

公共汽电车复杂网络模型构建与特性分析 ——以淄博市为例

王连震, 张国立, 石凌云, 杜亚北, 陈旭琦
(东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 研究公共汽电车网络特性对于合理优化线路及站点布局具有重要作用。基于复杂网络理论, 使用L空间、P空间和R空间三种建模方法, 分别建立公共汽电车加权网络模型, 并利用Gephi软件分析网络的节点度、平均路径长度、聚类系数等静态拓扑参数。进而对淄博市公共汽电车网络进行实例分析, 并与不同规模城市进行对比。研究结果显示, 淄博市市区公共汽电车站点网络的度分布符合指数分布, 不具有明显的无标度特性, 公共汽电车换乘网络和线路网络具有明显小世界特性。居民乘坐公共汽电车出行一次, 平均需要经过13.77个站点并换乘1.32次, 基本可以满足当前出行需求, 但是与国家公交都市建设示范城市相比仍然存在邻近站点之间连接线路不足、具有换乘功能的站点较少、网络稳定性差等问题。

关键词: 公共汽电车; 加权网络; 拓扑结构; 特性分析; 淄博市

Construction and Characteristic Analysis of Complex Network Model for Bus Transit: A Case Study of Zibo

WANG Lianzhen, ZHANG Guoli, SHI Lingyun, DU Yabei, CHEN Xuqi

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, China)

Abstract: Estimating the characteristics of bus transit networks is crucial for optimizing the layout of routes and stations reasonably. Based on the theory of complex networks, this paper employs three modeling methods - L space, P space, and R space to establish weighted network models for bus transit systems. Gephi software is then utilized to analyze static topology parameters such as node degree, average path length, and clustering coefficient of the network. An empirical analysis of the bus transit network in Zibo is conducted, and comparisons are made with cities of different scales. The results indicate that the degree distribution of bus transit stations in Zibo follows an exponential distribution without obvious scale-free characteristics. While the transfer network and route network exhibit pronounced small-world characteristics. On average, residents' s travel by bus transit in Zibo need to pass through an average of 13.77 stations and transfers 1.32 times per trip, which meets the current travel demands. However, compared with demonstration cities of China' s transit metropolis construction, there are still problems such as insufficient connections between adjacent stations, fewer transfer stations, and limited network stability.

Keywords: bus transit; weighted complex network; topology structure; characteristic analysis; Zibo

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目“出行即服务理念下城市客运出行网络构建及路径规划方法研究”(2572019BG02)、国家自然科学基金青年科学基金项目“封闭小区对城市路网交通流的影响机理及干预策略研究”(71701041)

作者简介: 王连震(1985—), 男, 山东禹城人, 博士, 副教授, 研究方向为交通运输规划与管理, 电子邮箱 rock510@163.com。

0 引言

公共汽电车网络是一种可以抽象为复杂网络的系统。分析该系统的网络特性, 能够

揭示出个体和整体之间的关系^[1-2], 为公共汽电车交通系统优化提供理论依据, 进而更好地满足居民出行需求。

国内外学者对此开展了大量研究。D. Watts

等^[3]和R. Albert等^[4]分别提出复杂网络小世界特性和无标度特性的概念。P. Sen等^[5]最先提出了P空间的建模方法。J. Sienkiewicz等^[6]发现波兰不同城市节点的度分布或服从幂律分布或服从指数分布。常鸣等^[7]指出国内外公共汽车网络结构特性存在差异。陈强^[8]对哈尔滨市公共汽车交通系统的鲁棒性进行了分析,依据鲁棒性分析结果提出了优化措施。R. De Regt等^[9]总结归纳了网络的稳定性。L. Guo等^[10]使用L空间建模方法,以沿河、沿海的4座大城市为研究对象,所构建的加权网络反映了人类迁移加权和活动的异质性。L. András等^[11]以匈牙利公共汽车早高峰时段的通行能力为权重,对比分析了加权、未加权两种情况下的网络指标。周晓炯^[12]使用三种建模方法,在南京市无权网络的基础之上,构建综合因素的地铁加权网络,并对子网络进行叠加形成复合网络。B. Y. Hu等^[13]和胡宝雨等^[14]在传统建模方法的基础之上综合考虑站间线路数、站间距离等因素,据此分析了东北4个大城市公共汽车网络结构特征。除此之外,L. Zhang等^[15]、黄爱玲等^[16]、郑啸等^[17]采取不同的权重方式分别对大城市公共汽车网络进行分析。

关于中国城市的公共汽车网络研究主要集中于北京、上海等一线城市的网络拓扑结构分析,并引入权重改进现有模型,探究公共汽车网络结构与交通特性之间的关联关系。然而,众多中型城市与超(特)大城市存在显著差异:前者公共交通结构简单,种类单一;公共汽车出行分担率低,居民平均出行距离短,出行倾向于采用步行和自行车^[18];公共汽车财政补贴有限且客流量少,导致服务水平不断下降,进而引发客流流失,形成恶性循环。因此,本文将基于复杂网络理论,使用L空间,P空间和R空间建模方法,建立以淄博市为例的公共汽车加权网络,从几何角度探究中等规模城市公共汽车网络与一线城市之间的差异性以及薄弱点,为中等规模城市的公共汽车发展以及空间结构优化提供理论参考。

1 复杂网络拓扑参数选取

复杂网络的拓扑参数用于描述网络静态特征,是研究复杂网络的基础。一般情况下,拓扑结构特性可以通过度分布、平均路

径长度、介数、聚类系数、核数、模块性等参数表现出来。本文旨在探究公共汽车网络中最关键的三个参数:度分布、平均路径长度、聚类系数。

1.1 度及度分布

度表示以某节点为端点的边的数目。度值在L空间、P空间和R空间中分别表示乘坐1站可到达站点的数目,不需换乘可直达的站点数目以及1条公共汽车线路可连接其他线路的数目。所有节点度的平均值称为网络的平均度,计算公式为

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i,$$

式中: $\langle k \rangle$ 为网络中所有节点度的平均值; k_i 为节点*i*的度; N 为网络节点数/个。

度分布指对一个随机选择的节点其度为*k*的概率,计算公式为

$$P(k) = \frac{N(k)}{N},$$

式中: $N(k)$ 为网络中度为*k*的节点数量; $P(k)$ 为网络中度为*k*的节点在整个网络中所占的比例/%。

1.2 平均路径长度

平均路径长度指网络中所有节点对之间的最短路径的平均值。一般来说平均路径长度值越小,公共汽车网络性能越优,计算公式为

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i>j} d_{ij},$$

式中: L 为平均路径长度; d_{ij} 为节点*i*与节点*j*之间的最短路径长度。

1.3 聚类系数

聚类系数用来描述网络的聚类特性。L空间中,该指标反映公共汽车车站附近线路的密集程度,即线路之间的联系加权重;P空间中,该指标反映乘客在第*i*个公共汽车站直达相邻车站的可能性;R空间中,该指标反映某公共汽车线路与邻近的线路之间的联系程度。聚类系数的计算公式为

$$C_i = \frac{2E_i}{m_i(m_i-1)},$$

式中: C_i 为节点*i*的聚类系数; m_i 为节点*i*的邻居节点数/个; E_i 为节点*i*的*m_i*个邻居节点之间实际存在的边数/条。

2 公共汽电车复杂网络模型构建

2.1 假设条件

结合公共汽电车交通发展状况，将众多公共汽电站替换成复杂网络节点，站点之间的连线替换成边，抽象为一个复杂网络，并提出以下假设条件：

- 1) 将具有相同名称的站点视为同一站点，同时忽略同一站点具有多个名称的情况。
- 2) 一般而言，城市公共汽电车线路上下行存在对称性，但由于条件限制，少量线路上下行路径存在差异。在模型构建中忽略这些轻微差异，仅选取上行站点进行建模，将公共汽电车网络抽象为无向网络。
- 3) 公共汽电站点网络和换乘网络连边的有无是根据停靠站点间有无线路通过确定的，连边权重为通过节点间线路的运营时间与发车间隔之比；在公共汽电车线路网络中连边的有无是根据两条线路之间有无共同站点确定的，连边的权重为两条线路共同站点的数量。由此将公共汽电车网络抽象为加

权网络。

2.2 网络模型构建方法

城市公共汽电车网络L空间、P空间和R空间建模方法的侧重点有所不同，如表1所示。

图1表示的是一个简单的公共汽电车网络，包括3条线路和9个站点。线路1由站点S1~S5组成，线路2由站点S2, S6和S7组成，线路3由站点S3, S4, S8和S9组成。

公共汽电车网络模型之间的连边关系可以用邻接矩阵表示。在站点模型和换乘模型中，若节点 S_i 与节点 S_j 之间无边连接，则 $a_{ij}=0$ ；若节点 S_i 与节点 S_j 之间有一条边连接，则 $a_{ij}=w_{ij}^a$ ；若节点 S_i 与节点 S_j 之间有 n 条边连接，则 $a_{ij}=w_{ij}^a+w_{ij}^b+\dots+w_{ij}^n$ 。连边权重的定义如下： $w_{ij}^a=o_{ij}^a/d_{ij}^a$ ，式中 w_{ij}^a 为一日内通过该连边的公共汽电车数量， o_{ij}^a 为该连边的公共汽电车运营时间， d_{ij}^a 为该连边的公共汽电车发车间隔。根据上述网络连边方式和加权方式，分别得到站点网络加权邻接矩阵 A_L 和换乘网络加权邻接矩阵 A_P 。

表1 网络建模方法对比分析

Tab.1 Comparative analysis of network modeling methods

构建方法	节点定义	连边定义	侧重点
L空间	站点	相邻两个站点之间至少有一条线路通过	接近自然路网形态，反映站点之间的实际空间距离和平均出行距离
P空间	站点	两个站点之间有直达的公共汽电车线路	反映站点之间的换乘可达关系
R空间	线路	两条线路之间存在至少一个共同站点	表达不同线路之间的关系，网络规模小，反映线路之间的重复性和竞争性

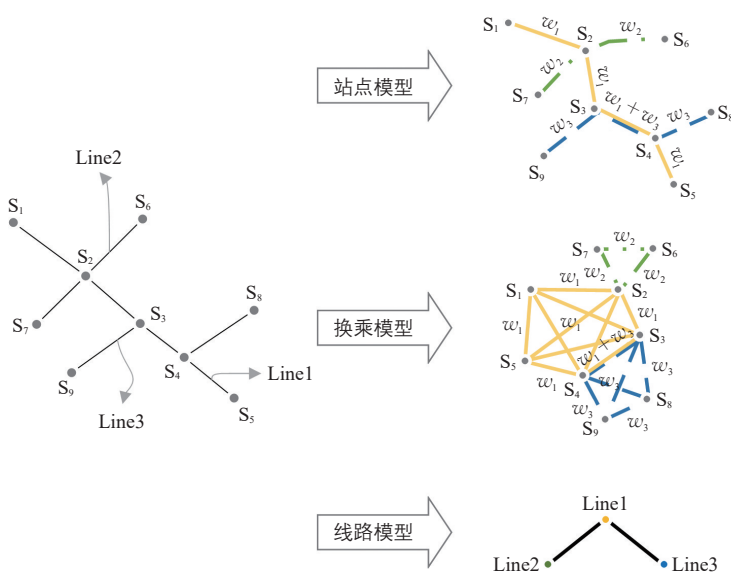


图1 不同类型公共汽电车网络示意

Fig.1 Schematic of different types of bus transit networks

$$A_L = \begin{bmatrix} 0 & w_{12}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ w_{21}^1 & 0 & w_{23}^1 & 0 & 0 & w_{26}^1 & w_{27}^1 & 0 & 0 \\ 0 & w_{32}^1 & 0 & w_{34}^1 + w_{34}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_{39}^3 \\ 0 & 0 & w_{43}^1 + w_{43}^3 & 0 & w_{45}^1 & 0 & 0 & w_{48}^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_{54}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_{62}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_{72}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_{84}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_{93}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_P = \begin{bmatrix} 0 & w_{12}^1 & w_{13}^1 & w_{14}^1 & w_{15}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ w_{21}^1 & 0 & w_{23}^1 & w_{24}^1 & w_{25}^1 & w_{26}^1 & w_{27}^1 & 0 & 0 \\ w_{31}^1 & w_{32}^1 & 0 & w_{34}^1 + w_{34}^3 & w_{35}^1 & 0 & 0 & w_{38}^3 & w_{39}^3 \\ w_{41}^1 & w_{42}^1 & w_{43}^1 + w_{43}^3 & 0 & w_{45}^1 & 0 & 0 & w_{48}^3 & w_{49}^3 \\ w_{51}^1 & w_{52}^1 & w_{53}^1 & w_{54}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_{62}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_{67}^1 & 0 & 0 \\ 0 & w_{72}^1 & 0 & 0 & 0 & w_{76}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_{83}^3 & w_{84}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & w_{89}^3 \\ 0 & 0 & w_{93}^3 & w_{94}^3 & 0 & 0 & 0 & w_{98}^3 & 0 \end{bmatrix}.$$

在线路模型中，若 $Line_i$ 与 $Line_j$ 之间无共同站点，则 $a_{ij}=0$ ；若 $Line_i$ 与 $Line_j$ 之间有一个共同站点，则 $a_{ij}=1$ ；若 $Line_i$ 与 $Line_j$ 之间有 n 个共同站点，则 $a_{ij}=n$ 。由此得到线路网络加权邻接矩阵

$$A_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

3 案例分析

3.1 数据采集

基于 Python 软件，本文在 8684 网站 (<https://www.8684.cn>)上提取了2022年5月淄博市公共汽车相关资料，包括192条线路、2 260个站点，筛选出市区范围内的91条线路、1264个站点。

3.2 网络构建

为了全面、宏观地分析淄博市公共汽车网络的复杂特性，不仅需要考虑到站点的节点模型、换乘模型，更要考虑以线路为节点的线路模型。构建网络加权邻接矩阵，采用 Pajek 中的 Kamada-Kawai 算法，得到公共汽车网络模型拓扑结构图(见图2)。其中L空间网络节点数为1 264个，边为1 691条；P空间网络节点数为1 264个，边为40 137条；R空间网络节点数为91个，边为1 640条。将上述得到的网络加权邻接矩阵导入 Gephi 软件中，得到淄博市公共汽车网络拓扑参数值。

3.3 站点网络特性分析

3.3.1 度及度分布

淄博市公共汽车站点网络节点度值的范围为1~11，大于等于10的站点仅4个；度值为2~4的节点占总数的86.8%；平均度为2.676，即一个站点平均与2~3个站点相连(见表2)。从空间位置来看，度值和节点加权重较大的节点位于市区中心地段，路网发

达。从站点性质来看，度值和节点加权重较大的站点主要为枢纽换乘站或毗邻休闲购物场所。度值较大的站点，节点加权重并不一定也大，表现出不完全的正比关系(见表3)。

采取不同坐标系可以区分度分布的形式。随机网络中节点度的概率分布在半对数坐标系中呈线性分布，在线性坐标系中为指数分布；无标度网络中节点度的概率分布在双对数坐标系中呈线性分布，在线性坐标系中为幂律分布。图3a和3b分别对应半对数、双对数坐标系下的度和加权重分布，图3c和3d分别对应线性坐标系下度和加权重分布、累积度和累积加权重分布。半对数坐标系中，节点度的概率密度函数 $P(k) = -0.266 - 0.237k$ ，确定系数为0.892，模型拟合程度较好；双对数坐标系中，节点度的概率密度函数 $P(k) = -0.228 - 2.117k$ ，确定系数为0.556，模型拟合程度低；线性坐标系中使用指数函数和幂函数对度的概率分布进行拟合，对累积度的概率分布使用指数函数进行拟合，发现两种度的概率分布拟合效果均一般，但指数函数拟合优于幂函数拟合。因此，淄博市公共汽车站点网络中节点度的概率分布服从指数分布，不属于无标度网络，也不完全属于随机网络，介于二者之间。网络规模增长过程中，新站点的设置不倾向于与度值大的站点优先连接，连接边的选择具有较强的随机性。

3.3.2 平均路径长度

在公共汽车站点网络中最短路径长度

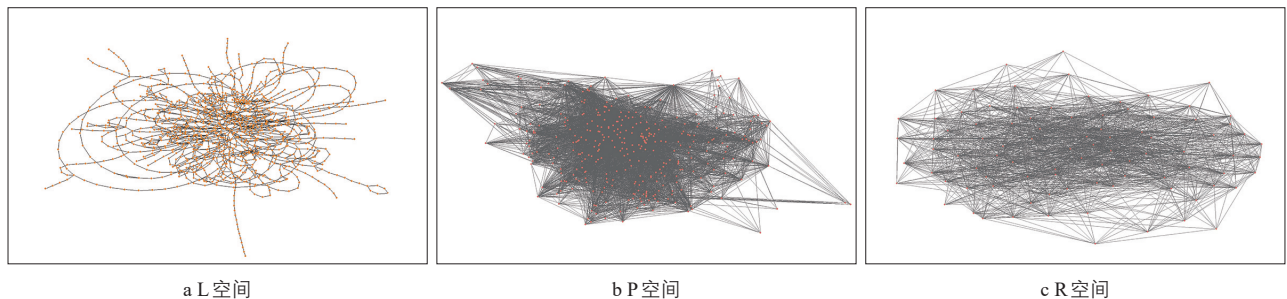


图2 公共汽车网络模型拓扑结构示意图

Fig.2 Schematic topology of bus transit network model

表2 站点网络节点度值占比

Tab.2 Proportional distribution of node degree values in the station network

度值	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
节点个数	49	820	145	132	55	36	10	9	4	3	1
比例/%	3.88	64.87	11.47	10.44	4.35	2.85	0.79	0.71	0.32	0.24	0.08

表3 站点网络节点强度值占比

Tab.3 Proportional distribution of node strength values in the station network

加权度值	<100	100~<200	200~<300	300~<400	400~<600	600~<800	800~<2 000
节点个数	569	378	102	84	67	34	30
比例/%	45	30	8	7	5	3	2

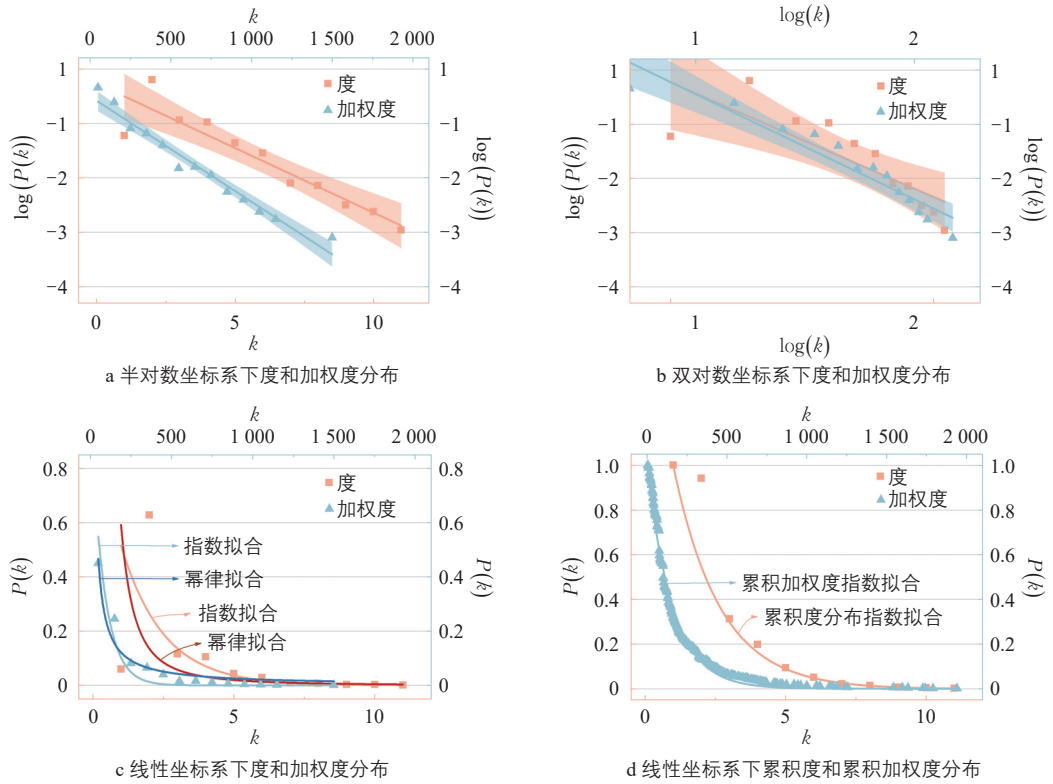


图3 站点网络度和加权度分布

Fig.3 Distribution of degree and weighted degree in the station network

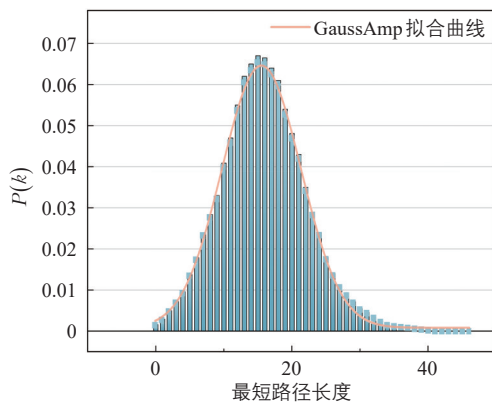


图4 站点网络最短路径分布

Fig.4 Distribution of the shortest paths in the station network

表示居民乘坐公共汽车出行一次需要经过的站点数。使用Floyd算法计算空间中任意两节点间的最短路径,得到淄博市公共汽车站点网络的平均路径长度为13.77,即出行一次平均经过13~14个站点。最远的距离是从淄博师专站到后孙站,需要经过46个站

点。最短路径距离服从GaussAmp(高斯)分布 $P(d_i) = 0.00096 + 0.065 * e^{(0.5 * (0.5 * (d_i - 15.57) / 5.78)^2)}$, 确定系数为0.998(见图4)。

3.3.3 聚类系数

在该网络模型中,平均聚类系数为0.054;最小值为0,占84.01%;最大值为1,仅占3.80%,整个网络连通性较低。如图5所示,数值较大的点集中在火车站、鸿泰花漾城附近。淄博市站点网络聚类系数远低于其他城市,较低的聚类系数导致公共汽车网络稀疏、稳定性较差,容易造成少数节点客流负荷超载的情况。

3.4 换乘网络特性分析

3.4.1 度及度分布

公共汽车换乘网络扩大了站点的直达辐射范围,度值能够进一步体现站点的重要程度。换乘网络节点度最小值为3,最大值为583,节点加权度最小值也是3,最大值

为850。平均度为63.51，表明淄博市居民乘坐公共汽电车在不换乘的情况下可以到达63个站。网络中节点度和加权重较大的站点高度吻合(见表4)。换乘网络中度值高的节点与站点网络中度值较大的节点也大致相同，如公交东站、火车站、义乌小商品城、市中西医院等站点。虽然度值较大的站点不一定是枢纽站，但是在现实中都发挥着重要作用。

从图6可以看出，换乘网络中度的概率分布和加权度的概率分布在半对数坐标系以及双对数坐标系下呈现杂乱无章的分布形式，无法辨别出符合哪一类分布；在线性坐标系下采取指数函数和幂函数进行拟合，系数均低于0.1。累积度的概率分布和累积加权度的概率分布均符合指数分布，方程分别为 $P(k) = e^{-0.015k}$ 和 $P(k) = e^{-0.0003k}$ ，确定系数均为0.995。尽管拟合结果表明累积度的概率分布和累积加权度的概率分布符合指数分布且确定系数数值高，但是在其他坐标系下均无法对度的概率分布和加权度的概率分布进行很好的拟合。因此，无法判断公共汽电车换乘网络属于哪种网络模型。

3.4.2 平均路径长度

在公共汽电车换乘网络中最短路径长度表示任意站点到达另一个站点所乘坐的线路条数，平均换乘次数等于平均路径长度 $d_{ij} - 1$ 。表5给出了淄博市公共汽电车任意两点之间的最短路径统计情况，60.537%的站点之间最多换乘一次即可到达；平均路径长度为2.315，网络直径为4，表明居民每次出行平均需换乘1.3次，最多需要换乘3次。对照平均换乘次数与可达性的对应关系(0~1优，>1~1.5良，>1.5~2中，>2差)，可以看出在淄博市乘坐公共汽电车出行换乘比较便利。

3.4.3 聚类系数

淄博市公共汽电车换乘网络平均聚类系数为0.807，最小值为0.116，聚类系数低的节点与度值大的节点一一对应，聚类系数大的节点集中在张店区人民政府周边，聚集效应较好(见图7)。淄博市公共汽电车换乘网络与同等规模随机网络相比，二者平均路径长度相近，但其聚类系数远高于随机网络聚类系数(0.025)，符合小世界网络高聚类系数特性。

3.5 线路网络特性分析

3.5.1 度及度分布

淄博市公共汽电车线路网络的平均度为

36.04，表明一条公共汽电车线路平均可直接换乘36条线路。节点度最大值为70，是K159路；节点度最小值为7，即任一线路都能至少与7条线路直接换乘，意味着整个网络中没有一条孤立的线路，每条线路都能相对容易地与其他线路直接换乘，可达性较高。度值高的节点多数经过重要的换乘站、枢纽站。度值及加权重值在多种形式坐标系下进行拟合均无法判断出符合哪一类分布。累积度分布符合Logistic分布，其分布函数为 $P(k) = 1.265 / (1 + (x/107.378)^{1.783}) - 0.23$ ，确定系数为0.995(见图8)。

3.5.2 平均路径长度

线路网络平均路径长度 d_{ij} 能够反映出

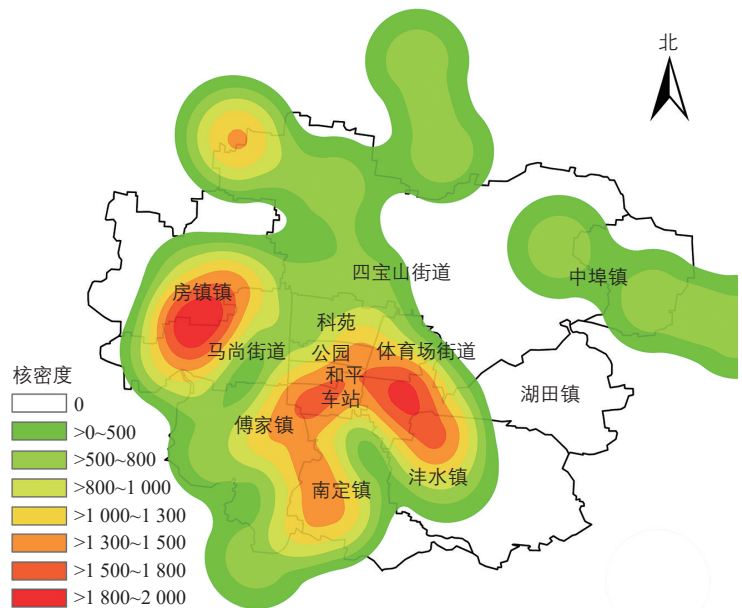


图5 站点网络聚类系数核密度分布

Fig.5 Kernel density distribution of clustering coefficient in the station network

表4 换乘网络节点度值前十的站点

Tab.4 Top ten stations with transfer network degree value

序号	站点名称	度值	加权重值
1	公交东站	583	36 077
2	良乡东门	425	29 831
3	市鞭炮公司	403	33 671
4	火车站	389	26 796
5	杏园东路洪沟西街	389	32 711
6	市中西医院	382	32 016
7	义乌小商品城	355	25 124
8	淄建集团	344	29 379
9	文化艺术城	307	18 787
10	市妇幼保健院杏园院区	291	21 844

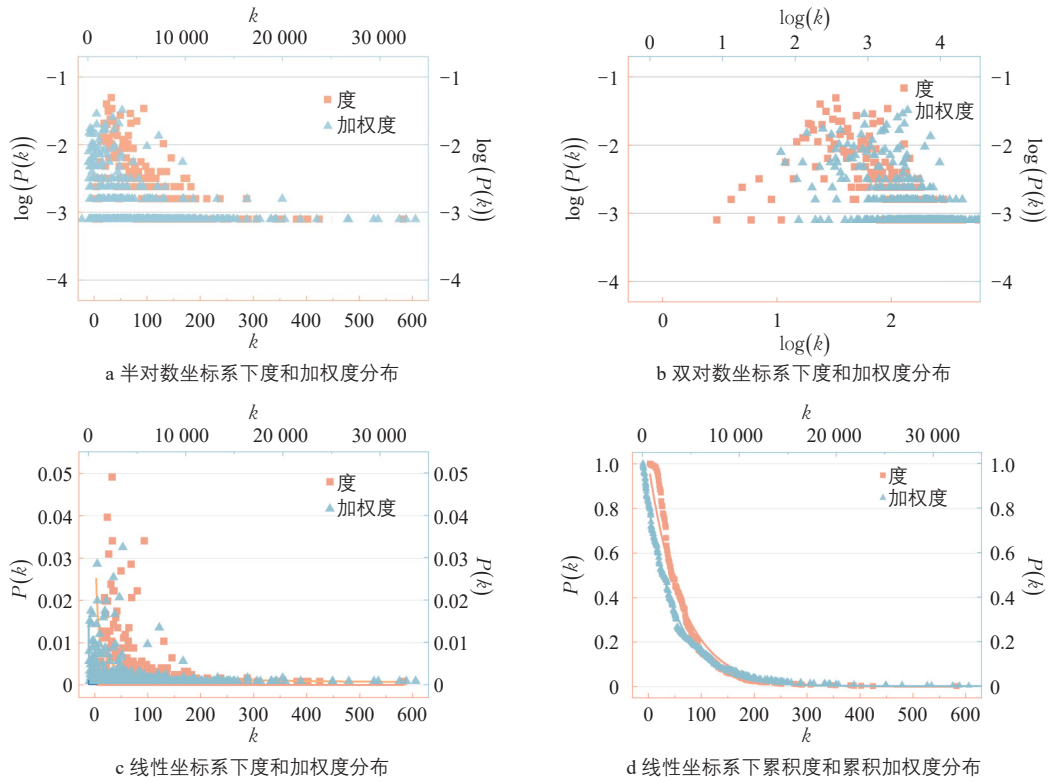


图6 换乘网络度及加权重度分布

Fig.6 Distribution of degree and weighted degree in the transfer network degree

表5 换乘网络最短路径统计

Tab.5 Statistics of shortest paths in transfer network

最短路径长度	0	1	2	3	4
路径数量/条	1 264	40 137	442 575	315 488	16
比例/%	0.158	5.020	55.359	39.461	0.002

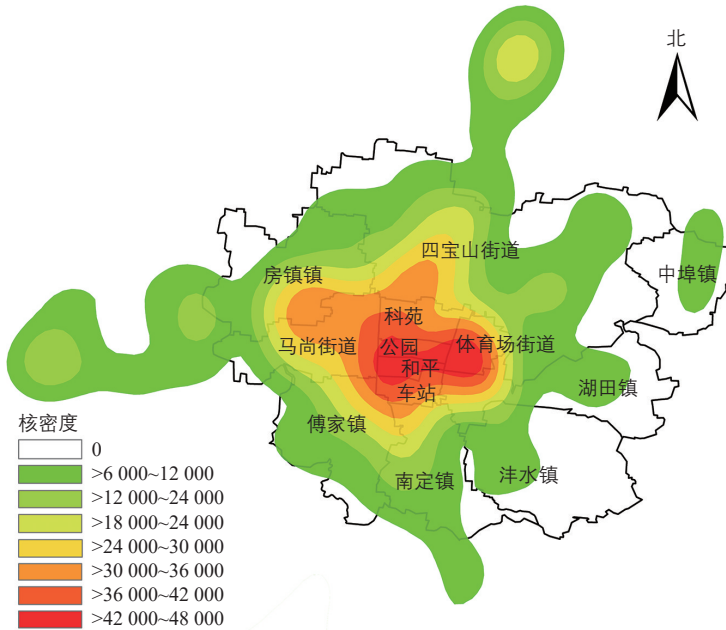


图7 换乘网络聚类系数核密度分布

Fig.7 Kernel density distribution of clustering coefficient in transfer network

从一条线路到另一条线路所需的平均换乘次数，平均换乘次数等于平均路径长度 $d_{ij} - 1$ 。淄博市公共汽电车线路网络平均路径长度为 1.61，可以理解为在淄博市从任意一条线路到其他线路大约需要中转 1 次。网络中最短路径长度的最大值即网络直径为 3 (见表 6)。网络直径最大的站点对为 (1, 7) 和 (3, 4)，相对应线路分别为 101 路和 119 路、103 路和 105 路，101 路至 119 路中间需换乘 137 路和 181 路，103 路至 105 路中间需换乘 89 路和 127 路。

3.5.3 聚类系数

线路网络聚类系数为 0.636，超过 95% 的节点的聚类系数值高于 0.5。对比同等规模随机网络聚类系数值，淄博市公共汽电车线路网络也表现出高聚集效应，符合小世界网络的特性(见图 9)。

4 网络水平对比及优化建议

4.1 对比分析

本文收集整理了部分“国家公交都市建设示范城市”的公共汽电车网络静态拓扑参数^[19-21]，其中南京为首批命名城市，天津为第二批命名城市，属超(特)大城市。济宁、

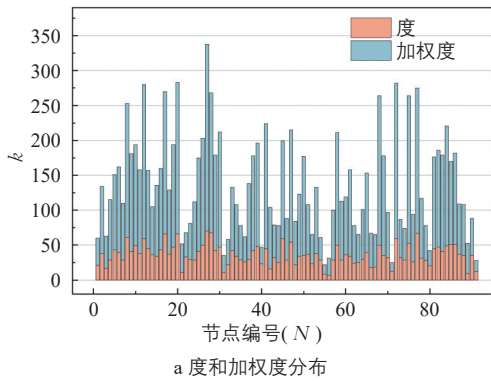


图8 线路网络度分布

Fig.8 Degree distribution of route network

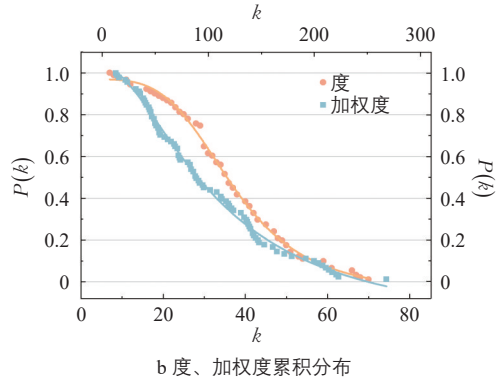
唐山为第六批命名城市，属于II型大城市以及组团式城市。

从表7可以明显看出，淄博市公共汽电车的线路、站点数量远低于天津、南京；公共汽电站点网络的度和聚类系数均低于对比城市，说明相邻站点之间线路连接程度不足，网络不稳定；3种空间网络的平均路径长度均较低，这与所选取的公共汽电车线路为市区线路有关；公共汽电车换乘网络和线路网络较高的聚类系数说明聚类特性好，也说明具有换乘功能的公共汽电站点较少，少数具有换乘功能的公共汽电站点失效对网络整体连通性能的影响大，同时随着外围区域公共汽电车覆盖范围的提升，聚类系数会有所下降。整体上，济宁、唐山、淄博相较于天津、南京，公共汽电车网络的度、平均最短路径均较低。II型大城市比较，淄博市存在度和平均最短路径较低的问题，进一步表明了淄博市公共汽电车网络连接性、可达性较弱和网络不稳定的特点。

4.2 优化建议

1) 完善枢纽站、换乘站功能，加强网络稳定性。

公共汽电车枢纽站在城市交通系统中起着重要作用，具有多种形式以及多重功能。从L空间和P空间的节点度、节点加权重分析结果可以看出，数值较高的节点所占比例小。此外，度值高的节点在空间分布上表现出极大的不平衡性，在P空间网络节点度较高的10个节点中，8个节点位于淄博市火车站附近。因此，建议完善铁路客站等城市客运集散中心周边现有公共汽电车枢纽站、换乘站的功能以及配套设施，如公交东站客运枢纽、杏园路金晶大道路口站(至淄博火车站)换乘站。科学规划，形成多元化枢纽布



b 度、加权重累积分布

表6 线路网络最短路径统计

Tab.6 Statistics of shortest paths of the route network

最短路径长度	0	1	2	3
路径数量/条	91	3 029	5 157	4
比例/%	1.098	36.577	62.275	0.048

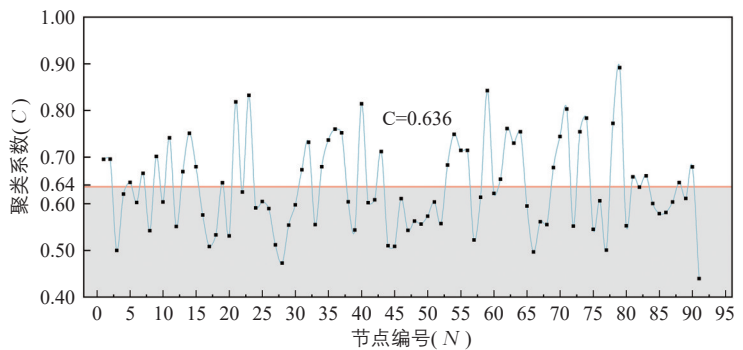


图9 线路网络聚类系数分布

Fig.9 Distribution of clustering coefficient of the route network

局，发挥新建枢纽对缩短平均路径长度的作用，如高新区公交枢纽、淄博北站公交枢纽；提高休闲场所周边公共汽电站的换乘作用，分担枢纽站客流量，减少公共汽电车在交通量大的区域内频繁停靠，如火炬公园、人民公园、市政服务中心。

2) 强化站点间联系，增强线网连通性。

淄博市公共汽电车网络规模远小于超(特)大城市，1个站点平均和2.68个站点相连，不换乘情况下能够到达63.5个站点，处于较低的连通水平。另外，公共汽电车是淄博市唯一的公共交通方式。因此，有必要以客流走廊为核心，增强市区内主要商业中心、文教场所、医疗机构之间的便捷联系，如万象汇、大润发超市、义乌小商品城、山东理工大学、淄博实验中学、淄博市技师学院、市中西医结合医院、淄博市妇幼保健院

表7 淄博市与国家公交都市建设示范城市公共汽电车网络静态拓扑参数对比

Tab.7 Comparison of static topology parameters of bus transit networks between Zibo and demonstration cities of China's transit metropolis construction

城市规模	城市名称	线路数/条	站点数/个	L空间网络			P空间网络			R空间网络		
				$\langle k \rangle$	C	L	$\langle k \rangle$	C	L	$\langle k \rangle$	C	L
超大城市	天津	292	2 726	3.07	0.100	16.26	66.99	0.620	2.88	42.28	0.587	2.48
特大城市	南京	221	1 652	3.02	0.138	20.14	69.04	0.663	2.75	36.73	0.535	2.14
	济宁	68	891	2.73	0.068	17.79	62.01	0.759	2.33	38.01	0.661	1.64
II型大城市	唐山	119	1 095	2.69	0.070	16.08	61.59	0.749	2.35	37.98	0.663	1.70
	淄博	91	1 264	2.68	0.054	13.77	63.51	0.807	2.32	36.04	0.636	1.61

表8 优化后公共汽电车网络拓扑参数

Tab.8 Topology parameters of bus transit network after optimization

线路数/条	站点数/个	L空间网络			P空间网络			R空间网络		
		$\langle k \rangle$	C	L	$\langle k \rangle$	C	L	$\langle k \rangle$	C	L
96	1 264	2.71	0.059	13.71	63.52	0.805	2.32	37.16	0.639	1.598

等；开辟部分区间线路，缓解交通拥堵；提供差异化运营服务，如客运量较大的K2，K88路；针对节点度较大且聚类系数较低的站点增设线路，增强城市公共汽电车线网连通性。

4.3 优化结果

对淄博市公共汽电车网络进行上述优化后的各项参数如表8所示。L空间、R空间网络各拓扑参数有较明显的改变，尤其是节点度，而P空间网络拓扑参数变化不明显。

5 结束语

本文基于复杂网络理论使用L空间、P空间和R空间建模方法，以淄博市为例构建了3种公共汽电车加权网络并计算网络的重要拓扑参数。公共汽电站点网络模型不具有明显的无标度特性，未表现出与超(特)大城市相似的性质；公共汽电车换乘网络和线路网络具有小世界特性。此外，将淄博市公共汽电车网络拓扑参数与不同规模城市进行对比，发现淄博市公共汽电车网络存在相邻站点之间线路连接程度不足、具有换乘功能的站点比例较少、关键换乘站点在空间分布上表现出极大的不平衡性等问题。因此，本文从完善公共汽电车枢纽站及换乘站布局、增强线网连通性等方面对淄博市公共汽电车网络的优化调整提出了建议。本文的研究成果对中等规模城市公共汽电车网络优化有一定的借鉴价值，但是在构建加权网络时主要

考虑了公共汽电车运营时间和发车间隔，未考虑公共汽电车线路客流量等指标，在未来研究中应予以改进。

参考文献：

References:

- [1] LU M, ZHANG Z L, QU Z H, et al. LPANNI: overlapping community detection using label propagation in large-scale complex networks [J]. IEEE transactions on knowledge and data engineering, 2019, 31(9): 1736-1749.
- [2] ZHU X, YANG Q, TIAN H, et al. Contagion of information on two-layered weighted complex network[J]. IEEE access, 2019, 7: 155064-155074.
- [3] WATTS D, STROGATZ S. Collective dynamics of small world networks[J]. Nature, 1998 (393): 440-442.
- [4] ALBERT R, BARABÁSI A. Statistical mechanics of complex networks[J]. Diameter of the world wide web nature, 2001(74): 47-97.
- [5] SEN P, DASGUPTA S, CHATTERJEE A, et al. Small-world properties of the Indian railway network[J]. Physical review E, 2003, 67 (3): 036106.
- [6] SIENKIEWICZ J, HOŁYST J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. Physical review E, 2005, 72(4): 046127.
- [7] 常鸣, 马寿峰. 我国大城市公交网络结构的实证研究[J]. 系统工程学报, 2007, 22(4): 412-418.

- CHANG M, MA S F. Empirical analysis for public transit networks in Chinese cities[J]. *Journal of systems engineering*, 2007, 22(4): 412-418.
- [8] 陈强. 基于复杂网络理论的哈尔滨公交网络拓扑特性及优化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- CHEN Q. Topological characteristics and optimization of Harbin public traffic network based on complex network[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [9] DE REGT R, VON FERBER C, HOLOVATCH Y, et al. Public transportation in Great Britain viewed as a complex network[J]. *Transportmetrica A-transport science*, 2019, 15(2): 722-748.
- [10] GUO L, ZHU Y, LUO Z, et al. The scaling of several public transport networks in China [J]. *Fractals- complex geometry patterns & scaling in nature & society*, 2013, 21(2): 1-5.
- [11] ANDRÁS L, ANDOR H, ISTVÁN F, et al. Complex network analysis of public transportation networks: a comprehensive study [C]//IEEE. *International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. Budapest, Hungary: IEEE, 2015: 371-378.
- [12] 周晓炯. 南京市区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.
- ZHOU X J. The analysis of weighted composite network model and robustness of Nanjing bus and subway network[D]. Nanjing: Nanjing University of Post, 2016.
- [13] HU B Y, PEI Y L, TANG J, et al. Common network characteristics of four bus transport networks in Northeast China based on a perfect space P[J]. *International journal of modern physics B*, 2018, 32(21): 1850228.
- [14] 胡宝雨, 裴玉龙, 何南. 哈尔滨公交复杂网络建模与特性分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2017, 39(9): 20-25.
- HU B Y, PEI Y L, HE N. Modeling and characteristics analysis of bus transport complex network of Harbin[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2017, 39(9): 20-25.
- [15] ZHANG L, FU B B, LI Y X. Cascading failure of urban weighted public transit network under single station happening emergency[J]. *Procedia engineering*, 2016, 137: 259-266.
- [16] 黄爱玲, 关伟, 毛保华, 等. 北京公交线路客流加权复杂网络特性分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(6): 198-204.
- HUANG A L, GUAN W, MAO B H, et al. Statistical analysis of weighted complex network in Beijing public transit routes system based on passenger flow[J]. *Journal of transportation systems engineering and information technology*, 2013, 13(6): 198-204.
- [17] 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 X, CHEN J P, SHAO J L, 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.
- [18] 徐良杰, 刘翔禾. 基于复杂网络的中小城市公交网络特性分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2016, 40(6): 943-948.
- XU L J, LIU X H. The characteristics analysis of transit network in small cities based on the complex network theory[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering)*, 2016, 40(6): 943-948.
- [19] 吴迪. 地铁-常规公交耦合网络演化模型及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- WU D. Research on evolution model of metro-bus coupling network and application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [20] 赵勋. 基于复杂网络理论的天津市公交网络数据分析及优化[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- ZHAO X. Data analysis and optimization of Tianjin public transport network based on complex network theory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [21] 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 J X. Modeling and empirical analysis of bus and subway weighted composite network in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Post, 2017.