

城市道路网布局结构对公交线网密度的影响

叶彭姚¹, 陈小鸿², 崔叙³

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804;

3. 西南交通大学 建筑学院, 四川 成都 610031)

摘要: 定义了描述道路网整体结构中心化程度的道路网结构集聚度指标, 用于描述路网中道路之间的衔接关系, 定义了描述道路网综合布局特性的道路网布局结构指数, 结合实例分析了路网布局结构对公交线网密度的影响因素和影响机理, 通过对实例数据的回归分析验证了公交线网密度与道路网密度和道路网结构集聚度之间的相关关系, 并指出道路网布局结构指数与公交线网密度之间具有显著的线性正相关关系。

关键词: 交通工程; 道路网布局结构; 道路网密度; 网络拓扑; 公交线网密度

中图分类号: U419.12

文献标识码: A

Impact on Density of Public Transportation Network by Urban Road Network Layout

YE Pengyao¹, CHEN Xiaohong², CUI Xu³

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Faculty of Architecture, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This study first defines two new indicators to describe the characteristics of road network structure, one is road network concentration degree, which describes the extent to which the network has a centralized structure, another is structure index of road network layout, which describes comprehensive structure properties from the aspects of road network density and network topology. Then the influencing factors and mechanism which impact on density of public transportation network by road network layout are analyzed. Finally, based on the regression analysis of field data, this study points out that the density of public transportation network is influenced by density of road network and road network concentration degree, there is a significantly positive linear correlation between density of

public transportation network and structure index of road network layout.

Key words: traffic engineering; road network layout; density of road network; network topology; density of public transportation network

城市道路网布局结构指组成道路网的各条道路的空间布局和相互衔接关系, 以及由这些地位、功能各不相同的道路根据一定的衔接规则连接而成的整体^[1]. 公交线网密度是在每平方千米城市用地面积上有公共交通线路经过的道路中心线长度, 该指标反映了居民接近公交线路的程度, 是公交规划的关键技术指标. 传统的以机动车为导向的道路网规划方法常采用低密度、低连通性的树状道路网结构, 不利于公交线网布局和慢行交通的出行. 而近年来, 新城市主义(new urbanism)、精明增长(smart growth)和环境敏感设计(context sensitive design)等城市规划设计理论都开始主张以高密度、高连通性的网状结构作为道路网布局的主要模式, 旨在有效分散机动车交通的同时鼓励慢行交通的使用并增加公交线网的覆盖率^[2]. 已有的研究虽然分析了道路网密度对公交线网密度的影响^[3-4], 但由于缺少描述道路衔接关系的评价指标, 故尚未开展道路网拓扑结构对公交线网密度的影响分析, 也就难以从道路网布局的综合结构特性上分析其对公交线网密度的影响。

因此, 本文首先建立了道路网结构集聚度和道路网布局结构指数的定义和计算方法; 然后结合实例分析了路网布局结构对公交线网密度的影响机理; 最后通过对实地数据的统计回归, 分析了道路网密度、道路网结构集聚度和道路网布局结构指数与公交线网密度之间的相关关系. 通过建立路网布局

结构指数等指标评判不同的路网结构是否有利于公交线网的布局,试图在道路网规划阶段就为公共交通优先战略提供基础设施层面的保障,为形成公共交通导向的道路网规划方法提供理论支持。

1 道路网布局结构评价方法

1.1 道路网结构集聚度的定义

在相同的道路面积率和道路网密度下,根据不同的道路衔接原则,可以形成多种不同拓扑结构特性的道路网。如图1所示,3个密度相同的道路网在道路衔接关系上具有明显的差异。图1a道路网呈相互连通的网状结构,各条道路之间的结构重要性差异较小,即整个路网的结构较分散,没有明显的中心;而图1c道路网呈逐级衔接的树状结构,少数道路成为其他道路之间联系的桥梁和枢纽,即整个路网的结构高度集聚,具有非常明显的中心;图1b道路网的结构集聚程度介于上述两者之间。

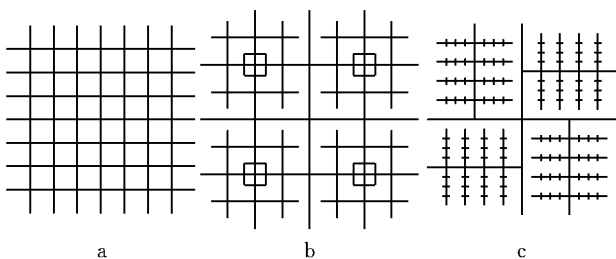


图1 不同的路网拓扑结构比较

Fig.1 The comparison among different road network topologies

为描述道路网拓扑结构存在的这种分散或集聚的特性,本文定义道路网结构集聚度指标用于评价

路网整体结构的中心化程度,即道路网在多大程度上是由少数几条主要道路连通起来的。

1.2 道路网拓扑结构的抽象方法

采用对偶法(dual approach)对城市道路网进行抽象,得到描述道路网拓扑结构的对偶图(dual graph),并以此为基础对不同道路网的结构集聚程度进行了定量比较。对偶法是指在对实际交通网络进行抽象时将道路、公交线路等交通网络中的线状设施抽象为图的顶点,将这些线状设施的衔接关系(道路交叉点、公交换乘站等)抽象为图的边^[5]。由于对偶法保留了交通网络的布局特点和线路之间的空间关系,特别适合于分析以运输线路为核心的网络模式或结构,因此近年来广泛应用于对道路网^[6-7]、公交线网^[8]、地铁网^[9]等交通运输网络结构特性的分析。

以连续的道路中心线(smoothly continuous road center-line segments),简称路线(stroke),作为对路网结构进行拓扑分析的基本单元,路线是由多条在方向上具有良好的连续性,在道路属性(如路名、宽度、类型等)上具有较好的一致性的路段组成的线性元素,不同的路线在交叉口相交^[10];并以方向连续性为原则,设计了一个基于ARCGIS软件的将道路网自动分解为路线的程序STROKE ANALYSIS1.0^[11],该程序读入SHP格式的道路中心线图,根据预先规定的夹角阈值判定相邻路段是否需要合并,将道路网分解为路线图,并输出描述这些路线衔接关系的邻接矩阵表(adjacency matrix)和各条路线的属性统计表等数据,作为计算道路网结构集聚度的基础,如图2所示。

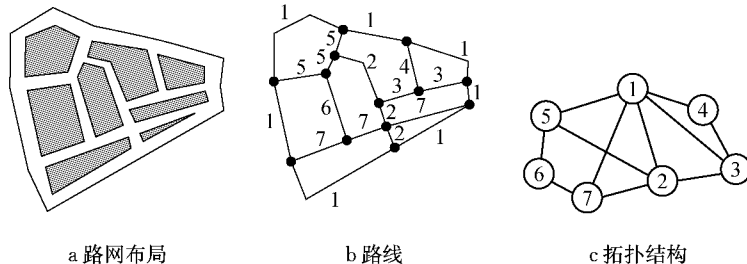


图2 连续道路中心线的路网抽象过程示意

Fig.2 The dual graph based on smoothly continuous road center-line segments

1.3 道路网结构集聚度的计算方法

在网络结构特性分析中,通常采用网络中心势指标(network centralization)描述作为一个整体的网络在多大程度上具有一个中心化的结构,即整个网络是在多大程度上围绕着某些核心节点组织起来的。进一步研究发现,在Freeman提出的点度中心势(degree

centralization)、邻近中心势(closeness centralization)和介数中心势(betweenness centralization) 3个网络中心势指标中^[12]介数中心势对前述道路网集聚程度的描述能力最强,因此选择介数中心势作为道路网结构集聚度 C_B 的计算指标

$$C_B = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{i^*,B} - C_{i,B})}{N^3 - 4N^2 + 5N - 2} \quad (1)$$

式中: $C_B \in [0, 1]$; i 为节点编号; N 为网络的节点数; $C_{i,B}$ 为节点 i 的介数中心度 (betweenness centrality); i^* 为介数中心度指标最大的节点. 介数中心度定义为 1 个节点位于网络中其他任意 2 个节点之间最短路径上的概率, 即 1 个节点在多大程度上位于网络中其他节点的“中间”, 它描述了位于中间的节点对其他节点在战略上的控制性和影响力, 其公式为


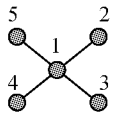
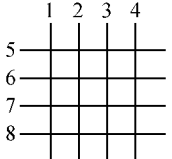
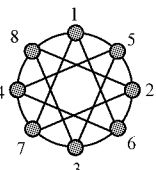
$$C_{i,B} = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{\substack{j,k \in N \\ j \neq k, j, k \neq i}} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (2)$$

式中: $C_{i,B} \in [0, 1]$, 取 1 表示图中所有节点间的最短路径都必须通过节点 i , 取 0 表示没有节点间的最短路径通过节点 i ; $n_{jk}(i)$ 是节点 j 与节点 k 之间包含了节点 i 的最短路径数量; n_{jk} 为节点 j 与节点 k 之间的最短路径数量.

如表 1 所示, 当道路网为标准的方格型道路网时 (即道路网中各条路线的结构重要性完全相同), 整个道路网的集聚度 $C_B = 0$. 当道路网为标准的树状结构时 (即道路网中某一条路线成为整个网络的结构中枢, 完全占据整个网络的重要位置), 整个道路网的集聚度 $C_B = 1$. 实际的道路网结构绝大多数是介于标准的方格型道路网和标准的树状道路网之间, 因而当道路网集聚度越小时, 其结构越接近于网状结构, 反之则越接近树状结构.

表 1 标准树状与方格道路网的结构集聚度比较

Tab.1 The comparison of concentration degree between dendritic road network and grid network

标准道路网	布局	拓扑结构	结构集聚度/%
树状			100
方格			0

1.4 道路网布局结构指数的定义

道路网密度和道路网集聚度是评价路网布局结构的主要指标. 其中道路网密度的高低反映了在道路网面积率确定后, 是采用“分散”还是“集中”的原

则在道路网中分配道路空间资源. 而道路网集聚度的高低反映了在道路总长度确定后 (即一定的路网密度下), 是采用“集中”还是“分散”的衔接原则将这些道路组织成网络. 可见, 道路网密度和道路网集聚度从 2 个不同的角度描述了路网布局结构的“集中”或“分散”特征. 为了综合描述路网布局结构在这 2 个方面的分布特性, 定义道路网布局结构指数 D , $\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$.

$$D = d(1 - C_B) \quad (3)$$

式中, d 为路网密度, $\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$. 以上海市局部路网为例, 表 2 是这 2 个指标的 4 种典型的组合情况, 其对应的路网结构指标见表 3, 表中, s 为道路网覆盖的建成区面积, km^2 ; l 为道路长度, km . 从表 3 可见, 外滩与老城厢虽然具有大致相同的道路网密度, 但由于集聚度相差较大, 因此有不同的 D 值; 而老城厢与三林虽然具有大致相同的集聚度, 但道路网密度相差较大, 因此 D 也不同. 从某种程度上说, D 反映了道路网中能通过性交通有效利用的那部分道路的网密度.

2 道路网布局结构对公交线网密度的影响机理分析

道路网布局结构对公交线网密度的影响可分为 2 个方面. 一方面, 提高道路网密度可以提高公交线网密度, 减小公交线路重复系数并增加公交线网的覆盖率, 因此保证公共交通行驶所需的道路网密度是优先发展公共交通的前提; 另一方面, 连通度高的网状结构的路网便于公交线路的分散布置, 有利于提高公交线网密度, 而等级分明、逐级衔接的树状结构的路网由于干路网的路线有更好的连续性并且相互连通, 更适宜布置公交线路, 因此易导致公交线路集中布局在干路上, 而由于支路的连续性差, 易导致布置的公交线路非直线系数过大, 因此通常只布置一些公交线路的首末段和接驳线, 其结果是造成公交线网密度过低, 同时城市主要干路上公交线路重复系数过高.

例如, 成都市区 (三环内) 的公交线路总长度为 1 367 km, 公交线路密度为 $7.1 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$. 有公交线路覆盖的道路总长度为 327 km, 公交线网密度为 $1.7 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$. 公交线网重复系数为 4.2, 公交线网覆盖率 (有公交线路经过的道路长度占全部道路长度的比例) 为 47%. 从表 4 和图 3 可见, 一方面, 公交线网在各级道路的分布情况差异很大, 在有公交线

表 2 不同道路网密度与集聚度的路网比较

Tab.2 The comparison of road network density and concentration degree among road networks

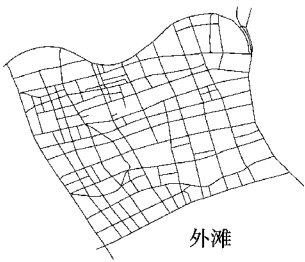



密度	低集聚度	高集聚度
高密度	 外滩	 老城厢
低密度	 陆家嘴	 三林

表 3 上海市区 4 个典型局域路网的结构指标

Tab.3 The structure index of four representative road networks in Shanghai

道路网名称	s/km^2	l/km	$d/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	$C_B/\%$	$D/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$
外滩	2.0	40.5	20.0	9	18.2
老城厢	4.0	78.5	19.6	39	11.9
陆家嘴	29.2	177.5	6.1	16	5.1
三林	57.6	236.9	4.1	37	2.6

路覆盖的约 327 km 道路中,主、次干路占了 84%,支路只占 16%;另一方面,各级道路的公交线网覆盖情况差异也很大,主、次干路的公交线网覆盖率达到 82%,支路只占到 15%.这说明一方面最大公交线网密度受道路网密度制约,另一方面在整体集聚度较高的路网中只有路线连续性和相互连通性较高的城市主、次干路较适合布置公交线路,即实际的公交线网密度同时受道路网集聚度的制约.表 4 中 l_B 为有公交线路覆盖的道路长度,km; δ_N 为公交线网密度, $\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$; η 为公交线网覆盖率,%.

表 4 成都市区公交线网在各级道路的分布

Tab.4 The distribution of bus lines among different hierarchical roads in Chengdu

道路等级	l/km	l_B/km	s/km^2	$d/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	$\delta_N/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	$\eta/\%$
主干路	209.2	199.5	192.9	1.1	1.0	95
次干路	123.5	73.9	192.9	0.6	0.4	60
支路	360.6	53.3	192.9	1.9	0.3	15
总计	693.2	326.7	192.9	3.6	1.7	47

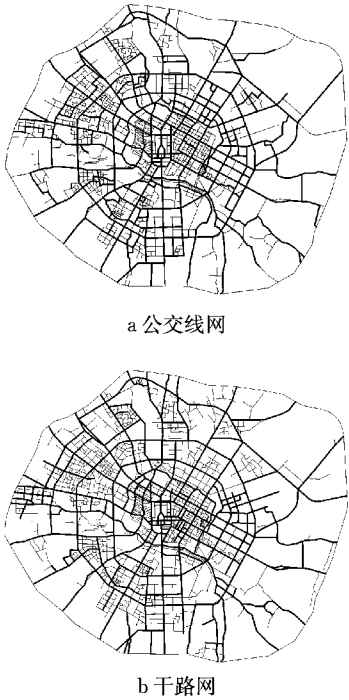


图 3 成都市区公交线网布局与干路网布局的相似性

Fig.3 The similarity of public transport network layout and arterial road network layout

3 实例验证

采用实地数据,通过对公交线路密度 δ_L , d , C_B 和 D 4 个因素与 δ_N 之间相互关系的统计回归定量分析道路网结构特性对公交线网密度的影响.

3.1 上海浦东新区(外环内)数据

将上海浦东新区(外环内)约 290 km² 的城市建设用地划分为 16 个分区,统计分析得到各个分区内的 δ_N, δ_L, d 和 C_B 值,如表 5 所示,表中 L 为公共交通线路总长度,km.

3.2 回归分析

对 δ_N 而言, δ_L 很大程度上反映了客运交通的需求,即受城市建成区的人口规模、土地开发强度等因素影响的单位面积上需要布置的公交线路总长度; d 决定了可能布置公交线路的道路长度,易知 $\delta_N \leq d$. C_B 则决定了适宜布置公交线的道路网条件. C_B 越小,道路网中各条道路的连续性和整个网络的连通性越好,适宜布置公交线的道路长度占全部道路长度的比例越大. 因此, δ_N 受 δ_L, d 和 C_B 三个因素的影响,其中 δ_N 与 δ_L 和 d 呈正相关关系,与 C_B 呈反相关关系,即

$$\delta_N = \alpha \delta_L^{\beta_1} d^{\beta_2} C_B^{\beta_3} \quad (4)$$

式中: $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为系数, α, β_1, β_2 为正数, β_3 为负数. 对式(4)取对数可得

$$\ln \delta_N = \ln \alpha + \beta_1 \ln \delta_L + \beta_2 \ln d + \beta_3 \ln C_B \quad (5)$$

令 $Y = \ln \delta_N, X_1 = \ln \delta_L, X_2 = \ln d, X_3 = \ln C_B, \beta_0 = \ln \alpha$, 有

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (6)$$

下面通过对实地数据的回归分析验证是否存在式(6)中的关系. 根据表 3 中的数据,建立多元线性回归模型

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (7)$$

式中: ε 为除自变量 X_1, X_2, X_3 以外的其他因素对随机变量 Y 的影响, ε 服从一个数学期望为零、标准方差为 σ^2 的正态分布. 采用统计分析软件 SPSS13.0 求解得决定系数 R^2 为 0.982, 说明 3 个自变量 X_1, X_2 和 X_3 共解释了随机变量 Y 98.2% 的变化, 式(7)对观测值的拟合程度很高; 回归方程检验的 F 值为 220.563, P 值为零, 说明回归方程是极高度显著的, 有统计学意义; X_1, X_2, X_3 检验结果的 P 值分别为 0, 0 和 0.003, 都小于 0.010, 可知 3 个解释变量的作用都是极高度显著的.

令 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3$ 为 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 的最小二乘估计, 由回归系数表知, $\hat{\beta}_0 = -1.060, \hat{\beta}_1 = 0.294, \hat{\beta}_2 = 0.597, \hat{\beta}_3 = -0.248$, 故所求回归方程为

$$\hat{Y} = -1.06 + 0.294X_1 + 0.597X_2 - 0.248X_3 \quad (8)$$

其中, \hat{Y} 为 Y 的点估计. 由回归系数表中的标准回归系数知, 3 个自变量对随机变量 Y 的影响从大到小依次为 X_1, X_2, X_3 . 将 $Y = \ln \delta_N, X_1 = \ln \delta_L, X_2 = \ln d, X_3 = \ln C_B, \beta_0 = \ln \alpha$ 代入式(8), 得

$$\delta_N = 0.346 \frac{\delta_L^{0.294} d^{0.597}}{C_B^{0.248}} \quad (9)$$

式(9)表明, 城市道路网作为公交线网布局的基础设施条件, 其布局结构对公交线网密度有明显的影响. 路网密度越大, 可能的公交线网密度也越大. 路网集聚度越小, 路网中适宜布局公交线路的道路所占的比例也越大.

表 5 上海浦东新区各分区的路网与公交网络特性指标

Tab.5 The index of road networks and public transportation networks in Pudong New District of Shanghai

分区编号	s/km	l_B/km	L/km	l/km	$\delta_N/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	$\delta_L/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	$d/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	$C_B/\%$
1	8.1	43.4	464.0	60.9	5.4	57.2	7.5	21.2
2	7.4	29.5	255.9	42.8	4.0	34.6	5.8	22.2
3	8.0	32.4	314.1	37.8	4.0	39.0	4.7	13.8
4	17.7	44.0	235.6	70.9	2.5	13.3	4.0	17.5
5	17.5	30.0	111.8	67.8	1.7	6.4	3.9	39.7
6	54.9	67.4	208.9	186.9	1.2	3.8	3.4	45.4
7	4.6	20.2	272.7	24.8	4.4	59.3	5.4	27.7
8	11.5	46.5	248.6	61.0	4.0	21.6	5.3	19.3
9	11.4	18.3	120.9	32.8	1.6	10.7	2.9	26.9
10	19.5	35.2	145.2	72.4	1.8	7.4	3.7	31.8
11	15.1	48.3	432.3	70.4	3.2	28.7	4.7	36.0
12	14.6	37.0	264.9	61.6	2.5	18.2	4.2	35.1
13	24.2	47.6	199.5	98.4	2.0	8.2	4.1	29.2
14	25.0	46.1	203.2	79.4	1.8	8.1	3.2	24.5
15	24.5	34.0	184.1	66.9	1.4	7.5	2.7	42.4
16	26.1	33.2	104.9	56.1	1.3	4.0	2.1	26.8

3.3 道路网布局结构指数对公交线网密度的影响

根据表5中的数据可分析 D 对 δ_N 的影响.从图4可知, δ_N 与 D 之间具有显著的线性正相关关系.这说明虽然从交通需求的角度看一个地区的人口规模、用地类型、开发强度等用地布局因素决定了期望布置的公交线网密度,但实际可能布置的公交线网密度很大程度上受道路网布局结构的影响.因此在面向公共交通优先的道路网规划过程中应设法提高道路网布局结构指数的取值.

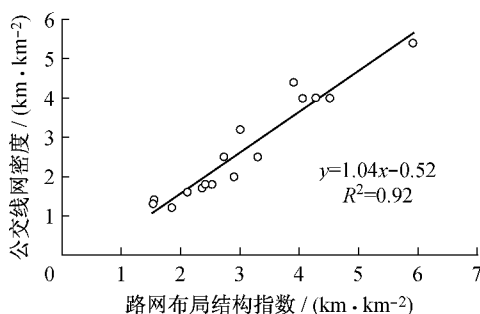


图4 道路网布局结构指数与公交线网密度之间的关系

Fig.4 The relationship between structure index of road networks and density of public transportation networks

4 结语

(1)道路网密度仅能描述道路面积资源在空间上分布的疏密程度,难以描述路网中道路的衔接关系.因此,定义了道路网结构集聚度指标用于评价道路网整体结构的中心化程度,并建立了该指标的计算方法.

(2)城市道路网作为公交线网布局的基础设施条件,其布局结构对公交线网密度有明显的影响.通过机理分析指出,道路网密度越大,可能的公交线网密度也越大;道路网结构集聚度越小,路网中适宜布局公交线路的道路所占的比例也越大,因而可能的公交线网密度也越大.并通过对实例的统计分析验证了道路网密度和道路网结构集聚度对公交线网密度的影响.

(3)为了综合描述道路网在空间资源分布和道路衔接关系上的“集中”或“分散”特征,提出了道路网布局结构指数的定义和计算方法,并通过统计分

析指出公交线网密度与道路网布局结构指数之间具有显著的线性正相关关系.

(4)受实例数据的限制,仅以上海浦东新区的数据初步验证了道路网布局结构对公交线网密度的影响.进一步的研究将获取国内多个城市的道路网和公交线网的统计数据,通过对足够容量样本的统计分析得出道路网结构特性对公交线网密度的影响程度.

参考文献:

- [1] Stephen Marshall. Streets and patterns; the structure of urban geometry[M]. London: Spon Press, 2005.
- [2] ITE Smart Growth Task Force. Smart growth transportation guidelines: an ITE proposed recommended practice [M]. Washington D C: Institute of Transportation Engineers, 2003.
- [3] 杨佩昆. 重议城市干道网密度——对修改《城市道路规划设计规范》的建议[J]. 城市交通, 2003, 1(1): 52.
YANG Peikun. Discussion on density of urban arterial street network[J]. Urban Transport of China, 2003, 1(1): 52.
- [4] 王召森. 规划道路网密度指标调整之思考[J]. 城市交通, 2004, 2(2): 46.
WANG Zhaosen. Consideration on density of urban road network[J]. Urban Transport of China, 2004, 2(2): 46.
- [5] Sergio Porta, Paolo Crucitti, Vito Latora. The network analysis of urban streets: a dual approach[J]. Physica A, 2006, 369 (2): 853.
- [6] Rosvall M, Trusina A, Minnhagen P. Networks and cities: an information perspective[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(2): 1.
- [7] Penn A, Hillier B, Banister D. Configurational modeling of urban movement networks[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1998, 25: 59.
- [8] Sienkiewicz J, Holyst J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. Phys Rev E, 2005, 72 (4): 46.
- [9] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small world network[J]. Physica A, 2002, 314: 109.
- [10] Thomson R C, Richardson D E. The ‘good continuation’ principle of perceptual organization applied to the generalization of road networks [C] // Proc 19th Int Cartographic Conf. Ottawa: [s. n]. 1999: 1215 – 1223.
- [11] 叶彭姚. 城市道路网结构特性研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2008.
YE Pengyao. Research on structure characteristics of urban road and street network [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2008.
- [12] Linton C Freeman. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. Social Networks, 1978, 1(3): 215.