

DOI:10.11918/201812108

出行方式链的转换成本估计

罗玉芳, 陈梦微, 王殿海

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要: 为更准确预测居民出行方式选择,构建考虑心理因素的方式综合转换成本测算模型. 以杭州市居民出行行为为例,运用条件价值法,通过线上线下相结合的问卷调查,得到出行者的个人属性、出行方式链选择以及为了避免方式转换环节的最大支付意愿价格. 研究结果表明:变动转换成本随着转换级数的增加而增加,随转换时间的增加呈指数增长;同时,结果标定了不同转换级数下全方式间的固定转换成本矩阵. 方式综合转换成本测算模型的建立,可以预测基于出行方式链的居民出行需求.

关键词: 交通规划; 出行成本; 方式转换成本; 最大支付意愿; 转换成本模型

中图分类号: U491.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)03-0011-07

Estimation of cost in travel mode chain conversion

LUO Yufang, CHEN Mengwei, WANG Dianhai

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To predict residents' preference for travel modes more precisely, a comprehensive conversion cost model considering psychological factors is introduced in this paper. By taking the travel behaviors of Hangzhou residents as an example, online and offline surveys using questionnaire were conducted with the aid of the contingent valuation method to obtain travelers' personal information, choice for travel mode chain, and the maximum cost quantified by the expense that they are willing to pay for avoiding mode conversion. Results show that the variable conversion cost increased with the increase of conversion series and had a positive exponential correlation with conversion time. Meanwhile, the results demarcated fixed conversion cost matrix among all the modes in different conversion series. The establishment of the comprehensive conversion cost calculation model can predict the travel demands of residents based on the travel mode chain.

Keywords: traffic planning; trip cost; mode conversion cost; maximum willingness to pay; conversion cost model

在城市中,出行者的一次出行通常不仅仅由一种交通方式构成,而是由多种出行方式按照先后次序构成一条出行方式链^[1]. 因此要实现一次出行,方式和方式之间的转换就显得尤为重要. 以往关于转换成本的研究往往集中在小汽车和公交系统转换(“P+R”)或者公交系统和公交系统转换方面^[2-3],但是在中国以及其他发展中国家,居民出行除小汽车、公交车出行以外,步行和自行车也是主要出行方式,因而研究全方式间的转换成为重要的课题.

以往关于“P+R”或者公交系统与公交系统转换成本的研究,是通过换乘惩罚的概念进行的,基于算法的需要,提出换乘惩罚因子,并对其进行测算. 关于换乘惩罚的研究主要包括两个方面,一方面是对换乘时间的惩罚研究,另一方面是对换乘惩罚附加值的研究^[4-5].

换乘时间的惩罚方面,文献[6]认为换乘惩罚是换乘时长和时间价值的乘积,忽略了心理因素在换乘过程中的影响. 随后,文献[7]指出心理因素对换乘时间惩罚的影响,认为根据出行心理,对于选择城市轨道交通出行的乘客而言,相同的时间花费在换乘过程中和花费在车上的效果是不同的,乘客对前者的心理感觉要比后者长. 关于换乘时间惩罚的模型研究,主要分为 3 类:1) 换乘时间惩罚的系数为固定常数,比如文献[2,8]给予走行时间常数倍惩罚,不过这一类没有考虑到换乘次数对于换乘惩罚的影响;2) 构建关于换乘次数的幂函数,并将此幂函数作为换乘时间的惩罚系数^[9];3) 考虑了出行者在换乘过程中的心理因素,构建关于换乘时间的幂函数,表征随着换乘时间的增加,换乘惩罚的增长速度会越来越快^[10].

换乘惩罚附加值方面,考虑到在出行时间、出行费用等条件一致时,出行者相对于需要换乘的出行方式而言更倾向于直达的出行方式^[11-12],所以基于换乘负效用的换乘惩罚附加值的概念被提出. 文献[13]认为换乘惩罚附加值是一种因换乘引起的纯

收稿日期: 2018-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61773338)

教育部人文社科基金青年基金(17YJCZH124)

作者简介: 罗玉芳(1993—),女,硕士;

王殿海(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者: 王殿海, wangdianhai@zju.edu.cn

粹的心理负担,文献[14]认为换乘惩罚附加值是从一种交通工具换乘到另一种交通工具时的感知价值,和换乘过程中等待时间、步行时间无关,和交通方式的安全性、舒适性有关.影响换乘惩罚附加值的因素,主要涉及换乘时段、换乘目的、换乘模式、换乘地域等^[15-18].文献[6]从台北挑选 1 850 个公共交通出行者随机样本得出公交网络之间的换乘惩罚附加值相当于 30 min 的车内时间或者 10 min 的等车时间.文献[7]认为换乘模式不同,换乘惩罚附加值也不同(汽车和火车的换乘惩罚附加值为 15 min,大于火车换乘火车的换乘惩罚附加值 5 min).文献[19]提出同种方式之间换乘的换乘惩罚附加值比不同种方式间换乘的换乘惩罚附加值小.文献[16]指出换乘所处的区域不同,所得到的换乘惩罚附加值也不同.

已有换乘惩罚(包括换乘时间惩罚和换乘惩罚附加值)的研究主要从单方式角度考虑,研究公交和轨道两种交通工具之间的换乘,而转换成本概念的提出从出行方式链角度出发,考虑方式链中各方式的组合模式,研究全方式(包括自行车、公交、轨道、出租车、小汽车)之间的转换.类比经济学中的“转换成本”的含义,将一种出行方式看作一种交通服务,研究出行者从一种交通服务转向另一种交通服务时所产生的一次性成本,即转换成本.由于转换成本的测算是将转换过程看成一个整体,故转换成本比单一的换乘时间惩罚或者换乘惩罚附加值更能准确描述方式间转换的广义费用,各级转换成本与方式链上各方式成本共同统一构成了成本链,加和即为出行方式链成本.

本文旨在探讨一种基于方式链的全方式之间综合转换成本的通用测算方法.首先建立了考虑心理因素的方式综合转换成本模型,然后以杭州市为例,进行实例分析,对该模型进行验证,最后得到了全方式之间的固定转换成本矩阵及变动转换成本模型.

1 考虑心理因素的方式综合转换成本建模

基于方式链的综合转换成本,提出了转换成本测算模型,该模型主要包括变动转换成本 c_v 和固定转换成本 c_f .变动转换成本 c_v 指随着转换过程中的转换时间(包括转换走动时间和转换等待时间)以及所处的转换级数变动而变动的成本.转换级数即所处的转换序数,若处于出行方式链中的第 2 次转换,则此时转换级数为 2,若处于出行方式链中的第 3 次转换,则此时转换级数为 3,以此类推.固定转换成本 c_f 是心理因素在转换过程中直接作用的结果,是一种因转换所引起的纯粹心理负担,与方式间转

换时间长短无关,只与转换模式有关系,一旦转换中上下游的方式确定,这种纯粹的心理负效用也将确定.由于影响变动转换成本 c_v 的因素取值在一次出行过程中变化较快,本文称这些变量为即时变量(例如转换时间,所处的转换级数).影响固定转换成本 c_f 的因素变化较慢,主要来源于出行者对于出行方式服务水平的既有认识和印象,本文称之为长时变量(例如转换环境,出行方式服务水平,城市整体交通运行状况等).

变动转换成本模型在已有的 3 类换乘时间惩罚模型上改进,第 1 类模型指换乘时间系数为常数,未考虑换乘次数,计算公式^[20]为

$$\varphi_a = \phi_0 + \phi \times t_a. \quad (1)$$

其中: φ_a 为换乘链接阻抗, ϕ_0 为换乘惩罚因子, ϕ 为换乘等待时间系数, t_a 为换乘等待时间.

第 2 类模型指构建换乘次数幂函数,同时作为换乘时间的系数,计算公式^[9,21-22]为

$$c = a \times k^\theta \times t_w. \quad (2)$$

其中: c 为换乘费用, a 为换乘心理感知强度放大系数, k 为累计换乘次数, θ 为换乘次数惩罚系数, t_w 为换乘等待时间.

第 3 类模型指换乘惩罚为换乘次数幂函数,同时也是换乘时间的幂函数,计算公式^[10]为

$$c = k^\theta (t_p^\gamma \times t_p + t_w). \quad (3)$$

其中: c 为换乘费用; k 为换乘次数; t_p 为换乘步行时间; t_w 为换乘等待时间; θ , γ 为待标定参数.

与以往模型不同的是,在本次建模中,变动转换成本模型既考虑转换次数对转换成本的影响,又考虑转换时间的非线性影响.将改进后的变动转换成本部分建立模型为

$$c_v = p_{v0} \cdot n \alpha e^{\beta t}. \quad (4)$$

式中 n 为转换级数, α 为转换级数惩罚因子, t 为转换时间, β 为转换时间惩罚因子, p_{v0} 为时间价值.

本模型认为转换心理阻抗对时间变化更为敏感,与转换时间之间用指数关系描述更为恰当,故建立关于转换时间的指数函数,给予更快的增长速度.当 $t = 0$,即换乘时间为 0 时,由于转换级数的影响,变动转换成本也不会为 0.同时,当系数为转换级数的幂函数时,可能会存在转换成本过大的情况,故本模型给予转换级数常数倍惩罚,得到每一级转换的转换成本.

固定转换成本方面,本次建模将考虑方式链的所有转换模式,构建全方式的固定转换成本矩阵.全方式的固定转换成本分类见表 1. E_{m-i} 表示从方式 m 转换到方式 i 的固定转换成本,其中 $m = 1, 2, 3, 4, 5$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$.该成本只与转换上下游的接驳

交通方式有关,为待标定参数, E_{1-1} 代表从自行车方式转换到自行车方式, E_{1-2} 代表从自行车方式转换到公交方式,以此类推。

表 1 固定转换成本分类

Tab.1 Classification of fixed conversion costs

上游	转换到下游方式 i 的固定转换成本				
方式 m	自行车 1	公交 2	地铁 3	出租车 4	私家车 5
自行车 1	E_{1-1}	E_{1-2}	E_{1-3}	E_{1-4}	E_{1-5}
公交 2	E_{2-1}	E_{2-2}	E_{2-3}	E_{2-4}	E_{2-5}
地铁 3	E_{3-1}	E_{3-2}	E_{3-3}	E_{3-4}	E_{3-5}
出租车 4	E_{4-1}	E_{4-2}	E_{4-3}	E_{4-4}	E_{4-5}
私家车 5	E_{5-1}	E_{5-2}	E_{5-3}	E_{5-4}	E_{5-5}

由于个体的年龄、性别、收入等因素的不同,在相同转换时间下,出行者的选择也会不同,因此方式综合转换成本模型中还考虑了出行者的个体因素。参考居民出行效用函数的构成,在构建变动转换成本 c_v 和固定转换成本 c_f 的同时,对每一个个体因素变量赋予各自的系数,三者相加共同构成完整的考虑心理因素和各种转换模式的方式综合转换成本模型。

综上,考虑心理因素的方式综合转换成本模型可表示为

$$w = c_v + c_f + \sum x \cdot g = p_{v0} \cdot n\alpha e^{\beta t} + E_{m-i} + \sum x \cdot g.$$

(5)

式(5) 表示个体 G 进行 m 方式到 i 方式转换,且所处的转换级数为 n ,转换时长为 $t(h)$ 的该级转换成本为 w (元)。 c_v 为变动转换成本,与转换时长和转换级数有关,随着转换时间的增加,转换成本呈指数增加,且这种增长趋势随着转级数的增加而加快。 α, β 为待标定参数。 g 代表个体 G 的个体属性和出行属性; x 为各属性变量对应的系数,为待标定参数。

2 WTP 问卷设计与调查

为了验证模型的准确性,需要对模型中的参数进行标定,本文以杭州市为例作了相关问卷调查。目前,杭州拥有常住人口 400 万,主城区面积 700 km²,私人小汽车保有量 200 万,截止到 2018 年 5 月,杭州公交 500 m 站点覆盖率达到 80%,线网覆盖率达到 71%,同时杭州市也具有相对完善的公共自行车租赁服务系统和非机动车出行设施保障系统。2016 年,杭州自行车日平均出行次数 17.2 万次。根据杭州市居民出行数据调查,步行和自行车或助动车仍然是居民主要的出行方式,占总出行方式的 60% 以上。各方式之间转换行为在出行中大量存在,其成本不可小觑。通过杭州市城市居民出行方式链及转换成本问卷调查,获取各样本为了避免转换所

愿意支付的最大价格,运用多元非线性回归对参数 $\alpha, \beta, E_{m-i}, x$ 进行标定。

2.1 最大支付意愿调查

进行最大支付意愿(WTP)的引导方法主要有: 1) 开放式出价法。以问卷形式模拟出公共物品或服务的交易市场后,直接询问受访者的支付意愿或受偿意愿,获得其非市场价值。此类方法优点在于自由度大,数据范围广,易于操作,便于回答,不存在起点偏差、中点偏差、范围偏差的问题,但存在着问卷拒答率较高的缺点。2) 支付卡法。在问卷中设置好一组标的值,受访者只需在问卷给出的选项中进行选择即可。此类方法的优点在于将可供选择价值限定在一定范围内,避免了开放式问卷迫使受访者评估公共物品价值的问题,但存在受访者受限于选项中给出的价格,容易受到“徘徊”心理影响选择价格较低的选项的缺点。3) 二分选择法。询问被调查者是否愿意支付之后再调查愿意支付的数值或不愿意支付的原因。此类方法的优点在于能减少受访者因不熟悉物品或服务的非市场价值评估而导致的偏差,但缺点是由于主观给出选项,可能存在偏差,同时选定价格、选定排序的不同都容易造成结果的不同。

考虑到不同的被调查者均根据自身实际出行方式链填写转换时间、转换模式,必然会有许多不同的场景,调查方法既无法利用支付卡法事先拟定各种可能支付价格,也无法利用二分选择法事先主观给出选项,所以采用开放式出价法。应用条件价值法(CVM)^[23]研究支付意愿,将最大支付意愿界定为出行者根据各种交通方式的特点与体验,为了得到假想条件下避免方式转换的服务,实现无缝衔接的换乘,拥有直达般体验所愿意支付的最大价格。

2.2 调查问卷的设计

为得到出行者为了避免转换愿意支付的最大价格,验证模型的准确性,并为方式链的转换成本模型中相关参数的估计建立数据基础,本研究于 2018 年 1 月 15 日至 2018 年 2 月 5 日期间开展了线上和线下问卷相结合的问卷调查。通过问卷星设计线上问卷^[24]并进行预调查,问卷采用了逻辑关联设置,根据被调查者前面填写常用出行方式链转换模式,自动跳转至下一步对应的为了避免该种类型转换愿意支付的价格页面。为了扩大样本量,招募 15 位线上问卷发放团队,尽可能覆盖多的区域,通过多种线上渠道,网站(微信、微博、问卷星等)进行发放,保证样本的有效性。线下调查中,由被调查者(杭州市所有使用市政道路各类人群)自行填写,调查者会在填写过程中给予指导。由于实地调查时,杭州地铁只有 1 号线和 2 号线全线开通,分别贯穿南北向和

东西向,所以在杭州地铁 1 号线和 2 号线上跟车调查,同时在地铁线路周围随机选取公交线路进行驻站调查,其中 93 路公交车主要辐射到达写字楼、杭州东站人群,10 路公交车主要辐射到达景区、市中心、写字楼区域人群,74 路公交车由西到东,主要辐射到达居民区,高校的人群. 在现有地铁框架下,地铁线路和公交线路在人群和区域覆盖上互为补充,公交线路既和地铁有换乘衔接点,又能链接地铁线路到达不了的地方,使得在硬件条件限制下,能高效的完成此次调查.

问卷内容分为两部分,第 1 部分是 RP 调查,第 2 部分是最大支付意愿调查. 根据建模考虑到的要素及实际路网上的出行者特点,RP 调查将从以下两方面数据收集:1)出行者个体特征.包括性别,年龄,月收入,受教育程度. 2)出行者出行特点.包括通常出行时间段,出行目的,完成该种目的使用的出行方式链,如图 1 所示.

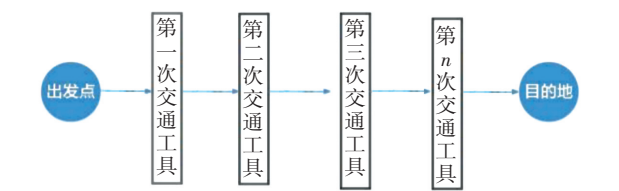


图 1 出行方式链示意图

Fig.1 Schematic diagram of travel mode chain

第 2 部分最大支付意愿调查,基于出行者之前填写的出行方式链,调查每级转换过程中的转换等待时间和转换步行时间,以及自行填写为了避免各级转换过程中的转换时间和转换麻烦、转换阻抗所愿意支付的最大价格. 若出行者填写的出行方式链为“公交-公交-地铁”,则会针对各级转换过程分别询问,比如针对第一级转换的调查问卷的内容截图,如图 2 所示.

*您出行第一次使用的交通工具是:

☐ 电动车/自行车 (小黄等)
☒ 公交车
☐ 地铁轨道
☐ 出租车
☐ 私家车

*您出行第二次使用的交通工具是:

☐ 电动车/自行车 (小黄等)
☐ 公交车
☐ 地铁轨道
☐ 出租车
☐ 私家车

*从您下公交车到您这次坐上公交车,这一段换乘时间 (包括候车时间) 通常为 _____ 分钟,其中步行时间为 _____ 分钟.

此时您已经是第1次换乘,您此时最多愿意花 _____ 元钱免去公交车、公交车之间全部换乘时间和上下车、拥挤、投币等所有换乘麻烦,实现无缝衔接的换乘,拥有直达般的体验.

图 2 问卷内容截图

Fig.2 Screenshot of questionnaire contents

3 样本基本特征分析

本研究通过问卷调查共回收问卷 515 份,经过筛选一些理解错题意,逻辑不符合的问卷后,共获得有效问卷 486 份. 由于在 95%的置信水平下,最大

误差为 5%, $p = 0.64$,所需样本数为 355 份^[25];当按照最保守估计, $p = 0.5$ 时,所需样本数为 384 份^[26]. 本文的研究样本数均大于所需样本数,故对此数据进行统计分析.

问卷的设置主要考虑了可能会影响支付意愿的出行者的个体属性和出行属性(比如男性相比于女性可能耐心更差,对于免去转换的支付意愿更高,老人和小孩对于转换的感受则可能没有年轻人或者中年人那么强烈等).

样本初步分析时对每个变量的属性均进行编码预处理,为之后的代入模型计算建立基础. 性别 g_1 编码为 1 和 2;年龄 g_2 按大小分为 5 个阶段,从小到大依次编码为 1, 2, 3, 4, 5;月收入 g_3 和受教育程度 g_4 按照从低到高分 4 个阶段,依次编码为 1, 2, 3, 4;出行目的 g_5 按照时间的紧迫程度依次编码为 1, 2, 3, 4, 5, 6. 有关样本特征的具体统计分析结果见表 2.

表 2 样本特征统计

Tab.2 Statistics of sample features				
属性	分类	属性编码	频数/人	分类百分数/%
性别	男	1	202	42
	女	2	284	58
年龄	0~18 岁	1	7	1.4
	19~25 岁	2	290	59.7
	26~35 岁	3	141	29
	36~50 岁	4	38	7.8
	51~65 岁	5	10	2
	66 岁及以上	6	0	0
月收入	0~3 000 元	1	275	56.6
	3 001~5 000 元	2	91	18.7
	5 001~10 000 元	3	76	15.7
	10 001 元及以上	4	44	9
受教育程度	小学及以下	1	0	0
	初中	2	10	2
	高中	3	13	2.7
	大学及以上	4	463	95.3
出行目的	上/下班(学)	1	228	47
	商务办公出差	2	23	4.7
	就医	3	2	0.3
	探亲访友	4	10	2
	休闲娱乐购物	5	213	44
	其他	6	10	2
出行方式	1 次(直达)	0	198	40.74
	2 次(换乘 1 次)	1	210	43.21
	3 次(换乘 2 次)	1,2	57	11.73
	4 次(换乘 3 次)	1,2,3	17	3.50
	5 次(换乘 4 次)	1,2,3,4	4	0.82
	6 次及以上 (换乘 5 次及以上)	1,2,3,4,5...	0	0

同时经过调查,在换乘次数方面,出行方式链中直达频数:换乘 1 次频数:换乘 2 次频数:换乘 3 次频数=16:16:4:1. 调查结果还指出,有一些转换模式,比如自行车转私家车、公交转出租车等使用频率较低或者并不存在的情况,所以将这些不存在的转换模式从表 1 中剔除,将剩下的 14 种转换模式从 E_1 到 E_{14} 依次表示,见表 3. 接下来通过问卷数据对存在的 14 种转换模式的固定转换成本进行标定.

表 3 现有固定转换成本

上游方式	转换到下游方式的固定转换成本				
	自行车	公交	地铁	出租车	私家车
自行车	—	E_1	E_2	E_3	—
公交	E_4	E_5	E_6	—	—
地铁	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
出租车	—	E_{12}	E_{13}	—	—
私家车	—	E_{14}	—	—	—

4 参数标定

4.1 参数标定结果

将收集到的数据进行处理,舍弃出行者直达的问卷数据后,对于出行者 i 共计转换 1 次的数据,将其记录为转换级数为 1 的一组数据,该组数据包括出行者的个人属性($g_{1,i}, g_{2,i}, g_{3,i}, g_{4,i}$)、出行者的出行属性($g_{5,i}$, 出行者所处的转换级数 n (此组数据 $n = 1$)、该级转换耗费的时间 t_i 、该级转换所属的转换模式 $E_{j,i}(j = 1, 2, \dots, 14)$ 以及为了避免该级转换所最多愿意支付的价格 $w_{n,i}$;对于共计转换 2 次出行者的出行数据,则分别记录转换级数为 1 和 2 两组数据(此两组数据 $n = 1, 2$),每组数据所包含的记录与上述相同;对于出行者共计转换 3 次的数据(此三组数 $n = 1, 2, 3$),分别记录转换级数为 1, 2, 3 三组数据. 以此原则共获得 372 组数据,通过最小二乘法对式(5) 进行多元非线性回归拟合:

$$J(\alpha, \beta, E_1, \dots, E_{14}, x_1, \dots, x_5) = \sum_{i=1}^{372} \delta_i^2 =$$
$$\sum_{i=1}^{372} [f(x_i) - w_i]^2 = \sum_{i=1}^{372} \sum_{n=1}^3 [p_{v0} \cdot n\alpha e^{\beta t_i} +$$
$$\sum_{j=1}^{14} (\lambda_{j,i} \cdot E_{j,i}) + \sum_{p=1}^5 (x_p \cdot g_{p,i}) - w_{n,i}]^2. \quad (6)$$

其中 $\lambda_{j,i}$ 为虚拟变量,若样本 i 选择了某项转换模式 $E_{j,i}$,则该模式前的系数 $\lambda_{j,i}$ 为 1,该样本的其余转换模式前系数为 0,且 $\sum_{j=1}^{14} \lambda_{j,i} = 1$.

通过 MATLAB 拟合,使得 $J(\alpha, \beta, E_1, \dots, E_{14}, x_1, \dots, x_5)$ 最小,得到各参数的估计值及各参数的 t

统计量. 根据分析标定结果, g_1, g_2, g_4 三个变量不显著,可能性别对最终的支付意愿的基本没有影响. 由表 2 可知,调查对象的年龄大多数集中在 19 ~ 35(88.7%) 之间,调查对象的教育程度大多数集中在大学及以上(95.3%),可能导致年龄和教育程度不显著,故本文剔除性别 g_1, g_2, g_4 ,再次进行模型拟合后,各参数的估计值见表 4.

表 4 参数估计值

Tab.4 Parameter estimates			
参数类型	变量名称	参数符号	估计值
待定系数	转换级数因子	α	0.082 3
	转换时间因子	β	3.716 0
转换模式(上游方式 - 下游方式)	自行车 - 公交	E_1	1.576 2
	自行车 - 地铁	E_2	2.068 7
	自行车 - 出租车	E_3	1.735 4
	公交 - 自行车	E_4	2.242 8
	公交 - 公交	E_5	2.156 1
	公交 - 地铁	E_6	1.714 4
	地铁 - 自行车	E_7	1.218 3
	地铁 - 公交	E_8	1.9755
	地铁 - 地铁	E_9	3.860 5
	地铁 - 出租车	E_{10}	2.993 6
	地铁 - 私家车	E_{11}	2.885 9
	出租车 - 公交	E_{12}	3.553 5
	出租车 - 地铁	E_{13}	9.662 2
	私家车 - 公交	E_{14}	6.853 3
个人属性系数	收入系数	x_3	0.100 2
	出行目的系数	x_5	0.093 0

结果表明,参数 $\alpha > 0$,表示转换成本和转换级数呈正相关, $\beta > 0$ 表示随着转换时间的增加,转换成本增加的越来越快,呈指数型增加. 固定转换成本即 E 值方面,不同方式之间的固定转换成本大部分集中在 1 ~ 4 元之间,部分转换模式的固定转换成本达到了 10 元. 其中 E_1 为 1.576 2 元,由表 3、4 可知,表示自行车转换公交车的固定转换成本是 E_1 ,对应成本为 1.576 2 元, E_2 为 2.068 7 元,表示自行车转换地铁的固定转换成本为 2.068 7 元,依次类推,可得到各种交通转换模式的固定成本. 同时,当两种交通方式以不同的转换顺序构成不同的转换模式时,所具有的固定转换成本也不相同. 比如 E_6 表示公交转换地铁的固定转换成本为 1.714 4 元, E_8 表示地铁转换公交的固定转换成本为 1.975 5 元. 此外,出行者个体的因素也影响着转换成本,根据表 2 的属性编码原理, $x_3 > 0$ 表示出行者收入越高,转换对于该出行者的成本越高; $x_5 > 0$ 代表随着出行目的

越趋向于通勤出行,由于对线路较为熟悉以及出行频率较高,固定转换成本相对较低。

4.2 模型评价

4.2.1 模型拟合优度检验

评价回归模型整体拟合程度多用 F 检验, F 检验是单侧检验, F 值越大,表示模型拟合得越好。 $F = (SSR/p)/[SSE/(n - p - 1)]$ 该统计量 F 服从自由度为 $(p, n - p - 1)$ 的 F 分布,当 $F > F(p, n - p - 1)$ 时拒绝零假设,表示至少有一个回归系数不为 0,模型是有意义的,否则不能拒绝零假设,模型无意义。本文中, $F = 6.7 > F(18, 372 - 18 - 1) = 1.67$,故该模型是有意义的,而且拟合良好。

4.2.2 回归系数 t 检验

检验回归系数拟合程度多用 t 统计量 $t_i = \hat{\beta}_i/S_{\beta_i}$, S_{β_i} 为回归系数 β_i 的样本标准差,假设当该系数为 0 的零假设成立时,该 t_i 统计量服从自由度 $(n - p - 1)$ 的 t 分布,对于给定的显著性水平 α' ,当 $|t_i| > t_{\alpha'/2}(n - p - 1)$ 时,拒绝该系数为 0 的零假设。对全样本进行参数估计后,对各参数进行显著性分析,计算 t 统计量,结果见表 5。

表 5 各参数 t 统计值

Tab.5 t -statistic of each parameter

参数	估计值	标准误差	t 统计量
α	0.082 3	0.186 0	0.451
β	3.716 0	0.764 2	4.957 5 ***
E_1	1.576 2	0.257 9	6.230 7 ***
E_2	2.068 7	0.203 3	10.376 0 ***
E_3	1.735 4	0.766 6	2.308 1 **
E_4	2.242 8	0.392 2	5.830 6 ***
E_5	2.156 1	0.286 4	7.645 0 ***
E_6	1.714 4	0.290 4	6.019 3 ***
E_7	1.218 3	0.319 4	3.888 7 ***
E_8	1.975 5	0.353 5	5.696 8 ***
E_9	3.860 5	0.468 4	8.402 4 ***
E_{10}	2.993 6	0.766 6	3.981 3 ***
E_{11}	2.885 9	0.108 1	2.724 1 ***
E_{12}	3.553 5	0.883 5	4.100 5 ***
E_{13}	9.662 2	1.080 1	9.120 4 ***
E_{14}	6.853 3	1.080 1	6.469 0 ***
x_3	0.100 2	0.103 9	0.96
x_5	0.093 0	0.048 8	1.943 6 *

注:***表示置信度为 99%,**表示置信度为 95%,*表示置信度为 90%。

α 没有通过显著性检验可能是因为相比于转换时间而言,转换级数并未在很大程度上影响支付意愿,由于对于转换级数在 3 以上的样本相对较少,在

后期可以对较高转换级数的转换支付意愿进行针对性调查。 x_3 没有通过显著性检验,可能在于转换费用本身相对于月收入来说数量金额较小,并不能在转换费用上将各个收入层次的出行者分开,对于各个收入层次的出行者来说,都是在可以接受范围内的。

5 结 论

1)明确提出方式综合转换成本包括变动转换成本和固定转换成本,既包含了以往的换乘时间惩罚,也包括换乘附加值惩罚,用转换时间的指数函数和转换级数相结合的形式更贴切地描述了出行者转换过程的心理状态。

2)本调查所收集到的问卷主要用于对建模方法的验证。本文模型标定数据来源于杭州市,不同城市的交通网络、交通运行状况以及当地的人口结构、经济发展水平不同,具体的模型参数可能在不同的城市会有不同的结果。

3)目前模型中变动转换成本主要考虑了转换时间、转换级数等因素,随着出行当天的天气状况,气温等即时因素变化,变动成本可能也会因此变动。固定转换成本在短期内不会大幅变动,随着研究城市的交通服务水平,交通环境等长时因素的改善,固定转换成本可能会发生改变。

参考文献

[1] 叶盈. 出行方式链成本测算方法研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2015
YE Ying. Study on the method of travel mode chaining cost [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015

[2] ALGERS S, HANSEN S, TEGNER G. Role of waiting time, comfort, and convenience in modal choice for work trip [J]. Transportation Research Record, 1975(534): 38

[3] WANG Ting, KE Siping. Transfer penalty of public transport [C]// 2nd International Conference on Education, Sports, Arts and Management Engineering (ICESAME 2017). Zhengzhou: Atlantis Press, 2017: 1711. DOI: 10.2991/icesame-17.2017.365

[4] GONG Xiaolin, CURRIE G, LIU Zhiyuan, et al. A disaggregate study of urban rail transit feeder transfer penalties including weather effects [J]. Transportation, 2018, 45(5): 1319. DOI: 10.1007/s11116-017-9768-0

[5] CASCAJO R, GARCIA-MARTINEZ A, MONZON A. Stated preference survey for estimating passenger transfer penalties: design and application to Madrid [J]. European Transport Research Review, 2017, 9(3): 42. DOI: 10.1007/s12544-017-0260-x

[6] HAN A F. Assessment of transfer penalty to bus riders in Taipei: a disaggregate demand modeling approach [J]. Transportation Research Record, 1987(1139): 8. DOI: 10.2514/6.1987-1588

[7] LIU Rongfang, PENDYALA R M, POLZIN S. Assessment of inter-modal transfer penalties using stated preference data [J]. Transportation Research Record, 1997, 1607(1): 74. DOI: 10.3141/1607-11

- [8] GUO Zhan, Jr FERREIRA J. Pedestrian environments, transit path choice, and transfer penalties: understanding land-use impacts on transit travel [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2008, 35(3): 461. DOI:10.1068/b33074
- [9] SI Bingfeng, ZHONG Ming, LIU Jianfeng, et al. Development of a transfer-cost-based logit assignment model for the Beijing rail transit network using automated fare collection data [J]. Journal of Advanced Transportation, 2013, 47(3): 297. DOI: 10.1002/atr.1203
- [10] 钱堃, 陈垚, 毛保华. 考虑换乘时间影响的城市轨道交通路径选择行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 116
QIAN Kun, CHEN Yao, MAO Baohua. Route choice behavior for urban rail transit considering transfer time[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(2): 116. DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2015.02.018
- [11] GUO Zhan. Assessment of the transfer penalty to transit trips in downtown Boston: a GIS-based disaggregate modeling approach[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2003
- [12] GUO Zhan, WILSON N H M. Assessment of the transfer penalty for transit trips geographic information system-based disaggregate modeling approach [J]. Transportation Research Record, 2004, 1872(1): 10. DOI:10.3141/1872-02
- [13] HOROWITZ A J, ZLOSEL D J. Transfer penalties: another look at transit riders' reluctance to transfer[J]. Transportation, 1981, 10(3): 279. DOI:10.1007/BF00148463
- [14] CURRIE G. The demand performance of bus rapid transit[J]. Journal of Public Transportation, 2005, 8(1): 3. DOI:10.5038/2375-0901.8.1.3
- [15] HOOGENDOORN-LANSER S, Van NES R, HOOGENDOORN S P. Modeling transfers in multimodal trips: explaining correlations [J]. Transportation Research Record, 2006, 1985(1): 144. DOI: 10.1177/0361198106198500116
- [16] YOO G S. Transfer penalty estimation with transit trips from smart-card data in Seoul, Korea[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(4): 1108. DOI:10.1007/s12205-013-1297-6
- [17] HUNT J D. A logit model of public transportation route choice[J]. ITE Journal, 1990, 60(2): 26
- [18] GUO Zhan, WILSON N H M. Modeling effects of transit system transfers on travel behavior: case of commuter rail and subway in downtown Boston, Massachusetts [J]. Transportation Research Record, 2007, 2006(1): 11. DOI:10.3141/2006-02
- [19] DOUGLAS N J, JONES M. Estimating transfer penalties and standardised income values of time by stated preference survey [C]// 36th AustralianTransport Research Forum. Brisbane, Queensland, Australia: ARRB Group Ltd., 2013:21
- [20] 李想. 考虑换乘的多模式城市交通网络配流问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015
LI Xiang. Multi-modal urban mixed traffic network assignment based on transfer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015
- [21] 刘剑锋. 基于换乘的城市轨道交通网络流量分配建模及其实证研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012
LIU Jianfeng. Transfer-based modeling flow assignment with empirical analysis for urban rail transit network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012
- [22] 赵微. 考虑路径约束的城市多模式交通流分配模型与算法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016
ZHAO Wei. Research on urban multi-modal traffic assignment and algorithm problem based on path constraint [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016
- [23] DAVIS R K. Recreation planning as an economic problem [J]. Natural Resources Journal, 1963, 3(2): 239. DOI: 10.2307/1286621
- [24] 罗玉芳. 杭州市居民出行方式转换支付意愿调查问卷 [EB/OL]. (2018-01-15) [2018-04-10]. <https://www.wjx.top/jq/22339461.aspx>
- [25] 乔新. 抽样设计中样本量的确定 [J]. 山东统计, 2005(6): 27
QIAO Xin. Determination of sample capacity in sampling design [J]. Shandong Statistics, 2005(6): 27
- [26] 王博彬. 多方式交通信息服务下节假日活动链重构及演化研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017
WANG Bobin. Reconstruction and evolution analysis of holiday activity chain under integrated multimodal travel information service [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017

(编辑 魏希柱)