

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.11.014

基于复杂网络的失效公交站点绕行方案研究

王国娟^{1,2}, 吕文红¹, 高歌¹, 刘玉洁¹

(1. 山东科技大学 交通学院, 山东 青岛 266590;

2. 宿迁市城市规划设计研究院有限公司, 江苏 宿迁 223800)

摘要:为研究城市公交站点失效后的绕行方案,以公交线路发车时间间隔倒数为权重,构建基于Space L法的公交网络模型,根据交通流量特征将公交网络划分为早高峰、晚高峰和平峰3个网络。首先,结合ABC管理法构建了基于Lorenzen曲线的公交网络拓扑特性指标分析模型,识别出各指标的重点要素。然后,在拓扑特性指标研究的基础上,设计了公交站点失效优化方案。以网络平均路径长度和网络全局效率衡量公交网络的连通性,根据公交站点绕行前后两指标值的变化来判断网络是否优化,若绕行后网络平均路径长度变小,网络全局效率变大,则优化后网络更连通。根据绕行区域内站点的数量,分为存在2个站点、1个站点和0个站点3种情况进行讨论。最后,以青岛市某区域公交网络为例研究模型的可靠性。通过对节点度、2阶节点度、中心性等指标的分析,得出该公交网络具有明显的小世界性,对于相同排名的站点,各时段的节点中心度值大小排序为早高峰>晚高峰>平峰,排序靠前的站点主要分布在城市中心区域和城区边缘新规划区域,此类站点大多分布在商场、高校、政府机构附近;选取节点度值排名前10的公交站点作为失效站点进行优化分析,研究表明优化后的网络平均最短路径长度变小,网络全局效率变大,设计的优化方案可行。

关键词:城市交通;绕行方案;复杂网络;公交网络;站点

中图分类号:U491.17

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2020)11-0107-11

Study on Detour Scheme for Failure of Transit Station Based on Complex Network

WANG Guo-juan^{1,2}, LÜ Wen-hong¹, GAO Ge¹, LIU Yu-jie¹

(1. School of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China;

2. Suqian Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Suqian Jiangsu 223800, China)

Abstract: In order to study the detour scheme after the failure of urban transit station, taking the reciprocal of transit line departure time interval as the weight, the transit network model is constructed based on Space L method. According to the characteristics of traffic volume, the transit network is divided into morning rush hour network, evening rush hour network and flat network. First, a Lorezen curve based transit network topological characteristic indicator analysis model is constructed by combining ABC management method to identify the key elements of each indicator. Second, based on the research of topological characteristics indicators, an optimization scheme for failure of transit station is designed. The connectivity of the transit network is measured by average path length and the overall efficiency of the network. The optimization effect is judged by the changes of the values of the 2 indicators before and after transit station detour. If the average path length of the network becomes smaller after detour and the overall efficiency of the network becomes larger, the network becomes more connected after optimization. According to the number of stations in the

收稿日期:2020-03-27

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(71801144);山东省科技攻关重点研发项目(2019GGX101008)

作者简介:王国娟(1994-),女,甘肃静宁人,硕士研究生.(2712128025@qq.com)

detour area, it is divided into 3 situations (2 stations, 1 station and no station) for discussion. Finally, the reliability of the model is studied by a case study of a regional transit network of Qingdao City. Through the analysis of node degree, second-order node degree, centrality and other indicators, it is concluded that this transit network has obvious small-world characteristics. For the stations with the same ranking, the node centrality values of different periods are sorted as morning rush hour > evening rush hour > flat hour, the top-ranked stations are mainly distributed in the urban center area and the new planned area at the edge of the urban area. Most of these stations are distributed near shopping malls, universities, and government agencies. The transit stations with top 10 node degree values are selected as the failure stations for optimization analysis. The result shows that the average shortest path length of the optimized network decreases, the overall efficiency of the network increases, and the designed optimization scheme is feasible

Key words: urban traffic; detour scheme; complex network; transit network; station

0 引言

目前,大多数研究采用 Space L 、Space P 和 Space R 中的一种或几种方法构建单一和复合公交网络模型,对网络站点拓扑特性指标和可靠性展开研究。文献[1-2]构建了无权公交网络,文献[3-6]构建了加权公交网络,文献[7-8]构建了公交—地铁复合网络。上述研究表明城市公交网络站点节点度分布具有明显的小世界和无标度特性。文献[9-10]构建了无权公交换乘网络,文献[11-12]构建了加权复杂运输网络,文献[13-14]构建了公交—地铁加权复合网络。上述研究分别采用不同攻击模式对公交网络站点可靠性展开了研究,得出公交网络具有明显的小世界和无标度特性,复合网络站点可靠性高于单一网络,网络在面对随机攻击时更加脆弱^[15-16]。

当前复杂网络在交通运输网络的研究中,对拓扑指标缺乏聚类分析,对公交站点失效后如何采取优化措施亦较少涉及。如能对公交网络站点拓扑特性指标进行聚类分析,找出关键节点并有针对性地进行管理,在站点失效后及时采取合理的绕行措施,将有利于提高公交网络对抗攻击的能力。

1 基于复杂网络的城市公交网络分析

1.1 公交网络模型构建方法

本研究采用 Space L 模型构建方法,以公交线路发车时间间隔倒数为权重构建公交网络模型。此模型以公交站点为网络节点,若两公交站点相邻且经过同一公交线路,则两公交站点间存在一条连边。定义 G 为公交网络, V , E , W , H 分别表示网络的节点、连边、节点权重和连边权重。根据客流量特性,将公交网络划分为早高峰、晚高峰和平峰 3 个

网络,分别用 G^m , G^e , G^p 表示。

用矩阵形式表示网络拓扑关系,若节点对之间存在连边则矩阵中的元素为 1,不存在连边则矩阵中对应元素值为 0。假设网络中有 N 个节点,则定义公交线路网络的邻接矩阵为 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

以早高峰网络为例,阐述公交加权网络模型构建规则。

$$h_{ij}^{fm} = \sum_{ij \in \Gamma(ij)} \frac{1}{T_{ij}^{fm}}, \quad (2)$$

式中, h_{ij}^{fm} 为早高峰时段加权网络节点 i 和 j 连边权重; $\Gamma(ij)$ 为经过节点 i 与 j 公交线路的集合; T_{ij}^{fm} 为早高峰时段经过节点 i 和节点 j 连边公交线路发车时间间隔。

对高峰时段加权公交网络连边权重进行归一化处理则有:

$$h'_{ij}^{fm} = h_{ij}^{fm} / \left(\sum_i \sum_j h_{ij}^{fm} \right), \quad (3)$$

早高峰公交加权网络连边权重为:

$$H^{fm} = [h'_{ij}^{fm}]_{n \times n}, \quad (4)$$

早高峰加权网络节点权重为:

$$w_i^{fm} = \sum_{j \in \Gamma(i)} h'_{ij}^{fm}, \quad (5)$$

早高峰公交加权网络节点权重矩阵为:

$$W_i^{fm} = [w_1^{fm}, w_2^{fm}, \cdots, w_n^{fm}], \quad (6)$$

公交加权网络连边权重向量:

$$H^f = \{H^{fm}, H^{fe}, H^{fp}\}, \quad (7)$$

公交加权网络节点权重向量:

$$W^f = \{W^{fm}, W^{fe}, W^{fp}\}. \quad (8)$$

1.2 基于 Lorenz 曲线的公交网络拓扑特性指标分析模型

Lorenz 曲线能对事件的分布状况进行聚集性分析, 并得出热点所在^[17]。本研究以公交网络拓扑特性指标为对象, 各拓扑特性指标站点个数呈离散分布并趋于集中。聚集系数 Q 用以描述 Lorenz 曲线的聚集程度, 其值为 $\alpha/(\alpha+\beta)$, 其中: α 为 Lorenz 曲线与直线 $y=x$ 之间的面积, β 为 Lorenz 曲线与 x 轴之间的面积, 如图 1 所示。计算公式如下:

$$Q = 1 - 2 \int_0^1 L dx, \quad (9)$$

式中 L 为 Lorenz 曲线的函数表达式。

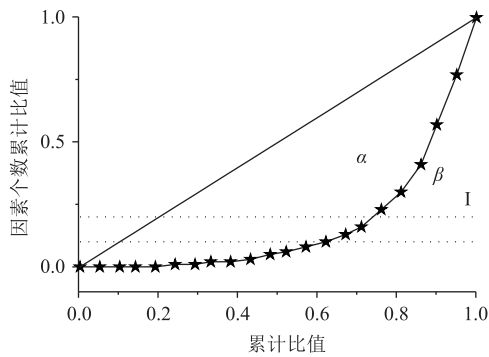


图 1 Lorenz 曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Lorenz curve

聚集系数越大表示分布越不均匀^[18]。 $Q > 0.4$ 时呈聚集性, $Q > 0.5$ 呈强聚集性。结合 ABC 管理分类法, 根据因素个数累计比值 (y 轴) 将 Lorenz 曲线分为 3 个区间, 如表 1 所示。本研究则以站点个数累计比值 (y 轴) 为分类对象, 对各拓扑特性指标分布情况进行分析。

表 1 曲线区间分布

Tab. 1 Curve interval distribution

累计度分布	区间分类	研究对象等级
0.2 ~ 1.0	I 类	主要事物
0.1 ~ 0.2	II 类	次要事物
0 ~ 0.1	III 类	更次要事物

Lorenz 曲线公交网络拓扑特性分析模型求解步骤:

Step 1: 将拓扑特性指标按所对应公交站点个数大小进行升序排列。

Step 2: Lorenz 曲线 x 轴获取。

(1) 按照 Step 1 的顺序, 对各拓扑特性指标进行编号;

(2) 计算累计比值:

累计比值 = 编号/最大编号数;

(3) 累计比值即为 Lorenz 曲线的 x 轴。

Step 3: Lorenz 曲线 y 轴获取。

(1) 计算因素个数比值:

站点个数比值 = 各拓扑指标公交站点个数/公交站点总个数;

(2) 将站点个数比值根据升序排列的次序进行累加, 得到站点个数累计比值;

(3) 站点个数累计比值即为 Lorenz 曲线的 y 轴。

2 城市公交网络失效站点绕行方案设计

公交网络优化主要体现在网络连通性的提高, 本研究选取平均路径长度和网络全局效率两个指标衡量公交网络连通性, 通过对公交站点绕行前后两指标数值的变化判断网络是否优化: 与绕行前网络相比, 若绕行后网络平均路径数值变小、网络全局效率数值变大, 则表明网络优化后更连通, 绕行方案可行。

本研究定义绕行前网络为公交站点失效后不采取绕行方案的网络, 此网络为除去失效节点以及与失效节点相连连边后的网络。假设某一小型网络中有 10 个节点, 20 条连边, 与编号为 7 的节点相连的连边有 3 条, 则节点 7 失效后, 绕行前网络有 9 个节点, 17 条连边。

模型假设:

(1) 绕行网络为采取绕行方案后的网络, 为节约运营成本不重新修建公交站点, 站点失效后只选择公交网络中已有站点作为绕行站点, 绕行后公交网络的站点数为 $N-1$;

(2) 公交线路首末站点不受攻击;

(3) 以公交上行方向为研究对象, 规定失效站点的上一站点为前, 失效节点的下一站点为后;

(4) 为方便模型计算, 网络优化后其他节站权重保持不变, 失效站点权重全部分配到绕行站点。

假设节点 i 为失效站点, 节点 $i-1$ 和 $i+1$ 为失效站点 i 的前、后站点, 节点 j 为绕行站点。绕行站点选取过程中既要考虑路径最短, 也要考虑与前后站点的位置关系, 应尽量选择在前后站点的中间位置, 因此设失效站点前后两站点 $i-1$ 和 $i+1$ 间直线距离为 $d_{(i-1,i+1)}$, 分别以节点 $i-1$ 和节点 $i+1$ 为圆心, $d_{(i-1,i+1)}$ 为半径画圆, 两圆重合区域即为选择绕行站点的区域 S 。节点 $i-1$ 与 j 节点间的直线距离为 $d_{(i-1,j)}$, 节点 j 与节点 $i+1$ 之间的直线距离为 $d_{(j,i+1)}$, 选取与节点 $i-1$ 和 $i+1$ 直线距离和最小的站点作为绕行站点, 绕行区域 S 内, 绕行站点有 2 个、1 个和 0 个绕行站点 3 类情况。

2.1 绕行区域内存在2个绕行站点

若重合区域存在2个最短路径站点,则2个站点同为绕行站点,如图2所示,实线线段为绕行前线路,虚线线段为绕行后线路。节点 j_1 与节点 $i-1$ 间的直线距离为 $d_{(i-1,j_1)}$,节点 j_1 与节点 $i+1$ 间的直线距离为 $d_{(j_1,i+1)}$,节点 j_2 与节点 $i-1$ 间的直线距离为 $d_{(i-1,j_2)}$,节点 j_2 与节点 $i+1$ 间的直线距离为 $d_{(j_2,i+1)}$,则绕行站点 j_1 和 j_2 满足如下条件:

$$\min d = d_{(i-1,j_1)} + d_{(j_1,i+1)} = d_{(i-1,j_2)} + d_{(j_2,i+1)}, \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} j_1 \in S \\ j_2 \in S \end{cases} \quad (11)$$

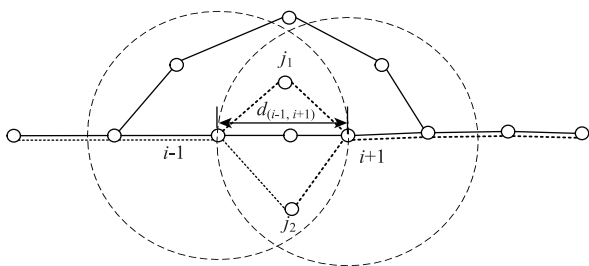


图2 绕行区域内存在2个节点

Fig. 2 Two nodes in detour area

网络节点度反映节点与其他节点连接关系,节点度值越大表明该节点与其他节点间的联系越密切,连通性越高,可以承担更多的交通负荷。本研究采用节点度值重新分配策略^[19-20]分配失效节点权重值,绕行后失效节点 i 的节点权重按照节点度值重新分配策略分配至节点 j_1 和 j_2 。设失效节点 i 的权重值为 w_i ,节点 j_1 和 j_2 的权重值为 w_{j_1} , w_{j_2} ,节点 j_1 和 j_2 的节点度值为 k_{j_1} , k_{j_2} ,则采用节点度值重新分配策略后节点 j_1 和 j_2 的权重为:

$$w'_{j_1} = w_i + \left(\frac{k_{j_1}}{k_{j_1} + k_{j_2}} \right) w_i, \quad (12)$$

$$w'_{j_2} = w_i + \left(\frac{k_{j_2}}{k_{j_1} + k_{j_2}} \right) w_i. \quad (13)$$

2.2 绕行区域内存在1个绕行站点

若重合区域内最短路径站点只有1个,如图3所示该站点即为绕行站点,实线线段为绕行前线路,虚线线段为绕行后线段,则有绕行站点 j 满足如下条件:

$$\min d = d_{(i-1,j)} + d_{(j,i+1)}, \quad (14)$$

$$\text{s. t. } j \in S. \quad (15)$$

假设失效前节点 i 的节点权重为 w_i ,节点 j 的权重为 w_j 则有绕行后节点 j 的权重为:

$$w'_j = w_i + w_j. \quad (16)$$

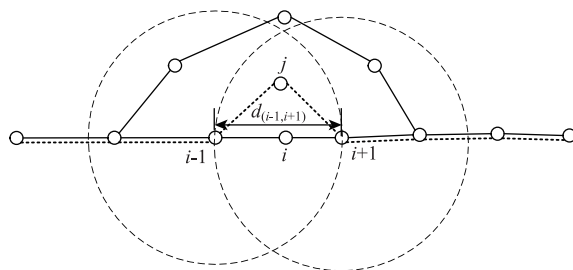


图3 绕行区域内存在1个节点

Fig. 3 One node in detour area

2.3 绕行区域内无站点

若重合区域 S 内无站点,则适当增加半径值,扩大重合区域直至区域内存在最短路径节点,如图4所示,外侧虚线区域为扩大后的区域,实线线段为绕行前线路,虚线线段为绕行后线段。则有绕行站点 j 满足如下条件:

$$\min d = d_{(i-1,j)} + d_{(j,i+1)}, \quad (17)$$

$$\text{s. t. } j \in S'. \quad (18)$$

与 S 区域内存在站点相同,对于扩大的区域 S' 同样存在1个绕行节点和存在2个绕行节点两种情况,节点权重 w'_j 由公式(12)、公式(13)和公式(16)计算求得。

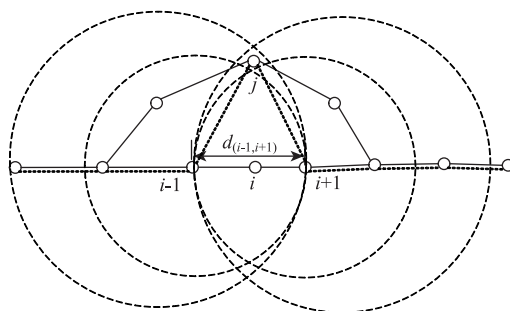


图4 绕行区域内不存在节点

Fig. 4 No node in detour area

3 案例分析

本研究以青岛市某区公交网络为例进行分析,区域内有226条公交线路^[21],以公交线路发车间隔倒数为权重,构建早高峰、晚高峰和平峰公交网络模型见表2,3个网络均有1823个节点和2666条连边。

3.1 区域公交网络拓扑特性分析

(1) 节点度

该区域公交站点度值主要分为14类,分别为1,2,...,13和17,公交站点间的节点度值差别较大。

表 2 节点度分布的 Lorenz 曲线分析模型构建表

Tab. 2 Lorenz curve analysis model construction table for node degree distribution

节点 度值	编号	累计比值 (x 轴)	站点 个数	站点 个数比值	站点个数累计 比值 (y 轴)
17	1	0.071 4	1	0.000 5	0.000 5
13	2	0.142 9	1	0.000 5	0.001 0
12	3	0.214 3	1	0.000 5	0.001 0
11	4	0.285 7	6	0.003 3	0.004 3
10	5	0.357 1	8	0.004 4	0.008 7
9	6	0.428 6	8	0.004 4	0.013 1
8	7	0.500 0	21	0.011 5	0.024 6
7	8	0.571 4	36	0.019 8	0.044 4
6	9	0.642 9	66	0.036 2	0.080 6
1	10	0.714 3	82	0.045 0	0.125 6
5	11	0.785 7	110	0.060 4	0.186 0
4	12	0.857 1	211	0.115 8	0.301 8
3	13	0.928 6	236	0.129 5	0.431 3
2	14	1.000 0	1 036	0.568 6	1.000 0

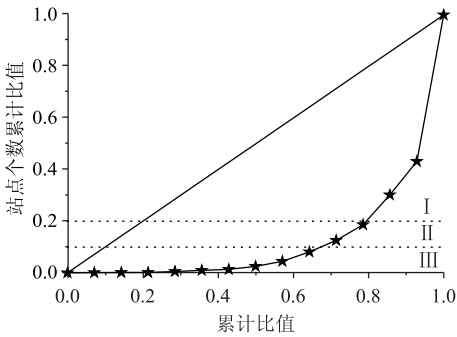
累计度服从幂律分布, 网络具有小世界特性。

由公式 (9) 计算可得该区公交站点节点度值分布聚集系数为 0.87, 大于 0.5, 呈现强聚集性, 由图 5 (a) 可得 I 类区间的节点度为 4, 3, 2, 分别占总站点数的 11.57%, 12.95% 和 56.83%。由图 5 (b) 节点度值为 2 的公交站点所占比重最大, 表明该区大部分公交站点为非换乘站点, 此类站点主要分布在郊区及村镇区域, 起连接前后两公交站点的作用, 换乘便捷性不高; 节点度值为 1 的尽头时公交站点有 82 个, 占总站点数量的 4.5%。网络中节点度值大于 10 的站点只有 16 个, 此类节点为公交枢纽站点, 均分布在中心商业区边缘, 周围大多分布着度值较大、换乘便捷的公交站点, 有利于缓解中心区域交通负荷。

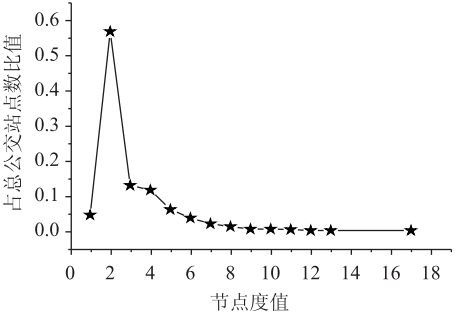
(2) 局部特性分析

考虑相邻及次邻节点的影响, 本研究以 2 阶邻近度这一拓扑指标来衡量公交网络节点局部重要性。对于公交站点而言, 2 阶邻近度值越大, 表明其局部换乘便捷性越高。

如图 6 (a) 所示, 网络节点 2 阶度值分布集中系数为 0.6, 呈现强分布性, I 类区域 2 阶节点度值为 28, 22, 26, 20, 24, 18, 16, 2, 14, 12, 6, 10, 8, 4, 分别占站点总数量的 2.30%, 2.47%, 2.80%, 3.46%, 3.68%, 3.84%, 4.44%, 4.88%, 5.16%, 6.03%, 6.14%, 7.02%, 8.83%, 19.14%, 如图 6 (b) 所示 2 节点度值为 4



(a) 节点度数量分布Lorenz图



(b) 节点度值分布图

图 5 节点度值分布图

Fig. 5 Curves of node degree value distribution

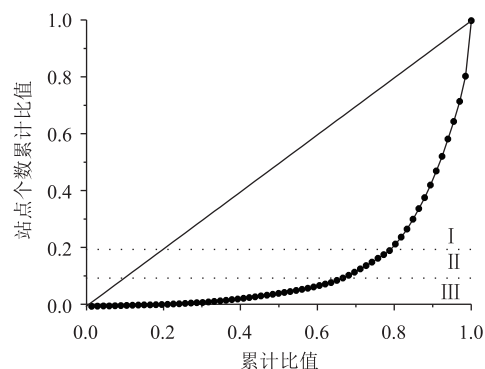
的站点个数最多。由此可得: ①青岛市某区域公交网络密度较低, 2 阶节点度值为 4 的公交站点最多, 约占总节点数的 19%, 5% 的公交站点 2 阶邻近度值为 2, 此类公交站点为始发站多分布在郊区、村镇等区域, 换乘便捷性差, 连通性较低; ② 2 阶邻近度值超过 100 的站点占总站点数量的 1.2%, 大多数站点为大型购物中心, 其中排名前 10 的站点为: 商城、东新村东、机关东部办事中心、市民服务中心北、世纪商城、西海岸汽车东站、东方华庭、新城吾悦广场、保税港区西门、家佳源, 此类节点均布中心商业区。

(3) 中心性分析

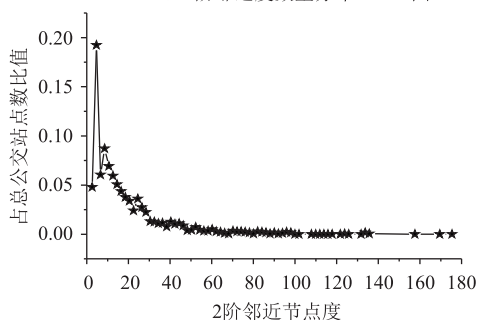
点度中心性是网络中刻画节点中心性的最直接指标, 在公交网络中若某公交站点与其他很多站点有直接联系, 表明该站点处于整个公交网络的中心位置, 此站点换乘更便捷, 一旦失效后对整个网络的影响也更大。

早高峰、晚高峰和平峰 3 个时段节点中心度平均值为 0.329, 0.288, 0.179, 总和为 600.38, 525.486, 326.154, 平方和为 502.97, 368.239, 138.521, 最小值为 0.011, 0.011, 0.004, 最大值为 3.601, 3.236, 1.959, 各值均为早高峰 > 晚高峰 > 平峰。

青岛市某区域各时段公交网络相同排名站点的



(a) 2阶邻近度数量分布Lorenz图



(b) 2阶邻近度值分布图

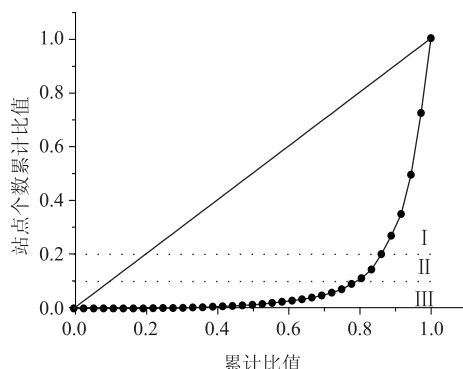
图6 2阶邻近度站点分布 Lorenz 图

Fig. 6 Lorenz curves of 2nd-order proximity degree station distribution

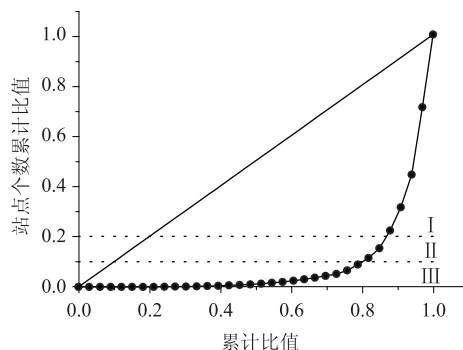
节点中心度值均为早高峰 > 晚高峰 > 平峰。这是由于该区域内分布大量的工厂、高校和企事业单位,上班时间较为集中,下班时间较为分散,早高峰时段公交网络节点权重较大,客流量较晚高峰和平峰时段交通流量更为集中,点度中心值反应站点在网络中的重要程度,因此相同排名的节点中心度值:早高峰 > 晚高峰 > 平峰。

早高峰时段公交网络节点中心度值范围为 0.001 ~ 3.601, 如表3所示以 0.1 为步长将节点中心度值划分为 36 个区间, 由图 7 (a) 可知公交站点节点中心度值主要分布在 $[0.8, 0.9)$, $[0.6, 0.7)$, $[0.5, 0.6)$, $[0.4, 0.5)$, $[0.3, 0.4)$, $[0.2, 0.3)$, $[0.1, 0.2)$ 和 $[0, 0.1)$ 这 8 个区间, 各区间站点个数分别占总站点数的 2.14%, 3.24%, 5.7%, 6.8%, 8.1%, 14.54%, 22.87% 和 27.65%。

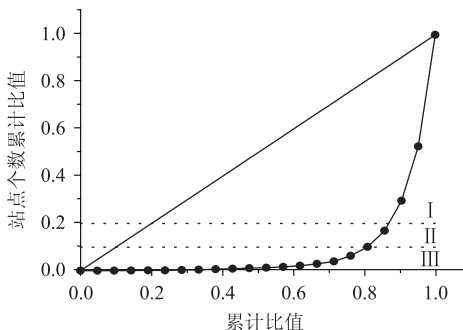
晚高峰时段公交网络节点中心度值范围为 0.004 ~ 3.236, 以 0.1 为步长将节点中心度值划分为 33 个区间, 由图 7 (b) 可知公交站点节点中心度值主要分布在 $[0.4, 0.5)$, $[0.3, 0.4)$, $[0.2, 0.3)$, $[0.1, 0.2)$ 和 $[0, 0.1)$ 这 5 个区间, 各区间站点个数分别占总站点数的 7.02%, 9.22%, 12.95%, 26.71% 和 28.8%。



(a) 早高峰



(b) 晚高峰



(c) 平峰

图7 节点中心度值站点分布 Lorenz 图

Fig. 7 Lorenz curve of node centrality value station distribution

平峰时段公交网络节点中心度值范围为 0.004 ~ 1.959, 同样以 0.1 为步长将点度中心值分为 21 个区间, 由图 7 (c) 可知公交站点节点中心度值主要分布在 $[0.2, 0.3)$, $[0.1, 0.2)$ 和 $[0, 0.1)$ 这 3 个区间, 各区间站点个数分别占总站点数的 12.73%, 23.04% 和 47.28%。

综上所述, 对于整个区域公交网络而言, 大多数公交站点节点中心度值分布在区间 $[0.2, 0.3)$, $[0.1, 0.2)$ 和 $[0, 0.1)$, 平均值为 0.265, 对于相同排名的站点, 节点中心度值大小在早高峰、晚高峰和平峰时段呈现明显的分布规律, 排序顺序为: 早高峰 > 晚高峰 > 平峰。

表 3 早高峰节点中心度值分布区间

Tab. 3 Node centrality value distribution intervals in early rush hour

排 序	区间	站 点 数	排 序	区间	站 点 数	排 序	区间	站 点 数
1	[0, 0.1)	504	13	[1.2, 1.3)	11	25	[2.4, 2.5)	3
2	[0.1, 0.2)	417	14	[1.3, 1.4)	8	26	[2.5, 2.6)	0
3	[0.2, 0.3)	265	15	[1.4, 1.5)	5	27	[2.6, 2.7)	0
4	[0.3, 0.4)	146	16	[1.5, 1.6)	8	28	[2.7, 2.8)	3
5	[0.4, 0.5)	124	17	[1.6, 1.7)	9	29	[2.8, 2.9)	0
6	[0.5, 0.6)	104	18	[1.7, 1.8)	2	30	[2.9, 3.0)	1
7	[0.6, 0.7)	59	19	[1.8, 1.9)	4	31	[3.0, 3.1)	0
8	[0.7, 0.8)	36	20	[1.9, 2.0)	0	32	[3.1, 3.2)	1
9	[0.8, 0.9)	39	21	[2.0, 2.1)	7	33	[3.2, 3.3)	0
10	[0.9, 1.0)	23	22	[2.1, 2.2)	2	34	[3.3, 3.4)	0
11	[1.0, 1.1)	14	23	[2.2, 2.3)	3	35	[3.4, 3.5)	1
12	[1.1, 1.2)	19	24	[2.3, 2.4)	4	36	[3.5, 3.6)	1

由表 4 可知公交网络各时段节点中心度值排序靠前的站点主要分布在商业中心区域和城区边缘新规划区域, 此类站点大多分布在商场、高校、政府机构附近, 例如同时经过 3 个时段排名前 10 的公交站点有: 世纪商城、青职学院、东新村东、保税港区西门等。

3.2 区域公交网络站点失效绕行方案设计

3.2.1 绕行站点获取

(1) 失效站点获取

常见城市公共交通网络中地铁与公交站点重合区域大多为交通流量较大的区域, 人为造成公交站点失效的常见原因为地铁站点施工, 因此本研究在选择失效节点的过程中采用蓄意攻击方式, 选择节点度值大的站点进行失效处理, 如表 5 所示。选取节点度值排名前 10 的站点作为研究对象, 进行线路优化处理, 验证模型的可靠性, 对于节点度值相同的站点, 选取编号较小的站点。

表 4 节点中心度排名前 10 站点

Tab. 4 Stations with top 10 node centrality values

序号	站点编号	早高峰	晚高峰	平峰
1	319	保税港区西门	33 机关东办公中心	33 机关东办公中心
2	33	机关东办公中心	320 青职学院	341 西海岸汽车东站
3	341	世纪商城	341 世纪商城	319 保税港区西门
4	320	青职学院	319 保税港区西门	320 青职学院
5	4	西海岸医疗中心	321 武家庄	513 天目山农贸市场
6	10	北船职工公寓	51 东新村东	373 王家港
7	321	武家庄	373 王家港	328 城市桂冠
8	513	天目山农贸市场	10 北船职工公寓	51 东新村东
9	34	西海岸汽车东站	332 金海岸利群	192 琅琊台酒厂
10	329	丁家河	377 观海华庭	332 金海岸利群

表 5 失效站点

Tab. 5 Failure of stations

序 号	失效站 点编号	度 值	站点名称	失效节点权重		
				早高峰	晚高峰	平峰
1	50	17	西海岸汽车总站	0.372 2	0.358 3	0.483 2
2	42	13	灵山卫交通枢纽站	0.785 3	0.651 4	0.236 5
3	332	12	金海岸利群	1.335 3	1.206 1	0.701 1
4	33	11	机关东部办公中心	1.450 0	1.300 0	0.732 6
5	151	11	市民服务中心北	0.488 9	0.447 2	0.296 9
6	192	11	琅琊台酒厂	0.604 2	0.605 6	0.377 4
7	319	11	保税港区西门	1.350 0	1.226 9	0.676 1
8	377	11	观海华庭	0.771 4	0.641 3	0.676 1
9	551	11	王台汽车站	0.316 7	0.300 0	0.178 9
10	4	10	西海岸医疗中心	0.441 7	0.421 4	0.237 4

(2) 绕行前、后站点的获取

在确定绕行站点时需要先确定上行线路失效站点前一站点和后一站点的名称及距离, 由于只选取一定范围内的公交站点, 且公交站点间的距离较远, 因此可选用百度地图进行粗略测距。

(3) 绕行站点获取

在确定绕行站点时需要先确定前后站点的名称及距离。以失效站点“西海岸汽车总站”公交站点为例, 前后站点距离最近的两公交站点为“唐岛湾小区”和“家佳源”, 两站点间直线距最小值为 0.579 km, 因此则有“西海岸汽车总站”的前一站点为“唐岛湾小区”, 后一站点为“家佳源”。分别以前后站点为圆心, 两站点间的直线距离为半径画

圆选择绕行站点。绕行区域内有“西海岸汽车东站”和“西海岸汽车总站西”两个公交站点，其中“西海岸汽车东站”、“西海岸汽车总站西”到前后站点的直线距离分别为 0.214, 0.483 km 和 0.411, 0.516 km，则两绕行站点到前后站点距离之和分别

为 0.697 和 0.927 km，“西海岸汽车东站”到两前后站点间的距离最小，因此失效站点为“西海岸汽车东站”。其余各失效节点前后站点及绕行站点编号、名称和绕行距离如表 6 所示。失效节点的前后站点及绕行站点的编号和名称如表 7 所示。

表 6 绕行距离值

Tab. 6 Detour distance values

失效站点编号	绕行站点	前站	距离/km	后站	距离/km	总和/km
50	西海岸汽车东站	唐岛湾小区	0.214	家佳源	0.483	0.697
	西海岸汽车总站西		0.411		0.516	0.927
42	东方华庭北门	瑞海花园	0.473	东方华庭	0.379	0.852
	西南村		0.806		0.294	1.100
332	爱心农贸市场	理工大学新校区	0.525	泽润金融广场	0.277	0.802
	美国想象英语		0.370		0.512	0.882
33	武夷山市场	城市桂冠	0.422	丁家河	1.300	1.722
	中治东方大厦		0.422		1.300	1.722
151	郝家石桥	喜鹊山路	0.761	金河丽城	0.265	1.026
	人名医院东		0.777		0.527	1.304
	医药公司		0.433		0.789	1.222
192	小哨头北	小哨头	0.493	飞宇路	0.451	0.944
	琅琊台路南		0.366		0.284	0.650
	世纪公寓		0.439		0.732	1.171
319	卓亭广场	五台山路 新于家河	0.105	中国人保财险	0.285	0.390
377	黄海学院南	灵山卫地铁站	1.000	灵山卫枢纽站	0.856	1.856
551	同春公司	星火集团	0.523	王台大集	0.643	1.166
4	西海岸医疗中心北门	瑞智精密	0.304	齐长城	0.425	0.729

表 7 绕行前后站点名称及编号

Tab. 7 Station names and serial numbers before and after detour

失效站 点编号	前站		绕行站点		后站	编号
	名称	编号	名称	编号	名称	
50	唐岛湾小区	436	西海岸汽车东站	194	家佳源	370
42	瑞海花园	540	东方华庭北门	539	东方华庭	43
332	理工大学新校区	7	爱心农贸市场	515	泽润金融广场	334
33	城市桂冠	328	武夷山市场	327	丁家河	329
151	喜鹊山路	150	郝家石桥	982	金河丽城	152
192	小哨头	175	琅琊台路南	872	飞宇路	873
319	五台山路新于家河	475	卓亭广场	318	中国人保财险	324
377	灵山卫地铁站	1 745	黄海学院南	841	灵山卫枢纽站	42
551	星火集团	549	同春路	673	王台大集	548
4	瑞智精密	429	西海岸医疗中心北门	657	齐长城	430

3.2.2 绕行后指标计算

在计算绕行后公交网络最短路径长度和网络全

局效率之前，首先获得优化后公交网络拓扑连边权重。若原网络中节点 j 与前后站点 $i-1$ 或 $i+1$ 存在

连边, 则优化后的站点 j 与站点 $i-1$ 或 $i+1$ 存在连边, 优化后网络绕行站点与连边的权重值为 $h'_{j,i+1} = h_{j,i+1} + \frac{1}{2}w'$; 若优化后网络中站点 j 与节点 $i-1$ 或 $i+1$ 不存在连边, 优化后网络增加站点 j 与前后站点 $i-1$ 或 $i+1$ 的连边, 且优化后连边的权重为 $h'_{i-1,j} = \frac{1}{2}w'$ 或 $h'_{j,i+1} = \frac{1}{2}w'$ 。以失效节点“灵山卫公交枢纽

站”为例, 早高峰时段节点权重为 0.785 3, 绕行前网络中不存在连边 540-539 (“瑞海花园-东方华庭北门”), 存在连边 539-43 (东方华庭北门-东方华庭), 则绕行后增加连边 540-539, 且连权重为:

$$h'_{540-539} = 0.279\ 8 + 0.392\ 65 = 0.672\ 45。(19)$$
$$h'_{539-43} = 0.392\ 65, \text{ 表 8 所示为各站点绕行连边权重。}$$

表 8 绕行连边权重
Tab. 8 Detour edge weights

序号	绕行后连边权重				绕行后连边权重			
	连边	早	晚	平	连边	早	晚	平
1	436-194	0.181 60	0.179 15	0.241 60	194-370	0.181 60	0.179 15	0.241 60
2	540-539	0.672 45	0.551 20	0.259 25	539-43	0.392 65	0.325 70	0.118 25
3	7-515	0.667 65	0.603 05	0.350 55	515-334	0.667 65	0.603 05	0.350 55
4	328-327	1.391 70	1.216 70	0.674 60	327-329	0.725 00	0.650 00	0.366 30
5	150-982	0.244 45	0.223 60	0.148 45	982-152	0.244 45	0.223 60	0.148 45
6	175-872	0.302 10	0.302 80	0.188 70	872-873	0.352 10	0.312 80	0.205 40
7	475-318	0.675 00	0.613 45	0.338 05	318-324	0.675 00	0.613 45	0.338 05
8	1745-841	0.385 70	0.320 65	0.338 05	841-42	0.485 70	0.403 98	0.383 50
9	549-673	0.158 35	0.150 00	0.089 45	673-548	0.158 35	0.150 00	0.089 45
10	429-675	0.220 85	0.210 70	0.118 70	657-430	0.220 85	0.210 70	0.118 70

公式 (11)、公式 (12) 和公式 (14) 计算求得绕行站点连边权重, 如表 9 所示。

表 9 绕行站点权重
Tab. 9 Detour station weights

序号	早高峰节点权重		晚高峰节点权重		平峰节点权重	
	绕行前	绕行后	绕行前	绕行后	绕行前	绕行后
1	0.412 5	0.784 7	0.355 6	0.713 9	0.355 6	0.740 8
2	0.363 1	1.148 4	0.281 0	0.932 4	0.281 0	0.390 0
3	0.208 3	1.543 6	0.166 7	1.372 8	0.166 7	0.796 6
4	1.416 7	2.866 7	1.266 7	2.566 7	1.266 7	1.490 9
5	0.438 0	0.926 9	0.366 7	0.813 9	0.366 7	0.540 9
6	0.116 7	0.720 9	0.116 7	0.722 3	0.116 7	0.460 7
7	1.583 3	2.933 3	1.426 9	2.653 8	1.426 9	1.454 1
8	0.193 6	0.965	0.179 2	0.820 5	0.179 2	0.773 4
9	0.366 7	0.683 4	0.328 1	0.628 1	0.328 1	0.393 1
10	0.250 0	0.691 7	0.200 0	0.621 4	0.200 0	0.337 4

计算结果如表 10 和表 11 所示。表 10 中与绕行前相比, 早高峰、晚高峰和平峰时段绕行后公交网络平均最短路径长度均变小, 表明绕行后公交网络越紧密, 网络性能提升。

如表 11 所示, 除平峰时段编号为 50 的站点“西海岸汽车总站”, 绕行前后公交网络全局效率均

为 3.610 2 无变化之外, 其余绕行站点在早高峰、晚高峰和平峰时段公交网络全局效率均提高。这是由于“西海岸汽车总站”站点失效后绕行节点为“西海岸汽车东站”, 由表 4 可知“西海岸汽车东站”在平峰时段为节点中心度值排名前 3 站的关键站点, 交通负荷较大, “西海岸汽车总站”站点失效后站点权重分配到“西海岸汽车东站”, 使得这一站点权重大幅度增加, 因而网络效率没有提升。进一步研究中选择到前后两站点距离次小的“西海岸汽车总站”作为新的绕行站点, 绕行后平均最短路径长度由 13.792 91 变为 13.700 89, 网络全局效率由 3.610 2 变为 3.610 3 数值在增大, 绕行方案可行。

4 结论

本研究以青岛市某区域公交网络为例, 结合 ABC 管理法, 构建了基于 Lorezen 曲线的公交网络拓扑特性指标分析模型, 并在拓扑特性指标研究的基础上设计了公交网络优化方案。通过对节点度, 2 阶节点度、中心性等指标的分析, 得出该区公交网络具有明显的小世界性, 各时段对于相同排名的站点, 节点中心度值大小为早高峰 > 晚高峰 > 平峰; 选取节点度值排名前 10 的公交站点作为失效站点,

表 10 失效前后网络平均路径长度值
Tab. 10 Network average path lengths before and after failure

序号	失效编号	绕行编号	早高峰		晚高峰		平峰	
			绕行前	绕行后	绕行前	绕行后	绕行前	绕行后
1	50	194	13. 729 08	13. 650 53	13. 727 45	13. 648 99	13. 792 91	13. 649 00
2	42	539	13. 730 42	13. 710 21	13. 729 33	13. 714 33	13. 729 33	13. 699 45
3	332	515	13. 559 23	13. 452 45	13. 559 23	13. 498 72	13. 559 23	13. 544 49
4	33	327	13. 634 73	13. 589 72	13. 634 72	13. 453 45	13. 634 73	13. 579 24
5	151	982	13. 545 86	13. 445 24	13. 545 85	13. 528 93	13. 545 86	13. 476 82
6	192	872	13. 557 49	13. 547 99	13. 557 48	13. 444 78	13. 557 49	13. 498 72
7	319	318	13. 605 72	13. 443 21	13. 605 71	13. 554 32	13. 605 72	13. 600 12
8	377	841	13. 547 89	13. 512 14	13. 547 89	13. 459 01	13. 547 89	13. 423 87
9	551	673	13. 534 44	13. 444 21	13. 601 82	13. 598 87	13. 601 82	13. 577 82
10	4	657	13. 547 83	13. 541 12	13. 547 83	13. 478 91	13. 547 83	13. 489 21

表 11 失效前后网络全局效率
Tab. 11 Overall network efficiency before and after failure

序号	失效编号	绕行编号	早高峰		晚高峰		平峰	
			绕行前	绕行后	绕行前	绕行后	绕行前	绕行后
1	50	194	3. 419 2	3. 419 3	1. 774 6	1. 776 7	3. 610 2	3. 610 1
2	42	539	3. 521 1	3. 529 8	1. 751 2	1. 752 4	3. 521 7	3. 597 8
3	332	515	1. 585 0	1. 587 3	1. 585 0	1. 585 5	3. 543 7	3. 548 0
4	33	327	1. 536 2	1. 536 3	1. 536 2	1. 536 3	3. 452 2	3. 453 0
5	151	982	1. 585 9	1. 586 1	1. 789 4	1. 790 0	3. 518 2	3. 519 4
6	192	872	1. 594 4	1. 600 2	1. 784 4	1. 784 9	3. 595 0	3. 595 1
7	319	318	1. 583 6	1. 583 7	1. 775 9	1. 776 2	3. 564 4	3. 564 7
8	377	841	1. 604 1	1. 605 2	1. 795 6	1. 796 5	1. 795 6	1. 796 0
9	551	673	1. 606 9	1. 607 2	1. 760 3	1. 760 5	3. 539 5	3. 539 8
10	4	657	1. 604 1	1. 605 3	1. 797 3	1. 797 4	3. 592 1	3. 592 4

研究绕行方案的可靠性, 研究结果表明设计的优化方案可以有效提高公交网络的连通性。

参考文献:

References:

[1] 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.
LI Ying, ZHOU Wei, GUO Shi-jin. An Analysis of Complexity of Public Transportation Network in Shanghai [J]. Systems Engineering, 2007, 25 (1): 38-41.

[2] 张琳, 傅白白, 殷增超. 城市公交网络拓扑特性与鲁棒性实证研究 [J]. 山东建筑大学学报, 2015, 30 (3): 243-248.
ZHANG Lin, FU Bai-bai, YIN Zeng-chao. Empirical Research on Topological Properties and Robustness of Urban Public Transit Network [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2015, 30 (3): 243-248.

[3] 高红艳, 刘飞, 钱郁. 公共交通网络的复杂性及其优化: 以宝鸡市为例 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2018, 38 (5): 146-153, 181.

GAO Hong-yan, LIU Fei, QIAN Yu. Complexity and Optimization of Public Transit Network; Taking Baoji for Example [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2018, 38 (5): 146-153, 181.

[4] 冯慧芳, 李彩虹, 王瑞. 河谷型城市公交网络脆弱性研究: 以兰州市为例 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16 (1): 217-222.
FENG Hui-fang, LI Cai-hong, WANG Rui. Vulnerability Study for Public Transport Network of Valley City: Case of Lanzhou [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16 (1): 217-222.

[5] 刘锐, 严宝杰, 黄志鹏. 公共交通的局域世界演化网络模型 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (3): 108-113.
LIU Rui, YAN Bao-jie, HUANG Zhi-peng. Local-world Evolving Network Model for Public Transport [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (3): 108-113.

[6] 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, 146.
- ZHAO Guo-feng, YUAN Shao-wei, CI Yu-sheng. Analysis of Complex Network Property and Robustness of Urban Road Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (1): 119-124, 146.
- [7] 罗艺, 钱大琳. 公交-地铁复合网络构建及网络特性分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15 (5): 39-44.
- LUO Yi, QIAN Da-lin. Construction of Subway and Bus Transport Networks and Analysis of the Network Topology Characteristics [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15 (5): 39-44.
- [8] LI X H, GUO J Y, GAO C, et al. Network-based Transportation System Analysis: A Case Study in a Mountain City [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2018, 107: 256-265.
- [9] 朱中华. 重庆公交线路复杂网络性质研究 [J]. 科技创新与应用, 2014 (14): 57.
- ZHU Zhong-hua. Study on Nature of Complex Network of Bus Lines in Chongqing [J]. Technology Innovation and Application, 2014 (14): 57.
- [10] 朱中华, 杨德刚. 公交系统复杂网络抗毁性分析: 以重庆市公交换乘网络为例 [J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2014, 31 (1): 89-93.
- ZHU Zhong-hua, YANG De-gang. Analysis of Survivability of the Bus Complex Network in Chongqing [J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition, 2014, 31 (1): 89-93.
- [11] YANG Y H, LIU Y X, ZHOU M X, 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.
- [12] WANG X G, KOU Y, DERRIBLE S, et al. Multi-criteria Robustness Analysis of Metro Networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 474 (10): 19-31.
- [13] 彭景新. 南京市市区公交、地铁加权复合网络建模与实证分析 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- PENG Jing-xin. Modeling and Empirical Analysis of Bus and Subway Weighted Composite Network in Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [14] 强添纲, 赵明明, 裴玉龙. 城市多模式交通网络的复杂网络特性与鲁棒性研究 [J]. 交通信息与安全, 2019, 37 (1): 65-71.
- QIANG Tian-gang, ZHAO Ming-ming, PEI Yu-long. An Analysis of Characteristics of Complex Network and Robustness in Harbin Multi-mode Traffic Network [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37 (1): 65-71.
- [15] 吕文红, 王国娟, 王鹏飞. 协同共享视角下城市交通治理的伦理途径 [J]. 昆明理工大学学报: 社会科学版, 2017, 17 (6): 42-46.
- LÜ Wen-hong, WANG Guo-juan, WANG Peng-fei. Ethical Approach to Urban Traffic Governance from the Perspective of Collaborative Commons [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Social Science Edition, 2017, 17 (6): 42-46.
- [16] 吕文红, 王国娟, 王鹏飞. 基于复杂网络的交通运输网络可靠性研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (24): 26-33.
- LÜ Wen-hong, WANG Guo-juan, WANG Peng-fei. A Review on Reliability of Transportation Network Based on Complex Network Theory [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (24): 26-33.
- [17] 黄一洲. Lorenz 曲线在反恐情报分析中的应用研究: 以中国及周边国家的恐怖袭击分析为例 [J]. 净月学刊, 2017 (6): 87-95.
- HUANG Yi-zhou. Application of Lorenz Curve in Counter Terrorism Intelligence Analysis: A Case Study of Terrorist Attacks in China and Neighboring Countries [J]. Jingyue Journal, 2017 (6): 87-95.
- [18] 王东方. 城市公交复杂网络的节点重要性及稳定性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- WANG Dong-fang. Study on Nodes' Importance and Stability of Urban Public Transport Complex Networks [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [19] 黄光球, 谢蓉. 考虑节点过载的碳排放空间关联系统级联失效模型 [J]. 计算机应用, 2019, 39 (6): 1829-1835.
- HUANG Guang-qiu, XIE Rong. Cascading Failure Model of Carbon Emission Spatial Correlation System Considering Load Overload [J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39 (6): 1829-1835.
- [20] 傅杰, 邹艳丽, 谢蓉. 基于复杂网络理论的电力网络关键线路识别 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14 (3): 91-96.
- FU Jie, ZOU Yan-li, XIE Rong. The Critical Lines Identification of the Power Grids Based on the Complex Network Theory [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 14 (3): 91-96.
- [21] 青岛市统计局. 青岛市 2018 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2019-03-19) [2019-05-10]. <http://qdtj.qingdao.gov.cn/n28356045/n32561056/n32561072/190319133354050380.html>.
- Qingdao Municipal Bureau of Statistics. Qingdao Municipal Statistical Bulletin of National Economic and Social Development in 2018 [EB/OL]. (2019-03-19) [2019-05-10]. <http://qdtj.qingdao.gov.cn/n28356045/n32561056/n32561072/190319133354050380.html>.