鲜有对各类网络进行综合比对分析. 西安市作为世界历史文化名城、“一带一路”重要门户和节点城市、国家重点建设的现代化生态化国际化大都市, 未来将在国家发展中担负更大责任、发挥更大作用. 因此, 有必要从宏观角度对西安的公共交通系统进行分析, 提出改善思路, 以适应城市未来的发展要求. 本文调研西安市内 154 条公交线路和 6 条地铁线路(2020 年规划线路)的运营情况, 构建西安市公交网(bus network, BN)、地铁网(subway network, SN)及两者综合构成的复合网络(interdependent network, IN)3 类网络模型, 并对 3 类网络的静态网络特性、度与介数的相关性, 以及网络的鲁棒性进行对比分析, 以期西安市公共交通网络的科学管理与优化提供理论依据.

1 模型的构建

采用 Space L 建模方法, 将公共交通网络的站点定义为网络的节点, 若相邻的两个站点间有一条线路经过, 则这两个节点间就存在一条连边. 通过调研西安市的 154 条公交线路及其 1 004 个站点、6 条地铁线路及其 129 个站点, 绘制地铁网络、公交网络及公共交通网络的线路图, 如图 1~3 所示. 通过 Pajek 软件绘出 3 类网络的拓扑图, 如图 4~6 所示.

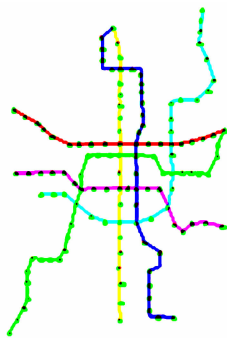


图 1 地铁网线路图
Fig. 1 Diagram of SN



图 2 公交网线路图
Fig. 2 Diagram of BN



图 3 复合网络线路图
Fig. 3 Diagram of IN

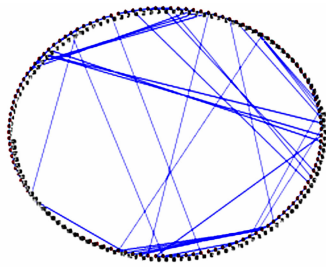


图 4 地铁网拓扑
Fig. 4 Topology of SN

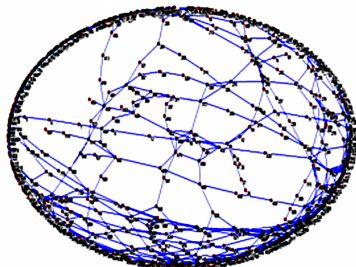


图 5 公交网拓扑图
Fig. 5 Topology of BN

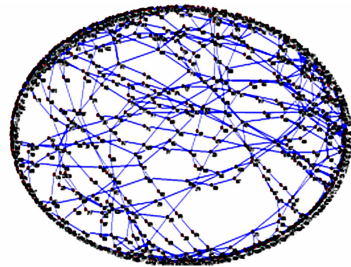


图 6 复合网络拓扑图
Fig. 6 Topology of IN

2 网络特性

2.1 交通网络统计特性

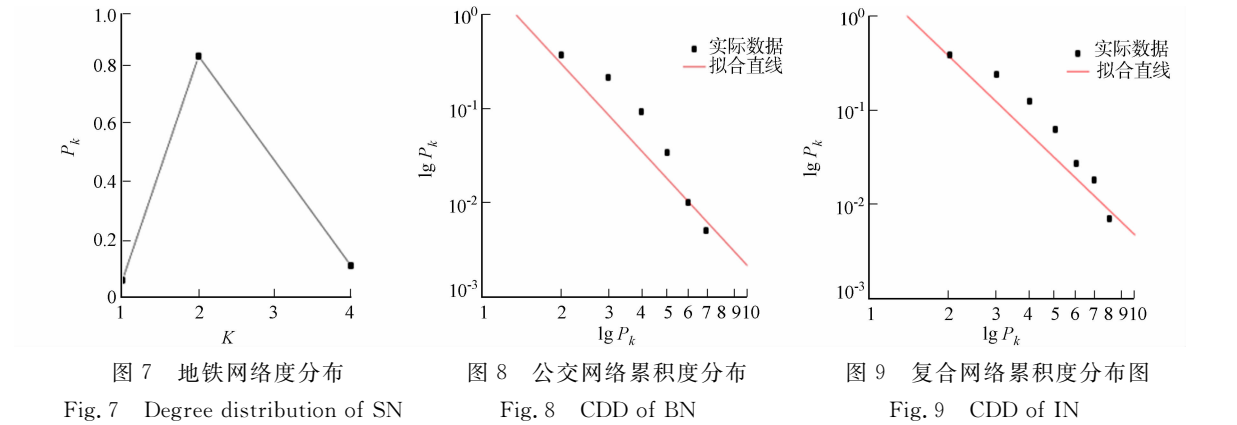
通过 Pajek 软件和 R 软件编程计算复合网络及其网的统计特性,如表 1 所示.由表 1 可知:3 类网络均有较大的平均路径长度、较大的网络直径、较低的网络效率和非常小的平均集聚系数,说明 3 类网络均不属于小世界网络.

表 1 3 类公共交通网络的统计特性
Tab. 1 Statistical characteristic of three networks

网络类型	节点数	边数	平均度	介数	集聚系数	平均 路径长度	直径	网络效率	度分布
地铁网络	129	270	2.155	0.082	0	11.418	35	0.133	近似泊松分布
公交网络	1 004	2 338	2.653	0.018	0.090	19.358	60	0.073	幂律分布
复合网络	1 041	2 491	2.782	0.105	0.105	14.588	49	0.090	幂律分布

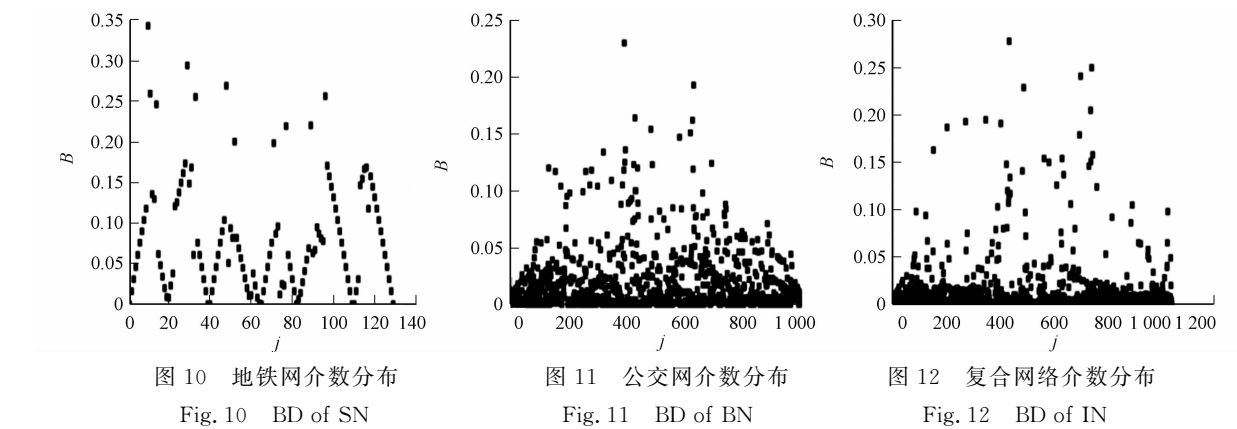
2.2 度或累积度分布

网络中节点的度值反映的是节点在网络中的重要程度,3 类网络的度或累积度分布,如图 7~9 所示.图 7~9 中: k 为节点; P_k 为概率.由图 7~9 可知:地铁网的度分布非常稀疏,近似于泊松分布形态.公交网及复合网络的累积度分布(cumulative degree distribution, CDD)近似为一条直线,符合幂律分布,即 $P_k = \sum_{x=k}^{\infty} P(x) \propto k^{-(\gamma-1)}$, 幂指数 γ 分别等于 3.079, 2.708, 属于无标度网络.



2.3 介数分布

节点介数反映节点在整个网络的作用和影响力,介数分布(BD)如图 10~12 所示.图 10~12 中: j 为节点; B 为节点介数.



由图 10~12 可知:地铁网节点的介数分布较分散,大多分布在区间 $[0, 0.2)$ 范围内,节点的重要性相对比较均匀;公交网和复合网介数分布则较集中,且数值偏小,多数节点介数分布在 $[0, 0.05)$ 之间,这

主要是因为公交网和复合网的规模较大, 累积度分布均服从幂律分布, 介数较大的少数节点对网络有重要的影响.

2.4 集聚系数分析

集聚系数描述的是网络局部的社团结构, 因地铁网中相邻站点之间只能有一条线路经过, 故地铁网的平均集聚系数为 0. 公交网与复合网络平均集聚系数分别为 0. 090 和 0. 105, 数值均很小(表 1). 公交网、复合网络集聚, 如图 13, 14 所示. 图 13, 14 中: i 为节点; C 是集聚系数. 由图 13, 14 可知: 公交网和复合网络的多数节点集聚系数很小, 个别节点拥有较大的集聚系数, 具有较少的社团结构.

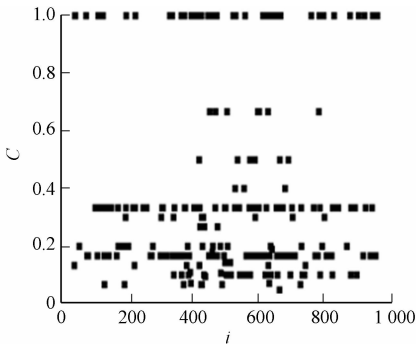


图 13 公交网集聚系数分布

Fig. 13 Cluster coefficient distribution of BN

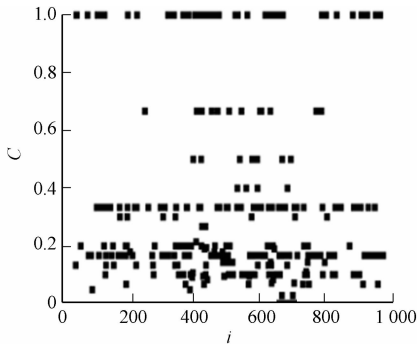


图 14 复合网络集聚系数分布

Fig. 14 Cluster coefficient distribution of IN

2.5 网络最短路径和效率分析

平均最短路径长度(L)是网络中所有节点对之间最短路径长度的平均值, 它描述了网络中节点间的平均分离程度. 通过 R 软件编程计算, 结合表 1 可知: 3 类网络的最短路径基本符合泊松分布. 网络中大部分节点路径较长, 网络效率较低, 其直方图如图 15~17 所示. 图 15~17 中: f 为频数.

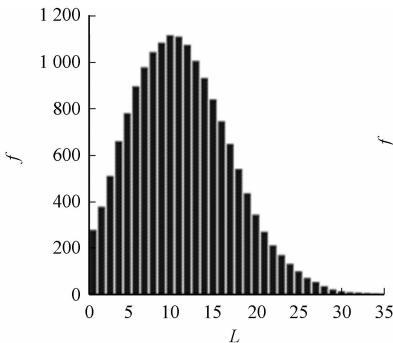


图 15 地铁网 L 分布图

Fig. 15 L distribution of SN

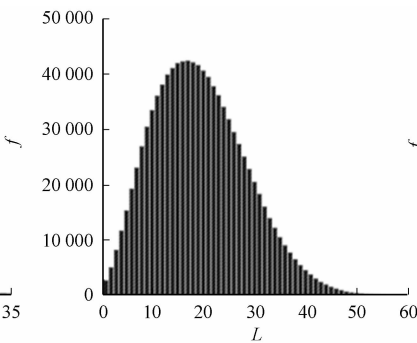


图 16 公交网 L 分布图

Fig. 16 L distribution of BN

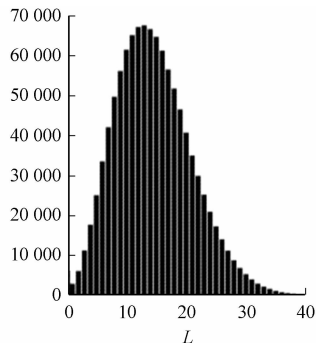


图 17 复合网络 L 分布图

Fig. 17 L distribution of IN

由图 15~17 可知: 地铁网的平均最短路径长度为 11. 42, 即一个乘客乘坐地铁平均需要坐 11 站左右才能到达目的地, 且最大直径 D 为 35; 公交网的平均最短路径长度为 19. 36, 即一个乘客乘坐公交车平均需要乘坐 19 站左右才能到达目的地, 最大直径为 60; 复合网络的平均最短路径长度为 14. 59, 即一个乘客以地铁-公交混合交通方式出行时, 平均需要乘坐 14 站左右才能到达目的地, 最大直径为 49. 00. 相对而言, 地铁网的平均最短距离最小, 复合网次之, 公交网最大. 这是因为公交网比地铁网的覆盖范围更大, 节点更加密集所致. 在两个站点之间, 复合网络在公交网的基础上增加了地铁网络, 比公交网络拥有更多的路径选择, 平均最短路径缩短, 效率有所提升.

表 2 地铁网度值前 10 的节点

Tab. 2 Top 10 degree of SN

排序	站名	度值	排序	站名	度值
1	北大街	4	6	南稍门	4
2	五路口	4	7	小寨	4
3	金花路	4	8	大雁塔	4
4	行政中心	4	9	李家村	4
5	钟楼	4	10	大差市	4

3 节点度介数相关性

3.1 地铁网度介数相关性

地铁网度和介数较大的节点统计, 如表 2, 3 所示. 由表 2, 3 可知: 度值最高的 10 个节点

的度值均为 4,且这 10 个节点均是换乘节点,因此,它们在地铁网络中具有较高的重要性;介数较大的节点,其度值往往也偏大,这在一定程度上也体现出地铁网络中节点介数与度值呈正相关性,度较大,经过该节点的线路多,介数大,经过该点的最短路径多,地铁网换乘节点的设置较合理.北大街节点的度和介数都最大,说明此节点在地铁网络中重要性最高.

表 3 地铁网中介数前 10 的节点
Tab. 3 Top 10 betweenness of SN

排序	站名	度值	介数	排序	站名	度值	介数
1	北大街	4	0.344	6	小寨	4	0.256
2	钟楼	4	0.295	7	金花路	4	0.247
3	大雁塔	4	0.270	8	咸宁路	4	0.221
4	五路口	4	0.260	9	青龙寺	4	0.220
5	高新路	4	0.257	10	大差市	4	0.201

3.2 公交网度介数相关性

公交网度和介数较大的节点统计,如表 4,5 所示.由表 4,5 可知:排名前 10 的度与介数中,仅有两个节点相同,说明公交网的度和介数基本没有相关性;度-介数的非相关性说明度大的节点没有充分被应用,经过该节点的线路可以适当的减少,而需增加介数大的节点的经过线路;另外,公交网中,火车站节点度和介数值都最大,说明了火车站节点在公交网中的重要程度.

表 4 公交网中度值前 10 的节点
Tab. 4 Top 10 degree of BN

排序	站名	度值	排序	站名	度值
1	火车站	11	6	万寿路	7
2	北门	8	7	西门	7
3	民乐园	8	8	韩森寨	7
4	东门	8	9	沙坡	7
5	文艺路	8	10	沣惠南路	7

表 5 公交网节点介数前 10 的节点
Tab. 5 Top 10 betweenness of BN

排序	站名	度值	介数	排序	站名	度值	介数
1	火车站	11	0.230 3	6	小雁塔	5	0.150 6
2	南稍门	4	0.193 0	7	南门	6	0.146 6
3	朝阳门	6	0.163 8	8	西站	4	0.135 9
4	黄雁村	5	0.161 8	9	大华	4	0.134 4
5	大差市	6	0.154 4	10	北门	8	0.124 9

3.3 复合网络度介数相关性

复合网络度和介排名前 10 的节点的统计,如表 6,7 所示.由表 6,7 可知:排名前 10 的度与介数中,有 5 个节点相同,且介数大的度值也较大,度和介数有一定的相关性,说明复合网络可以部分解决公交网中存在的部分度值大的节点利用率不高、而部分介数大的节点超载的问题;复合网络中介数和度均比较大的节点是北大街,说明经过北大街站的路径最多、最短路径数目也最多,北大街站潜在客流密度最大,重要性最高.

表 6 复合网络度排名前 10 的节点
Tab. 6 Top 10 degree of IN

排序	站名	度值	排序	站名	度值
1	火车站	12	6	青龙寺	9
2	北大街	9	7	大雁塔	9
3	万寿路	9	8	公交六公司	8
4	劳动南路	9	9	北门	8
5	沣惠南路	9	10	金花路	8

表 7 复合网络中介数排名前 10 的节点
Tab. 7 Top 10 of betweenness of IN

排序	站名	度值	介数	排序	站名	度值	介数
1	北大街	9	0.277 8	6	北关	6	0.194 8
2	小寨	8	0.249 8	7	龙首村	6	0.193 5
3	高新路	8	0.241 4	8	金花路	8	0.191 0
4	钟楼	7	0.229 5	9	公交六公司	8	0.186 7
5	大雁塔	9	0.204 8	10	青龙寺	9	0.179 1

4 随机攻击与蓄意攻击模式下网络的鲁棒性

鲁棒性是指网络在发生意外或受到攻击时,网络维持原功能的能力,即网络抵抗故障的能力. 采用随机攻击与蓄意攻击两种方式分析网络的鲁棒性能. 随机攻击是指随机删除网络中的节点,且与其相邻节点之间的连边一起被删除;蓄意攻击是将网络中度值较大的节点,按比例依次删除,且与其相邻节点之间的连边同样被删除.

4.1 网络最大连通子图率的变化

网络的连通率 S 表示网络受到攻击后,最大连通子图的节点数占原始网络节点数的比例. 即 $S = N'/N$. 其中: N 表示原始网络的总节点数; N' 表示网络受到攻击后的最大连通子图的节点数.

3 类网络在随机攻击与蓄意攻击下 S 的变化情况,如图 18,19 所示. 图 18,19 中: η 为攻击节点比例. 由图 18,19 可知:随机攻击模式下,公共交通网络及其网络的 S 下降情况比较缓和,当攻击比例达到 50% 时,公共交通网络及其网络的 S 值分别为 7.5%,4.5%,6.5%,相对较小,网络整体分解成了很多很小规模的网络或离散节点,基本完全瘫痪;蓄意攻击模式下 3 类网络的 S 值呈急剧下降状态,仅攻击节点比例为 10% 时, S 值分别为 11.7%,28.9%,29.4%,基本接近瘫痪;攻击节点比例为 20% 时, S 值分别为 8.4%,5.7%,4.3%,基本完全瘫痪. 以 S 作为衡量指标,3 类网络的鲁棒性能相当.

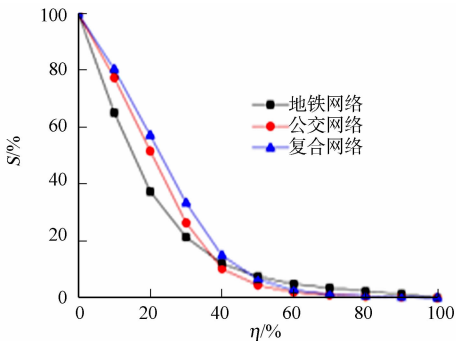


图 18 随机攻击下 S 的变化

Fig. 18 Change of S under random attack

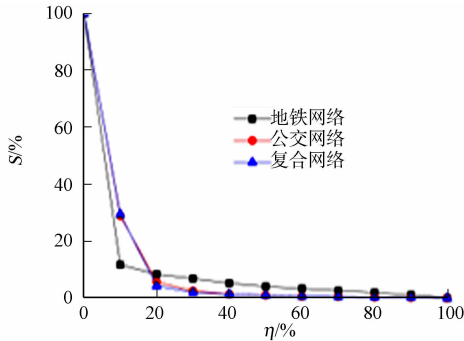


图 19 蓄意攻击下 S 的变化

Fig. 19 Change of S under deliberate attack

4.2 最大连通子图平均路径长度的变化

对于受攻击后的整个网络,在不考虑孤立节点和其他连通子图,仅考虑最大连通子图,将所有节点对的最短路径取平均值,求其变化,网络平均路径长度表达式为

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{i,j}.$$

3 类网络最大连通子图平均距离在随机攻击与蓄意攻击模式下的变化情况,如图 20,21 所示. 由图 20,21 可知:在随机攻击模式下,当攻击节点数量少于 20% 时,3 类网络的 L 值的变化比较缓和,当攻击节点数量介于 20%~60% 之间时, L 值迅速下降,当攻击节点数量大于 60% 时,最大连通子图规模锐减, L 值达到最小值 5~6 之间;在蓄意攻击模式下,复合网络和公交网的鲁棒性相似,当攻击节点数量

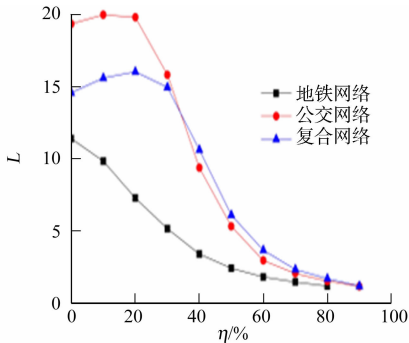


图 20 随机攻击下 L 的变化

Fig. 20 Change of L under random attack

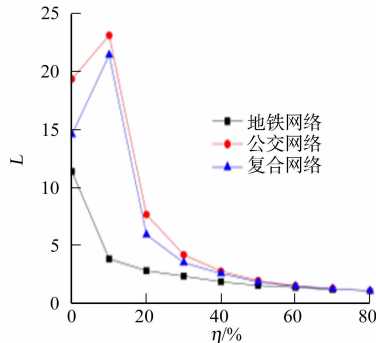


图 21 蓄意攻击下 L 的变化

Fig. 21 Change of L under deliberate attack

少于 10% 时, L 值反而增大, 当攻击节点数量介于 10%~20% 之间时, L 值迅速下降, 当攻击节点数量大于 20% 之间时, L 值在 6~7 左右; 对于地铁网, 当攻击节点小于 20% 时, L 值迅速下降, 大于 20% 时, 最大连通子图规模大大减小, L 值从 3.0 到 1.9 缓慢下降. 因此, 以 L 作为衡量指标, 地铁网络的鲁棒性较强, 复合网络次之, 公交网较弱.

4.3 网络全局效率的变化

网络全局效率指网络中所有节点对之间的最短距离的倒数的平均值. 网络中孤立节点与其他节点的效率为 0. 全局效率表达式为

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (1/d_{i,j}).$$

在随机攻击与蓄意攻击下 3 类网络 E 的变化情况, 如图 22, 23 所示. 由图 22, 23 可知: 在随机攻击模式下, 3 类网络的 E 呈缓慢下降的状态, 当攻击比例为 50% 时, E 分别为 2.7%, 0.7%, 0.8%, 数值非常小, 表明公共交通网络及其网络效率非常低, 基本处于瘫痪状态; 在蓄意攻击模式下, 公共交通网络及其 E 随攻击比例骤降, 当攻击比例为 20% 时, 其 E 分别为 2.3%, 0.5%, 0.4%, 网络已经瘫痪.

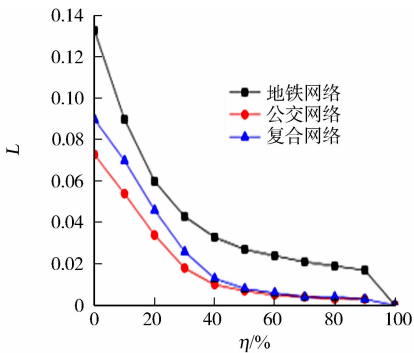


图 22 随机攻击下 E 的变化
Fig. 22 Change of E under random attack

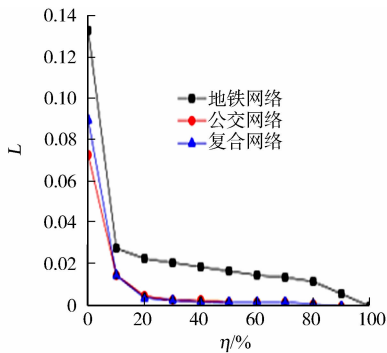


图 23 蓄意攻击下网络 E 的变化
Fig. 23 Change of E under deliberate attack

对 3 类网络的鲁棒性进行比较, 如表 8 所示. 由表 8 可知: 3 类网络对于随机攻击都具有较好的鲁棒性; 对于蓄意攻击表现出了较大的脆弱性, 地铁网的鲁棒性较强, 复合网络次之, 公交网较弱.

表 8 两种攻击模式下网络的鲁棒性比较

Tab. 8 Comparison of robustness parameters in two attack modes

网络类型	最大连通子图率 S		平均路径长度 L		全局效率 E	
	随机攻击排序	蓄意攻击排序	随机攻击排序	蓄意攻击排序	随机攻击排序	蓄意攻击排序
地铁网络	3	相当	1	1	1	1
公交网络	2	相当	3	3	3	3
公共交通网络	1	相当	2	2	2	2

5 结论

基于 Space L 建模方法, 对比分析了西安市地铁、公交及其综合构成的复合网络的统计特性, 以及度和介数的相关性并给出了相关建议, 研究了 3 类网络的鲁棒性能, 得到以下 3 个结论

- 1) 3 类网络都具有较大的平均路径长度与极小的集聚系数, 不符合小世界特征. 这表明西安公共交通系统整体质量还有待提高, 需要增加相关的站点和外围环线, 以改善网络的运行效率.
- 2) 地铁网介数和度值呈正相关性, 转乘站的设计较合理. 公交网的介数和度值基本没有相关性, 应优化网络结构, 增加介数大且度小节点的途径线路, 避免线路紧张和拥挤. 对度大而介数小的节点, 可适当的减少公交线路, 提高站点的利用率. 该结论为西安公共交通系统线路的合理规划提供了理论参考.
- 3) 西安地铁网的度分布近似于泊松分布; 公交网和复合网络的累积度分布符合幂律分布, 属于无标度网络. 3 类网络对于随机攻击具有较好的鲁棒性, 对蓄意攻击表现出明显的脆弱性. 相对而言, 地铁网鲁棒性较强, 复合网络次之, 公交网较弱. 建议新增或调整公交线路时, 加强度小节点的建设, 改变网

络节点的度分布形态,或尽量减少幂指数,以提高蓄意攻击时西安公共交通系统的鲁棒性.

参考文献:

[1] DERRIBLE S,KENNEDY C. The complexity and robustness of metro network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications,2010,389(17):3678-3691. DOI:10. 1016/j. physa. 2010. 04. 008.

[2] WANG Xiangrong,KOC Y,Derrible S,*et al.* Multi-criteria robustness analysis of metro networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications,2017,474(15):19-31. DOI:10. 1016/j. physa. 2017. 01. 072.

[3] YANG Yuhao,LIU Yongxue,ZHOU Minxi,*et al.* Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory: A case study of the Beijing subway[J]. Safety Science,2015,79:149-162. DOI:10. 1016/j. ssci. 2015. 06. 006.

[4] 曾小舟,唐笑笑,江可申. 基于复杂网络理论的中国航空网络结构实证研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(6):175-181. DOI:10. 3969/j. issn. 1009-6744. 2011. 06. 027.

[5] 叶彭姚. 城市道路网拓扑结构的复杂网络特性研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2012,10(1):13-19. DOI:10. 3969/j. issn. 1009-6744. 2011. 06. 027.

[6] 余曼,王高峡,李亮. 基于 NodeXL 的城市地铁网络仿真与结构分析[J]. 城市轨道交通研究,2016,19(10):91-96, 109. DOI:10. 16037/j. 1007-869x. 2016. 10. 020.

[7] 鲍登,高超,张自力. 基于复杂网络的公交-地铁复合网络鲁棒性分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2017, 42(5):22-27. DOI:10. 13718/j. cnki. xsxb. 2017. 05. 004.

[8] 何胜学,范炳权. 从公交线网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. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-5781. 2007. 06. 007.

[9] 李英,周伟,郭世进. 上海公共交通网络复杂性分析[J]. 系统工程,2007,25(1):38-41. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-4098. 2007. 01. 007.

[10] 汪涛,方志耕,吴卉. 城市地铁网络的复杂性分析[J]. 军事交通学院学报,2008(3):24-28. DOI:10. 3969/j. issn. 1674-2192. 2008. 02. 006.

[11] 张建华. 地铁复杂网络的连通脆弱性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.

[12] 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.

[13] 周晓炯. 南京市公交地铁加权复合网络模型及鲁棒性分析[D]. 南京:南京邮电大学,2016.

[14] 徐凤,朱金福,苗建军. 基于复杂网络的空铁复合网络的鲁棒性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学,2015,12(1):26-31. DOI:10. 13306/j. 1672-3813. 2015. 01. 006.

[15] 杜斐,黄宏伟,张东明,等. 上海轨道交通网络的复杂网络特性及鲁棒性研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(5):701-707. DOI:10. 14188/j. 1671-8844. 2016-05-010.

[16] 赵国锋,苑少伟,慈玉生. 城市路网的复杂网络特性和鲁棒性研究[J]. 公路交通科技,2016,33(1):119-124. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-0268. 2016. 01. 018.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)