

## 考虑出行效用的空铁联运需求研究

吴薇薇,徐幼婷,刘 硕,林思奇,李倩茹

(南京航空航天大学民航学院,江苏 南京 211106)

**摘要:**文章从出行效用角度出发对空铁联运旅客需求进行研究。结合前景理论与后悔理论提出基础效用、风险感知效用和欣喜效用,基于转换的重力模型优化效用函数,得到腹地城市-高铁-航班的旅客需求预测模型。以南京禄口国际机场为目标机场,综合长三角机场群中旅客吞吐量大于1 000万的机场、距离最近的十个机场以及根据行政区划的江苏省所有机场进行空铁联运旅客需求研究。基于Wilson模型提高空铁联运辐射半径的预测精度,构建腹地城市年人均出行次数与人均GDP的关系式,得到腹地城市的空铁联运旅客需求,并进一步根据旅客出行效用评估进行空铁联运客流分配,为机场准确识别出空铁联运需求。

**关键词:**空铁联运腹地范围;需求预测;出行效用;客流分配

中图分类号:U116

文献标志码:A

本文引用格式:吴薇薇,徐幼婷,刘硕,等.考虑出行效用的空铁联运需求研究[J].华东交通大学学报,2021,38(1):136-141.

## Research on Passenger Demand of Air-Rail Intermodal Transport Considering Passenger Travel Utility

Wu Weiwei, Xu Youting, Liu Shuo, Lin Siqi, Li Qianru

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** This paper studies the passenger demand of air-rail intermodal transport from the perspective of travel utility. Combined with prospect theory and regret theory, it proposes basic utility, risk perception utility and gratification utility. Based on the converted gravity model, the utility function is optimized, and the passenger demand forecasting model of hinterland city-HSR-flight is obtained. Taking Nanjing Lukou International Airport as the target airport, it studies the passenger demand of air rail intermodal transportation by integrating the airports with passenger throughput greater than 10 million, the nearest ten airports and all airports in Jiangsu Province according to the administrative division. Based on Wilson model, the prediction accuracy of air rail combined transport radiation radius is improved, and the relationship between annual per capita travel times and per capita GDP of hinterland cities is constructed, and the passenger demand of air rail combined transportation in hinterland cities is obtained. Finally, according to the passenger travel utility evaluation, the air rail intermodal passenger flow distribution is carried out to accurately identify the demand for the airport.

**Key words:** air-rail intermodal hinterland; demand forecast; travel utility; passenger flow distribution

**Citation format:** WU W W, XU Y T, LIU S, et al. Research on passenger demand of air-rail intermodal transport considering passenger travel utility[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 136-141.

收稿日期:2020-10-10

作者简介:吴薇薇(1972—),女,副教授,博士,研究方向为交通运输经济。E-mail:nhwei@nuaa.edu.cn。

通信作者:徐幼婷(1994—),女,硕士研究生,研究方向为空铁联运组织优化。E-mail:1059843834@qq.com。

空铁联运旅客出行由飞机与高铁共同完成,航空为主+铁路为辅的空铁联运模式在我国具有很大优势<sup>[1]</sup>。我国大多数城市不具备机场-高铁站一体化的综合交通枢纽,机场、高铁站之间的中转组织难度大。分析空铁联运的客流来源,识别联运需求及分布,是优化换乘组织的前提,对于空铁联运规划建设具有重要的现实意义。

目前,对于我国空铁联运需求的研究主要集中在我国空铁复合网络及其演化研究<sup>[2]</sup>、旅客选择行为研究<sup>[3-6]</sup>、空铁联运服务水平研究<sup>[7-9]</sup>。以往的空铁联运需求主要面向全国机场枢纽构建预测模型<sup>[10-13]</sup>,为全国空铁联运布局提供了参考。本文进一步考虑旅客出行效用,结合具体机场空铁联运的市场环境、空铁联运合作资源,在满足时间协同衔接、空间衔接的基础上,综合旅客时间、票价等出行成本,采用转换的重力模型改进效用函数建立机场空铁联运旅客需求分布预测模型。南京禄口国际机场属长三角机场群,位于高铁网络发达的南京市,毗邻上海大型枢纽机场,同时也面临来自其他机场的市场竞争。一方面可以充分借助空铁联运的优势发展次级枢纽机场;另一方面随着地面到达系统的完善,区域机场之间的腹地范围愈加模糊、范围划分愈加复杂,传统的行政划分、地理距离划分方法已不能很好的预测客源分布。空铁联运客流预测难度大,亟需改进预测方法为机场识别出准确的空铁联运需求。

## 1 空铁联运旅客需求测算

机场空铁联运旅客需求属于派生需求,主要受联运腹地范围、腹地范围内的需求强度以及区域市场占有率影响<sup>[14]</sup>,同时旅客属于有限理性人,会根据联运产品属性带来的出行效用进行路径选择<sup>[15]</sup>。因此有必要对空铁联运旅客出行效用进行分析,在构建联运出行路径的基础上,将客流需求根据出行效用分配到不同的空铁联运出行路径上,得到机场空铁联运需求的时空分布并分析,为机场空铁联运规划识别有效的需求。

### 1.1 旅客出行效用函数

根据随机效用理论,空铁联运旅客出行效用受时间、票价等显性成本以及关于准时登机、换乘紧张度等隐性成本影响,出行效用随交通阻抗变化。根据随机效用理论衍生的前景理论和后悔理论,本

文将空铁联运旅客出行效用划分为以下三部分:

1) 基础效用。空铁联运旅客出行分为三个部分:旅客乘坐运输工具、旅客等候换乘、旅客候机,地面到达时间应充分,保证预留航班起飞前的最小安检时间,当预留时间超过最小安检时间,则准时到达机场的基础效用为 0,旅客放弃选择该路线。基础效用大小由该 OD(origin to destination, O 为起点, D 为终点)对所有备选路径出行时长的相对大小决定,在其他条件相同的情况下,旅客倾向于选择时长较短的方案,时间越短,交通阻抗越小,效用值越大。

2) 风险感知效用。空铁联运的旅客风险感知主要来源于换乘阶段的换乘紧张度,定义换乘紧张度为高铁站与机场间的单趟走行时间除以高铁-航班间的衔接时间长度。鉴于不同旅客的风险偏好,不同类别的旅客对于换乘过程的预留换乘时间具有不同的选择偏好<sup>[16]</sup>。如风险规避型旅客倾向于换乘中转时长较长的空铁联运出行方案,并愿意支付一定的费用<sup>[9]</sup>。

3) 欣喜效用。机场安检需要旅客预留一定的时间进行进站安检,大部分乘客会提前到达机场进行候机,但旅客可接受的候机时长不同,并当候机时长超过一定范围时旅客出行体验将随之下落,旅客需求随候机时长变化而浮动<sup>[17]</sup>,候机时间缩短可以节约旅客出行时间,提升旅客出行欣喜效用值。

基于此,构建旅客出行效用函数

$$v_{jhf} = \frac{O_{jk} S_f}{R_{jhf}^2} \quad (1)$$

式中: $v_{jhf}$ ,  $R_{jhf}$  分别为腹地城市  $j$  选择  $h-f$  组合出行的效用、交通阻抗函数; $O_{jk}$  为腹地城市  $j$  选择机场  $k$  的航空运输旅客需求; $S_f$  为航班  $f$  座位数。

空铁联运规划初期应该综合考虑旅客出行心理,构建有效的联运路径以最大化旅客满意度<sup>[15]</sup>。小汽车出行具有时间灵活及门到门的特点,可以在一定程度上弥补其价格及时长的劣势,在城际出行中具备一定优势,因此选取小汽车出行作为乘客出行备选方案。 $R_f$  为交通阻抗函数,取地面到达成本中的最小值,即小汽车出行成本与者高铁出行成本中的最小值

$$R_f = \min \{R_{car}, R_{hsr}\} \quad (2)$$

$$R_{tool} = C_1 + C_{travel} t_{travel} + C_{wait1} t_{travel} + C_{wait2} t_{travel} \quad (3)$$

式中: $tool$  为地面到达交通工具集合,包括高铁  $hsr$  和小汽车  $car$ ;  $R_{tool}$  为出行工具的交通阻抗函数,与旅客出行效用负相关,交通阻抗越大,旅客出行效

用越小; $C_1$ 为票价成本; $C_{travel}$ 为在途时间成本; $t_{travel}$ 为在途时间; $C_{wait1}$ 为换乘等待时间成本; $t_{travel}$ 为换乘等待时间; $C_{wait2}$ 为候机等时间成本; $t_{travel2}$ 为候机等待时间。借鉴旅客支付意愿研究的相关成果,本文假设换乘等待时间成本以及候机等待时间成本分别为25.21元和17.53元<sup>[17]</sup>。

### 1.2 空铁联运出行路径构建

空铁联运路径构建属于双时间窗路径规划问题,根据空间上高铁与腹地城市的经停关系约束,时间上高铁与航班的中转时间约束,构建腹地城市与目标机场各航班间可行的空铁联运路径,腹地城市  $j$  若要通过高铁  $h$  与航班  $f$  之间的空铁联运路径前往搭乘航班  $f$ ,需满足以下条件

$$0 \leq (t_f - t_{checkin} - t_{chans} - t_h) x_{jhf}, \forall j \in J, h \in H, f \in F \quad (4)$$

$$x_{jhf} \leq L_{jh}, j \in J, h \in H \quad (5)$$

式中: $t_f$ 为航班  $f$  起飞时间, $F$ 为机场所有航班组成的集合; $t_{checkin}$ 为进站安检时间; $t_{chans}$ 为高铁站与机场间接驳工具单趟走行时间; $t_h$ 为高铁  $h$  到站时间, $H$ 为高铁站所有高铁车次组成的集合; $j$ 表示机场的腹地城市, $J$ 为机场所在城市外所有腹地城市组成的集合;决策变量  $x_{jhf}$  为0-1变量,当  $x_{jhf}$  为1时表示腹地城市  $j$  可选择高铁  $h$  与航班组成的联运产品,否则表示不能; $L_{jh}$ 表示高铁  $h$  与腹地城市  $j$  的经停关系,为0-1变量,可由高铁时刻表获得, $L_{jh}$ 为1时表示高铁  $h$  有开通城市  $j$  的动车服务,否则没有。式(4)表示高铁与航班衔接需要满足中转时间要求,式(5)表示高铁与城市  $j$  的经停关系约束。

通过在 OAG, 12306 官网收集机场与高铁站的航班时刻表和高铁时刻表,通过高德地图获得城市高铁站与机场之间的换乘数据,将其代入模型,得到可行的空铁联运路径集合。

### 1.3 空铁联运客流分配模型

不同空铁联运方案具有不同的时间、票价属性,因而产生不同的旅客出行效用。综合考虑准时到达的基础效用、换乘紧张度的风险感知效用、候机时间缩短的欣喜效用建立出行效用函数,根据计算结果对腹地城市-航班间客流进行分配。

第一步,将旅客需求分配到航班上。采用转换的重力模型,将腹地城市的客流需求分配到各航班上,建立城市-航班旅客需求预测模型。航班时刻表及航班座位数安排在一定程度上体现了旅客需求分布以及需求大小,腹地城市  $j$  选择机场航班  $f$  出

行的效用函数为

$$v_{jf} = \frac{O_{jk} S_f}{R_{jf}^2} \quad (6)$$

式中: $v_{jf}$ 为腹地城市  $j$  选择机场航班  $f$  出行的效用; $O_{jk}$ 为腹地城市  $j$  选择机场  $K$  的航空运输旅客需求; $S_f$ 为航班  $f$  座位数; $R_{jf}$ 为交通阻抗函数,取地面到达成本中的最小值,旅客选择航班  $f$  的概率  $P_{jf}$ ,搭乘航班  $f$  的旅客需求  $O_{jf}$

$$O_{jf} = O_j P_{jf} = O_j \frac{v_{jf}}{\sum_{f \in F} v_{jf}} \quad (7)$$

第二步,将总需求分配到空铁联运路径上。腹地城市  $j$  选择  $h$ - $f$  组合出行的概率  $P_{jhf}$

$$P_{jhf} = \frac{v_{jhf}}{\sum_{h \in H} v_{jhf}} \quad (8)$$

## 2 禄口机场空铁联运客源分析

Wilson 模型研究在系统资源需求、供给水平以及运输费用一定的情况下各区域间的相互作用力变化,以概率的形式定量描述区域内行为主体的选择行为,因此被广泛应用于区域规划研究。本文在经典 Wilson 模型的基础上,选取长三角地区机场中旅客吞吐量大于1000万的机场、距离禄口机场最近的十个机场以及根据行政区划的江苏省所有机场。考虑机场所在区域的航空运输市场情况、机场自身规模及服务水平、机场所在城市地面交通情况,对南京禄口机场空铁联运的腹地范围预测模型进行优化。根据 Wilson 模型<sup>[11]</sup>,机场  $k$  对区域  $j$  的客源吸引能力可表示为

$$T_{jk} = KO_j P_k \exp(-\beta r_{jk}) \quad (9)$$

式中: $T_{jk}$ 为两点间双向作用力; $K$ 为地域差异程度的大小,因为本文研究主要面向国内运输市场,假设不存在地域差异,即  $K$  赋值1; $O_j$ 为区域  $j$  的航空运输出行需求; $P_k$ 为机场  $k$  在区域航空市场中的综合实力得分; $\beta$ 为衰减因子<sup>[12]</sup>; $r_{jk}$ 为地理距离。机场  $k$  在区域  $j$  的市场占有率,其阈值定义为  $\theta$ ,  $\theta = T_{jk}/O_j$ 。

采用 SPSS 软件进行因子分析,并结合主成分分析得到各机场的综合实力得分,带入模型求解得到考虑高铁开通与不考虑高铁开通情形下的机场辐射半径。根据腹地城市与区域各主要机场间的实际距离,进一步测算主要机场在目标机场腹地城市

的客源吸引能力,进而得到目标机场在腹地城市的市场分担率。

结果显示(表 1),考虑高铁开通的影响后大部分机场的辐射范围均扩大,禄口机场在宿迁、淮安、铜陵、池州、南京、马鞍山、芜湖、扬州等地的空铁联运优势明显,市场占有率在 90%~100%,在镇江、宣城、泰州、蚌埠、盐城、常州等地市场占有率在 50%~90%之间,禄口机场空铁联运市场潜力巨大。

表 1 机场综合实力得分及辐射半径计算结果  
Tab.1 Airport comprehensive strength score and radiation radius calculation results

机场	不考虑高铁开通影响		考虑高铁开通影响	
	综合实力得分	辐射半径/km	综合实力得分	辐射半径/km
上海浦东机场	2.498	244.3	2.570	245.5
杭州萧山机场	1.066	206.6	1.112	208.5
南京禄口机场	0.899	199.1	0.943	201.2
上海虹桥机场	0.721	189.3	0.751	191.1
温州龙湾机场	0.164	123.7	0.201	132.8
合肥新桥机场	0.074	89.0	0.113	107.3
宁波栎社机场	0.005	-30.2	0.040	61.8

区域航空旅客出行需求与地区经济发展水平紧密相关,建立年人均航空出行次数  $y$  与人均 GDP

$x$  的关系式<sup>[14]</sup>

$$y = a(b - e^{-cx}) \quad (10)$$

式中: $a, b, c$  为待定参数,由历史数据拟合得到。结合区域  $j$  的经济、人口属性预测区域  $j$  的航空运输需求水平。

利用 2011—2019 年长三角地区的年人均航空出行次数和人均 GDP 情况进行参数拟合,得到禄口机场客源分布。结果显示,在长三角多机场群系统下,发达的高铁网络成为禄口机场扩大服务范围的有利条件,在高效的地面达到系统下,禄口机场的主要客源来源于江苏境内,其次是安徽、浙江;上海虽在南京市腹地范围内,但由于上海市本地虹桥机场以及浦东机场的吸引力作用,其它机场很难进入。

### 3 禄口机场空铁联运客流分布

南京禄口机场现已在南京南站开通城市航站楼,提供行李托运、机场大巴接送服务,初步具备空铁联运实施的条件。根据南京南站高铁时刻表、禄口机场航班时刻表和市内换乘时间,计算得到各 OD 对(腹地城市-目的地机场)的不同路径产品出行效用,并根据出行效用进行交通流分配,分析结果如下:

1) 腹地城市-目标机场的空铁联运需求强度由航空出行需求及时刻衔接度共同决定。图 1 为兴义机场(ACX)、赣州机场(KOW)、包头二里半机场(BAV)与各城市间的联运需求。受航班与高铁时刻衔接的限制,常州-兴义机场(ACX)的空铁联运需求大于合肥-兴义机场,但常州-赣州机场(KOW)的空铁联运需求小于合肥-赣州机场。

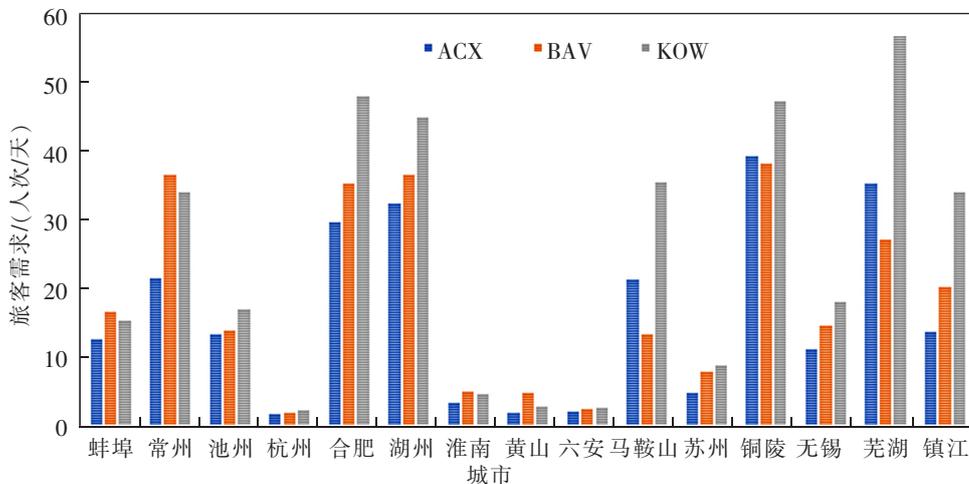


图 1 ACX/BAV/KOW 联运需求分布示意图

Fig.1. Intermodal demand distribution of ACX/ BAV/KOW

2) 腹地城市分时段联运旅客到达分布呈现明显的时空特性,在高铁车次稀疏的时段,由于腹地城市的地面到达成本较高,旅客出行效用随之下降,旅客空铁联运出行需求大幅降低。各城市间高铁开行密集区间不同,空铁联运呈现整体平稳、多个小高峰的特点,实验结果有效避免随时间推移而需求伪增加的现象。

3) 以服务旅客数量、服务城市数量为两个指标对一日内空铁联运服务能力进行评估。总体来看,机场空铁联运供需处于动态平衡的状态,如图2、图3所示,南京禄口机场空铁联运旅客需求以及空铁联运服务能力并非随高铁到站时间的推后而呈单调递减趋势,而是随时间推移呈周期性波动,与实际情况相符,考虑旅客出行效用可提高空铁联运供需的预测精度。同时说明旅客为有限理性,受出行效用的影响会相应的选取离航班起飞较为接近但仍保证一定换乘时间的高铁。其次高铁开行频率高,使得联运旅客可以在一天内进行平稳分流,同

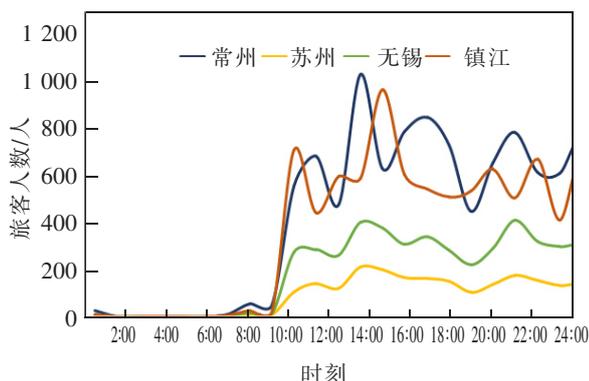


图2 部分城市日旅客到达分布示意图

Fig.2 Distribution of daily passenger arrivals in some cities

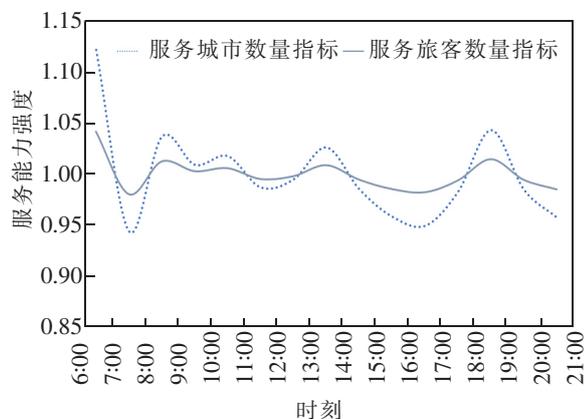


图3 空铁联运服务能力变化示意图

Fig.3 Schematic diagram of air rail intermodal transport service capacity change

一腹地的旅客到达较为分散,不同城市旅客由高铁经停达到汇集作用,因此适合以高铁车次为单位进行接驳服务的设计。

## 4 结论

本文在分析空铁联运旅客出行效用的基础上,构建出行效用函数对区域多机场系统下空铁联运旅客需求进行分配,并选取具体机场进行空铁联运路径的交通流分配。

1) 机场实施空铁联运能够改善旅客出行效用,增加市场占有率,各机场空铁联运腹地范围将突破地理和行政区划,机场应实施积极的空铁联运以增加辐射半径以及辐射强度。

2) 高铁时刻资源、航班时刻资源相对确定的情况下,不同OD对旅客理想的联运路径不同,旅客到达较为均匀、分散,运营方可将高铁作为接驳设计的基本单位,本文交通流分配的结果可作为进行车辆排班的依据,从而提高换乘衔接便利性,提高旅客满意度的同时降低运营成本。

3) 本文提出的空铁联运客源分析、联运路径出行效用评估以及空铁联运客流分配,可为机场准确识别出空铁联运需求,为空铁联运优化设计提供重要数据支撑。

## 参考文献:

- [1] 张发才. 我国空铁联运中几个关键问题分析与探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2019(4): 142-143.
- [2] 徐凤, 朱金福, 苗建军等. 空铁复合网络双阶段变式演化模型及仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(4): 1369-1375.
- [3] 李兴华, 李思雨, 成诚等. 空铁一体枢纽联运服务需求及偏好研究[J]. 综合运输, 2020, 42(6): 8-12.
- [4] XIA W M, ZHANG A M. High-speed rail and air transport competition and cooperation: A vertical differentiation approach[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2016, 94(DEC.): 456-481.
- [5] CHIAMBARETTO P, BAUDELAIRE C, LAVRIL T. Measuring the willingness-to-pay of air-rail intermodal passengers [J]. Journal of Air Transport Management, 2013, 26(JAN.): 50-54.
- [6] 李晓津, 邢伟永, 杨斌, 等. 我国空铁联运服务定价研究——基于旅客时间价值的实证分析[J]. 价格理论与实践, 2016(7): 75-78.

- [7] XIA W Y,ZHANG A M. Air and high-speed rail transport integration on profits and welfare: Effects of air-rail connecting time[J]. *Journal of Air Transport Management*,2017, 65(OCT.):181-190.
- [8] LI X Y,JIANG C M,WANG K,et al. Determinants of partnership levels in air-rail cooperation[J]. *Journal of Air Transport Management*,2018,71(AUG.):88-96.
- [9] SONG F Q,HESS S,DEKKER T. Accounting for the impact of variety-seeking:Theory and application to HSR-air intermodality in China[J]. *Journal of Air Transport Management*,2018,69(JUN.):99-111.
- [10] 沈静瑶,曾小舟,邬国祥. 中国民航客运市场需求预测的系统动力学模型研究[J]. *华东交通大学学报*,2019,36(4):57-66.
- [11] 王铮,邓悦,葛昭攀,等. *理论经济地理学*[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [12] 胡夏婷,曾小舟,潘怡凡. 区域多机场系统辐射域竞争均衡模型研究[J]. *华东交通大学学报*,2020,37(3):66-73.
- [13] 高克林,孙常聪. 大型铁路枢纽空铁联运规划分析[J]. *交通与运输*,2020,36(5):61-64.
- [14] 汪祝君. 基于机场竞争的区域机场航空客运量预测[J]. *综合运输*,2019,41(1):38-41.
- [15] 梁安宁,黄娜娜,张兵,等. 基于 NL 模型的昌九客运交通方式选择分析[J]. *华东交通大学学报*,2020,37(1):54-60.
- [16] 葛庆红,韩印. 基于 Wardrop 第二原理的中转旅客换乘紧张度优化模型研究[J]. *物流科技*,2019,42(7):107-110.
- [17] 杨忠振,陆婧. 轴-辐式机场长途巴士线网运营时刻表优化设计[J]. *系统工程理论与实践*,2012,32(9):2050-2056.