

城市多模式交通网络与广义枢纽协同优化研究综述

陈 峻

(东南大学 交通学院, 南京 211189)

摘 要:《交通强国建设纲要》提出构建便捷顺畅的城市交通网,注重一体化融合发展,强化方式衔接。基于城市多模式交通网络与枢纽衔接和转换的重要功能,提出了广义枢纽概念,围绕多模式交通网络与广义枢纽的供需特征、交通分配、优化方法、仿真研究等进行研究综述。基于城市综合交通呈现“多方式出行需求、多模式网络供给”发展趋势,提出未来重点研究方向,包括多模式交通网络供需特征及互动机理、一体化方式划分与交通分配、多模式网络与广义枢纽协同优化和多模式组合出行与广义枢纽仿真。上述重点研究方向将为提升城市综合交通系统一体化水平、提高城市综合交通系统运输能力、缓解城市交通拥堵、优化出行方式结构提供支撑。

关键词:多模式交通网络;广义枢纽;供需分析;交通分配;优化方法;仿真研究

中图分类号:U121

文献标识码:A

文章编号:1008-5696(2023)02-0001-10

Collaborative optimization of multi-modal transportation networks and generalized hubs: a review

CHEN Jun

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to build China with great transport strength, it is fundamental to develop a convenient urban multi-modal transportation network, integrate urban multi-modal transportation, and improve the quality of travel transfers. Based on the important connectivity and interchange functions of multi-modal transport networks and hubs, the concept of the generalized hub is proposed first. Then, a review of demand and supply characteristics, traffic assignment, optimization methods, and simulation research in the field is conducted. Considering the development trend of multi-modal travel demand and multi-modal network supply of the urban multi-modal transportation, future research areas are recommended, which include the analysis of demand and supply and their interaction mechanism, the integration of mode split and traffic assignment, the collaborative optimization of the multi-modal transportation network and generalized hubs, the simulation of the multi-modal trip in the urban multi-modal transportation system, and the simulation of generalized hub operation and optimization. The above key research could contribute to the integration of urban transportation systems, the improvement of urban transportation system capacity, the alleviation of traffic congestion, and the optimization of the travel modes structure.

Key words: multi-modal transportation; generalized hub; demand and supply analysis; traffic assignment; optimization; simulation

近年来,我国城镇化进程进一步加快,城市交通基础设施建设进一步深化,多方式交通基础设施

网络日趋完善。然而,当前城市内各种交通网络衔接不畅、缺乏协同,服务水平与质量未达预期,尚未实现高质量可持续发展。为优化城市交通网络融合协同不足等问题,《交通强国建设纲要》、《国家综合立体交通网规划纲要》指出,注重多方式一体化融合发展,构建便捷顺畅的城市交通网,加强方式

收稿日期:2022-12-03

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51638004)

第一作者简介:陈 峻(1972-),男,教授,博士,研究方向:交通运输规划与管理。

衔接,实现供给和需求更高水平的动态平衡,基本形成都市区 1 小时通勤,全面适应人民日益增长的美好生活需要^[1-2]。

为支撑和推进交通强国与综合立体交通网建设,把握城市交通供需特征是基础。当前我国城市交通高品质、多样化、个性化的需求不断增强,交通基础设施建设持续推进,需求与供给具有明显动态演变特征。需求方面,许多城市出行结构正由慢行交通主导向以机动化为主、多方式并存转变;供给方面,当前很多大城市的交通供给处在从单一道路交通网络向由道路网络、轨道交通网络和常规公交网络等构成的多模式交通网络演化过程中。多交通方式出行和多模式网络供给成为我国城市综合交通发展主要趋势。然而,当前我国交通基础设施建设和运营尚未与需求的动态演变形成良好匹配,城市交通正面临出行方式转移不合理、公共交通出行分担率不及预期等困境,交通拥堵在不同网络间往复。引发此类问题的一个重要原因,是各种交通网络衔接不畅、缺乏协同,未能充分发挥匹配多样化出行需求、服务复杂交通流运行转换的作用,难以引导交通方式合理转换。

在城市综合交通系统中,多种交通方式在多模式交通网络内运行流转,实现高水平的多模式交通网络一体化是应对持续增长的交通需求、促进交通系统可持续发展的解决方案。而传统交通枢纽定位为城市多模式交通与城间交通的多种交通方式衔接点,其对外服务属性较强,城市内部交通承载能力较弱。在城市交通网络中,诸如轨道交通换乘站的枢纽节点承担多种交通方式网络衔接与转换作用,是协调城市多模式交通网络资源并发挥组合运行效能的关键设施。为深入研究城市交通网络枢纽节点,文中将广义枢纽定义为服务城市多种出行方式转换和多模式交通网络衔接的交通节点。需求层面,广义枢纽能服务“个体交通-公共交通”、“公共交通-公共交通”方式转换,充分发挥组合出行方式优势;供给层面,在常规公交等子网络服务能力不足时,广义枢纽能将交通流有效衔接至其他子网络,提高城市综合交通系统韧性,实现网络效能最大化。

鉴于城市多模式交通网络与广义枢纽在动态供需演变和城市综合交通系统中发挥的重要作用,为突破多模式交通网络与广义枢纽协同发展瓶颈,掌握城市复杂交通网络各要素耦合交互机理,构建舒适顺畅的城市综合交通系统,实现高质量多网融合、高水平资源协同优化,学者针对多模式交通网

络和交通枢纽进行了深入研究。文中将以系统的视角,从供需特征、交通分配、优化方法、仿真研究方向归纳总结城市多模式交通网络与广义枢纽相关研究,针对性提出城市多模式组合出行需求-多模式网络与广义枢纽供需特征分析、城市多模式交通一体化组合出行方式划分与交通分配、基于广义枢纽协同的城市多模式交通网络优化方法和城市多模式交通网络与广义枢纽仿真方法等研究重点关注方向,为提升城市综合交通系统一体化水平、提高城市综合交通系统运输能力、缓解城市交通拥堵、优化出行方式结构提供支撑。

1 现状研究综述

供需特征、交通分配、优化方法、仿真研究在城市多模式交通网络研究中具有重要地位,受到了学者的广泛关注。本节将从城市多模式交通网络与广义枢纽供需特征、多模式出行交通分配、多模式交通网络与广义枢纽优化和多模式交通网络与广义枢纽仿真角度对已有研究进行归纳总结。

1.1 多模式交通网络与广义枢纽供需特征研究

当前,城市规模不断扩大,居民出行呈现多样化趋势,由轨道交通网络、常规公交网络和道路网络等构成的多模式交通网络已成为城市交通供给的重要组成部分。城市多模式交通网络要素复杂,是一个典型的复杂系统,其各子交通网络的网络容量、时空资源消耗、运行阻抗和服务水平等供给特征存在一定差异。国际上对于交通网络的特性研究兴起于 20 世纪 40 年代,经多年发展至今已形成一套较为成熟的城市多模式交通网络与广义枢纽供给特征研究体系,在网络容量与服务水平、结构特征与层级划分等方面积累了丰富的成果^[3-5]。国内对于多模式交通网络的研究起步相对较晚,但也取得了一系列代表性、符合我国实际情况的研究成果。目前,相关研究多集中在网络结构和客流特性方面。其中,网络结构研究多关注城市单一或多模式交通网络的拓扑分析和鲁棒性评价,以复杂网络理论为基础,通过构建交通网络模型,分析其网络的小世界特性、度分布特性等^[6-8],或模拟评估网络可靠性^[9-11]。多模式交通网络建模如图 1 所示。客流特性方面,学者通过将公交网络承载力与道路通行能力类比,构建了客流分布、服务水平与路网间的关系模型^[12-14]。广义枢纽的供给特性也引起了学者的关注,主要包括枢纽的接驳服务评价和客流特征分析。其中,接驳服务评价方面,学者以轨道交通与常规公交换乘衔接、轨道交通换

乘枢纽为主要对象,探究枢纽的客流均衡性、时空可达性等^[15-17]。枢纽节点客流特征方面,已有研究主要围绕枢纽内部和外部的客流转换特性,从枢纽换乘设施通行能力、客流接驳协调性等方面进行分析,并根据需求规模和衔接功能对枢纽进行量化评估,划分枢纽层级^[18-19]。

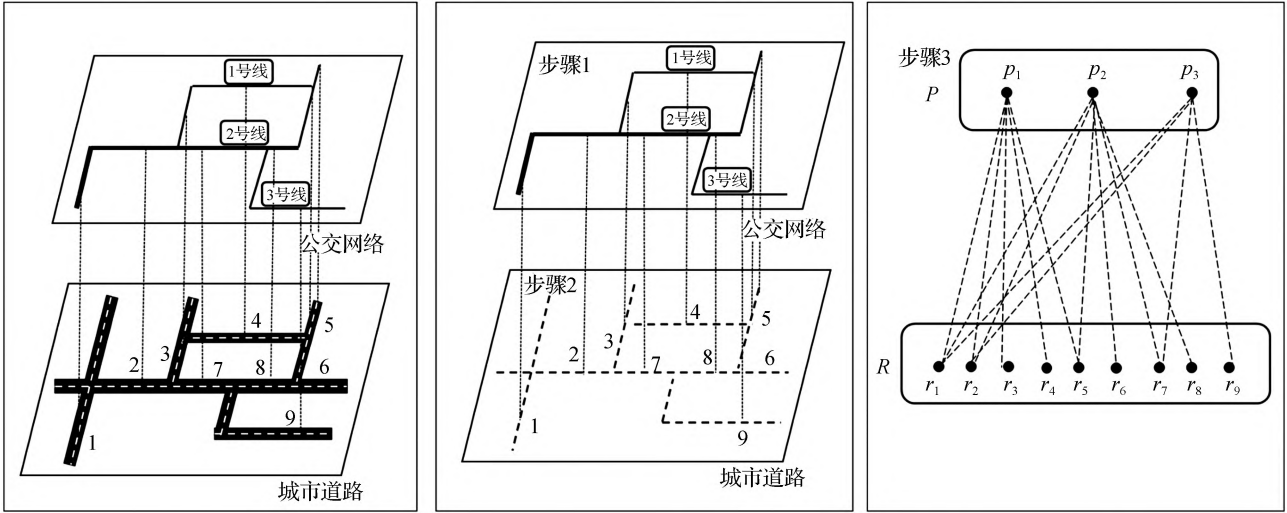


图 1 多模式交通网络建模

在需求侧,部分已有研究考虑出行 OD、换乘流量等基础出行需求,挖掘流量相关特性。而另一部分多模式交通出行需求分析常表现为出行需求效用/出行行为分析。此类针对多模式交通出行需求特征的研究主要采用集计和非集计 2 种方法。前者是将个体的交通活动按交通小区统计之后进行行为预测,但对微观个体出行需求效用及选择行为考虑有所不足,且无法实现考虑枢纽节点的组合交通行为分析,因此以个人为单位的非集计方法逐渐成为多模式交通网络客流分析的主要研究手段。诸多学者以此为基础,基于效用理论建立了考虑个体属性、出行属性、环境属性等因素的出行需求效用分析模型^[20-23]。20 世纪 90 年代开始,活动链、出行链和组合出行因其更完整地表征出行者出行行为而逐渐成为研究热点,学者也将目光逐渐转移至组合出行^[24-27]。Garcia 等^[28]提出了一种同时考虑单方式和组合出行方式的巢式 Logit 出行效用模型,构建了针对组合出行的多层方式选择函数。国内外学者针对 P&R、多式联运、枢纽换乘等多模式运行场景,提出了基于巢式 Logit 模型和交叉巢式 Logit 模型等的组合出行效用模型^[29-32],考虑换乘次数的巢式 Logit 模型结构如图 2 所示。为评估出行者出行需求,标定需求分析模型相关参数需要调查获取出行数据支撑^[33-34]。当前常用的组合出行数据获取方法大致分为两类:一类为基于显示偏好 (Revealed Preference, RP) 和陈述偏好 (Stated Preference, SP) 调查的数据获取方法,常用于挖掘

出行者的出行需求行为特征;另一类为多源交通大数据获取方法,其主要包括车辆自动定位数据、手机信令数据、刷卡数据、全球定位系统等,常用于推算多模式出行链,并进一步分析当前网络环境下组合出行方式的客流、路径等需求特征^[35-37]。

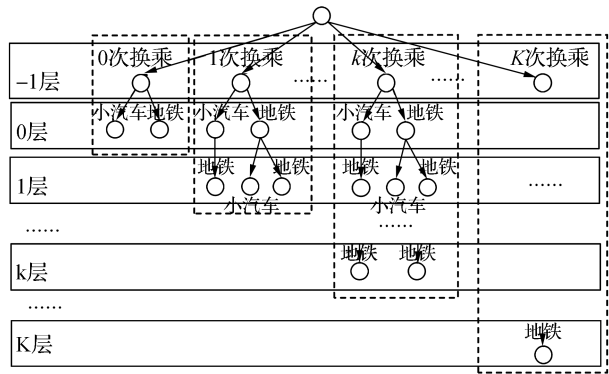


图 2 考虑换乘次数的巢式 Logit 模型结构

综上所述,在交通网络方面,单一模式的交通网络研究比多模式交通网络研究更为成熟,但针对多模式交通网络各交通方式网络间的动态连接特性分析相对薄弱,难以为解决多模式网络衔接转换等问题提供支撑。在广义枢纽方面,已有研究多关注设施优化,面向枢纽衔接的多模式交通网络协同供给特性及一体化供给性能方面的研究还有待深入。需求侧,除基础出行需求分析外,已有研究多利用 RP/SP 调查或多源大数据构建出行需求效用分析模型。此类研究大多关注 2~3 种交通方式构

成的组合出行行为,多模式网络-广义枢纽下的多种组合出行系统性需求效用分析有待提升,交通总体需求和个体出行行为协调关系有待建立,面向交通规划的非集计至集计修正方法有所欠缺,且多源大数据与传统数据的交叉融合仍有待深化。

1.2 多模式出行交通分配研究

交通分配是综合交通系统需求与供给平衡分析的重要手段。“四阶段法”是目前经典的方法之一^[38],相关研究已较为成熟,是在交通生成和交通分布的基础上基于出行需求效用/出行行为分析评估出行者交通方式选择,进行方式划分,而后根据对应交通网络的阻抗模型与流量分配原则,将客流加载到相应的网络中。为了更好地弥补传统四阶段法对多模式交通方式出行状态分析的不足,除组合出行需求效用研究外,国内外学者也对多模式出行情景下的交通分配问题开展了大量的研究。

交通分配模型通常分为静态和动态两类^[39-40],静态的交通分配主要用于预测用户在最终稳定的均衡状态下在多模式交通网络中的客流分布,而动态交通分配引入时间变量,将二维问题转化为路阻、流量和时间的三维问题。关于静态交通分配理论的研究已经较为成熟,形成了考虑用户均衡、系统最优的确定性交通分配模型^[41-42]和考虑随机用户均衡的随机性交通分配模型^[43-44]。针对多模式

交通网络的静态分配,Evans^[45]、Safwat 等^[46]、Boyce 等^[47]以及许多其他学者,在 Sheffi^[41]于 1984 年提出的方式划分/交通分配模型(Modal Shift/Traffic Assignment Problem, MS/TAP)基础上进行了完善,从模型、算法等方面使研究对象从单一出行方式向多种出行方式和组合出行方式转变。Merchant 等^[48]在 1978 年首次提出了动态交通分配(Dynamic Traffic Assignment, DTA)的概念,并采用数学规划的方法来描述动态交通流分配问题。随后的研究逐步运用混合均衡数学规划模型、变分不等式模型、巢式 Logit 模型等组合模型来研究多模式交通客流的动态分配^[49-52]。为了更好地揭示多种方式在枢纽及网络上的时空演变规律和交互作用机理,偏重于均衡演化过程的“暂态”变化和网络流波动的“逐日”(day to day)动态模型逐渐得到学者的关注^[53-54]。逐日动态交通分配理论最早始于 Horowitz^[55]和 Smith^[56]的研究,现阶段主要包括单纯重力模型、比例切换调节模型、网络试错过程、映射动态系统、演化动态系统等代表模型^[57-60],同时许多学者基于李雅普诺夫(Lyapunov)函数、不同出行感知模式、非线性系统分叉理论等对逐日动态模型的稳定性开展研究。逐日动态交通分配路径流量变化如图 3 所示。

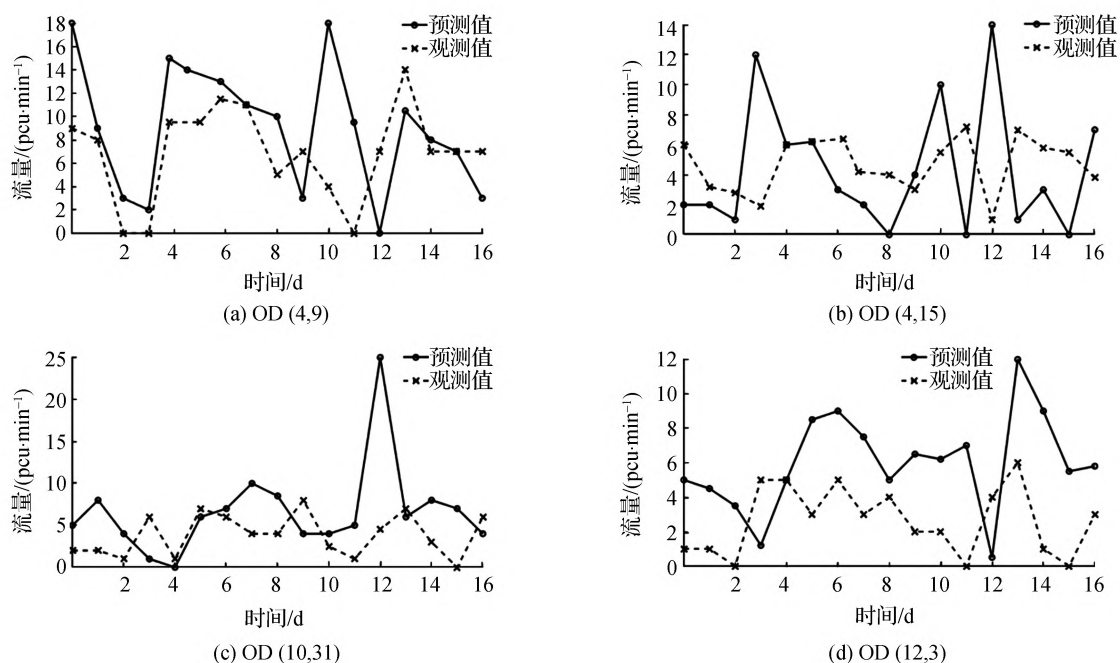


图 3 逐日动态交通分配路径流量变化

总体而言,上述针对多模式出行交通分配的研究多局限于单一网络或简单多模式网络,且只考虑了 2~3 种交通方式构成的组合出行行为,难以揭示

多模式网络中大量的组合出行在交通网络和枢纽上的动态供需交互规律,使得现阶段的建模方法和理论难以有效应用。

1.3 多模式交通网络与广义枢纽优化研究

由于广义枢纽设施资源与多模式交通网络容量存在限制,在一定约束条件下寻求满足交通出行需求的枢纽与网络优化方案成为了重要的研究任务。该方面的研究主要包括多模式交通网络设计、设施配置与布局优化、重要枢纽节点设计优化。

早期的相关研究主要聚焦于高效的交通规划与设计方案。近年来,随着多模式、多层次的城市现代化高质量综合交通系统的快速发展^[61],为充分发挥多模式交通系统的服务效能,考虑多种交通方式的交通网络优化得到了越来越多的关注。Gallotti等^[62]发现各交通方式之间进行协调与合作的难度随着交通网络复杂性的增加和规模的提升而

增大。因此,学者往往以图论、GIS路网、状态转移网络、超级网络等模型为基础构建多模式交通网络模型,考虑不同约束,并设置不同的优化目标^[63]。如Beaton等^[64]平衡了多种交通方式的运行特点与空间需求,对美国纽约的快速公交系统进行了资源协同设计。同时,一些学者也开始关注资源与环境等目标,使得多目标优化问题成为了新的研究热点^[65]。部分学者对交通网络中的共生关系问题进行了建模与分析,并就相互依赖的公共交通与共享单车各子网络系统进行了实例分析与评价^[66]。我国学者在多模式交通网络研究、系统规划、资源协同配置等方面也取得了一系列成果^[67-69]。多模式网络优化层级如图4所示。

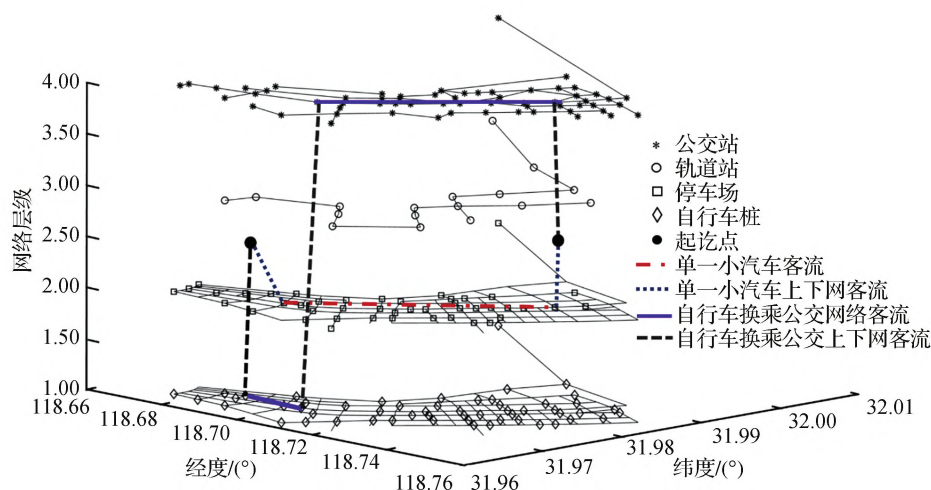


图4 多模式网络优化层级

城市综合交通枢纽是多模式交通出行依托的关键节点,因此枢纽资源优化配置也是重要的研究热点之一。其中,不少学者将线性规划、混合整数规划等理论方法应用于交通枢纽的选址布局和参数确定^[70]。目前,大多数研究多聚焦于在城市中位置相对独立的对外交通枢纽。例如,Lin等^[71]在对铁路车站P+R设施的规模进行了预测,以合理配置停车场规模。Yuan等^[72-73]针对机场枢纽的空铁联运换乘开展了SP调查,提供了枢纽服务感知模型与优化策略。Zhou等^[74]对南京南站开展了旅客调查,分析了异质旅客换乘瓶颈。部分研究也着眼于城市内部的广义枢纽资源配置问题,并大多关注轨道交通枢纽。如Du等^[75]研究了私家车与轨道交通换乘的选择行为,对枢纽换乘设施提出了优化建议。一些学者则对轨道交通枢纽站点的共享单车吸引力影响因素进行了分析,提出了共享单车站点资源优化配置策略^[76]。Chen等^[77]分析了轨道交通换乘枢纽的乘客选择行为,以便更好地指导多模式交通换乘设计。此外,Song等^[78]以社会成

本最小化为目标,提出了停车换乘与公交服务的联合规划方法。

综上,尽管现有研究已取得了一定成果,但在综合交通运输高质量发展预期下,从网络角度优化交通供需结构、提升多模式交通网络效能的需求愈发迫切,而现有研究大多关注多模式交通网络结构设计和设施资源优化,大多针对多模式交通网络中的特定枢纽或廊道,缺乏更宏观的网络供需关系优化研究。此外,枢纽领域的大量研究所关注的城市对外交通枢纽往往在城市交通规划中处于较为独立的地位,其承载的城市内部交通功能也较弱,与城市多模式交通网络的衔接性不强。城市内部的广义枢纽分布广泛、客流量大,深刻影响着大量居民的日常出行,然而相关研究中对城市广义枢纽与城市多模式交通网络的一体化资源协同优化配置考虑有所不足。

1.4 多模式交通网络与广义枢纽仿真研究

为进一步评估优化方案预期效果、模拟多模式网络与枢纽运行情况,国内外学者通常应用多种模

拟仿真软件进行仿真研究。当前,国内外主流的宏中微观交通模拟仿真软件平台有 TransCAD、TranStar、TESS NG、EMME、VISUM、VISSIM、MATSim 和 Anylogic 等。其中,交运之星 TranStar (Transportation Network System's Traffic Analysis Software)是东南大学以王伟教授为主的

交通工作者在交通运输领域内十多年的科学研究成果基础上开发的宏观交通仿真系统平台,是除同济大学孙剑教授主持开发的面向微观交通仿真软件 TESS NG 外,国内少有的具有自主知识产权的城市综合交通系统集成分析与仿真平台软件,其软件界面如图 5 所示。



图 5 交运之星 TranStar 城市多模式交通网络协同仿真分析软件界面

针对多模式交通网络,学者多使用 TransCAD、TranStar、VISUM 等宏观模拟仿真软件开展研究。此类研究主要基于出行 OD、路网流量等交通出行数据开展,且多关注分析与评估。预期路网流量预测方面,Crişan 等^[79]使用 VISUM 对罗马尼亚某市的宏观交通流进行了仿真,获取各种建设方案下路网中小汽车、卡车和公共汽车流量。多模式需求效用/方式划分等交通模型评估方面,李心为^[80]基于构建的轨道与常规公交联合方式划分-交通分配组合模型,使用西宁市实例数据分析测试了该模型;Chalumuri 等^[81]基于问卷调查数据,通过仿真评估了以地铁为主导的多模式组合出行效益。多模式网络运行效能及相关指标评价方面,Cipriani 等^[82]为优化意大利罗马市常规公交线路与发车频率,使用仿真模拟手段估计交通网络的运营成本、换乘衔接等指标;Ruyang 等^[83]基于仿真手段,使用贝叶斯优化算法求解了在考虑停车换乘场景下的次优网络容量。此外,也有研究关注不同交通政策或运营组织手段对交通系统运行的影响,如 Gholami 等^[84]针对伊朗马什哈德市,构建了包含可达性、机动性

等指标在内的交通网络评价体系,并基于 EMME 仿真分析了 6 个改进项目对于各评价指标的影响;Cipriani 等^[85]关注意大利罗马市的拥堵收费政策,并基于个体出行方式选择等模型对多种收费场景进行仿真等。针对广义枢纽,学者则多使用 Anylogic、VISSIM 等微观仿真软件,基于枢纽内部客流数据或行人流动力模型,重点针对广义枢纽内部客流组织与换乘等开展仿真优化研究,识别枢纽内部出行瓶颈问题^[86],分析评价枢纽内部设施服务能力^[87],还原枢纽内部客流行为与决策过程,如洪卓识^[88]搭建了重庆市沙坪坝枢纽站行人换乘仿真系统,为枢纽站设施设备布置问题和行人流线设计问题提供优化方案。此外,也有学者在使用 TranStar 等宏观软件模拟多模式交通网络运行情况时提取广义枢纽的换乘流量以评估交通分配结果^[89]。总体上,上述针对广义枢纽的仿真研究为广义枢纽的换乘设施设计、运营优化与资源配置提供了量化分析支撑。

综上所述,尽管学者已针对多模式交通网络和广义枢纽开展广泛的仿真研究,但仍存在以下不

足:多模式交通网络仿真方面,已有研究大多仅考虑了多种交通方式,并未涉及多模式的组合出行,尚未实现多网融合组合出行背景下的交通网络运行仿真分析。广义枢纽仿真方面,当前大多研究关注城市对外交通枢纽中的微观人流,而对城市多模式网络中的公共交通换乘站等广义枢纽考虑的有所不足,与出行者方式及路径需求的结合也不够深入,广义枢纽处各出行方式接驳需求不明,难以支撑城市多模式网络与广义枢纽协同优化。

2 研究重点关注方向

综上所述,尽管学界已针对多模式交通网络与广义枢纽的供需特征分析、交通分配、优化方法、仿真研究开展广泛的研究,但相关研究仍存在一定局限性。城市多模式交通呈现“多方式出行需求、多模式网络供给”发展趋势,多网高质量融合、高水平协同运营成为发展预期目标,而当前相关理论难以适应多方式组合出行趋势,难以支撑城市多模式交通网络一体化分析与协同优化。结合现状研究综述与未来发展趋势,文中提出以下研究重点关注方向。

1)城市多模式组合出行需求-多模式网络与广义枢纽供需特征分析

城市多模式交通网络规模大、复杂程度高,为构建合理高效的多模式网络结构,充分发挥广义枢纽在多模式网络中的衔接转换作用,有必要进一步分析广义枢纽与多模式交通网络的供需特征与客流交互特征。在供给侧,深入研究多模式交通网络中各子网络动态连接特性,分析多种衔接不同网络的广义枢纽特征,建立广义枢纽衔接多模式网络的一体化供给性能分析理论,为进一步研究多模式网络间动态竞合关系、评价多模式网络、评价枢纽衔接以及划分枢纽层级等提供支撑。在需求侧,深入分析多模式网络-枢纽环境下非集计与集计的组合同行需求与选择机理,研究宏观集计需求与个体行为的互动机理与修正方法,完善基于多源交通数据交叉融合的组合出行需求识别与特征分析方法,为挖掘组合出行需求特征、提高交通规划中宏观出行分布与方式选择精度提供理论支撑。

2)城市多模式交通一体化组合出行方式划分-动态静态交通分配

随着网约车、共享单车等出行方式的丰富、交通枢纽换乘服务水平的提高以及用户出行需求的多样化,城市多模式交通网络中的组合出行方式数量呈指数上升趋势,导致现阶段仅考虑简单多模式

交通网络和少量组合出行的方式划分与交通分配模型逐渐不再符合实际。因此有必要深入揭示多方式组合出行需求与多模式网络供给的互动机理,在组合出行选择行为分析的基础上,优化组合出行方式划分函数,提高集计与非集计方式划分准确率,并进一步探究多模式网络交通分配中多方式组合出行背景下的动态路径阻抗、路径集生成、平衡条件、动静态分配等,开展逐日动态交通分配模型的多模式网络场景实证研究,构建考虑全过程出行的一体化组合方式划分-交通分配模型,更全面、准确、动态还原出行者组合出行方式与路径选择行为,为多模式交通网络与广义枢纽优化提供基础供需特征量化支撑。

3)考虑广义枢纽与城市多模式交通供需特性的协同优化方法

以往针对城市广义枢纽与网络优化的研究多聚焦于对外客运枢纽的服务优化与多模式交通网络的结构优化,缺乏城市内部枢纽与多模式交通网络的供需特征分析。因此,应重点关注广义枢纽与多模式网络资源协同规划以及枢纽及周边设施的配套设计方法,包括:网络层面,建立城市多模式交通网络模型,根据不同方式的子网络特性以及网络承载的出行需求,以多模式交通网络的结构韧性和承载力等为优化目标,设计广义枢纽与多模式交通网络协同优化方法及其求解算法,以进一步提升网络效能,促进供需平衡;枢纽层面,基于运筹优化或建模仿真等方法,优化多模式交通相互衔接的广义枢纽中多种交通方式的换乘设施、容量与衔接设计,包括广义枢纽的出入口、P+R 停车场、自行车停放区域、行人设施等,从而更好地满足组合出行需求、优化便捷衔接机制;廊道层面,基于多模式网络中不同交通方式时空资源消耗等特征,充分挖掘和分析多模式交通系统的运行特性,优化多模式网络资源配置。

4)组合出行背景下城市多模式交通网络与广义枢纽仿真方法体系

城市多模式交通网络与广义枢纽建设成本高、运营组织复杂,实践中难以针对建设或运营等开展大范围实验研究,城市多模式交通网络与广义枢纽仿真方法将为建设优化方案评估、客流特征分析等提供量化支撑。当前城市多模式交通网络与广义枢纽仿真相关研究中对多模式组合出行、城市广义枢纽关注有所不足。因此,为更准确地还原多模式交通网络与广义枢纽中多方式组合出行行为,基于供需特征分析,搭建多方式组合出行仿真环境,开

发多模式交通网络与广义枢纽需求预测和效能评估、多模式交通一体化组合出行方式划分-交通分配、多模式交通网络与广义枢纽建设运营方案模拟等相关功能,实现考虑多网融合组合出行背景下的多模式交通网络运行仿真和考虑多方式衔接需求的城市广义枢纽运行仿真,最终形成组合出行背景下的城市多模式交通网络与广义枢纽仿真方法体系。

3 结 论

面向国家综合交通多方式一体化融合发展的重大需求,针对当前城市多模式交通网络衔接不畅、缺乏协同问题:

1)提出并分析了广义枢纽的概念和作用,并围绕多模式交通网络与广义枢纽供需特征分析、多模式出行交通分配、网络与枢纽优化方法、系统仿真研究等方面进行了研究进展综述;

2)结合未来发展趋势,提出了4大研究重点关注方向,包括城市多模式组合出行需求-多模式网络与广义枢纽供给特征分析、城市多模式交通一体化组合出行方式划分-动静态交通分配、考虑广义枢纽与城市多模式交通供需特性的协同优化方法,以及组合出行背景下的城市多模式交通网络与广义枢纽仿真方法体系。

上述重点研究方向将为构建舒适便捷的城市综合交通系统,实现高质量交通网络衔接、高水平供需动态平衡提供支撑。

参考文献:

- [1] 中共中央,国务院. 交通强国建设纲要[EB/OL]. (2019-09-19)[2022-11-20]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
- [2] 中共中央,国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[EB/OL]. (2021-02-24)[2022-11-20]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.
- [3] VERHOEF E T, KOH A, SHEPHERD S. Pricing, capacity and long-run cost functions for first-best and second-best network problems[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, 44(7): 870-885.
- [4] WONG S C, YANG H. Reserve capacity of a signal-controlled road network[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1997, 31(5): 397-402.
- [5] EWING R. Sketch planning a street network[J]. *Transportation Research Record*, 2000, 1722: 75-79.
- [6] ANGELOUDIS P, FISK D. Large subway systems as complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 367: 553-558.
- [7] DERRIBLE S, KENNEDY C. The complexity and robustness of metro networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2010, 389(17): 3678-3691.
- [8] 高自友, 吴建军, 毛保华, 等. 交通运输网络复杂性及其相关问题的研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2005(2): 79-84.
- [9] 杜斐, 黄宏伟, 张东明, 等. 上海轨道交通网络的复杂网络特性及鲁棒性研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(5): 701-707.
- [10] 王非. 基于复杂网络的公交线网特性分析与优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [11] 邢莹莹. 城市轨道交通复杂网络特性及脆弱性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [12] BRIAN C, O' MAHONY M. Transit capacity and quality of service manual applied to a bus corridor in Dublin, Ireland[J]. *Transportation Research Record*, 2004, 1887: 195-204.
- [13] KRUEGER H. Parametric modeling in rail capacity planning[C]. 1999 Winter Simulation Conference Proceedings. IEEE, 1999, 2: 1194-1200.
- [14] CURRIE G, LOADER C. Bus network planning for transfers and the network effect in Melbourne, Australia[J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2145(1): 8-17.
- [15] YANG M, WANG W, CHEN X, et al. Modeling destination choice behavior incorporating spatial factors, individual socio-demographics, and travel mode[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, 136(9): 800-810.
- [16] 许家雄. 城市轨道交通与常规公交无缝衔接评价研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [17] 宗刚, 吴彤. 公共交通枢纽可达性测度及应用[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2016, 33(5): 544-550.
- [18] 杜则行健. 基于交通换乘枢纽的多模式交通网络运能协调分析与评价[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [19] 陈辉. 城市多模式交通枢纽客流转换能力研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [20] TRAIN K E. Discrete choice methods with simulation[M]. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [21] PINJARI A R, PENDYALA R M, BHAT C R, et al. Modeling residential sorting effects to understand the impact of the built environment on commute mode choice[J]. *Transportation*, 2007, 34(5): 557-573.
- [22] LIU C, SUSILO Y O, KARLSTROM A. The influence of weather characteristics variability on individual's travel mode choice in different seasons and regions in Sweden[J]. *Transport Policy*, 2015, 41: 147-158.
- [23] 魏华, 马荣国, 赵跃峰, 等. 综合客运枢纽旅客换乘交通方式分担模型[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(2): 94-98.

- [24] BUNCH D S. Estimability in the multinomial probit model[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1991, 25(1): 1-12.
- [25] VOVSHA P. Application of cross-nested logit model to mode choice in Tel Aviv, Israel, metropolitan area [J]. *Transportation Research Record*, 1997, 1607(1): 6-15.
- [26] GRAYSON A. Disaggregate model of mode choice in intercity travel[J]. *Transportation Research Record*, 1981, 853: 36-42.
- [27] KOPPELMAN F S, WEN C H. Alternative nested logit models: structure, properties and estimation[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1998, 32(5): 289-298.
- [28] GARCÍA R, MARÍN A. Network equilibrium with combined modes: models and solution algorithms[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2005, 39(3): 223-254.
- [29] ZHANG J, TIMMERMANS H, BORGERS A, et al. Modeling traveler choice behavior using the concepts of relative utility and relative interest[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2004, 38(3): 215-234.
- [30] KONO Y, UCHIDA K, ANDRADE K. Economical welfare maximisation analysis: assessing the use of existing Park-and-Ride services [J]. *Transportation*, 2014, 41(4): 839-854.
- [31] LIU Z, CHEN X, MENG Q, et al. Remote park-and-ride network equilibrium model and its applications [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 117: 37-62.
- [32] 吴炜光. 多模式交通网络环境下典型多方式组合出行效用分析[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [33] 黄江彦. 基于智能体仿真的城市多模式组合出行分析[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [34] GRAYSON A. Disaggregate model of mode choice in intercity travel[J]. *Transportation Research Record*, 1981, 853: 36-42.
- [35] 焦朋朋, 赵霞, 张勇, 等. 基于交通大数据的移动模式分析综述[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(12): 175-202.
- [36] PELLETIER M P, TRÉPANIÉ M, MORENCY C. Smart card data use in public transit: a literature review [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(4): 557-568.
- [37] MAHAJAN V, KUEHNEL N, INTZEVIDOU A, et al. Data to the people: a review of public and proprietary data for transport models[J]. *Transport Reviews*, 2022, 42(4): 415-440.
- [38] 王伟, 过秀成. 交通工程学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2011.
- [39] 孟梦. 组合出行模式下城市交通流分配模型与算法[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [40] SAW K, KATTI B K, JOSHI G. Literature review of traffic assignment: static and dynamic[J]. *International Journal of Transportation Engineering*, 2015, 2(4): 339-347.
- [41] SHEFFI Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1985.
- [42] SMEED R J, BECKMANN M, MCGUIRE C B, et al. Studies in the Economics of Transportation[J]. *Economic Journal*, 1956, 26(265): 820-821.
- [43] DAGANZO C F, SHEFFI Y. On stochastic model of traffic assignment[J]. *Transportation Science*, 1977, 11(3): 253-274.
- [44] DAGANZO C F. Unconstrained extremal formulation of some transportation equilibrium problems [J]. *Transportation Science*, 1982, 16(3): 332-360.
- [45] EVANS S. Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment[J]. *Transportation Research*, 1976, 10(1): 37-57.
- [46] SAFWAT K, MAGNANTI T. A combined trip generation, trip distribution, modal split, and trip assignment model[J]. *Transportation Science*, 1988, 22(1): 14-30.
- [47] BOYCE D, ZHANG Y F. Calibrating combined model of trip distribution, modal split, and traffic assignment [J]. *Transportation Research Record*, 1997, 1607: 1-5.
- [48] MERCHANT D K, NEMHAUSER G L. A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problem[J]. *Transportation Science*, 1978, 12(3): 265-273.
- [49] 黄海军. 城市交通网络平衡分析: 理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [50] LEBLANC L J, FARHANGIAN K. Efficient algorithms for solving elastic demand traffic assignment problems and mode split-assignment problems [J]. *Transportation Science*, 1981, 15(4): 306-317.
- [51] UCHIDA K, SUMALEE A, WATLING D, et al. Study on optimal frequency design problem for multi-modal network using probit-based user equilibrium assignment[J]. *Transportation Research Record*, 2005 (1923): 236-245.
- [52] LOZANO A, STORCHI G. Shortest viable path algorithm in multimodal networks[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001, 35(3): 225-241.
- [53] LIU W, GEROLIMINIS N. Doubly dynamics for multi-modal networks with park-and-ride and adaptive pricing[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 102: 162-179.

- [54] CANTARELLA G E, VELONA P, WATLING D P. Day-to-day dynamics & equilibrium stability in a two-mode transport system with responsive bus operator strategies[J]. *Networks & Spatial Economics*, 2015, 15(3):485-506.
- [55] HOROWITZ J L. The stability of stochastic equilibrium in a two-link transportation network[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1984, 18(1):13-28.
- [56] SMITH M J. The stability of a dynamic-model of traffic assignment: an application of a method of Lyapunov[J]. *Transportation Science*, 1984, 18(3):245-252.
- [57] SMITH M J, WISTEN M B. A continuous day-to-day traffic assignment model and the existence of a continuous dynamic user equilibrium[J]. *Annals of Operations Research*, 1995, 60(1):59-79.
- [58] HUANG H, LAM W H K. Modeling and solving the dynamic user equilibrium route and departure time choice problem in network with queues[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002, 36(3):253-273.
- [59] MOUNCE R, CAREY M. Route swapping in dynamic traffic networks[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45(1):102-111.
- [60] GUO R Y, HUANG H J. Chaos and bifurcation in dynamical evolution process of traffic assignment with flow “mutation”[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2009, 41(3):1150-1157.
- [61] SZETO W Y, JIANG Y, WANG D, et al. A sustainable road network design problem with land use transportation interaction over time[J]. *Networks & Spatial Economics*, 2015, 15(3):791-822.
- [62] GALLOTTI R, BARTHELEMY M. Anatomy and efficiency of urban multimodal mobility[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1):1-9.
- [63] 刘月. 多模式交通网络下 P+R 与 K+R 设施布局优化与配置[D]. 南京:东南大学, 2020.
- [64] BEATON E B, BIALOSTOZKY E, ERNHOFER O, et al. Designing bus rapid transit facilities for constrained urban arterials case study of the selection process for the Webster avenue bus rapid transit running way design in New York City[J]. *Transportation Research Record*, 2013(2352):50-60.
- [65] BEN-AKIVA, MOSHE E. Smart-future urban mobility[J]. *Journeys*, 2010, 11:30-38.
- [66] CHOW J Y J, SAYARSHAD H R. Symbiotic network design strategies in the presence of coexisting transportation networks[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 62:13-34.
- [67] 曾明华, 李夏苗. 多层次多模式综合交通网络设计研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2010, 10(2):23-29.
- [68] 于晓桦. 城市多模式复合交通体系规划的若干理论与方法[D]. 上海:同济大学, 2012.
- [69] 白桦. 基于多方式的道路资源协调配置优化方法研究[D]. 南京:东南大学, 2013.
- [70] 陆化普. 交通规划理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [71] LIN T, XIA J H, ROBINSON T P, et al. Enhanced Huff model for estimating Park and Ride (PnR) catchment areas in Perth, WA[J]. *Journal of Transport Geography*, 2016, 54:336-348.
- [72] YUAN Y L, YANG M, FENG T, et al. Heterogeneity in passenger satisfaction with air-rail integration services: results of a finite mixture partial least squares model[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2021, 147:133-158.
- [73] YUAN Y L, YANG M, FENG T, et al. Analyzing heterogeneity in passenger satisfaction, loyalty, and complaints with air-rail integrated services[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 97:102950.
- [74] ZHOU Z Y, YANG M, CHENG L, et al. Do passengers feel convenient when they transfer at the transportation hub? [J]. *Travel Behaviour and Society*, 2022, 29:65-77.
- [75] DU B, WANG D Z W. Continuum modeling of park-and-ride services considering travel time reliability and heterogeneous commuters: a linear complementarity system approach[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 71:58-81.
- [76] CHENG Y H, LIN Y C. Expanding the effect of metro station service coverage by incorporating a public bicycle sharing system[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2018, 12(4):241-252.
- [77] CHEN E, STATHOPOULOS A, NIE Y. Transfer station choice in a multimodal transit system: an empirical study[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2022, 165:337-355.
- [78] SONG Z, HE Y, ZHANG L. Integrated planning of park-and-ride facilities and transit service[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 74:182-195.
- [79] CRIŞAN H G, FILIP N. Traffic modeling aspects using Visum software and effects on the traffic optimization[C]. *Proceedings of the European Automotive Congress EAEC-ESFA 2015*. Springer, Cham, 2016:495-506.
- [80] 李心为. 城市轨道交通与常规公交联合方式划分与分配模型研究[D]. 西安:长安大学, 2013.

(下转第 31 页)

- H-S网络路径再分配[J]. 系统工程, 2019, 37(3): 105-114.
- [9] 徐涛,吴志帅,卢敏,等. 面向拥堵问题的枢纽航线网络优化模型[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(11): 2553-2559.
- [10] ALUMUR S A, NICKEL S, ROHRBECK B, et al. Modeling congestion and service time in hub location problems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 55:13-32.
- [11] GHAFARINASAB N, MOTALLEBZADEH A. Modeling and solving the uncapacitated r-allocation p-hub median problem under congestion[J]. Computational and Applied Mathematics, 2021, 40(7):251-259.
- [12] O'KELLY M E, CAMPBELL J F, CAMARGO R S D, et al. Multiple allocation hub location model with fixed arc costs [J]. Geographical Analysis, 2015, 47(1): 73-96.
- [13] GHODRATNAMA A, ARBABI H R, AZARON A. A biobjective hub location-allocation model considering congestion[J]. Operational Research, 2018, 40(1): 1-40.
- [14] CAMPBELL J F, MIRANDA G D, CAMARGO R S D, et al. Hub location and network design with fixed and variable costs[C]//Hawaii International Conference on System Sciences, 2015:1059-1067.
- [15] 张培文,汪瑜,王旻轲. 枢纽航空公司机队与航线网络的联合规划方法[J]. 系统工程, 2021, 39(6):99-107.
- [16] MAHMUTOGULLARI A I, KARA B Y. Hub location under competition [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 250(1):214-225.
- [17] NIKNAMFAR A H, NIAKI S T A, NIAKI S A A. Opposition-based learning for competitive hub location: a bi-objective biogeography-based optimization algorithm[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 128: 1-19.
- [18] MARIANOV S R. Location of hubs in a competitive environment[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 114(2):363-371.
- [19] 杨澜. 竞争环境下的中枢辐射式航线网络优化设计[D]. 昆明:昆明理工大学, 2018.
- [20] 王苗苗,杨文东. 联盟环境下航空公司航线网络优化[J]. 航空计算技术, 2016, 46(3):67-71, 74.
- [21] 裴玉龙,张展展. 基于 CRITIC-TOPSIS 法的城市交通拥堵演变趋向指数研究[J]. 交通科技与经济, 2021, 23(2):1-5.

[责任编辑:戴彤焱]

(上接第10页)

- [81] CHALUMURI R S, NATH R, ERRAMPALLI M. Development and evaluation of an integrated transportation system: a case study of Delhi[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2018, 171(2): 75-84.
- [82] CIPRIANI E, GORI S, PETRELLI M. Transit network design: a procedure and an application to a large urban area[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 20(1):3-14.
- [83] RUYANG Y, XIN L, NAN Z, et al. Simulation-based analysis of second-best multimodal network capacity [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 145:103925.
- [84] GHDLAMI A, ZIAEE M. Development of a performance measurement system to choose the most efficient programs, the case of the Mashhad transportation system[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 106:261-277.
- [85] CIPRIANI E, MANNINI L, MONTEMARANI B, et al. Congestion pricing policies: design and assessment for the city of Rome, Italy[J]. Transport Policy, 2018, 80:127-135.
- [86] ZULFADLY A B, SYAHRIAH B, MARIANA M O. Simulating the pedestrian movement in the public transport infrastructure[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2016, 222:791-799.
- [87] 刘俊伯. 高速铁路与城市轨道交通换乘设施通过能力匹配研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [88] 洪卓识. 多制式轨道交通枢纽站换乘出行链构建与仿真分析[D]. 成都:西南交通大学, 2020.
- [89] 丁浩洋. 城市多模式公交网络快速构建与客流分配研究[D]. 南京:东南大学, 2018.

[责任编辑:戴彤焱]