

城市道路网络拓扑结构对常规公共交通的适宜性评价*

宋小冬 李晓晗 齐文菲 林本江 陈晨 赵一夫 王骏

提 要 道路系统是常规公共交通得以运营的物质条件,将道路网络规划好,是城市规划支持公交最基本的手段。研究提出道路网络适宜公交的三个经验假设:①路段易经过、宜经停;②少曲折、较顺直;③较连贯,可运营较长的线路。引入社会网络分析中的中间度(betweenness)概念和计算原理,以济南中心城区为例,sDNA为软件平台,计算每个路段的中间度指标,以路段上运营的公交线路数为主,乘客刷卡记录数为次,得到很强的线性相关,再做残差分析,从定量、定性两方面验证了三个经验假设。由此,可作为规划设计的三个条件。规划设计人员可借助本研究提出的中间度指标和计算方法,根据公交需求来布置道路网络结构,为公交企业提供既宽松、又有针对性的物质条件,使企业在布线、运营时,有较强的灵活性、针对性,提高常规公交的服务水平。

关键词 路网结构;拓扑;常规公交;济南

中图分类号 TU984 文献标识码 A
DOI 10.16361/j.upf.202004005
文章编号 1000-3363(2020)04-0043-08

作者简介

宋小冬,同济大学建筑与城市规划学院,高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室,教授, spt@tongji.edu.cn

李晓晗,同济大学,城市规划系,硕士研究生

齐文菲,济南市规划设计研究院,主任工程师,注册规划师

林本江,济南市规划设计研究院,高级工程师

陈晨,上海社会科学院,城市与人口发展研究所,助理研究员,通讯作者, chenchen@sass.org.cn

赵一夫,同济大学,城市规划系,硕士研究生

王骏,上海同济城市规划设计研究院有限公司,助理工程师

A Suitability Evaluation of Urban Road Network Topology for Conventional Bus Transits

SONG Xiaodong, LI Xiaohan, QI Wenfei, LIN Benjiang, CHEN Chen, ZHAO Yifu, WANG Jun

Abstract: The planning and design of road system is a foundation of the conventional bus transits in urban planning. This study puts forward three empirical hypotheses underlying the suitability of road network for the operation of the conventional bus transit, namely easily passable road sections, straight road-lines, and coherent road network. This study borrows the concept of betweenness in social network analysis to quantify the index of a road section. The study employs Jinan central city as a case and sDNA as the software platform and calculates the betweenness index of each road section. Both the number of bus routes on road sections (the primary factor) and the frequency of public transportation card usage (the secondary factor) are highly and linearly correlated with the betweenness index. The analysis results verify the three empirical hypotheses and their utility in road network planning and design. Planners can apply the betweenness index in the design of road network, which provides material support for conventional bus transit enterprises to achieve high-quality route planning and transit operation.

Keywords: road network structure; topology; normal bus transit; Jinan

发展公共交通是解决大城市交通拥堵问题的基本途径,也是解决环境问题的重要途径,学界早已达成共识。近年来,国内很多大城市相对重视轨道交通,该系统有快速、准时、载客量大的优势,但是常规公共交通有成本低、灵活性强、站距短、网络密度高、覆盖范围广的优势,依然不容忽视。常规公共交通依赖道路系统,对后者的规划设计是城市规划的基本业务,也是规划支持公共交通最基本的手段。

公交线路也要规划、公交企业要运营管理,他们对公交的作用比规划更直接,但是这两项业务只能在既有(或既定)的道路系统中运作,根据市场需求,布置公交线路,在运营过程中,调整班次、线路,和其他交通方式展开竞争、合作,提高自己的服务水平。

道路系统是有限资源,道路系统较好,公交企业的物质运营环境较适宜,应对客运市场的自主性也较强。反之,常规公共交通会处在相对不利地位,容易出现公交线

* 国家自然科学基金资助项目“高密度城区路网拓扑结构定量评价方法及规划技术研究——基于公交优先的视角”(批准号:51908354);上海同济城市规划设计研究院有限公司科研项目“适宜常规公交的城市道路结构规划方法”(项目编号:KY-2019-YB-B02)

路分布不均,走向过于曲折等问题,服务和竞争能力受到制约。

道路网络处于道路系统的核心地位,城市规划可将道路网络分为等级(含功能、宽度)、密度、路网拓扑结构三个基本要素(陈晨,2018),三者既相互联系,又相对独立。

1 前人研究的参考

倡导公交引导土地开发(TOD)的文献不计其数,这类文献侧重于道路和土地使用、城市形态的关系,也会涉及公交线网密度,一般不讨论道路网络结构。

针对道路网络,若干文献从路段等级(宽度)、路网密度的角度讨论公共交通的适宜性,或者以现有(或规划结构已定)的路网为基础,调整断面、路权来规划公共交通线路,提高公交服务水平(陈小鸿,黄肇义,汪洋,2007;杨东援,2017)。

有少量文献从网络整体结构的角度分析公交适宜,认为提升路网拓扑结构的连通性,对公共交通有利(如Zhang M, 2004; Cervero R, Day J, 2008; Ewing R, Cervero R, 2010),也有国内学者认为,网络连通性并非越高越好(石飞,于世军,2016)。叶彭姚,陈小鸿等(2012)参考社会网络分析中的中间中心势概念(betweenness centralization,该文译为介数中心势)和计算公式(FREEMAN L C, 1977),改称为道路网络集聚度,评价道路网络拓扑结构整体特征,将上海市浦东新区划分为16个分区,分别计算每个分区的网络集聚程度,和公交线网做回归分析,发现集聚度较低的地区,公交线路分布相对均匀;集聚度较高的地区,公交线路分布不均,其内在含义是按拓扑关系,接近树枝状的路网结构容易造成公交线路集中在主要道路上,接近方格网的路网结构公交线路相对均匀。吴娇蓉、李铭等(2013)对社会网络分析中的中间中心度(betweenness centrality,该文译为介数中心度)进行调整,评价上海浦东新区公交线网,提出可以按中间中心度来考虑骨干线、区域线、驳运线。

对网络拓扑结构的描述有宏观、微观之分,上述成果均属前者,侧重路网整体布局和公交的关系,少量侧重微观的研究针对公交,不针对道路(吴娇蓉,李铭,魏明,2013),微观视角的研究成果更少(陈晨,2018),本研究将侧重后者,用中间中心度描述网络结点特征,即路段之间的相互连接方式,如果在理论上有意义,可以为规划设计提供指导。

2 公交线路和道路网络结构关系的经验假设

2.1 线路不宜过短

市民出行距离有长有短,公交线路如果较短,就要增加换乘次数。在靠近起终点站的位置,乘客步行距离会长。公交线路如果较长,相对容易满足出行距离不同、出行地点不同的众人,换乘较少,也可减少起终点站数量而缩短平均步行距离。如果市内公交采用统一票价,不分乘距,这会导致短途乘客偏少,短线公交需求量偏低。当然,线路过长也有弊病:一是因路况复杂,车速不均匀,提高误点率,调度不方便;二是需求密度不均匀,难以控制班次、间隔;三是统一票价的话,乘距过长会影响到企业营收。因此,线路不宜过短,也不宜过长(徐循初,黄建中,2007)。如果道路结构适宜长线,公交企业可以按市场需求调整长度,反过来,道路结构不适宜长线,企业布线相对被动,可能会增加绕行来保持一定长度。

2.2 线路相对顺直

对乘客个人来说,希望以较短的路径,尽快到达目的地,但是公交运营过程中,不同乘客的上下车站不同,乘距不同,对路径的要求也不同,公交线路转弯多,较曲折,离开多数乘客期望的最短路径差异较大,整体满足程度较低。相反,线路直,转弯少,容易接近多数乘客的最短路径。对公交企业来说,线路直,可节省运营里程,降低成本。现实中的道路网络,如果顺直的道路占比较少,而且不连续,企业会将不

同线路都布置在少数顺直的道路上,引起重复线路过多,服务不均匀,同时出现局部供给过剩和不足的局面。受道路网络结构的制约,为了布线均匀,企业不得不将线路保持一定的转弯次数,并维持必要的长度。在某些需求密度较低的地区,企业可能会局部绕行,增加某区段的曲折程度,降低乘客候车前、下车后的步行距离,吸引市民,以牺牲运营效率、车内最短路径来维持线路的覆盖密度。增加绕行,可用传统非直线系数来表示,但不全面,后文会涉及。

2.3 线路易经过

公交线路由两个起终点站、众多经停站串联而成,后者的比例远大于前者,也承担着主要的上下客源。容易经过的路段适合设经停站,不容易经过的路段,如尽端路,只能布置起终点站,如果要经停,势必增加不必要的绕行。

公交对道路还有其他要求,如:宽度、密度等,不属本研究重点。

2.4 线路和道路的关系小结

上述三个经验假设可看成是公交企业对道路规划设计的要求:线较长、少曲折、易经过,道路规划设计方可以看成是所设计的道路网络适宜公交的三个条件:①容易经过的路段有利公交经停;②比较顺直的路段绕道的可能性较小;③路段相互连贯的空间尺度较大,允许布置的线路较长。假设来自经验,有待用定量方法深化、验证。

3 计算方法、指标、软件平台

3.1 社会网络分析与网络中心度

社会学领域大约在1960年代出现了社会网络分析方法,然后不断改进、发展,将人和人、组织和组织的相互关系抽象成社会网络,有多种计算方法、指标来描述网络结构,解释社会人(或组织)的行为,在社会学领域得到了应用。网络的中心度是其中较典型的方法,发展已比较稳定(杨松,弗朗西斯卡·B.凯勒,郑路,2019),较常用指标有:

度数中心度 (degree centrality), 该指标描述网络的结点, 可表示某结点处于社会网络中相对中心的地位, 反映某社会人 (或组织) 有较高 (或较低) 的号召力, 该指标可进一步汇聚成度数中心势 (degree centralization), 描述网络整体的层次性。

接近中心度 (closeness centrality), 该指标可描述某结点在社会网络中是否处于容易联系、交往的地位, 反映某社会人 (或组织) 有较高 (或较低) 的亲合力, 该指标可进一步汇聚成接近中心势 (closeness centralization), 描述网络整体的紧密性。

中间中心度 (betweenness centrality), 该指标可描述某结点在社会网络中是否有较强 (或较弱) 的中介地位, 反映某社会人 (或组织) 能起到的联络、传递信息的作用有多强, 该指标可进一步汇聚成中间中心势 (betweenness centralization), 描述网络整体的中间性、中介性。

中心度描述网络结点, 中心势建立在中心度的基础上, 描述网络整体, 本研究侧重于结点, 选用中间中心度 (简称中间度) 作为关键指标。

3.2 网络分析软件平台

虽然社会网络分析领域有若干软件平台, 但侧重社会关系, 不专门针对城市道路。空间句法 (space syntax, Hillier B, Hanson J, 1984) 最早将社会网络分析方法引入建筑、实体空间, 大约是1980年代初在英国 University College London 创立, 对社会网络分析中的中心度指标名称、计算方法均作了调整 (表1)。空间句法的早期针对建筑室内空间, 2006年以后有明显改进, 重点转向街道网络, 但是依然侧重步行空间, 人的视线、视域有重要影响。

sDNA (Spatial Design Network Analysis, 空间设计网络分析) 也吸取了社会网络分析中的典型概念和指标 (表1), 调整了空间句法的计算方法、数据结构 (Chiaradia A, Cooper C, Webster C, 2013), 软件系统在2010年代初由英国 Cardiff University 开发 (目前还在发展、

表1 网络中心度典型指标

Tab.1 Typical indicators of network centrality

社会网络分析 social network analysis	空间句法 depthMap	空间设计 网络分析 sDNA
closeness centrality 接近中心度	integration 整合度	closeness 接近度
betweenness centrality 中间中心度	choice 选择度, 穿越度	betweenness 中间度

注: 还有其他指标, 不同系统有差异
资料来源: 作者根据文献总结。

扩展)。和空间句法相比, sDNA 对较大尺度的车行空间适应性较强 (肖扬, 李志刚, 宋小冬, 2015; 宋小冬, 陶颖, 潘洁雯, 等, 2020), 本研究选用后者, 软件版本为4.0.3。

3.3 网络拓扑关系的表示

具有拓扑关系的网络由“结点”和“边”组成, 如通用地理信息系统、常规交通分析将道路路段定义为边, 交叉口定义为结点, 称经典拓扑方式 (primary approach), 计算结果侧重于结点。当分析所关注的对象不是交叉口, 要另外定义结点, 连接到网络。如果关注对象是路段, 可以反过来, 将路段定义为结点, 交叉口定义为边, 称对偶拓扑方式 (dual approach), 最典型的就是空间句法 (肖扬, Chiaradia A, 宋小冬, 2014)。sDNA 称道路路段为link, 称道路交叉口为junction, 输入、维护、显示数据, 建立网络数据模型, 和通用GIS、常规交通分析一致, 为经典拓扑方式。当关注对象是路段 (link), 网络中的结点不得不和路段相对应, 为此, sDNA 将每条路段对应一个结点, 具体位置在路段的中央, 这和常规交通分析相反。计算产生路径, 要依据交通成本、走向, 所使用的方法却和常规交通分析相似。这样, 社会网络分析的一些概念、方法、指标和常规交通分析可以相融, 但是结果针对路段。

3.4 中间度的含义和计算方法

社会网络分析中的中间中心度, 表示某个结点起到“中介”“经纪”的作用, 可以促进或阻碍其他结点的相互联系。以贸易网络为例, “中介人”“经纪人”使得贸易发达或受限。本研究从社会网络

分析得到启示, 中间中心度较高的路段, 公交容易经过、易穿越, 反之, 较低的路段, 公交不容易经过、不易穿越。

中间中心度可简称为中间度 (betweenness), 在网络中任取两个结点, 产生最短路径, 该路径所经过的所有结点都被记录一次, 全网络所有两个结点之间最短路径产生的记录次数累加起来, 转变为中间度, 经过次数相对较多的结点, 中间度 (空间句法称为选择度、穿越度, 见表1) 取值较高; 经过次数相对较少的结点, 中间度取值较低。

每次计算路径, 只有一个起点、一个终点, 完成计算过程, 要遍历所有起终点, 每个起点、终点出现的机会均等, 但是路径不同, 才会引起中间度有高低, 由最短路径决定。如何产生最短路径, 涉及距离度量、搜索半径。

3.5 网络中的距离度量

计算最短路径必须要度量距离, sDNA 对路径的距离有多种定义方式, 较常用的是欧氏距离和角度距离。欧氏距离和通用地理信息系统相同, 道路路段几何长度较短, 交通成本较低, 角度距离按道路路段和交叉口引起的转向角度来定义成本, 转向角度较大, 交通成本较高, 转向角度较小, 成本较低, 完全直行, 成本最低。以图1为例:

按欧氏距离定义路径成本, AEFGD (图1左图) < ABCD=AHJKD (图1右图)。

按角度距离定义路径成本, ABCD < AEFGD (图1左图) < AHJKD (图1右图)。

传统交通规划中的非直线系数, AEFGD (图1左图) < ABCD=AHJKD (图1右图)。

按传统非直线系数, ABCD 和 AHJKD 相同, 但是公交企业布线往往倾向于前者, 前者的转弯次数和角度变化总量小, 表明角度距离度量最短路径对于

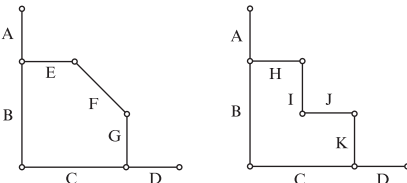


图1 道路网络结构示意图
Fig.1 Diagram of road network structure
资料来源: 作者自绘。

公交选线有一定的积极意义,符合少曲折、较顺直的假设。

3.6 搜索半径

网络分析方法中有搜索半径参数,其含义是当网络涉及的空间范围很大时,用搜索半径来限定分析的空间尺度。搜索半径较大,分析者关注的空间尺度较大,反之较小,这一方法可以和公交线路的长度对应起来,关注较小范围内的道路对公交的适宜性,可以缩小搜索半径,淡化线路长度,评价道路网络结构是否适合较长的公交线路时,可加大搜索半径。sDNA以网络中任意路段(link)的中点为圆心,按既定的搜索半径定义一个圆,在该半径范围内能包括的所有路段,产生多条不同的最短路径,对经过的link(路段)记录次数。按上述规则,预设搜索半径,遍历整个网络,将最短路径经过次数的累积值转换为路段(link)的相对指标:中间度(betweenness)。

产生中间度依靠最短路径,隐含行驶成本最低,和公交绕道少,走向顺直有关。因此,道路结构适宜公交线路的三假设、三条件,体现在计算过程中:

- (1) 中间度对应容易经过,适宜经停;
- (2) 基于角度距离的最短路径对应线路较顺直、少曲折;
- (3) 搜索半径对应线路不宜过短、能较长。

中间度是相对指标,现实中任何地区,中间度不可能均匀,基于角度距离、考虑搜索半径的中间度很可能和公交线路分布不匀密切相关。

4 典型案例:济南中心城区

4.1 城市概况

本研究选取山东省济南市为典型案例。受南部山体、北部黄河的阻碍,济南市中心城区由老城区向东西两翼(尤其是东侧)发展,高密度地区呈带状形态(图2),有起伏的地形占比不多,位于边缘。至2018年,中心城区大约有470万常住居民。当前的公共交通以常规公共汽车为主,包括多条中运量

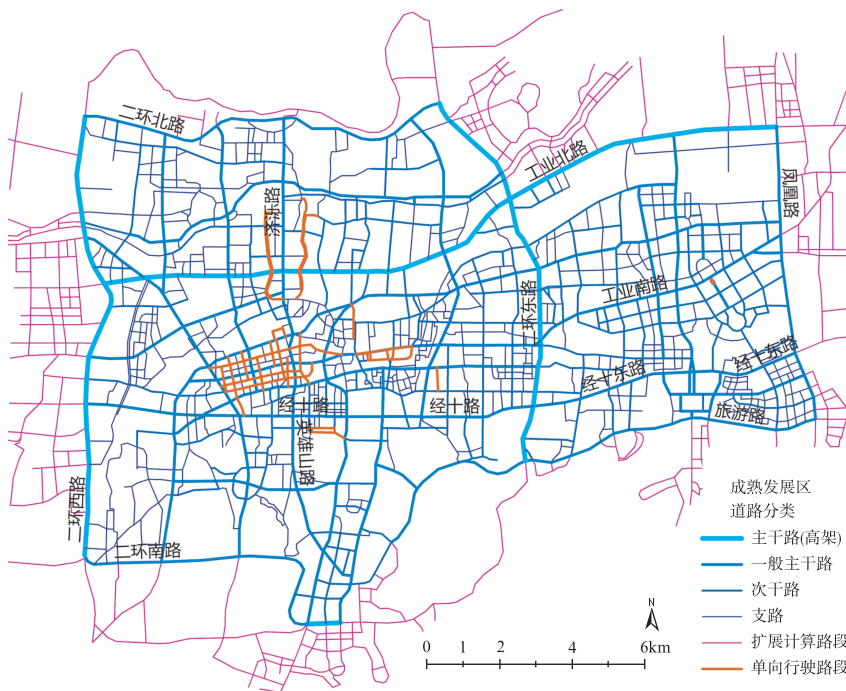


图2 济南中心城区的道路网、研究范围

Fig.2 Road network and the research area of Jinan city

资料来源:作者根据数据资料分析绘制。

BRT。作为“泉城”,为了保护地下泉脉,城市轨道交通建设相对谨慎,目前仅有两条轨交线,未穿越人口密集的中心区。

4.2 道路网络

现状道路基础数据依据2018年底调研资料,参考2019年的高德导航地图,做少量补充,按道路中心线输入计算机,构建网络,作为研究对象。对老城区内的狭窄、很短的小路,大型居住区、大单位不允许公交进入的内部道路均不纳入,高架路只纳入底层适合公交的部分,或允许公交行驶的局部。先用软件ArcGIS检查拓扑关系,消除拓扑差错。对较曲折的路段,做概括处理,降低中心线的曲折程度,再用sDNA检查交叉口是否正常交汇,纠正差错。交通管理部门对少数道路有单向行驶限制(大约有133段,图2),根据上下行方向,按sDNA软件的要求,对link(路段)赋予特定属性。

4.3 研究的空间范围

本研究重点关注成熟发展区,对此

划定范围:东到凤凰路,西到二环西路,南到二环南路、旅游路,北到二环北路、工业北路(图2),东西向长度约19.3km,南北向宽度约7—14km,面积大约为195km²,涉及2172条道路路段。为了减弱拓扑分析的边缘效应,将计算范围向外扩大约2km,称扩展计算区,面积大约为340km²,涉及2638条路段。

4.4 公交线路

公交线路数作为验证假设的主要、直接依据,由济南市规划设计研究院收集数据,也参考高德导航地图,做少量补充,共有311条运营线路。如果某条公交线路在某段路上双向行驶,记为经过2次,单向行驶记为1次,没有公交线路经过的道路该属性值为零(图3),成熟发展区内,平均值为11.7(如果按传统口径,有公交的路段,平均有6条线路经过,重复系数较高),最多的是经十东路,局部达到53,没有公交经过的路段大约占41.8%。

排除行驶到郊区、周边城镇的线路,行驶在扩展计算区范围内的公交有180条,据此得到平均长度为14.25km,

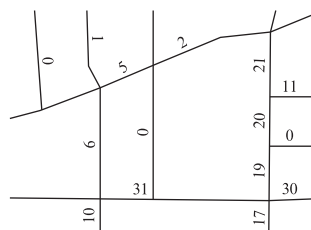


图3 不同路段上的公交线路条数

Fig.3 The number of bus routes on different sections

资料来源：作者自绘。

其中较长的是K141、322、济长巴士1路，大约31—33km，较短的505、516路，大约4.1km（临时短驳线除外）。

4.5 公交IC刷卡记录

刷卡记录数作为验证假设的次要、间接依据。若同时有上下车记录，可得到公交线路不同区间的客流量，便于验证路段的中间度。但是乘客只需上车刷卡一次，只能假设上车客流量与区间客流量呈正相关。使用济南公共交通公司提供的2017年5月乘客IC刷卡记录（不含其他企业运营的线路，当时还未推广手机二维码支付），根据刷卡的时间和刷卡时的GPS坐标定位记录，可判断乘客上车的路段，从而计算不同路段的刷卡次数（图4）。

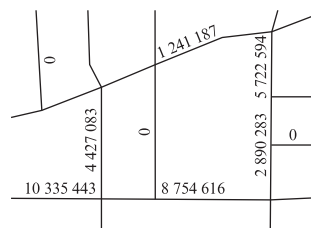


图4 不同路段上的刷卡次数

Fig.4 Times of card-swiping on different sections

资料来源：作者自绘。

5 中间度指标的计算、验证、分析

5.1 公交线路条数和中间度线性相关检验

取5种搜索半径：6km，8km，10km，12km，14km，按扩展计算区，用sDNA计算每路段的中间度指标。然后，以成熟发展区内的道路中间度为自变量，每条道路上运营的公交线路条数（含城乡公交）为因变量，做线性相关检验，计算结果见表2。可以看出中间度和公交

表2 路段中间度和经过的公交线路数线性相关检验（ $n=2172$ ）

Tab.2 The linear correlation test between the betweenness index and the number of bus routes on each road section ($n=2172$)

搜索半径(m)	6000	8000	10 000	12 000	14 000
线性相关系数	0.678	0.703	0.721	0.734	0.731
显著性 (Sig.)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

资料来源：作者计算后整理。

线路条数存在非常强的线性相关（样本量超过2000），显著性（Sig.）明显小于0.001，当搜索半径为12km时，相关性最强（图5）。按统计验证，可以认为，中间度较高的路段，相对适宜公交运营，中间度较低的路段，相对不适宜公交运营。

5.2 搜索半径的启示

搜索半径的含义是空间尺度，本案例的搜索半径达到12km时，中间度和公交线路条数的相关性最强，如果非直线系数为1.2，隐含了单条公交线路大约在14.5km比较合适，接近市内公交的平均长度（14.25km），虽然这是一种间接的、粗略的估计，但至少可以说明中间

表3 路段中间度和路段刷卡记录线性相关检验（ $n=2172$ ）

Tab.3 The linear correlation test between the betweenness index and the times of card-swiping on each road section ($n=2172$)

搜索半径(m)	6000	8000	10 000	12 000	14 000
线性相关系数	0.503	0.506	0.517	0.536	0.535
显著性 (Sig.)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

资料来源：作者计算后整理。

度的计算过程隐含公交线路的长度。

5.3 公交刷卡记录和中间度线性相关检验

将成熟发展区内的道路中间度为自变量，每条道路上公交IC刷卡记录数为因变量，做线性相关检验，结果见表3。可以看出中间度和刷卡次数也是强线性相关，显著性也明显小于0.001，当搜索半径为12km时，线性相关也最强。按统计验证，可以认为，中间度较高的路段，乘用公交的市民较多，中间度较低的路段，乘用公交的市民较少。

刷卡记录和公交布线互为依存，有了线路才会有乘客。如果排除无公交线路， $n=1265$ ，搜索半径为12km， $r=0.796$ ， $\text{Sig.}<0.001$ 。但是和公交线路数相比，刷

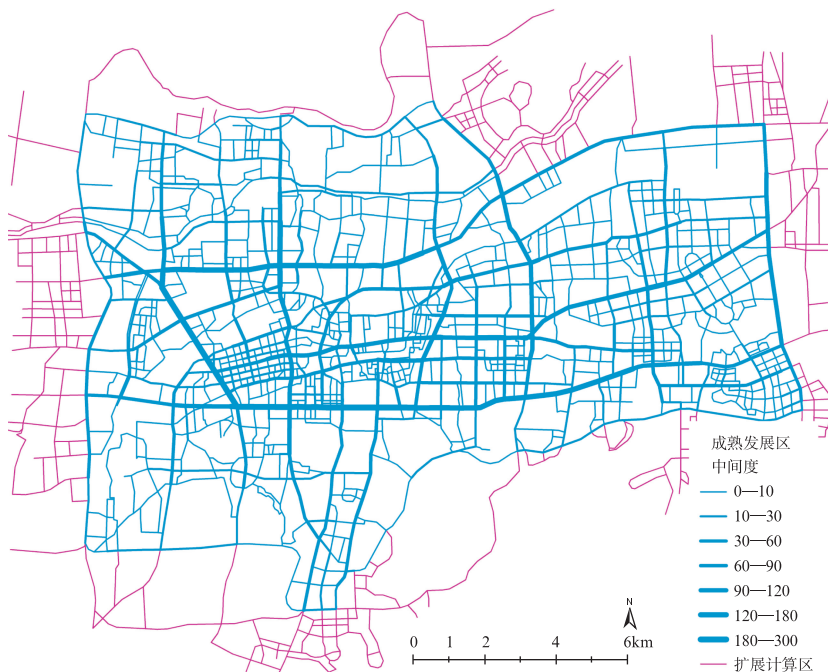


图5 搜索半径为12 000m，不同路段的中间度

Fig.5 The betweenness index of each section under the search radius of 12 000 meters

资料来源：作者根据数据资料分析绘制。

卡次数和中间度的统计相关性稍弱。除了数据采集不全,少数线路没有记录,或者部分丢失外,还有它和线路数不完全匹配,公交企业布线首先是考虑市民需求;其次是道路结构的适宜性,最终以整条线路的载客总量为依据,刷卡记录反映上车地点的公交需求,肯定受布线影响,但是,上车量和整体载客量之间会有局部错位,会有局部线段车内乘客较多,上下客不多,或者车内乘客不多,上下客较多。可以认为,道路拓扑结构对公交布线的影响相对直接、对市民上车地点的影响相对间接,因此本研究以线路数为主,作为直接验证,以刷卡数为次,作为间接验证。

考虑样本量,用线路数、刷卡数统计验证,线性相关都非常强,但是依然会有少量样本明显偏离回归。

5.4 残差分析

5.4.1 计算方法

线性相关同时得到线性回归函数,会有少量样本远离回归函数的估计值,用残差分析方法,找出偏离函数估计值较明显的样本,也许会有参考价值。当样本量较大时,可用如下公式计算残差区间:

$$\hat{y}_0 \pm t_{\alpha/2}(n-2)S_e \quad (1)$$

上式中,当样本的自变量 $x=x_0$, $\hat{y}_0$ 为线性回归函数的估计值, $t_{\alpha/2}$ 为显著性水平为 α 的 t 统计量, $(n-2)$ 是统计参数, n 为样本个数, $S_e^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-2)$, y_i 为样本点的观测值, $\hat{y}_i$ 为该样本点的函数估计值。当某样本点取值为 x_0, y_0 , y_0 和 $\hat{y}_0$ 之差称为残差,计算结果是一个估计区间,任何样本点的 y_0 如果在该区间之内,就认为在 α 水平下该点的残差可接受,如果样本点的 y_0 在该区间外,就认为残差明显。同样的样本群, α 越小,估计区间越大,区间内的样本点越多,区间外的样本点离开函数估计值较远,残差较大。该方法较多用于估计线性函数的预测区间,此处是反过来估算残差。

运用上述公式,自变量 x 为路段的中间度,因变量 y 分别为路段公交线路数、刷卡记录数, $\alpha=0.001$, 搜索半径取

12 000m,公交线路数明显偏低的有 10 条路段,明显偏高的有 17 条路段,刷卡数明显偏低的有 10 条路段,明显偏高的有 29 条路段,它们的空间分布见图 6、图 7。

5.4.2 残差特别明显的原因解释

(1) 公交线路条数偏少(图 6)。济齐路—纬十二路—阳光新路,数据采集期间,纬十二路附近正在建设人防工程,对公交有限制,而且该方向的西北

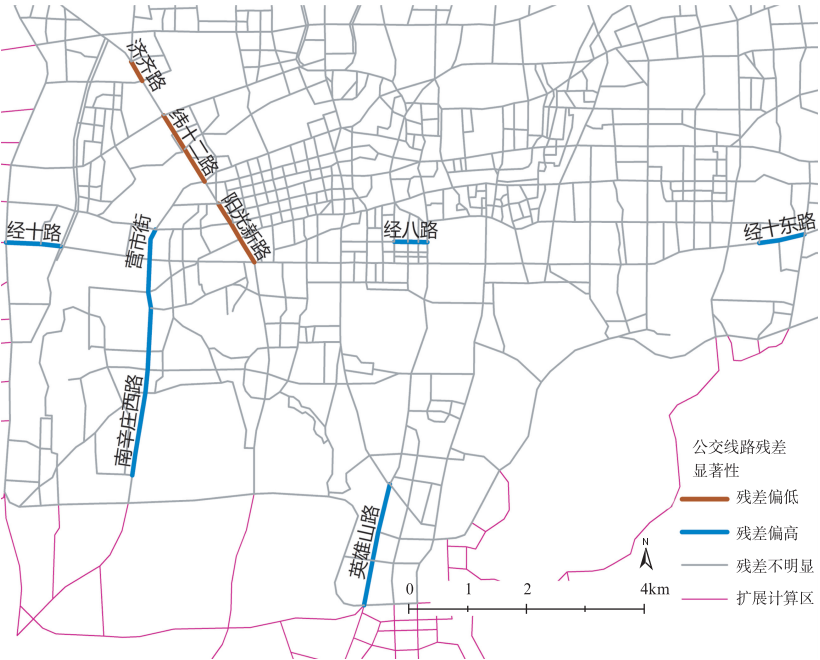


图 6 公交线路统计残差明显的路段 ($\alpha=0.001, n=2172$)
Fig.6 Sections with significant statistical residuals of bus routes number ($\alpha=0.001, n=2172$)
资料来源:作者根据数据资料分析绘制。



图 7 刷卡次数统计残差明显的路段 ($\alpha=0.001, n=2172$)
Fig.7 Sections with significant statistical residuals of card-swiping frequencies ($\alpha=0.001, n=2172$)
资料来源:作者根据数据资料分析绘制。

段路网局部密度不均衡,造成中间度指标相对偏高。

(2) 公交线路条数偏多(图6)。经十路西段,营市街—南辛庄西路,英雄山路南段,这些道路是中心城区重要出口通道,包括城乡公交线路,造成数量偏多。经十东路局部有53条线路,为济南之最,经八路东段很短,有28条线路,也属特殊现象。其他原因包括:上述路段周边路网密度较低,允许通公交的道路偏少。

(3) 刷卡次数偏少(图7)。纬十二路—阳光新路,原因和公交线路偏少一致。

(4) 刷卡次数偏多(图7)。营市街附近缺少贯通道路,公交相对集中。堤口路附近有城乡公交枢纽。济泺路北段有服装、鞋类、眼镜等大型交易市场。纬二路两侧是传统商业、商务中心,北段西侧的西市场也是公共活动中心,由此还影响至经一路。经八路沿线有两家医院,就医人数多,多处中小学及幼托,学生走读和家长接送较多。趵突泉北路附近有重要的城市公园,也是贯穿南北方向的重要道路。明湖北路位于知名旅游景点大明湖的北门,有长途汽车客运站。该路向东为花园路,是重要的东西向通道,其两侧平行路上公交线路较少,相距较远。历山路是南北向的重要通道,靠近解放路为古城东侧的城市中心,附近还有中心医院。

6 小结和讨论

6.1 主要结论

本研究提出三个假设:①易经过;②少曲折;③较长线。计算过程中:

(1) 中间度对应易经过,适宜公交经停;

(2) 基于角度距离计算路径对应少曲折、线路较顺直;

(3) 搜索半径对应线路不宜过短、能较长。

以济南中心城区为例,借助软件平台sDNA,以路段公交线路数为主,公交刷卡记录为次,初步验证了三个假设,说明中间度的计算过程、计算结果,可以评价道路网络对公交的适宜

性。研究结论不但和经验相符,和前人的研究也有部分相似:

(1) 提升路网拓扑结构的连通性,对公共交通有利,但是并非越高越好。本研究对济南现有路网的观测,发现多数公交线路选择易经过的路段,这是对网络连通性相对微观的视角。

(2) 集聚度较高的地区,公交线路分布不均。济南部分道路公交线路重复率很高,周边道路上的线路往往很少或没有,这一特征和网络结点的中间度指标相对应,市民对公交的需求不太可能在很小尺度范围内有大起大落,这和宏观中间势的描述相似。

(3) 公交网络的中间度指标较高的,可作为骨干线。本研究对此具有佐证的效果,即中间度较高的路段上应该运营相对重要的公交线路。

6.2 尚未解决的问题

居住人口、工作岗位密度,商业、就业中心、郊区城镇等因素尚未深入考虑。

道路结构还包括等级(功能)和密度,虽然该领域前人已有研究成果,但是和网络拓扑结构会相互制约,如何综合,有待深化。

用网络分析软件做计算,获得评价指标,有一定工作量,还有网络边界效应、细节效应,规划设计者要熟悉它,会有一个过程。拓扑关系较抽象,讨论时所用词语比较冷僻、概念比较抽象,公众不容易理解。如果能提出一些一般规划设计人员容易掌握,比较简单的原则、导则来指导规划设计,使得抽象的网络拓扑结构理论隐含在原则、导则中,便于操作,容易向公众宣传。

6.3 道路网络评价和道路规划设计的关系

本研究提出的三假设、三条件可服务于城市总体规划、片区规划、详细规划,或者道路系统专项规划,例如,鼓励公交经过的地段,有关路段应该易经过,少曲折,较连贯。如果对某些路段采取反向处理:不易经过、多曲折、弱连贯,等于鼓励公交布置到其他相对适宜的路段。另外,道路连贯性太短,不适宜公交布线,实践中会经常遇到。

参考前人相对宏观、整体的分析结论,规划设计人员可根据当地的公交需求来考虑网络局部的拓扑结构。对公交需求较大的地区,满足这三假设、三条件的路段应该较多、较均匀;对公交企业而言,选线、布线的弹性、灵活性较大,可以投入较大的运能,来均布线路,使得公交服务也比较均衡。对公交需求较小的地区,满足这三假设、三条件的路段可较少,但是应相对集中,有针对性,便于公交企业将较小的运能集中在关键路段、主要方向上,突出自己的局部优势。

6.4 道路网络评价和公交规划的关系

道路网络是公交线路规划、公交运营规划的物质基础。公交线路规划以既定道路网络为依据,以满足市民未来需求为目标。公交运营规划针对市民近期需求,增减线路、调整走向、班次,提高服务质量,降低运营成本。

道路网络评价促使路网对公交有更好的适宜性,为公交布线和运营提供较宽松、有针对性的物质条件,使布线、运营有更大的灵活性或者针对性,目的是提升运营效果,和私人交通相竞争,刺激公交需求,实现良性循环。

常规公交和轨道交通之间如何协同发展,是大城市规划机构面临的挑战,对此,相对微观的网络拓扑关系结点描述方法会有它的潜在应用价值。

当前,国内的空间规划体系正在改革之中,如果道路系统在空间规划中被淡化,公共交通就会处于不利地位,如果将道路系统整合在空间规划中,网络拓扑关系的结点描述、整体描述两种方法可获得进一步发展的机会。

感谢同济大学交通运输工程学院吴娇蓉、建筑与城市规划学院肖扬为本研究提供帮助。

参考文献 (References)

- [1] CERVERO R, DAY J. Suburbanization and transit-oriented development in China[J]. Transport Policy, 2008, 15(5): 315-323.
- [2] CHIARADIA A, COOPER C, WEBSTER C.

- Spatial design network analysis(sDNA) specifications[EB/OL]. Cardiff University, 2013, <http://www.cardiff.ac.uk/sdna/>.
- [3] 陈晨. 适宜常规公交的城市道路网络评价方法[D]. 上海: 同济大学博士学位论文, 2018. (CHEN Chen. Evaluation methods of the urban road network suitability for normal bus transit[D]. Shanghai: The Dissertation for Doctor Degree of Tongji University, 2018.)
- [4] 陈小鸿, 黄肇义, 汪洋. 公交导向的城市道路网络规划方法与实践[J]. 城市规划, 2007, 31(8): 74-79. (CHEN Xiaohong, HUANG Zhaoyi, WANG Yang. Transit oriented road network planning: method and practice[J]. City Planning Review, 2007, 31(8): 74-79.)
- [5] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a meta-analysis[J]. Journal of the American Planning Association, 2010, 76(3): 265-294.
- [6] FREEMAN L C. A set of measures of centrality based on betweenness[J]. Sociometry, 1977, 40(1): 35-41.
- [7] HILLIER B, HANSON J. The social logic of space[M]. Cambridge University Press, 1984.
- [8] 石飞, 于世军. 公交导向的城市道路网络结构体系研究[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016. (SHI Fei, YU Shijun. A study of urban road network structure and system from the perspective of transit orientation[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016.)
- [9] 宋小冬, 陶颖, 潘洁雯, 等. 城市街道网络分析方法比较研究: 以 Space Syntax, sDNA 和 UNA 为例[J]. 城市规划学刊, 2020(2): 19-24. (SONG Xiaodong, TAO Ying, PAN Jiewen, et al. A comparative study of urban street network analysis methods: taking space syntax, sDNA and UNA as examples[J]. Urban Planning Forum, 2020(2): 19-24.)
- [10] 吴娇蓉, 李铭, 魏明. 基于修正线路介数中心度的公交骨干提取方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 1009-1014. (WU Jiaorong, LI Ming, WEI Ming. Bus main line extraction method based on modified line betweenness centrality[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(7): 1009-1014.)
- [11] 肖扬, Chiaradia A, 宋小冬. 空间句法在城市规划中应用的局限性及改善和扩展途径[J]. 城市规划学刊, 2014(5): 32-38. (XIAO Yang, CHIARADIA A, SONG Xiaodong. A discussions on implementing space syntax method in urban planning[J]. Urban Planning Forum, 2014(5): 32-38.)
- [12] 肖扬, 李志刚, 宋小冬. 道路网络结构对住宅价格的影响机制——基于“经典”拓扑的空间句法, 以南京为例[J]. 城市发展研究, 2015, 22(9): C6-C11. (XIAO Yang, LI Zhigang, SONG Xiaodong. Estimating the value of street layout via local housing market: a empirical study of Nanjing, China[J]. Urban Development Study, 2015, 22(9): C6-C11.)
- [13] 徐循初, 黄建中. 城市道路与交通规划(下册)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (XU Xunchu, HUANG Jianzhong. Urban road and transportation planning(last of two volumes)[M]. Beijing: China Construction Press, 2007.)
- [14] 杨东援. 城市交通网络的层次结构[J]. 交通与航港, 2017(10): 4-13. (YANG Dongyuan. Hierarchical structure of urban traffic network[J]. Communication and Shipping, 2017(10): 4-13.)
- [15] 杨松, 弗朗西斯卡·B.凯勒, 郑路. 社会网络分析: 方法与应用[M]. 曹立坤, 曾丰又, 译. 北京: 社会科学文献出版社, 2019. (YANG Song, KELLER F B, ZHENG Lu. Social network analysis: methods and examples[M]. SAGE Publications, Inc, 2017.)
- [16] 叶彭姚, 陈小鸿, 崔叙. 城市道路网布局结构对公交线网密度的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 51-56. (YE Pengyao, CHEN Xiaohong, CUI Xu. Impact on density of public transportation network by urban road network layout[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2012, 40(1): 51-56.)
- [17] ZHANG M. The role of land use in travel mode choice: evidence from Boston and Hong Kong[J]. Journal of the American Planning Association, 2004, 70(3): 344-360.

修回: 2020-06