

基于网络拓扑特性的北京地铁静态网络分析

杨世元¹, 闫佳宝^{2*}, 程肖冰^{1*}, 杨森¹, 陈雅卓¹

¹北京联合大学城市轨道交通与物流学院, 北京

²工商银行北京分行房山城关支行, 北京

收稿日期: 2022年10月21日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

摘要

研究网络的拓扑性对识别网络重要节点、了解网络的特征结构具有重要作用, 本文以北京地铁换乘车站为研究对象, 经统计共有62个节点, 102条边, 构建北京地铁网络的拓扑模型。通过网络的一些静态特征, 如度、平均路径长度、集聚系数、介数等参数分析北京地铁的拓扑特性。

关键词

北京地铁, 网络拓扑结构, 小世界特性

Static Network Analysis of Beijing Metro Based on Network Topology

Shiyuan Yang¹, Jiabao Yan^{2*}, Xiaobing Cheng^{1*}, Sen Yang¹, Yazhuo Chen¹

¹College of Urban Rail Transit and Logistics, Beijing Union University, Beijing

²Industrial and Commercial Bank of China Beijing Branch Fangshan Chengguan Sub Branch, Beijing

Received: Oct. 21st, 2022; accepted: Nov. 23rd, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

Studying the topology of the network plays an important role in identifying the important nodes of the network and understanding the characteristic structure of the network. This paper took Beijing subway transfer station as the research object. 62 nodes and 102 sides were used to construct the topology model of the Beijing subway network. This paper analyzed the topological characteristics of the Beijing subway through some static characteristics of the network, such as degree, average path length, clustering coefficient, intermediate number and other parameters.

*通讯作者。

Keywords

Beijing Metro, Network Topology, Small World Characteristics

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 网络拓扑特性

拓扑是一种不考虑物体的大小、形状等物理属性，而仅仅使用点或者线描述多个物体实际位置与关系的抽象表示方法。拓扑不关心事物的细节，也不在乎相互的比例关系，而只是以图的形式表示一定范围内多个物体之间的相互关系[1]。研究网络拓扑结构时通常会构建拓扑模型，计算“度”、“平均路径长度”、“集聚系数”、“介数”等参数。

1.1. 度

度(k_i)是一个描述节点特征的重要几何量，度表示的是与这个节点相连的节点个数，该节点度值越大，说明连接的车站数量越多，在研究网络中越重要。度值可以通过邻接矩阵来计算，公式如式(1)，其中 k_i 为节点的度， a_{ij} 表示节点 i 、 j 之间的连边情况，有连边时 $a_{ij} = 1$ ，无连边时 $a_{ij} = 0$ ， N 为网络规模，即节点数[2]。

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

1.2. 平均路径长度

路径长度是用来表示节点间沟通难易程度的量，网络中任意两节点间都可以存在多条路径，不同路径需要经过的节点和边也不同，经过边最少的路径称为最短路径，本文中的路径长度指的就是最短路径长度，所有路径长度的平均值就是平均路径长度，用 L 来表示，平均路径计算公式如式(2)。

$$L = 2/[N(N+1)] \sum_{i \geq j} d_{ij} \quad (2)$$

与最短路径相对应的还有最长路径，也就是最大的最短路径，该路径被称为网络的直径，用 D 表示，公式如式(3)。

$$D = \max d_{ij} \quad (3)$$

通常来讲，一般复杂网络的规模虽然巨大，但网络的平均最短路径却很小，各节点之间相对容易达到，表现出了复杂网络的小世界特性。

1.3. 集聚系数

大部分的现实网络都具有集聚性，集聚系数能够反映网络中节点的连接强度，某个节点的集聚系数越大，说明此节点与相邻节点的联系越密切。集聚性可以理解为：假设与节点 i 相连的有 n 个节点，这 n 个节点又相互连接，这时理论上最多可以有 $n(n-1)/2$ 条边，但实际上只有 E_i 条边，实际的边数与理论最多连接边数的比值，就是节点 i 的集聚系数，表达式如式(4)。集聚系数的取值在 0 到 1 之间，当集聚系数取值为 1 时，说明网络中任意两节点都有边相连，但现实世界中一般大规模网络的聚类系数都远小于 1 [3]。

$$C_i = 2E_i/n(n-1) \quad (4)$$

1.4. 介数

介数分为节点介数和边介数，是用来衡量节点或边重要性的量。

在统计两个节点之间的最短路径时，被经过的节点和边频率越高，相应的节点介数或边介数就越高，说明在网络中越重要。

2. 北京地铁静态特征分析

以北京地铁线路网中换乘车站为节点，两站点间线路为边构建一个拥有 62 个节点、103 条边的无向无权网络，需要对网络中的各换乘车站进行编号以便确认车站邻接矩阵(各车站编号见文章末附录 A)，用 UCINET 软件输出用于分析的矩阵数据，再用 NETDRAW 构建北京地铁网络拓扑模型，如图 1 所示。

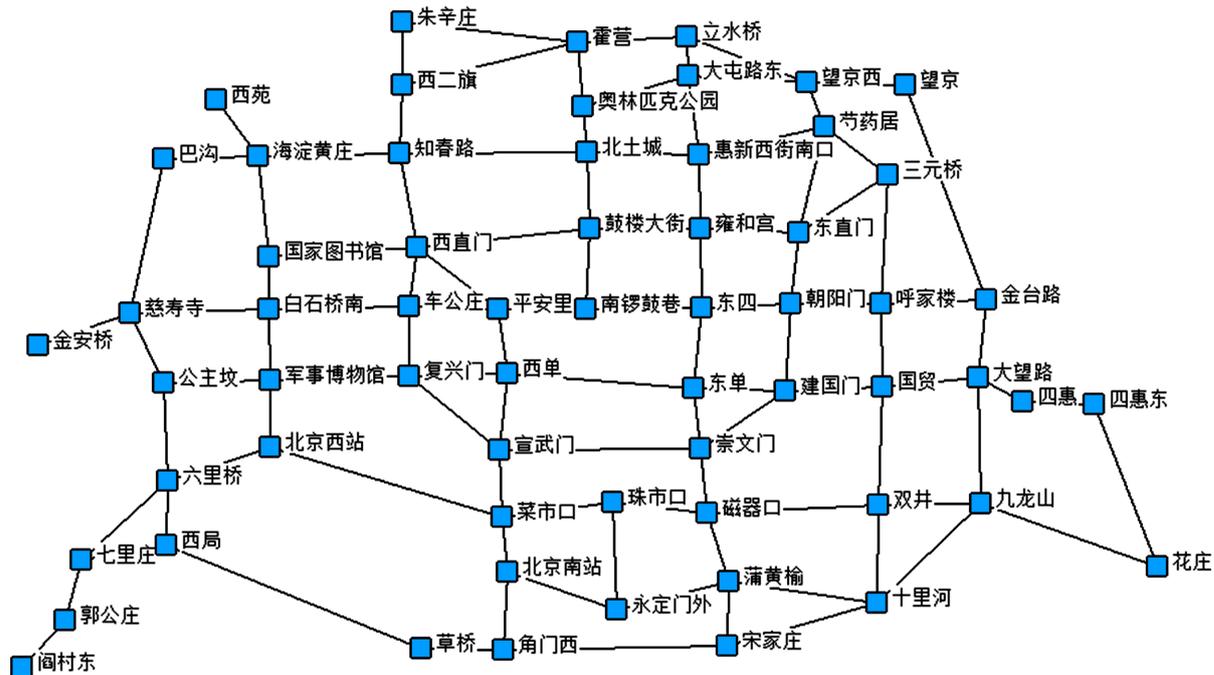


Figure 1. Beijing metro network topology model
图 1. 布局对比北京地铁网络拓扑模型

统计城市轨道交通网络，反映出的是网络的静态统计量，具体表现为网络宏观统计量的平均值或微观统计量的统计分布，复杂网络的静态特征分析主要包括度和度的分析、集聚系数、介数等统计量[4]，通过对北京地铁网络静态特征进行计算分析，能初步刻画出网络本身的特征，有助于研究网络的结构特性。下面分别说明北京地铁网络中这些特征的存在情况。

2.1. 度和度分析

比如在西单地铁站，西单站是换乘车站，换乘 4 号线可以到达平安里和宣武门地铁站、换乘 1 号线到达复兴门和东单地铁站，所以西单地铁站周边有 4 个地铁站相邻，它的度值就为 4。通过统计站点间的连接关系可以得到邻接表，在 MATLAB 中将邻接表转换为邻接矩阵，然后就可以得到各换乘站点的度值分布散点图(如图 2 所示)及其度分布概率(如图 3 所示)。

可以看出大部分换乘站点的度值为 4，其他度值分布还有 1、2、3、5 等，度值为 5 的只有西直门地铁站，它是 2 号线、4 号线、13 号线三条线路的换乘车站(如图 4 所示)。整个北京地铁网络的平均度(k)=3.16，

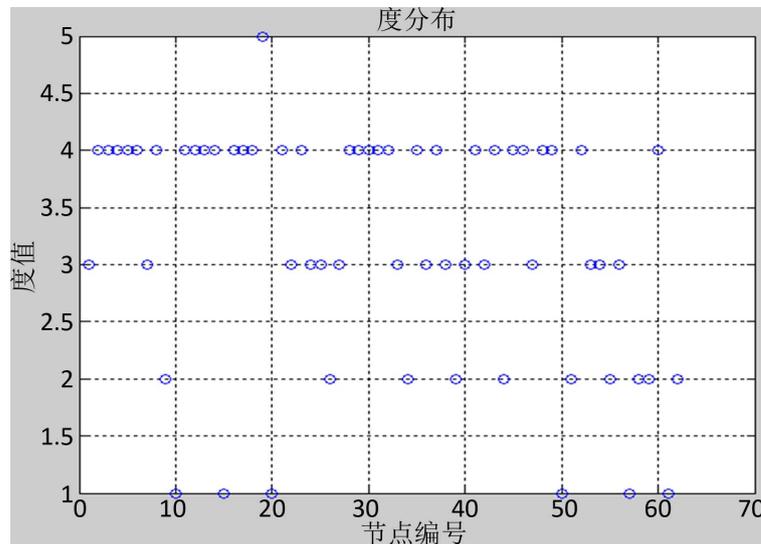


Figure 2. Scatter diagram of degree distribution at each transfer station
图 2. 各换乘车站度值分布散点图

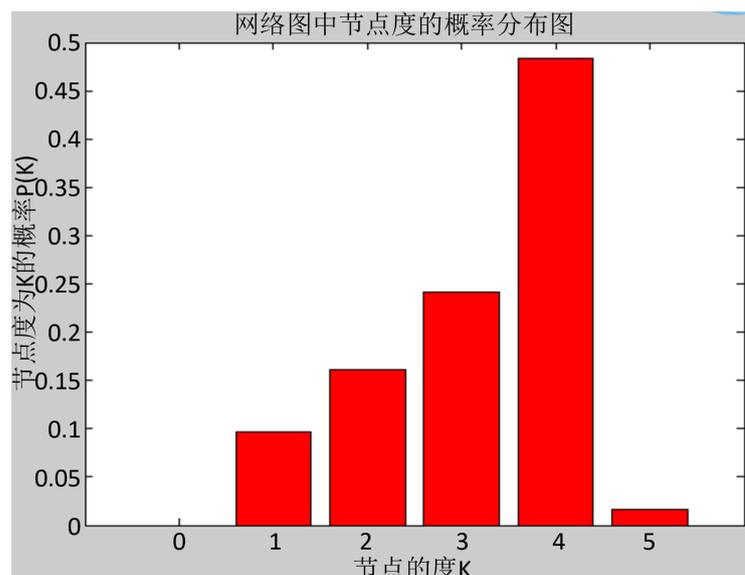


Figure 3. Distribution probability of each station degree of transfer station
图 3. 换乘车站各站点度分布概率

表示每个换乘地铁站点平均与 3 至 4 个换乘站点相连，地铁出行换乘的便捷性相对较高。

度值为 1 的换乘车站一般都是连接线路的终点站，比如阎村东；度值为 4 的换乘车站最多，表明北京地铁的网络结构相对完整，大多换乘车站都能充分发挥作用，保证整体网络的运行；度值为 2 和 3 的换乘车站是两条线路中至少有一条连接着终点站，如立水桥、望京等。整个北京地铁网络的平均度(k) = 3.16，表示每个换乘地铁站点平均与 3 至 4 个换乘站点相连，地铁出行换乘的便捷性相对较高(度值最大的十个节点如表 1 所示)。

换乘车站是城市地铁网络中的交通枢纽，因此这部分节点是最重要的，这部分车站分布相对均匀，表明给予了乘客更多的换乘选择，增加了整体运营的可达性。张晋等在做相关研究时还发现网络平均度接近树形网络，他把这种现象解释为地铁造价较高，树结构可以减少重合线路，以尽量少的边来保证网络的连通性[5]。



Figure 4. Line crossing at Xizhimen station
图 4. 地铁西直门站线路交叉情况

Table 1. 10 nodes with the largest medium value in Beijing metro network transfer stations
表 1. 北京地铁网络换乘车站中度值最大的 10 个节点

排序	节点编号	节点名称	度	排序	节点编号	节点名称	度
1	19	西直门	5	6	6	建国门	4
2	2	军事博物馆	4	7	8	大望路	4
3	3	复兴门	4	8	11	鼓楼大街	4
4	4	西单	4	9	12	雍和宫	4
5	5	东单	4	10	13	东直门	4

2.2. 平均路径长度

路径长度指一个节点 i 到达网络任意另外一节点 j 所通过最少边的数量, 平均路径长度所有对节点所通过最少边数量的平均值, 它反映的是网络中节点的分离程度。将已建立的节点邻接矩阵导入 MATLAB, 在脚本文件中输入代码, 最后在执行窗口调用 bar 函数, 生成各节点到其他节点的平均路径分布的直方图, (如图 5 所示)。

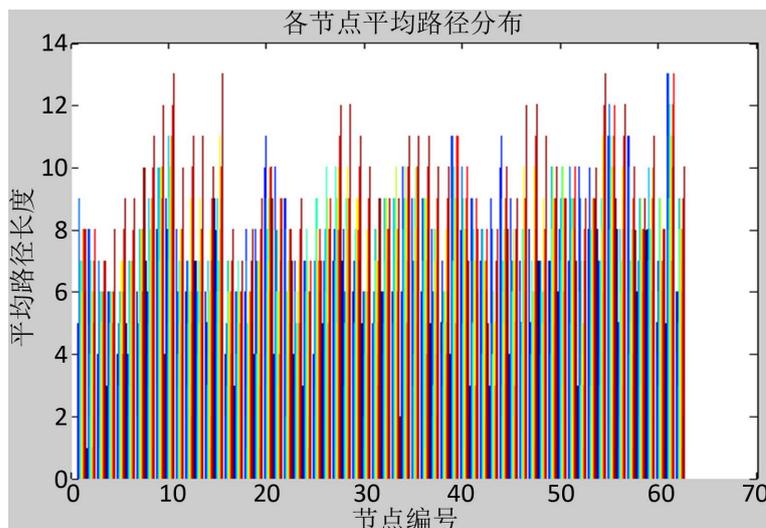


Figure 5. Average path distribution
图 5. 平均路径分布图

根据图 5 可知, 北京地铁网络 62 个换乘车站的平均路径长度为 5.0925, 说明在各站点间出行量相等的前提下, 任意两换乘车站间平均经过 5 站可到达, 这个数远小于网络节点的规模, 符合复杂网络的“小

世界特性”：即大多数现实网络中的平均路径小于其网络规模(即节点数) [6]。

2.3. 集聚系数

判断聚类特性时，根据定义，发现只有当某个地铁站点与周边邻近站点在网络图中构成三角形时，才能体现出该站点在网络中的聚类特性[7]。用 MATLAB 导入数据，得出 62 个重要节点的集聚系数如图 6 所示，将其绘制为柱形图，如图 7 所示，经分析可知，北京地铁网络中只有个别节点与邻接节点的连接程度呈现密集，相当一部分节点的集聚系数为 0，表示大部分节点的连接程度并不密集，所以就导致北京地铁网络的平均聚类系数较低，具体值为 0.1065。

```
ans =
Columns 1 through 14
    0    0  0.1667  0.1667  0.1667  0.1667    0    0    0    0    0    0  0.1667    0
Columns 15 through 28
    0  0.1667  0.1667  0.1667  0.1000    0    0    0  0.1667    0    0    0  0.3333  0.1667
Columns 29 through 42
    0    0    0  0.1667  0.3333  1.0000  0.1667    0    0    0    0  0.3333  0.1667    0
Columns 43 through 56
    0    0    0  0.1667  0.3333    0  0.1667    0  1.0000    0  0.3333  0.3333    0    0
Columns 57 through 62
    0    0    0    0    0    0
```

Figure 6. Clustering coefficient of each node

图 6. 各节点集聚系数

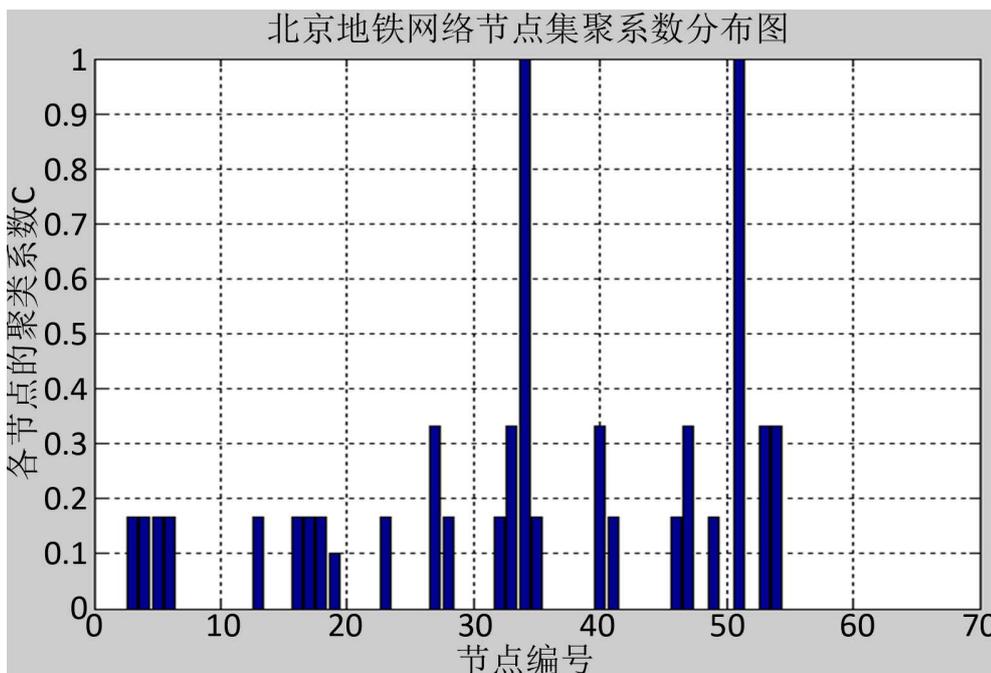


Figure 7. Distribution of agglomeration coefficient

图 7. 集聚系数分布图

2.4. 介数

介数用来表示节点或边在整个网络中的重要程度，分为节点介数和边介数。节点介数定义为网络中经过该节点的最短路径的数目，边的介数定义与之相似。

1) 节点介数

通过 MATLAB 计算，得到节点介数分布散点图(如图 8 所示)，节点的介数分布范围为 0~0.1035，网络节点平均介数为 0.0166。介数最大的 10 个节点如表 2 所示，这 10 个节点在北京地铁网络中的作用相

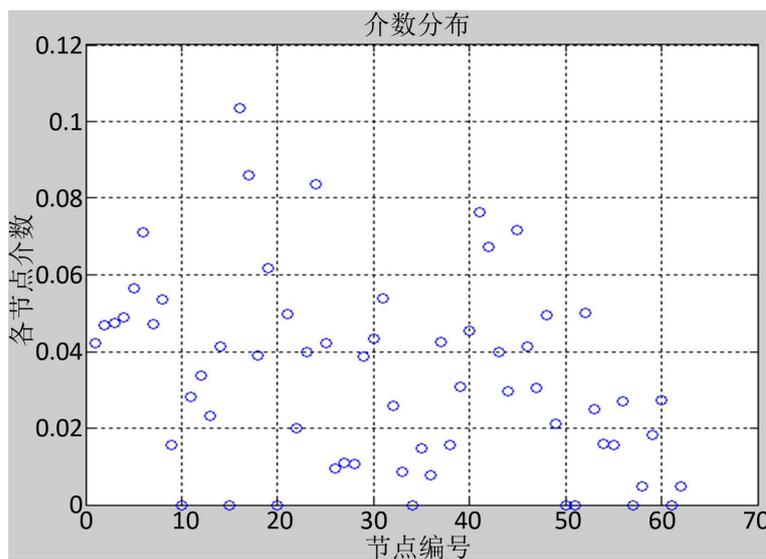


Figure 8. Distribution of node intermediates
图 8. 节点介数分布图

Table 2. 10 nodes with large number of intermediaries in Beijing metro network transfer stations

表 2. 北京地铁网络换乘车站中介数较大的 10 个节点

排序	节点编号	节点名称	介数	排序	节点编号	节点名称	介数
1	16	崇文门	0.1035	2	17	宣武门	0.0859
3	24	菜市口	0.0836	4	41	六里桥	0.0764
5	45	知春路	0.0718	6	6	建国门	0.0712
7	42	北京西站	0.0674	8	19	西直门	0.0617
9	5	东单	0.0566	10	3	磁器口	0.0540

Table 3. Ten edges with the largest intermediate number

表 3. 边介数最大的十条边

排序	起点编号	终点编号	边名称	介数	排序	起点编号	终点编号	边名称	介数
1	16	17	崇文门 - 宣武门	0.0710	2	24	42	菜市口 - 北京西站	0.0678
3	16	31	崇文门 - 磁器口	0.0645	4	17	24	宣武门 - 菜市口	0.0617
5	40	41	七里庄 - 六里桥	0.0593	6	6	16	建国门 - 崇文门	0.0564
7	41	42	六里桥 - 北京西站	0.0553	8	24	25	菜市口 - 北京南站	0.0535
9	21	45	海淀黄庄 - 知春路	0.0479	10	39	40	郭公庄 - 七里庄	0.0460

对较重要，大部分的路径要经过上述节点才能到达。

2) 边介数

与节点介数方法类似，能统计出网络中每条边的介数(如图 9 所示)，边介数分布为 0~0.0710 (若不相连为 0)，平均边介数为 0.0013，边介数最大的十条边如表 3 所示。表中所示的这些线路在北京地铁网络中发挥着比较重要的作用，本节通过度和介数，可以筛选出网络中的重要节点和边。

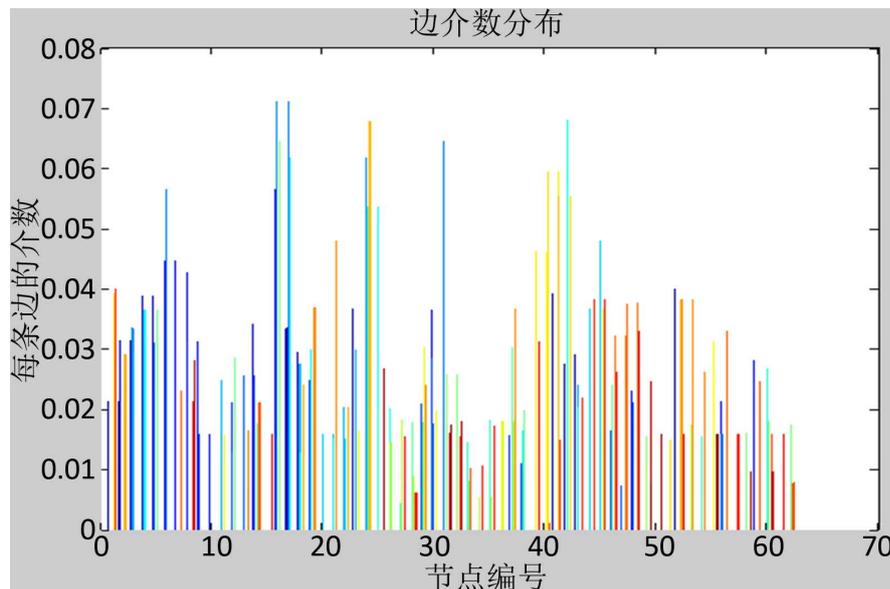


Figure 9. Median distribution of each edge
图 9. 各条边的介数分布

3. 总结

通过静态特征分析了北京地铁网络的拓扑特性，并构建了拓扑模型。度值和介数最高的 10 个节点中，有一部分是重合的，分别是西直门、磁器口、建国门，这些站点为网络中的重要节点；平均路径为 5，与节点数 62 相差较多，与集聚系数值相差并不悬殊，说明网络具有小世界特性，如表 4 所示。

Table 4. Summary of static characteristics of Beijing metro network

表 4. 北京地铁网络静态特征小结

特征名称	数值	网络特性
度	3.1613	平均每个节点与 3 个节点相连
平均路径长度	5.0952	任意两节点相连平均需经过 5 条边
直径	13	最远距离节点到达需经过 13 条边
集聚系数	0.1065	网络具有明显的小世界特性
节点介数	0.0166	网络中任意两节点最短路径通过各个节点的概率为 0.0166
边介数	0.0013	网络中任意两节点最短路径通过各条边的概率为 0.0013

基金项目

北京市教委科技一般资助项目(KM202011417002)；北京联合大学 2022 年“启明星”大学生科技创新创业项目：震后应急物资需求预测及 HTN 调度决策研究。

参考文献

- [1] 刘明, 曹杰, 章定. 数据驱动在疫情应急物流网络动态调整优化[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(2): 437-448.
- [2] 王永明. 基于情景构建的应急预案体系优化策略及方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2019(8): 38-43.
- [3] 张梦玲, 王晶, 黄钧. 不确定需求下考虑供应商参与机制的应急资源配置鲁棒优化研究[J]. 中国管理科学, 2020(7): 102-111.
- [4] 刘美玲. 基于复杂网络理论的我国高速铁路网络抗毁性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2019.
- [5] 陈刚, 付江月. 灾后不确定需求下应急医疗移动医院鲁棒选址问题研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(9): 213-223.
- [6] 朱莉, 曹杰, 顾珺, 郑翼. 考虑异质性行为的灾后应急物资动态调度优化[J]. 中国管理科学, 2020, 28(12): 151-161.
- [7] 种鹏云, 尹惠. 交通运输传播新型冠状病毒肺炎的系统动力学仿真[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 100-109.

附录

Appendix 1. Beijing Metro Transfer Station No.

附表 1. 北京地铁换乘车站编号

车站编号	车站名	车站编号	车站名	车站编号	车站名
1	公主坟	6	建国门	11	鼓楼大街
2	军事博物馆	7	国贸	12	雍和宫
3	复兴门	8	大望路	13	东直门
4	西单	9	四惠	14	朝阳门
5	东单	10	四惠东	15	望京
16	崇文门	21	海淀黄庄	26	角门西
17	宣武门	22	国家图书馆	27	立水桥
18	车公庄	23	平安里	28	大屯路东
19	西直门	24	菜市口	29	惠新西街南口
20	西苑	25	北京南站	30	东四
31	磁器口	36	奥林匹克公园	41	六里桥
32	蒲黄榆	37	北土城	42	北京西站
33	宋家庄	38	南锣鼓巷	43	白石桥南
34	朱辛庄	39	郭公庄	44	巴沟
35	霍营	40	七里庄	45	知春路
46	芍药居	51	西局	56	金台路
47	三元桥	52	慈寿寺	57	金安桥
48	呼家楼	53	西二旗	58	珠市口
49	十里河	54	望京西	59	九龙山
50	草桥	55	阎村东	60	永定门外
61			花庄		
62			双井		