

通勤交通方式链适应性评价与优化导向

吴娇蓉¹, 余 森¹, 周冠宇²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 从通勤者视角, 将通勤距离分为长、中、短 3 组, 采用统一的出行时耗可接受度评价标准, 从门到门行程速度、广义成本、可靠性、满意度和选择比例分别分析不同通勤距离分组下各方式链的行程速度、可靠性、广义成本与满意度相关性, 基于相关性分析结果建立适应性好的方式链判断标准。根据这一判断原则, 挑选出通勤距离分组下适应性好的方式链类型, 以适应性好的方式链所具有的特征指标为参照对象、公共交通优先发展为约束条件, 提出通勤距离长、中、短分组中各交通方式链优化导向, 为通勤交通服务质量的改善提供决策参考。

关键词: 通勤距离; 交通方式链; 适应性; 时耗可接受度; 广义成本; 满意度; 优化导向

中图分类号: U121

文献标志码: A

Adaptability Evaluation and Optimization Guidance of Commuting Traffic Mode Chain

WU Jiaorong¹, YU Miao¹, ZHOU Guanyu²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Zhejiang Transport Planning and Design Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract: From the perspective of commuters, the commuting distance was divided into three groups including long, medium and short commuting distance and a unified evaluation criteria about the acceptability of travel time was used in this article. From five dimensions of door-to-door travel speed, general cost, reliability, satisfaction and choice ratio, various traffic mode chains in three group of distance are analyzed. Based on the results of correlation analysis between the travel speed, reliability, general cost and satisfaction for each group of commuting distance, judgment criterion of the adaptability was established and the traffic mode chain with good adaptability was selected. Finally, with the characteristic of the traffic mode chain with good adaptability as reference objects, optimization guidance for

each traffic mode chain in long, medium and short commuting distance was proposed under the constraint on prior development of public transport, which was used to provide decision reference for the improvement of commuting traffic service.

Key words: commuting distance; traffic mode chain; adaptability; adoption of travel time; general cost; satisfaction; optimization guidance

通勤交通的刚性决定了其对准时性和单次出行时耗均有较高的要求。随着城市范围的逐渐扩大, 通勤距离逐渐变长, 以多种交通方式换乘衔接的方式链成为居民通勤的主要形式。方式链的门到门时间受各个环节影响, 即使主要交通方式速度和服务质量高, 但多个接驳环节的配合出现瑕疵后, 也会使得整个方式链的速度、广义成本、耗时等指标有较大变化。理论上方式链可以有很多种组合, 但在通勤交通出行中, 被出行者真正选择的方式链类别是有限的。且随着出行距离长、短不同, 被出行者选择的方式链类型也会呈现差异性, 即不同方式链在不同距离范围内, 会呈现出适应性差别。另一方面, 通勤者在选择交通方式链时往往综合考虑全过程总耗时、广义费用、换乘接驳便捷性、衔接顺畅性以及主观感受(如全过程舒适性、私密性等), 因此, 分析方式链适应性显然比单一交通方式来得复杂。

本文从通勤者视角, 提出通勤距离分组方法, 比较各类交通方式链耗时可接受度下的选择比例、相对门到门行程速度、广义成本和主观满意度等指标, 剖析各种通勤者交通方式链的适应性; 根据“公共交通优先发展战略”规划, 对各类通勤方式链把脉与诊断, 分析短、中、长通勤距离分组下主、客观指标适应性好的方式链, 筛选出不同距离分组下需优化的方式链类型, 分析方式链优化导向。

收稿日期: 2018-03-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71734004)

第一作者: 吴娇蓉(1973—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理。

E-mail: wujiaorong@tongji.edu.cn



吴娇蓉老师访谈录

1 研究综述

随着居民通勤出行距离不断增加,出行方式由“单一交通工具”向“多种交通工具换乘”转移,方式链由于侧重研究出行方式间的衔接换乘而逐渐成为国内职住分离趋势下研究通勤行为的主要对象。由活动分析理论的出行链引申出的方式链相比主要交通方式更能反映通勤全程特征,逐渐被学者们采用^[1-3]。目前对方式链的相关研究较多集中在居民出行特征和方式链成本测算、轨道客流分析等方面。王伊丽指出出行方式链具有一致性和转换性,并基于居民出行数据说明个人属性对出行方式链的选择起着重要作用^[4]。叶盈从出行方式链的成本构成出发,重点研究出行方式间的换乘成本,从而建立出行方式链成本模型,并应用于分析杭州市城市居民出行成本^[5]。吴娇蓉等从方式链的角度对上海市居民通勤特征加以分析,对地铁、公共汽车和复杂方式链进行客观效率评价,得出接驳和候车是必要且易于改善的重点环节,显著地影响通勤者对通勤时间的感知^[6]。史晟等提出基于方式链的轨道交通客流分析方法及在实际应用中的分析流程^[7]。董志国从轨道交通出行多方式组合特征入手,建立轨道交通出行方式链模型,深入揭示轨道站点周边用地、配套交通设施与轨道客流的关系,从而提高轨道客流预测分析技术的可靠性^[8]。

目前对方式链的相关研究较为有限,对方式链的评价也仅限于客观效率层面,忽略了出行者对方式链的主观感受、综合成本、耗时可接受度、满意度、可接受程度的深层次关联研究。

2 方式链定义及数据准备

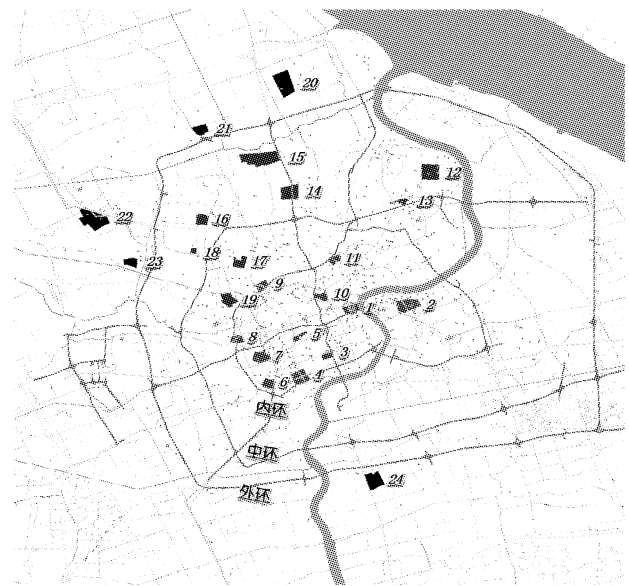
2.1 方式链定义

方式链详细表述出行全过程,侧重体现出行方式间的衔接换乘情况。根据活动层次下的出行链定义,确定交通层次下的通勤方式链定义如下:①一个以家为起点、工作单位为讫点(反之亦可)的单向方式段序列;②方式段是指一次通勤多种交通方式中2个相邻换乘点(或接驳点)之间的出行过程,方式段的组合即为方式链,包含交通方式换乘、接驳的全过程。

2.2 数据采集情况

于2014—2016年在上海市内选择24个居住小

区(图1)进行问卷调查,调查小区的选取综合考虑了区位特征、住宅类型、社会经济背景等因素,兼顾位于不同区位、不同收入水平和职业背景的居住小区,保证调查对象的代表性和典型性。采用问卷调查形式,内容主要包括个人基本信息、居民通勤出行信息和通勤出行满意度评价3个部分。为了提高抽样调查的准确率和可信度,本次调查采取现场发放问卷、现场填写回收的方式完成。共发放问卷2 196份,其中有效问卷共2 088份,问卷有效率95.1%。其中,男性1 108份,女性980份,分别占有效问卷总数的53.1%和46.9%。问卷调查所得方式链有效数据共计2 022条,包括27类交通方式组成情况。



1. 中福城;2. 崂山一村;3. 海华花园;4. 东安一村;5. 东湖小区;6. 中漕小区;7. 新华豪庭;8. 中山公寓;9. 石泉一村;10. 华祺苑;11. 华星公寓;12. 殷行一村;13. 建新小区;14. 彭浦新村;15. 共康雅苑;16. 金祁新城;17. 中环花苑;18. 李子园花苑;19. 曹杨二村;20. 四季花城;21. 韶光花园;22. 永翔佳苑;23. 嘉城桃花岛;24. 绿波家园

图1 调查居住区分布

Fig.1 Distribution of surveyed residential districts

为了研究方便,根据所属交通系统不同和复杂程度将方式链分为10大类别,如表1。

2.3 通勤交通方式链分类与通勤距离分组

通勤距离的长短反映居民居住地与工作地的客观远近,并影响着居民对通勤方式链的选择,故首先讨论通勤距离分组。绘制通勤距离累积频率曲线,如图2所示。全样本量的平均通勤距离为9.10 km,比上海市第五次综合交通调查(2014年)的全市平均通勤出行距离8.20 km略长。选取通勤距离的50%、70%、85%分位点6 km、11 km、18 km将通勤

表 1 方式链分类

Tab.1 Classification of traffic mode chain

序号	出行方式链	样本量/个	比例/%	说明
1	小汽车	464	23	私人小汽车(出租汽车)直达
2	步行	338	17	步行直达
3	地铁换乘	302	15	步行接驳的多次地铁换乘
4	地铁直达	292	14	步行接驳的地铁直达
5	公交直达	198	10	步行接驳的公共汽车直达
6	电动自行车	158	8	电(助)动自行车直达
7	多方式换乘	130	6	个体交通、公共交通方式组合
8	自行车(含共享单车)	72	4	自行车直达
9	公交换乘	38	2	步行接驳的公共汽车换乘
10	班车直达	30	1	班车直达
总计		2 022	100	

距离分为 3 组:短通勤距离 0~6 km 组,当量面积不大于 113 km²(当量面积指以通勤距离为半径对应的圆面积);中通勤距离 6~11 km 组,当量面积为 113~380 km²;通勤距离 11~18 km 组,当量面积为 380~1 017 km². 3 组通勤距离对应方式链情况如表 2 所示. 可以看出,短通勤距离分组中出现了 7 种方

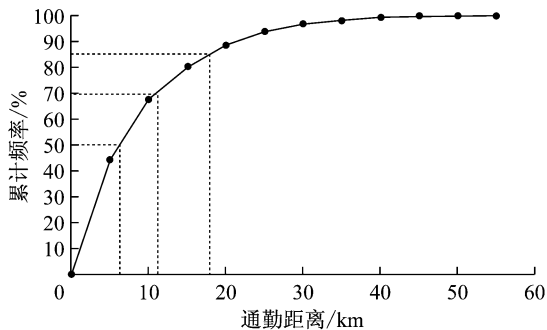


图 2 通勤距离累积频率分布曲线

Fig.2 Cumulative frequency distribution of commuting distance

表 2 不同通勤距离分组对应方式链情况

Tab.2 Corresponding traffic mode chains of three commuting distance groups

出行方式链	短通勤距离	中通勤距离	长通勤距离
小汽车	✓	✓	✓
步行	✓		
地铁换乘	✓	✓	✓
地铁直达	✓	✓	✓
公交直达	✓	✓	✓
电动自行车	✓	✓	✓
多方式换乘		✓	✓
自行车	✓	✓	
公交换乘		✓	✓
班车直达			✓

式链;中距离和长距离分组中出现了 8 种方式链,少了步行方式链,出现了多方式换乘、公交换乘、班车直达方式链.

3 方式链行程速度与出行时耗可接受度分析

出行时耗可接受度分析与“出行距离与时间之比”的出行平均速度指标结合,可以考察出行效率,即在同一通勤距离分组中,方式链使用越少的出行耗时完成相应出行则效率越高.

根据国内外学者研究,居民日均出行时耗具有相对稳定性,通勤通学单次出行时间平均值接近 30 min^[9-10],本次调查的平均值是 35.3 min. 因此,不论通勤距离的长短,居民可接受的出行时耗是相对稳定的,针对所有方式链在三类通勤距离中的“门到门”时间,确定统一的出行时耗可接受度评价标准: ① 通勤者单次通勤“门到门”时间在 60~90 min 时,为通勤出行时耗可接受度较差. ② 通勤者单次通勤“门到门”时间在 40~60 min 时,为通勤出行时耗可接受度一般. ③ 通勤者单次通勤“门到门”时间在 40 min 以下时,为通勤出行时耗可接受度较好.

结合通勤距离分组的各种方式链出行时耗可接受度分析如表 3 所示. 由表中可知,短通勤距离分组中 97.6% 的方式链出行时耗不超过 40 min,可接受度较好;中通勤距离分组中,77.7% 的方式链出行时耗不超过 40 min,可接受度较好;21.3% 的方式链出行时耗在 40~60 min 之间,可接受度一般;长通勤距离分组中,仅 17.0% 的方式链出行时耗不超过 40 min,可接受度较好;37.0% 的方式链出行时耗在 60~90 min 之间,可接受度较差.

进一步分析不同通勤距离分组中方式链速度与选择比例(如表 4 所示),短通勤距离分组中出行时耗可接受度较好的方式链按照实际选择比例排名前五的方式链为步行、小汽车、地铁直达、公交直达、电动自行车;中通勤距离分组选择比例排名前五的方式链为小汽车、地铁直达、地铁换乘、公交直达、电动自行车;长通勤距离分组中方式链选择比例较为集中,排名前四的方式链为小汽车、地铁直达、地铁换乘、多方式换乘. 但是,短、中、长通勤距离分组中,方式链的行程速度与选择比例并未呈现出正相关关系,即行程速度越快、选择比例越大.

考虑到公共交通与小汽车交通门到门行程速度比值在 1.5 之内是居民出行方式链选择时重要影响因素^[11],则短通勤距离分组中只有速度不小于 12.8

表 3 不同通勤距离分组的方式链选择比例

Tab.3 Ratio of chain selection of different commuting distance groups

距离分组	出行方式链	85%位行程速度/(km·h ⁻¹)	可接受程度比例/%		
			较好	一般	较差
短通勤距离	小汽车	19.2	15.4	0	0
	电动自行车	17.2	12.2	0.1	0
	自行车	13.3	6.3	0.1	0
	地铁直达	13.0	14.0	1.0	0
	地铁换乘	10.4	3.8	0	0
	公交直达	8.4	13.3	1.0	0.2
	步行	4.5	32.6	0	0
总计			97.6	2.2	0.2
中通勤距离	小汽车	23.8	27.2	2.5	0
	电动自行车	21.4	5.9	0.5	0
	地铁直达	18.2	19.3	4.0	0
	地铁换乘	16.5	18.8	4.5	0.4
	自行车	13.8	2.0	0.5	0
	公交直达	11.9	2.2	6.4	0.5
	多方式换乘	10.6	2.3	1.4	0
公交换乘	10.3	0	1.5	0.1	
总计			77.7	21.3	1.0
长通勤距离	小汽车	30.3	10.7	15.6	4.7
	地铁直达	21.2	1.0	7.0	1.0
	地铁换乘	20.1	3.7	16.7	9.7
	电动自行车	19.9	0	0.7	1.0
	班车直达	17.5	0.6	2.0	0.7
	公交直达	16.2	0	0.7	2.3
	多方式换乘	14.8	1.0	3.0	13.3
公交换乘	13.3	0	0.3	4.3	
总计			17.0	46.0	37.0

表 4 不同通勤距离分组中方式链速度与选择比例

Tab.4 Speed and the selection ratio of different commuting groups

出行方式链	短通勤距离		中通勤距离		长通勤距离	
	85%行程速度/(km·h ⁻¹)	出行时耗可接受度较好的比例/%	85%行程速度/(km·h ⁻¹)	出行时耗可接受度“较好”+“一般”的比例/%	85%行程速度/(km·h ⁻¹)	出行时耗可接受度“较好”+“一般”的比例/%
步行	4.5	32.6				
小汽车	19.2	15.4	23.8	29.7	30.3	26.3
地铁直达	13.0	14.0	18.2	23.3	21.2	8.0
地铁换乘	10.4	3.8	16.5	23.3	20.1	20.4
公交直达	8.4	13.3	11.9	8.6	16.2	0.7
电动自行车	17.2	12.2	21.4	6.4	19.9	0.7
多方式换乘			10.6	3.7	14.8	4.0
自行车	13.3	6.3	13.8	2.5		
公交换乘			10.3	1.5	13.3	0.3
班车直达					17.5	2.6
总计		97.6		99.0		63.0

般通过模型公式计算得到,其中车辆折旧成本采用固定资产的平均年限折旧法计算得到^[12],车辆维修成本采用世界银行 HDM-III 模型^[13]. 燃油成本则基于燃油消耗模型^[14] 计算得到. 保险成本简化测算为:平均 10.76 万元的小汽车价格,平均保费约 3 326 元,年均行驶里程为 1.16 万 km 时,单位距离的保险费用约 0.29 元·km⁻¹,以此作为保险成本

km·h⁻¹、中通勤距离分组中速度不小于 15.9 km·h⁻¹、长通勤距离分组中速度不小于 20.2 km·h⁻¹ 的公共交通方式链才有竞争力. 可见不同通勤距离分组中目前唯有地铁直达方式链的行程速度及出行时耗是具有竞争力的;而其他方式链(如地铁换乘、公交直达、多方式换乘)如果不对方式链各构成环节进行针对性改进,现在及未来都不具竞争力. 另一方面,地铁直达方式链的行程速度在长通勤距离分组中 85%分位值达到 21.2 km·h⁻¹,明显高于短通勤距离分组的 13.0 km·h⁻¹,因此地铁直达方式链的优势速度只有在中、长通勤距离中可以发挥出来,短通勤距离急需尽快推出在速度不小于 12.8 km·h⁻¹ 的替代公共交通方式链.

4 方式链广义成本分析

方式链由一系列的方式段即交通方式环节组成,对通勤者而言广义成本也由各环节成本组成,且同时包括费用成本和时间成本两大类.

4.1 费用成本测算

费用成本是出行者完成方式链所有环节需要支付的金钱总和. 费用成本主要包括折旧成本、维修成本、燃油成本、保险成本、停车成本、票费成本等,前 3 种成本主要出现在使用小汽车和电动车的环节,一

的距离参数. 停车成本和票费成本(主要出现在公共交通环节),可直接根据问卷数据得到.

基于已有研究成果,为简化成本计算过程,假设出行费用与出行距离或时间呈简单的函数关系,通过调整各类方式链费用成本的权重系数得到方式链费用成本 u_{ip} . 测算模型的通用公式如下:

$$u_{ip} = \sum_{n=1}^k (\varphi_n l_{in} + \mu_n) \quad (1)$$

式中： k 为出行费用总类别数； φ_n 为通勤者 i 的第 n 类费用成本的权重系数； l_{in} 为通勤者 i 的第 n 类费用成本对应的通勤距离，km； μ_n 为通勤者 i 的第 n 类费

用成本中的固定费用项(如票价)，元。

汇总各环节费用成本计算公式如表 5 所示， l_i 为通勤者 i 完成相应交通方式环节的通勤距离，km； v_i 为通勤者 i 驾驶车辆的行驶速度， $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ； t_i 为通勤者 i 完成相应交通方式的用时，h。

表 5 方式链费用成本

Tab.5 Cost of traffic mode chain

成本类型环节	折旧成本	维修成本	燃油成本	保险成本	停车成本	票费成本
小汽车	$0.72l_i$	$0.30l_i$	$(36.449 - 0.782v_i + 0.012v_i^2)l_i$	$0.29l_i$	问卷数据	
出租车						问卷数据
电动车	$0.20l_i$	$0.12l_i$	$0.01l_i$			
自行车						
公共自行车						问卷数据
步行						
班车						问卷数据
常规公交						问卷数据
地铁						问卷数据

4.2 时间成本测算

时间成本是出行者完成出行所需要的时间折算费用，是时间价值和时间的乘积。首先选择收入法进行时间价值的估算，收入法假定出行价值与出行者的收入水平呈正相关关系，两者的比值即出行时间利用系数。根据通勤者个人月收入、每日上下班时间和每周上班天数估算小时工资率，全体样本平均 $39.16 \text{元} \cdot \text{h}^{-1}$ 。根据本次问卷中通勤者对当前通勤的“期望节省时间”和“愿意额外支付费用”数据，计算全体样本平均边际时间价值为 $33.87 \text{元} \cdot \text{h}^{-1}$ 。两者相除得到通勤出行时间利用系数的近似估计为 0.86。将该利用系数应用于收入法模型中，得到的时间价值兼顾了通勤者的支付意愿和收入水平。通勤者时间价值计算公式如下：

$$p_i = 0.86\omega_i \quad (2)$$

式中： p_i 为通勤者 i 的时间价值， $\text{元} \cdot \text{h}^{-1}$ ； ω_i 为通勤者 i 的小时工资率， $\text{元} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

方式链各交通方式环节的单位花费时间尽管在时间尺度上相等，但由于便利性、舒适性等方面的差异，会对通勤者的时间主观感知产生影响，故不同环节的时间成本应给予不同的权重系数，则时间成本测算模型的通用公式如下：

$$u_{it} = p_i \sum_{m=1}^t \delta_m t_{im} \quad (3)$$

式中： t 为出行时间成本总类别数； δ_m 为通勤者 i 的第 m 类环节时间成本的权重系数； t_{im} 为通勤者 i 的第 m 类环节时间成本实际花费的时间，h。

根据方式链的环节组成(接驳环节、站点的候车环节、乘车环节、换乘环节)，时间成本包括：车内时

间成本、等待时间成本、接驳时间成本、拥挤时间成本、时间可靠性成本。根据通勤者实际花费时间和时间价值的乘积，结合各类时间成本的权重系数，得到不同环节的时间成本，如表 6 所示，各类时间成本的权重系数基于已有相关研究结论确定^[15-16]。表中： t_i 为通勤者 i 完成相应交通方式环节需要的时间，h； t_{iw} 为通勤者 i 等候车辆到达需要的时间，h； t_{it} 为通勤者 i 完成接驳或换乘需要的时间，h； σ_i 为通勤者 i 每周上班时间的标准差，h； α 为通勤者 10 次通勤乘坐公共交通工具时的有座次数估计。

表 6 方式链时间成本

Tab.6 Time cost of traffic mode chain

交通方式环节	车内时间成本	等待时间成本	接驳时间成本	拥挤时间成本	可靠性时间成本
小汽车	$p_i t_i$				
出租车	$p_i t_i$				
电动车	$p_i t_i$				
自行车	$p_i t_i$		$1.5 p_i t_{it}$		
公共自行车	$p_i t_i$		$1.5 p_i t_{it}$		$1.77 p_i \sigma_i$
步行			$1.5 p_i t_{it}$		
班车	$p_i t_i$				
常规公交	$p_i t_i$				
地铁	$p_i t_i$	$1.5 p_i t_{iw}$	$0.59(1 - \alpha/10) p_i t_i$		

4.3 方式链广义成本分析

方式链广义成本为费用成本和时间成本之和，通用计算公式如下：

$$u_i = u_{ip} + u_{it} = \sum_{n=1}^k (\varphi_n l_{in} + \mu_n) + p_i \sum_{m=1}^t \omega_m t_{im} \quad (4)$$

式中： u_i 为通勤者 i 当前所选方式链的总成本，元； φ_n 为通勤者 i 的第 n 类费用成本的权重系数； l_{in} 为

通勤者 i 的第 n 类费用成本对应的通勤距离, km ; μ_n 为通勤者 i 的第 n 类费用成本中的固定费用项(如票价), 元; t 为出行时间成本总类别数; p_i 为通勤者 i 的时间价值, 元 $\cdot \text{h}^{-1}$; ω_m 为通勤者 i 的第 m 类环节时间成本的权重系数; t_{im} 为通勤者 i 的第 m 类环节时间成本实际花费的时间, h .

汇总不同通勤距离分组中各方式链的总成本数据, 并计算总成本平均值, 汇总如表 7. 由表中数据可得: ① 在各距离分组内, 方式链出行时耗越长, 平均

广义成本越高; ② 在各方式链广义成本中, 时间成本占比均大于 51%, 即时间成本大于费用成本; ③ 步行、自行车、电动车的广义成本较低, 其中主要是时间成本; ④ 地铁直达、地铁换乘和班车方式链广义成本与自行车、电动车相当; ⑤ 公交直达和公交通换乘、多方式换乘方式链广义成本略低于小汽车, 但时间成本占比明显高于小汽车, 即耗时长、费用低; ⑥ 小汽车方式链广义成本最高, 其中费用成本占比明显高于其他方式链.

表 7 不同通勤距离分组的各方式链平均广义成本

Tab.7 Average general cost of traffic mode chain in three commuting distance groups

距离分类	方式链	平均广义成本/元		
		出行时耗(0,40]min	出行时耗(40,60]min	出行时耗(60,90]min
短通勤距离	步行	10.4(100.0%)		
	小汽车	49.7(60.7%)		
	地铁直达	13.3(77.4%)	19.5(77.4%)	
	公交直达	42.5(95.3%)	58.5(96.6%)	78.9(97.1%)
	电动自行车	15.8(95.4%)	31.4(94.3%)	
	自行车	16.2(98.5%)	20.2(99.2%)	
	地铁换乘	18.2(83.5%)		
中通勤距离	小汽车	75.2(60.8%)	80.1(73.2%)	
	地铁直达	21.0(82.6%)	25.6(79.0%)	
	地铁换乘	23.6(84.5%)	28.0(76.2%)	42.7(75.4%)
	公交直达	34.8(97.8%)	46.6(92.3%)	70.9(91.5%)
	电动自行车	24.8(89.9%)		
	多方式换乘	37.0(86.5%)	51.1(90.2%)	
	自行车	20.7(99.2%)	29.2(99.3%)	
	公交换乘		64.9(93.4%)	72.8(91.8%)
长通勤距离	小汽车	136.2(52.2%)	143.1(51.3%)	189.2(54.7%)
	地铁换乘	43.5(89.6%)	49.3(89.0%)	57.8(89.6%)
	地铁直达	39.9(89.2%)	48.2(90.0%)	56.9(87.3%)
	多方式换乘		86.3(77.6%)	94.2(82.3%)
	班车直达	42.7(85.8%)	50.4(84.2%)	63.8(82.9%)
	公交直达		68.5(86.0%)	76.3(95.8%)
	电动自行车		92.5(95.3%)	95.0(94.2%)
	公交换乘	65.8(93.9%)	74.2(84.7%)	89.5(94.1%)

注:表中方式链按照选择比例由大到小排序,括号中数据为时间成本占比.

表 8 各变量与满意度相关性分析结果

Tab.8 Correlation analysis result between the satisfaction and other variates

距离变量	变量	Pearson 相关性	Sig.	平均值
短距离	行程速度	0.038	0.576	7.500
	可靠性	-0.001	0.989	0.302
	广义成本	-0.149*	0.027	25.720
中距离	行程速度	0.221*	0.023	14.680
	可靠性	-0.040	0.688	0.219
	广义成本	-0.203*	0.017	51.750
长距离	行程速度	0.412**	0	19.680
	可靠性	-0.157*	0.032	0.193
	广义成本	-0.232*	0.029	87.150

注: * 表示在 0.05(双侧)水平上显著相关, ** 表示在 0.01(双侧)水平上显著相关.

5 通勤交通方式链适应性分析

交通方式链适应性分析以通勤者视角, 采用统一的出行时耗可接受度评价标准, 从门到门行程速度、广义成本、可靠性、满意度和选择比例 5 个维度进行分析. 其中, 可靠性表示为行程波动时间与行程时间的比值; 满意度是通勤者对自身采用的方式链的主观评价, 按照 10 分制进行打分.

分别分析不同通勤距离分组下各方式链的行程速度、可靠性和广义成本与满意度相关性, 结果如表 8 所示. 分析得出: 在短距离下, 广义成本与满意度呈显著的负相关性, 行程速度、可靠性与满意度不存

在明显的相关性; 在中距离下, 行程速度与满意度呈

显著正相关性,广义成本与满意度呈显著负相关性,可靠性与满意度不存在明显的相关性;在长距离下,行程速度与满意度呈显著正相关性,而可靠性、广义成本与满意度均呈现显著负相关性。

适应性好的方式链判断标准:基于相关性分析结果,选取不同通勤距离分组下与满意度呈现显著相关性的变量,对于呈现正相关性的变量,高于该变量平均值的方式链为适应性好的方式链;对于呈现负相关性的变量,低于该变量平均值的方式链为适应性好的方式链。根据这一判断原则,挑选出不同通勤距离分组下适应性好的方式链类型,如表 9 所示。其中,短距离适应性好的方式链特征是广义成本较低(小于 25.72 元),中距离适应性好的方式链特征是行程速度较高(大于 $14.68 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)和广义成本较低(小于 51.74 元),长距离适应性好的方式链特征是行程速度较高(大于 $19.68 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)、可靠性较高(行程波动时间与行程时间的比值较低,小于 0.19)和广义成本较低(小于 87.15 元)。

表 9 不同通勤距离适应性好的方式链

Tab.9 Mode chains with good adaptability of three commuting distance groups

短通勤距离	中通勤距离	长通勤距离
步行	地铁直达	地铁直达
自行车	地铁换乘	地铁换乘
地铁直达		
地铁换乘		

6 通勤交通方式链优化导向

汇总短、中、长通勤距离分组下不同方式链行程速度、不同出行时耗可接受度下平均广义成本和满意度数据,如表 10 所示。由表 10 可知,短、中、长通勤距离分组中地铁直达方式链在行程速度、出行时耗可接受度、广义成本、满意度等方面均与小汽车有强竞争力。因此,以地铁直达方式链的行程速度、平均广义成本、满意度为基准,设为标准值 1,得出其他方式链 3 项指标的相对值(指标值除以地铁直达方式链的指标值),如表 11 所示。

表 10 不同距离分组的方式链行程速度、广义成本、满意度

Tab.10 Speed, general cost and satisfaction of mode chain in different commuting distance groups

距离分组	出行方式链	85%位行程速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	平均广义成本/元			满意度 评分
			出行时耗可接受 程度较好	出行时耗可接受 程度一般	出行时耗可接受 程度较差	
短通勤距离	步行	4.5	10.4			8.1
	小汽车	19.2	49.7			7.7
	地铁直达	13.0	13.3	19.5		7.6
	公交直达	8.4	42.5	58.5	78.9	7.0
	电动自行车	17.2	15.8	31.4		7.8
	自行车	13.3	16.2	20.2		8.0
	地铁换乘	10.4	18.2			7.3
中通勤距离	小汽车	23.8	75.2	80.1		7.4
	地铁直达	18.2	21.0	25.6		7.4
	地铁换乘	16.5	23.6	28.0	42.7	7.3
	公交直达	11.9	34.8	46.6	70.9	7.3
	电动自行车	21.4	24.8			7.6
	多方式换乘	10.6	37.0	51.1		6.6
	自行车	13.8	20.7	29.2		7.4
长通勤距离	公交换乘	10.3		64.9	72.8	6.8
	小汽车	30.3	136.2	143.1	189.2	7.5
	地铁换乘	20.1	43.5	49.3	57.8	7.0
	地铁直达	21.2	39.9	48.2	56.9	7.3
	多方式换乘	14.8		86.3	94.2	6.0
	班车直达	17.5	42.7	50.4	63.8	7.2
	公交直达	16.2		68.5	76.3	6.8
电动自行车	19.9		92.5	95.0	6.8	
公交换乘	13.3	65.8	74.2	89.5	6.5	

结合表 9~11,以不同距离分组中适应性好的方式链所具有的特征指标为参照对象、公共交通优先发展为约束条件,可得出各交通方式链在出行时耗

可接受度较好与可接受度一般情况下的优化导向,具体如下:

(1) 在短、中、长通勤距离分组中,小汽车相较

表 11 不同距离分组的方式链相对行程速度、广义成本、满意度

Tab.11 Relative speed, general cost and satisfaction of mode chain in different commuting distance groups

距离分组	出行方式链	85%位行程速度相对值	平均广义成本相对值			满意度相对值
			出行时耗可接受程度较好	出行时耗可接受程度一般	出行时耗可接受程度较差	
短通勤距离	步行	0.35	0.78			1.07
	小汽车	1.48	3.74			1.01
	地铁直达	1.00	1.00			1.00
	公交直达	0.65	3.20			0.92
	电动自行车	1.32	1.19			1.03
	自行车	1.02	1.22			1.05
	地铁换乘	0.80	1.37			0.96
中通勤距离	小汽车	1.31	3.58	3.13		1.00
	地铁直达	1.00	1.00	1.00		1.00
	地铁换乘	0.91	1.12	1.09		0.99
	公交直达	0.65	1.66	1.82		0.99
	电动自行车	1.18	1.18			1.03
	多方式换乘	0.58	1.76	2.00		0.89
	自行车	0.76	0.99	1.14		1.00
	公交换乘	0.57		2.54		0.92
长通勤距离	小汽车	1.43	3.41	2.97	2.56	1.03
	地铁换乘	0.95	1.09	1.02	1.02	0.96
	地铁直达	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	多方式换乘	0.70		1.79	1.66	0.82
	班车直达	0.83	1.07	1.05	1.12	0.99
	公交直达	0.76		1.42	1.34	0.80
	电动自行车	0.94		1.92	1.97	0.85
	公交换乘	0.63	1.65	1.54	1.57	0.89

注:地铁直达方式链各项指标为基准值;待优化的方式链加粗显示。

于地铁直达方式链,行程速度是其 1.31~1.48 倍,平均广义成本是 3.41~3.74 倍,相对满意度在中、短距离分组与地铁直达相当,在长距离分组为 1.03,略好于地铁直达。可见,在轨道可以直达区域,实现小汽车转向轨道交通的规划引导目标,难度较小,通过经济杠杆来提高目的地(非居住区)小汽车使用成本(如提高停车收费、拥挤收费等)是一条较为有效的路径。另一方面,如果能提供门到门行程速度、成本、满意度指标类似地铁直达方式链的公共交通服务模式,将对小汽车使用方式转换有较好的促进效用。

(2) 在短距离通勤分组中,公交直达方式链由于行程速度低(仅为地铁直达速度的 0.65 倍)、耗时较长导致广义成本是地铁直达的 3.2 倍,因此满意度也是最低的,适应性较差。为了提高公交直达方式链的适应性,该方式链优化导向为:降低时间成本,即通过减少公交线路非直线系数、站点提供时刻表或提高发车班次减少等候时间、站点布局优化等,使公交直达门到门提速 50%,至 13 km·h⁻¹ 以上,在需求固定的线路上可考虑开设定制公交服务。

(3) 在中距离通勤分组中,电动自行车、自行车方式链相较于地铁换乘、地铁直达,适应性略差。而

多方式换乘和公交换乘方式链的相对行程速度较低、广义成本较高、满意度也不高,适应性较差。公交直达方式链各项指标相对好于多方式换乘和公交换乘方式链,因此,在该分组中方式链优化指向公交直达方式链,提高适应性的改善目标为:降低时间成本,提高门到门行程速度,即减少公交线路非直线系数、站点提供时刻表或提高发车班次减少等候时间、采用快速公交或定制公交辅以自行车接驳服务,使公交直达门到门提速 35% 至 16 km·h⁻¹ 以上。另一方面,地铁换乘方式链是通勤者选择比例仅次于小汽车和地铁直达的,因此各接驳环节和站点设置仍有进一步优化的需求。

(4) 在长距离通勤分组中,由于多方式换乘相较于地铁换乘、地铁直达,适应性略差。因此,该分组中方式链优化应指向多方式换乘链,提高适应性的改善目标为:提高可靠性和门到门行程速度、降低时间成本,即通过轨道交通运营组织提速、新轨道技术提速、优化接驳环节的站点设置、接驳距离、发车班次衔接等方面,使多方式换乘方式链门到门提速 36% 至 20 km·h⁻¹ 以上。另一方面,要实现小汽车向公共交通转化的规划引导目标,急需引入更快、更灵活的轨道或市域铁路联合运营组织方式,使得平

均行程速度、广义成本、可靠性、满意度与小汽车相比,具有竞争力。

7 结语

基于通勤距离分组,采用通勤者视角,采用统一的出行时耗可接受度评价标准,从门到门行程速度、广义成本、可靠性、满意度和选择比例 5 个维度进行交通方式链适应性分析。得出在短通勤距离分组中,广义成本与满意度呈显著的负相关性,适应性好的方式链为步行、自行车、电动自行车、地铁直达。在中距离分组中,行程速度与满意度呈显著正相关性,广义成本与满意度呈显著负相关性,适应性好的方式链为地铁直达、地铁换乘。在长距离分组中,行程速度与满意度呈显著正相关性,而可靠性、广义成本与满意度均呈现显著负相关性,适应性好的方式链为地铁直达、地铁换乘。结合适应性分析结果,针对 3 个通勤距离分组中的公交直达和多方式换乘方式链,提出优化导向。

后续研究将从交通系统整体运行效益角度,分析各方式链的适应性;然后将通勤者视角、系统整体运行效益视角得出的基于通勤距离分组的方式链适应性进行协同分析,以便为通勤交通服务质量改善提供决策参考。

参考文献:

- [1] 栾琨,隗志才,宗芳. 通勤者出行方式与出行链选择行为研究[J]. 公路交通科技,2010,27(6):107.
LUAN Kun, JUAN Zhicai, ZONG Fang. Research on commuters choice behavior between travel mode and trip chain [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 107.
- [2] 周家中,张殿业. 多模式交通网络下的城市交通出行链行为模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(2):125.
ZHOU Jiazhong, ZHANG Dianye. Behavior model of urban trip chains in multi-mode transportation network [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(2): 125.
- [3] 张华歆,张丽杰. 基于交通信息的通勤出行链模式选择行为[J]. 上海海事大学学报,2015,36(1):12.
ZHANG Huaxin, ZHANG Lijie. Trip chain pattern choice behavior of commuters based on traffic information [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2015, 36(1): 12.
- [4] 王伊丽. 城市居民出行方式链特征分析[J]. 交通运输研究,2012(1):136.
WANG Yili. Characteristics of urban travel mode chain [J]. Transport Research, 2012(1):136.
- [5] 叶盈. 出行方式链成本测算研究[D]. 浙江: 浙江大学,2015.
YE ying. Research on the cost estimation of trip mode chain [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2015.
- [6] 吴娇蓉,周冠宇. 上海市居民通勤方式链特征分析与效率评价[J]. 城市交通,2017,15(2):67.
WU Jiaorong, ZHOU Guanyu. Efficiency and characteristics of shanghai residents' commuting trip chains [J]. Urban Transport of China, 2017, 15(2): 67.
- [7] 史晟,杨超. 基于出行方式链的城市轨道交通客流分析方法[J]. 城市轨道交通研究,2011,14(1):29.
SHI Sheng, YANG Chao. Urban rail transit passenger volume forecasting method based on trip mode chain [J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(1): 29.
- [8] 董志国. 上海轨道交通出行方式链模型研究[J]. 城市轨道交通研究,2012,15(7):15.
DONG Zhiguo. On the trip chain model of shanghai urban rail transit [J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(7): 15.
- [9] SCHAFFER A. Regularities in travel demand: An international perspective [J]. Journal of Transportation and Statistics, 2000, 3(3): 1.
- [10] 吴娇蓉,余森,朱启政. 基于 30 min 通勤可达范围的居住区分类及特征指标[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(8):1136.
WU Jiaorong, YU Miao, ZHU Qizhen. Analysis on characteristic indexes and classification of residential districts based on 30-minute accessible commute range [J]. Journal of the Tongji University (Natural Science), 2017, 45(8): 1136.
- [11] 吴娇蓉,朱启政,林子旸. 基于城市综合体分类的停车收费政策预评估[J]. 城市交通,2017,15(3):74.
WU Jiaorong, ZHU Qizhen, LIN Ziyang. Pre-evaluation of parking charge policy based on the classification of urban complex [J]. Journal of Transportation and Statistics, 2017, 15(3): 74.
- [12] 程珊珊,章后忠. 我国汽车折旧、利息及管理费用预测模型研究[J]. 公路交通科技,2003,20(4):143.
CHEN Shanshan, ZHANG Houzhong. Developing models for vehicle depreciation & interest costs estimation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(4): 143.
- [13] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 上海: 同济大学出版社,2003.
SUN Lijun. Structural behavior study for asphalt pavements [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003.
- [14] 槐海林,王劲松,王云鹏. 基于城市道路工况的汽车燃油消耗模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2009,39(5):1146.
KUI Hailin, WANG Jinsong, WANG Yunpeng. Vehicle fuel consumption model based on urban road operation [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(5): 1146.
- [15] KRAUS M. Discomfort externalities and marginal cost transit fares [J]. Journal of Urban Economics, 1991, 29(2): 249.
- [16] JARADÍAZ S, GSCHWENDER A. Towards a general microeconomic model for the operation of public transport [J]. Transport Reviews, 2003, 23(4): 453.