

基于效用的大型综合客运枢纽智能交通出行链技术

袁胜强¹, 张亮¹, 张伟略², 吴金龙¹, 冯宝¹

(1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 上海市道路运输事业发展中心, 上海 200023)

摘要: 近年来, 基于效用理论的大型综合客运枢纽智能交通出行链受到广泛关注。提出旅客交通出行效用模型, 基于数据挖掘技术、用户画像技术精准识别枢纽旅客出行需求, 并给出典型用户优先过滤推荐算法和信息动态更新策略; 针对大客流情景建立交通系统效用模型, 提出基于交通系统效率最优的智能交通出行链, 均衡各交通方式; 当交通系统服务正常运行时, 为了避免交通系统共振, 建立旅客端与交通系统端效用均衡最优的双层规划模型。最后, 经“畅行虹桥”APP 测试验证, 采用智能交通出行链后, 总体交通方式转变率约 0.050, 出行链满意度总体得分提升率为 0.160, 出行时间变化率减少 0.056。

关键词: 智能交通; 出行链; 枢纽; 旅客效用模型; 双层规划
中图分类号: U115 **文献标志码:** A

Intelligent Trip Chain Technology for Large Comprehensive Transportation Hub Based on Utility Theory

YUAN Shengqiang¹, ZHANG Liang¹, ZHANG Weilue², WU Jinlong¹, FENG Bao¹

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Road & Transportation Development Center, Shanghai 200023, China)

Abstract: In recent years, the research on intelligent trip chains for large comprehensive passenger transportation hubs based on utility theory has received extensive attention. Firstly, the utility model of hub passenger transportation was proposed. Based on data mining technology and user profiling technology, the travel demands of hub passengers were accurately identified. With the goal of optimizing passenger travel utility, a typical user priority filtering recommendation algorithm and an information dynamic update strategy were proposed. Secondly, for scenarios with large passenger flows, a transportation system utility model was

established, and an intelligent trip chain based on the optimization of transportation system efficiency was proposed to balance various transportation modes. Thirdly, during the normal operation of the transportation system service, to avoid the resonance in the transportation system, a bi-level programming model for the equilibrium optimization of passenger and transportation system utility was established. Finally, verified by the internal test of the “Changxing Hongqiao” APP, after adopting the intelligent trip chain, the overall rate of change in transportation modes is approximately 0.050, the overall satisfaction score of the trip chain increases by 0.160, and the rate of change in travel time decreases by 0.056.

Keywords: intelligent transportation; trip chain; transportation hub; passengers utility model; bi-level programming

大型综合客运枢纽是 2 种及以上对外运输方式与城市客运交通转换的场所, 一般日均客运量超 20 万人次^[1]。大型综合客运枢纽旅客交通出行链包括由城市内出发点通过市内交通方式到达枢纽, 并通过飞机、铁路或其他交通方式离开枢纽, 或是从城市外通过飞机、铁路或其他交通方式到达枢纽, 换乘市内交通到达城市内目的地的过程。

利用用户画像技术引导旅客出行或刻画旅客出行行为已有一定的成果。尹溪琛^[2]以机场旅客为研究对象, 利用用户画像技术将旅客分类, 并基于出行时间预测推荐出行线路, 但该研究主要依据用户出行偏好和出行时间而未考虑出行过程中各环节的效用值, 同时出行链中仅考虑了旅客端需求而缺少对交通系统总效用的考虑。邵静华^[3]利用真实联程出行数据建立旅客用户画像, 考虑出行费用和行程时

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 上海市科委重大科研项目(17DZ1204000, 23DZ1202400)

第一作者: 袁胜强, 教授级高级工程师, 管理学博士, 主要研究方向为道路交通、交通枢纽、智能交通、BIM 技术研发等。E-mail: yuan_sq@163.com



论文
拓展
介绍

间建立多目标规划模型,通过法线微分(DON)算法求解得到较现状更优的解决方案,但该方案主要针对联程出行方式及中转地选择,而未涉及市内出行及枢纽换乘等部分。上官伟等^[4]依据旅客出行数据建立用户画像,构建旅客类型、交通方式、出行时间段3个维度的交叉巢式Logit模型,预测旅客航班交通方式、出行时间段的交叉选择。在交通出行链效用理论研究中,肖丁^[5]建立交通方式选择影响因素的结构方程模型和交通方式混合选择模型;叶玉玲等^[6]在传统Logit模型效用函数基础上引入心理潜变量,精准分析城际出行链需求;逯婷婷^[7]采用大量样本优化效用参数,构建出行链需求预测模型;Paulssen等^[8]、Greene等^[9]也研究了效用对出行行为选择的影响。在出行链相关研究中,主要是对旅客的出行行为和需求进行分析,但缺少实际应用和与出行引导技术相结合方面的研究。此外,基于城市交通数据大平台,对乘客进行诱导、指引和交通出行信息推送,也是交通领域研究热点和应用实践重点。Jou^[10]、赵丹^[11]分别利用Probit模型和基于RP(revealed preference)-SP(stated preference)融合数据的Mixed Logit模型研究了出行信息对通勤者出行行为的影响;王博彬等^[12]利用RP-SP融合数据建立Nest-Logit模型,研究了出行信息对节假日交通方式的影响;Erke等^[13]利用实测数据研究了可变信息板对驾驶行为的影响;Shao等^[14]以上海虹桥枢纽为例,研究了静态指引设施设置对出行行为的影响,并提出静态诱导信息优化设计建议。双层规划方法是较为成熟的建模方法,有着较为详尽的研究^[15]。百度、高德、腾讯等国内交通出行服务平台在个体交通出行信息服务方面比较成熟。

综上所述,已有关于旅客用户画像和出行链的研究尚存一些不足,主要体现在以下几个方面:①旅客用户画像标签中主要考虑年龄、收入、出行偏好,而缺少对信息需求、信息推送方式等方面的考虑;②出行链的预测或建议主要依据费用和时间,而枢纽旅客出行链较为复杂,以老年人或全家出游旅客为例,旅途舒适、可无障碍出行也是主要考虑因素;③旅客出行效用模型不能基于旅客的个人偏好和出行需求准确地计算交通出行全过程效用,也不能实现出行信息精准推送;④针对大客流或其他异常状态,旅客出行效用模型和交通系统效用模型双层优化不足,不能有效地均衡客流。

基于交通大数据平台建立旅客出行效用模型,对海量综合客运枢纽旅客交通出行进行用户画像分

析,得到每个旅客的出行偏好类型。当综合交通系统处于自由流的运行状态时,按照旅客出行偏好实时精准地推送交通出行链;当出现大客流等异常状态时,以保障交通系统不失效且整体最优下向旅客推送交通出行链;当综合交通系统处于正常服务水平状态时,兼顾旅客出行偏好和交通系统运行效率最优,对旅客端和交通系统端的不同目标进行双层优化,向旅客精准推送优化后的交通出行链。该研究成果在上海虹桥综合交通枢纽中得到了验证。

1 面向枢纽旅客偏好的智能交通出行链

1.1 枢纽旅客出行效用模型

相关研究表明,大型综合客运枢纽旅客在城市内的起点(或终点)主要是家、公司及酒店,不同于市内交通出行,更倾向于选择个人效用最高的交通方式,枢纽旅客出行效用评判主要包括快捷性、经济性、舒适性、安全性等^[16]。

为了完整表达枢纽旅客交通出行链,将旅客从出发点到枢纽检票口构建为交通网络 $G=(V,A)$,其中, V 为交通网络的换乘节点, A 为枢纽外部交通网络路段(包括道路路段子集 ϕ_r 、轨道路段子集 ϕ_m 和枢纽内部路段子集 ϕ_w)。设路段 i 为枢纽外部交通网络路段(总量为 I),节点 j 为枢纽外部换乘节点(总量为 J),路段 l 为枢纽内部路段(总量为 L),旅客的第 k 条交通出行链的出行效用表述为

$$M(k) = \frac{0.7}{I} \sum_{i=1}^I S_i(k) + \frac{0.1}{J} \sum_{j=1}^J R_j(k) + \frac{0.2}{L} \sum_{l=1}^L W_l(k) \quad (1)$$

式中: $S_i(k)$ 为由枢纽外部路段出行效用,权重0.7; $R_j(k)$ 为枢纽外部换乘效用,权重0.1; $W_l(k)$ 为枢纽内部出行效用,权重0.2。

枢纽旅客出行效用采用时间、费用、舒适度3项指标。舒适度为正效应指标,时间、费用为负效应指标,各指标的权重由旅客属性(如年龄、性别、收入)以及不同情景下的出行需求来确定。 $S_i(k)$ 、 $R_j(k)$ 、 $W_l(k)$ 的计算式为:

$$S_i(k) = 0.3e^{-0.05\alpha_s T_{im}} + 0.35e^{-0.005\beta_s C_{im}} + 0.25e^{-0.1\gamma_s^{-1} A_{im}^{-1}} + \delta_m, \quad i \in \phi_r \cup \phi_m \quad (2)$$

$$R_j(k) = 0.5e^{-1.5\alpha_s T_{jm}} + 0.4e^{-0.1\gamma_s^{-1} A_{jm}^{-1}} + \delta_j \quad (3)$$

$$W_l(k) = 0.2e^{-\alpha_s T_{lm}} + 0.1e^{-0.2\beta_s C_{lm}} + 0.5e^{-0.1\gamma_s^{-1} A_{lm}^{-1}} + \delta_l, \quad l \in \phi_w \quad (4)$$

式中: T_{im} 、 C_{im} 、 A_{im} 分别为第 m 种交通方式在第 i 个路段的时间、费用、舒适度(见表1); α_{is} 、 β_{is} 、 γ_{is} 分别为第 i 个路段的时间权重、费用权重、舒适度权重(见表2); δ_m 为其他影响因素效用,包括天气、环境等,取值 $0 \sim 0.1$; T_{jm} 、 A_{jm} 分别为第 j 个换乘节点的时间、舒适度; α_{js} 、 γ_{js} 分别为第 j 个换乘节点的时间权重、舒适度权重; δ_j 为其他影响因素效用,取值为 $0 \sim 0.1$; T_{lm} 、 C_{lm} 、 A_{lm} 分别为枢纽内第 m 种交通方式在第 l 个路段的时间、费用、舒适度; α_{ls} 、 β_{ls} 、 γ_{ls} 分别为枢纽内第 l 个路段的时间权重、费用权重、舒适度权重; δ_l 为其他影响因素效用,取值 $0 \sim 0.2$; $S_i(k)$ 、 $R_j(k)$ 、 $W_l(k)$ 取值均为 $0 \sim 1$ 。

表 1 舒适度取值

Tab.1 Comfort values

满意度	取值
不满意	0.1
一般	0.5
较满意	1.0
满意	2.0
非常满意	4.0

表 2 出行效用权重取值

Tab.2 Travel utility weight values

旅客类型	α_s	β_s	γ_s
时间敏感型旅客	2.0~4.0	0.5~1.5	0.5~1.0
费用敏感型旅客	0.5~1.5	2.0~4.0	0.5~1.0
舒适优先型旅客	0.5~1.5	0.5~1.5	1.0~2.0

关于时间、费用、舒适度的权重 α_s 、 β_s 、 γ_s 可根据不同旅客类型赋值,基于枢纽运行情况 and 旅客需求,采用专家打分或利用旅客大数据对历次交通出行的选择进行综合评估。

1.2 枢纽旅客出行用户画像

通常,枢纽旅客在经过多次尝试后,会采用其认为效用最高的交通出行链作为常用的交通方式和路径,并逐渐产生路径依赖,而具有相似基本属性、出行目的旅客的出行效用取值往往具有相似性。根据既有旅客经验为相似程度较高的旅客推荐出行线路,可以得到更高的效用和更好的计算效率。

针对旅客基本属性及出行需求特点,通过用户画像模型对旅客出行偏好进行判别,建立包含原始数据层、出行行为标签层、出行行为偏好标签层 3 个层次的标签体系,如图 1 所示。将每一个用户抽象为标签集合空间中的稀疏向量^[12],从而实现旅客类型量化和出行信息精准推送。

采用优先过滤算法,根据不同出行目的建立典型出行者信息需求矩阵,并以目标用户与典型用户

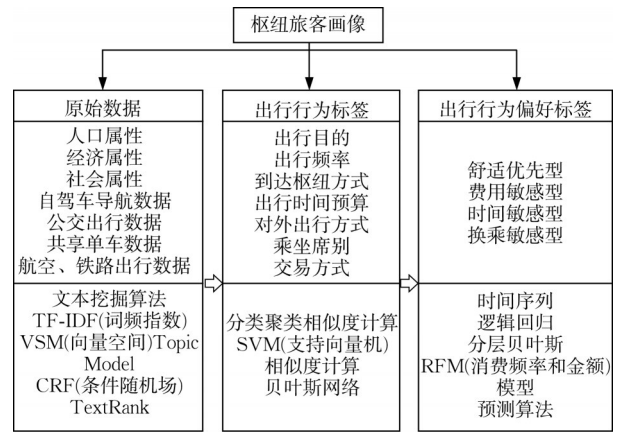


图 1 枢纽旅客画像标签系统

Fig.1 Hub passenger portrait label system

相似度为依据,经加权计算后判断应推送信息内容和相应信息推送方式,力求实现旅客端效用的最大化;对于部分与典型用户差异较大的旅客,根据历史数据定制出行信息,并建立相应数据库。该算法既兼顾信息推荐效率,又可满足特殊类型旅客的信息需求。具体步骤为:

(1) 对于所收集的用户画像数据中基本用户属性的赋值数据与出行行为偏好的赋值数据组合而成的向量,采用较为成熟的 K -means 算法^[17-20]进行聚类。依据出行目的数量设定 e 个质心,经迭代计算后得到 e 个典型用户枢纽出行链,判断各典型交通出行链的需求,利用历史数据分析旅客出行信息需求与接收习惯。

(2) 建立典型旅客出行信息需求矩阵,包括出行行为、信息需求、信息推送方式 3 个部分(见表 3)。出行行为用于目标用户与典型用户间相似程度判断,信息需求由典型用户交通出行链分析得出,信息推送方式由用户历史行为分析得出。

(3) 利用夹角余弦相似度判断目标用户与典型用户间出行行为相似度,计算式为

$$Q_n = \frac{R_c R_v}{|R_c| |R_v|} \quad (5)$$

式中: Q_n 为相似度; R_c 为典型旅客出行行为向量; R_v 为目标旅客出行行为向量; $|R_c|$ 、 $|R_v|$ 为向量的模。

采用遍历法求得最大余弦值,并设定合理阈值 w ,剔除相似度较低的选项。若全部典型旅客均未能达到阈值,则转入下一步,按照特殊类型旅客处理。根据出行行为相似度 Q_n ,分别计算目标旅客信息需求和推送方式需求:

$$P_{D_n} = \max \sum_{n=1}^N Q_n D_n \quad (6)$$

表3 不同出行信息推送方式赋值

Tab.3 Assignment of different travel information push modes

标签名	取值	说明
信息推送方式	1	手机短信
	2	APP消息
	3	语音电话
信息推送时间	1	出行1d前
	2	出行3~5h前
	3	出行前3h内
信息推送频率	1	单次
	2	2~3次
	3	3次以上
信息推送批次	1	一次推送
	2	分2~3次推送
	3	分多次推送
信息更新频率	1	不更新
	2	触发式更新
	3	定时更新

$$P_{H_n} = \max \sum_{n=1}^N Q_n H_n \quad (7)$$

式中: P_{D_n} 、 P_{H_n} 为目标旅客信息需求、信息推送方式取值; D_n 、 H_n 为典型旅客信息需求、信息推送方式取值。

(4)对于与几类典型用户相似度均小于阈值 w 的旅客,通过历史出行数据分析出行信息需求和信息接收习惯,建立特殊类型用户数据库,并逐渐收集“邻居用户”,向“邻居用户”推送类似出行信息,满足小众用户的个性化出行需求。

(5)建立出行信息及推送方式评分反馈系统,根据用户的反馈,进一步优化信息推送内容,完善信息推送方式。典型旅客出行信息需求矩阵见表4。表中, $C_{a1} \sim C_{af}$ ($a=1,2,\dots,5$)表示基本行为、选择偏好等, $D_{a1} \sim D_{af}$ 表示道路信息、安检信息等, $H_{a1} \sim H_{af}$ 表示推送时间、推送频率等; f 表示出行行为、信息需求、信息推送方式的具体内容。

表4 典型旅客出行信息需求矩阵

Tab.4 Typical passenger travel information demand matrix

旅客类型	出行行为	信息需求	信息推送方式
舒适优先型	$C_{11} \sim C_{1f}$	$D_{11} \sim D_{1f}$	$H_{11} \sim H_{1f}$
费用敏感型	$C_{21} \sim C_{2f}$	$D_{21} \sim D_{2f}$	$H_{21} \sim H_{2f}$
时间敏感型	$C_{31} \sim C_{3f}$	$D_{31} \sim D_{3f}$	$H_{31} \sim H_{3f}$
换乘敏感型	$C_{41} \sim C_{4f}$	$D_{41} \sim D_{4f}$	$H_{41} \sim H_{4f}$
其他类型	$C_{51} \sim C_{5f}$	$D_{51} \sim D_{5f}$	$H_{51} \sim H_{5f}$

由于城市局部路况、天气情况、枢纽内通道拥挤程度等对旅客出行效用产生较大影响的因素均处于动态变化中,因此所推送的出行信息也需动态更新。在出行前,系统会根据旅客的出行偏好及当下的交

通运行状态自动推送一条出行链,定义出行链效用为 M_0 。在出行过程中,假设某段时间后,随着外部条件变化,再次向旅客发送更新后的出行信息导致出行链效用变化为 ΔM ,设定一阈值 Z ($Z > 0$), Z 通过海量数据分析后得到,则 Z 为旅客改变出行链的临界值,其取值与旅客的主观条件有关。当 $\Delta M > Z$ 时,旅客出行链发生改变。

通过出行信息引导动态化的出行链生成是一个多阶段决策结果,决策阶段可以按时间、距离、固定节点等方式划分。本研究采用固定节点划分方式,即每一次交通方式转换、经过换乘节点、枢纽内外转换等。在任意决策节点 t_d ,交通信息的变化导致 $\Delta M > Z$ 时,旅客改变出行路径或者交通方式。假设决策阶段 d 生成的出行链为 q_d ,此出行链为静态出行链,出行效用为 $M_{q_d,d}$, t_d 节点后进入 $(d+1)$ 阶段,基于前文所述信息推荐系统进行出行链效用评估,通过与 Z 的对比,确定是否向旅客推送新的出行建议信息。 ΔM 计算式为:

$$\Delta M = \begin{cases} 0, & \Delta M \leq Z \\ M_{q_{d+1},d+1} - M_{q_d,d}, & \Delta M > Z \end{cases} \quad (8)$$

式中: $M_{q_{d+1},d+1}$ 为 $(d+1)$ 阶段出行链不改变的出行效用; $M_{q_d,d}$ 为 $(d+1)$ 阶段出行链发生变化的出行效用。

2 交通系统效率最优的智能交通出行链

不同于旅客个体,综合交通系统构成复杂,包含了道路交通、轨道交通、常规公交、慢行系统、枢纽内安检及值机系统。就综合交通系统而言,提高交通系统内各类设施服务的均衡性,防止短时旅客在某一节点的大量聚集,避免某一类交通方式饱和度出现异常,保证交通系统整体的运行安全平稳是提升交通系统整体效用的关键。

不同交通方式的承载能力不同,设置合理饱和度阈值。饱和度超过阈值后,乘客舒适性、系统运行可靠度等将大幅下降。例如,采用小汽车出行方式,若道路饱和度 >0.85 则临近F级服务水平,交通路段进入拥堵状态;若公交地铁饱和度 >0.90 则会进入拥挤状态,乘客空间局促。饱和度阈值如表5所示。当各交通方式饱和度平均值 \bar{V}_s 大于饱和度阈值平均值 \bar{V} 时,应采用系统最优策略。

表5 典型交通方式推荐饱和度阈值

Tab.5 Recommended saturation thresholds for typical traffic modes

交通方式	饱和度阈值
小汽车	0.85
地铁	0.90
公交车	0.90
慢行	0.80

系统最优情景下,采用效用理论中离散选择(MNL)模型,建立系统效用函数:

$$U(m) = u_1 B_1 + u_2 B_2 + \dots + u_p B_p + \varepsilon = \sum_{p=1}^p u_p B_p + \varepsilon \quad (9)$$

式中: $U(m)$ 为交通系统在枢纽旅客不同交通方式组合下所产生的系统效用; B_p 为影响系统效用的交通系统运行效率、总体运力、运力均衡性、安全性等各种属性; u_p 为各个属性的影响程度,可通过专家打分获得; ε 为随机变化,包括交通系统对城市运行效率的影响^[21-23]。

假定枢纽交通出行链系统中共有 X 种交通方式, V_m 为第 m 种交通方式饱和度(路网运行监测数据),平均值 $\bar{V}_s = \frac{1}{X} \sum_{m=1}^X V_m$ 。一个出行链涉及的多一种交通方式中,部分大于平均值,部分小于平均值。为使不同方式饱和度达到一致,需将部分饱和度偏高的交通方式向饱和度较低的交通方式进行转移。根据1.2节所述,向旅客推送信息的依据是与典型旅客出行行为相似度,在排序的基础上加权计算后得出推荐线路。考虑系统最优的情况下,在式(6)中加入交通方式转移系数:

$$P_{D_m} = \max \sum_{m=1}^X \left(Q_m - V_m + \frac{1}{m} \sum_{m=1}^X V_m \right) D_m \quad (10)$$

当某种交通方式饱和度大于平均饱和度时,该交通方式的信息推荐将减少,反之将增加。对于饱和度超过表5中阈值的情况,不再推送相关信息。考虑到交通方式的合理性,对于通过手机定位判定出行距离大于3 km的,应人为剔除慢行方式;对于出行距离大于1 km的,应人为剔除步行方式。经优化后,在特殊情景下可实现枢纽交通出行链上下游交通系统出行饱和度均衡,促进总体效用提升。

3 基于双层优化的智能交通出行链

客流量较少、整体饱和度较低的情况下,交通系统产生拥堵的可能性较低,此时采用旅客端最优的

管理策略,向旅客推送其偏好的出行方案。然而,随着客流量的逐渐增加,交通系统内部饱和度逐渐接近合理运行饱和度阈值,若仍以旅客端效用最优为目标推送交通出行链信息,则可能造成大量客流向单一子系统聚集,从而导致系统共振。

基于此,采用双层优化模型对正常运行状态且客流较高时旅客出行链进行优化,兼顾旅客端效用和系统端整体均衡性,当 $\bar{V}_s > \bar{V} \geq \bar{V}_s - \gamma$ (\bar{V} 为饱和度阈值平均值, γ 为临界阈值)时,不同枢纽可根据自身情况取值为0.05~0.15。将旅客端设定为上层,最优解为:

$$T = \max \sum_{k=1}^K M(k) \\ \text{s. t. } V_m \leq V_{m0} \\ \Delta M \leq Z$$

式中: V_{m0} 为交通方式饱和度阈值(见表5)。将防止旅客过渡聚集或临界状态下共振系统端设定为下层,最优解为:

$$S = \max \sum_{m=1}^X U(m) \\ \text{s. t. } \min(S^2) = \sum_{m=1}^X (V_m - \bar{V})^2$$

建立旅客端出行链最优为上层模型,系统端整体均衡为下层模型,通过拉格朗日方程或分支定解法求解。

4 验证案例

将研究成果基于上海市科委课题《大型国际交通枢纽复杂交通智能调控技术与示范》所开发的“畅行虹桥”APP(微信小程序)进行测试。首先,对旅客前往虹桥枢纽的原始数据、出行行为标签、出行行为偏好标签进行统计,对旅客采取的交通方式、出行时间、出行满意度进行问卷调查;然后,在“畅行虹桥”APP开发中植入智能出行链技术,将调查问卷中得到的枢纽旅客画像数据(原始数据、出行行为标签、出行行为偏好标签)录入“畅行虹桥”APP中,获得定制化信息后的交通方式、出行时间、出行满意度;最后,将定制化的出行时间、交通方式转换、出行满意度与调查问卷中的数据进行对比,分析出行时间变化率、交通方式转换率、出行满意度提升率等。

各指标定义如下:①交通方式转变率,出行旅客转变交通方式的比例,如小汽车出行改为地铁出行,算作1次交通方式转变;②出行时间变化率,采用智

能出行链信息推送后来往枢纽出行时间与未采用前的出行时间比值减1;③出行满意度提升率,采用APP发放满意度调查问卷,出行满意度提升率为采用智能出行链信息推送后满意度得分与未采用前满意度得分的比值。

由表6可见,商务旅客对出行信息的敏感度最

高,在获得所需的完整动态化出行信息后,交通方式转变率和出行满意度提升率均较高;通勤旅客对出行链已形成习惯,交通方式转变率较小,出行满意度提升也较为有限。总体交通方式转变率约为0.050,出行满意度总体得分提升率为0.160,出行时间变化率减少0.056。

表6 精准出行链信息影响下旅客出行对比

Tab.6 Comparison of passenger behaviors under the effect of accurate travel chain information

旅客出行目的	所占比例/%	来往枢纽方式	交通方式转变率	出行时间变化率	出行满意度提升率
商务	32.1	个体机动/地铁	0.093	-0.085	0.244
旅行	26.1	地铁/出租车	0.035	-0.056	0.165
通勤	35.9	地铁/巴士	0.021	-0.032	0.083
其他	5.9	地铁/巴士	0.066	-0.052	0.151
总计	100.0		0.050	-0.056	0.160

5 结语

针对大型综合客运枢纽旅客交通出行特点,构建旅客出行效用模型。基于旅客历史出行大数据,构建枢纽旅客画像系统,完整刻画不同类别枢纽旅客的出行行为及出行效用。建立典型用户出行行为矩阵,采用典型用户优先过滤推荐算法,兼顾计算效率与匹配精度,以旅客效用最优为目标,建立动态信息推送系统,分时点向旅客推送定制化出行信息。针对大客流情景,以交通运输系统整体效用最优为目标,推送相应信息,均衡旅客交通方式。利用双层规划模型,提出2种推荐模型的切换点饱和度计算方法。经调查验证,采用智能交通出行链后,旅客出行满意度及交通系统效率等得到提升。

作者贡献声明:

袁胜强:模型构思,论文撰写。

张亮:模型构建。

张伟略:模型构建,论文撰写。

吴金龙:模型验证,论文修改。

冯宝:模型验证。

参考文献:

- [1] 陈大伟. 大城市对外客运枢纽规划与设计理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
CHEN Dawei. Study on planning and design theory for external passenger transport hub of metropolis [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [2] 尹溪琛. 基于旅客画像和出行链模型的交通出行推荐方法及应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
YIN Xichen. Travel recommendation method and application

based on passenger profile and trip chain model [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

- [3] 邵静华. 基于用户画像的旅客空铁联程出行规划模型及应用[D]. 南京: 东南大学, 2021.
TAI Jinghua. Travel planning model and application of air-rail intergraded service based on user portrait [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [4] 上官伟, 邓雨亭, 柴琳果, 等. 基于旅客画像的航班出行选择预测方法研究与实现[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45: 56.
SHANGGUAN Wei, DENG Yuting, CHAI Linguo, *et al.* Research and implementation of flight selection predicting method based on passengers portrait [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45: 56.
- [5] 肖丁. 考虑出行链的城市居民交通方式选择行为研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
XIAO Ding. Study on travel mode choice behavior of urban residents considering travel chain [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [6] 叶玉玲, 韩明初, 陈俊晶. 基于出行链的城际旅客交通方式选择行为[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46: 1234.
YE Yuling, HAN Mingchun, CHEN Junjing. Intercity passenger travel mode choice behavior based on trip chain [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46: 1234.
- [7] 逯婷婷. 基于多层Nested Logit模型的城市居民出行链预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
LU Tingting. Research on urban residents' travel chain forecasting based on multi-level Nested Logit model [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [8] PAULSEN M, TEMME D, *et al.* Values, attitudes and travel behavior: a hierarchical latent variable mixed logit model of travel mode choice [J]. Transportation, 2014, 41: 873.
- [9] GREENE W H, HENSHER D A. A latent class model for discrete choice analysis: contrasts with mixed logit [J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 2003, 37 (8): 681.

- [10] JOU R C. Modeling the impact of the pre-trip information on commuter departure time and route choice [J]. *Transportation Research; Part B*, 2001, 35(10):887.
- [11] 赵丹. 综合交通信息下通勤出行链重构机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
ZHAO Dan. Reconstruction mechanisms of commute trip chain under the integrated transportation information [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [12] 王博彬, 邵春福, 孙轶轩, 等. 多方式交通信息条件下节假日出行行为研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14:229.
WANG Bobin, SHAO Chunfu, SUN Yixuan, *et al.* Holiday travel behavior analysis under integrated multimodal travel information service [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14:229.
- [13] ERKE A, SAGBERG F, HAGMAN R. Effects of route guidance variable message signs(VMS) on driver behavior[J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2007, 10(6):447.
- [14] SHAO Minhua, XIE Congcong, SUN Lijun, *et al.* Optimal layout of static guidance information in comprehensive transportation hubs based on passenger pathfinding behavior[J]. *Sustainability* 2019, 11(13):3684.
- [15] 滕春贤, 李智慧. 二层规划的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
TENG Chunxian, LI Zhihui. The theory and application of bilevel programming [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [16] 吴才锐, 过秀成, 何明, 等. 基于广义费用修正模型的客运方式选择研究[J]. *交通与计算机*, 2008, 26:132.
WU Cairui, GUO Xiucheng, HE Ming, *et al.* Model split of passenger transport based on the generalized cost and fuzzy evaluation model [J]. *Computer and Communications*, 2008, 26:132.
- [17] 李映坤. 大数据背景下用户画像的统计方法实践研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2016.
LI Yingkun. Capital research on the statistical method of user portrait in the context of big data [D]. Beijing: University of Economics and Business, 2016.
- [18] 高新. 一种改进K-means 聚类算法与新的聚类有效性指标研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
GAO Xin. Research on improved K-means algorithm and new cluster validity index[D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [19] YODER J, PRIEBE C E. Semi-supervised K-means++ [J]. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2017, 87(13):2597.
- [20] LI Peng, LIU Feng, ZHU Erzhou. MSTI: a new clustering validity index for hierarchical clustering [C]//The 2018 International Conference on Information Science and Technology. Wuhan: [s.n.], 2018:162-176.
- [21] 盖松雪. 高铁枢纽停车库内外交通智能调控方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2021.
GAI Songxue. Intelligent regulation method for internal and external parking garage of high-speed railway hub [D]. Shanghai :Tongji University, 2021.
- [22] 郭钰, 黄世玉, 赵彦涛, 等. 站城融合背景下智慧枢纽换乘引导需求研究[J]. *城市建筑*, 2023(16):88.
GUO Yu, HUANG Shiyu, ZHAO Yantao, *et al.* Research on transfer guidance demand of smart hub under the background of station-city integration [J]. *Urbanism and Architecture*, 2023(16):88.
- [23] 马晓磊, 刘兵, 姚李亮. 基于多源数据融合的高铁枢纽多模式换乘客流分担率估计[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3):309.
MA Xiaolei, LIU Bing, YAO Liliang. Estimation passenger transfer demand multimodal split in a high-speed railway hub based on multi-source data fusion [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2022, 50(3):309.