

考虑公平性的定制公交路径规划及系统评估

刘锴¹, 王静², 连芝锐², 王江波^{1*}

1. 大连理工大学经济管理学院, 大连 116024

2. 大连理工大学交通运输学院, 大连 116024

摘要 梳理了定制公交的研究进展, 分析表明: 公平性对定制公交服务系统的可持续发展起着至关重要的作用, 现有线路规划研究已开始关注弱势群体出行公平性和时空均衡性问题。未来研究应着重解决公平性评价指标体系的建立、系统考虑公平性约束下的路径规划和调度运营等。定制公交系统设计应当兼顾新乘客票价优惠和忠诚乘客福利, 在需求演化各阶段持续优化, 提高定制公交系统的综合服务水平以及可持续发展能力。

关键词 定制公交; 需求响应; 公平性

移动互联网技术促使城市交通方式选择更加多元, 让出行变得更加便利。借助智能手机和移动网络技术实现出行需求的动态响应, 使最早出现于1970年代但一直较难推广的需求响应公交(demand responsive transit, DRT)系统重新得到重视, Daganzo^[1]45年前提出的需求响应公交常规运营(定制公交)的设想, 已经成为我国公共交通系统中的重要一环。2013年9月青岛和北京开始运营定制公交, 在很少或者几乎没有增加公共财政负担的情

况下提高了城市居民公交出行的可达性, 取得了显著的推广效果^[2]。我国大多数城市快速城市化发展进程中, 定制公交发挥了补充常规公交运力不足等积极的作用, 有效缓解了城市扩张阶段新线路规划和开通运营周期较长、公交出行需求量少且空间分散等问题。定制公交在减缓私家车购置需求、降低私家车出行(或者减少早晚通勤高峰出行需求)比例等方面具有巨大潜力, 符合我国绿色交通发展的迫切需求。

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871043, 52302404)

作者简介: 刘锴, 教授, 研究方向为交通行为分析及系统优化, 电子信箱: liukai@dlut.edu.cn; 王江波(通信作者), 副教授, 研究方向为出行行为建模分析与预测, 电子信箱: Jiangbo_Wang@dlut.edu.cn

引用格式: 刘锴, 王静, 连芝锐, 等. 考虑公平性的定制公交路径规划及系统评估[J]. 科技导报, 2024, 42(3): 89-96; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.008

定制公交系统当前角色主要是弥补传统公共交通可达性,对提升交通公平性,特别是公交服务公平性有巨大潜力。然而,全球各大城市的定制公交系统普遍在快速增长后出现乘客骤减、线路取消的现象,线路和系统存活率低、可持续性差。定制公交与传统公交系统最大的区别是供需匹配方式。传统公交系统以满足基本可达性为首要任务,被动匹配大多数一般出行需求;定制公交以需求为导向,通过定制化路线和主动服务响应,匹配个性化及特定出行需求。

公平性在定制公交路径规划中是一个至关重要的因素,强调如何公正地分配有限资源和服务^[3-4]。定制公交路径规划须从多个角度考虑公平性影响。一方面,定制公交公平性保证不同乘客群体之间的服务公平性,考虑老年人、残障人士和儿童等弱势群体的特殊需求;另一方面,定制公交公平性涉及城市不同区域之间的服务均衡性以及途响应阶段不同乘客的服务效率公平性。因此,定制公交服务资源应该合理地分配到不同城市区域,在途响应决策应尽可能满足所有乘客的最短绕行期望,避免时空不平衡分布及路径不合理响应。

本文从定制公交的运营与规划角度出发,聚焦定制公交服务公平性,从需求特征及需求响应机制、线路设计及优化方法、定制公交服务系统评估3方面具体分析国内外研究现状、问题及发展动态。

1 定制公交需求特征及需求响应机制

定制公交提供了不同于传统交通方式的公共出行服务。与常规公交相比,定制公交虽然价格较高,但更可靠(无换乘)、更舒适(每人一座)。高艺萍等^[5]研究表明,大连市常规公交和定制公交的里程效用分界线是8 km,即当乘客的出行行程超过8 km时,定制公交有明显优势。与传统出租车不同之处是可以为乘客定制出发和到达时间,但需要与其他乘客共同分享车内空间;与网约车的差别在于可以在高峰时间使用公交专用道,而且价格更低^[6]。定制公交显著提高了公交出行的服务水平,自2013年引入北京和青岛以来,全国大中型城市

经历了约3年的需求暴增期,但是随着初期阶段的车票补贴逐渐取消,2016年开始部分城市的定制公交逐渐显露出组织运营和系统管理问题,主要体现在:乘客时空需求分散导致服务水平不稳定,反过来又影响了乘客的满意度和持续选择意愿,乘客不稳定进一步加剧了线路优化设计的复杂度和组织运营动态响应的难度。一部分定制公交出行需求逐渐转向网约车出行、地铁主导的多方式出行。

1.1 考虑弱势群体的需求特征

调查发现当前大多数定制公交的使用者来自传统公交车,一部分来自出租车(主要是拼车用户),只有极少数来自私家车出行者。Zheng等^[7]发现近78%的受访者愿意尝试灵活路线的公共交通服务。女性、残疾人和退休人员、共享单车用户以及需要换乘地铁的通勤者具有更大潜力成为定制公交用户。Ke等^[8]指出非全日制学生、受过良好教育的中年人或具有学士或硕士学位的通勤者更倾向于使用定制公交,其需求差异性特征较为显著。如何不断提高时空服务水平,吸引更多用户(包括私人汽车用户、专车和出租车使用者),在交通出行服务市场竞争中稳定生存下来,成为近年来国内外研究的热点问题之一。

定制公交为特殊需求群体(如老年人、残障人士和儿童)提供了更多出行机会,确保公共交通服务的可达性,是提高公共交通公平性的重要交通方式。为了获取特殊需求群体的出行需求,研究人员采用了多种方法,并在相关研究中进行了深入探讨。Knierim等^[9]回顾了公共交通与老年人不断变化的需求之间的关系,分析了老年人出行的特点和需求,提出了改善公共服务的建议。此外,Wang等^[10]重点研究了老年人和残障人士的个性化出行需求,表明个性化移动出行服务对公平性的提升具有巨大作用。

了解个人用户特征对于满足各类出行者的需求至关重要,根据定制公交的服务水平和时空特征,确定其在出行市场中的定位和适宜市场空间,并开展需求的时空演变分析和需求响应机制分析,以最大限度地提高定制公交系统的社会效益。

1.2 多样化需求响应策略

根据定制出行服务的灵活性水平,将定制公交

分为3类,如图1所示。其中,车辆出发前收到的出行需求用黑色表示,而车辆出发后收到的出行需求用蓝色表示。图1(a)为按照固定路线和固定时间表运行的较低灵活性模式的定制公交,运行计划根据需求定期优化路线,更新时刻表。运营基本理念是了解乘客的流动性需求,并提供比传统公交车更灵活和定制化的服务,旨在提高公共交通工具的利用率。该模式由潜在乘客通过预订系统提交出行需求,注明期望出发地及出发时间、目的地和到达时间,如果该请求可以由一个(或多个)当前运行的线路来服务,则乘客可以选择满足请求的一条线路。否则,请求被存储在未满足的请求池中,并在后续优化阶段(通常每2周或每月执行一次)不断更新^[11]。

图1(b)为中等灵活模式需求响应公交,根据收集到的请求,在车辆出发之前优化路线,但是一旦车辆已经在途中,则不允许绕行。这种服务的实现遵循2阶段方案:在运营期间,信息系统收集潜在乘客提交的运输请求。这样的请求被动态地插入到未来的线路中,并且向乘客提出最佳匹配(或潜在匹配的有序集合),乘客接收行程计划的建议包括估计的接送时间和票价。如果接受,则相应地修改路线,并且存储出行请求^[12]。Sanallah等^[13]强调了需求响应出行服务的优势,并详细介绍了加拿大的实施案例。

图1(c)为高灵活模式需求响应公交,当运营商接收到一个或一批请求时,调度中心响应新需求并动态更新车辆路线^[14]。车辆预定行驶的路线途径新乘客的上下车位置时,可以直接响应需求。但如果需要绕行来满足乘客需求时,必须改进需求响应策略^[15]。一种有效提高响应成功率的方法是提升短时出行需求预测精度,根据预测需求时空序列设计车辆路线,并实时动态更新^[16]。为了简化问题,Huang等^[12]假设在车辆出发之前识别出一组强制停靠点,然后优化阶段限于两个连续强制停靠点之间的路线。Wu等^[17]对路径优化中多个参数进行了敏感性分析,例如输入请求的时间窗口宽度、车辆大小、迟到或早到惩罚以及涉及盈利能力的最小车辆负载因子。获取出行时间预测和实时路况信

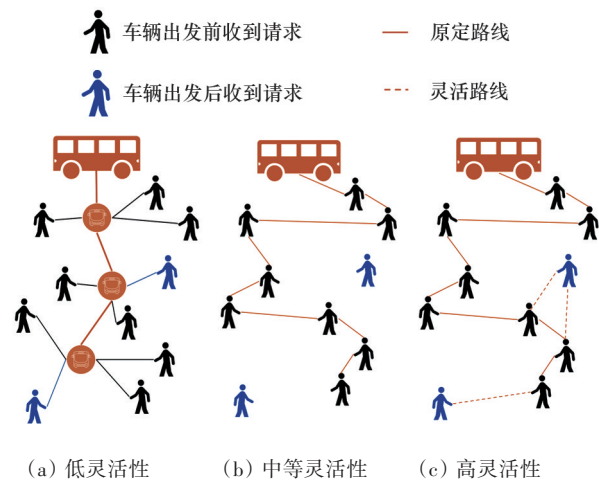


图1 定制公交灵活性示意

息可提高公交路线的灵活性并提高乘客感知的服务质量,从而潜地提高需求响应服务的利用率^[18]。

运营商通过更好地满足潜在乘客的出行需求来提高其服务的吸引力,根据乘客登车地点和时间偏好合理调度车辆,提高差异性乘客需求特征识别和预测精度,进一步设计和提供多种灵活性服务及定价机制。目前定制公交逐渐由低灵活性向动态需求响应的灵活服务转变^[19]。使用多种车型能够更好地使运输服务适应需求量,研究表明采用较小车型可以更好地实现灵活服务,但同时要解决车队规模问题^[20],更加精准的需求预测有助于确定需要的车辆数及车辆容量。使用模块车^[21]来改变车内容量可以适应动态变化的需求,但同时面临在复杂城市路网中优化路线与模块车协调调度的新挑战。

2 考虑公平性的定制公交线路设计

定制公交给出行需求相似的乘客提供一种舒适、快捷的乘车服务,其线路设计需在乘客利益、运营商利益以及社会福利3方面之间实现平衡。针对不同的目标主体,需要考虑不同的优化目标函数及约束条件。从乘客角度来说,优化目标主要包括出行时间最短、步行距离最短、较大的服务范围和较高的可靠性等^[22];从运营者的角度来说,需要尽可能低的运营成本服务尽可能多的乘客,优化目标包括总运营里程最小^[23]、运营车辆数最少^[24]、车辆

运营成本最小^[25]、利润最大以及多种成本线性加权形成的系统总成本最小^[26-29]等。从社会福祉的角度来说,定制公交线路设计优化目标主要包括提升公共交通的覆盖范围和服务水平,减轻交通拥堵和环境污染,制定合理的票价策略以促进出行公平性。将公平性指标纳入定制公交线路设计优化目标中,以寻求最优的路径规划方案。

2.1 服务范围与服务人群

目前定制公交面临的首要问题是市场占有率较低,可以响应需求和动态调度的线路过少,导致较难满足乘客的非规律性出行需求。定制公交线路设计大多数针对城市内日常通勤,从公平性的角度来看,定制公交应该考虑公平地扩展服务范围,以服务通常被忽视或公共交通不便的地区。这可以帮助减少地域差异,确保所有人都能够获得公平的交通服务。同时在线路设计时需要避免与传统公交有明显的重合,提高公共交通的服务范围。Zhang等^[30]研究需求响应农村定制公交车辆路线优化问题,目的是最小化运营商的运营成本和乘客的出行时间成本,设计的优化模型和混合算法可为农村开通需求响应型定制公交线路运营方案提供理论参考。

定制公交应该根据乘客的不同需求提供多样化的服务,包括适应残障人士的无障碍设施、为老年人提供辅助服务、为家庭提供儿童安全座椅等。通过满足不同人群的需求,可以确保服务的公平性。周晟等^[31]通过问卷调查和对特定数量的公交IC卡数据进行了整理分析,针对老年人乘坐公交的需求和顾虑,设计出专为老年人服务的定制公交运行线路和班次,提高老年人公交出行体验,保障其出行需求和出行安全。定制公交出行服务有效拓展了公共交通服务的类型,也为更好地提供公益性交通服务创造了条件。

2.2 提高服务水平

在定制公交线路设计前需要收集乘客的出行需求,为线路规划预留充分的时间。定制公交如何在运行过程中合理响应乘客动态出行需求并保证定制公交的运营收益,是保证定制公交服务公平性和可持续性的关键问题。研究成果提出多种可行

方案,包括考虑动态需求响应、设计灵活的需求响应服务等。汪怡然等^[32]考虑迟到乘客处理和线路运营收益计算等实际问题,提出一种定制公交动态响应方案,能处理车辆运行过程中可能出现的动态需求、乘客迟到误车等突发情况,同时保障公交的运营收益和服务公平性。Wang等^[33]引入时间惩罚成本,以适应车辆提前和延迟到达对乘客满意度的影响,建立路由优化模型,最大限度降低系统运行成本和乘客时间损失成本。Wang等^[34]提出了一种更灵活的需求响应服务,考虑了有限理性乘客的软时间窗口,建立补偿机制,缓解乘客的不满,同时大幅提高系统效率。Dou等^[35]为了捕捉不确定需求环境下运营商的风险规避水平,在混合整数线性规划模型中嵌入一个描述潜在乘客拒绝公交服务的可能性的随机变量和2个相关的控制参数,从而实现了一个可调的鲁棒优化模型,用于公交线路、时刻表和公交车调度的复杂决策,目标是生成一组有利可图的公交服务,以满足不同通勤出行需求。这些方案能够处理突发情况、优化系统效率、提高乘客满意度,同时保证运营收益和服务公平性。

2.3 合理的票价策略与公益性保障

传统公交具有明显的公益属性,普遍采用低于运营成本的低票价,票价与运营成本的差额需要给予相应的财政补贴才能保持公交服务供给的连续性。定制公交的票价高于传统公交,但是在不考虑补贴的情况下,票价收益还是不足以覆盖车辆运营成本。定制公交的公益性与市场性发展路径孰优孰劣仍然存在争议。岳昊等^[36]引入价格窗的概念描述乘客出行过程中可接受的支付范围;提出超额均摊的票价支付假设规则,使乘客在保证出行的基础上支付最少费用。定制公交定位于传统公交辅助补充的角色,应该与传统公交错位发展、差异化经营。由于国家层面尚未出台城市定制公交运营管理办法,各地方城市大多采用完全市场化运营模式,未来建议适度补贴部分公益性线路,以提高公共交通的公平性。蒋蕊等^[37]通过总出行成本的数值量化建立竞争力评估模型,定量分析定制公交线路相对常规公交线路所具有的竞争力,利用不同的引导策略,实现了定制公交与常规公交的错位协调

发展。龚华炜等^[38]以定制公交和普通公交的客票收入最大化作为博弈目标,构建2种公交方式的票价博弈模型,研究结果表明,合理制定票价方案能够使定制公交和普通公交获得均衡发展的条件,并促进不同公交方式的协调发展,实现城市公交优先的交通发展目标。

总的来说,定制公交路径规划在充分权衡乘客和运营商两方利益的基础上,还应着眼于更广泛的社会利益和可持续性发展。

3 定制公交系统评估

目前国内外对需求响应式公交的研究多集中在调度运营方面,对系统服务水平评估较少。定制公交系统综合评价体系研究是对该系统进行全面认识和有效评估的基础,能够为系统组织优化、运营成本控制、政府宏观调控等方面提供科学依据。

3.1 乘客感知评估:满意度及忠诚度

乘客感知满意度是定制公交出行研究的核心问题,帮助研究者和决策者了解乘客对定制公交服务的满意程度,并为改进服务提供参考。近年来,许多研究关注了定制公交出行的满意度,采用了不同的方法和指标。龚华炜等^[39]提出从乘客感知(服务对象)、公交运营(服务提供)、政府管理(服务监督)3个层面建立了灵活型定制公交系统的评价体系。Amirgholy等^[40]提出整体上有3类因素直接或者间接影响需求响应式公交系统的服务水平:需求特征因素、网络因素和运营因素。常见的方法是通过调查问卷收集乘客的反馈意见,卢晓林等^[39]使用了调查问卷评估乘客对定制公交服务的整体满意度、车辆舒适度、等待时间等方面的感受。何民等^[41]在线路设计时考虑了乘客舒适性等满意度指标。

Lai等^[42]指出乘客的使用意愿或忠诚度显著依赖于乘客满意度,Jomnonkwao等^[43]发现公交服务的用户满意度对忠诚度水平有显著且直接的影响,并证明了感知价值、服务质量、服务期望、出行经验等对忠诚度有正向影响。目前大多研究关注新乘客的票价折扣,而并未考虑忠诚者福利的设计,直接影响了需求的稳定性,导致线路可持续性差,系统

存活时间短、存活率较低。Wang等^[44]基于中国大连市定制公交用户的长期订阅记录和OD信息,建立了生存模型,证实了节约出行时间和票价合理折扣有助于提高定制公交用户忠诚度,但对于忠诚用户与非忠诚用户的作用效果存在差异。进一步研究发现降低票价对忠诚用户的订阅频率提升有更为显著的作用^[45],针对忠诚用户设计鼓励长期使用的福利策略有利于提升定制公交系统的生存率。短期票价折扣对新用户有很强的吸引力,能够显著提高其订阅频率,但并不能将其转化为忠诚用户。定制公交系统规划不仅需要设计面向新乘客的票价折扣策略,还应充分考虑面向忠诚者的福利设计,从提升服务吸引力到提高忠诚用户转化率的需求演化全链路持续发力,提高定制公交线路和系统的可持续性和存活率。

3.2 运营评估:公平、效率与可持续发展

通过收集和分析定制公交系统的运行数据,如乘客流量、车辆运行时间和准点率,可以评估系统的运行效率和服务水平。张汝华等^[46]从路段服务水平、站点服务水平及车上服务水平3个维度提取运行服务水平的影响因素,包含站点覆盖率、高峰满载率等指标,开展需求响应式公交运行服务水平研究,将青岛市实际运行服务水平评价为“较高”等级。交通公平性在越来越多的交通规划目标中不断加强^[47],金煜东^[48]应用累计机会可达性模型和空间分析方法分析了大连市定制公交对城市交通公平可达性的影响,结果显示,定制公交明显提升了居民区、工业园区、交通枢纽和商场等区域的可达性,特别在中长途出行中更加显著。

根据可持续发展目标,需要标准来量化社会效益与成本^[49]。Nguyen-Hoang等^[50]将出行需求建模为价格、系统特征、影响出行方式选择的因素、其他人口统计和位置特征以及误差项的函数,将出行成本建模为未观察到的成本(例如产出、投入价格和无法控制的外部因素)和效率的函数,证实了需求响应定制公交的整体效益远远超过了其成本投入。

定制公交呼应了双碳目标的要求,对其节能减排的影响评估恰逢其时。Dytekov等^[51]研究评估定制公交系统的碳排放量和空气污染物排放量,以及

与传统公交系统和私家车相比的环境优势。Ryley 等^[52]分析了需求响应式公交系统对城市交通可持续发展的贡献,针对农村出行、机场接驳、铁路车站接驳、通勤出行、就医出行 6 种服务场景分别提出了对应的政策导向,并提出与其比较环境可持续的绝对水平,不如从替代方案(通常是公共汽车或汽车)的角度考虑环境效益。Dessouky 等^[53]提出应当使用全生命周期影响评估方法评估需求响应出行系统环境影响,而不是仅仅在车辆路径规划和调度优化阶段评估环境影响。采用电动公交车也成为一研究热点^[54],这种新型绿色能源交通工具必然成为城市绿色交通的主要贡献,如何结合定制公交的运营需求和电动公交车能源消耗和补充的限制,也成为近期的主要研究问题。

4 结论

分析了近 10 年来定制公交系统的研究热点,梳理了路径规划和系统评估相关研究成果。其中,公平性在定制公交的路径规划和系统评估中起着重要作用,研究者已经考虑了包括弱势群体在内的不同乘客群体的服务公平性,将公平性指标纳入路径规划优化目标。总结了包括乘客满意度与忠诚度、定制公交系统公平效率及可持续发展在内的系统评估指标,对定制公交出行需求演化进行有效评估。展望了未来研究需要重点关注的方向:需要考虑不同乘客群体的需求差异,通过需求响应策略设计将其与路径规划、运营调度相融合。此外,还应加强实证研究和案例分析,细分定制公交服务市场,检验多样化、定制化服务产品在不同出行场景和不同占有率出行市场中的适应性。

参考文献 (References)

- [1] Daganzo C F. An approximate analytic model of many-to-many demand responsive transportation systems[J]. *Transportation Research*, 1978, 12(5): 325-333.
- [2] Liu T, Ceder A. Analysis of a new public-transport-service concept: Customized bus in China[J]. *Transport Policy*, 2015, 39: 63-76.
- [3] Di Ciommo F, Shiftan Y. Transport equity analysis[J]. *Transport Reviews*, 2017, 37(2): 139-151.
- [4] Karner A. Assessing public transit service equity using route-level accessibility measures and public data[J]. *Journal of Transport Geography*, 2018, 67: 24-32.
- [5] 高艺萍, 高虹, 彭新潮, 等. 定制公交用户持续选择行为影响因素研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021, 45(4): 639-642.
- [6] Wang J, Yamamoto T, Liu K. Role of customized bus services in the transportation system: Insight from actual performance[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2019: 6171532.
- [7] Zheng Y, Li W, Qiu F, et al. Travelers' potential demand toward flex-route transit: Nanjing, China, case study[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2020, 146(1): 05019018.
- [8] Ke J, Zheng H, Yang H, et al. Short-term forecasting of passenger demand under on-demand ride services: A spatio-temporal deep learning approach[J]. *Transportation Research part C: Emerging technologies*, 2017, 85: 591-608.
- [9] Knierim L, Schlüter J C. The attitude of potentially less mobile people towards demand responsive transport in a rural area in central Germany[J]. *Journal of Transport Geography*, 2021, 96: 103202.
- [10] Wang H, Li J, Wang P, et al. Adaptability analysis methods of demand responsive transit: A review and future directions[J]. *Transport Reviews*, 2023, 43(4): 676-697.
- [11] Vansteenwegen P, Melis L, Aktaş D, et al. A survey on demand-responsive public bus systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 137: 103573.
- [12] Huang D, Gu Y, Wang S, et al. A two-phase optimization model for the demand-responsive customized bus network design[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 111: 1-21.
- [13] Sanaullah I, Alsaleh N, Djavadian S, et al. Spatio-temporal analysis of on-demand transit: A case study of Belleville, Canada[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2021, 145: 284-301.
- [14] Shen S, Ouyang Y, Ren S, et al. Design and implementation of zone-to-zone demand responsive transportation systems[J]. *Transportation Research Record*, 2021, 2675(7): 275-287.
- [15] Guo R, Guan W, Zhang W, et al. Customized bus routing problem with time window restrictions: Model and

- case study[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2019, 15(2): 1804–1824.
- [16] Tafreshian A, Abdolmaleki M, Masoud N, et al. Proactive shuttle dispatching in large-scale dynamic dial-a-ride systems[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 150: 227–259.
- [17] Wu Y, Yuan Z, Xiao Q, et al. Customized bus scheme design of large transport terminals with jointly optimization of departure time, vehicle allocation and routing[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2023, 17(1): 85–101.
- [18] Guo R, Zhang W, Guan W, et al. Time-dependent urban customized bus routing with path flexibility[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 22(4): 2381–2390.
- [19] Lyu Y, Chow C Y, Lee V C S, et al. CB-Planner: A bus line planning framework for customized bus systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 101: 233–253.
- [20] Tirachini A, Chaniotakis E, Abouelela M, et al. The sustainability of shared mobility: Can a platform for shared rides reduce motorized traffic in cities? [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 117: 102707.
- [21] Xia D, Zheng L, Cai X, et al. Urban Customized bus design for private car commuters[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(21): 21723–21735.
- [22] 安久煜, 宋瑞, 毕明凯, 等. 高铁车站接驳公交灵活线路优化设计研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(5): 150–155.
- [23] 王超, 马昌喜. 基于遗传算法的定制公交多停车场多车线路优化[J]. *交通信息与安全*, 2019, 37(3): 109–117.
- [24] 韩霜, 傅惠. 即时响应式定制公交调度优化[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(6): 120–127.
- [25] Li Z J, Song R, He S, et al. Methodology of mixed load customized bus lines and adjustment based on time windows[J]. *PLoS ONE*. 2018, 13(1): 1–11.
- [26] Tong L C, Zhou L, Liu J, et al. Customized bus service design for jointly optimizing passenger-to-vehicle routing[J]. *Transportation Research: Emerging Technologies*, 2017, 85: 451–475.
- [27] Han Z, Chen Y, Li H, et al. Customized bus network design based on individual reservation demands[J]. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5535.
- [28] 申婵, 崔洪军. 基于可靠性最短路的实时定制公交线路优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(6): 99–104.
- [29] 彭巍, 周和平, 高攀. 面向城际轨道交通的定制化接驳公交线路优化[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 14(4): 49–54.
- [30] Zhang B, Zhong Z, Zhou X, et al. Optimization model and solution algorithm for rural customized bus route operation under multiple constraints[J]. *Sustainability*, 2023, 15(5): 3883.
- [31] 周晟, 姜耀鹏, 习晨希. 浅谈老年人定制公交车次的研究[J]. *公路*, 2020, 65(7): 244–249.
- [32] 汪怡然, 陈景旭, 王岳平, 等. 考虑服务公平性的定制公交动态响应方案[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(11): 2574–2581.
- [33] Wang S, Wang J, Hu X, et al. Routing optimization of regional flexible transit under the mixed demand mode[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2023, 2677(10): 662–675.
- [34] Wang H, Guan H, Qin H, et al. Towards a more flexible demand responsive transit service with compensation mechanism considering boundedly rational passengers [J]. *IET Intelligent Transport Systems*. 2023, 17(6): 1229–1246.
- [35] Dou X, Meng Q, Liu K. Customized bus service design for uncertain commuting travel demand[J]. *Transportmetrica (Abingdon, Oxfordshire, UK)*. 2021, 17(4): 1405–1430.
- [36] 岳昊, 刘建业, 李崇楠. 引入价格窗的定制公交线路优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*. 2022, 22(3): 93–103.
- [37] 蒋蕊, 卓健. 定制公交竞争力分析与规划应对[J]. *规划师*, 2018, 34(8): 113–119.
- [38] 龚华炜, 靳文舟, 郝小妮, 等. 定制公交的博弈定价方法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(8): 70–76.
- [39] 卢小林, 张娴, 俞洁, 等. 灵活型定制公交系统综合评价方法研究[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(5): 135–140.
- [40] Amirgholy M, Gonzales E J. Demand responsive transit systems with time-dependent demand: User equilibrium, system optimum, and management strategy[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 92: 234–252.
- [41] 何民, 李沐轩, 税文兵, 等. 可靠性和舒适性对响应式定制公交线路设计的影响[J]. *公路交通科技*, 2019, 36(5): 145–151.
- [42] Lai W T, Chen C F. Behavioral intentions of public transit passengers—The roles of service quality, perceived

- value, satisfaction and involvement[J]. *Transport Policy*, 2011, 18(2): 318–325
- [43] Jomnonkwo S, Ratanavara V, Khampirat B, et al. Factors influencing customer loyalty to educational tour buses and measurement invariance across urban and rural zones[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2015, 11(8): 659–685.
- [44] Wang J, Yamamoto T, Liu K. Key determinants and heterogeneous frailties in passenger loyalty toward customized buses: An empirical investigation of the subscription termination hazard of users[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102636.
- [45] Wang J, Yamamoto T, Liu K. Exploring the subscribing behavior of customized bus passengers: Active users versus inactive users[J]. *Journal of Choice Modelling*, 2022, 43: 100355.
- [46] 张汝华, 赵冰. 需求响应式公交运行服务水平指标体系构建与测度研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(11): 41–51.
- [47] Ciommo F D, Shiftan Y. Transport equity analysis[J]. *Transport Reviews*, 2017, 37(2): 139–151.
- [48] 金煜东. 衡量定制公交对于公共交通公平可达性的贡献[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [49] Heinitz F. Sustainable development assessment of incentive-driven shared on-demand mobility systems in rural settings[J]. *European Transport Research Review*, 2022, 14(1): 38.
- [50] Nguyen-Hoang P, Yeung R. What is paratransit worth[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2010, 44(10): 841–853.
- [51] Dytckov S, Persson J A, Lorig F, et al. Potential benefits of demand responsive transport in rural areas: A simulation study in Lolland, Denmark[J]. *Sustainability*, 2022, 14(6): 3252.
- [52] Ryley T J, Stanley P A, Enoch M P, et al. Investigating the contribution of demand responsive transport to a sustainable local public transport system[J]. *Research in Transportation Economics*, 2014, 48: 364–372.
- [53] Dessouky M, Rahimi M, Weidner M. Jointly optimizing cost, service, and environmental performance in demand-responsive transit scheduling[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2003, 8(6): 433–465.
- [54] Varga B O, Iclodean C, Mariasiu F. *Electric and hybrid buses for urban transport*[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

Customized bus path planning and system evaluation considering equity

LIU Kai¹, WANG Jing², LIAN Zhirui², WANG Jiangbo^{1*}

1. School of Economics and Management, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. School of Transportation and Logistics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract Customized buses can achieve an accurate match between travel demands and responsive travel service supply to meet the emerging travel requirements of flexibility and carbon reduction. However, sustainable development of customized bus systems and routes still faces many problems. By analyzing the relevant literature in the past decade, this paper compares the hot spots and trends of customized buses, summarizes the common problems of existing research, and forecasts the important future research directions. Equity plays a crucial role in the sustainable development of customized bus service systems, and existing route planning studies have begun to focus on the equity for disadvantaged groups and spatial equilibrium. Future research should focus on addressing the establishment of a fairness evaluation index system, systematic consideration of route planning and scheduling operations under fairness constraints, etc. Customized bus system planning must take into account the design of new passenger fare discounts and loyalist benefits, and sustain efforts at all stages of demand evolution to improve the sustainability and survival rate of customized bus routes and systems.

Keywords customized bus; demand responsiveness; equity ●



(责任编辑 卫夏雯)