

# 基于乘客能量和心理阻抗的换乘便利性分析

何 静<sup>1,2</sup>, 刘志钢<sup>2</sup>, 孙有望<sup>1</sup>

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

**摘要:** 能量阻抗和心理阻抗, 是乘客在交通系统换乘过程中的能量消耗和心理负担的量化值. 通过乘客在不同换乘径路以及换乘设施条件下的能量损耗, 可以计算出乘客的能量阻抗. 在能量阻抗的基础上, 利用集计型模型价格敏感度测试法, 分析乘客换乘时心理负担, 求得乘客心理阻抗的评价指标. 通过换乘能量阻抗及心理阻抗指标, 评价轨道交通的换乘便利性, 为轨道交通换乘站的换乘设施的设计标准的制定以及对现有设施的改良提供依据, 更精确地表现换乘成本.

**关键词:** 能量阻抗; 心理阻抗; 非集计型价格敏感度测试法; 换乘阻抗

**中图分类号:** F 572.6

**文献标识码:** A

## Transfer Convenience Analysis Based on Passengers' Physical and Psychological Impedance

HE Jing<sup>1,2</sup>, LIU Zhigang<sup>2</sup>, SUN Youwang<sup>1</sup>

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** The quantization of energy consumption and psychology burden is called transfer resistance, which is classified into physical and psychological impedance. Physical resistance defined based on different energy consumptions under different routes and facilities. Based on the physical resistance, the technical point on passenger's psychology resistance is proposed by using the KLP (Kishi's Logit PSM) method, then psychological impedance is determined. As a result, the transfer convenience in urban rail can be evaluated, which is helpful for the planning standard establishment and the improvement of the design of interchange hub and will make the value of transfer cost more precise.

**Key words:** physical resistance; psychological impedance; kishi's logit price sensitivity measurement; transfer resistance

轨道交通的换乘便利性, 可以从换乘长度、换乘时间、换乘费用三个方面进行评价, 将这些因素转化为定量的数值就是阻抗值<sup>[1]</sup>.

国外对枢纽的研究偏重于设施的规划设计, 注重乘客需求、信息服务以及残障人士的特殊要求. 还研究乘客出行心理、枢纽内乘客步行特征、交通方式衔接模式, 以及枢纽建设的经济成本分析. 在以往的研究中, 对于换乘对于乘客的影响, 主要停留在换乘的时间损耗和能量损耗方面, 几乎没有考虑对乘客的心理影响.

日本这方面已经取得了一定的研究成果. 夏目浩次等提出的迂回率, 对轮椅等使用者进行移动阻抗的评价<sup>[2]</sup>; 三浦秀一等计算了不同换乘行动的能量消耗量, 并换算成水平步行距离进行比较<sup>[3-4]</sup>; 加藤浩德根据上下车站的路径选择的结果, 利用非集计 logit 模型寻求换乘行动的时间价值, 提出了等价费用的理论<sup>[5]</sup>; 饭田克弘等在等价费用的基础上, 根据问卷调查, 确定换乘行动等价时间系数、不同换乘径路的换乘等价时间<sup>[6]</sup>.

国内对枢纽的研究, 主要根据实际需要, 从枢纽的某个方面进行了研究. 不论是理论研究还是项目研究, 偏重于设施建设的便利性, 而对乘客在换乘过程中的生理和心理需求则考虑不够. 在换乘设施的设计及现有设施的改良上, 也很少借助换乘阻抗进行评价, 尤其是心理阻抗的定量计算.

## 1 换乘过程中的阻抗分析

乘客在出行过程中不可避免地要换乘, 这势必给乘客出行带来不便. 将影响换乘的因素转化为定量的数值就是换乘阻抗. 在以往的研究中, 换乘阻抗

收稿日期: 2008-11-19

基金项目: 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金资助项目(06XPYQ32)

作者简介: 何 静(1978—), 女, 讲师, 博士生, 主要研究方向为交通规划与管理. E-mail: kmpolly@163.com

孙有望(1948—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为交通规划与管理. E-mail: sunyouw@263.net

主要停留在人体伴随物理移动所消耗的能量分析上,没有考虑到在车站区域内出现的拥挤或环境引起的心理意识等方面的负担。

乘客在换乘过程中,会损耗能量,即换乘能量阻抗,这也是以往对于换乘阻抗研究的重点。香港地铁的研究结果表明,当轨道交通车站的换乘连接通道长度大于 50 m 的时候,车站设施的单纯交通功能会给人带来单调乏味的感觉,产生一种情绪上的不安定感。在 1 min 内完成换乘不会使乘客产生畏惧心理。按照一般人的步行速度,在 1 min 内走完 100 m 的距离。结合车站内的拥堵情况,如换乘距离在 60 m 以内,所需要的换乘时间较为理想<sup>[1]</sup>。这表明,乘客在换乘过程中还会产生一定的心理反应,对于特定的换乘能量消耗,产生对应的心理阻抗。

因此,对于换乘便利性的评价,应该从乘客的角度出发,从能量消耗量和心理阻抗两个方面进行。

## 2 换乘阻抗理论

阻抗,作为研究轨道交通换乘的评价指标,可以从时间、距离和费用三个方面量化估算,用于对比分析。本研究将以换乘距离为例,说明换乘阻抗的计算过程。

首先,通过不同运动状态下的阻抗系数,换算乘客在换乘过程中消耗的能量,确定换乘能量阻抗,并在能量阻抗的基础上,结合问卷调查,运用 KLP (kishi's logit PSM, 非集计型模型价格敏感测试法),衡量乘客对换乘距离的心理感受程度,确定乘客心理阻抗值,最终,通过“换乘距离太远而不愿承受的界限点”,评价换乘便利性。

### 2.1 换乘能量阻抗

能量阻抗是指乘客在特定径路以及换乘设施的条件下完成换乘所耗费的能量,现以“等价水平移动距离”表示。

研究换乘距离,不应仅考虑换乘过程中的绝对距离,还应将水平移动距离,上下楼梯、扶梯、电梯等不同的移动方式,根据人体能量的消耗,分别换算。这是因为,不同的设施,人体的能量消耗不同。不同高度层的移动(如上下楼梯),相比于水平移动,会给人更多的身体负担。这些都需要分别计算,如日本铁路换乘能量阻抗的估算公式为

$$E = X_1 + 0.636X_2 + 1.418N_1 + 0.831N_2 + 0.564N_3 + 0.424N_4 + 0.290N_5 \quad (1)$$

式中: $E$  为换乘阻抗, m;  $X_1$  为水平移动距离, m;  $X_2$  为水平电梯移动距离, m;  $N_1$  为上楼梯的台阶数, 级;  $N_2$  为下楼梯台阶数, 级;  $N_3$  为标准自动扶梯, 级;  $N_4$  为高速自动扶梯, 级;  $N_5$  为电梯, 级。

式(1)中的系数确定方法如图 1 所示。

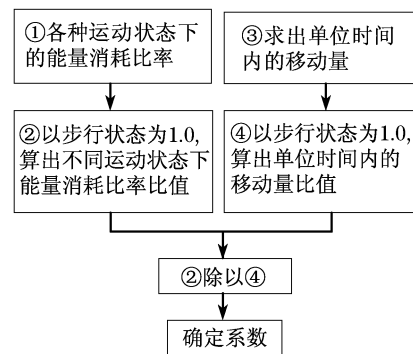


图1 换乘能量阻抗系数确定过程

Fig.1 Physical impedance coefficient ascertainment process

能量消耗的比率,是相对于能量代谢率(RMR)而言的,是基础代谢量的 1.2 倍<sup>[7]</sup>。所谓 RMR,就是在运动生理学中采用的各工作状态下的劳动代谢的指标。个体存在体能的差异,通过式(2),能够得到标准化了的劳动代谢值。

$$R = (W - Q) / B \quad (2)$$

其中: $R$  为相对代谢率;  $W$  为总代谢量,  $\text{kJ} \cdot (\text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$ ;  $Q$  为安静代谢量,  $\text{kJ} \cdot (\text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$ ;  $B$  为基础代谢量,  $\text{kJ} \cdot (\text{m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

通过现场调研数据,可以计算出乘客在换乘过程中,采用特定换乘设施的换乘能量阻抗值。

### 2.2 换乘心理阻抗

仅仅知道能量阻抗,只停留在比较各个换乘枢纽指标的优劣上。至于好坏程度、乘客所能承受的换乘距离,换乘设计和改善现有枢纽站的换乘条件时依据的标准,则需要在心理阻抗方面进一步研究。

#### (1) 非集计价格敏感度测定法

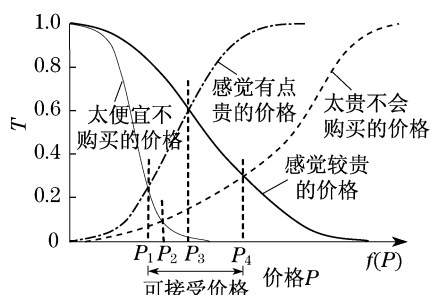
乘客们心理上所能承受的换乘距离范围很难量化,这里采用非集计价格敏感度测定法(kishi's logit PSM, KLP)来分析研究。这种方法是基于价格敏感度测试法(price sensitivity measurement, PSM)发展而来的。PSM 根据消费者的心理反应来测定商品价格,将消费者对价格的感受进行细化,分为不同的价格区间,得到可接受价格区间、最优价格点和无差异价格点。

在PSM中,对于没有回答到的价格带就不能详细评价.如果改变相对累计频数的区间,就有可能变化曲线交点.考虑到这个问题,就可以把其相对累计频数的变化范围转换为0~1,并且使用连续的函数来表达变化趋势.根据式(3)和(4)的非集计模型的回归,分别得到4条曲线<sup>[8]</sup>.由非集计模型变型的PSM,就定义为KLP(图2).

$$T = 1/(1 + \exp f(P)) \quad (3)$$

$$f(P) = aP + b \quad (4)$$

式中:  $T$  为相对累计频数;  $f(P)$  为价格的函数.



$P_1$ —最小价格,  $P_2$ —合理价格,  $P_3$ —标准价格,  $P_4$ —最大价格.

图2 基于KLP的价格评价指标体系

Fig.2 Price evaluation system based on KLP method

### (2) KLP在轨道交通换乘行为中的应用

KLP提供了心理感受的量化评价方式.应用到换乘问题上来,旨在研究乘客对于换乘距离的心理上的承受界限.对于乘客而言,换乘距离当然是越近越好,所以,研究的关键是要确定乘客们心理上所能承受的最远换乘距离.

在交通换乘行为中,由于换乘距离太近而放弃换乘的乘客是不存在的.因此,类似于图2中的“太便宜以至于不会购买”的现象,实际上是不会发生的.因此,可以不用考虑对于乘客最短换乘距离的测定.同样,根据所得到的数据进行回归分析,就能得到相应的评价指标图(图3).图中,任意2条曲线的交点确定的距离,可以称为无差别距离.如图中的 $L_1$ ,在这一点上,乘客的心理感觉是,这样的换乘距离既不远也不近.这是心理感受的界限,即后面计算的设计基准距离.图中的 $L_2$ 既是无差别距离,也是上限距离,如换乘距离超过了这一点,乘客就会感觉太远了,心理上的负担就会很大,甚至会放弃该种交通方式.所以,应把上限距离作为心理阻抗的界限. $L_1$ 与 $L_2$ 将确定3个距离区域,其心理感受为——

0~ $L_1$ , 换乘距离较近,换乘无负担;

$L_1 \sim L_2$ , 选择换乘,但不觉得近;

$L_2$ 以上,换乘距离较远,可能放弃.

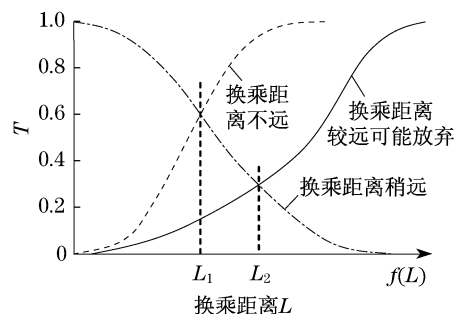


图3 换乘行为中的KLP应用评价指标

Fig.3 Transfer distance evaluation by KLP index during the transfer process

## 3 计算示例

本研究分两个步骤测算能量阻抗和心理阻抗.测算的是通过对各个轨道交通换乘站的平面图的测量与实地的考察综合得出的.心理阻抗的测算则是在能量阻抗测算的基础上,基于KLP设计调查问卷,通过问卷调查的方式分析得出的.

### 3.1 能量阻抗计算

在换乘过程中,能量消耗是最明显、最客观的,采用的换乘路线以及设施的不同,能量消耗是不同的.乘客在下车站台到上车站台之间,有可能选择楼梯、步行、自动扶梯等方式完成换乘,且有可能采取不同的换乘径路.本研究考虑大多数乘客的行为,即采取换乘过程中的两个站台之间的最短距离.关于换乘距离的确定如图4所示.当存在高度差时,按照台阶和自动扶梯分别计算.由于上海轨道交通车站中电梯的使用基本仅限于残疾人,本研究没有给出计算结果.

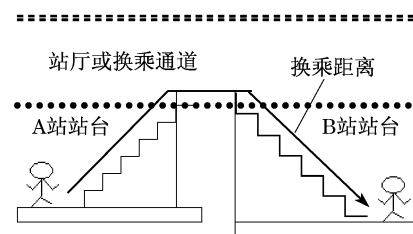


图4 换乘距离计算示意图

Fig.4 Transfer distance calculation sketch

以中山公园站说明能量阻抗的计算过程.中山公园站2号线→3号线,水平距离为168.6 m.在换乘中,若全部使用楼梯,有172级;当兼用自动扶梯和楼梯时,有77级(自动扶梯)和58级(台阶).将以上数据代入式(1),得乘客在换乘过程中的等价水平

距离,即换乘能量阻抗.同理,可计算其他车站的能量阻抗.计算如下:

使用楼梯时

$$E = 1 \times 168.6 + 1.418 \times 172 = 413 \text{ m}$$

兼用自动扶梯和楼梯时

$$E = 1 \times 168.6 + 1.418 \times 58 + 0.564 \times 77 = 294 \text{ m}$$

表 1 部分典型车站换乘能量阻抗  
Tab.1 Transfer physical impedance of representative station

换乘路线	水平距离	楼梯能量阻抗	自动扶梯能量阻抗
人民广场站,2→1	138.60	245	195
人民广场站,1→2	321.60	392	345
中山公园站,2→3	168.60	413	294
中山公园站,3→2	168.60	312	297
上海南站,1→3	183.00	319	220
上海南站,3→1	183.00	263	249
世纪大道站,2→4	29.88	128	66
世纪大道站,4→2	23.24	141	74

注:人民广场站换乘阻抗的计算依据为长短通道换乘模式.

3.2 心理阻抗计算

(1) 调查概况

问卷调查于 2007 年 5 月 28 日至 6 月 1 日,在上海市轨道交通主要换乘站周边进行.调查的概要见表 2.

表 2 调查概要  
Tab.2 Investigation summary

地点	对象	日期	方法	问卷/份	有效问卷/份
轨道交通换乘站周边	轨道交通乘客	2007 年 5 月 28 日至 6 月 1 日	问询式	350	302

(2) 问卷的设计思路

在测算能量阻抗的基础上,运用 KLP 对心理感受进行量化评价,以确定乘客对于换乘距离的心理上的承受界限.问卷分为基础问题与心理阻抗调查问题.前者主要是为了区分乘客与轨道交通的相关程度,便于分析不同背景的乘客对于换乘距离的心理反应或感觉;后者在设计上,以上海现有几个轨道交通换乘站的等价水平换乘距离(即能量阻抗)作为参考,能够给乘客更为直观的感受,更为准确地反映乘客的心理感受.

在调查问卷中提示给受访者的信息如下,并由调查者说明换乘使用的设施为楼梯:

人民广场站,1→2 号线换乘距离:392 m.

人民广场站,2→1 号线换乘距离:245 m.

中山公园站,2→3 号线换乘距离:413 m.

上海南站站,1→3 号线换乘距离:319 m.

这些都是普通的上海市民经常使用的换乘枢纽站,能够使受访者清楚地把自己的心理感受和测算的能量阻抗结合起来,然后依据 KLP 的原理,对乘客询问:

问题 1 当换乘距离为多少时,你开始觉得“这样的换乘距离比较近”?

( )m

问题 2 当换乘距离为多少时,你开始觉得“这样的换乘距离比较远”?

( )m

问题 3 当换乘距离为多少时,你开始觉得“这样的换乘距离太远了,我会考虑别的交通方式”?

( )m

(3)调查分析结果

在调查有效的 302 个样本中,男女比例分别为 54%和 46%,比较均衡.受访者的年龄分布如图 5 所示.调查考虑到 20 岁以下的学生对调查的理解可能不够充分,所以没有过多采集该年龄段的样本.另外,鉴于乘坐地铁的老年人比较少,老年人的样本也比较少.

根据前面关于乘客对换乘距离的心理感受的问题,将数据分类处理并回归分析后,得出女性和男性的 KLP 的心理阻抗距离评价图(图 6,7)及评价结果(表 3,4).

男性受访者与女性受访者相比较,男性的上限距离 309.84 m 大于女性的 289.15 m,而男性的基准距离 158.56 m,却小于女性的 171.19 m.这一结果客观体现了男性在体力上的优势可以承担较长距离、而女性则在耐性上优于男性的特点和不同受访者的特点,以及在上限距离和基准距离方面的差异.

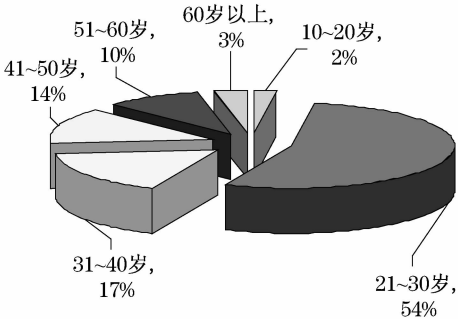


图 5 受访乘客的年龄分布  
Fig.5 Age distribution of passenger investigated

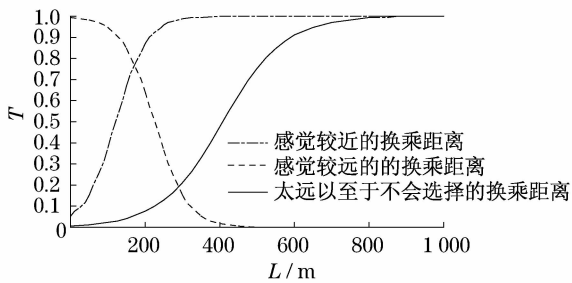


图 6 女性乘客 KLP 心理阻抗距离评价  
Fig.6 Female passengers' transfer distance evaluation by KLP method and psychological impedance

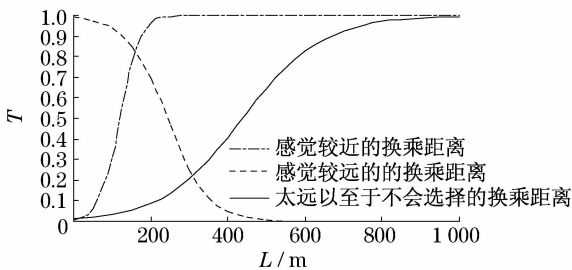


图 7 男性乘客 KLP 心理阻抗距离评价  
Fig.7 Male passengers' transfer distance evaluation by KLP method and psychological impedance

表 3 女性的 KLP 分析结果

Tab.3 KLP analysis result of female passengers

评价指标	换乘距离/m
基准距离	171.19
上限距离	289.15

表 4 男性的 KLP 分析结果

Tab.4 KLP analysis result of male passengers

评价指标	换乘距离/m
基准距离	158.56
上限距离	309.84

可以认为,上限距离即为心理阻抗界限,如果换乘距离大于它,乘客就会感觉太远,甚至不愿换乘,那么,这样的换乘距离就可以说是不符合乘客要求的.而对于换乘基准距离,如果换乘距离大于这个距离,乘客会感觉到有点远;如果低于这个距离,那么就有更多的乘客感觉这样较近.因此,以基准距离和上限距离为设计参考值,能够为换乘站的设计提供依据.

对于换乘站设计,全体受访者的数据更具代表性,更能体现乘客的出行意愿.其 KLP 的心理阻抗距离评价图及评价结果如图 8 和表 5 所示.

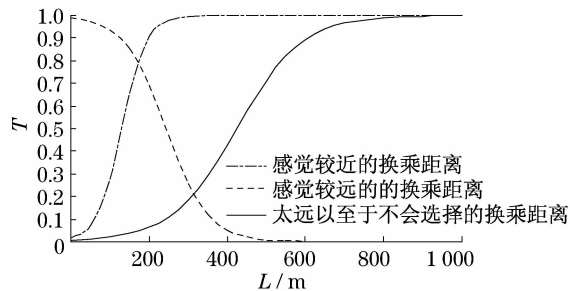


图 8 全体受访者的 KLP 心理阻抗距离评价  
Fig.8 Total passengers' transfer distance evaluation by KLP method and psychological impedance

表 5 全体受访者的 KLP 分析结果

Tab.5 KLP analysis result of whole passengers

评价指标	换乘距离/m
基准距离	171.32
上限距离	313.33

根据全体受访者 KLP 心理阻抗评价结果显示,如果换乘距离超过 313.33 m,将会影响乘客的出行选择.因此,改造之前的上海人民广场站 1 号线换乘 2 号线的“长通道”是不符合要求的,曾经引起乘客的不满.所以,换乘距离限制在 313.33 m 以内,可以说是换乘枢纽设计的基本要求.

从人性化的角度出发,加之考虑到城市的老龄化等趋势,设计者应该更多地考虑把换乘距离限制在 171.31 m 以内;如果可能,还要尽量缩小这个值,真正实现轨道交通基础设施的“以人为本”的服务理念.

## 4 结论

### (1) 换乘阻抗值与换乘设施关系

从换乘阻抗的计算过程和结果来看,换乘的水平距离、楼梯、自动扶梯的布置会影响能量阻抗,进而影响到心理阻抗.因此,换乘阻抗与换乘距离以及换乘设施的布局是相关的,关键在于这些因素之间的合理组合匹配,将换乘阻抗值控制在乘客的承受范围之内.

对于新建枢纽,最理想的是将不同线路的车站立体布局,尽量通过自动设备,如自动扶梯或电梯,连接不同的站台,以使换乘阻抗值最小(国内较成功的案例如上海轨道交通世纪大道站).对于既有枢纽,通过土建设施改变换乘径路的可能性较小.通过计算可知,不同的设施换乘阻抗值是不同的,其中楼梯的换乘阻抗值最大.因此,通过换乘设施数量和位

置的合理布局,通过人行通道、电梯、自动扶梯等换乘设备的组合,把乘客的换乘能量阻抗控制在一个合理的范围内.既缩短换乘时间,更减少了能量消耗量,让乘客更乐于接受.

### (2) 不同乘客的换乘阻抗分析

不同的乘客群体,对于换乘距离的期望以及承受范围是不同的.在一次针对城市轨道交通的乘客调查中,月收入为5 000元以上的乘客仅为14%;61岁以上乘客的比例为5%<sup>[9]</sup>.我国已经于1999年进入老龄化社会的行列,将来我国的这两部分乘客的比例会不断上升,他们也是城市轨道交通企业未来需要关注的重点客户群.采用KLP可以针对不同的乘客群体进行相应的换乘阻抗分析,为制定有针对性的服务措施奠定基础.

### (3) 今后的研究

为验证阻抗理论在轨道交通换乘评价中的合理性和作用,在本次研究中,仅以距离作为评价指标计算换乘阻抗.实际上,乘客在换乘过程中对于不同的拥挤程度有不同的心理感受,可通过距离、时间、成本等综合指标表示,这样的换乘阻抗计算更有利于全面地分析换乘便利性.

在计算换乘能量阻抗时,采用了日本的能量阻抗估算公式,用于我国的具体实践中难免有偏差.今后,可在对我国乘客行为以及换乘阻抗分析的基础上,确定基于我国乘客甚至特定区域乘客群的能量阻抗计算公式.

### 参考文献:

- [1] 刘学军. 地铁换乘行为及换乘站布置选型[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(8): 25.  
LIU Xuejun. Type selections of metro interchange station from behavior measures[J]. Urban Mass Transit, 2006, 9(8): 25.
- [2] 夏目浩次, 若林拓史. 障害属性を考慮した駅空間における移動容易性に関する研究[C]//第55回土木学会年次学術講演会講演概要集. 熊本: 日本土木学会, 2000: 186-190.  
Hirotsugu natsume, Hiroshi Wakabayashi. Mobility in a station space for handicaps considering types of handicaps[C]//55'th Proceedings of Annual Conference of Japan Society of Civil Engineers. Kumamoto: Japan Society of Civil Engineers, 2000: 186-190.
- [3] 三浦秀一, 加藤新一郎, 大島義行. 乗換駅における移動抵抗に関する研究[C]//第51回土木学会年次学術講演会講演概要集. 札幌: 日本土木学会, 1996: 218-219.  
Miura Shuichi, Kato Shinichiro, Oshima Yoshiyuki. Study on the moving resistance at railway junctions [C] // Proceeding of Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers. Sapporo: Japan Society of Civil Engineers, 1996: 218-219.
- [4] 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.  
Yoshiyuki OSHIMA, Sadao Mtsuhashi, Shunichi Miura. A basic study on transfer resistance at railway station[J]. Proceedings of Infrastructure Planning, 1996, 11(2): 701.
- [5] 加藤浩徳, 芝海潤, 林淳, 等. 都市鉄道駅における乗継利便性向上施策の評価手法に関する研究[J]. 運輸政策研究, 2000, 3(2): 9.  
Kato Hironori, Shikai Jun, Hayashi Jun, et al. Research on the method of transfer convenience at urban railway station [J]. Transport Policy Studies' Review, 2000, 3(2): 9.
- [6] 飯田克弘, 新田保次, 森康男, 等. 鉄道駅における乗換え行動の負担度とアクセシビリティに関する研究[J]. 土木計画学研究・講演集, 1996, 11(2): 705.  
Katsuhiro IIDA, Yasutsugu Nitta, Yasuo Mori, et al. Research of transfer behavior in railway terminal and estimation of equivalent time coefficient [J]. Proceedings of Infrastructure Planning, 1996, 11(2): 705.
- [7] 屋井鉄雄, 岩倉成志, 伊東誠. 鉄道ネットワークの需要と余剰の推定方法について[J]. 土木計画学研究・論文集, 1993(11): 81.  
Tetsuo YAI, Seiji IWAKURA, Makoto ITO. Alternative approaches in the estimation of user demand and surplus of rail network[J]. Infrastructure Planning Review, 1993(11): 81.
- [8] Kunihiro KISHI, Keiichi SATOH. Evaluation of willingness to buy a low-pollution car in Japan[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005, 6: 3121.
- [9] 毛保华, 四兵锋, 刘智丽. 城市轨道交通网络管理及收入分配理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
MAO Baohua, SI Bingfeng, LIU Zhili. Urban rail transit network and income distribution theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2007.