

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201709139

公交专用道施划的公交客流影响范围

罗艺,钱大琳

(城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室(北京交通大学),北京 100044)

摘要: 公交专用道虽能有效地保障公交优先,但其对公交乘客产生的巨大吸引力,能够引发公交网络中局部区域的客流转移动,对公交运营造成影响. 为准确获取该变化的具体范围及程度,结合公交出行特征,在改进后的公交换乘网络基础上,提出一种重叠社团结构检测算法以确定出专用道的可影响范围,并进一步利用改进后的公交站点网络,利用 Dijkstra 算法提出影响模型以计算具体影响程度. 最后根据实际调研数据验证了方法的合理性. 研究表明:公交网络中线路间的相互联系是专用道影响的基础,而换乘条件是限制其影响的重要因素. 与专用道站点之间具有至多一次换乘关系的站点集构成了专用道的影响范围,乘车资源及环境则决定其影响程度. 研究结果,可对既有专用道进行评估及其进一步施划.

关键词: 交通工程;影响分析;社团结构;公交专用道;复杂网络

中图分类号: U491.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)03-0114-07

Influence scope of bus lanes on public transport passenger flow

LUO Yi, QIAN Dalin

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology (Beijing Jiaotong University),
Ministry of Education, Beijing 100044, China)

Abstract: Although the bus lanes could guarantee public transport priority effectively, their great attraction to bus passengers can lead to the transfer of passenger flow in local area of bus network, and has an impact on bus operation. In order to accurately obtain the specific scope and extent of this change, this research put forward an overlapping community structure detection algorithm based on the improved bus transfer network, and used the improved bus station network and Dijkstra algorithm to propose an impact model to calculate the specific impact degree. Finally, the rationality of the method was verified in accordance with the actual survey data. Results show that the interconnection among bus lines in the public transport network is the basis of the influence of the bus lanes, and the transfer conditions are the important factors limiting its influence. The set of stations with a maximum of one transfer relationship with the bus lane stations constitutes the scope of the impact of the bus lane, and the impact degree is determined by the resources and environment of the bus. The results can be used to evaluate the existing bus lanes or to further planning.

Keywords: traffic engineering; influence analysis; community structure; bus lane; complex network

地面公交车辆的通畅运行,关系着城市中绝大部分通勤人群的出行利益. 当前,机动车保有量急剧增长,为保障公交出行的可靠性,在城市道路资源紧张及基础设施建设成本高昂等情况下,利用既有城市路段,施划出一条或多条路段专门提供给公交车行驶的公交专用道,成为当前各大城市保障公交优先的有效措施之一. 数据显示,专用道开通后,公交车速相比之前与小汽车混行的状况获得较大提升,部分车速甚至可提升至原来的2倍^[1]. 很明显,公交专用道能够改善所属站点间公交车辆的出行环

境,保障其可靠性. 据上海市的一项交通调查显示,约78%的出行者,特别是通勤出行人员,非常重视出行时间的可靠性,认为出行时间可靠性甚至比出行时间本身还重要^[2]. 因此,专用道在通勤高峰期所带来的高可靠性与低出行时耗,将对公交出行者产生较大吸引力,促使部分出行者改变其原先的出行线路;另一方面,这样的改变是长期,甚至是永久的. 对于交管部门来说,明确上述变化在公交网络中发生的具体范围及程度,及时针对范围内的站点和路段开展调度与规划工作,才能最大限度地发挥专用道效用,提升公交系统的客运效率和能力.

一直以来,公交专用道对公共交通运营的影响研究,成果已较为丰富. 主要可分为宏观和微观两个方面. 宏观方面主要通过建立数学规划模型等方式,研究专用道的规划方案^[3-4]、整体路网优化^[5]以

收稿日期: 2017-09-27

基金项目: 北京市哲学社会科学规划重大项目(11ZDA03)

作者简介: 罗艺(1983—),男,博士研究生;

钱大琳(1963—),女,教授,博士生导师

通信作者: 钱大琳, dlqian@bjtu.edu.cn

及施划后的效益评估^[6];微观方面主要借助仿真软件,从公交停靠站^[7-8]、交叉口与信号配置^[9-10]等角度就公交专用道的具体设计方案进行探讨.但是,涉及专用道与网络中公交客流关系的文献相对较少.实际上,专用道对公交客流的影响,体现在公交网络中相应站点的客流变化及站点间的客流联系上.当前研究已表明,公交网络具备小世界、无标度性质^[11],是典型的复杂网络,结合本文的研究内容,显然从网络的角度展开研究是合理的.此外,社团结构^[12]是复杂网络的一项重要特性,社团内部的节点连接紧密,社团之间连接稀疏.利用合理的社团结构划分算法,可以将网络中相关元素进行聚类.受上述启发,本文提出一种重叠社团结构划分算法,检测公交换乘网络中的社团结构,据此获取线路间的换乘关系,划分出可能被影响的站点群,然后提出影响模型并进一步计算.最终得到的站点集合及其相互间的联系即构成公交客流所受专用道影响的具体范围.

1 基本理论与说明

1.1 公交网络拓扑结构

公交网络由站点和站点间的线路所构成.根据已有研究可知,获取公交网络拓扑结构一般采用Space P、Space L、Space R 3种方法^[13].其中,Space P 获取到的是公交换乘网络,是将公交站点视为节点,若站点之间有直达公交线路,则节点之间有连边;Space L 获取到的是公交站点网络,其同样将公交站点视为节点,若两个站点在某一条公交线路上相邻,则节点之间有连边;Space R 则是用节点表示公交线路,线路间有公共停靠站则有连边,称为公交线路网络.3种方法各有特点:公交站点网络既保留了原网络的拓扑性质,同时又较好地体现了网络中站点之间的空间逻辑关系;公交换乘网络能够更好地表示网络中的换乘状况;公交线路网络则更多用于线路研究.图1分别给出了3种方法的示意图,其中数字表示站点编号,字母表示线路名称.

本文的研究一方面需要考虑出行者在不同线路间的换乘,另一方面需要计算站点间的出行时间.因此,本文参考Space P及Space L两种方法获取公交网络拓扑结构.

一般情况下,城市中某些站点间并没有公交线路,但因相互距离较近,出行者可以通过步行方便地往来于这些站点.如图2(a)所示,出行者若需要去往站点8或站点10,实际上可以乘坐线路1抵达站点3或者线路3抵达站点15,然后步行去往站点8或站点10即可.这是一种合理的出行路线.但若依

照原始Space L方法构建的网络,出行者只有选取线路2才能达到出行目的,这也许会花费更多的出行时间.

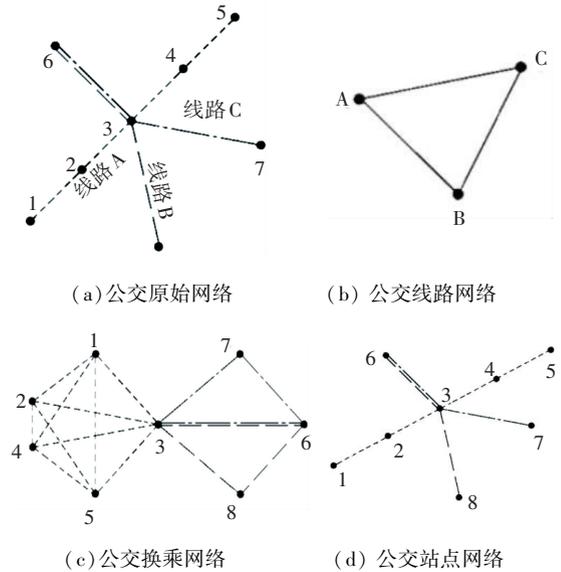


图1 公交网络拓扑结构

Fig.1 Topological structure of bus networks

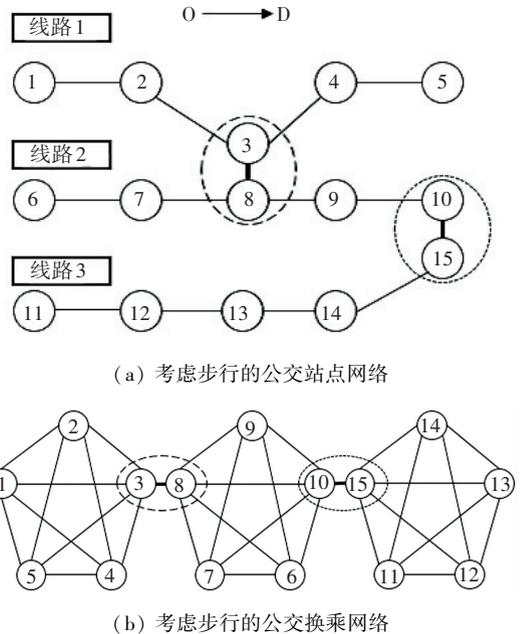


图2 考虑步行的公交网络拓扑结构

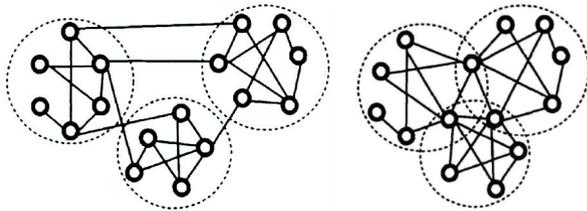
Fig.2 Topological structure of bus networks considering walk

基于上述考虑,本文认为具备步行条件的公交站点之间有一条连边.参考文献^[14],取步行范围在0.5 km内.也就是说,公交站点网络中任意两个属于不同线路的站点,若相距不超过0.5 km,则将二者相连.在此基础上的公交换乘网络,也进行相应调整,如图2(b)所示.可见,由于站点3与站点8,站点10与站点15的连边,使得原先毫无联系的3个完全图有了联系,出行者在该网络中也可以有新的换乘方案,更符合现实情况.

1.2 社团结构

随着复杂网络研究的不断深入,复杂网络的一项重要特性—社团结构^[12]逐渐被人们所认识. 社团 (community), 还可以称为“簇”(cluster) 或者“模块”(module), 是指一组具有相似功能的对象集合. 其中, 集合可以是相同的角色, 或者具有相同隶属关系、具有相同属性的对象等. 社团内部相互联系紧密, 内部与外部的联系较为稀疏.

社团结构示意图如图 3 所示. 其中图 3(a) 为互不重叠的社团结构, 是指每个节点仅归属于一个社团; 图 3(b) 为重叠社团结构, 是指某些节点可归属于两个或两个以上社团, 使得社团之间出现重叠现象.



(a) 互不重叠的社团结构 (b) 重叠的社团结构

图 3 社团结构示意图

Fig.3 Sketch of communities structure

社团结构划分的方法很多. 可按照图 3 示意将方法主要分为两类: 一类用于检测网络中互不重叠的社团结构, 如 Kernighan-Lin 法、谱平分法、分裂法、凝聚法等; 另一类重叠社团结构检测的方法, 主要有基于完全子图的方法、基于边划分的方法、基于局部优化的方法以及其他方法等^[15].

2 网络分析与算法提出

2.1 网络分析

城市中任意两地间的公交出行, 通常包含多条线路. 如图 4 所示, 共有 5 条运行于不同道路上的线路可满足 OD 间的出行需求.

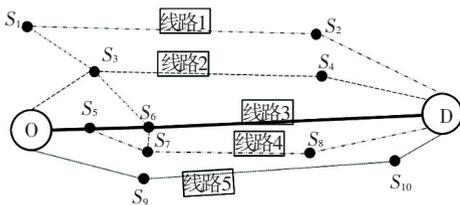


图 4 站点影响示意图

Fig.4 Sketch of influence on stations

其中线路 1、2、4 与线路 3 之间均有公交线路连接, 分别为 $S_1-S_3-S_6$ 、 S_3-S_6 、 S_7-S_6 . 线路 2、5 与线路 3 的空间距离基本相等, 但线路 5 与其他线路均无连接, 线路 3、4 有公共站点为 S_6 . 公交专用道施划前, 5 条线路的出行环境大致相同, 人们就近选择适合的线路完成出行. 此处若线路 3 所在道路施划专

用道, 那么线路 3 显然成为 OD 间最具吸引力的公交线路. 由于专用道的吸引, 使得部分公交出行者倾向于选择专用道线路替代原先的部分或全部出行线路, 以更好地满足出行需求. 通常, 这部分出行者可以通过步行或公交换乘等方式, 抵达专用道上站点 S_5 、 S_6 , 再使用专用道线路 3 继续出行. 但需要注意的是, 公交出行线路改变不如社会车辆那样灵活, 不仅与站点空间位置相关, 还受到不同线路间换乘关系的制约. 此外, 专用道投入使用的时间主要在早晚高峰的通勤时期. 如北京、上海等城市的大部分公交专用道, 有效时间为上午 7:00—9:00 时, 下午 17:00—20:00 时. 显然, 在争分夺秒的通勤过程中, 公交出行者为抵达线路 3 所耗费的时间越多, 则其选择专用道线路的意愿也必定越弱.

进一步对图 4 分析可知: 1) 站点 S_5 、 S_6 的出行者可直接选择线路 3 出行, 转移条件最好; 站点 S_1 、 S_3 、 S_7 的出行者需 1 次换乘去往线路 3, 具备转移可能性. 线路 5、2 与线路 3 的距离虽相同, 但 S_9 碍于换乘条件的限制不能直达线路 3, 使得线路 5 上的出行者难以转移. 另外, 基于公交出行特性并结合实地调研^[16] 也了解到, 换乘具有较大不确定性, 次数越多, 时间代价越大, 相应出行距离也应该越长. 实际公交通勤出行中, 一般至多换乘 1 次. 因此, 本文不考虑至少两次换乘才能抵达专用道的出行者. 2) 在明确站点 S_1 、 S_3 、 S_5 、 S_6 、 S_7 的公交乘客均具有转移概率的基础上, 转移概率的大小则必然取决于乘客选择专用道线路 3 后, 其公交出行时间相比之前的改善程度.

综上, 可总结出被影响的出行人员特征: 1) 抵达专用道线路的便利度高; 2) 选择专用道线路后的出行时间最优. 两个条件也共同决定了专用道的吸引力. 于是, 本文通过公交线路间的换乘关系明确专用道的可影响范围, 通过出行时间的变化计算影响程度. 以任意位于影响范围内的公交站点作为出行起点, 得出专用道对此站点的影响值为

$$E = T - A \cdot T_0. \quad (1)$$

式中: T 为不包含专用道线路的出行时间; T_0 为包含专用道线路的出行时间; A 为换乘因子^[17], $A = 1 + \ln(1 + h)X$, 其中 h 为换乘次数, 代入式(1), 得到

$$E = T - [1 + \ln(1 + h)] \cdot T_0. \quad (2)$$

显然, 换乘次数越多, 换乘因子越大, E 就越小. 公交出行时间包含了候车时间、车内时间与换乘时间. 本文假设所有车次在高峰期的发车间隔时间相同为 τ , 即认为每个车次的候车时间均为 τ , 此外, 站点能够利用的线路数越多, 候车时间也相应缩短, 于是进一步改进式(2), 得到

$$E = \left(\frac{\tau}{n_0} + t_0 \right) - [1 + \ln(1 + h)] \cdot \left[\frac{\tau}{n_1} + \left(\frac{\tau}{n_2} + t' \right) \cdot h + t \right]. \quad (3)$$

其中: n_0 、 n_1 分别为不包含、包含专用道线路时起点站能够利用的线路数量; n_2 为换乘站能够利用的专用道路数量; t_0 为不含专用道路径的出行时间; t 为包含专用道路径的车内时间; t' 为平均换乘时间. 上述参量均可通过实地调研获取, 换乘次数 $h = 0$ 或 $h = 1$.

式(3)计算步骤如下: 1) 基于 1.1 节的方法得到改进后的公交换乘网络 N_p . 对 N_p 进行社团结构划分, 探索路网中任意线路间的换乘关系, 通过其中的 0、1 换乘社团结构, 获取到专用道线路可影响范围内的站点集 θ . 2) 同样基于 1.1 节的方法得到改进后的公交站点网络 N_L , 令其连边权重为站点间的出行时间. 利用 Dijkstra 算法, 计算步骤 1) 中站点集 θ 包含的站点与目标站点 D 的最短出行时间 t_s . 若最优路径 P 不含专用道, 则放弃该节点, 置其影响为 0, 选择其他节点计算. 若最优路径 P 包含专用道, 则令 $t = t_s$. 然后参考 N_L , 得到路径 P 中相应站点能够利用的线路数量 n_1 、 n_2 , 记录整个过程中的换乘次数 h 及平均换乘时间 t' . 3) 更改 N_L 中专用道所示连边的权重为专用道施划前的出行时间值, 重新计算 O 与 D 间的时间最短路径 P' 的出行时间 t_0 . 同样参考 N_L , 得到 n_0 . 4) 根据式(3)计算出影响结果 E . 5) 重复计算 θ 内的站点, 直到计算完毕为止. 得到所有 $E \neq 0$ 的站点组成的集合 θ_0 .

2.2 社团结构划分算法

2.1 节介绍的计算方法中, 首先需要获取任意线路间的换乘关系. 先分析公交换乘网络特性, 如图 1(c) 所示. 图中共有 3 条线路, 分别为 1—2—3—4—5、6—3—7、6—3—8. 站点及相互间的连接构成 3 个完全子图. 显然, 每个完全子图内部所有站点间客流往来不需换乘. 此外, 图 1(c) 中节点 3 与节点 6 为重叠节点, 分析可知任意两个完全子图拥有一个或以上公共节点时, 则两个子图所包含的站点间客流往来至多需换乘 1 次. 如 1—2—3—4—5 与 6—3—7 之间通过节点 3 重叠, 那么站点 6 去往站点 1—2—4—5 则需要换乘 1 次. 可见通过公交换乘网络能够探索线路间的换乘状况. 另一方面, 城市中的公交线路, 彼此连接错综复杂. 如上述站点 6, 实际情况中还可能与多条线路(或线路群)均保持 1 次换乘关系. 鉴于此, 本文需要采用合适的方法挖掘公交换乘网络, 对其中的公交站点从换乘的角度进行聚类. 基于此, 无论是针对既有专用道, 还

是未来专用道的进一步规划, 都能够快速准确地掌握可能被影响的线路及站点.

通过对公交换乘网络的分析, 结合社团结构的特性. 本文提出一种重叠社团结构划分算法, 对公交换乘网络进行社团结构划分以获取换乘关系. 通过 1.2 节中重叠社团结构划分方法概述, 发现基于完全子图的方法较为合适. 2005 年 Palla 发表于 Nature 上的派系过滤算法^[18] (clique percolation method, CPM) 使得重叠社团结构发现开始受到广泛关注. 该方法认为社团结构由相邻的完全子图所构成, 由于一个节点可以属于多个完全子图 (clique), 因而该方法可以发现重叠社团结构. 算法首先搜索所有具有 k 个节点的完全子图 (k -clique), 而后建立为新图中的节点, 在该图中如果两个 k -clique 有 $k - 1$ 个公共节点则在新图中为代表它们的节点间建立一条边. 最终在新图中, 每个连通子图即为一个社团. 但显然 CPM 方法不适合公交换乘网络, 因为通常情况下, 每一条公交线路所包含的公交站点数量不可能均等, 即公交换乘网络中每个完全子图所包含的节点数并不会一致, 所以在换乘图中不可能找到合适的多个 k -clique. 此外, 两个相邻完全图之间也难以确保有 $k - 1$ 个公共节点.

受上述启发, 本文以图 2(b) 为例, 提出社团结构划分算法如下.

步骤 1 基于 1.1 节中方法分别获取到公交站点网络 N_L 和公交换乘网络 N_p . 并得到两个网络的邻接矩阵分别为 G_L 和 G_p .

步骤 2 搜索步骤 1 中公交换乘网络 N_p 中所有完全子图, 方法如下: 1) 任意选取节点 $i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 作为起始节点, N 为节点总数. 若节点 i 没有邻居节点, 则令 $i = i + 1$ 重新搜索. 2) 若节点 i 有邻居节点 $j (j = 1, 2, 3, \dots, N)$, 则 i 与 j 共同组成两个节点的完全子图 G_1 . 继续搜索节点 i 的邻居节点, 若能够与节点 i, j 组成新的完全子图, 则将其加入 G_1 中, 否则停止计算, 令 $i = i + 1$ 重新搜索. 以此类推, 直到没有节点可以加入 G_1 中为止. 将相关节点赋予社团编号, 过程如图 5 所示. 3) 令 $i = i + 1$ 继续搜索, 直到 $i > N$ 为止. 按照步骤 2) 中赋予的社团编号, 对得到的完全子图进行筛选, 选出不重复的完全子图, 得解.

步骤 3 基于凝聚算法思想, 将步骤 2 中所有完全子图 $G_s (S = 1, 2, 3, \dots)$ 设为新节点, 任意两个子图 G_s 之间若有至少一个公共节点则新节点间进行连边, 得到新的网络图. 并再次将形成的新网络重复如上的操作, 以此类推, 逐渐向上凝聚, 直到整个网络成为一个社团为止. 图 6 演示了整个凝聚过

程:初始换乘网络中有 1 ~ 15 共 15 个节点. 其中节点 1 ~ 5、6 ~ 10、11 ~ 15 以及节点 3 和 8, 节点 10 和 15 等构成了网络中的 5 个完全子图, 于是形成“0 - 换乘社团图”中的 5 个节点, 表示社团内部任意站点间换乘次数至多 0 次. 同理, “1 - 换乘社团图”中的两个节点则是根据“0 - 换乘社团图”中的两个完全子图构成, 表示社团内部任意站点间换乘次数至多 1 次. 最终, 整个网络凝聚成为一个节点, 即“2 - 换乘社团图”所示, 表示整个网络任意站点间公交往来, 换乘次数至多两次. 另外, 本文需要对“0 - 换乘社团图”进行处理. 即是任意两条线路间通过步

行可连接的两个站点视为一个站点, 示意如图 6 所示. 图中将仅包含两个节点的完全子图处理为一条连边, 物理意义表示线路 1 与线路 2、线路 2 与线路 3 之间为一次换乘关系. 可见, 经过处理, 线路 1、2、3 之间便存在合理的换乘关系, 否则仅会是完全独立的 3 条线路.

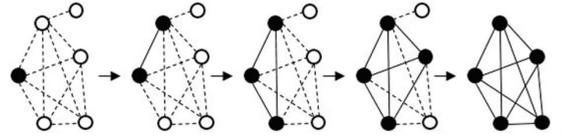


图 5 完全子图的搜索过程

Fig.5 Searching process of complete subgraph

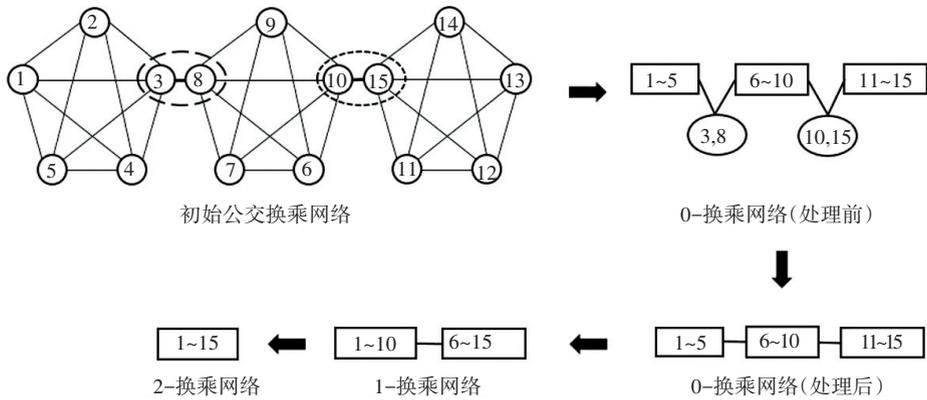


图 6 公交换乘网络的社团结构划分

Fig.6 Communities of bus transfer network

步骤 4 确定站点凝聚原则与衡量社团检测质量. 本文基于凝聚算法对换乘网络进行社团结构划分, 通过树形结构可直观地了解任意站点之间的换乘关系. 对于整个网络来说, 还必须通过合适的参量来判断站点凝聚的原则以及整个网络可划分成的最合适社团数量. 不仅能够检测社团划分质量, 也可通过社团结构了解到站点之间、站点集之间的相互关系.

社团划分结果自然不能仅用定性的方法, 于是 Newman 等^[19] 提出社团模块度 Q 定量地描述网络中社团, 衡量网络社团结构的划分. 所谓模块度是指网络中连接社团结构内部顶点的边所占的比例与另外一个随机网络中连接社团结构内部顶点的边所占比例的期望值相减得到的差值. Q 越大, 网络的社团结构越明显, 反之则越不明显. 实际应用中, Q 的取值一般为 (0.3, 0.7). 模块度的表达式为

$$Q = \frac{1}{2M} \sum_{i,j} (A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2M}) \delta(\sigma_i, \sigma_j), \quad (4)$$

其中: M 为网络中边的总数; A_{ij} 为网络中邻接矩阵中元素, 若节点 i, j 间有连边则为 1, 否则为 0; δ 为

隶属度函数, 若节点 i, j 属于同一个社团则为 1, 否则为 0; k_i 为节点 i 的度.

围绕 Newman 提出的模块度 Q 衍生出大量社团结构划分算法. 但其仅能较好地找出较粗的网络社团, 且无法应用于重叠网络社团结构的发现. 在此基础上, 文献[20]提出新的模块度为

$$Q_c = \frac{1}{2M} \sum_{c \in P} \sum_{uw} \delta_{cu} \delta_{cv} (A_{uw} - \frac{k_u k_v}{2M}), \quad (5)$$

其中: δ_{cu} 用于判断节点 u 是否位于社团 c 中, 若在则为 1, 否则为 0; P 表示社团全集.

非重叠社团网络中, 一个节点仅属于一个社团, 但是在重叠社团网络中, 一个节点可以属于多个社团. 于是式(5)中的隶属度函数 δ_{cu} 需要再作一些改进. 进一步, 将式(5)中 δ_{cu} 替换为 α_{cu} , 得到

$$Q_c = \frac{1}{2M} \sum_{c \in P} \sum_{uw} \alpha_{cu} \alpha_{cv} (GP_{uw} - \frac{k_u k_v}{2M}), \quad (6)$$

式中:

$$\alpha_{cu} = \frac{n_{cu}}{\sum_{c \in P} n_{cu}}, \alpha_{cv} = \frac{n_{cv}}{\sum_{c \in P} n_{cv}}, \quad (7)$$

其中 n_{cu} 、 n_{cv} 分别为节点 u 和节点 v 在社团 c 中的连

接边数, α 需满足

$$0 \leq \alpha_{cu} \leq 1, \forall c \in P, u \in V, \sum_{c \in P} \alpha_{cu} = 1. \quad (8)$$

α 的物理意义即为通过节点在社团内外的连接比例来确定其隶属度. 基于式(6)计算得图6中网络的模块度最大为0.3881,说明其模块度较为明显.

综上所述,划分得到的 N -换乘社团图的社团直径(即社团中任意两个节点之间距离的最大值)为 N ,表示社团内站点间换乘次数最大为 N . 所以,通过 N -换乘社团图,能够获取任意站点之间往来的换乘次数. 根据本文的研究目的,便可通过其中获取到的“1-换乘社团图”得到路网区域内所有0、1换乘关系的站点集合.

3 实例应用

为满足通州地区与北京市中心巨量的通勤需求,北京市京通快速路于2011年5月24日启用公交专用道^[1]. 专用道布设为路内侧式,快速路上全程不设车站. 东侧为早高峰进城方向,位于双会桥西,西侧为京通快速路终点,位于四惠桥东出口以西,全长8.6 km. 将京通快速2 km范围内的道路考虑在内,组成整个路网,如图7所示. 通州地区的公交通勤主要通过朝阳北路、朝阳路、京通快速路等路段上的相关公交线路完成出行.



图7 京通快速路周边路网

Fig.7 Road network within five square kilometers of Jing-Tong Expressway

本文以京通快速路施划专用道为例. 研究早高峰通勤时期,通州区至北京市区的公交客流因专用道而发生转移变化的具体范围,并通过实地调研结果验证,研究方案及结果如下.

1) 依据公交数据,进行社团结构划分. 图7路网中,共包括218个公交车站,35条线路^[21]. 划分得到35个0-换乘社团,19个1-换乘社团,1个2-换乘社团. 说明图7整个路网中任意站点间公交换乘最大为两次.

2) 获取可影响范围站点集 θ . 运行于京通快速公交专用道上的线路有626路、668路、322路等. 参考社团划分结果,得出与专用道线路具有0次或1次换乘关系的线路有615路、316路、666路等线路,

以此得到站点集 θ .

3) 计算影响值 E ,明确影响范围.京通专用道上不设车站.京通快速路入口站点即为早高峰客流抵达专用道的换乘站点,此处以影响范围集 θ 中的站点与换乘站点的线路连接为基础,计算影响值 E . 其中,京通快速路专用道换乘点分别有通州西门路口东站、通州北苑路口东站、通州北苑路口西站、八里桥站;京通快速路在早晚高峰期主要承担着通州区与北京市区间的通勤出行. 因此本文以早高峰期通州区起至国贸CBD为止的OD对作为研究对象. 计算步骤2获取的 θ 内全部站点的影响值 E ,保留 $E \neq 0$ 的站点,进一步得到专用道的具体影响站点集 θ_0 .

4) 实地调研,验证结果.以 θ_0 内的站点为中心,针对其覆盖范围内的居住小区进行实地调研. 通过问卷调查的形式,收集小区居民的线路选择信息. 调研专用道施划后,是否存在从其他线路转移到专用道线路的出行者,转移的主要因素等. 参考文献[14,22],覆盖范围选取以相应站点为圆心,半径为500 m的圆形区域,进行为期半年的调研^[16].

调研目标区域均位于专用道可影响范围内,如图8(a)所示,主要包含3个居住小区. 分别为刘庄、通典铭居和阿尔法社区. 刘庄主要包含1换乘线路,覆盖线路数最多;通典铭居主要包含0换乘站点,相距京通快速路入口最近;阿尔法社区也主要包含1换乘线路,但覆盖线路最少,便利性较低使得此区域出行者换乘到专用道线路的时间代价最大.

本次调研共获得问卷585份,有效问卷563份,有效率96.24%.转移结果如图8(b)所示. 其中,刘庄占转移总人数的39%,通典铭居占34%,阿尔法社区占27%. 其中,刘庄和阿尔法社区相距专用道入口较远,但刘庄因可利用线路多,换乘便利性相对较好,被影响程度要大于阿尔法社区,选择专用道后能够比原先朝阳路线路缩短约20 min左右. 因此刘庄的公交通勤人员转移到专用道线路上的人数比例要高于刘庄. 通典铭居为3个社区中相距专用道入口最近的区域,转移意愿强烈,被影响程度最大. 但该区域的主要乘车站点,即八里桥公交站在早高峰时期基本处于极为拥挤状态,导致部分公交出行者难以顺利乘车,因此实际转移的人数比例比刘庄要少一些;而刘庄换乘的出行人员进入专用道的乘车站点主要是位于八里桥公交站东侧的通州北苑路口西站,乘车环境相对较好. 既反映出公交专用道对出行者的吸引力,也说明了公交服务水平仍需提高的必要性. 调研中也了解到,阿尔法社区虽线路覆盖量较低,但随着公共自行车等的普及,部分通勤者也通过自行车等方式接驳到专用道线路以出行. 说

明 1-换乘站点能够利用的换乘资源越多,客流转移比例也会越大。

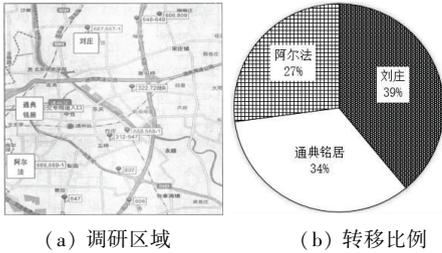


图 8 调研区域及转移比例

Fig.8 Research area and transitionratio

4 结 论

1)通过对公交换乘网络的重叠社团结构划分,能够指明任意路段施划专用道后的大致影响范围,可免于开展耗费巨大的公交出行调查。

2)算例分析表明,公交线路间的相互联系是专用道影响的基础.另一方面,通过提升专用道线路的公交服务水平,改善专用道上换乘站的客流到发条件均为加深影响程度的有效措施。

3)基于网络角度展开研究,对于当前各大城市专用道广泛应用或已逐渐连接成网的现状,也可用于多条专用道的影响研究,方法合理,实施难度不高。

参 考 文 献

- [1] 刘雪杰, 孙明正, 李民伟, 等. 京通快速路公交专用车道建设效果评估[J]. 城市交通, 2012 (3): 33
LIU Xuejie, SUN Mingzheng, LI Minwei, et al. Evaluation of exclusive bus lane on Jing-Tong Expressway [J]. Urban Transport of China, 2012 (3): 33. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5328.2012.03.006.
- [2] 张天然. 基于交通网络均衡理论的交通需求管理政策评价研究[D]. 上海: 同济大学, 2008
ZHANG Tianran. Research on travel demand management policies evaluation based on transportation network equilibrium theory [D]. Shanghai: Tongji University, 2008
- [3] KHOO H L, TEOH L E, MENG Q. A bi-objective optimization approach for exclusive bus lane selection and scheduling design [J]. Engineering Optimization, 2014, 46 (7): 987. DOI: 10.1080/0305215X.2013.812728
- [4] CHEN Q. An optimization model for the selection of bus-only lanes in a city [J]. Plos One, 2015, 10(7): e0133951. DOI: 10.1371/journal.pone.0133951
- [5] 要甲. 基于多式交通均衡的公交专用道设置分析与优化[D]. 长沙: 中南大学, 2014
YAO Jia. Busexclusive lane setting analysis and optimization based on multi-modal transportation equilibrium [D]. Changsha: Central South University, 2014
- [6] KIESLING M, RIDGWAY M. Effective bus-only lanes [J]. ITE Journal, 2006, 76(7): 24
- [7] ZHAO X M, GAO Z Y, LI K P. The capacity of two neighbor intersections considering the influence of the bus stop [J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2008, 387 (18): 4649.

- DOI: 10.1016/j.physa.2008.03.011
- [8] LI Q D, DONG L Y, DAI S Q. Investigation on traffic bottleneck induce by bus stopping with a two-lane cellular automaton model [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58 (11): 7584
- [9] WU J P, HOUNSELL N. Bus priority using pre-signals [J]. Transportation Research Part A, 1998, 32 (8): 563. DOI: 10.1016/S0965-8564(98)00008-1
- [10] CHIABAUT N, XIE X Y, LECLERCQ L. Road capacity and travel times with bus lanes and intermittent priority activation analytical investigations [J]. Transportation Research Record, 2012, 2315:182. DOI: 10.3141/2315-19
- [11] LUH P, SHI Y. Complexity of public transport networks [J]. Tsinghua Science & Technology, 2007, 12(2): 204
- [12] NOH J D, RIEGER H. Random walks on complex networks [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(11): 118701
- [13] 何大彻, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010
HE Daren, LIU Zonghua, WANG Binghong. Complexsystems and complex networks [M]. Beijing: High Education Press, 2010
- [14] 张守军. 城市 BRT 系统规划理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007
ZHANG Shoujun. Study onurban BRT system planning theory and method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. DOI:10.7666/d. y1230018
- [15] 何东晓. 复杂网络社团结构发现方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014
HE Dongxiao. Studies on methods for identifying community structure in complex networks [D]. Changchun: Jilin University, 2014
- [16] 田国亮. 快速路开辟公交专用道对小汽车通勤出行转移影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012
TIAN Guoliang. Impactanalysis of opening up bus lanes on the transfer of car-commuting travel of expressway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012
- [17] DU W B, ZHOU X L, CHEN Z, et al. Traffic dynamics on coupled spatial networks [J]. Chaos Solitons & Fractals, 2014, 68: 72. DOI: 10.1016/j.chaos.2014.07.009
- [18] PALLA G, DERENYI I, FARKAS I, et al. Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society [J]. Nature, 2005, 435(7043): 814. DOI: 10.1038/nature03607
- [19] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks [J]. Physical Review E, 2004, 69 (2): 026113. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.026113
- [20] SHEN H W, CHENG X Q, CAI K, et al. Detect overlapping and hierarchical community structure in networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2009, 388 (8): 1706. DOI: 10.1016/j.physa.2008.12.021
- [21] 北京公交网: 通州区到国贸地图[EB/OL]. [2017-09-21]. <http://beijing.gongjiao.com/search?k1=通州区&k2=国贸&type=transfer>
Beijing Public Transport: map from Tongzhou District to China World Trade Center [EB/OL]. [2017-09-21]. <http://beijing.gongjiao.com/search?k1=通州区&k2=国贸&type=transfer>
- [22] YANG X H, CHEN G, CHEN S Y, et al. Study on some bus transport networks in China with considering spatial characteristics [J]. Transportation Research Part A, 2014, 69(C): 1. DOI: 10.1016/j.tra.2014.08.004