

轨道站出入口客流分布系数估计方法

傅搏峰^{1,2}, 吴娇蓉¹, 华陈睿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. 上海市路政局, 上海 201824)

摘要: 将轨道车站出入口客流分布系数的预测问题转化为对站点周边路网中行人活动分布比例关系的研究, 采用空间句法轴线图模型的道路 R_3 集成度建立预测轨道站出入口客流分布系数的方法。为了避免其他因素对轴线模型估算轨道车站出入口客流分布系数产生影响, 选取上海 8 个郊区轨道车站 24 个出入口进行方法有效性验证分析, 同时评价该方法的精度性和局限性。

关键词: 轨道站出入口; 客流分布系数; 空间句法; 轴线模型; R_3 集成度

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

Estimation Method of Distribution Coefficient of Passenger Flow of Subway Station Entrance

FU Bofeng^{1,2}, WU Jiaorong¹, HUA Chenrui¹

(1. Key Laboratory of Road and Transportation Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Municipal Roadway Administration Bureau, Shanghai 201824, China)

Abstract: This paper aims to find out the pedestrian movement distributing ratios around railway station street network based on the relationship between integration- R_3 of space syntax axial model and pedestrian movement. In order to avoid the influence of other factors on the estimated result, 8 suburban subway stations in Shanghai rail transit system of China are chosen for case studies. And their 24 entrances's distribution coefficients of passenger flow are calculated with this new proposed method. Based on the investigation of pedestrian traffic, the validity, the availability and limitation of the new estimated method are analyzed.

Key words: subway station entrance; distribution coefficient of passenger flow; space syntax; axial model; integration- R_3

单条轨道线路和站点工程设计时, 在站址、车站规模和客流总量一定的前提下, 都需要准确预测车站高峰小时各出入口的客流量, 以便确定出入口规模、进出站设施(如检票闸机)、与出入口衔接的通道类设施(包括楼梯、自动扶梯、水平通道等)的布局、数量、规模; 确定站外配套的机动车、非机动车停车设施以及公交站点等换乘设施的布局、规模。轨道车站周边的土地使用性质及其开发强度是影响乘客乘降量、不同方向的集散量以及到站方式等的主要因素^[1-2], 高密度的混合用地会吸引更多的轨道客流。部分研究认为, 车站周边区域的路网结构形态、换乘便捷性等交通条件对客流的影响也不容忽视^[3]。中国《地铁设计规范》指出, 轨道站点设计时首先应确定轨道站出入口数量, 依赖主观经验给出某个出入口分布系数, 然后确定轨道站出入口宽度 B_n ^[4]。

已有的研究对影响轨道站出入口客流集散量的土地利用、开发强度、到站交通方式、轨道车站区位、轨道车站周边路网结构均进行了分析, 但是这些研究没有进一步给出轨道站各出入口客流分布相对不均衡的预测方法。本文以上海轨道车站为研究对象, 以空间句法轴线图模型为基础, 分析行人活动在轨道车站周边路网中的空间分布规律, 将路网结构形态从众多影响车站客流分布的因素中剥离出来, 建立预测轨道站各出入口客流量的方法, 并与轨道车站各出入口客流量实际调查值进行对比分析, 为轨道车站出入口客流预测提供一种新思路。

1 轨道站出入口客流分布的空间句法理论基础

空间句法理论在轨道交通的研究主要集中在采用轴线图模型(axial model)分析轨道线网的结构分析与设计^[5-6]。采用凸面空间分析法(convex

space)研究轨道交通终点站周边区域更新战略^[7]、地下轨道车站的空间设计^[8]、以轨道站点为核心的建筑交通综合体运行绩效评估^[9]、轨道站内火灾疏散安全区域界定^[10]等. 本文将采用轴线图模型研究轨道站出入口客流分布分布系数.

1.1 轴线图模型分析轨道站出入口客流分布的基础

轨道车站的上下客流主要通过站点周边的路网来集散,路网中的行人会选择距离所在空间位置最便捷的出入口进入轨道车站,轨道车站内的乘客也会在站内指示标识的引导下,选择离自己目的地最便捷的出入口离开轨道车站,然后由周边路网疏散. 可认为站点周边各条道路集散客流量的大小与道路空间中行人活动量的大小变化趋势一致,行人活动量愈大,相应集散的轨道客流量也越大. 在这一前提下,车站出入口客流不均衡性的预测问题转化为对站点周边路网中行人活动分布比例关系的研究——如果能够得到路网中行人活动分布比例关系,即可用于估算车站出入口客流量的大小.

空间句法轴线图模型在分析路网结构形态、把握路网空间中行人活动分布模式方面优势显著. 轴线图模型计算出的一系列句法变量中,道路 R_3 集成度主要描述某条道路到路网中与其相差 3 步拓扑距离的道路的便捷程度,可以表征路网中的行人活动量,反映行人在研究区域路网中的整体分布模式,分析各道路空间中行人活动量分布的相对比例关系,而不是道路空间中行人交通量的绝对值. 本研究是对轨道站点出入口的分向客流进行估计,关注的是站点周边路网中行人的活动,因此对车站周边区域路网的空間结构进行分析,研究每个出入口对应道路的形态指标变量 R_3 集成度变化关系,理论上可以推算站点出入口分担客流的相对比例.

1.2 空间句法轴线图模型

基于拓扑计算法则,空间句法发展了连接度、控制度、深度、集成度等一系列句法变量,定量描述空间组构. Hillier 和 Iida 阐述了如何使用空间句法相关量度进行城市空间结构的分析^[11]. 将城市道路网的轴线图,转化为轴线连接图,利用轴线图模型,即可计算轴线图中各段道路句法变量值.

轴线图并不是城市路网的直接再现,而是在行人可视性基础上对路网的抽象,它强调区域路网的整体结构模式,也是基于行人视觉的空间记述. 为了使不同研究者绘制的轴线图彼此同性,需要遵循以下绘制原则:

- (1) 描述道路片段的直线要尽可能地长.
- (2) 用尽可能少的直线来描述整个路网.
- (3) 一般来说,轴线的绘制从区域中最长的直线道路片段开始,以最短的直线道路片段结束.
- (4) 轴线不因路段是否单双行而改变,不按道路的交叉口进行轴线的分段,忽略由此造成的路网形态的变化. 两条轴线是否相交取决于两条道路片段是否直接相交或相连.

轴线图述转化为轴线连接图(或关系图解),得到轴线图模型的规则是:用节点表示原轴线图的轴线,连接节点的直线表示原轴线图中两条轴线直接相交或者相连的相关关系. 如图 1c 为图 1a 所示区域路网的轴线图,图中的直线段是对道路路段的简化抽象,数字是道路路段的编号. 图 1d 是图 1c 所示轴线图转化而成的轴线连接图. 图 1d 带圈数字表示原图中对应的道路路段,带圈数字之间的连接表示两道路路段之间直接相连的相关关系. 例如图 1c 中编号为 2 的道路路段与编号为 11 的道路路段是相交的,在图 1d 中,2 号圈和 11 号圈之间即有一条连接线. 因此,轴线连接图描述的是道路网络的拓扑可达性,而不是基于物理距离的可达性研究. 这种做法的好处是把路网的结构形态关系放到了研究的焦点.

根据转化形成的轴线连接图,句法变量指标中集成度是理解城市路网中人车流活动的关键性指标,即道路在整体城市路网结构中的布局位置将会影响道路上的人车流量. Hillier 在伦敦 5 个不同的片区分别选择了 100 条路段对行人流量进行观测,得出道路的 R_3 集成度与步行交通量的相关值大约是 0.6^[12]. 换句话说,如果没有特别的吸引目标,且剔除了各种干扰因素如路况等的干扰后,空间组构与空间中的活动有着明显的对应关系—— R_3 集成度较高的路段,往往具有较多的人流,类似的研究结果也在其他许多城市的广泛应用中得到证实^[13].

R_3 集成度计算公式如下:

$$R_3 = \frac{D_n(n-2)}{2(M-1)}$$

(1)

$$M = \frac{\sum_{j=1}^k d_{ij}}{k-1}$$

(2)

$$D_n = 2\{n(\log_2((n+2)/3-1)+1)\} / [(n-1)(n-2)]$$

(3)

式(1)~(3)中: M 为路网的平均深度; k 为在 3 步拓扑距离范围内与节点 i 直接联系的节点个数; d_{ij} 为从道路 i 到道路 j 的深度; D_n 为标准化参数; n 为连

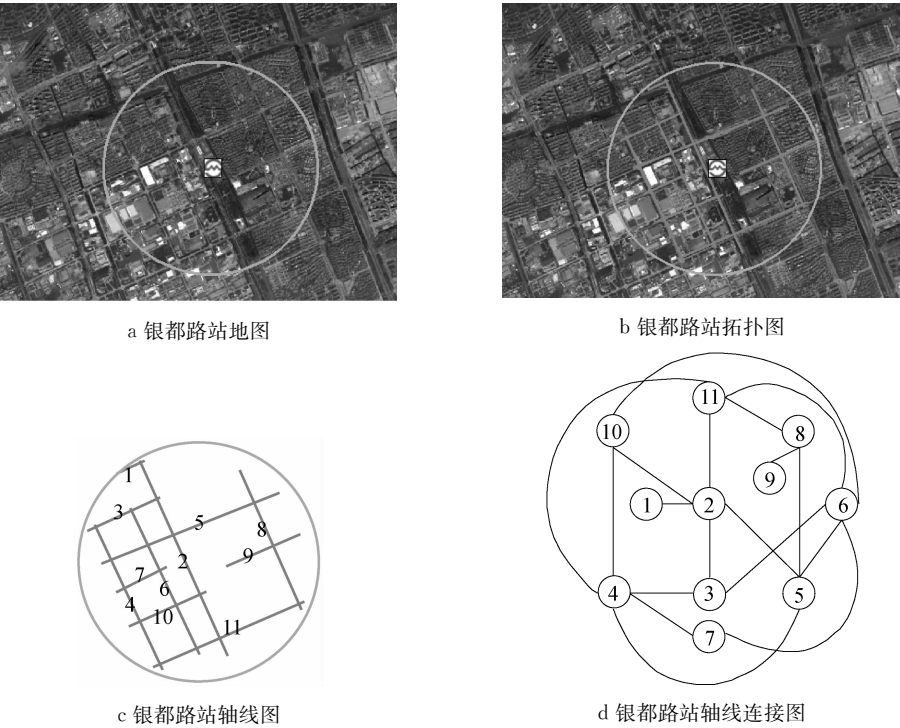


图 1 银都路站周边路网转化为轴线连接图的过程

Fig.1 Axial connection diagram transformation process of network surrounding Yindu Rd Station

接图中所有节点的个数.

2 基于周边路网结构形态的轨道站出入口客流估计方法

2.1 轨道站出入口轴线图模型涵盖区域的界定方法

构建轨道站出入口周边路网空间句法的轴线图模型时,靠近轨道站客流产生区边界的轴线计算得出的空间形态变量指标可能会因“边界效应”而产生偏差,不能反映真实的空间属性,导致区域内行人活动模式理解的错误.因此适当扩展客流产生区范围,可以外移空间分析中“边界效应”,保证重点研究的客流产生区有关结果的准确性.通常以研究对象区域的外边界为起点,向外延展约 30 min 步行距离(若步行速度为 $60\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,即为 $1\,800\text{ m}$)即可满足要求.

轨道车站的客流产生区,是轨道站点投入运营后吸引客流所涉及的区域,也称轨道站点的影响区域.研究视角和目标的差异,使得研究者会选择不同的标准对轨道车站客流产生区的范围进行界定,目前常见的主要有步行半径、功能-文脉因素、地形标志和开发边界等四种^[13].客流产生区内的路网结构与行人活动的空间分布关系是本研究的切入点,故

选择步行半径作为界定客流产生区范围的标准.

车站区位、用地性质、交通配套等情况不同,轨道站点客流产生区的步行半径将存在差异.既有研究中建议城市建成区站点以 500 m 或步行 10 min 的距离作为适宜半径^[14].位于郊区的轨道站点,由于交通设施分布密度远低于城市中心城区,出行人员对于步行距离的可接受程度会大于城区.郊区站点客流产生区步行半径可运用轨道站点步行接驳客流聚集效应距离衰减函数曲线^[14]予以确定,结合上海现有 10 个郊区轨道站点的实地调查数据,计算得出各站点步行接驳距离-频率累积曲线中第 80% 位步行接驳距离为 $752\sim1\,072\text{ m}$ ^[2].

综上,轨道站出入口空间句法轴线图模型涵盖区域的界定步骤为:以轨道车站为中心,城市建成区以 2.3 km 为半径、郊区以 2.8 km 为半径画圆;沿该圆形外边缘选择空间隔断性比较明显的物质设施,如河流、高速道路等为区域边界,选择的边界尽可能向外凸出,接近圆形或方形的形态;边界所围区域即为轴线图模型的构建区域,如图 2 所示.

2.2 R_3 集成度分布图与轨道出入口分布系数估计方法

借助空间句法分析软件 Confeego 形成轨道站点轴线图模型中 R_3 集成度分布见图 3,图中轴线颜色从黑到淡灰的变化表示集成度从大到小.轴线为

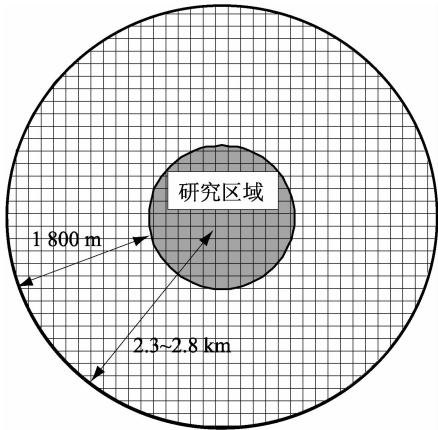


图 2 轴线图分析范围的选择
Fig.2 Study area of axial map

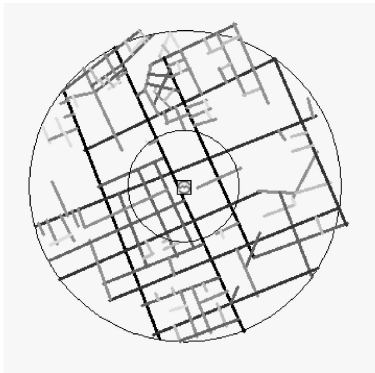


图 3 银都路站周边 2 800 m 区域道路 R_3 集成度分布图
Fig.3 Road integration R_3 distribution of Yindu Rd Station around 2 800 m area

黑,表示该路段行人的活动量最大,相应集散的轨道客流量也最大;轴线颜色越淡,表示集散的客流量越小.假设站点周边各条道路集散客流量的大小与道路空间中行人活动量大小变化趋势一致,在这一假设条件下, R_3 集成度指标即可表征各条道路集散的轨道客流量大小.比较轨道客流生成区内各方向道路的句法变量平均值,即可得到对应出入口分担客流的大致比例关系.

具体客流估计方法如下:

第一步,按照车站出入口布置方案,对车站客流生成区进行子区域细分.

子区域细分标准为子区域内任一点到对应出入口的距离,相对于车站其他出入口子区域是最近的.

客流生成区子区域细分时,首先以轨道线为中心轴,将整个客流产生区均分为两个子区域,假设为子区域 a 和 b;然后根据这两个子区域各自对应的出入口数,均分为若干子区域,比如说子区域 a 对应应有 2 个出入口,则 a 要继续细分为 a1 和 a2.因此,若车站出入数量为 k ,则最终划分形成的子区域数量也为

k .图 4 为轨道车站客流产生子区域细分示意图,车站设有 4 个出入口,圆形区域为车站的客流产生区,虚线为虚拟的区域分界线.客流产生区被细分为 4 个子区域,①号口对应区域Ⅰ,②号口对应区域Ⅱ,依此类推.

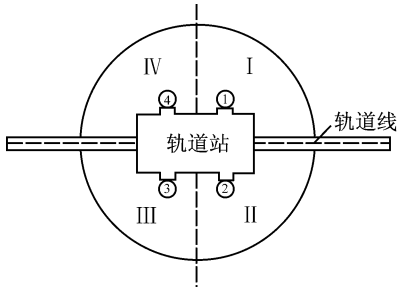


图 4 轨道车站客流产生子区域细分示意图
Fig.4 Passenger flow generation subareas of a subway station

第二步,计算各出入口客流分布系数.定义 C_j 为各出入口客流分布系数,则

$$C_j = \frac{I_{R_3j}}{\sum_{j=1}^k I_{R_3j}} \tag{4}$$

$$I_{R_3j} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{R_3i}}{n} \tag{5}$$

式(4)~(5)中: I_{R_3j} 为站点客流产生区内, j 号出入口方向对应子区域路网的 R_3 集成度(局部集成度)平均值; k 为车站出入口个数; I_{R_3i} 为站点客流产生区内各出入口对应子区域中每条道路片段(或者说每条轴线)的 R_3 集成度(局部集成度); i 为路段编号; n 为路段数.

需要注意,计算 I_{R_3j} 时,原则上第 j 号出入口对应的子区域内所有道路路段(或者说轴线)都要包含在内.

3 案例分析

为了尽可能避免其他因素对轴线模型估算轨道车站出入口客流分布系数产生影响,本文选择上海已建成运营的 8 个郊区轨道站点 24 个出入口,对其客流分布系数进行估计,并将估计值与调查所得的实际客流分布系数(表 1)进行对比分析.由表 1 可知,42%的出入口客流分布系数估算误差小于 20%;25%的出入口客流分布系数估算误差小于 30%;1/3 出入口客流分布系数估算误差较大,超过了 40%.七宝站和佘山站由于公交站点集中在个别出入口,造

表 1 8 个郊区轨道站出入口客流分布系数

Tab.1 Passenger flow distribution coefficient of 8 subway stations' entrances

轨道车站	取值	分布系数						
		1 号口	2 号口	3 号口	4 号口	5 号口	6 号口	7 号口
桃浦新村站	实际调查值	0.427	0.273		0.301			
	模型估计值	0.224	0.203		0.573			
	误差/%	47.5	25.6		−90.4			
莘庄站	实际调查值	0.279	0.317	0.405				
	模型估计值	0.213	0.339	0.448				
	误差/%	23.7	−6.9	−10.6				
银都路站	实际调查值	0.300	0.700					
	模型估计值	0.427	0.573					
	误差/%	−42.3	18.1					
闵行开发区站	实际调查值	0.631	0.369					
	模型估计值	0.521	0.479					
	误差/%	17.4	−29.8					
七宝站	实际调查值	0.128	0.137		0.146	0.589		
	模型估计值	0.268	0.302		0.278	0.152		
	误差/%	−109.4	−120.4		−90.4	74.2		
中春路站	实际调查值		0.314	0.271			0.183	0.232
	模型估计值		0.262	0.306			0.230	0.202
	误差/%		16.6	−12.9			−25.7	12.9
佘山站	实际调查值	0.066	0.934					
	模型估计值	0.296	0.704					
	误差/%	−348.5	24.6					
松江新城站	实际调查值	0.295	0.145	0.328	0.232			
	模型估计值	0.236	0.184	0.327	0.254			
	误差/%	20.0	−26.9	0.3	−9.5			

成模型估计偏差较大,如果扣除这两个站点,模型估计的平均误差为 18%。

4 轴线模型估计方法的优势与局限性

4.1 空间句法轴线图模型的适应性分析

采用轴线图模型对轨道站点出入口客流估计时,只要具备车站所在区域的地图和空间句法分析软件,便能有效估算轨道车站的各出入口客流分布系数,合理地确定轨道车站出入口规模、布置进出站设施等. 空间句法轴线图模型在客流估算过程中仅需考虑研究区域的拓扑特性,不涉及环境或者道路的几何特性、土地利用、开发密度等因素,无需考虑行人的出行目的以及出行的起点信息,避免了上述信息采集的困难,而这些信息在传统的行人交通量的预测方法中,都是必要的输入. 因此,空间句法轴线图模型输入和分析计算过程相对简单和快捷,在轨道车站规划设计初始阶段,适应性强.

4.2 轨道站出入口客流分布系数估计精度分析

相对于传统的采用土地利用、人口分布、到站交通方式等进行轨道站客流交通预测方法,空间句法轴线模型在建模能力和预测准确度方面尚需要进一

步做适应性验证分析. 本文案例分析只是采用了郊区 8 个单线轨道站 24 个出入口客流分布系数进行验证,平均精度误差 18%. 通常在轨道交通线路规划方案研究或城市轨道交通网络规划研究阶段进行客流预测时,轨道站点出入口分布系数的误差保持在 18%左右是可接受的. 然而进入轨道交通线路工程可行性研究阶段后,需要进一步减小站点出入口分布系数误差,本文提出模型的适用性待继续做深入研究.

4.3 空间句法轴线图模型的局限性

尽管空间句法轴线图模型在分析路网形态和行人活动分布模式方面展现出了强大的适应力,但空间句法并不是为了解决交通问题而萌生的,对行人活动的模拟目的在于探析城市空间形态与城市社会功能之间的互动规律,它仅仅只是不同研究目的下产生的副产品. 城市路网的空间组构和人的流动之间是相互关联的,这是空间句法用于轨道站出入口客流估算的基本前提. 但这一基本前提是依赖大量实证数据与空间形态指标的相关性分析. 统计意义上的相关是否就能证明空间结构的相关,质疑之声尚存^[16]. 另一方面,根据路网拓扑简化原则,表征道路的轴线无论长短都被转化为量纲一的节点,而连

接节点的线段则既没有方向也不计权重;同时,将路网的拓扑结构关系置于分析的主导地位,抛弃了道路网络所包含的几何要素(如道路的宽度、长度等)。因此,这一分析方法应和传统交通分析方法结合,才能简化预测过程,提高分析准确性。

5 结语

建立了轨道车站周边区域路网的空间句法轴线模型,分析了路网结构对轨道车站各出入口到发客流方向不均衡性的影响,提出了车站各出入口客流不均衡性的估算方法。为了尽可能避免其他因素对轴线模型估算轨道车站出入口客流分布系数产生影响,选择 8 个上海市郊区轨道交通站点 24 个出入口,对采用轴线模型建立的轨道车站出入口客流分布系数估算方法进行了验证分析。由于选择的轨道站点数量有限,且分布在郊区,无法深入分析论文提出的轨道车站出入口客流量估算方法的适用条件。

参考文献:

[1] 吴娇蓉,郑宇,陈小鸿.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. In urban areas the subway station transfer facility planning method study [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(11): 1501.

[2] 吴娇蓉,毕艳祥,傅博峰.基于郊区轨道交通站点分类的客流特征和换乘系统优先级分析[J].城市轨道交通研究,2007,10(11):23.
WU Jiaorong, BI Yanxiang, FU Bofeng. Characteristics of passenger different suburban railway stations and the priority of transfer system[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(11): 23.

[3] Southworth M, P M Owens. The evolving metropolis studies of community, neighborhood, and street form at the urban edge [J]. Journal of the American Planning Association, 1993, 59(2):271.

[4] 中华人民共和国建设部. GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
Ministry of Construction of P R China. GB 50157—2003 Metro design specifications [M]. Beijing: China Planning Press, 2003.

[5] Christian Schwander. Network analysis applied the railway network in South East England[C]//Proceedings of the 6th

International Space Syntax Symposium, Istanbul: [s. n.], 2007:76-83.

[6] Alper ünlü, Erincik Edgü. Comparative space syntax analysis of design strategies for istanbul underground railway system [C]//Proceedings of the 6th International Space Syntax Symposium, Istanbul:[s. n.], 2007:74-85.

[7] Penn A, Vaughan L. Pedestrian movement and spatial design, passenger terminal annual[M]. London: U K and International Press,1995.

[8] 杨滔:空间句法与理性的包容性规划[J].北京规划建设,2008(3):49.
YANG Tao. Space syntax and rational inclusive planning[J]. Journal of Beijing Planning Review,2008(3):49.

[9] Penn A, Hillier B, Banister D, et al. Configurational modelling of urban movement networks[J]. Environment and Planning B: Planning and Design,1998,25(1):59.

[10] 吴娇蓉,胡山川,冯建栋.轨道站火灾疏散安全区域界定研究[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(3):386.
WU Jiaorong, HU Shanchuan, FENG Jiandong. Study on safe area in railway station under fire [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 35(3): 386.

[11] Bill Hillier, Shinichi Iida. Network effects and psychological effects: a theory of urban movement[C]//Proceedings of the 5th International Space Syntax Symposium, Delft: [s. n.], 2005:42.

[12] Bill Hillier, Alan Penn, J Hansan, et al. Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1993, 20:29.

[13] 朱庆,王静文.城市空间结构优化设计的研究:基于空间句法之空间设计方法探讨[C]//第五届中国城市住宅研讨会.北京:中国建筑工业出版社:2005:287-292.
ZHU Qing, WANG Jingwen. Urban spatial optimization design: method of space design based on space syntax [C]//The 5th China Urban Housing Conference. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005: 287-292.

[14] 惠英.城市轨道交通站点地区规划与建设研究[D].上海:同济大学交通运输工程学院,2001.
HUI Ying. Study on the site planning and construction of urban subway[D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2001.

[15] 潘海啸,任春洋,杨眺晕.上海轨道交通对站点地区土地使用影响的实证研究[J].城市规划学刊,2007,70(4):92.
PAN Haixiao, REN Chunyang, YANG Zhaoyun. A study on the impact on the land use of station area brought by urban rail transport in Shanghai [J]. Urban Planning Forum, 2007, 70(4): 92.

[16] Carlo Ratti. Space syntax: some inconsistencies [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2004, 31(4):487.