

## 地铁车厢内乘客站立位置选择行为研究

史芮嘉<sup>1</sup>, 毛保华<sup>\*1</sup>, 丁勇<sup>1</sup>, 刘路<sup>2</sup>

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

2. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

**摘要:** 基于地铁乘客在车厢内站立位置选择行为设计问卷并调查, 引入信效度分析判断问卷及其结果的可靠性, 分析乘客在车厢内站立位置的选择偏好和对座位的需求程度. 针对乘客从车厢两端和车厢中部车门上车两种情景, 将车厢内部站立区域划分为6部分, 建立考虑乘客出行距离和车厢内立席密度的乘客站立位置选择基线—类别Logit模型, 采用调查数据对模型参数进行估计并验证. 研究表明, 模型标定结果与调查数据较为吻合, 可较好地刻画乘客的选择行为. 此外, 乘客对车门前区的选择概率随车厢内立席密度的增大而增大, 而坐席区域和侧边区域则相反; 乘客出行距离较长时, 乘客选择坐席区域的概率对车厢内立席密度的变化更为敏感.

**关键词:** 城市交通; 地铁车厢; Logit模型; 乘客选择行为; 站立位置

## Pedestrian Choice Behavior Analysis of Standing Position in Subway Carriage

SHI Rui-jia<sup>1</sup>, MAO Bao-hua<sup>1</sup>, DING Yong<sup>1</sup>, LIU Lu<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu, China)

**Abstract:** A questionnaire of pedestrian standing position choice behavior in subway carriage is designed and investigated, and the reliability and validity of the questionnaire is verified. Passengers' preference of standing position and the desire for seat are analyzed. The carriage is divided into six parts based on the two layouts in the carriage. A Baseline-Category Logit model is established by considering the trip distance of passengers and the standing density in the carriage. The estimates of the parameters are calculated by the survey data. The result shows that the proposed model can effectively reflect pedestrian choice behavior in subway carriage. In addition, the probability of choosing the front area near the door increases with the standing density in the carriage, but the seating area and the side area are opposite. The probability of choosing the seat area is more sensitive with the standing density in the carriage when passenger's trip distance is longer.

**Keywords:** urban traffic; subway carriage; Logit model; choice behavior; standing position

收稿日期: 2016-07-22

修回日期: 2016-11-21

录用日期: 2016-12-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助/ The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016YJS086); 国家自然科学基金/ National Natural Science Foundation of China(71390332, 71621001-3); 国家重点基础研究发展计划项目/ National Key Basic Research Program of China (2012CB725406).

作者简介: 史芮嘉(1991-), 女, 河北石家庄人, 博士生.

\*通信作者: bhmao@bjtu.edu.cn

## 0 引言

在轨道交通客流高峰时段,受乘客个体特性、客流性质及车厢设施布局影响,地铁车厢内立席密度的分布具有时间和空间上的不均衡性.当车门区聚集乘客数量较多时,将影响可上车乘客数量,从而降低列车的载客能力和高峰小时输送能力.因此,研究乘客在车厢内站立位置的选择行为及车厢内立席密度分布规律,对于改善地铁车厢设施布局、提高车厢载客能力具有重要意义.

目前,部分学者已针对乘客与列车的交互行为开展了大量研究,如乘客对快慢车的选择<sup>[1]</sup>、对上车车门的选择<sup>[2]</sup>、对车厢内座位的选择<sup>[3]</sup>等.在对乘客在车厢内站立位置的研究中,主要为针对乘客群体特性的车厢立席密度分布规律分析.由于车厢内立席密度受乘客心理、车厢布局、客流分布等因素的影响,理论分析存在较大困难,既有文献多依靠对实际运营的调研数据分析车厢内立席密度分布.赵亮等<sup>[4]</sup>通过调研地铁车辆内设施使用情况,分析了不同满载率下车内乘客的分布规律,并对车厢内设施布局提出建议.吴奇兵等<sup>[5-6]</sup>将车厢分为坐席区、车门区和车门壁区等3部分,通过调研分析了北京地铁1号线和4号线车厢内立席密度随时间和空间的变化规律,并在此基础上模拟乘客的空间舒适度状态.然而,上述研究都为调研数据的直接应用,缺乏对乘客在车厢内站立位置选择机理的深入分析.因此,有必要对乘客在车厢内站立位置的选择行为特性进行调查,研究乘客选择行为的影响机理.

基于随机效用理论研究乘客和车厢等相关因素对乘客在车厢内站立位置选择行为的知觉效用,是一种较为科学地分析预测乘客行为的方法.可通过RP(行为)调查和SP(意向)调查获取乘客随

机效用数据,从而为刻画乘客在车厢内站立位置的选择行为提供依据.本文以地铁车厢为对象,研究无空余座位时乘客在车厢内各区域的选择行为.通过设计SP调查问卷,分析乘客出行特征、车厢设施布局、车厢立席密度对乘客在车厢内站立位置选择行为的影响,建立乘客选择随机效用模型,采用调查数据对模型参数进行估计并验证.

## 1 乘客站立位置选择行为 SP 调查设计

在前期开展地铁车厢内乘客站立位置选择行为初步调研的基础上,设计乘客在车厢内站立位置选择行为调查问卷,并于2016年5月采取现场及互联网两种方式进行SP调查.问卷中车厢布局以北京地铁B型车为例,调查内容涵盖乘客的个体特征、乘客出行特征、车厢设施布局、车厢内立席密度及乘客的选择偏好等内容.调查仅考虑乘客个体出行的情况,不考虑结伴出行,同时忽略季节、上下车门位置改变等因素的影响.

### (1) 乘客特性.

为使样本构成涵盖各类乘客,问卷设置了多项乘客特性题目,具体包括乘客的性别、年龄、工作性质、出行频率、出行目的、是否关注车厢布局、上车位置偏好、靠近设施偏好、对站立时间的耐受程度等.

### (2) 车厢内站立区域划分.

由于实际运营的地铁车辆中,部分列车车厢头部或尾部并不布设座位,因此本文主要研究车厢两端(图1(a))和车厢中部(图1(b))两种情景.为了进一步得到乘客在车厢内不同位置的选择规律,将车厢内部分为6个区域,分别为坐席前区、坐席后区、车门前区、车门后区、侧边前区和侧边后区.车厢布局及区域划分如图1所示.

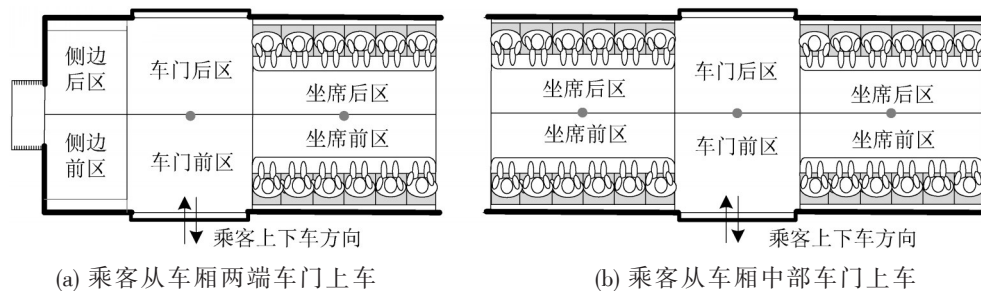


图1 车厢布局及区域划分

Fig. 1 The layout and division of the carriage

### (3) 乘客出行距离和车厢内立席密度组合方案.

问卷中设定不同的立席密度及乘客出行距离组合方案,研究不同情景下乘客选择区域的变化情况.根据《城市轨道交通工程项目建设标准》(建标 104-2008)<sup>[7]</sup>中立席密度评价标准,选取非常舒适( $<1$ 人/ $m^2$ )、较为舒适(3人/ $m^2$ )、定员标准(6人/ $m^2$ )、超员标准(9人/ $m^2$ )等4种立席密度,设置乘客出行5站及以下、6~10站、11~15站、15站以上4种出行距离范围,结合两种车厢布局,共计32种情景.

## 2 问卷信效度及结果分析

此次问卷为随机抽样,共获得有效问卷278份,共计8 896组样本.

### (1) 问卷信度和效度分析.

考虑到问卷的制作方法、调查结果会对结果分析产生较大影响,因此引入信效度分析<sup>[8]</sup>判断所设计问卷及问卷结果的可靠性和准确性.

信度即调查的可靠性,是指调查结果的一致性和稳定性程度.现场调查可即时对乘客的属性做出判断,确保重访时答案的一致性;后期统计时剔除不合理样本,可保证问卷信度的可接受性.调查回收有效问卷中含男性132份,女性146份;25岁及以下乘客占15%,26~40岁乘客占78%;通勤客流占53%,休闲客流占37%;在行政和事业单位工作的乘客占35%,企业单位占43%;每周乘坐地铁在5次以上的乘客占68%.样本涉及各类乘客,且

抽样对象对地铁系统具有相当的熟悉程度,满足问卷设计要求,调查结果较为可靠.

效度即调查的准确性,是指问卷能够反映调查特性的程度.调查问卷的效度分析常用的是结构效度.本文采用因子分析法进行结构效度分析,结果如表1所示. $KMO>0.7$ ,表明问卷调查结果适合做因子分析;Sig.值为0,表明调查项中至少存在一项因素对乘客站立位置选择行为产生显著影响.

表1 调查问卷的KMO和Bartlett的检验

Table 1 KMO and Bartlett test of the questionnaire

取样足够度的Kaiser-Meyer-Olkin度量	0.702
近似卡方	2 764.074
Bartlett的球形检验	df 66
	Sig. 0.000

### (2) 乘客对车厢内站立区域的选择偏好.

经调查,36%的乘客选择在车厢头部或尾部上车,22%的乘客选择在车厢中部上车,42%的乘客随机选择.其中,73%的乘客在乘车过程中关注车厢布局,可见乘客在车厢内的站立位置为有意识的选择行为.采取重要度指数法判断乘客对各区域的偏好程度,请受访者对车厢内站立区域的优先级进行排序,排序结果的累计频数如表2所示.其中,1~5表示乘客的选择次序.结果表明乘客在车厢内更偏向于选择人数更少的区域,因此选择车厢内立席密度( $m^2$ /人)作为影响乘客选择行为的主要因素之一.

表2 乘客对站立区域偏好排序

Table 2 Preference of standing area

偏好区域	1	2	3	4	5	样本量	偏好程度排序
人更少的区域	107	23	18	18	3		1
距离立柱更近	10	60	53	32	14		2
距离座位更近	29	35	50	29	26	169	3
距离座位两侧扶手更近	10	22	55	64	18		4
距离车门更近	13	17	29	84	26		5

(3) 乘客出行距离对乘客的座位需求程度的影响.

根据调查中不同拥挤程度下乘客对站立时间的耐受程度,进一步判断乘客对座位的需求程度.不同出行时长下乘客对座位的需求程度如图2所示.可以看出,随着乘客在车厢内站立时长的增加,对座位的需求程度不断增加;车厢内拥挤程度越

高,乘客对座位的需求程度越大.

## 3 乘客站立位置选择行为模型构建

多项Logit模型(Multinomial Logit Model)是广义极值模型中的一种,模型计算简便、操作性好,适用于有3个及以上响应变量的情景.根据问卷结果分析,将乘客出行距离和车厢内立席密度设为

乘客在车厢内站立位置选择随机效用模型中的解释变量.乘客在车厢内选择的站立区域为无序多分类变量,影响乘客选择的车厢立席密度为连续变量,乘客出行距离为有序多分类变量,因此,建立多项Logit模型中的基线一类别Logit模型<sup>[8]</sup>描述该问题.

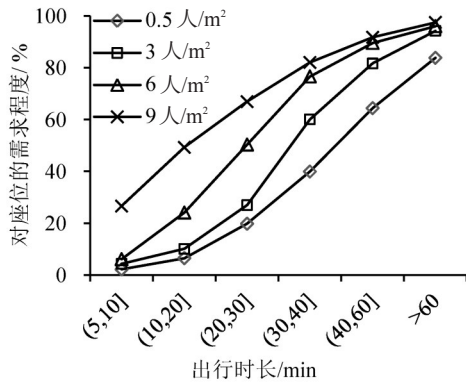


图2 不同出行时长下乘客对座位的需求程度

Fig. 2 Passenger demand of seat in different trip time

乘客选择站立区域的响应变量 $Y$ 关于解释变量 $X$ 的条件概率分布为

$$P\{Y=i|X_n\} = U_{in}(X) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^I U_{in}(X) = 1 \quad (2)$$

式中: $P\{Y=i|X_n\}$ 为乘客 $n$ 选择方案 $i$ 的概率; $U_{in}(X)$ 为乘客 $n$ 选择方案 $i$ 的选择概率函数.

设 $i=I$ 为基类,响应变量的基线一类别Logit

模型将每一类与基类配对.模型共有 $I-1$ 个方程,每个方程采用不同的参数.预测的基线一类别Logit模型为

$$\ln\left(\frac{U_{in}(X)}{U_{In}(X)}\right) = \alpha_i + \beta_i X_n^d + \sum_{j=1}^{I-1} \gamma_{ij} X_{jn}^t, \quad i=1, \dots, I-1 \quad (3)$$

式中: $\alpha_i$ 为待估计参数; $X_n^d$ 是乘客 $n$ 选择站立区域时车厢内立席密度变量值; $\beta_i$ 为对应的待估计参数; $X_{jn}^t$ 是乘客 $n$ 选择站立区域时乘客出行距离变量值; $\gamma_i = (\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \dots, \gamma_{i,I-1})^T$ 为对应的待估计参数向量.

乘客 $n$ 选择类别 $i$ 的条件概率为

$$P\{Y=i|X_n\} = U_{in}(X) = \frac{\exp(\alpha_i + \beta_i X_n^d + \sum_{j=1}^{I-1} \gamma_{ij} X_{jn}^t)}{\sum_{i=1}^I \exp(\alpha_i + \beta_i X_n^d + \sum_{j=1}^{I-1} \gamma_{ij} X_{jn}^t)}, \quad (4)$$

$i=1, \dots, I$

式中: $\alpha_i = \beta_i = \gamma_{i1} = \dots = \gamma_{i,I-1} = 0$

#### 4 乘客站立位置选择模型标定及验证

针对乘客从车厢两端车门和中部车门上车两种情景,分别建立基线一类别Logit模型.两种情景下,乘客可选择站立区域分别有6类和4类.由于实际运营中,部分乘客考虑到车厢内拥挤程度会选择等待下一列车,因此将乘客不上车也作为一种选择类别.将乘客不上车情况设为基类,根据问卷调查数据,利用SPSS软件对式(3)中模型参数进行估计,结果如表3所示.

表3 乘客站立位置选择模型参数估计结果

Table 3 Parameter estimation result of the passenger choice model

选择方案		参数估计				
上车位置	站立位置	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\gamma_{i1}$	$\gamma_{i2}$	$\gamma_{i3}$
乘客从车厢两端车门上车	坐席前区	2.601	-0.410	-0.507	0.103	0.175
	坐席后区	3.214	-0.442	-0.445	-0.145	0.206
	车门前区	1.980	-0.327	1.873	0.979	0.350
	车门后区	2.099	-0.386	1.471	1.143	0.278
	侧边前区	1.740	-0.418	1.051	0.928	0.250
	侧边后区	2.743	-0.447	0.621	0.706	0.292
乘客从车厢中部车门上车	坐席前区	2.742	-0.402	-0.092	0.335	0.284
	坐席后区	3.248	-0.432	-0.338	-0.028	0.096
	车门前区	1.416	-0.283	2.184	0.906	0.163
	车门后区	2.926	-0.417	1.212	0.985	0.211

乘客站立位置选择模型似然比检验如表4所示,其中Sig.值均小于0.05,表明立席密度和乘客出行距离对乘客在车厢内站立位置的选择产生显

著影响.经检验,两个模型对训练样本的回判正确率分别为71.6%和76.8%.



表4 乘客站立位置选择模型似然比检验  
Table 4 Likelihood-ratio test of the passenger choice model

上车位置	指标	卡方	df	Sig.
乘客从车厢	车厢内立席密度	526.822	6	0.000
两端车门上车	乘客出行距离	568.679	18	0.000
乘客从车厢	车厢内立席密度	579.071	4	0.000
中部车门上车	乘客出行距离	662.333	12	0.000

以2016年4月20日北京地铁大兴线上行方向(天宫院—公益西桥,区间编号1~11)早高峰某车厢中部车门对应区域的数据为例,根据实测乘客出行OD,采用本文标定结果对车厢内各区域立席密度进行推算.在各区间车门对应各区域立席密度及误差如图3所示.结果表明,采用本文模型标定结果与实测地铁车厢立席密度变化趋势相同,可较为准确地反应地铁车厢内乘客站立位置的选择行为.

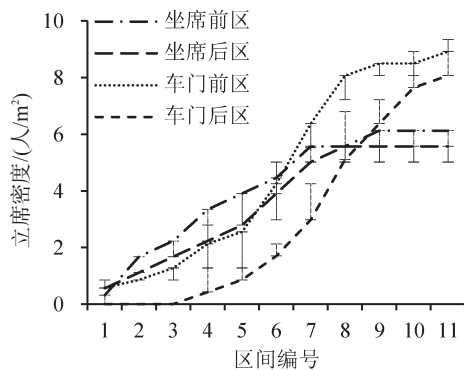


图3 大兴线上行方向各区间立席密度误差线图  
Fig. 3 Error bars figure of standing density of Daxing Line

## 5 模型结果分析

根据基线—类别Logit模型的参数标定结果,以乘客从车厢两端车门上车的情况为例,分析车厢立席密度和乘客出行距离对乘客站立位置选择行为的影响,结果如图4所示.图4(a)~图4(b)分别为当车厢密度为1~9人/m<sup>2</sup>,乘客出行距离为5站及以下、6~10站、11~15站、15站以上时,乘客分区域选择概率的变化.

由图4中车厢立席密度对选择行为的影响可以看出,乘车选择车门前区和不上车的概率随车厢内立席密度的增加而不断增大;坐席区域和侧边区域则随车厢内立席密度的增加而不断下降.其主要原因在于,随着车厢内立席密度的不断增加,乘客穿过较多人群进入其他区域的难度逐步增

大,相应下车时的难度也将加大,因此更偏向于距离车门较近的区域.

从乘客出行距离对乘客选择行为的影响来看,当乘客从车厢两端车门上车时,若乘客出行距离较短(图4(a)),受对座位的需求程度较低的影响,乘客更偏向于站立在车门区域,其次为侧边区域.随着乘客出行距离的增长,乘客对座位的需求不断增大,选择站立在坐席区的概率不断增大,出行距离超过5站后(图4(b)),乘客选择坐席区的概率将超过侧边前区;出行距离超过10站后(图4(c)和图4(d)),乘客将主要选择站在坐席后区、侧边后区和坐席前区.随着乘客出行距离的增加,乘客选择坐席区域的概率对车厢内立席密度的变化更为敏感,而乘客选择车门区域的概率对车厢内立席密度变化的敏感度则略有降低.

当乘客从车厢中部车门上车时,乘客对各区域的选择行为与从两端车门上车较为类似.若乘客出行距离较短,将主要选择车门前区和车门后区,且随车厢内立席密度的增加,对车门前区的选择概率将超过车门后区.乘客出行距离超过5站后,乘客选择车门前区的概率迅速减少,而车门后区和坐席区域则较受欢迎.

## 6 结论

本文以地铁车厢为对象,研究车厢内无空余座位时乘客在车厢内站立位置的选择行为.通过SP调查,分析乘客站立位置选择行为的主要影响因素,建立了考虑乘客出行距离和车厢内立席密度的基线—类别Logit模型,采用调查数据对模型进行参数估计并验证.研究得到的主要结论如下:

(1) 车厢内立席密度与乘客出行距离为影响乘客在车厢内站立位置选择行为的主要因素.乘客通常更偏向于站立在人更少区域,其次为距离立柱更近、距离座位更近、距离扶手更近和距离车门更近的区域.随着出行距离的不断增大,乘客对座位的需求不断提升.

(2) 由于乘客对站立位置的选择变量为无序多分类变量,基线—类别Logit模型可用于刻画乘客在车厢内站立位置选择行为.针对乘客从车厢两端车门和车厢中部车门上车两种情景分别建立

Logit模型,模型标定结果与调查数据较为吻合,可较为准确反映乘客在车厢内站立位置的选择行为

特性.

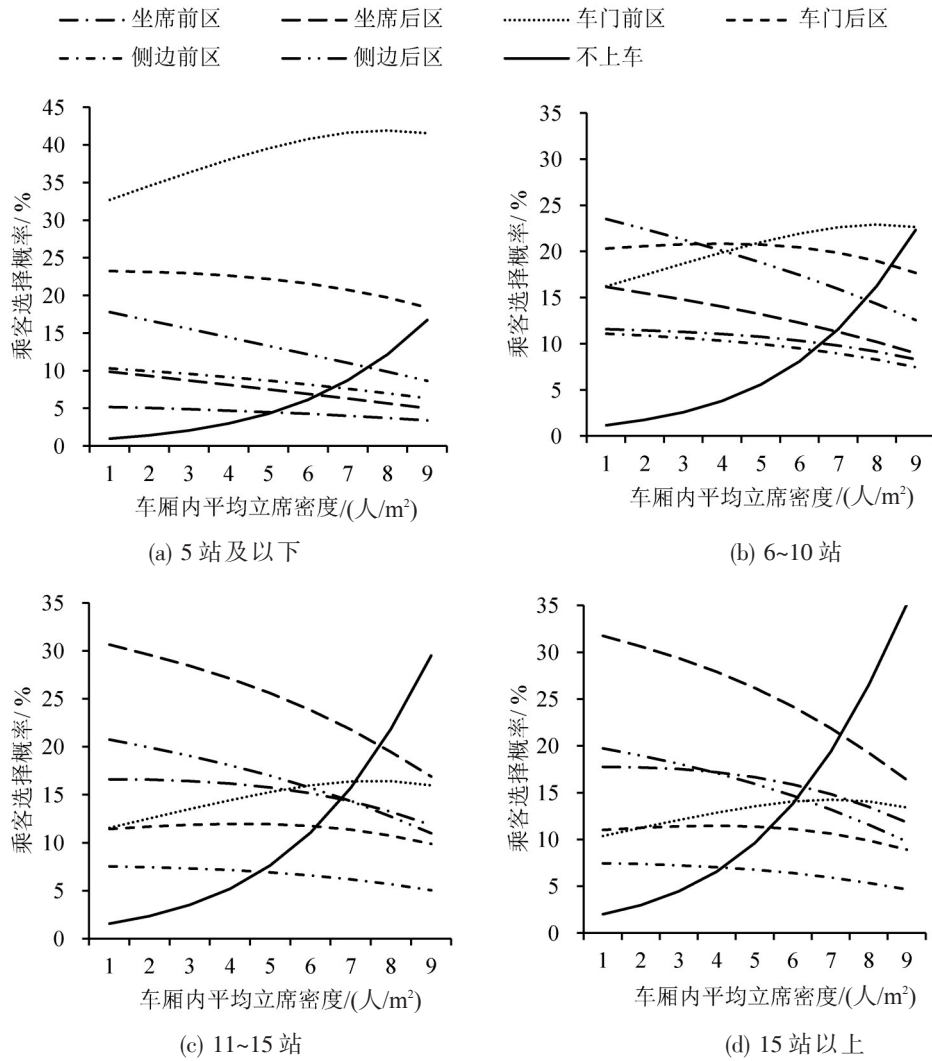


图4 乘客从车厢两端列车上车时站立区域选择概率

Fig. 4 Probabilities of choosing standing position when passengers board from the first or last doors

(3) 乘客对车门前区的选择概率随车厢内立席密度的增大而逐步增大,而坐席区域和侧边区域则相反.当乘客出行距离较长时,乘客对坐席区域的选择概率对车厢内立席密度的变化更为敏感,而乘客选择车门区域的概率对车厢内立席密度变化的敏感性则略有降低.

参考文献:

[1] 解晓灵, 张星臣, 陈军华, 等. 城市轨道交通乘车路径随机效用模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(2): 127-131. [XIE X L, ZHANG X C, CHEN J H, et al. The discrete choice model of urban rail transit passengers' route choice[J]. Journal of Transportation

Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(2): 127-131.]

[2] HYUNMI K, SOHEE K, SEUNG K W, et al. Why do passengers choose a specific car of a metro train during the morning peak hour?[J]. Transportation Research Part A, 2014(61): 249-258.

[3] MARK W, PAUL M. Passengers' valuations of train seating layout, position and occupancy[J]. Transportation Research Part A, 2015(74): 222-238.

[4] 赵亮, 陈峰, 吴奇兵. 轨道交通车辆服务设施的合理布置[J]. 铁道运输与经济, 2009, 31(6): 65-68. [ZHAO L, CHEN F, WU Q B. Layout of vehicle service facilities in urban rail transit[J]. Railway Transport and Economy, 2009, 31(6): 65-68.]