

基于修正线路介数中心度的公交骨干线提取方法

吴娇蓉¹, 李 铭², 魏 明¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 广西壮族自治区交通规划勘察设计研究院, 广西 南宁 530022)

摘要: 以复杂网络理论为基础, 运用 ArcGIS 二次开发程序和 Ucinet 软件进行公交 GIS(地理信息系统)网络分析, 提出修正的线路介数中心度指标作为筛选公交骨干线路的新方法. 以上海市浦东新区常规公交线网为例, 将应用修正线路介数中心度筛选的公交骨干线方案与浦东新区公交骨干线实际规划方案从网络重合度、公交线路非直线系数、站间距、客流稳定性等方面进行差异性分析, 说明新方法的合理性与科学性. 结合公交骨干线网规划编制时面临的 3 种情况, 讨论了新规划方法的适应性, 提出骨干公交线网方案中约 65% 的线路可按照新方法进行提取. 新方法基于 GIS 模型进行网络数据提取, 具有实用性和通用性, 能够作为公交骨干线规划的有效量化方法.

关键词: 公交线网; 骨干线; 复杂网络; 线路介数中心度; 提取方法; ArcGIS 二次开发

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Bus Main Line Extraction Method Based on Modified Line Betweenness Centrality

WU Jiaorong¹, LI Ming², WEI Ming¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Guangxi Communications Planning Surveying and Designing Institute, Nanning 530022, China)

Abstract: Based on the theory of complex network, ArcGIS second development program and Ucinet software were employed for transit GIS network analysis, and a new planning method was proposed to filter out bus main lines with a modified line betweenness centrality index. By taking the bus network of Pudong New Area in Shanghai as an example, a comparative analysis was made between the new method and the actual planning scenario, and the feasibility and rationality of the new method were illustrated from the aspects of 4 indicators, including the coincidence degree of the network, non-linear coefficient, station spacing and passenger flow stability. According to three cases in the process of bus main

lines planning, the adaptability of the new method was discussed. Results show that about 65% of the bus main lines in planning scenario can be extracted by this new method. The new method is practical and universal because of the advanced data extraction based on GIS model of network, which can be widely-used as an efficient quantitative method in the bus main line planning.

Key words: bus network; bus main line; complex network; line betweenness centrality; extraction method; ArcGIS secondary development

上海、深圳、重庆等大城市对常规公交线网结构规划提出了分层概念, 将公交线网划分为骨干线、常规区域线、便利驳运线等. 虽然道路设计规范结合功能、等级, 分别给出快速路、主干路、次干路和支路的分类和设计标准; 然而并没有相应规范或技术标准对公交线网进行分级规划指导. 在常规公交骨干线网规划的具体实践中, 规划师以主观判断为主, 缺乏定量的操作流程. 因此, 国内各个城市之间的公交骨干线网规划多停留在概念阶段, 造成骨干线的运营服务无法与其他公交线路形成明显差异; 且各城市之间的规划方案缺乏可比性、规划方法缺乏推广性. 复杂网络理论从网络本身拓扑结构和网络物理过程的复杂性出发, 如果能够根据网络指标来分析常规公交网络本身的结构特征, 通过定量计算和逻辑分析过程, 辅助形成通用的常规公交骨干线路提取方法, 将改变目前主观判断为主的规划方法.

1 公交骨干线规划研究综述

吴娇蓉对上海市公共交通一体化新模式进行了研究, 提出常规公交线网分成骨干线网、区域线网、驳运线网 3 个层次, 以满足各种出行需求的规划理

念^[1]. 3 种级别的公交线路在运行道路、线路形状、站距、运行车辆、平均运行速度、配车调度、首末站、公交优先措施等方面应有显著差异,以体现公交服务的差异,满足不同的客运交通需求^[2]. 公交骨干线主要服务于长距离片区,组团间出行;区域线用以满足市中心、片区或相邻组团的中等距离出行;而驳运线或支线则用以填补线路空白、加密线网、与公交骨干线、区域线换乘^[3]. 根据各城市规划经验,公交骨干线定义为承担大容量客流,为客运走廊提供快速、准时、可靠的公交服务^[4]. 公交线网分级规划的具体实践中,往往借助交通规划师的经验,先确定骨干线的规模,即骨干线占公交线路总数的比例,然后结合客运走廊、轨道交通、公交枢纽合理布局,以客流为主要分析指标,以加强各个片区的联系为原则确定最终规划方案^[4]. 由此可见,现阶段缺乏在已有的常规公交网络中提取骨干线的科学方法.

公交骨干线以服务大客流、提升常规公交服务为目标^[1],可以推断在常规公交网络结构中,骨干线应具有重要的中心性地位. 然而目前国内应用复杂网络理论建立公交网络拓扑模型,分析城市常规公交网络本身的结构特征,进行公交骨干线规划的研究很少. 公交线网规划多从常规的公交客流特征分析、客流 OD(origin destination)预测入手,提出线网分层布设的规划方法^[5-6]. 本文以上海浦东新区常规公交线网为例,采用 GIS(地理信息系统)建模工具,建立浦东公交网络模型,结合复杂网络理论运用 ArcGIS 二次开发程序和 Ucinet 软件进行网络分析,在公交拓扑网络中,线路介数中心度反映的是公交线路在全网中的重要性,选取该指标作为筛选公交骨干线路的依据.

2 公交 GIS 建模与线网抽象方法

2.1 公交站点的抽象

与道路网络的抽象不同,由于公交线路上下行站点位置分布在道路两侧,因此站点的抽象不能简单地将一条线路抽象成一系列的点和连接它们的边而形成网络. 为便于研究,采用如下 3 个原则进行抽象:① 定义错向距离为两站点沿道路走向的空间距离;② 对于上下行站点位置分布在道路两侧的错向距离小于平均站间距 1/2 长度的站点,将同名站点认定为同一站,如图 1a 所示;③ 对于上下行站点位置分布在道路两侧的错向距离大于平均站间距 1/2 长度的站点,以及线路走向因不在同一条道路上发

生方向性改变的站点,将同名站点认定为分离的站,该条线路分两部分表达,如图 1b 所示.

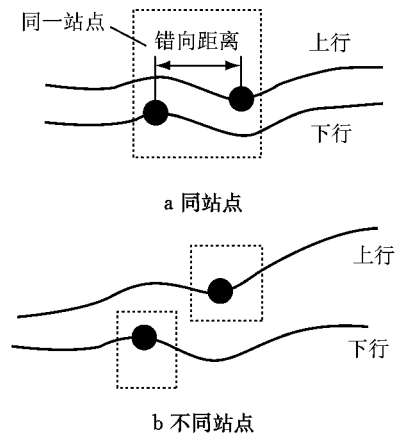


图 1 公交站点的抽象示意图

Fig. 1 Abstract sketch map of bus stations

2.2 公交线网的抽象

公交拓扑网络的构建可采用原始法^[7]或对偶法. 原始法将站点抽象为图中的顶点,将站点之间的线路抽象为图中的边,得到的图称之为原始图,常用于交通网络模型,见图 2a. 对偶法将公交线路等线状设施抽象为图中的顶点,将这些线状设施的衔接关系——站点抽象为图中的边,得到的图称之为对偶图^[8]. 该方法保留了交通网络的布局特点和线路之间的空间关系,适用于分析以运输线路为核心的网络模式或结构. 对偶法可分为两种方法:基于线段和基于线路. 本文的研究对象是公交骨干线,关心的是线路本身,站点并不是研究的重点,同时由图 2c 可以看出,基于线路的对偶法在数据存储和计算效率上大大优于基于线段的对偶法(见图 2b),因此采用基于线路的对偶法对浦东公交线网进行抽象.

本次上海浦东新区公交 GIS 线网模型包含 205 条公交线路,总长度为 3 590. 77 km,总客运量 1 454 065 人次 · d⁻¹. 基于公交 GIS 模型,应用 ArcGIS 二次开发程序获取基础数据库(如线层每个要素的长度、原始邻接矩阵、带长度的原始邻接矩阵、基于线路名称的对偶邻接矩阵等);应用 Ucinet 软件计算网络结构分析指标.

3 线路的介数中心度分析

在公交拓扑网络中,线路的介数中心度描述的是经过该条线路的最短路径数与路网中全部最短路径数的比值. 线路介数中心度越高,表明该线路在路网结构中的相对中心程度越大,该线路与网络中其

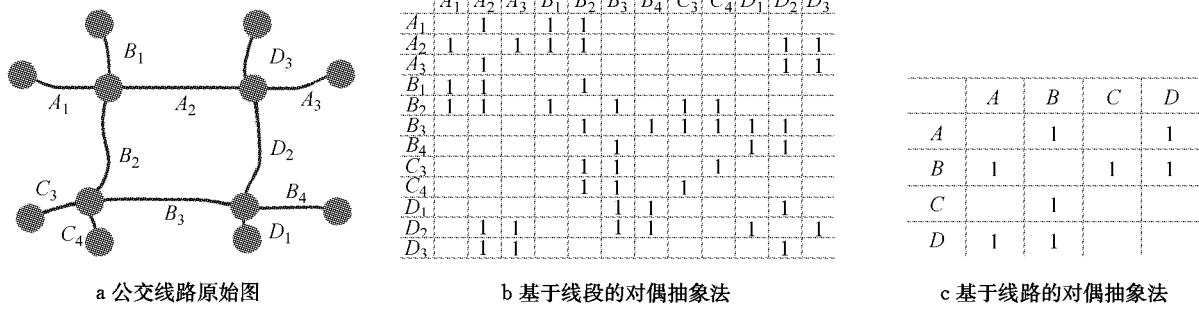


图 2 公交线路网抽象过程

Fig.2 Abstract process of transit line network

余线路的联系越紧密,可以认为该指标体现公交线路在全网中的重要性.而骨干线、区域线、驳运线 3 个层次的公交线路实质上反映了线路在整个公交线网结构中的地位,因此,可以根据线路在网络结构中的中心性确定线路的重要程度.线路的介数中心度计算式如下^[9]:

$$C_m = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{j,k \in N, j \neq k} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}, \forall i \quad (1)$$

式中: C_m 为线路 m 的介数中心度; N 为网络节点总数; n_{jk} 为节点 j 与节点 k 之间最短路径的数量; $n_{jk}(i)$ 为节点 j 和节点 k 之间包含了线路 m 的最短路径数量.

公交骨干线在公交网络中具有骨架作用,采用式(1)计算得出的线路中心性可以反映公交线路在整个线网的结构承载能力.然而,由公交骨干线路的概念界定可知,线路客流量也是关键判断指标之一,但是公式(1)无法反映乘客对公交线路的选择偏好.因此,结合已有各城市的规划经验,将线路客流量与公交线网的线路日均客流量比值引入公式(1),形成

如下线路介数中心度改进公式:

$$C_m = \frac{F_m/\bar{F}}{(N-1)(N-2)} \sum_{j,k \in N, j \neq k} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}, \forall i \quad (2)$$

式中: F_m 为线路 m 的日均客流量,人次·d⁻¹; \bar{F} 为公交线网的线路日均客流量,即线路总客流量与线路总条数的比值.

依托专家经验的公交骨干线规划方法通常采用骨干线路数占公交线路总数的 10%~15%,骨干线路客流量占总客流量 30% 以上的规划原则.本文分别采用式(1)和式(2)计算浦东新区 205 条线路的介数中心度,列出排名前 22 位的线路,如表 1 和表 2 所示.可以看出,改进式(2)较式(1)筛选出的骨干线路,有 10 条线路完全一致,见表 2 中标注 * 线路,说明改进式(2)既能考虑网络结构,又能兼顾公交乘客对线路的偏好.且改进式(2)筛选的骨干线路客流占总客流比例为 35.9%,式(1)筛选的骨干线路客流占总客流比例为 23.7%,改进式(2)更符合公交骨干线路规划原则.

表 1 线路介数中心度改进公式计算结果

Tab.1 Calculation results of line betweenness centrality improved formula

序号	线路名称	公式(1)计算结果	客流量/(人次·d ⁻¹)	线路长度/km	公式(2)计算结果	序号	线路名称	公式(1)计算结果	客流量/(人次·d ⁻¹)	线路长度/km	公式(2)计算结果
1	沪南线	0.262 09	66 835	45.050	2.469 59	16	东周线	0.257 50	19 068	29.400	0.692 23
2	申川线	0.250 61	30 970	39.000	1.094 23	17	188	0.250 00	18 784	29.460	0.662 06
3	周南线	0.257 82	29 492	44.85	1.071 99	18	方川线	0.254 64	18 196	43.355	0.653 24
4	451	0.249 09	24 125	27.255	0.847 22	19	993	0.258 79	17 880	36.915	0.652 36
5	576	0.238 15	24 814	23.455	0.833 14	20	871	0.235 70	19 361	17.415	0.643 36
6	955	0.244 08	24 134	23.735	0.830 48	21	971	0.241 78	18 345	27.105	0.625 33
7	85	0.237 88	24 273	12.600	0.814 05	22	东川专线	0.260 76	16 688	31.500	0.613 50
8	上川线	0.254 95	21 913	35.700	0.787 64	23	611	0.251 53	16 741	38.505	0.593 66
9	181	0.248 49	21 816	20.815	0.764 28	24	塘川线	0.256 86	16 132	25.200	0.584 19
10	81	0.245 53	21 816	20.815	0.755 18	25	455	0.238 15	17 146	15.245	0.575 68
11	815	0.244 37	21 816	20.815	0.751 61	26	774	0.241 50	16 664	19.215	0.567 37
12	991	0.254 32	20 916	49.150	0.749 94	27	640	0.252 45	15 939	26.330	0.567 29
13	徐川线	0.258 47	20 146	39.500	0.734 12	28	981	0.252 45	15 880	23.150	0.565 19
14	610	0.253 69	20 502	21.150	0.733 28	29	730	0.210 63	18 275	13.300	0.542 68
15	572	0.234 62	21 699	25.175	0.717 75	30	992	0.255 90	14 884	26.025	0.536 98

表2 以介数中心度指标筛选的浦东新区公交骨干线
Tab.2 Pudong New Area bus main line filtered out based on betweenness centrality index

序号	公式(2) 筛选结果	客运量/ (人次·d ⁻¹)	公式(1) 筛选结果	客运量/ (人次·d ⁻¹)
1	沪南线*	66 835	沪南线*	66 835
2	申川线	30 970	977	13 626
3	周南线*	29 492	东川专线*	16 688
4	451	24 125	993*	17 880
5	576	24 814	徐川线*	20 146
6	955	24 134	周南线*	29 492
7	85	24 273	639	12 065
8	上川线*	21 913	东周线*	19 068
9	181	21 816	施崂专线	2 473
10	81	21 816	塘川线	16 132
11	815	21 816	川芦专线	2 473
12	991*	20 916	川奉专线	2 473
13	徐川线*	20 146	992	14 884
14	610*	20 502	上川线*	21 913
15	572	21 699	方川线*	18 196
16	东周线*	19 068	991*	20 916
17	188	18 784	南新专线	2 473
18	方川线*	18 196	新川专线	2 473
19	993*	17 880	川南线	9 616
20	871	19 361	610*	20 502
21	971	18 345	632	4 411
22	东川专线*	16 688	川浦线	11 411
总计/(人次·d ⁻¹)		523 589		346 146
占总客运量比例/%		35.9		23.7

4 新公交骨干线提取方法适应性分析

4.1 与实际规划方案的差异性分析

将应用介数中心度筛选的公交骨干线方案与浦东新区十二五公交骨干线实际规划方案(见表3)进行差异性评价,从网络重合度、公交线路的非直线系数、站间距、客流稳定性等方面进行分析,讨论新方法的合理性与科学性。

4.1.1 网络重合度

为简化描述,将表2实际规划方案称为方案A;将表1应用介数中心度修正式(2)计算得到的骨干线方案称为方案B1;将表1应用介数中心度式(1)计算得到的骨干线方案称为方案B2,网络重合度以方案A为基准的比较结果如下:

除去方案A中1条有轨电车及3条规划拟新增的大站快线,方案A包含现有线路28条;方案B1和B2共包含线路34条。方案B1和B2与方案A匹配线路共14条,约占方案A线路总数的50%。其中:①有4条线路方案A与方案B1、B2均匹配,分别是沪南线、周南线、上川线、方川线;②有7条线路

方案A与方案B1匹配,分别是81路、85路、610路、申川线、955路、572路、815路;③有3条线路方案A与方案B2匹配,分别是塘川线、977路、川芦专线。

通过在ArcGIS中进行公交骨干线网长度和线网客流量宏观指标分析,方案B1线网长度664.2 km与方案A线网长度750.5 km绝对误差11.5%,方案B1线网客流量52.4万人次·d⁻¹与方案A 52.0万人次·d⁻¹绝对误差-0.7%。

4.1.2 非直线系数

骨干公交线路作为公交线网主骨架,具备直达、快捷的要求。骨干线方案B1非直线系数均值为1.46,方案A非直线系数均值为1.52,方案B1线路非直线系数略优于方案A;两方案匹配的11条线路的非直线系数均值为1.37。

4.1.3 站间距

骨干线方案B1线路平均站间距为798 m,方案A线路平均站间距为779 m,两方案匹配的11条线路的平均站间距为843 m,三者差异不大,且符合骨干线平均站间距大于区域线站间距500~600 m的要求。

4.1.4 年均客流增长率

方案B1的22条骨干线路中,有14条线路有2006年客流数据,2006—2010年年均增长率3.75%,波动范围从-7.97%~18.84%,极差26.81%,方差为0.82%;方案A的28条骨干线路中,有21条线路有2006年客流数据,2006—2010年年均增长率9.78%,波动范围从-9.01%~51.89%,极差60.9%,方差为4.48%,方案A方差是方案B1的5.46倍。两方案匹配的11条线路有9条有2006年客流数据,2006—2010年年均增长率2.76%。可以看出,方案B1筛选出的骨干线较方案A客流更稳定。

4.1.5 与枢纽联系情况

方案B1的22条骨干线路有19条途经公共交通枢纽,比例达86.4%;方案A的32条线路有22条途经公共交通枢纽,比例达70%。可见方案B1能够较好地体现枢纽与骨干线的衔接关系。

4.1.6 差异性分析总结

对方案B1、实际规划方案A、两种方法匹配的11条骨干线路各特征指标总结见表4。可以看出,从非直线系数、日客运量、客流增长率和增长率波动性、枢纽联结线路比例4个方面看,方案B1较实际规划方案A更优,两个方案匹配的11条线路各指标最佳,更符合公交骨干线路规划要求。

表3 浦东新区十二五公交骨干线实际规划方案

Tab.3 Bus main line planning scenario of Pudong New Area in the 12th Five-year Plan

序号	线路名称	线路起讫点	线路长度/km	日客运量/人次
1	779	其昌栈渡口—御青路	12.500	8 413
2	沪南	东昌路渡口站—南汇汽车站	45.050	64 679
3	790	东方路潍坊路站—金陆路海纳路站	20.850	6 896
4	791	东昌路渡口站—巨峰路站	15.200	7 622
5	961	陆家嘴站—沔北路军民路站	24.525	13 054
6	981	海阳新村站—台儿庄路长岛路站	23.150	15 368
7	周南	南码头站—南汇汽车站	44.850	28 541
8	塘川	塘桥站—川沙客运站	25.200	15 612
9	818	泰东路站—德州路西营路站	13.900	14 911
10	81	东昌路渡口站—港城路地铁站	20.815	21 112
11	85	陆家嘴地铁站—长岛路东陆路站	12.600	23 490
12	977	川沙益民大星村站—东昌路渡口站	34.000	13 186
13	978	塘口站—其昌栈渡口站	22.650	11 152
14	01	蓝村路—桃浦公路	20.140	19 093
15	610	耀华—东沟	21.150	19 841
16	82	陆家嘴地铁站—耀龙路规划站	11.650	11 654
17	隧道六线	金杨新村站—人民广场站	13.100	18 351
18	张南专线	张江地铁站—南汇科教园区站	38.000	22 287
19	730	南新小区—建国东路重庆南路	11.800	20 141
20	申崇二线	陈家镇—科技馆站	48.000	4 807
21	申川专线	川沙客运站—上海火车站南广场	39.000	29 971
22	955	上海火车站(南广场)—济阳路站	23.735	23 356
23	川芦专线	川沙站—芦潮港站	53.000	21 211
24	上川专线	重庆北路—川沙客运站	35.700	21 207
25	572	淮海西路虹桥路站—秀沿路站	25.175	20 999
26	815	耀龙路规划站—高桥镇站	34.375	11 967
27	799	陆家嘴地铁站—华高新村站	17.025	13 057
28	方川	老西门—机场镇北大门	43.355	17 609
29	张江有轨电车1路	张江—金秋路	9.200	6 837
30	规划大站快线1	临港—龙阳路站枢纽		
31	规划大站快线2	惠南镇枢纽—迪斯尼枢纽		
32	规划大站快线3	临港—川沙新镇枢纽		

表4 差异性分析总结

Tab.4 Summary of the difference analysis

方案	非直线系数	站间距/m	日客运量/ 人次	客流年均增 长率/%	客流增长率 方差/%	枢纽联结线路 比例/%
方案 B1	1.46	798	24 906	3.75	0.82	86.4
方案 A	1.52	779	18 876	9.78	4.48	70.0
两方案匹配线路	1.37	843	26 271	2.76	0.97	100

4.2 骨干线路提取方法应用条件

各大城市公交骨干线规划实践过程中,主要考虑3种情况:①自然发展形成的骨干线——在客运走廊上运行,客运量大,线路与其余线路联系紧密;②结合城市用地布局新规划的骨干线——为了支持城市重点发展区域,考虑新增客流需求配备公交系统,往往在重点发展区域开辟骨干线路联系已建成的成熟区中心或轨道站;③考虑实际线网情况的骨干线——结合区域各重要节点的联通需求,考虑线路重复系数、客流稳定性、道路等约束条件,对已

有的线路适当调整形成骨干线。

因此,在进行公交骨干线规划时,对于第1类自然形成的骨干线,从复杂网络角度考虑恰恰是线路中心度高的线路,修正线路介数中心度可以作为重要参考指标,按照方案A与方案B1比较结果,约40%骨干线可按此法提取;对于第3类骨干线,线路介数中心度可作为重要量化指标,结合线路重复系数、客流增长率、道路条件等约束指标,进行小幅调整后确定,按照方案A与方案B1比较结果,约25%骨干线可按此法提取;对于第2类骨干线,由于是新

增线路,不能凭借复杂网络法得出结果,必须依靠交通规划师的经验进行规划。

5 结论

(1) 从网络的结构特性出发来考察骨干线路与其他线路之间的连接关系,通过公交线路在网络结构中的中心性确定线路的重要程度,同时引入反应公交线路客流特征参数修正线路介数中心度计算公式。

(2) 从网络重合度、公交线路非直线系数、站间距、客流稳定性等方面,比较新方法 with 浦东新区公交骨干线实际规划方案的差异性,说明新方法的合理性,同时可以减少以往依赖规划师经验进行分析的随机性。

(3) 约 65% 的骨干公交线路方案可按照新方法进行提取,该方法能够作为公交骨干线规划的有效量化方法。

参考文献:

- [1] 吴娇蓉,王显璞.上海公共交通一体化新模式研究[J].城市交通,2004,2(3):27.
WU Jiaorong, WANG Xianpu. New integrated transit mode in Shanghai [J]. Urban Transport of China, 2004, 2(3): 27.
- [2] 王炜,杨新苗,陈学武.城市公共交通系统规划方法与管理技术[M].北京:科学出版社,2002.
- [3] 王小鸿.城市客运交通系统[M].上海:同济大学出版社,2008.
CHEN Xiaohong. Urban passenger transport system [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2008.
- [4] 同济大学交通运输工程学院,上海市浦东新区规划设计研究院.浦东新区公共交通发展规划[R].上海:同济大学交通运输工程学院,2012.
College of Transportation Engineering of Tongji University, Shanghai Pudong New Area Planning & Design Institute. Public transport development planning of Pudong New Area [R]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2012.
- [5] 吴娇蓉,郑宇,王小鸿.城市建成区轨道站公交换乘设施规划方法[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(11):1501.
WU Jiaorong, ZHENG Yu, CHEN Xiaohong. Approaches to planning of subway station transfer facility in urban areas [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(11): 1501.
- [6] 肖滨,范炳全,柯欣.城市公交线网的分层规划方法[J].城市交通,2005,3(3):19.
XIAO Bin, FAN Bingquan, KE Xin. Research on a layered method of the planning on the urban transit network [J]. Urban Transport of China, 2005, 3(3): 19.
- [7] Porta S, Crucitti P, Latora V. The network analysis of urban streets: a primal approach[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2006, 33(5): 705.
- [8] Sergio Porta, Crucitti P, Latora V. The network analysis of urban streets: a dual approach[J]. Physica A, 2006, 369(2): 853.
- [9] Freeman L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. Social Networks, 1978(1): 215.
- WANG Wei, YANG Xinmiao, CHEN Xuewu. Planning method and management technology of urban public transport system [M]. Beijing: Science Press, 2002.