

需求响应公交及其路径优化研究综述

冯帅^{1,2}, 刘小明¹

(1. 北方工业大学电气与控制工程学院, 北京 100043;

2. 北京公共交通控股(集团)有限公司, 北京 100161)

摘要: 随着新基建等技术的泛在应用, 需求响应公交(DRT)正成为未来城市交通发展的趋势。为了进一步厘清DRT的国内外研究现状, 首先, 梳理和分析了DRT的分类和实现DRT运营所必需的生产要素; 其次, 阐述了DRT模式的产生过程和运营实践; 再次, 从优化目标、约束选择、求解算法3个维度对DRT优化问题进行分析总结, 尤其对元启发式算法进行了详细总结; 最后, 在面向DRT的应用场景、模型构建、算法求解、常规公交与DRT协同优化等方面提出了展望, 针对DRT未来可能的研究方向和研究热点提出了建议。

关键词: 公共交通; 需求响应公交; 路径优化; 求解算法

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202116

A survey of research on demand responsive transit and its route optimization

FENG Shuai^{1,2}, LIU Xiaoming¹

1. School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100043, China

2. Beijing Public Transport Corporation, Beijing 100161, China

Abstract: With the widespread application of new infrastructure and other technologies, demand responsive transit (DRT) is becoming the trend of urban traffic development in the future. In order to further clarify the research status of DRT at home and abroad, firstly, the classification of DRT and the operational production factors were analyzed. Secondly, the production process and operation practice of DRT mode were described. Thirdly, the DRT optimization problem was summarized and analyzed from the three dimensions including optimization objectives, constraint selection and solving algorithm, especially the meta heuristic algorithm. Finally, the prospect of DRT scenarios, model construction, algorithm solution, and the collaborative optimization were proposed. Several hotspots and possible directions of future research were suggested.

Key words: public transport, demand responsive transit, route optimization, solving algorithm

1 引言

大数据、人工智能新时代^[1-3]的到来给传统公共交通带来很大的冲击和挑战, 深刻改变了传统的出行观念, 广大乘客对出行的需求正从常规出行向个性化、定制化、高品质转变。同时, 大型城市交通

拥堵现象严重, 对环境保护要求高, 在此背景下, 一种新型交通模式应运而生, 即需求响应公交(demand responsive transit, DRT)系统^[4]。DRT也被称为电召服务(dial-a-ride service, DAR)^[5-6]、定制公交^[7-8]、灵活型公交^[9-10]、柔性公交^[11-12]等, 它是一种具有一定自由度, 介于传统常规公交和私

收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-04-06

通信作者: 冯帅, 2039707616@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.2018YFB1601003); 北京市自然科学基金资助项目(No.8172018)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1601003), The Natural Science Foundation of Beijing (No.8172018)

家车之间的交通服务模式。

20 世纪 60 年代, Cole L M 等人^[13]探讨了未来可能出现的交通服务模式, 其中有一种需求响应公交系统 (demand-activated bus system), 该系统结合了常规公交和出租车系统的特点, 目的是为人口密度低的地区的居民提供便利的出行服务, 可以说这是 DRT 的缩影。1990 年, 美国颁布了《美国残疾人法案》, 该法案规定相关机构必须为不能使用常规公共交通的特殊乘客提供灵活型公交的服务^[14]。自此, 国内外学者纷纷开始研究 DRT 系统^[15-18]。国内学者对 DRT 的研究较晚。DRT 于 2013 年 8 月在青岛首次被引入并实施^[19], 随后北京、济南、天津等多个城市开通 DRT 服务。DRT 服务网络结构示意图如图 1 所示, 运营车辆从车场出发, 沿着一定的路径同时满足不同乘客的上车或下车需求, 直至把所有乘客送达目的地, 再返回车场。

DRT 与常规公交以及私家车的特点见表 1。

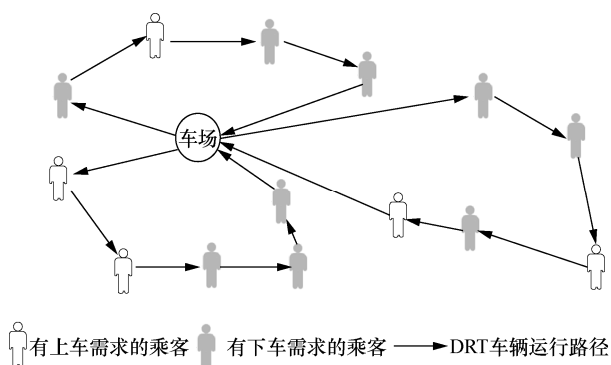


图 1 DRT 服务网络结构示意图

2 DRT 概述

2.1 DRT 分类

根据美国公共交通合作研究计划 (transit co-operative research program, TCRP), 可将 DRT 服务模式分为 6 类, 分别是: 线路可变公交服务、车站可变公交服务、需求响应接驳式服务、响应式车站服务、区段需求响应公交服务和区域需求响应公交服务^[20]。下面对每类 DRT 服务模式进行简单介绍。

(1) 线路可变公交服务

线路可变公交服务如图 2 所示。运营公交车辆沿着一条基准线路行驶, 如果没有乘客在固定车站以外有需求, 那么车辆沿着基准线路行驶, 此时它与常规公交线路一样, 有固定的车站、固定的线路、固定的时刻表。如果有乘客在固定车站以外提出需求, 那么车辆就会在系统规定的松弛时间内偏离基准线路提供响应式“门到门”的服务。当服务完固定车站以外的乘客后, 运营车辆继续沿着基准线路运行。这种类型的响应式服务不但会受到基准线路空间上的约束, 还会受到松弛时间的窗口约束。

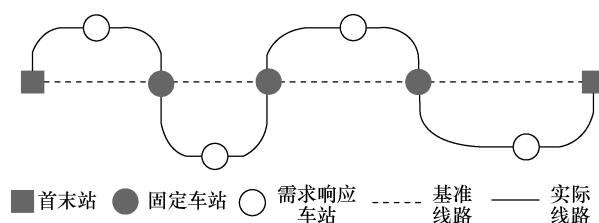


图 2 线路可变公交服务

(2) 车站可变公交服务

车站可变公交服务如图 3 所示。在一定的运营区域内, 此种模式下的运营车辆不需要沿着基准线路行驶, 只需要在经过一些固定车站的基础上, 根据乘客的响应式需求, 灵活地规划运行的路径。车站可变公交服务与线路可变公交服务的主要区别在于: 车站可变公交服务需要有固定车站, 而线路可变公交服务需要有基准线路。二者的相同点在于这两种模式都要受到空间和时间窗的约束。

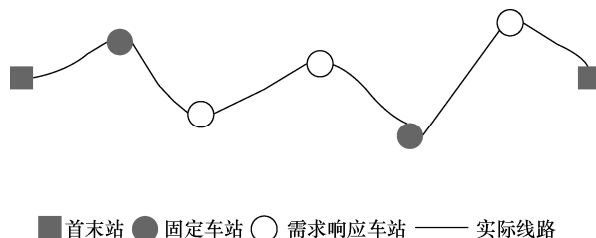


图 3 车站可变公交服务

表 1

DRT 与常规公交以及私家车的对比

| 交通服务模式 | 自由度 | 时刻表 | 载客量 | 乘坐成本 | 舒适度 | 运营模式 |
|--------|-----------|----------|-----|------|-----|----------|
| 常规公交 | 0 | 固定 | 高 | 低 | 低 | 基于固定公交线路 |
| DRT | (0, 100%) | 固定、不固定或无 | 可变化 | 中 | 高 | 可提前收集需求 |
| 私家车 | 100% | 无 | 低 | 高 | 高 | 完全响应需求 |

(3) 需求响应接驳式服务

需求响应接驳式服务如图4所示。该交通服务模式在一定的服务范围内,根据乘客的预约需求灵活生成线路,不会受到基准线路和固定车站的限制,自由度较高,服务方式较灵活。在北京南站和北京西站等地区开通的合乘定制公交线路就属于需求响应接驳式服务模式。这种模式多出现在一些大型的交通枢纽车站,服务于轨道交通旅客的接驳出行需求,解决了出行的“最后一公里”难题。线路的起点或终点通常会设置在大型的交通枢纽站。

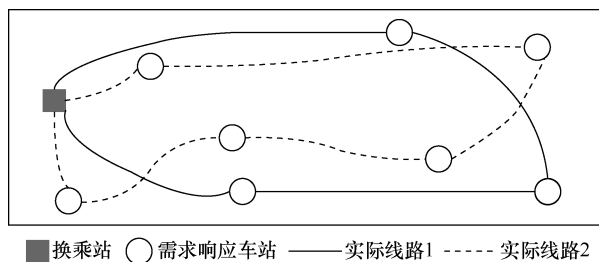


图4 需求响应接驳式服务

(4) 响应式车站服务

响应式车站服务如图5所示。该交通服务模式与线路可变公交服务类似,不同点是需求响应车站是已知的,车辆的运行路径会根据需求响应车站的乘客需求而定,需求响应车站一般设在乘客步行距离比较长或者其他公交线路不便到达的区域。经过需求响应车站后,车辆会返回到基准线路按照固定线路和车站、固定行车计划继续运行。相对来说,此种交通服务模式的路径规划和运营组织较简单。

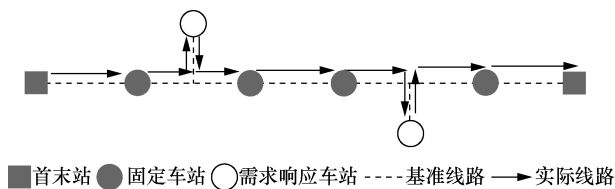


图5 响应式车站服务

(5) 区段需求响应公交服务

区段需求响应公交服务如图6所示。运营车辆按照传统常规公交的服务模式在基准线路上行驶,但是在部分特定的运行区段(即响应区域)内允许车辆以需求响应公交的服务模式运行,在响应区域内可以提供灵活的响应式出行服务,完成灵活的上下车服务后,运营车辆会尽快返回到基准线路继续行驶。这些实行响应式出行服务的区段一般是客流量比较大的区域,例如线路沿线的一些密集的居住社区等。

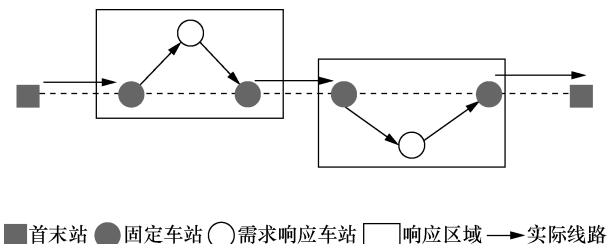


图6 区段需求响应公交服务

(6) 区域需求响应公交服务

区域需求响应公交服务如图7所示。在特定的服务范围内,运营车辆全部按照需求响应公交的模式运营,提供实时在线约车、多人拼车出行的服务模式,且车辆运行线路完全根据乘客的需求来规划,唯一限定的是需要按照既定时间发车或到达预设的一个或多个固定的起点/终点,其余时间的运行线路则完全根据乘客的实时需求进行规划,不会受到基准线路、固定车站的约束。此种交通服务模式在商务区、商场、医院等场景较为常见。

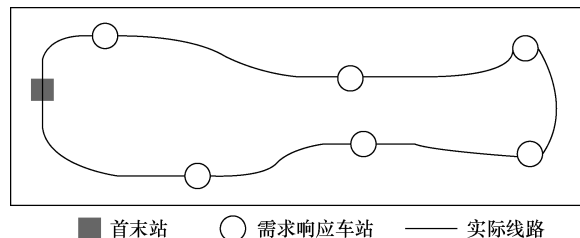


图7 区域需求响应公交服务

2.2 综合运营生产要素^[21]

(1) 运营车辆和参与人员

DRT可实现“门到门”的出行服务,考虑道路交通环境(如限高、道路宽度等)、服务品质和质量等因素,使用车辆多为少于20座的小型车,且舒适度较高(个别情况除外)。如北京南站试运行的DRT车型分为3种,分别是7座小型车、17座中型车、22座大型车;主要人员以接受服务的乘客为主,也涵盖部分运营管理者、调度人员、驾驶员以及上级行业主管部门管理者等。图8为北京南站运营的需求响应公交。

(2) 智能调度系统

智能调度系统是运营生产的“中枢”,调度员可通过远程方式(平板电脑端、手机端等)进行调度,实现运营生产平稳有序。将优化算法嵌入智能调度系统,可根据乘客需求动态调整车辆运行路径。

(3) 服务定制系统

DRT服务需要建立功能齐全的定制平台,可充

分利用微信、App 等平台, 为乘客提供实时查询、预订、退款等服务, 便于不同乘客预约需求响应公交服务。

(4) 线路和车站

车站的位置主要根据乘客的需求来确定, 为方便乘客, 车站站址尽可能选择大多数人的出行起讫点。既可利用既有的常规公交车站, 也可根据 DRT 运营的特点设置专门的 DRT 车站。DRT 行驶路径既可以采用固定线路, 也可根据乘客需求实时调整。



图8 北京南站运营的需求响应公交

3 DRT 优化问题研究现状

从运筹学角度来看, 可将 DRT 的优化问题描述为同时取送货的车辆路径问题 (vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, VRPSPD)^[22-23]。该问题已经在优化模型及其求解方法方面得到了广泛研究。

在模型的优化目标方面, 主要包括考虑企业运营成本^[24-25]、考虑乘客服务质量^[26-27]、统筹考虑企业运营成本和乘客服务质量^[28]3 类。通常来讲, 企业运营成本可用最小行驶成本、最小行驶里程、最小行驶时间、最少车辆数等指标表征; 乘客服务质量可用最小未服务的客户数、乘客最大满意度、最小响应需求时间等指标衡量。

在以企业运营成本为优化目标方面, 郑汉等人^[29]以最小的车辆运营里程和最少的使用车辆为目标函数建立了 DRT 调度等价分解模型, 并设计了分布式列生成算法求解。范文豪^[30]研究了单换乘点的 DRT 路径优化问题, 在无时间窗限制的条件下, 构建了以企业运营成本最小为目标的车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP) 模型, 并用改进的遗传算法求解。Ghannadpour S F 等人^[31]研究了带模糊时间窗的动态路径优化问题, 建立了以企业运营成本最小为目标的多目标模型, 并采用一种基于遗传算法和 3 个基本模块的策略进行求解。

在以乘客服务质量为优化目标方面, Paquette J 等人^[32]对 DAR 运营服务质量研究进行了综述, 首

先通过分析服务业领域关于服务质量的成果, 包括服务质量定义、模型、度量工具和方法等, 提出了 DAR 运营领域中关于服务质量的定义、度量的属性和维度, 在此基础上探讨了影响服务质量的因素。吴丽荣^[33]研究了考虑乘客等待行为的 DRT 优化问题, 充分考虑乘客行为要素, 建立了以乘客满意度最高为目标的数学模型, 并用 NSGA-II 算法求解, 为低密度客流区域提供 DRT 服务。

在以企业运营成本和乘客服务质量为优化目标方面, 邱丰等人^[34]以乘客时间成本和企业运营成本最小为目标, 构建了静态需求和即时需求的 DRT 公交调度模型。丁帅^[35]基于单车型 DRT 路径优化问题, 建立了以车队总运行时间和因车辆提前或延迟到达降低的乘客服务水平最小为目标的 VRP 模型, 达到减少企业运营成本、提升乘客服务质量的目的。Li X G 等人^[36]构建了一个连续逼近系统分析模型, 帮助决策者在平衡乘客服务质量和企业运营成本的同时, 确定居民区的分区数量。

与 DRT 问题的优化目标相关的研究见表 2。

在模型的约束选择方面, 主要约束包括车载容量、时间窗等。

在以车载容量为约束进行建模方面, 孙继洋等人^[37]构建了灵活型公交 VRP 调度模型, 采用启发式算法进行求解, 并用案例验证了模型和算法的有效性和鲁棒性; Kirchler D 等人^[38]研究了优化乘客服务质量以及企业运营成本的静态 DAR 问题, 构建了混合整数线性规划模型, 提出了一种粒度禁忌搜索算法, 实验结果表明, 与其他求解方法相比, 新提出的算法性能更好; Sun B 等人^[39]提出了一种用于 DRT 服务的混合整数线性规划模型, 以分配位于不同车场的车辆, 并将需求点的乘客送到火车站, 该模型充分考虑了乘客满意度, 目标是同时最小化总里程运营成本和最大限度提高乘客满意度, 并用一种改进的蝙蝠算法求得了亚最优解; Wang Z W 等人^[40]设计了一种高自由度响应式公交系统, 提出了针对车辆路线、调度和服务区域的优化方法, 构建模型时考虑了车辆容量约束等因素。

在以时间窗为约束进行建模方面, 王健等人^[41]研究了考虑出行时间窗的 DRT 车辆调度问题, 建立了调度优化模型, 并用贪心算法和遗传算法进行求解; 王正武等人^[42]研究了 DRT 路径优化和车辆调度问题, 以时间窗、车辆运行时间、发车时间等为约束, 构建了优化模型, 并采用双遗传算法求解; Quadrifoglio L

表 2 与 DRT 问题的优化目标相关的研究

| 参考文献 | 问题特点 | 目标类型 | 优化目标 | 模型及求解算法 | 测试数据来源 |
|------|---------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| [29] | 混合车型 VRP 问题 | 考虑企业运营成本 | 车辆运营里程最小和使用车辆最少 | DRT 调度等价分解模型； 分布式列生成算法 | 模拟预约系统 |
| [30] | 单换乘点 VRP 问题 | 考虑企业运营成本 | 企业运营成本最小 | VRP 模型； 改进的遗传算法 | 仿真实验 |
| [31] | 带有模糊时间窗的动态 路径优化问题 | 考虑企业运营成本 | 企业运营成本最小 | 多目标模型； 遗传算法和 3 个基本模块的策略 | Solomon 数据集 |
| [33] | 考虑乘客等待行为的 DRT 优化问题 | 考虑乘客服务质量 | 乘客满意度最高 | 数学模型； NSGA-II 算法 | 随机生成算例 |
| [34] | 同时服务预约需求和实 时需求的 VRP 问题 | 同时考虑企业运营成 本和乘客服务质量 | 乘客时间成本和企业运 营成本最小 | DRT 公交调度模型； 模拟退火算法和启发式插入算法 | 仿真洛杉矶 646 路公交数据 |
| [35] | 单车型 DRT 路径优化问题 | 同时考虑企业运营成 本和乘客服务质量 | 车队总运行时间和因车 辆提前或延迟到达降低 的乘客服务水平最小 | VRP 模型； 禁忌搜索算法 | 在山东建筑大 学区域进行仿 真实验 |
| [36] | 两个区域的支线运输服务 的最佳设计 | 同时考虑企业运营成 本和乘客服务质量 | 乘客服务质量最高 企业运营成本最小 | 连续逼近系统分析模型； 插入启发式算法 | 仿真实验 |

等人^[43]探讨了时间窗对 DRT 总行驶里程、空驶里程、车队规模等的影响，同时建立了服务区域分区和不分区分条件下的 DRT 调度模型。

除了车载容量和时间窗等约束，当应用场景、应用对象发生变化时，模型中的约束条件也会随之变化。Pei M Y 等人^[44]提出了一种实时随机型灵活公交运营系统模型，该模型允许乘客提出个性化的需求，并获得定制的“门到门”服务，可以满足具有不同出发站和时间窗需求的乘客，并优化路线和时刻表。

与 DRT 问题的主要约束相关的研究见表 3。
在模型的求解算法方面，由于 VRPSPD 是

VRP 的变种，因此它也是一个公认的 NP-hard 问题。主要求解方法包括精确算法和启发式算法两大类，如图 9 所示。运行路径的数量往往随问题规模的增大呈排列数增长，求解时间随问题规模的增大呈现爆炸式增长，因此只有在客户数量较少、运送路径较简单时才能得到精确解。主要方法有分支定界法^[45-47]、割平面法^[48-49]、动态规划法^[50-53]等。大多数 VRPSPD 通过传统启发式算法和元启发式算法进行求解^[54-56]。传统启发式算法易陷入局部最优而无法实现全局优化，求解结果一般不如元启发式算法。因此，现在大部分学者采用元启发式算法求解 VRPSPD，下面主要介绍元启发式算法。

表 3 与 DRT 问题的主要约束相关的研究

| 参考文献 | 问题特点 | 主要约束 | 优化目标 | 模型及求解算法 | 测试数据来源 |
|------|---------------------------|--------|-----------------------|------------------------------------|-------------------|
| [37] | 灵活型公交 VRP 调度问题 | 车载容量约束 | 车辆的运行时间和乘客出行时间最短 | 灵活型公交 VRP 调度模型； 启发式算法 | 仿真案例 |
| [38] | 静态 DAR 问题 | 车载容量约束 | 乘客服务质量最高， 企业运营成本最小 | 混合整数线性规划模型； 粒度禁忌搜索算法 | 其他文献数据 |
| [39] | 需求响应运输服务优化问题 | 车载容量约束 | 总里程运营成本最小， 乘客满意度最高 | 混合整数线性规划模型； 改进的蝙蝠算法 | 南京案例 |
| [40] | 高自由度响应式公交优化问题 | 车载容量约束 | 系统总收益最大 | 混合整数规划模型； 元启发式算法 | 长沙地铁 1 号线 尚双塘站 |
| [41] | 考虑出行时间窗的 DRT 车辆调 度问题 | 时间窗约束 | 多辆公交车总运营里 程最短 | 调度优化模型； 贪心算法和遗传算法 | 随机生成算例 |
| [42] | DRT 路径优化和车辆调度问题 | 时间窗约束 | 系统运营利润最大 | 优化模型； 双遗传算法 | 随机生成算例 |
| [43] | DRT 系统设计问题 | 时间窗约束 | 时间窗最小 | DRT 调度模型； 启发式算法 | 洛杉矶 DRT 数据 |
| [44] | 考虑乘客支付意愿的灵活路径 公交系统优化问题 | 时间窗约束 | 系统总收益最大 | 实时随机型灵活公交运营系统模型； 遍历方法和改进的禁忌搜索算法 | 广州 87 路公交数据 |

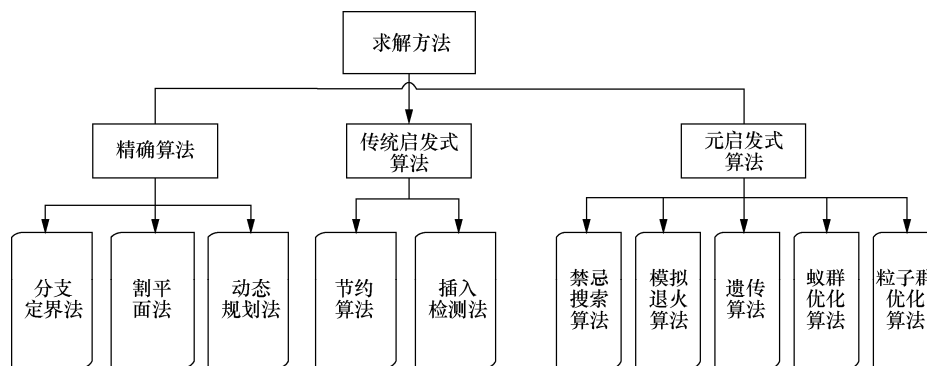


图9 求解方法分类

传统启发式算法主要包括节约算法^[57-59]、插入检测法^[60-61]。元启发式算法在传统启发式算法的基础上进行了改进，是局部搜索和随机算法结合之后的结果，具有较好的求解质量，主要包括禁忌搜索（tabu search, TS）算法、模拟退火（simulated annealing, SA）算法、遗传算法（genetic algorithm, GA）、蚁群优化（ant colony optimization, ACO）算法、粒子群优化（particle swarm optimization, PSO）算法等。

在禁忌搜索算法方面，聂靖入^[62]深入研究了DRT的运营特点，分别建立了单接驳点和多接驳点的DRT路径优化模型，且用改进后的禁忌搜索算法求得最优解；崔建勋等人^[63]研究了城市公交应急区域疏散VRP，用时间扩展网络的技术进行建模，并分别用精确算法和禁忌搜索算法求解，结果表明，禁忌搜索算法在求解的精度和计算效率间能实现良好折中；邱媛^[64]针对与时间相关的电动车VRP，构建了混合整数规划模型，通过在禁忌搜索算法中引入高效的路径间算子和扰动方法，求解的速度和质量得到改善；Bruni M E等人^[65]提出了一种随机混合整数规划的新公式，并描述了一个有效的禁忌搜索启发式算法。

在模拟退火算法方面，彭巍等人^[66]以需求响应接驳公交为研究对象，考虑乘客和公交企业双方因素，建立了需求响应接驳线路优化模型，并用混合模拟退火算法求得高质量的近似最优解；王正武等人^[67]研究了多换乘点之间的线路协调问题，建立了混合需求条件下的线路协调优化模型，设计了模拟退火算法求解；赵迪^[68]对DRT的车站规划问题进行研究，建立了以车站数量和位置均衡为优化目标的灵活车站模型，并用模拟退火算法进行求解。

在遗传算法方面，何民等人^[69]针对DRT线路

设计问题，构建了考虑企业运营成本和可靠性的优化模型，设计了基于遗传算法的优化算法，结果表明，遗传算法在运算效率和性能上具有明显优点，能在实际规模算例中进行应用；王超等人^[70]研究了DRT多停车场多车辆VRP，提出了一种基于遗传算法的三段式混合编码方式方法，并用实际算例验证了算法的有效性和高性能；Sun B等人^[71]研究了基于共享的DRT优化问题，建立了一种基于共享汽车的最佳DRT模型，并采用基于遗传算法的两阶段启发式算法求解。

在蚁群优化算法方面，李艳梅^[72]分析了定制公交网络的构建问题，综合考虑了乘客出行需求和企业收益，构建了乘客需求可拆分的优化模型，并利用蚁群优化算法求解，最后用实例对模型与算法进行了验证；Tripathy T等人^[73]提出了一种基于蚁群优化的算法来解决VRP，同时做到了最大限度地减小车队规模。

在粒子群优化算法方面，吴芳等人^[74]研究了合乘调度优化问题，建立了组合VRP模型，并设计了改进的粒子群优化算法，在其中加入了交叉变异算子，提升了求解效率；余静财^[75]以可需求响应公交线路为研究对象，建立了两阶段调度优化模型，并引入粒子群优化算法进行求解；陈兴博^[76]研究了DRT的组合调度优化问题，建立了协同组合优化模型，使用改进的混合粒子群优化算法进行求解，达到企业成本最优的效果，最后用实例验证了模型和算法的有效性。

与DRT问题主要求解算法相关的研究见表4。

由此可见，众多学者对DRT的路径优化和调度等问题进行了较为深入的理论研究，构建了不同应用场景、不同约束条件、不同目标函数的优化模型和多样的求解算法。但是，大部分学者对于复杂

环境下的不确定因素和信息以及对客户的个性化需求（如时间窗限制、优先级约束、乘客偏好等需求）考虑尚不足够，而这些复杂的不确定信息在运营实践过程中通常比较普遍，也是连接实践和理论研究的关键环节，因此，如果理论研究与实际运营场景相差较大，对实际运营过程的指导就比较有限或缺乏针对性、可操作性。

4 值得探讨的问题

作为一种新兴的交通服务模式，DRT 有着广阔的发展前景，具有不确定、大规模等特点，这给交通研究人员提出了更高的要求。DRT 的模型构建和优化在理论及其实践上面临一些新的挑战，存在很多亟待破解的难题。

（1）面向 DRT 实际运营场景的路径优化研究

现在关于 DRT 的研究多是基于静态需求条件下的路径优化，如容量约束、车辆数量约束等，而对于实际运营场景来说，考虑的约束往往不够充分，例如对结合乘客的个性化需求（时间窗、支付

意愿、偏好等）等实际情况下的路径优化问题研究尚不充分，导致求解结果实用性不强。同时，DRT 运营过程本身具有很多不确定性，如路况的不确定性、车辆行驶时间的不确定性、天气的不确定性、发生突发事件的不确定性等，这些情况在实际运营中是不可避免的，如何结合海量的公交运营数据（如预约数据、客流数据、调度数据等），进一步考虑 DRT 运营过程中的不确定性，从而获得更科学、鲁棒性更强的线路规划和车辆调度，以给乘客提供更可靠、更高效的响应式出行服务，值得进一步研究。

（2）构建更加通用的 DRT 优化模型

DRT 的运营往往处于复杂的交通环境中，影响因素很多，任何一个因素的变化都可能引起较大的扰动，如何从运营实际出发，研究更多的实际案例及其遇到的问题，探索更加复杂的乘客个性化需求，在同一系统集成预约出行、线路设计、运营调度、支付偏好、票价选择、运输优先级等问题，是未来值得研究的重要内容。同时，研究应尽可能对假设进行松弛，使得模型通用性更强，更能指导运

| 表 4 | | 与 DRT 问题主要求解算法相关的研究 | | |
|------|------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------|
| 参考文献 | 模型 | 求解算法 | 优化目标 | 数据来源 |
| [62] | 单接驳点和多接驳点的 DRT 路径优化模型 | 改进后的禁忌搜索算法 | 乘客出行成本和公交运营成本最小，系统潜在客流吸引最大 | 北京某职住分离区域数据 |
| [63] | 城市公交应急疏散 VRP 模型 | 精确算法和禁忌搜索算法 | 总疏散出行时间最短 | 长春中心区路网数据 |
| [64] | 混合整数规划模型 | 改进的禁忌搜索算法 | 综合成本最小 | 某公司实际业务场景数据 |
| [65] | 取送一体化 VRP 模型 | 禁忌搜索启发式算法 | 服务总成本最小 | 设计算例 |
| [66] | 需求响应接驳公交线路优化模型 | 混合模拟退火算法 | 乘客出行成本和公司运营成本最小，同时满足最大乘客定制需求 | 设计算例 |
| [67] | 混合需求条件下的线路协调优化模型 | 模拟退火算法 | 系统总费用最低 | 设计算例 |
| [68] | 以车站数量和位置均衡为优化目标的灵活车站模型 | 模拟退火算法 | 运营成本最小，乘客出行时间最短 | 调查问卷数据 |
| [69] | 考虑企业运营成本和可靠性的优化模型 | 基于遗传算法的优化算法 | 车辆可变成本和固定成本之和最小 | 设计算例 |
| [70] | DRT 多停车场多车辆 VRP 模型 | 基于遗传算法的三段式混合编码方式方法 | 运营总里程最小 | 兰州城关区部分交通网络数据 |
| [71] | 基于共享汽车的最佳 DRT 模型 | 基于遗传算法的两阶段启发式算法 | 总旅行时间最短 | 重庆案例研究 |
| [72] | 乘客需求可拆分的优化模型 | 蚁群优化算法 | DRT 网络覆盖率最大，车辆总收益最大 | 成都定制公交系统 |
| [73] | DAR 优化模型 | 蚁群优化算法 | 车队规模最大 | 仿真数据 |
| [74] | 组合 VRP 模型 | 改进的粒子群优化算法 | 合乘出租车司机收益最大，乘客服务率最高，乘客费用最低 | 仿真数据 |
| [75] | 两阶段调度优化模型 | 改进的粒子群优化算法 | 乘客出行成本与运营成本之和最小 | 陕西省西咸新区 272 路公交数据 |
| [76] | 协同组合优化模型 | 改进的混合粒子群优化算法 | 企业成本最小 | 汕尾东部地区至火车站实例 |

营生产实践。

(3) 对 DRT 优化算法持续改进

现在研究多采用单一算法或者基于现行优化算法进行局部改进来求解 VRP, 虽然性能较改进前有了一定提升, 但是这种改进多是局部的改进, 比如遗传算法的改进主要从改进初始种群、选择算子、交叉算子、变异算子、惩罚方式等方面进行, 而通过将遗传算法与其他智能算法结合, 设计出学习能力强、集成性能佳、求解速度快的混合集成算法求解的情况相对较少。这是未来值得深入研究的一个方向。

(4) 常规公交与 DRT 协同优化

现在有些城市 DRT 发展相对缓慢, 有些城市已形成较为完善 DRT 的网络, 但是与常规公交在时刻表编制、线路设计、运营组织等方面并没有充分协同, 甚至“各自为政”。如此一来, 对车辆、人力等资源是极大的浪费, 增加了对低效路线区段的投入。未来如何在计划性强的常规公交服务和灵活性强的响应式服务之间找到平衡, 形成相互补充、相互促进的交通服务谱系, 如何在政府、乘客、公交企业之间找到平衡, 有待进一步探索。

5 结束语

需求响应公交作为一种具有吸引力的新型交通模式, 在大型枢纽以及商业区等区域具有很强的适用性, 不仅能提供多样化、高品质的出行服务, 还能解决常规公交服务“最后一公里”末梢失灵问题, 有利于城市公共交通健康可持续发展, 构筑健康、井然有序的公交出行生态。尤其近年来, 对传统公共交通向新业态新模式创新发展的研究越来越受到国内外学者和有关政府部门的重视, 本文重点从 DRT 模式的由来、DRT 模式的概述和 DRT 优化 3 个方面进行较系统的梳理及述评, 并展望了未来发展方向。

参考文献:

- [1] 宁滨. 平行轨道交通系统[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(3): 215-218.
NING B. Parallel rail transportation system[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(3): 215-218.
- [2] 吕宣生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
LYU Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [3] 郑南宁. 人工智能新时代[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 1-3.
ZHENG N N. The new era of artificial intelligence[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 1-3.
- [4] LI X G, QUADRIFOGLIO L. Feeder transit services: choosing between fixed and demand responsive policy[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(5): 770-780.
- [5] ERRICO F, CRAINIC T G, MALUCELLI F, et al. A survey on planning semi-flexible transit systems: methodological issues and a unifying framework[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 36: 324-338.
- [6] DONG X T, REY D, WALLER S T. Dial-a-ride problem with users' accept/reject decisions based on service utilities[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(4): 1-13.
- [7] DOU X P, MENG Q, LIU K. Customized bus service design for uncertain commuting travel demand[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2020(3): 1405-1430.
- [8] QIU G, SONG R, HE S W, et al. Clustering passenger trip data for the potential passenger investigation and line design of customized commuter bus[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(9): 3351-3360.
- [9] ZHENG Y, LI W Q, QIU F. A methodology for choosing between route deviation and point deviation policies for flexible transit services[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018(4): 6292410.1- 6292410.12.
- [10] GIUFFRIDA N, PIRA M L, INTURRI G, et al. On-demand flexible transit in fast-growing cities: the case of dubai[J]. Sustainability, 2020, 12(11): 4455.
- [11] SUN J Y, HUANG J L, CHEN Y Y, et al. Flexible bus route optimization for multitarget stations[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020: 7183465.
- [12] BROOME K, WORRALL L, FLEMING J, et al. Evaluation of flexible route bus transport for older people[J]. Transport Policy, 2012, 21(4): 85-91.
- [13] COLE L M. Tomorrow's transportation: new systems for the urban future[M]. [S.l.]: U.S. Government Printing Office, 1968.
- [14] PERRITT H H, PERRITT J. Americans with disabilities ACT (ADA) handbook[M]. [S.l.]: Aspen Publishers Online, 2002.
- [15] RODIER C J, JOHNSTON R A, SHABAZIAN D R. Evaluation of advanced transit alternatives using consumer welfare[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1998, 6(1-2): 141-156.
- [16] BRAKE J, NELSON J D, WRIGHT S. Demand responsive transport: towards the emergence of a new market segment[J]. Journal of Transport Geography, 2004, 12(4): 323-337.
- [17] 卢小林, 张炯, 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.
LU X L, ZHANG X, YU J, et al. Research of a comprehensive evaluation method for customized flexible transit system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(5): 135-140.
- [18] 巫威眺. 不确定环境下公交网络协同调度的鲁棒性及控制策略[D].

- 广州: 华南理工大学, 2015.
- WU W T. The robustness and control strategies of bus network schedule coordination with uncertainty[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [19] LIU T, CEDER A A. Analysis of a new public-transport-service concept: customized bus in China[J]. *Transport Policy*, 2015: 63-76.
- [20] KOFFMAN D. Operational experiences with flexible transit services[J]. *Transportation Research Board*, 2004.
- [21] 徐康明, 李佳玲, 冯浚, 等. 定制公交服务初探[J]. *城市交通*, 2013(5): 24-27.
- XU K M, LI J L, FENG J, et al. Discussion on subscription bus services[J]. *Urban Transport of China*, 2013(5): 24-27.
- [22] PARRAGH S N, DOERNER K F, HARTL R F. A survey on pickup and delivery problems[J]. *Journal Für Betriebswirtschaft*, 2008, 58(1): 21-51.
- [23] LAPORTE G. Fifty years of vehicle routing[J]. *Transportation Science*, 2009, 43(4): 408-416.
- [24] CODATO G, FISCHETTI M. Combinatorial benders' cuts for mixed-integer linear programming[J]. *Operations Research*, 2006, 54(4): 756-766.
- [25] GÉRALDINE H, CORDEAU J F, LAPORTE G. An integer L-shaped algorithm for the dial-a-ride problem with stochastic customer delays[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2011, 159(9): 883-895.
- [26] TONG L, ZHOU L S, LIU J T, et al. Customized bus service design for jointly optimizing passenger-to-vehicle assignment and vehicle routing[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 85: 451-475.
- [27] 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.
- SHEN C, CUI H J. Optimization of real-time customized shuttle bus lines based on reliability shortest path[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(6): 99-104.
- [28] FU L P. Planning and design of flex-route transit services[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2002: 59-66.
- [29] 郑汉, 张星臣, 王志美. 混合车型需求响应公交服务定制问题研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 8(2): 157-163.
- ZHENG H, ZHANG X C, WANG Z M. Design of demand-responsive service by mixed-type vehicles[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 8(2): 157-163.
- [30] 范文豪. 需求响应式接驳公交线路优化模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- FAN W H. Research on routing optimization model of demand-responsive connector[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [31] GHANNADPOUR S F, NOORI S, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, et al. A multi-objective dynamic vehicle routing problem with fuzzy time windows: model, solution and application[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 14: 504-527.
- [32] PAQUETTE J, CORDEAU J F, LAPORTE G. Quality of service in dial-a-ride operations[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2009, 56(4): 1721-1734.
- [33] 吴丽荣. 考虑乘客等待行为的柔性路径公交车实时调度方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- WU L R. Real-time tour planning for flexible route bus considering passengers' waiting behavior[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [34] 邱丰, 李文权, 沈金星. 可变线路式公交的两阶段车辆调度模型[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(5): 1078-1084.
- QIU F, LI W Q, SHEN J X. Two-stage model for flex-route transit scheduling[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(5): 1078-1084.
- [35] 丁帅. 灵活型公交接驳系统运行线路优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- DING S. The route optimization research of flexible feeder transit system[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [36] LI X G, QUADRIFOGLIO L. 2-vehicle zone optimal design for feeder transit services[J]. *Public Transport*, 2011, 3(1): 89-104.
- [37] 孙继洋, 黄建玲, 陈艳艳, 等. 面向多目标站的灵活型公交路径优化调度模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(6): 105-111.
- SUN J Y, HUANG J L, CHEN Y Y, et al. Flexible bus route optimization scheduling model for multi-target stations[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(6): 105-111.
- [38] KIRCHLER D, CALVO W R. A granular tabu search algorithm for the dial-a-ride problem[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013, 56: 120-135.
- [39] SUN B, WEI M, ZHU S L. Optimal design of demand-responsive feeder transit services with passengers' multiple time windows and satisfaction[J]. *Future Internet*, 2018, 10(3): 30.
- [40] WANG Z W, YU J, HAO W, et al. Designing high-freedom responsive feeder transit system with multitype vehicles[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2020(6): 1-20.
- [41] 王健, 曹阳, 王运豪. 考虑出行时间窗的定制公交线路车辆调度方法[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(5): 143-150.
- WANG J, CAO Y, WANG Y H. Customized bus route vehicle schedule method considering travel time windows[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(5): 143-150.
- [42] 王正武, 陈涛, 宋名群. 同时接送模式下响应型接驳公交运行路径与调度的协调优化[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(5): 139-149.
- WANG Z W, CHEN T, SONG M Q. Coordinated optimization of operation routes and schedules for responsive feeder transit under simultaneous pick-up and delivery mode[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(5): 139-149.
- [43] QUADRIFOGLIO L, DESSOUKY M M, ORDONEZ F. A simulation study of demand responsive transit system design[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008, 42(4): 718-737.
- [44] PEI M Y, LIN P Q, DU J, et al. Operational design for a real-time flexible transit system considering passenger demand and willingness to pay[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 180305-180315.
- [45] BRAMEL J, SIMCHI-LEVI D. On the effectiveness of set covering formulations for the vehicle routing problem with time windows[J].

- Operations Research, 1997, 45(2): 157-325.
- [46] QIU X Q, FEUERRIEGEL S, NEUMANN D. Making the most of fleets: a profit-maximizing multi-vehicle pickup and delivery selection problem[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 259(1): 155-168.
- [47] MOHAMMAD R, AHMED G. A branch-and-price algorithm for a vehicle routing with demand allocation problem[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 272(2): 523-538.
- [48] LYSGAARD J. Reachability cuts for the vehicle routing problem with time windows[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175(1): 210-223.
- [49] MAK V, ERNST A T. New cutting-planes for the time- and/or precedence-constrained ATSP and directed VRP[J]. Mathematical Methods of Operations Research, 2007, 66(1): 69-98.
- [50] JEPSEN M, PETERSEN B, SPOORENDONK S, et al. Subset-row inequalities applied to the vehicle-routing problem with time windows[J]. Operations Research, 2008, 56(2): 497-511.
- [51] ALP E O. Integrated routing and scheduling of hazmat trucks with stops en route[J]. Transportation Science, 2007, 41(1): 107-122.
- [52] CIMEN M, SOYSAL M. Time-dependent green vehicle routing problem with stochastic vehicle speeds: an approximate dynamic programming algorithm[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 54: 82-98.
- [53] NOVOA C, STORER R. An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 196(2): 509-515.
- [54] 裴明阳. 灵活公共交通系统营运调度模型与方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- PEI M Y. Operational design models for flexible transit systems[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [55] 邱丰. 可变线路式公交运营调度与模式优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- QIU F. Research on operation scheduling and mode optimization of flex-route buses[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [56] 贺韵竹. 城市化进程中公交服务商业模式创新研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- HE Y Z. Innovation of business mode of public transit service during the process of a rapid urbanization[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [57] LI H Q, CHANG X Y, ZHAO W C, et al. The vehicle flow formulation and savings-based algorithm for the rollon-rolloff vehicle routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(3): 859-869.
- [58] 李进, 张江华. 基于碳排放与速度优化的带时间窗车辆路径问题[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(12): 3063-3072.
- LI J, ZHANG J H. Vehicle routing problem with time windows based on carbon emissions and speed optimization[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2014, 34(12): 3063-3072.
- [59] LI H Q, ZHANG L, LYU T, et al. The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 94: 169-188.
- [60] 潘立军, 符卓. 求解带时间窗车辆路径问题的插入检测法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(2): 319-322.
- PAN L J, FU Z. Insertion detection method for vehicle routing problem with time windows[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2012, 32(2): 319-322.
- [61] 刘霞, 齐欢. 带时间窗的动态车辆路径问题的局部搜索算法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(5): 114-120.
- LIU X, QI H. Local search algorithm of dynamic vehicle routing problem with time window[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(5): 114-120.
- [62] 聂靖入. 基于改进禁忌搜索算法的灵活公交接驳线路规划研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- NIE J R. Research on flexible feeder transit route planning based on improved tabu search algorithm[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [63] 崔建勋, 安实, 崔娜. 基于时间扩展网络的区域疏散公交线路规划[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 64-69.
- CUI J X, AN S, CUI N. Route planning of public transit for regional evacuation based on time-expanded network[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2010, 38(3): 64-69.
- [64] 邱媛. 基于一种改进的禁忌搜索算法的时间相关电动车车辆路径问题研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- QIU Y. An improved tabu search for time-dependent electric vehicle routing problem[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [65] BRUNI M E, GUERRIERO F, BERALDI P. Designing robust routes for demand-responsive transport systems-sciencedirect[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 70(1): 1-16.
- [66] 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, 82.
- PENG W, ZHOU H P, GAO P. The route optimization research of customized feeder transit system oriented on intercity railway system[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 14(4): 49-54, 82.
- [67] 王正武, 宋名群. 多换乘点响应型接驳公交运行线路的协调优化[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 164-172.
- WANG Z W, SONG M Q. Coordinated optimization of operation routes for responsive feeder transit systems with multiple transfer points[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(9): 164-174.
- [68] 赵迪. 陆侧网络不发达机场响应式公交接驳研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- ZHAO D. Research on responsive bus connection for landside network underdeveloped airport[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [69] 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.
- HE M, LI M X, SHUI W B, et al. Influence of reliability and comfort on responsive custom bus route design[J]. Journal of Highway and

- Transportation Research and Development, 2019, 36(5): 145-151.
- [70] 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, 127.
- WANG C, MA C X. Optimization of parking lot and multi-vehicle route of customized buses based on genetic algorithm[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(3): 109-117, 127.
- [71] SUN B, WEI M, WU W. An optimization model for demand- responsive feeder transit services based on ride-sharing car[J]. Information, 2019, 10(12): 370.
- [72] 李艳梅. 定制公交系统线网构建方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- LI Y M. Network planning of customized city bus service[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [73] TRIPATHY T, NAGAVARAPU S C, AZIZIAN K, et al. Solving dial-a-ride problems using multiple ant colony system with fleet size minimisation[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017: 325-336.
- [74] 吴芳, 李志成, 徐琛. 出租车合乘制调度优化模型研究[J]. 兰州交通大学学报, 2009, 28(1): 104-107.
- WU F, LI Z C, XU C. Study of the mode of combined-taxi optimal scheduling[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2009, 28(1): 104-107.
- [75] 余静财. 可变线路公交设置条件及车辆调度模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- YU J C. Research on setting conditions and vehicle scheduling model for the route deviation system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [76] 陈兴博. 需求响应式公交协同组合调度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- CHEN X B. Research on demand responsive transit cooperative combination scheduling[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[作者简介]



冯帅(1991—), 男, 工程师, 北方工业大学电气与控制工程学院博士生, 主要研究方向为公交系统优化。



刘小明(1974—), 男, 博士, 北方工业大学电气与控制工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为城市交通控制、交通信息处理、交通流理论。