

文章编号:1671-8879(2018)05-0146-08

公共交通网络的复杂性及其优化 ——以宝鸡市为例

高红艳,刘 飞,钱 郁

(宝鸡文理学院,物理与光电技术学院,陕西 宝鸡 721016)

摘 要:为了减缓城市交通拥堵,改变城市公交线路规划不合理的状况,采用复杂网络的分析方法研究城市公交系统,构建公交网络模型,分析公交站点中心性、公交路段中心性、公交网络聚类特性、小世界性、集团特性和抗毁性等重要指标。以宝鸡市公交网络为例,基于 Space L 方法构建宝鸡市公交网络模型,用节点度和节点介数衡量站点的重要性,用边介数衡量公交路段的重要性,用聚类系数、最短路径衡量公交网络的复杂网络特性,采用 GN 算法对公交网络进行了社团划分。采用随机和突发 2 种策略对网络进行了攻击,验证公交网络的鲁棒性。研究表明:宝鸡市公交站点网络和大多数公交网络一样具有幂律分布特性,该网络可划分为 11 个明显的社团;该网络对于随机攻击具有较好的鲁棒性,对于基于度的蓄意攻击具有较大的脆弱性,和全国大中城市相比,宝鸡市公交网络的集团化程度较低。据此提出优化公交网络的方法,对关键站点实行分流,对关键路段实行绕行,根据社团划分和网络整体结构优化公交路网,建设智能公交系统,规划城市建设,研究结果可为宝鸡市交通线路规划和城市建设提供理论依据。

关键词:交通工程;城市交通;静态特性;优化;复杂网络

中图分类号:U491.17;TP393.0

文献标志码:A

Complexity and optimization of public transit network: Taking Baoji for example

GAO Hong-yan, LIU Fei, QIAN Yu

(School of Physics and Opto-electronic Technology, Baoji University of Arts and
Sciences, Baoji 721016, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reduce the urban traffic congestion and change the unreasonable situation of urban public transit route planning, the urban public transit system was studied with the method of complex network, and the public transit network was constructed, the important parameters such as the centrality of bus station, the centrality of bus section, the clustering characteristic of bus network, the small world, the group characteristic and the destructiveness were studied, take Baoji public transit network as an example. Public transit network model of Baoji was

收稿日期:2018-02-15

基金项目:国家自然科学基金项目(11675001);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM6099);

宝鸡市科技计划项目(2017JH2-18);宝鸡文理学院科研项目(ZK16032)

作者简介:高红艳(1981-),女,陕西榆林人,讲师,E-mail:bwlghy@163.com。

通讯作者:钱 郁(1981-),男,江苏苏州人,教授,工学博士,E-mail:qianyu0272@163.com。

constructed based on Space L method, the degree and betweenness of nodes were used to measure the importance of the bus stations, the betweenness of edges were used to measure the importance of the bus routes, and the clustering coefficient and the shortest path were used to measure the complexity of the public transit network. The community structure of public transit network was detected by GN algorithm. The robustness of public transit network was verified, when the network was attacked by two strategies such as random attack strategy and burst attack strategy. The results show that Baoji public transit network has the same power-law as public transit networks, which can be divided into 11 distinct community structures. The network is robust to random attacks and vulnerable to deliberate attacks based on degree. Compared with large and medium-sized cities in China, the collectivization degree of Baoji public transit network is relatively low. The methods of optimizing Baoji public transit network are proposed, such as dividing the key stations, detouring the key sections, according to the community division and the overall network structure, the road network is optimized, the intelligent bus system is constructed and the urban construction is planned. It can provide theoretical basis for traffic line planning and urban construction in Baoji City. 6 tabs, 7 figs, 25 refs.

Key words: traffic engineering; public transit network; static characteristic; optimization; complex network

0 引言

现实世界中,许多实际网络都可以看成是复杂网络,如电力网、社会网、互联网、蛋白质相互作用网、交通网络和神经网络等^[1-6]。复杂网络已经发展成为众多学科交叉的一个研究领域,复杂网络的研究方法也逐渐应用到了其他学科^[7]。

交通系统是一种庞大而复杂的系统,大量学者应用复杂网络或统计物理学的方法对其展开了研究^[8-14]。复杂网络分析方法是一种分析交通网络更为有利的工具,通过对网络基本性能的分析,可以加强人们对交通系统的宏观认识和科学掌控。Sienkiewicz等分析了波兰22个城市的公交系统网络拓扑结构,发现所有网络的节点度都服从幂律分布^[15]。Li等分析了中国前十大城市的公交拓扑网络发现,所有的网络具有较高的局部效率和较低的全局效率^[16]。胡一竑采用复杂网络方法对航空、道路和航海网络进行了实证研究,发现这些网络虽然类型、功能、规模大相径庭,但都具有无标度特性^[17]。李进等对城市地铁网的拓扑结构展开了分析,发现地铁网拥有倾向于选择短边、平均度接近于2等特性^[18]。上述4种方法仅从拓扑结构研究了相应的公交、航空、地铁等网络,而没有分析交通网络的鲁棒性、社团结构和优化方法。周康等提出基于出行行为的公交网络多目标优化方法,优化公交网络,缓解交通拥堵^[19]。刘志勇等

对北京市公共交通网络系统的鲁棒性进行了研究,发现正序攻击对公共交通网络的连通性和效率的影响极大,倒序攻击的影响则极小^[20]。这些方法验证了交通网络采用攻击行为网络的鲁棒性,以此来优化交通网络,减缓交通堵塞,但是这些方法没有进行社团结构划分,没有挖掘出交通网络的易堵结点。

虽然公交网络的演变和城市的发展相关,受地理、历史和社会等诸多因素的影响,但是实践证明,公交网络的功能特性还是主要取决于其统计特性。因此,从公交网络统计特性出发研究其功能特性、网络鲁棒性和网络演变是一种较为可行的方法。结合上述方法的优缺点,本文采用复杂网络图论的研究方法,构建公交网络模型,在前人研究的基础上,系统研究了公交网络的统计特性,社团结构和鲁棒性。以中等城市宝鸡市为例,分析了河谷型城市的社团划分特点,挖掘出城市交通网络的易堵结点,为宝鸡市城市公交网络的优化提供了理论依据。

1 城市公交网络模型

城市公交系统是一个复杂的大型系统,构建公交系统模型,需要考虑站点、线路以及其彼此之间的相互关联。目前有3种公交网络模型,分别是公交停靠站点网络模型、公交线路网络模型和公交换乘网络模型。

停靠站点网络模型基于Space L方法构建网

络,根据站点的自然地理联系构建网络,保留公交网络的基本拓扑特征。在该网络中,节点代表公交系统中的停靠站点,若 2 个站点之间存在至少 1 条公交线路,且 2 个站点相邻,则在相对应的 2 节点之间连边。停靠站点网络的基本物理参量都具有重要的实际意义。度分布体现了通过各站点的公交线路数,聚类系数体现了每个站点附近的公交线路数,站点的介数表示该站点所经过的最短路径数,反映了站点在整个停靠站点网络的影响力。

公交线路网络模型主要研究公交线路之间的联通关系。在此网络中,节点是公交线路,如果 2 条公交线路有相同的停靠站点,则 2 个节点之间有 1 条边连接。

公交换乘网络模型基于 Space P 方法构建网络,研究公交站点的换乘情况,如果城市公交网络中公交站点不具备较好的换乘会影响公交站点之间的可达性,从而可能造成局部的换乘拥挤,导致公交系统运输效率低下。

2 宝鸡市公交网络

2.1 宝鸡市公交站点网络模型的构建

本文以宝鸡市为例,通过构造停靠站点网络模型研究复杂公交网络。本文数据来源于 8 486 条公交线路,选取了截止 2016 年 12 月,宝鸡市区的 51 条公交线路、406 个公交站点作为样本数据构建公交站点网络。网络构建时,做以下假设:①公交线路存在方向性,大多数情况下,从站点 1 到站点 2 的线路和从站点 2 到站点 1 的线路同时存在,在数据提取时,只要存在从站点 1 到站点 2 或者站点 2 到站点 1 的任意 1 条边,就在节点 1 与节点 2 之间连边,将网络视为无向网络;②在公交网络中,不考虑车辆发车的频次,也不考虑多条公交线路共享支路的情况,将网络视为无权图;③不考虑公交站点的实际地理经纬度。

根据上述构造假设,由宝鸡市公交站点数据构造的公交网络拓扑图如图 1 所示。它是一个由 406 个节点,613 条边构成的无向无权网络,可抽象为一个由点集 V 和边集 E 构成的无向无权图 $G=(V, E)$,定义网络节点数 N 为 $|V|$,网络边数 M 为 $|E|$,其邻接矩阵为 A 。

2.2 宝鸡市站点网络的拓扑参数分析

2.2.1 度分布

节点的度 k ,定义为节点的邻居个数,表示了节点的重要性。宝鸡市公交网络的节点度统计如表 1

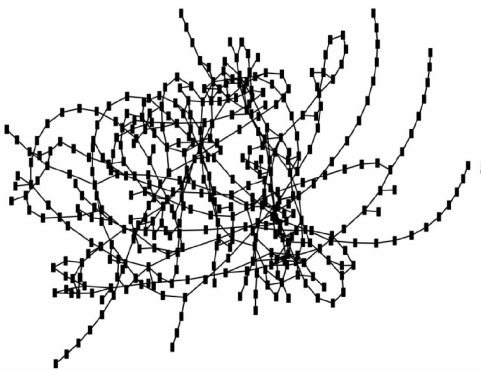


图 1 宝鸡市公交站点网络拓扑图

Fig. 1 Network topology of bus stations of Baoji

所示。通过分析得知:结点的度最大为 13,节点度均值为 3.019 7,说明每个站点平均与 3~4 个站点相连。度值小于等于 5 的节点占了总数的 85.47%,度值在 9 以上的仅占了 2.22%,说明公交站点网络只有少数节点的度比较大,大多数节点的度比较小。度值最高的 9 个站点如表 2 所示。由表 2 可以看到,人民医院等 9 个地方主要分布在市中心区、火车站和高速路口等交通枢纽地带,在公交网络中起着非常重要的作用,在网络规划和交通控制中应重点关注。节点度的概率分布在对数坐标系中的曲线如图 2 所示。除了度为 1 的节点外,剩余节点的度分布在对数坐标系中近似是 1 条直线,所以其近似服从幂律分布,幂律指数 $\gamma=2.152$ 。Von Ferber 等研究了柏林等 14 个城市的公交站点网络,指出其均服从幂律分布,其 γ 为 2.62~5.49^[21],说明大多数公交站点网络符合无标度网络的增长特性和优先连接特性。

表 1 节点度数统计

Tab. 1 Statistical of nodes degree

节点度	1	2	3	4	5	6	7
节点数	43	205	88	38	17	9	3
比例/%	0	4.68	46.31	21.92	12.56	7.14	2.71
节点度	8	9	10	11	12	13	
节点数	4	5	3	0	0	1	
比例/%	2.46	1.23	0.74	0	0	0.25	

2.2.2 聚类系数

聚类系数主要考察网络的聚集特性,在公交站点网络中,站点的聚类系数反映了各站点附近公交线路的密集程度,站点的聚类系数越低,则其邻居间的联系就越稀疏,邻居间的大多出行交通流量均经过该站点,则该站点的负荷就越重,所以聚类系数低的站点比聚类系数高的站点更容易发生拥堵,而整个网络的聚类系数反映了公交线路的密集程度。宝

表 2 公交站点度数排序
Tab. 2 Sequencing of degree of bus stations

序号	站点	度值
252	人民医院	13
386	中国人寿保险宝鸡分公司	10
111	工业品市场(曙光路)	10
141	高速客运中心	10
198	金陵桥西	9
278	胜利桥北. 汉唐茶城	9
280	胜利桥南(清姜路)	9
293	太白路	9
355	行政西路北口	9

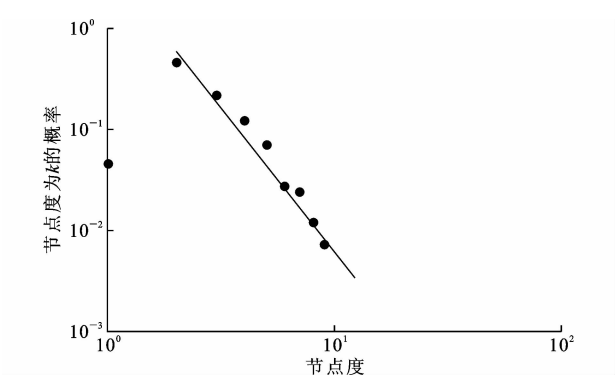


图 2 节点度分布曲线

Fig. 2 Curve of distributions of nodes degree

鸡市公交网络中各站点的聚类系数如图 3 所示。可知:有 303 个站点的聚类系数为 0,说明有 74.63% 的相邻站点不连通,这也是宝鸡市公交网络稳定性差的主要原因之一;8 个站点的聚类系数为 1,占 1.97%,整个网络的聚类系数为 0.0824,说明宝鸡市公交网络的集团性较差。

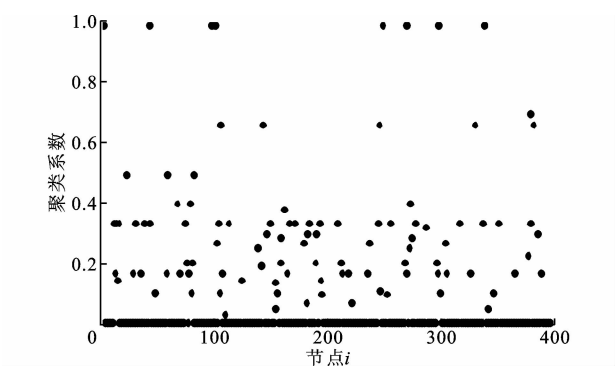


图 3 节点的聚类系数

Fig. 3 Cluster coefficients of nodes

2.2.3 最短路径

在公交站点网络中,最短路径描述了任意 2 个站点之间最少要经过的边数。最短路径概率分布如图 4 所示。从图 4 可以看出,最短路径的最小值为 1,最大值为 35,平均值为 11.552 8,说明宝鸡市公

交站点网络是一个全通网络,从 1 个站点到另外 1 个站点平均要经过 11~12 个站点。最短路径曲线呈现非对称、单峰、长尾特性,这是由于宝鸡市公交站点的分布不均匀造成的,少数远离市中心的郊区线路站点距离远,所以曲线呈现出长尾特性。

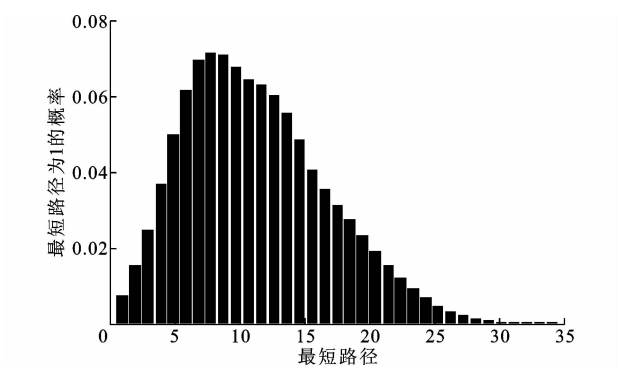


图 4 最短路径的概率分布

Fig. 4 Probability distributions of shortest path

2.2.4 网络效率

网络效率是衡量网络中节点传输信息的有效性。网络中任意 2 个节点 i 与 j 之间的效率定义为节点 i 与 j 之间最短路径的倒数,所有节点对之间的效率平均值定义为网络效率 $E_{\text{eff}}(G)$,即

$$E_{\text{eff}}(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum e_{ij} = \frac{1}{N(N-1)} \sum \frac{1}{d_{ij}} \quad i \neq j \in G \quad (1)$$

式中: N 为网络节点数; e_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的效率; d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短路径。

在公交网络中,网络效率常用来衡量网络受到攻击后表现出的抗毁性,利用这个参数能较准确地刻画公交网络连通性的变化情况。通过计算,宝鸡市公交网络的平均效率为 0.1214,说明宝鸡市公交网络效率较低,有待提高。

2.2.5 网络介数

介数是衡量网络中元素的重要性或者影响力的重要指标,介数又分为节点介数和边介数 2 种。在公交网络中,节点介数表示公交站点在网络中的重要性,边介数表示公交路段在网络中的重要性。

网络中不相邻的节点 l 和 j 之间的最短路径会途经某些节点,如果某个节点 i 被其他许多最短路径经过,则表示该点很重要,其重要性或者影响力可以用节点的介数 B_i 来表征,定义为

$$B_i = \sum [k_{jl}(i)/k_{jl}] \quad 1 \leq j < l < N, j \neq i \neq 1 \quad (2)$$

式中: k_{jl} 为节点 j 和 l 之间的最短路径条数; $k_{jl}(i)$ 为节点 j 和 l 之间的最短路径经过节点 i 的条数。

图 5 为网络节点介数分布,通过计算得知,宝鸡市公交站点网络的平均介数为 4 273。其中,人民医院站点的介数最大,其值为 62 489,这说明了在所有站点中,经过人民医院的最短路径最多,人民医院离其他站点的平均拓扑距离也最近,其在网络中的作用也非常重要。表 3 为公交网络介数最大的 12 个站点的介数排列和所经过的公交线路数。从表 3 可以看出,介数较大的站点经过的公交线路数不一定较大。凤凰桥北是一个非常特殊的站点,因为凤凰桥位于宝鸡市偏东郊区域,横跨渭河两岸,政府只规划了 1 条跨河的公交线路,但从介数分布来看,与凤凰桥北相邻接的北岸公交站点和南岸公交站点都比较多,凤凰桥公交线路的设置大大缩短了渭河东段两岸的公交站点之间的距离。如果此公交线路临时故障或凤凰桥路段故障,则两岸居民必须绕行其他跨河大桥,为居民出行带来了很大的不便。总之,在公交网络中,介数和度数较高的点在网络中都非常重要的,所以在网络规划的时候,应该重视这些站点,提高这些站点的车辆吞吐性能和客流量,以提高整个网络的运营效率。

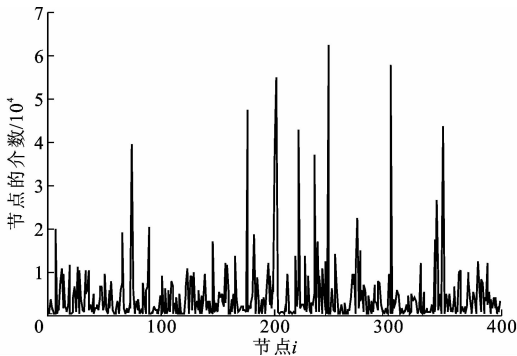


图 5 节点的介数分布

Fig. 5 Distributions of betweenness of nodes

表 3 公交站点的介数排序

Tab. 3 Sorting of bus stops

序号	节点编号	站点	介数	经过的公交线路/条
1	252	人民医院	62 489	14
2	308	卧龙寺·华晨凤凰城	58 040	9
3	205	兰宝小区	54 900	5
4	179	教育中心	47 304	6
5	355	行政西路北口	43 701	8
6	226	南坡村	42 578	7
7	76	底店路口	39 497	7
8	204	六村千渭星城	38 277	7
9	240	千河汽配城	36 966	5
10	34	行政中心	26 512	6
11	27	胜利桥北·汉唐茶城	22 107	11
12	91	凤凰桥北	20 204	1

边介数 \tilde{B}_{ij} 定义为网络中所有的最短路径中经过边 e_{ij} 的数量比例,其表达式为

$$\tilde{B}_{ij} = \sum [k_{lm}(e_{ij})/k_{lm}]$$
$$1 \leq l < m \leq n, (l, m) \neq (i, j) \quad (3)$$

式中: k_{lm} 为节点 l 和 m 之间的最短路径条数; $k_{lm}(e_{ij})$ 为节点 l 和 m 之间的最短路径经过边 e_{ij} 的条数。

在公交网络中,边介数反映了经过公交路段的最短路径条数,介数越大,经过的最短路径就越多,说明该路段在网络中的作用就越重要。宝鸡市公交网络平均边介数为 1 549,最大边介数为 26 507。表 4 为公交网络边介数排序,其中,从兰宝小区到卧龙寺华晨凤凰城路段的介数最大,说明该路段至关重要,在交通管控和城市规划时应注意保持这些路段的畅通。

表 4 公交线路的介数排序

Tab. 4 Sorting of bus routes

序号	节点编号	站点	边介数
1	(205,308)	(兰宝小区,卧龙寺华晨凤凰城)	26 507
2	(252,179)	(人民医院,教育中心)	23 823
3	(308,226)	(卧龙寺华晨凤凰,南坡村)	21 367
4	(226,76)	(南坡村,底店温哥华国际酒店)	19 591
5	(205,355)	(兰宝小区,行政西路北口)	18 697
6	(240,76)	(千河汽配城,底店路口温哥华国际酒店)	18 672
7	(240,204)	(千河汽配城,六村千渭星城)	17 904
8	(349,179)	(行政中心,教育中心)	12 831
9	(278,252)	(胜利桥北汉唐茶城,人民医院)	10 281

2.2.6 社团划分

社团结构是复杂网络的重要特性,分析公交网络社团结构可以帮助发现连通性较好的区域,以及区域与区域之间连通性较差的部分,从而有针对性的改进和防护,增强整个公交系统的鲁棒性。

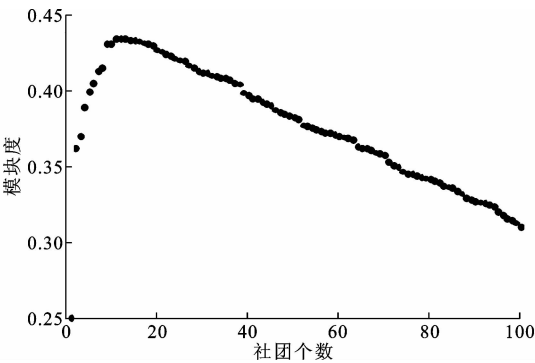


图 6 模块度曲线

Fig. 6 Curve of module

采用 GN 算法对宝鸡市公交网络进行社团挖掘^[22],得到其模块度曲线如图 6 所示。宝鸡市公交网络的最优社团划分为 11 个社团,对应最大的模块

度 0.434 6,所以宝鸡市公交网络具有明显的社团结构,规模最大的社团包含 57 个节点,规模最小的社团包含 15 个节点。

表 5 为宝鸡市公交网络社团划分结果,由划分结果可知,前 5 个大社团依次是社团 8,11,2,4,1,其中,最大社团 8 主要位于渭滨区,覆盖了以行政中心北口为中心节点,包含宝鸡市政府,西起创新路北口、东到龙丰村的区域。这些规模较大的社团处于宝鸡市公交线路相对密集的地方,自然形成紧密的社团。社团 8 中的站点跨越了渭河两岸,说明虽然宝鸡属于河谷型地形,但是由于宝鸡在在渭河上搭建了很多跨河大桥,密集地区的社团划分并没有受到影响。社团 6 位于金陵桥以北的沿河狭窄地带,社团 10 位于宝成铁路以西的渭河北岸,社团 3 位于渭河以南,说明宝鸡市公交网络划分明显的受到了宝鸡河谷型地形特性以及宝成铁路穿城而过对城市切割的影响。通过分析得出,同一社团的各个站点在地理位置上相近,它们之间的连接紧密,每个社团的中心节点(即度最大节点)在社团中起着非常重要的作用,如在社团 11 中,中心节点为人民医院站点。在城市规划中,应在中心节点附近建设大型商场、医院、学校,带动整个区域的经济发展。社团与社团之间的桥接节点起到连接 2 个区域的枢纽作用,在公交管控过程中要保证其正常运行。

2.2.7 宝鸡市公交网络与全国大型城市网络拓扑特性比较

经过宝鸡市停靠站点网络相关参数的计算,结合全国相关大型城市的公交网络研究^[23]对拓扑性质总结,见表 6。从表 6 可以看出,城市站点网络的平均度都在 2~4 之间,表示平均每个站点有 2~4 个邻居站点。节点的度远小于网络节点数,符合稀疏网络的特点,所以公交网络和大多数实际网络一样,属于稀疏网络^[24]。节点度分布极不均匀,大部分节点度比较小,极少数节点度比较大,说明公交网络都具富人俱乐部特性。和其他大城市相比,宝鸡市公交网络的聚类系数较小,说明宝鸡市区规模较小,集团化程度低。宝鸡市公交网络的规划与设计和大城市相比,处于中下游水平,有待于进一步完善。

3 宝鸡市公交站点网络抗毁性分析和网络优化

3.1 抗毁性分析

在现实生活中,公交系统往往因为各种原因不能正常运行。但是很少会出现整个网络都受到攻击

表 5 社团划分结果		
Tab. 5 Results of community detection		
社团序号	规模	包含节点
1	43	1 10 11 13 14 27 38 58 59 60 85 92 93 110 111 147
		148 149 150 151 156 157 158 162 165 168 193 198
		199 216 217 222 223 250 253 258 303 311 333 359
		363 373 395
2	45	2 6 15 34 35 36 39 41 71 94 115 128 129 131 132
		133 154 175 176 202 239 243 244 245 246 248 249
		260 261 267 276 277 290 291 292 314 315 323 369
		377 385 387 396 397 400
3	27	3 25 77 87 91 109 120 140 215 230 231 232 282
		298 309 310 327 328 362 364 368 378 379 380 401
		402 403
4	45	4 8 9 21 30 31 40 45 46 67 72 78 79 80 82 84 99
		100 108 126 127 141 166 177 178 181 185 186 187
		211 218 220 221 254 265 270 296 301 302 304 345
		367 383 384 389
5	35	5 16 17 23 42 48 49 50 52 74 75 76 98 102 146 207
		208 209 214 226 240 247 262 286 287 299 300 306
		307 308 324 343 344 370 391
6	15	7 97 130 190 191 195 196 197 200 212 213 312
		319 320 366
7	31	12 37 86 160 182 184 188 189 192 203 225 228
		229 255 259 263 264 272 273 294 295 305 313 321
		325 337 360 392 393 394 406
8	57	18 22 24 28 32 33 44 68 69 70 73 89 134 135 136
		137 138 139 153 179 180 201 205 219 224 227 233
		234 235 236 237 238 256 257 268 285 317 318 322
		326 329 330 331 332 347 348 349 350 351 352 353
9	31	354 355 361 365 372 399
		19 20 54 55 56 57 61 62 63 64 65 66 83 90 116 117
		118 119 121 122 123 124 125 142 173 204 210 241
		266 371 390
10	24	26 43 51 88 95 96 101 104 155 170 171 172 206
		281 288 289 297 340 341 342 346 376 381 398
11	53	29 47 53 81 103 105 106 107 112 113 114 143 144
		145 152 159 161 163 164 167 169 174 183 194 242
		251 252 269 271 274 275 278 279 280 283 284 293
		316 334 335 336 338 339 356 357 358 374 375 382
		386 388 404 405

的现象,较多的是某个站点因为客观原因失效,所以本文只分析了某个站点受到攻击时网络效率的变化特征。

公交网络遭受的攻击目标和方式不同,其影响亦不同。攻击的目标可以是网络上的点或者边,当网络上的某个点受到攻击时,和其相连的边也就被摧毁。而当边受到攻击时,只是边不能发挥作用,但

表 6 宝鸡市与全国部分大型城市拓扑性质对比

Tab. 6 Comparisons of topological properties of large cities in China

参数	北京	上海	天津	南京	杭州	西安	兰州	太原	宝鸡
平均度	3.268 0	4.008 9	3.069 7	2.890 0	3.216 0	3.012 1	2.720 0	2.526 0	3.019 7
聚类系数	0.145 0	0.006 4	0.110 0	0.345 0	0.017 0	0.137 6	0.117 9	0.821 0	0.082 4
特征路径长度	17.387 0	7.585 0	16.260 0	15.830 0	9.230 0	15.520 0	17.090 0	3.924 0	11.553 0

点不受影响。攻击的方式也可以分为随机攻击和蓄意攻击,随机攻击指的网络上的点或者边以某个概率被随机的攻击,蓄意攻击则是对网络上的点或者边进行有目的的、有针对性的、有策略地攻击^[25]。

图 7 是不同攻击策略下公交网络效率的变化。考虑到宝鸡市公交站点的数量较多,计算数据量较大,逐站删除的话,数据处理时间较长,因此本文选取每次的攻击量为 $N/20$ 。从图 7 可以看出:在随机攻击策略下,网络效率下降的速度明显慢于蓄意攻击下的网络效率;在蓄意攻击下,8%的节点被攻击后,网络的效率就下降到原始网络效率的一半以下。这说明宝鸡市公交网络的拓扑结构受到严重的破坏,40%以上的节点被攻击之后,网络效率接近于 0,网络几近崩溃瓦解。而在随机攻击策略下,18%的网络站点受到攻击时,网络效率降为原来的一半,55%以上的节点受到攻击以后,网络的效能接近于 0,网络几近瓦解。

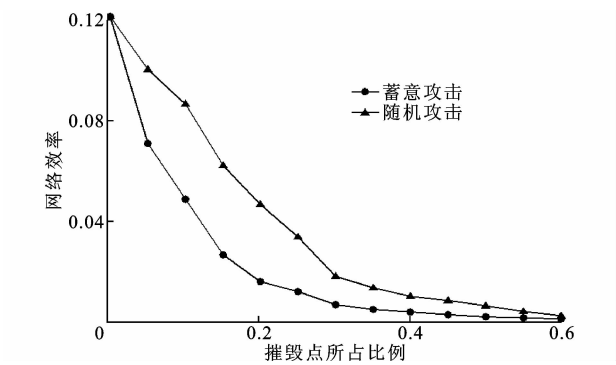


图 7 不同攻击策略下的网络效能

Fig. 7 Network efficiencies under different attack strategies

通过计算分析发现,随机去掉 1 个公交站点,对网络的整体效率几乎没有影响,因为这个随机攻击的站点并非宝鸡市公交枢纽站点,因为非公交枢纽站点在网络中的作用很小,所以宝鸡市公交网络对随机故障有着较高的鲁棒性。但是在蓄意攻击策略下,总是优先攻击节点度比较大的站点,被攻击后网络效能急剧下降。所以,宝鸡市公交网络对蓄意攻击具有较强的脆弱性,这种脆弱性正是由宝鸡市公交网络有明显的无标度特性决定的。

3.2 网络优化

公交网络的稳定性严重影响着城市交通系统的正常运行。局部公交站点或者公交路段故障会增加网络其他部分的负担,关键节点和高负荷节点的故障甚至会导致整个交通网络系统的崩溃。因为网络结构对交通拥堵及其交通传播具有较大的影响,所以通过分析现有网络结构,提出科学的网络结构整改方案是提高公交网络稳定性的一个重要途径。

通过分析,宝鸡市公交网络的优化可以从以下几个方面进行:

(1)针对交通流量比较大的重要站点(即度数、介数中心性较大节点,如人民医院)采用分流措施,将中心节点的流量分配到你现有的邻居站点,或者通过在中心站点附近新增站点,将一部分公交车的停靠分配到新增站点上。通过这样的方式减少公交进站等待的时间,从而增强公交网络的运输能力。

(2)在日常生活中,居民一般以最短路径策略选择到达目的地,通过研究可知,节点的介数越大,经过节点的最短路径数也就越多,也就有越多的小汽车、出租车选择该节点,从而造成该站点严重拥堵,针对这种现象,设计基于介数的绕行策略,绕过交通拥堵点,重新选择路径。

(3)针对早晚高峰期局部负荷高的重要路段(即边介数较大路段),通过增加车道、开辟公交专用车道、加大交通部门的交通管控力度,建议市民乘坐快车、专线等降低交通流量,增强路网能力,或在城区内建立轻轨,提高交通吞吐量。

(4)通过建立全城范围内的智能公交系统,实现对公交状况的全程实时监控,从而更科学合理地管控公交车辆,提高公交系统的运营能力。

4 结 语

(1)采用复杂网络的分析方法分析了公交网络的拓扑特性,构建了宝鸡市公交站点网络,分析了其网络特性,并与全国大型城市公交网络拓扑特性做了比较。研究结果表明,宝鸡市公交站点网络节点度分布不均匀,公交网络具有较小的平均最短路径,较大聚类系数,明显的社团结构,对随机攻击具有较

强的鲁棒性,对蓄意攻击具有较强的脆弱性。针对网络节点度较大的站点,如节点度最大的人民医院站点,提出分解中心节点的策略来减缓其道路拥挤状况。针对边介数较大的节点,采取绕行策略,绕过交通拥堵路段,重新选择路径。为了缓解整个城市的道路拥挤,可以采用新建快速干道和轻轨,建立智能公交系统等优化公交网络的策略。

(2)本文在构建公交网络模型时,把网络考虑成无权无向网络,实际上同一路段不只经过 1 条公交线路,而且部分公交线路往返所经过的路段也不同,公交线路网络其实是一个动态变化的系统,交通系统还要受到车流、人流等因素的影响。因此,动态的交通系统网络的构建需要进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. *nature*, 1998, 393 (6684): 440.
- [2] WATTS D J. The new science of networks[J]. *Annual Review of Sociology*, 2004, 30(1): 243-270.
- [3] 李季,汪秉宏,蒋品群,等. 节点数加速增长的复杂网络生长模型 [J]. *物理学报*, 2006, 55 (8): 4051-4057.
LI Ji, WANG Bing-hong, JIANG Pin-qun, et al. Growing complex network model with acceleratingly increasing number of nodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(8): 4051-4057.
- [4] 许丹,李翔,汪小帆. 复杂网络病毒传播的局域控制研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(3): 1313-1317.
XU Dan, LI Xiang, WANG Xiao-fan. An investigation on local area control of virus spreading in complex networks [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56 (3) 1313-1317.
- [5] PAN W, LU W, XUE Y, et al. Multifractal property and long-range cross-correlation behavior of particulate matters at urban traffic intersection in Shanghai [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2016, 30(5): 1515-1525.
- [6] XUE Y, KANG S J, LU W Z, et al. Energy dissipation of traffic flow at an on-ramp[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 398: 172-178.
- [7] CRANDALL R E. Linked: The new science of networks by Barabási A L [J]. *American Journal of Physics*, 2003, 71: 409-411.
- [8] 高自友,吴建军,毛保华,等. 交通运输网络复杂性及其

其相关问题的研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2005, 5(2): 79-84.

GAO Zi-you, WU Jian-jun, MAO Bao-hua, et al. Study on the complexity of traffic networks and related problems[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2005, 5(2): 79-84.

- [9] 许晴,祖正虎,徐致靖,等. 330 个中国城市 P 空间下公交复杂网络实证研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(1): 193-198.

XU Qing, ZU Zheng-hu, XU Zhi-jing, et al. Space P-based empirical research on public transport complex networks in 330 cities of China[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(1): 193-198.

- [10] 郑啸,陈建平,邵佳丽,等. 基于复杂网络理论的北京公交网络拓扑性质分析[J]. *物理学报*, 2012, 61 (19): 95-105.

ZHENG Xiao, CHEN Jian-ping, SHAO Jia-li, et al. Analysis on topological properties of Beijing urban public transit based on complex network theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(19): 95-105.

- [11] DING R, UJANG N, BIN HAMID H, et al. Complex network theory applied to the growth of Kuala Lumpur's public urban rail transit network[J]. *PloS one*, 2015, 10 (10): e0139961.

- [12] ZOU Z, LIU P, ZHOU S, et al. Analysis on evolving model with modular growth of urban roadway network topology structure[J]. *Kybernetes: The International Journal of Systems & Cybernetics*, 2015, 44 (4): 505-517.

- [13] DU Y P, CHEN F F, ZHANG Z H. Analysis of urban rail transit based on complex network [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 90: 770-773.

- [14] XU Y, LIU X, YANG X C, et al. ITS demand analysis based on fuzzy cluster method[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering*, 2006, 30(5): 853-855.

- [15] SIENKIEWICZ J, HOLYST J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. *Physical Review E*, 2005, 72(4): 46-50.

- [16] LI P, XIONG X, QIAO Z L, et al. Topological properties of urban public traffic networks in Chinese top ten biggest cities[J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, 23(12): 3384-3386.

- [17] 胡一屹. 基于复杂网络的交通网络复杂性研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008.

HU Yi-hong. Research on the complexity of traffic network based on complex network [D]. Shanghai: Fudan University, 2008.