

文章编号:1671-8879(2014)06-0152-05

# 基于改进 MNL 模型的地铁换乘区路径选择

严 海<sup>1</sup>, 李 涛<sup>1</sup>, 白鸿宇<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 交通工程北京市重点实验室, 北京 100124;

2. 航天科工智慧产业发展有限公司, 北京 100039)

**摘 要:**以行人路径的完整过程为研究基础,分析组成路径的不同设施对行人路径选择以及路径效用的影响,同时对同种类型设施在不同路径中的效用值做了深入的调查分析,并根据效用最大化理论,建立了改进的 Multinomial Nested Logit(MNL)模型和路径效用函数。通过对轨道换乘车站行人路径选择的跟随问询调查,研究影响行人在轨道车站换乘区域内路径选择的因素。根据效用最大化理论,建立了改进的 Multinomial Nested Logit(MNL)模型和路径效用函数。以北京市地铁国贸站换乘调查数据为基础,标定了模型参数。模型分析表明:行人在轨道车站换乘区域的路径选择与出行目的及各交通换乘设施的走行时间有关;同时,路径重复系数对路径效用的影响较大,进而影响路径选择行为,佐证了行人对拥挤路径的规避行为;得到的模型具有很高的精度,为评价和提高轨道换乘车站设施服务效率提供理论依据。

**关键词:**交通工程;轨道交通;换乘区域;行人路径选择;改进 MNL 模型;路径效用函数

**中图分类号:**U491 **文献标志码:**A

## Pedestrian route choice in transfer area of subway station based on improved MNL model

YAN Hai<sup>1</sup>, LI Tao<sup>1</sup>, BAI Hong-yu<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. China Aerospace Science Industry Corp. Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on pedestrian path tracing, this paper analyzed the influence of different facilities on pedestrian route choice path selection and route utility in the Transfer area of subway station, and the utility value of the same type facility in different routes. Through the investigation of pedestrian route choice, it studied the factors of pedestrian route choice in the Transfer area of subway station. According to maximum utility theory, the improved multinomial nested logit (MNL) model and route utility function were established, and the parameters of this model were determined. The model analysis shows that pedestrian route the choice is related to trip purposes and travel time on the facilities, and path overlap factor has big effect on route utility. The conclusion provides proofs with the circumvention of the crowded path. The model established has high accuracy, and could provide theoretical basis with the evaluation of subway station service in the Transfer area of subway station. 4 tabs, 20 refs.

收稿日期:2014-07-06

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(50308018)

作者简介:严 海(1977-),女,上海人,副教授,工学博士,E-mail:yhai@bjut.edu.cn.

**Key words:** traffic engineering; subway station; transfer area; pedestrian route choice; improved multinomial nested logit mode; route utility function

## 0 引言

城市轨道交通之间的换乘作为城市换乘系统的末端,在理论层面和实际应用方面均有较多的关注<sup>[1-2]</sup>,城市地铁作为轨道交通的主要体现形式,主要担负城市短途客流集散,其换乘效率的高低影响到城市换乘体系的畅通和稳定。国内外关于轨道交通枢纽换乘方面的研究主要集中于两部分:一是城市轨道交通与其他方式换乘的研究,侧重于宏观的系统建立及相关数据研究。林国城分别从轨道交通、公交、出租车 3 种交通方式探讨枢纽换乘时间衔接,并提出了相应模型,分析了客运枢纽与城市交通的运营时间协调性<sup>[3]</sup>;另一部分是对城市轨道交通换乘的微观行人心理方面的研究,侧重于不同的换乘设施对行人生理及心理的影响<sup>[4-7]</sup>。Cheung 等研究了地铁换乘站中行人自动扶梯和楼梯之间的选择情况<sup>[4]</sup>;Winnie 等分析了轨道车站乘客在不同情况下的路径选择变化情况<sup>[5]</sup>。关于轨道交通枢纽换乘功能方面的研究,大部分将换乘枢纽的设施建设与其交通功能分别考虑,在枢纽结构设计完成的基础之上论证枢纽的交通换乘功能,对枢纽换乘功能的时空连贯性考虑不足,更缺少以行人路径选择为视角的枢纽内换乘设施研究<sup>[8]</sup>。为此,本文以行人路径的完整过程为研究基础,分析组成路径的不同设施对行人路径选择以及路径效用的影响,同时对同种类型设施在不同路径中的效用值做了深入的调查分析,并最终得出地铁车站换乘设施的路径效用函数模型。

## 1 行人路径选择模型

路径选择模型主要应用于交通行为分析中,一般假设遵循效用最大化原则,以离散选择模型作为行为分析的工具,在驾驶人的路径选择行为研究中应用广泛<sup>[8-9]</sup>。经过多年在相关领域的延伸发展,离散选择模型逐渐应用在行人的路径选择行为分析中,并取得较好的效果<sup>[10-12]</sup>。

轨道车站换乘区域的行人路径选择行为,是指在轨道换乘车站行人受到综合因素影响,从一条地铁线路,经过一系列交通换乘服务设施,最终达到另外一条地铁线路的全过程。这一过程是行人习惯性行为与理性行为共同作用的选择结果。假设行人遵

循效用最大化的原则选择路径,路径效用函数为

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_{in} \quad (1)$$

式中: $U_{in}$ 为出行者  $n$  选择路径  $i$  的效用函数中的固定项; $V_{in}$ 为出行者  $n$  选择路径  $i$  的效用函数中的固定项; $\epsilon_{in}$ 为出行者  $n$  选择路径  $i$  的效用函数中的随机项。

在假设效用函数的随机项  $\epsilon_{in}$  符合相互独立二重指数分布,可推导出基础的多项 logit(MNL)模型

$$P_{in} = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j \in A_n} e^{V_{jn}}} = \frac{1}{\sum_{j \in A_n} e^{V_{jn} - V_{in}}} \quad (2)$$

式中: $P_{in}$ 为出行者  $n$  选择路径  $i$  的概率; $V_{jn}$ 为出行者  $n$  选择路径  $j$  的效用函数固定项; $A_n$ 为出行者  $n$  的可选方案集。

由于在轨道车站换乘区域行人的路径选择存在重叠情况,而基础的传统的 MNL 模型不能合理地解释这一点,因此国内外学者做了相应研究,提出了 Path-Size Logit(PSL)模型<sup>[11]</sup>。PSL 模型通过添加附加效用因子,考虑并解决了存在重叠路径情况下的路径选择问题,相关的模型研究指出:PSL 模型通过添加路径重复系数,有效地改进了效用函数随机项相互独立的假设,并且具有简便的形式<sup>[13]</sup>。路径重复系数的表达式为

$$P_{S_{in}} = \sum_{a \in \zeta_i} \frac{l_a}{L_i} \frac{1}{\sum_{j \in C_{in}} G(L_i; L_j; \gamma) \delta_{aj}} \quad (3)$$

式中: $P_{S_{in}}$ 为出行者  $n$  所选路径  $i$  的路径重复系数; $\alpha$ 为重叠路段; $\zeta_i$ 为路径  $i$  中的路段集; $l_a$ 为路径  $i$  中重叠路段  $a$  长度; $L_i$ 为路径  $i$  的长度; $G_m$ 为路径  $i$  所在的路径集合; $\delta_{aj}$ 为重叠路径指示参数,路径  $j$  中含有路段  $a$  则为 1,否则为 0; $G(L_i; L_j; \gamma)$ 是关于路径长度  $L_i, L_j$  和尺度参数  $\gamma$  的函数;如果  $P_S$  项不考虑路径长短,则长路径和短路径关于  $G$  函数的值都等于 1。

考虑了重叠路径影响的路径选择模型为

$$P(i|C_n) = \frac{e^{(V_i + \beta \ln(P_{S_{in}}))}}{\sum_{j \in C_n} e^{(V_j + \beta \ln(P_{S_{jn}}))}} \quad (4)$$

式中: $P(i|C_n)$ 为给定方案选择集  $C_n$  中选择方案  $i$  的概率; $C_n$ 为方案选择集; $V_i$ 为路径  $i$  的效用固定项; $\beta$ 为需要标定的参数。

本文假设固定效用的基本形式公式为

$$V_{in} = \sum_{k=1}^K \theta_k X_{ink} \quad (5)$$

将影响行人路径选择的因素分为 4 类考虑影响路径选择的因素,分别为:行人的个人属性(性别、年

龄);行人的出行特性(出行目的、每周车站使用频次、同行人数);设施服务时间相关因素(楼梯或扶梯不同位置走行时间、不同连通走廊走行时间等);路径重复系数。则路径效用函数的固定项为

$$V_{in} = \sum_{j=1}^m \theta_j X_j + \sum_{k=1}^n \theta_k X_k + \theta_0 P_{Si} \tag{6}$$

式中: $\sum_{k=1}^m \theta_k X_k$  为个人属性和出行特性对路径的效用贡献值; $\sum_{k=1}^n \theta_k X_k$  为设施服务时间对路径的效用贡献值; $\theta_0 P_{Si}$  为重叠路径对路径的效用贡献值。

## 2 数据采集

### 2.1 调查地点和时间

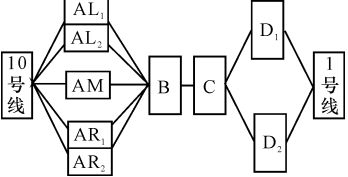
为了使研究具有代表性,需要采集到典型的轨道交通换乘车站的行人路径选择数据。典型的轨道交通车站应具备站口设置清晰、站区设施完善和功能齐全的特点。

根据以上条件,数据采集地点选择在北京轨道交通国贸站 10 号线换乘 1 号线的换乘区域。为连续 5 d(工作日 3 d,周末 2 d)。

### 2.2 调查方法和内容

建立交通服务特性数据的方法有 2 种:轨迹法和网络法<sup>[12]</sup>。本文采用轨迹法。轨迹法的具体方法是:在 OD 起讫点之间,统计各个行人的路径选择情况,在轨道车站换乘区域内将对行人的轨迹进行组合和编号。路径集合如表 1 所示。

表 1 国贸地铁站换乘区域路径集合

路径	路段组合	图示
路径 1	AL <sub>1</sub> -B-C-D <sub>1</sub>	
路径 2	AL <sub>1</sub> -B-C-D <sub>2</sub>	
路径 3	AL <sub>2</sub> -B-C-D <sub>1</sub>	
路径 4	AL <sub>2</sub> -B-C-D <sub>2</sub>	
路径 5	AM-B-C-D <sub>1</sub>	
路径 6	AM-B-C-D <sub>2</sub>	
路径 7	AR <sub>1</sub> -B-C-D <sub>1</sub>	
路径 8	AR <sub>1</sub> -B-C-D <sub>2</sub>	
路径 9	AR <sub>2</sub> -B-C-D <sub>1</sub>	
路径 10	AR <sub>2</sub> -B-C-D <sub>2</sub>	

其中:AL<sub>1</sub> 为左侧楼梯;AL<sub>2</sub> 为左侧电梯;AM 为中部楼梯;AR<sub>1</sub> 为右侧楼梯;AR<sub>2</sub> 为右侧电梯;B、C 分别为连接通道;D<sub>1</sub> 为楼梯;D<sub>2</sub> 为电梯。

行人路径调查方法有 2 种:跟随问询和视频采集,本文采用跟随问询法,即在调查过程中,调查人员全程跟随被访行人并通过问询采集其个人信息,同时描绘行人路径全貌并记录被访者到达路径关键节点的时刻。

## 3 模型标定及分析

本次调查,共调查样本 121 份,并获得有效问卷 100 份。统计发现,100 份调查样本中:男性乘客比例为 56%,女性乘客比例为 44%。

### 3.1 变量设置

根据调查数据,使用列联表独立性检验方法判断各特性变量对路径选择结果是否有影响。检验结果表明,行人出行特性中的“同行人数”和“每周车站使用频次”的相伴概率大于 0.05,说明其对路径选择结果影响较小,因此将这 2 个变量剔除。

经过变量的分段分析,将年龄划分为 2 类:①小于等于 30 岁;②大于 30 岁。将出行目的划分为两类:①上班、上学、回家通勤出行(刚性出行);②其他(弹性出行)。经过变量筛选后,行人路径选择模型的变量设置如表 2 所示。

表 2 哑元变量设置

Tab. 2 Set dummy variables

变量	分类	哑元变量	
年龄	≤30	1	0
	>30	0	0
出行目的	通勤	1	0
	其他	0	0

### 3.2 模型标定结果

使用数理统计与分析软件 SPSS<sup>[14]</sup>和交通仿真软件 TransCAD<sup>[15]</sup>标定模型参数,结果见表 3。

表 3 模型标定结果

Tab. 3 Calibration results of ps-logit model

特性变量	参数值	t 检验值
Constant3	-2.963	-2.678
Constant5	7.563	6.077
Constant6	0.439	
Constant8	3.705	
Constant9	2.575	
出行目的	1.350	1.972
年龄特征	-1.648	-2.434
上行楼梯(左)	-0.105	2.776
上行扶梯(左)	-0.030	2.072
上行楼梯(中)	-0.134	5.295
上行楼梯(右)	-0.279	1.985
上行扶梯(右)	-0.041	-2.059
连通走廊(1)	-0.725	-2.404
连通走廊(2)	-1.639	-1.975
上行楼梯(4)	-0.205	-5.247
上行扶梯(4)	-0.078	-3.466
P <sub>S</sub>	2.819	2.157
ρ <sup>2</sup>	0.626 7	
ρ <sup>2</sup>	0.552 5	
-2(L(0)-L(θ))	236.648	

根据非集计模型理论,检验所有参数值全为 0 假设的统计量为 $-2(L(0)-L(\theta))^{[12]}$ 。由表 3 可以看出,该统计量为 $236.648>\chi^2_{0.05}(9)=3.325$ ,表明在显著性水平 5%下,所有参数值为 0 的假设不成立。

从标定结果可以看到,优度比 $\rho^2$ 和经过自由度调整后的优度比 $\bar{\rho}^2$ 均大于 0.55。在实践中优度比在 0.2~0.4 时,即可认为模型的精度较高,由此可以看出本模型的精度很高。

通过对模型参数进行  $t$  检验,检验相应变量是

否对选择概率产生影响。当  $t$  值的绝对值大于 1.96 时,在 5%的显著性水平上,可以拒绝假设  $H_0:\theta_K=0$ 。模型标定过程中剔除“性别”这个变量( $t$  检验值小于 1.96)对模型进行标定,最终结果如表 3 所示,各变量均能通过  $t$  检验。

得到每条路径的函数表达式如表 4 所示。其中, $t_{\text{des}}$ 为出行目的; $t_{\text{age}}$ 为年龄; $T_{\text{s1}}$ 为上行左侧楼梯; $T_{\text{s2}}$ 为上行中部楼梯; $T_{\text{s3}}$ 为上行右侧楼梯; $T_{\text{s4}}$ 为上行楼梯(4); $T_{\text{E3}}$ 为上行扶梯右; $T_{\text{E4}}$ 为上行扶梯(4); $T_{\text{ZD1}}$ 为连通走廊(1); $T_{\text{ZD2}}$ 为连通走廊(2)。

表 4 路径效用函数汇总  
Tab. 4 Summary of paths utility functions

路径	路径效用函数
路径 1	$U_1=1.350t_{\text{des}}-1.684t_{\text{age}}-0.105T_{\text{s1}}-0.205T_{\text{s4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S1}}$
路径 2	$U_2=1.350t_{\text{des}}-1.684t_{\text{age}}-0.105T_{\text{s1}}-0.078T_{\text{E4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S2}}$
路径 3	$U_3=-2.963-0.134T_{\text{s2}}-0.205T_{\text{s4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S3}}$
路径 4	$U_4=1.350t_{\text{des}}-0.134T_{\text{s2}}-0.03T_{\text{E4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S4}}$
路径 5	$U_5=7.563-1.684t_{\text{age}}-0.279T_{\text{S3}}-0.205T_{\text{S4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S5}}$
路径 6	$U_6=0.439-1.684t_{\text{age}}-0.041T_{\text{E3}}-0.079T_{\text{E4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S6}}$
路径 7	$U_7=1.350t_{\text{des}}-0.030T_{\text{E1}}-0.205T_{\text{S4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S7}}$
路径 8	$U_8=3.705-1.684t_{\text{age}}-0.030T_{\text{E1}}-0.078T_{\text{E4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S8}}$
路径 9	$U_9=2.575+1.350t_{\text{des}}-0.041T_{\text{E3}}-0.205T_{\text{S4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S9}}$
路径 10	$U_{10}=1.350t_{\text{des}}-1.684t_{\text{age}}-0.279T_{\text{S3}}-0.078T_{\text{E4}}-0.725T_{\text{ZD1}}-1.639T_{\text{ZD2}}+2.819P_{\text{S10}}$

3.3 模型分析

根据标定结果对各变量进行如下分析:

(1)模型标定过程中,性别  $t$  检验值的绝对值小于 1.96,可以看出性别对乘客在换乘区域内的路径选择的影响不大,对路径选择的效用值影响不显著。性别不同的乘客在换乘区域内的路径选择差异不明显。个人属性中,乘客个人属性中的乘客的年龄及出行特性中的出行目的对选择概率的影响较大,对效用值影响显著。出行目的对路径效用的贡献值为正,说明刚性出行目的相较于其他出行目的对路径效用的贡献较大;并且刚性出行目的对路径 1、2、4、7、9、10 的影响显著。年龄对路径效用的贡献值为负,说明 30 岁以下人群相较于 30 岁以上人群对路径的选择贡献更小;而且对路径 1、2、5、6、8、10 影响显著。

(2)不同路径的同类设施,对路径效用的贡献值不同,路径 1 与路径 2 的楼梯长度相同,但路径 1 的楼梯行走时间效用值是路径 2 楼梯行走时间效用值的 2 倍,说明设施不同的路径的效用值不同。

(3)从参数标定结果来看,行人的个人属性中的出行目的和年龄的参数值分别为 1.35 和-1.684,其绝对值相较于设施行走时间的参数值大,因此对路径效用值的影响大于设施行走时间的影响,说明

针对不同属性个体效用值的改善将会非常显著;楼梯行走时间参数值的绝对值均大于自动扶梯的,说明行人对路径自动化水平的依赖程度较高,且自动扶梯的效用贡献值约为楼梯的 2 倍,说明人们更偏向于选择有自动扶梯的路径。

(4)路径重复因子系数的估计值为正值负值(2.819),同时路径重复系数本身为负值,该因子的系数为 $2.819>0$ ,说明换乘区域内的某条路径与其他路径的重叠度越高,其对效用值的负面影响越大,随着路径重叠度的增高,选择该路径的概率会降低。该结果与实际中行人对拥挤路径的规避行为一致<sup>[4]</sup>。因此说明在有限的换乘区域内提供多元的服务设施布设方案,减少重叠路段的影响,对路径效用的提升效果显著。

4 结 语

(1)个人属性和出行特性中,对换乘去行人路径选择影响显著的因素是出行目的和路径的步行时间;路段属性中对路径选择影响较大的是路径重复系数,路径选择概率随路径重复系数的增高而降低;检验结果表明模型精度较高,此分析方法对 H 型通道换乘模式有效。

(2)分析地铁车站之间换乘区域的行人路径选择行为是一项基础研究工作,为地铁车站之间的换乘设施改善提供参考,同时也为规划地铁车站换乘设施的布设方案比选和评价提供依据。本文主要研究  $H$  型通道换乘模式,今后学者可参照本文方法对其他的换乘通道类型的换乘模式进行分析研究,完善换乘设施研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 潘东来.城市轨道交通枢纽交通衔接研究[D].武汉:华中科技大学,2005.  
PAN Dong-lai. Study on the theory of traffic join and co-operation for urban rail transit hub[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005. (in Chinese)
- [2] 王建聪.城市客运枢纽换乘组织关键问题研究[D].北京:北京交通大学,2006.  
WANG Jian-cong. Key issues on transfer organization of city passenger traffic hubs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [3] 林国成.城市综合客运枢纽换乘衔接研究[D].西安:长安大学,2010.  
LIN Guo-cheng. Research on passenger transfer in urban comprehensive transportation hub[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [4] Cheung C Y, William H K L. Pedestrian route choices between escalator and stairway in MTR Stations[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(3): 277-285.
- [5] Daamen W, Bovy P H L, Hoogendoorn S P, et al. Passenger route choice concerning level changes in railway stations [C]//Transportation Research Board Transportation Research Board Annual Meeting, Washington DC: National Academy Press, 2005: 1-18.
- [6] 大島義行,松橋貞雄,三浦秀一.鉄道駅における乗換抵抗に関する基礎的研究[J].土木計画学研究・講演集,1996,11(2):701-702.  
Oshima Y, Mtsuhashi S, Miura S. A basic study on transfer resistance at railway station[J]. Proceedings of Infrastructure Planning, 1996, 11(2): 701-702. (in Chinese)
- [7] 何静,刘志刚,孙有望.基于乘客能量和心理阻抗的换乘便利性分析[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(1):92-97.  
HE Jing, LIU Zhi-gang, SUN You-wang. Transfer con-

venience analysis based on the energy and mental impedance of passengers[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(1): 92-97. (in Chinese)

- [8] 周溪召,胡文君.路径选择中重叠路线的解决方法比较[J].公路工程,2010,35(1):28-32.  
ZHOU Xi-zhao, HU Wen-jun. Several ways of solving overlay in route choice[J]. Central South Highway Engineering, 2010, 35(1): 28-32. (in Chinese)
- [9] 刘莹,吴娇蓉,林航飞.轨道交通车站行人路径选择研究[J].城市交通,2008,6(6):46-53.  
LIU Ying, Wu jiao-rong, LIN Hang-fei. Study on pedestrian route choice within a rail transit station[J]. Urban Transport of China, 2008, 6(6): 46-53. (in Chinese)
- [10] Hoogendoorn S P, Bovy P H L. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2004, 38(2): 169-190.
- [11] Hoogendoorn L S, van Ness R, Bovy P H L. Path-size modeling in multi-modal route choice analysis [J]. Transportation Research Board Annual Meeting, in Cd-rom with proceedings, 2005(1921): 27-34.
- [12] 关宏志.非集计模型-交通行为分析的工具[M].北京:人民交通出版社,2004.  
GUAN Hong-zhi. Disaggregate model A tool of traffic behavior analysis[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [13] 白鸿宇,严海,刘诗序.基于PSL模型的轨道车站行人路径选择研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012,36(1):149-152.  
BAI Hong-yu, Yan Hai, Liu Shi-xu. PSL model-based pedestrian route choice study in rail station[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2012, 36(1): 149-152. (in Chinese)
- [14] 宇传华.SPSS统计与分析[M].北京:电子工业出版社,2007.  
YU Chuan-hua. Statistical analysis with SPSS[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
- [15] 闫小勇,刘博航.交通规划软件实验教程(TransCAD 4.X)[M].北京:机械工业出版社,2010.  
YAN Xiao-yong, Liu Bo-hang. Transportation planning software experimental course (TransCAD 4. X) [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)