

【交通物流 / Transportation Logistics】

站点可变型需求响应式公交车辆调度优化研究

沈子康, 靳文舟, 郑亚晶

华南理工大学土木与交通学院, 广东广州 510641

摘要: 站点可变型需求响应式公交是一种既有固定服务站点又允许乘客在可变站点预约的公交运营模式。传统研究聚焦于单个车次的行程规划, 而忽视车辆在整个运营周期执行多个车次的接续性。本研究从系统视角建立单个运营周期内车辆发车时刻表编制和车辆调度协同优化模型, 以总成本最小化为目标, 构建时空网络图, 清晰表达站点可变型需求响应式公交的服务逻辑和复杂的时空约束。同时根据问题特征, 整合8类邻域算子和改进的最大网络流算法, 设计可快速求解现实大规模复杂问题的自适应邻域搜索算法。以中国广州市黄埔区部分路网为例进行数值实验, 结果表明, 相比传统两阶段车辆调度模型, 本模型车辆使用率提高8.7%以上, 总成本下降20%~70%; 相比传统算法, 在绝大多数订单规模下自适应邻域搜索算法求解质量更优, 在预约订单规模为60时, 可节省总成本30%以上。

关键词: 交通运输工程; 需求响应式公交; 发车时刻表; 车辆调度问题; 协同优化; 自适应邻域搜索算法

中图分类号: U491; C935

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2024.06691

Vehicle scheduling optimization for demand responsive transit with flexible stops

SHEN Zikang, JIN Wenzhou, and ZHENG Yajing

School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641,
Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Flexible stops demand responsive transit is a public transportation mode that combines fixed service stops with the ability for passengers to book at flexible stops. Traditional research focuses on the planning of individual trips, while ignoring the connectivity of vehicles performing multiple trips throughout the entire operating period. This paper establishes a joint model for timetabling and vehicle scheduling within a single period, with the objective of minimizing total cost. Our model utilizes a time-space network to represent the service logic and constraints of flexible stops demand responsive transit service. Furthermore, based on the problem characteristics, an adaptive variable neighborhood search algorithm (AVNS) that integrates 8 types of neighborhood operators and an improved maximum network algorithm is designed to efficiently solve real-world large-scale complex problems. Finally, numerical experiments conducted in Guangzhou's Huangpu District demonstrate that bus utilization rate can enhance 8.7% and total cost can reduce 20% to 70%, respectively, compared with traditional two-stage method. Besides, the AVNS provides better solution quality for the vast majority of order sizes, saving over 30% of total cost for an order size of 60, compared with traditional algorithms.

Key words: transportation engineering; demand responsive transit; departure time-table; vehicle scheduling problem; coordination optimization; adaptive variable neighborhood search algorithm

Received: 2024-03-24; Accepted: 2024-05-18; Online (CNKI): 2024-06-19

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52072128)

Corresponding author: Lecture ZHENG Yajing (ctyjzheng@scut.edu.cn)

Citation: SHEN Zikang, JIN Wenzhou, ZHENG Yajing. Vehicle scheduling optimization for demand responsive transit with flexible stops [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(6): 691-702. (in Chinese)



随着社会的不断发展和城市机动化水平的不断提高, 常规公交在固定发车时刻和线路方面, 与居民日益增长的个性化出行需求愈发不匹配, 需求响应式公共交通(demand response transit, DRT)应运而生. 站点可变型需求响应式公交是一种典型的 DRT, 一方面, 其在主线路路上发挥常规公交的功能, 通过设置车辆必须服务的固定站点满足主线路常规非预约乘客的通勤需求; 另一方面, 在主线路周边增设可变站点, 根据预约订单信息灵活调整公交运行线路, 满足区域零散预约客流的出行需求.

站点可变型 DRT 在主线路路上依次服务固定站点的模式与常规公交类似, 均需提前编制发车时刻表以适应线路的客流时变特征^[1-2]. 为确保顺利执行时刻表, 运营方还需安排一组车辆覆盖发车时刻表规定的全部车次任务, 构造一系列车次链, 实现最小化运营成本或车队规模的目标^[3]. 车次链构造问题也被称为车辆调度问题^[4]. 但与常规公交不同, 站点可变型 DRT 还需服务预约订单的出行需求, 即通过选择性纳入可变站点规划车辆的行驶路径. 因此, 相较于常规公交, 站点可变型 DRT 的车次任务不仅要确定发车时刻, 还需确定服务的订单和行驶路径. 目前站点可变型 DRT 相关研究主要是规划所有车次的行驶路径和发车时刻, 如胡迪等^[5]基于站点聚类算法设计了站点可变型 DRT 路径优化模型; 靳文舟等^[6]在站点可变型 DRT 路径优化模型中考虑了差异化票价和未预约乘客的服务判断. 在发车时刻表编制方面, 庞明宝等^[7-8]将时刻表编制转化为发车间隔时间窗约束进行考虑, 通过控制发车频率满足客流需求; 邵孜科等^[9]则根据乘车需求在基准发车时刻表基础上进行调整. 随着电动公交车的普及, 电容量限制约束也开始成为研究关注内容^[10-11]. 相关研究忽视了在完整运营周期内车次链的构造优化, 生成发车时刻表时缺乏车辆执行多个车次的接续性考量, 可能导致在同等任务量下投入更多运力资源, 增加不必要的运营成本. 时刻表编制和车辆调度相互影响, 规划良好的发车时刻表有助于提升车辆调度效能, 而车次服务预约订单造成的行程时间差异会影响车辆调度方案, 进而影响发车时刻表的制定. 事实上, 在常规公交研究领域, 已有研究证明协同优化两者可有效降低运营成本, 如 CAROSI 等^[12]建立发车时刻表与车辆调度协同优化模型, 证明协同优化两者可以有效降低车辆启用成本; XU 等^[13]利用时空网络图进行建模,

证明协同优化两者可以提高运营利润.

本研究建立站点可变型 DRT 的发车时刻表与车辆调度协同优化模型, 将车辆路径规划、发车时刻表编制及车次链优化进行一体化建模, 在满足主线路客流和预约订单服务的同时, 规划运营周期内每辆车的调度方案. 生成的发车时刻表不仅能适配主线路非预约客流的时变特征并保证准时服务预约订单, 还能降低与车辆调度相关的成本, 提升站点可变型 DRT 模式的常规公交职能和需求响应式服务效益. 在建模方面, 利用时空网络图将运营阶段全部复杂运营决策转化为清晰的网络流路径搜索, 同时针对问题特征设计求解性能良好的自适应邻域搜索算法优化车次任务, 并在自适应邻域搜索算法中嵌入最大网络流算法用于快速构造车次链. 最后, 在中国广州市黄埔区的实际路网上进行数值实验以分析协同优化模型的效能.

1 模型建立

1.1 问题描述

本研究中的站点可变型需求响应式公交兼具常规公交和需求响应式服务两大模式的特点. 首先, 设置由固定站点次序组成的主线路服务通道型大客流, 公交在主线路的服务模式与常规公交一致, 乘客无需预约便可直接在固定站点上下车. 需求响应式服务采取先预约后服务的周期性运行模式. 1 个运营周期定义为 1 个较长工作时段(如 06:00—12:00), 预约乘客必须在运营周期前提交当前周期时间范围内的预约订单, 包括上下车站点和期望上车时间等信息. 为满足预约订单的个性化出行需求, 站点可变型 DRT 在主线路周边设置可变站点, 预约订单的起终点可分布在任意站点.

为同时应对主线路的非预约大客流和离散预约客流, 系统必须提前规划当前运营周期的所有车次任务, 在保证全部预约订单及时服务的同时, 提升主线路服务质量. 每个车次任务由发车时刻、服务预约订单和行驶路径组成. 其中, 有些车次仅服务主线路, 故不存在服务订单, 此时行驶路径为主线路固定站点顺序. 所有车次的发车时刻构成运营周期的发车时刻表, 并通过最大最小发车间隔进行约束以保障服务质量. 此外, 系统还需在电量约束下为每辆车指定执行一系列车次任务, 即车次链. 在站点可变型需求响应式公交的服务模式中, 运营收益

来自服务主线路非预约客流的预计票价收益和预约订单的票价收益, 其中, 主线路预计票价收益等于发车时刻表的车次收益总和; 特定发车时刻的车次收益取决于该时刻的预测非预约客流量^[13-15]. 运营成本则包括与车队规模有关的车辆启用成本、与行驶距离有关的行驶成本, 以及与等待乘客上车时间有关的等待成本. 整个服务模式的总成本为运营成本减去运营收益. 优化目标即为生成总成本最小的发车时刻表和车辆行车计划, 车辆行车计划包括车次任务集合和相应的车次链.

本研究站点可变量 DRT 服务模式规划的部分行车计划如图 1. 其中包括每辆车的车次链, 如车辆 1 运行车次链为车次 1、3 和 6, 车辆 2 运行车次 2、4 和 7; 也包含了所有车次的具体行车任务, 如车次 1 的发车时刻为 08:00, 行驶路径为“1—4—2—3”, 服务预约订单 1, 车次 6 没有服务预约订单, 行驶路径为主线路固定站点顺序“1—2—3”.

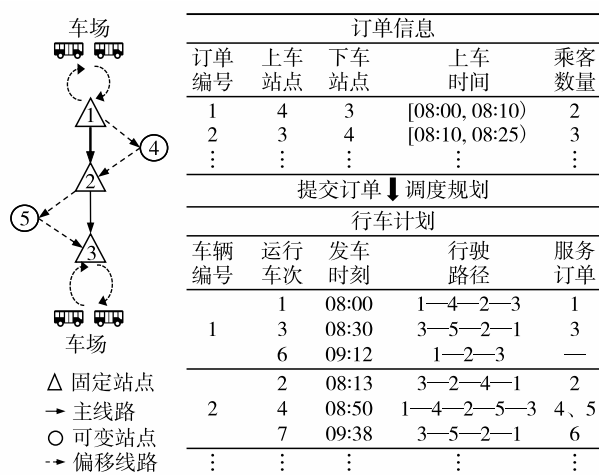


图1 站点可变量需求响应式公交服务示例

Fig. 1 Service example of flexible stops demand responsive transit.

为方便建模, 基于站点可变量需求响应式公交的服务模式要求, 做如下模型假设: ① 固定站点和可变站点已知, 位置根据居民出行需求聚集点预先确定, 且乘客上下车站点只能在这些站点中选择; ② 预约乘客在运营周期开始前提交订单, 并根据设定的订单处理规则决定订单的属性, 包括服务时间和票价等; ③ 预约订单的上车站点和下车站点均随机分布在固定站点和可变站点之间; ④ 为保证服务效率, 假定 1 个预约订单必须在公交单个车次内完成; ⑤ 假设相邻站点的行驶时间固定, 乘客在站点的上下车时间固定且包含在行驶时间内;

⑥ 公交车辆从车场出发开始运营任务, 并最后返回初始车场; ⑦ 假设所有公交在运营周期开始前均处于满电状态, 且保证在运营周期结束后至少以最低电量返回车场或充电站; ⑧ 公交运行过程保证预约订单均有固定座位, 而主线路未预约乘客可选择空位就坐或站立乘车.

1.2 符号定义

对车场、固定站点、可变站点、预约订单及电动公交 5 类元素的符号进行定义. 集合 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{|M|}\}$ 表示系统中的所有车场, $|M|$ 为车场数量. 每个车场的容量恒定, 有特定数量的电动公交车.

集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$ 表示主线路上所有固定站点, $|S|$ 为固定站点数量. s_1 至 $s_{|S|}$ 方向为上行方向, $s_{|S|}$ 至 s_1 方向为下行方向, 上下行方向固定站点的服务顺序相反且已提前规定. 为保证服务质量, 单个方向的发车间隔必须位于一定区间, 令上行和下行方向的最小发车间隔为 h_s^u 和 h_s^d 、最大发车间隔为 g_s^u 和 g_s^d . 对于特定的固定站点 $s \in S$, 其所有属性可表示为 (u_s, v_s, f_s) , 其中, u_s 表示上行方向的下一个固定站点; v_s 表示下行方向的下一个固定站点. 当 $u_s \in \emptyset$ 时, 站点 s 为上行的终点站, 下行的起点站; 当 $v_s \in \emptyset$ 时, 站点 s 为上行的起点站, 下行的终点站; f_s 表示起点站 s 在时刻 t 发车时的固定收益, 当 s 为中间站或终点站时, $f_s = 0$.

集合 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{|Q|}\}$ 表示所有可变站点, $|Q|$ 为可变站点数量. 固定站点集合 S 与可变站点集合 Q 共同构成了总站点集合 L , 即 $L = S \cup Q$.

集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{|P|}\}$ 表示提前预约的订单, $|P|$ 为预约订单数量. 订单 $p \in P$ 的所有属性表示为 $(o_p, d_p, a^p, b^p, w_p, r_p, f_p)$, 其中, $o_p, d_p \in L$ 分别表示订单的起点和终点; a^p 和 b^p 表示订单服务时间窗; w_p 表示订单允许的最大在途时间; r_p 表示订单的乘客数量; f_p 为服务订单的收益, 即票价收益.

集合 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{|K|}\}$ 表示所有候选的电动公交车, $|K|$ 为公交车数量. 所有电动公交的最大电容量均为 $E_{\max}$, 且将单位时间耗电量设置为 e_k . 单辆车的固定使用成本为 c_1 , 单位时间行驶成本设定为 c_2 , 单辆车在站点的单位时间等待成本设定为 c_3 , 而任意两个站点 $l, l' \in L$ 间的行驶时间为 $\alpha_{ll'}$. 为保证主线路服务水平, 每辆车 $k \in K$ 在单个

车次分配给预约订单的座位数限制为 θ_k , 该值可根据主线路的客流时变特征灵活调整, 而两个相邻固定站点 $s \in S$ 和 $s' \in \{u_s, v_s\}$ 间最长行驶时间定义为 $\beta_{ss'} = \delta \alpha_{ss'}$, 其中, δ 为绕行系数, 表示相较直达时间的倍率.

将整个运营周期离散化为 $T = \{0, 1, 2, \dots, |T|\}$, 其中, 每个时间单元设置为 1 min. 定义时空网络图 $G = (V, A)$ 表达站点可变速需求响应式公交的运营活动, 其中, 节点集合 V 表示运行场景中公交可服务所有节点的时空位置; 连接节点间的弧集合 A 表示公交在不同时间点执行的任务. 相关节点集合 V 和弧集合 A 的符号定义及描述如下.

ρ_m 和 $\bar{\rho}_m$ 分别表示车场 m 的虚拟发车节点和收车节点, 分别用于指示车辆发车状态和收车状态; 固定站点 $s \in S$ 在时刻 $t \in T$ 的上行节点定义为 ρ_{st} , 下行节点为 $\bar{\rho}_{st}$, 两者分别代表车辆不同行驶方向, 所有上下行节点共同构成集合 $V_1 = \{\rho_{st}, \bar{\rho}_{st} | s \in S, t \in T\}$; 为有效追溯预约订单服务状态, 将订单 $p \in P$ 根据上下站点分解为两类节点集, 根据服务时间窗, 上车节点集合定义为 $V_2 = \{\rho_{pt} | p \in P, a^p \leq t \leq b^p\}$, 下车节点集合定义为 $V_3 = \{\bar{\rho}_{pt} | p \in P, a^p + \alpha_{o_p d_p} \leq t \leq b^p + w_p\}$; 令节点 $\bar{o}$ 和节点 $\bar{d}$ 分别表示虚拟的源点和汇点. 因此, 整个时空网络图中的所有节点集合可表示为

$$V = \{\bar{o}, \bar{d}\} \cup \{\rho_m, \bar{\rho}_m | m \in M\} \cup V_1 \cup V_2 \cup V_3$$

弧集合 A 表示连接时空网络图 G 中节点 V 之间的弧. 根据公交车辆的服务过程, 本研究定义了 10 种类型的弧, 如表 1. 其中, $\Omega(l, l', t, t')$ 为车辆在任意两个时空位置 (l, t) 和 (l', t') 之间的服务成本; $\Omega(l, l', t, t') = c_2 \cdot \alpha_{ll'} + c_3 \cdot (t' - t - \alpha_{ll'})$, $l, l' \in L$,

$$\mathcal{A}_{st_1}^{u_1} = A \cap \left\{ (\rho_{st}, \rho_{s't'}), (\rho_{st}, \rho_{pt'}), (\rho_{st}, \bar{\rho}_{pt'}), (\rho_{st}, \bar{\rho}_m) \mid t, t' \in T; s' = u_s; p \in P; m \in M; t_1 \leq t \leq t_1 + h_s^u - 1 \right\} \quad (1)$$

最大发车间隔约束要求在后续的时间间隔 $[t_1, t_1 + g_s^u - 1]$ 内至少有 1 条弧经过该站点保证不超

$$\mathcal{A}_{st_1}^{u_2} = A \cap \left\{ (\rho_{st}, \rho_{s't'}), (\rho_{st}, \rho_{pt'}), (\rho_{st}, \bar{\rho}_{pt'}), (\rho_{st}, \bar{\rho}_m) \mid t, t' \in T; s' = u_s; p \in P; m \in M; t_1 \leq t \leq t_1 + g_s^u - 1 \right\} \quad (2)$$

令 $\mathbb{A}_1^u = \{\mathcal{A}_{st_1}^{u_1} | s \in S, v_s \in \emptyset, t = 0, 1, 2, \dots, |T| - h_s^u + 1\}$ 和 $\mathbb{A}_2^u = \{\mathcal{A}_{st_1}^{u_2} | s \in S, v_s \in \emptyset, t = 0, 1, 2, \dots, |T| - g_s^u + 1\}$ 分别表示第 1 个固定站点在上行方向处理最

$t, t' \in T$. 同时为了建模方便, 将表 1 中不同类型弧 $(i, j) \in A$ 的成本统一记为 $c(i, j)$.

1.3 时空网络图建模

假设 1 个站点可变速需求响应式公交系统有 2 个车场 $\{m_1, m_2\}$ 、3 个固定站点 $\{s_1, s_2, s_3\}$ 及 2 个可变站点 $\{q_1, q_2\}$, 整个运营周期被离散化为 12 min, 并且收集到 5 个预约订单 $\{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$, 这些预约订单均匀分布在站点集合中. 由此构造的时空网络如图 2. 固定站点根据上下行方向生成两类时空节点, 而预约订单则根据上下车站点也生成两类时空节点, 并生成相应的 10 大类弧集. 图 2 为 2 辆电动公交在整个运营周期的行程, 如车辆从车场 m_1 出发, 在时刻 0 从站点 s_1 开始下行方向车次, 首先到达订单 p_1 的上车站点, 然后到达站点 s_2 , 再行驶至订单 p_1 的下车站点, 最后到达下行方向终点站 s_3 ; 接着由下行状态转换为上行状态, 并在车站 s_3 等待 2 个单位时间开始下一上行车次任务, 首先到达订单 p_5 的上车站点, 然后到达站点 s_2 , 再行驶至订单 p_5 的下车站点, 并返回上行终点站 s_1 , 最后完成运营周期任务返回车场 m_1 . 由图 2 可见, 通过时空网络图可以清晰表达整个运营调度计划, 将复杂的公交运行过程转化为清晰的网络流路径, 实现时刻表与车辆调度决策协同优化.

1.3.1 时空约束

1) 发车间隔约束. 单一方向上任意两个连续车次的发车间隔必须位于最大发车间隔与最小发车间隔之间. 最小发车间隔约束要求对于上行方向的第 1 个固定站点 s , 在任意时间 $t_1 = 0, 1, 2, \dots, |T| - h_s^u + 1$, 后续时间间隔 $[t_1, t_1 + h_s^u - 1]$ 内至多存在 1 条弧经过该站点, 该弧子集可定义为 $\mathcal{A}_{st_1}^{u_1}$, 即

过最大发车间隔, 该弧子集定义为 $\mathcal{A}_{st_1}^{u_2}$, 即

小和最大发车间隔的弧子集集合. 对于每个集合 $\mathcal{A} \in \mathbb{A}_1^u$, 要求最多有 1 辆公交车经过集合 $\mathcal{A}$ 中的弧; 对于每个集合 $\mathcal{A} \in \mathbb{A}_2^u$, 要求至少有 1 辆公交经

表1 不同类型弧集合总结说明
Table 1 Summary of different types of arc sets

弧类型	符号	领域范围	弧成本	公交状态
开始弧	$(\bar{o}, \rho_m)$	$m \in M$	c_1	公交从车场 m 准备发车
终止弧	$(\bar{\rho}_m, \bar{d})$	$m \in M$	0	公交回车场 m 收车
发车弧	(ρ_m, ρ_{st})	$m \in M; s \in S; t \in T; \text{s. t. } v_s \in \emptyset$	$c_2 \alpha_{ms}$	公交从车场 m 出发
	$(\rho_m, \bar{\rho}_{st})$	$m \in M; s \in S; t \in T; \text{s. t. } u_s \in \emptyset$	$c_2 \alpha_{ms}$	
收车弧	$(\rho_{st}, \bar{\rho}_m)$	$m \in M; s \in S; t \in T; \text{s. t. } u_s \in \emptyset$	$c_2 \alpha_{sm}$	公交返回车场 m
	$(\bar{\rho}_{st}, \bar{\rho}_m)$	$m \in M; s \in S; t \in T; \text{s. t. } v_s \in \emptyset$	$c_2 \alpha_{sm}$	
休息弧	$(\bar{o}, \bar{d})$	—	0	公交不分配任何工作
行驶弧	$(\rho_{st}, \rho_{s't'})$	$s, s' \in S; t, t' \in T; \text{s. t. } t + \alpha_{ss'} \leq t' \leq t + \beta_{ss'}; s' = u_s \notin \emptyset; s' = v_s \notin \emptyset$	$\Omega(s, s', t, t') - f_{st}$	公交在时刻 t' 到达固定站点
	$(\bar{\rho}_{st}, \bar{\rho}_{s't'})$			
	$(\rho_{pt}, \rho_{s't'})$	$p \in P; s \in S; t, t' \in T; \text{s. t. } t' \geq t + \alpha_{op_s}$	$\Omega(o_p, s, t, t')$	
	$(\bar{\rho}_{pt}, \bar{\rho}_{s't'})$			
	$(\rho_{pt}, \rho_{s't'})$	$p \in P; s \in S; t, t' \in T; \text{s. t. } t' \geq t + \alpha_{dp_s}$	$\Omega(d_p, s, t, t')$	
	$(\bar{\rho}_{pt}, \bar{\rho}_{s't'})$			
状态转移弧	$(\rho_{st}, \bar{\rho}_{st})$	$s \in S; t \in T; \text{s. t. } u_s \in \emptyset$	0	公交由上一车次结束状态转换为下一车次开始状态
	$(\bar{\rho}_{st}, \rho_{st})$	$s \in S; t \in T; \text{s. t. } v_s \in \emptyset$	0	
等候弧	(ρ_{st}, ρ_{st+1})	$s \in S; t \in T; \text{s. t. } v_s \in \emptyset, t < T $	0	公交在起点站 s 等候1个时间单元
	$(\bar{\rho}_{st}, \bar{\rho}_{st+1})$	$s \in S; t \in T; \text{s. t. } u_s \in \emptyset, t < T $	0	
订单开始弧	$(\rho_{pt}, \rho_{p't'})$	$p, p' \in P; t, t' \in T; \text{s. t. } t' \geq t + \alpha_{op_{p'}}$	$\Omega(o_p, o_{p'}, t, t') - f_{p'}$	公交开始服务订单 p'
	$(\bar{\rho}_{pt}, \bar{\rho}_{p't'})$	$p, p' \in P; t, t' \in T; \text{s. t. } t' \geq t + \alpha_{dp_{p'}}$	$\Omega(d_p, o_{p'}, t, t') - f_{p'}$	
	$(\rho_{st}, \rho_{p't'})$	$s \in S; p' \in P; t, t' \in T; \text{s. t. } v_s \notin \emptyset; t' \geq t + \alpha_{so_{p'}}$	$\Omega(s, o_{p'}, t, t') - f_{p'} - f_{st}$	
	$(\bar{\rho}_{st}, \bar{\rho}_{p't'})$	$s \in S; p' \in P; t, t' \in T; \text{s. t. } u_s \notin \emptyset; t' \geq t + \alpha_{so_{p'}}$	$\Omega(s, o_{p'}, t, t') - f_{p'} - f_{st}$	
	$(\rho_{st}, \rho_{p't'})$	$s \in S; p' \in P; t, t' \in T; \text{s. t. } u_s \notin \emptyset; t' \geq t + \alpha_{so_{p'}}$	$\Omega(s, o_{p'}, t, t') - f_{p'} - f_{st}$	
订单结束弧	$(\rho_{pt}, \bar{\rho}_{p't'})$	$p, p' \in P; t, t' \in T; \text{s. t. } t' \geq t + \alpha_{op_{d_{p'}}}$	$\Omega(o_p, d_{p'}, t, t')$	公交完成服务订单 p'
	$(\bar{\rho}_{pt}, \bar{\rho}_{p't'})$	$p, p' \in P; t, t' \in T; \text{s. t. } t' \geq t + \alpha_{dp_{d_{p'}}}$	$\Omega(d_p, d_{p'}, t, t')$	
	$(\rho_{st}, \bar{\rho}_{p't'})$	$s \in S; p' \in P; t, t' \in T; \text{s. t. } t' \geq t + \alpha_{sd_{p'}}$	$\Omega(s, d_{p'}, t, t')$	
	$(\bar{\rho}_{st}, \bar{\rho}_{p't'})$	$s \in S; p' \in P; t, t' \in T; \text{s. t. } t' \geq t + \alpha_{sd_{p'}}$	$\Omega(s, d_{p'}, t, t')$	

过集合 $\mathcal{A}$ 中的弧. 下行方向的两类集合 $\mathbb{A}_1^{\mathcal{D}}$ 和 $\mathbb{A}_2^{\mathcal{D}}$ 也以相同方式生成. 同时, 令 $\mathbb{A}_1 = \mathbb{A}_1^{\mathcal{U}} \cup \mathbb{A}_1^{\mathcal{D}}$, $\mathbb{A}_2 = \mathbb{A}_2^{\mathcal{U}} \cup \mathbb{A}_2^{\mathcal{D}}$.

2) 固定站点绕行约束. 单辆车在上行或下行方向任意两个相邻固定站点之间的服务时间间隔不

得超过最长行驶时间. 这要求对于上行方向的固定站点 s 在任意时间 $t_2 = 0, 1, 2, \dots, |T| - \beta_{ss'} + 1$, 在后续时间间隔 $[t_2, t_2 + \beta_{ss'} - 1]$ 内必须有1条弧经过下一个固定站点 s' , 该弧子集可定义为 $\mathcal{A}_{p_{st_2}}^{U3}$, 即

$$\mathcal{A}_{p_{st_2}}^{U3} = \mathcal{A} \cap \left\{ (\rho_{st_2}, \rho_{s't}), (\rho_{pt'}, \rho_{s't}), (\bar{\rho}_{pt'}, \rho_{s't}) \mid t, t' \in T; s' = u_s; p \in P; t_2 \leq t \leq t_2 + \beta_{ss'} - 1 \right\} \quad (3)$$

令 $\mathbb{A}_3^{\mathcal{U}} = \{ \mathcal{A}_{p_{st}}^{U3} \mid s \in S, s' = u_s \notin \emptyset, t = 0, 1, 2, \dots, |T| - \beta_{ss'} + 1 \}$ 表示上行方向任意固定站点满足绕行

约束到达下一固定站点的弧子集集合. 对于每个集合 $\mathcal{A} \in \mathbb{A}_3^{\mathcal{U}}$, 要求当公交经过时空节点 ρ_{st} 时, 相应

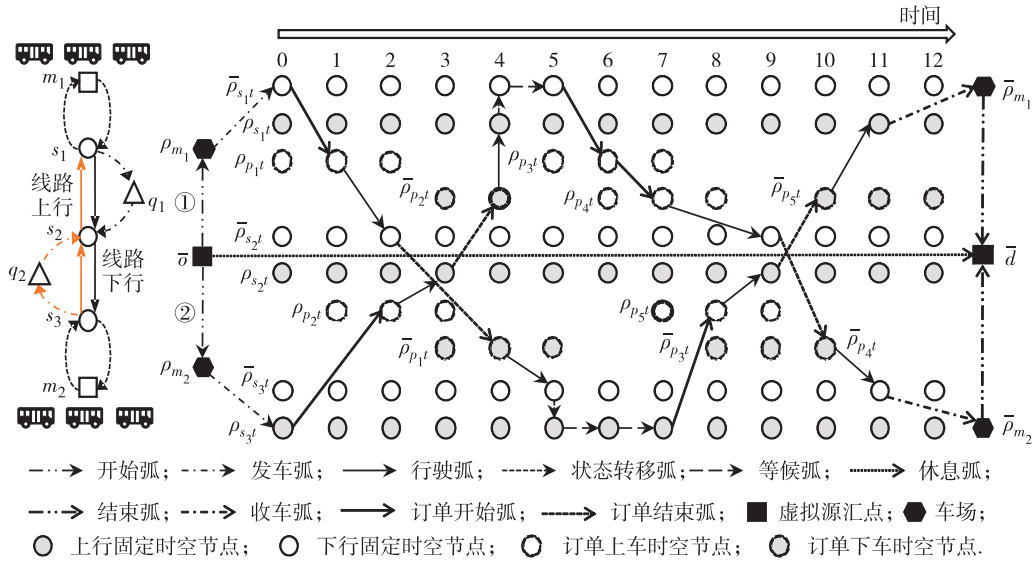


图2 站点可变量需求响应式公交时空网络图

Fig. 2 (Color online) Space-time network diagram of flexible stops demand responsive transit.

地至少该公交必须经过 $\mathcal{A}_{st}^{U3}$ 中 1 条弧. 同理定义下行方向集合 $\mathcal{A}_3^D$. 令 $\mathcal{A}_3 = \mathcal{A}_3^U \cup \mathcal{A}_3^D$.

3) 预约订单服务约束. 预约订单必须在指定的时间范围内被单辆车在单个车次内完成服务, 包括及时到达订单起点站点和终止站点. 对于订单 p

的开始服务时间 $t_3 = a^p, a^p + 1, \dots, b^p$, 要求在后续时间间隔 $[t_3, t_3 + w_p]$ 内必须完成订单 p 的服务, 即必须有 1 条弧经过订单下车节点, 该弧子集可定义为 $\mathcal{A}_{pt_3}^4$, 即

$$\mathcal{A}_{pt_3}^4 = A \cap \left\{ (\rho_{pt_3}, \bar{\rho}_{pt}), (\rho_{st}, \bar{\rho}_{pt}), (\bar{\rho}_{st}, \bar{\rho}_{pt}) \mid t, t', t'' \in T, s \in S; t_3 \leq t \leq t_3 + w_p \right\} \quad (4)$$

令 $\mathcal{A}_4 = \left\{ \mathcal{A}_{pt}^4 \mid p \in P, t = a^p, a^p + 1, \dots, b^p \right\}$ 表

示任意 1 个订单连接其下车节点的弧子集集合. 对于每个集合 $\mathcal{A} \in \mathcal{A}_4$, 要求当公交在 t 时刻服务订单 p 时, 相应地该公交必须经过 $\mathcal{A}_{pt}^4$ 中的 1 条弧, 以保证订单及时完成.

1.3.2 协同优化模型

基于时空网络图, 定义决策变量 x_{ij}^k 表示车辆 k 是否经过弧 $(i, j) \in A$, 经过则 $x_{ij}^k = 1$, 否则 $x_{ij}^k = 0$. 定义 y_i^k 表示车辆 k 到达节点 $i \in V$ 时公交上的预约乘客数量. 本研究构建的站点可变量需求响应式公交时刻表编制与车辆调度协同优化模型为

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c(i,j) x_{ij}^k \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j: (\bar{o}, j) \in A} x_{oj}^k = 1, \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i: (i, \bar{d}) \in A} x_{id}^k = 1, \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} x_{ji}^k = \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ij}^k, \forall k \in K, i \in V \setminus \{\bar{o}, \bar{d}\} \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_m^+} x_{ij}^k = \sum_{(i,j) \in A_m^-} x_{ji}^k, \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq 1, \forall \mathcal{A} \in \mathcal{A}_1 \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \geq 1, \forall \mathcal{A} \in \mathcal{A}_2 \quad (11)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} x_{ij}^k = \sum_{(u,v) \in \mathcal{A}_i^3} x_{uv}^k, \forall k \in K, i \in V_1, \mathcal{A}_i^3 \in \mathcal{A}_3 \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V_2^+} \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ji}^k = 1, p \in P \quad (13)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} x_{ij}^k = \sum_{(u,v) \in \mathcal{A}_i^4} x_{uv}^k, \forall k \in K, i \in V_2, \mathcal{A}_i^4 \in \mathcal{A}_4 \quad (14)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} e_{ij} x_{ij}^k \leq E_{\max}, \forall k \in K \quad (15)$$

$$y_i^k = 0, \forall i \in \tilde{V}_1 \quad (16)$$

$$y_j^k \leq y_i^k + r_i + \mathcal{M}(1 - x_{ij}^k), \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (17)$$

$$y_j^k \geq y_i^k + r_i - \mathcal{M}(1 - x_{ij}^k), \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (18)$$

$$y_i^k \leq \theta_k, \forall k \in K \quad (19)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (20)$$

$$y_i^k \geq 0, \forall k \in K, i \in V \quad (21)$$

目标函数(5)是最小化所有公交车队的总成本; 约束(6)和(7)保证每辆车必须从虚拟源点出发并回到虚拟汇点; 约束(8)保证车流量平衡约束; 约束(9)保证车辆从初始车场出发并最后回到初始车场, 其中, A_m^+ 表示连接发车节点 ρ_m 的所有弧集, A_m^- 表示连接收车节点 $\bar{\rho}_m$ 的所有弧集; 约束(10)和(11)保证上行或下行方向任意两个相邻车次间的发车间隔位于最小发车间隔和最大发车间隔之间; 约束(12)保证相邻固定站点间的行驶时间不超过最大行驶时间, 即满足绕行约束; 约束(13)保证每个订单有且仅有1辆车为其服务1次, $V_2^p = \{\rho_{pi} | a^p \leq t \leq b^p\}$ 表示订单 p 的所有可能订单上车时空节点; 约束(14)保证每个订单都能在规定时间内完成; 约束(15)要求任意电动公交在运营过程中满足电量约束, 其中, e_{ij} 表示特定弧 (i, j) 执行过程中所消耗的电量; 约束(16)保证任意车辆在上下行起始站的初始预约乘客载客量为0, 其中, $\tilde{V}_1$ 表示上下行方向起始固定站点的时空节点集合, 该约束也蕴含了单个车次要完成所有预约订单任务, 而不允许在不同车次间服务; 约束(17)和(18)表示通过不同时空节点时的公交预约载客人数的变化, 其中, M 表示1个较大整数, r_i 表示时空节点的上下车预约乘客数量, 当 $i \in V_2$ 时, $r_i > 0$ 表示上车人数, 当 $i \in V_3$ 时, $r_i < 0$ 表示下车人数, 否则 $r_i = 0$; 约束(19)保证公交的在途预约乘客载客量不超过其允许的最大座位数; 约束(20)和(21)为决策变量的值域。

2 算法设计

本研究设计一种多阶段迭代启发式算法, 其建立在一种自适应邻域搜索(adaptive variable neighborhood search, AVNS)的框架上, 引入自适应邻域算子选择机制, 并嵌入最大网络流算法快速解构公交车辆多车次行程, 通过不断循环迭代, 不断更新电动公交的运营计划, 实现快速高质量地求解。

2.1 编码规则与初始解的生成

对于订单 $p \in P$, 编码信息定义为 $(t, UD, loc_{o_p}, loc_{d_p})$, 其中, t 表示公交从起始固定站点出发的时间; UD 表示公交上下行的方向; loc_{o_p} 表示公交在当前方向访问完 loc_{o_p} 个固定站点后到达订单 p 的上车站点 o_p 开始服务, 并在访问完 loc_{d_p} 个

固定站点后到达订单 p 的下车站点 d_p 结束服务。将所有订单编码随机插入到所有的可能车次, 即每个车次可能包含多个订单(包含0和1), 再从车次集中筛选出可行的车次子集即构成初始解, 未选择的车次集称为候选车次集。

2.2 领域搜索算子

1) 订单操作类算子。

$\mathcal{N}_1$: 任意选择解包含的两个车次, 在保证能产生可行解的前提下分别选择两个车次的1个订单编码进行交换, 更新订单编码的时间信息。对于无订单编码的车次, 其选择的订单编码为空集。

$\mathcal{N}_2$: 任意选择解包含的两个车次, 在保证能产生可行解的前提下将两个车次的全部订单进行交换。此操作仅发生在同向车次中, 订单位置信息 loc_{o_p} 和 loc_{d_p} 并无变化。

$\mathcal{N}_3$: 选择解中存在订单编码的车次 t_{i1} , 并从候选车次集中选择1个车次 t_{i2} , 将车次 t_{i1} 中包含的全部订单编码移入车次 t_{i2} , 同时将 t_{i1} 移出当前解, t_{i2} 移入当前解。

$\mathcal{N}_4$: 任意选择解中存在订单编码的车次, 将其中1个订单的位置信息在当前车次中偏移, 即改变订单在车次行程的服务顺序。

2) 车次操作类算子。

$\mathcal{N}_5$: 选择解中不存在订单编码的车次 t_{i1} , 并从候选车次集中选择1个车次 t_{i2} , 在确保产生可行解的前提下交换两个车次。

$\mathcal{N}_6$: 选择解中不存在订单编码的车次, 将此车次从当前解中移除。

$\mathcal{N}_7$: 从候选车次集中选择1个车次, 将此车次插入到当前解。

3) 破坏修复类算子。

$\mathcal{N}_8$: 选择解中存在订单编码的车次, 将此车次从当前解移除, 并将该车次服务的全部预约订单, 在保证能产生可行解的前提下以成本最优为导向重新插入到其他车次中, 并更新订单编码。

最后, 令 $\mathcal{LSO} = \{\mathcal{N}_1, \mathcal{N}_2, \dots, \mathcal{N}_8\}$ 表示全部邻域算子集合。

2.3 扰动与自适应局部搜索机制

本研究设计一种自适应搜索机制(adaptive local search, ALS), 根据邻域搜索算子的历史表现选择个别邻域算子进行局部搜索, 而非使用所有邻域算子。AVNS前期采用随机变量邻域下降法(random variable neighborhood descent, RVND)进行

局部搜索, RVND先随机打乱 $\mathcal{LSO}$ 的顺序, 然后根据常规的变量邻域下降法步骤生成新解, 每个邻域算子在完成搜索后记录其得分: 若产生的解比历史最优解更优, 得分加5, 若产生的解比扰动解更优, 得分加3, 否则该算子搜索失败, 得分加1. 在算法后期借助自适应局部搜索方法进行局部搜索, 既提高算法迭代速度又通过自适应机制保证选择合适的邻域算子.

2.4 改进的最大网络流算法

AVNS生成每个车次的任务, 具体单辆车的行程仍未知, 因此, 本研究设计最大网络流算法生成使用最少电动公交数量的车次连接方案(即车次链). 构造公交车次链的二部图, 可通过扫描文末右下角二维码查看补充材料图S1. 假设生成的车次集合为 $\mathcal{T}$, 每个车次 $t_r \in \mathcal{T}$ 均划分为单个开始节点和单个结束节点, 开始节点的属性包括车次 t_r 的首发站 s_b^r 和发车时间 t_b^r , 结束节点的属性包括车次 t_r 的终点站 s_e^r 和到达时间 t_e^r . 此外, 设置虚拟源点节点源点 o_r 和汇点 s_r . 将开始节点与汇点 s_r 相连接, 车次结束节点与源点 o_r 相连接. 设计中改进的增广路径算法先生成所有的增广路径, 然后判定路径的电量可行性, 删除不可行路径, 再对未服务的车次重新生成车次链. 此算法可在多项式时间内迅速完成车次链的构建, 生成近似最优的车辆行程计划.

2.5 算法框架

自适应邻域搜索算法AVNS的具体流程可通过扫描文末右下角二维码查看补充材料图S2. 其中, iterMax表示允许算法未改进最优解的最大次数, 超过iterMax后算法终止; levelMax表示扰动操作中允许的最大扰动次数; maxLS1定义了AVNS前期局部搜索操作使用RVND的次数, 超过maxLS1后算法采用ALS代替RVND. 用 (x, y) 表示当前最优解, x 表示选择的可行车次集合, 所有邻域操作默认针对 x 改进, y 表示 x 的公交车次链方案, 可通过最大网络流算法直接求解 x 得到, 算法中默认该步骤在生成新的 x 后自动进行.

3 算例

3.1 算例数据

本研究以中国广州市黄埔区永和街道部分实际路网(图3)进行算例分析, 根据地图信息及实际调研确定9个固定站点和17个可变站点, 站点间行驶

距离及行驶轨迹通过高德地图应用程序编程接口(application programming interface, API)获取, 从站点1到站点9的方向称为上行方向, 反之为下行方向. 考虑到目前研究的公交运行模式在国内缺乏相关运营经验, 相关客流数据根据现实情况生成. 单车次发车收益根据主线路客流时变特征确定, 同时根据居民出行特征生成06:00—12:00内不同规模的预约订单(订单规模为20~60个).

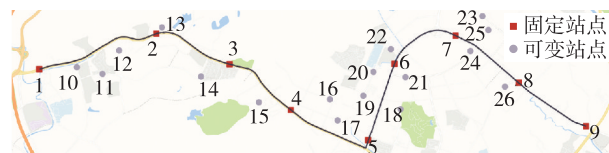


图3 站点可变量需求响应式公交主线路及站点位置

Fig. 3 (Color online) Main route and site location map of flexible stops demand responsive transit.

模型相关参数设置如表2. 采用的票价策略为: 不预约乘客票价为3元/人, 预约订单票价根据乘客乘车距离的远近取5~7元/人; 车辆固定使用成本考虑司机薪资及车辆折旧等, 取100元/辆; 单位时间行驶成本由每公里行驶成本1.8元换算得到; 预约订单的座位数限制根据不同时段的客流特征进行划分, 平峰时间最多允许预留10个座位, 高峰时间预留6个座位; 其他参数参考实际公交运行与文献[5-6]确定. 所有算例均在相同电脑配置上进行运算.

表2 模型参数取值

Table 2 The value of the model parameters

参数名称	符号及单位	取值
车辆行驶速度	$v/(\text{km} \cdot \text{min}^{-1})$	0.4
票价	$f_p \cdot r_p^{-1}$ /元	3, 5, 6, 7
单位时间耗电量	$e_k/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{min}^{-1})$	1
最大电容量	$E_{\max}/(\text{km} \cdot \text{h})$	300
单辆车固定使用成本	$c_s/(\text{元} \cdot \text{辆}^{-1})$	100
单位时间行驶成本	$c_g/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	7.2
单位时间等待成本	$c_w/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	0.65
最大绕行系数	δ	3
最大发车间隔	g_s/min	30
最小发车间隔	h_s/min	4
预约订单的平峰时间座位数限制	θ_k	10
预约订单的高峰时间座位数限制		6

3.2 算例分析

3.2.1 求解结果

AVNS算法参数中VND调用次数设置为50、

ALS 内部搜索次数为 10、最大扰动次数为 20, 所有算例均取算法运行 10 次后的最优值。不同订单规模算例对应的运行方案集计结果如图 4。

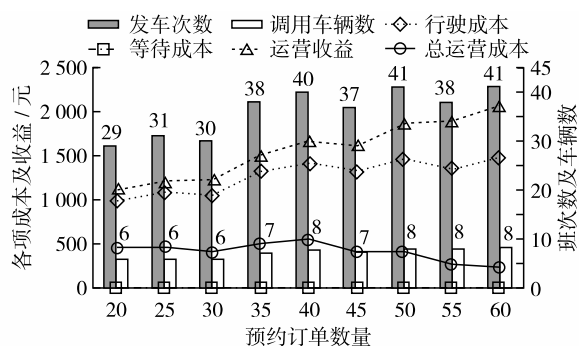


图4 各项指标随订单数量变化图

Fig. 4 Chart of change of indicators with order quantity.

由图4可见, 行驶成本及运营收益随预约订单数量的增加总体呈递增趋势, 这主要由于预约订单数量的增加使得车辆行驶距离增加同时带来更多的收入, 两者共同影响总成本。当订单数量 ≥ 30 个时, 总成本随订单数量的增加呈先增加后下降的趋势, 在预约订单数量为 40 个时, 达到最大值并随后逐渐减小。而等待成本始终处于较低水平, 这表明模型能提供服务质量较好的公交运行方案。从发车次数来看, 在订单数达到 35 个时呈现突变, 发车次数由 30 个变为 38 个, 之后发车次数及调用车辆数随着订单数量的增加波动较小, 在控制发车成本和车辆调用成本上效果显著, 这也是总成本在较大订单规模下呈现下降趋势的关键。以 30 个预约订单为例, 求解得到的最优车辆运行计划可通过扫描文末右下角二维码查看补充材料表 S1。可见, 本模型能有效解决站点可变量需求响应式公交调度问题, 在追求总成本最小化目标下, 协同优化发车时刻表与车辆调度, 实现运营周期内系统最优的车辆运行计划。

3.2.2 与两阶段优化方法比较

传统站点可变量需求响应式公交调度模型主要考虑各车次路径和发车时刻的优化, 并未涉及运营周期内各车次之间的衔接, 将车次优化和车次链构造分为两阶段进行, 是典型的两阶段优化模型。第 1 阶段先确定各车次发车时刻及行驶路径, 第 2 阶段为所有车次指定运行车辆。考虑到在优化第 1 阶段的车辆路径过程时, 可能调用车辆数未知, 故通过预先估计每车次的发车成本代替车辆调度成本进行计算。每车次发车成本分别选取 10、15、20 和

25 元, 对不同预约订单规模进行计算, 与本模型结果对比如表 3。可见, 本模型得到运营方案的总成本值均优于两阶段模型, 降低幅度在 20% 以上, 特别是当订单数 ≤ 50 个时, 总成本降低 35% 以上。对比发车班数和调用车辆数, 本模型除 60 个订单规模外, 均不大于两阶段模型的最优值, 而车辆使用率(发车次数与调用车辆数的比值)明显优于两阶段模型, 充分证明本研究设计时刻表与车辆调度协同优化模型优于两阶段模型, 能有效提高车辆的使用率, 降低公交总成本。

3.2.3 与典型启发式算法的比较

本研究利用 AVNS、SA 及 GA 算法对模型进行求解, 算子设置相同。其中, AVNS 算法 VND 调用次数设置为 50、ALS 内部搜索次数为 10、最大扰动次数为 20; SA 的初始温度设置为 1 000、降温系数为 0.91、最小终止温度为 0.1、内部迭代次数为 100; GA 种群规模为 50、迭代次数为 100~300 (根据订单数量进行调整)、交叉概率为 0.8、变异概率为 0.3, 采用精英策略进行选择。3 种算法对不同规模案例分别计算 10 次。算法迭代中常将迭代次数或者求解时间作为终止条件判定, 而 AVNS、SA 和 GA 的内部迭代框架不同, 为了保证算法计算的公平性, 在经过测试保证 3 种算法都收敛, 即都求得算法计算最优解的前提下, 为所有算法设置相同的求解时间。所有算法在不同订单规模下的目标值比较及求解时间如图 5。可见, 算法求解时间整体上随着预约订单数量线性变化。对于绝大多数不同订单规模的算例, AVNS 在求解质量上优于 SA 和 GA, 特别是在较大规模算例(预约订单数量大于 40)上优势更加明显, 在订单数量为 60 个时, 最优解的总成本相较于 SA 和 GA 分别下降 38.5% 和 32.9%。这表明本研究提出的 AVNS 算法具有更强的搜索性能, 尤其在面对现实大规模订单问题时的表现比传统算法更优异。

3.2.4 敏感性分析

1) 绕行系数。设置不同的车辆绕行系数(3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0)以模拟现实中不同的运营条件, 获得各项指标的变化趋势如图 6。其中, 绕行里程随绕行系数的增加呈线性增长。当绕行系数 ≤ 4.0 时, 随着绕行系数的增加, 由于公交车辆的自由度逐渐提升, 服务全部订单所需的车次数量大幅减少, 显著降低了总成本, 但这也使得不同订单乘客共乘同一车辆的概率增大, 过度绕行也增加了乘客

表3 协同优化模型与传统两阶段模型的优化效果比较

Table 3 Result comparison of joint optimization model and normal two-stage method

订单数量/个	模型	发车成本/元	发车次数	调用车辆数	车辆使用率	行驶成本/元	等待成本/元	运营收益/元	总成本/元
20	两阶段模型	10	40	14	2.9	1 321.6	10.5	1 571	1 161
		15	29	9	3.2	984.2	10.5	1 085	809.6
		20	30	9	3.3	1 008.9	10.6	1 100	819.6
		25	30	9	3.3	1 012.8	7.0	1 100	819.8
	本模型		29 (=)	6 (↓ 33.3%)	4.8 (↑ 45.5%)	980.8 (↓ 0.3%)	6.6 (↓ 5.3%)	1 121 (↓ 28.6%)	466.5 (↓ 42.4%)
30	两阶段模型	10	46	14	3.3	1 560.2	9.5	1 823	1 146.7
		15	35	11	3.2	1 234.0	6.8	1 352	988.9
		20	36	10	3.6	1 254.3	6.2	1 391	869.5
		25	36	10	3.6	1 246.5	12.5	1 394	865.0
	本模型		30 (↓ 14.3%)	6 (↓ 40.0%)	5.0 (↑ 38.9%)	1 055.4 (↓ 14.5%)	4.3 (↓ 31.1%)	1 241 (↓ 31.9%)	418.7 (↓ 51.6%)
40	两阶段模型	10	55	13	4.2	1 880.9	17.1	2 171	1 027.0
		15	46	10	4.6	1 620.0	23.2	1 769	874.2
		20	45	11	4.1	1 569.3	20.2	1 745	944.5
		25	45	11	4.1	1 588.4	15.3	1 730	973.7
	本模型		40 (↓ 11.1%)	8 (↓ 20.0%)	5.0 (↑ 8.7%)	1 423.7 (↓ 9.3%)	13.5 (↓ 11.6%)	1 673 (↓ 22.9%)	564.2 (↓ 35.5%)
50	两阶段模型	10	72	22	3.3	2 451.2	13.5	2 886	1 778.8
		15	59	14	4.2	2 033.6	18.4	2 277	1 174.9
		20	59	14	4.2	2 051.5	25.5	2 310	1 167.0
		25	55	13	4.2	1 926.3	2.6	2 079	1 149.9
	本模型		41 (↓ 25.5%)	8 (↓ 38.5%)	5.1 (↑ 21.4%)	1 476.7 (↓ 23.3%)	7.6 (↑ 193%)	1 863 (↓ 35.4%)	421.4 (↓ 63.4%)
60	两阶段模型	10	81	23	3.5	2 762.7	47.4	3 189	1 921.1
		15	67	22	3.0	2 305.3	60.1	2 592	1 973.4
		20	35	8	4.4	1 288.0	37.0	1 818	307.0
		25	34	8	4.3	1 254.1	28.2	1 740	342.3
	本模型		41 (↑ 20.6%)	8 (=)	5.1 (↑ 15.9%)	1 489.2 (↑ 18.7%)	20.7 (↓ 26.7%)	2 067 (↓ 35.2%)	242.9 (↓ 20.9%)

注：“↑”表示本模型计算结果对应指标相比于两阶段模型计算结果的最优值上升，“↓”表示下降，“=”表示相等，数值为上升或下降的比例。

的在途时间，造成预约订单延误时间的逐渐增加。当绕行系数 > 4.5 时，总成本不再下降，这表明此时过度绕行并不会降低总成本，而受限于发车间隔要求和预约订单服务要求，发车车次数量处于最低的水平无法再进一步下降。

2) 单位车辆固定使用成本。本研究选取不同的单位车辆固定使用成本(0, 50, 100, 150, 200)进行计算分析，探讨各个指标与车辆固定使用成本之间的联系，结果如图 7。可见，随着单位车辆固定使用成本的增加，总成本呈线性增长，而绕行里程

和预约订单延误时间波动相对较小，这是因为绕行里程和预约订单延误时间主要由服务订单的车辆行驶路径决定，与车辆固定使用成本关系较小。由图 7(b)可见，当不考虑车辆发车成本(即车辆固定使用成本为 0)，并满足发车收益大于空驶成本时，调度方案偏向于饱和发车以获得更多收益，因此，发车次数明显偏大，但当单位车辆固定使用成本 ≥ 50 时，由于需满足保证基本通勤服务的发车间隔时间窗约束以及覆盖所有预约订单的要求，车次数量处于较低水平，整体波动较小。

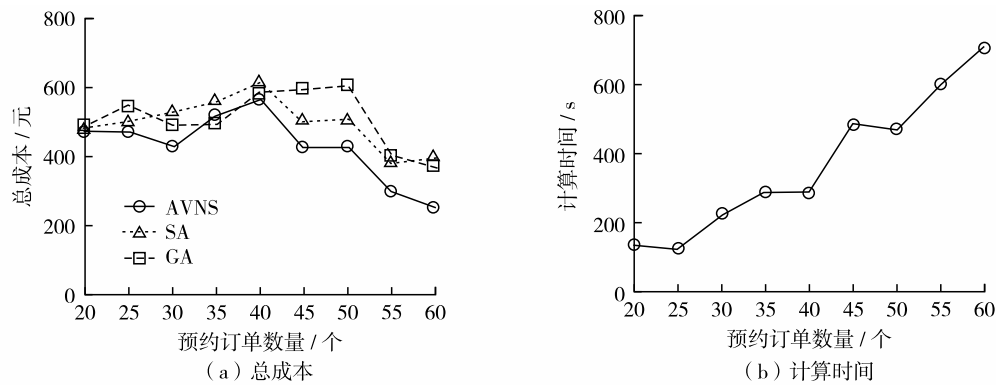


图5 算法求解结果对比

Fig. 5 The comparison of (a) total cost and (b) computation time of algorithms.

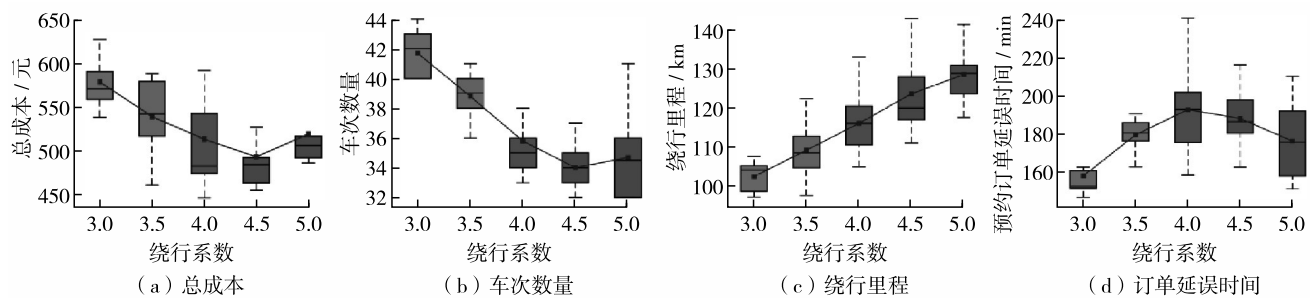


图6 绕行系数对总成本、车次数量、绕行里程及订单延误时间的影响

Fig. 6 Impact of detour coefficient on (a) total cost, (b) the number of trips, (c) detour distance, and (d) delay time of orders.

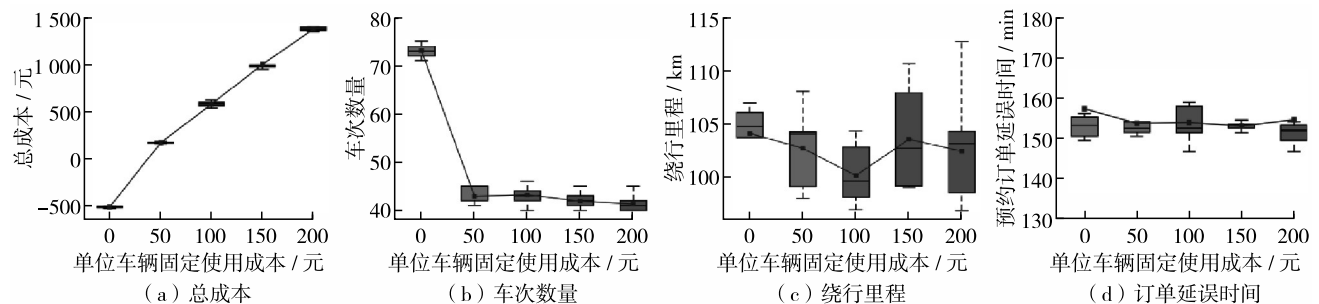


图7 单位车辆固定使用成本对总成本、车次数量、绕行里程及订单延误时间的影响

Fig. 7 Impact of unit fixed vehicle usage cost on (a) total cost, (b) the number of trips, (c) detour distance, and (d) delay time of orders.

4 结 论

本研究基于时空网络图构建站点可变量需求响应式公交服务模型,以最小化总成本为目标协同优化发车时刻表与车辆调度,可实现运营周期内所有车辆运行的车次链全局优化,并针对大规模复杂问题求解要求,基于问题特征设计自适应变邻域搜索算法,包含8类独特的邻域搜索算子并拥有自适应搜索能力.以广州市黄埔区路网数据进行效果验证,得到的主要结论如下:

1) 随着预约订单数量的增加,车辆行驶成本

和运营收益总体上呈现递增趋势,而当订单数量 ≥ 30 个时,总成本呈现先增加后下降的趋势.当预约订单数量达到35时,增加预约订单的数量对发车次数和调用车辆数的影响较小,因此,可以适当放宽车辆预约订单座位限制.

2) 与两阶段模型相比,本研究协同优化固定线路的发车时刻表与车辆调度,从系统层面显著减少车辆使用数量,针对不同预约订单规模以及不同车次发车成本案例,车辆使用率均显著上升,最高提升45.5%,尤其在减少总成本上效果显著,降低幅度为20%~70%.

3) 相比于传统的SA和GA算法,本研究设计

的 AVNS 算法在绝大多数订单规模下求解质量更优,特别是在较大规模算例的计算上,AVNS 强大的搜索性能使得其不易陷入局部最优.当预约订单数为 60 个时,AVNS 最优解的总成本相较于 SA 和 GA 分别下降 38.5% 和 32.9%.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52072128)

作者简介:沈子康(892315570@qq.com),华南理工大学硕士研究生.研究方向:交通规划运输与管理.

引文:沈子康,靳文舟,郑亚晶.站点可变速需求响应式公交车辆调度优化研究[J].深圳大学学报理工版,2024,41(6):691-702.

参考文献 / References:

- [1] MESA J A, ORTEGA F A, POZO M A. Locating optimal timetables and vehicle schedules in a transit line [J]. *Annals of Operations Research*, 2014, 222(1): 439-455.
- [2] GKIOTSALITIS K, ALESIANI F. Robust timetable optimization for bus lines subject to resource and regulatory constraints [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 128: 30-51.
- [3] CEDER A. *Public transit planning and operation: modeling, practice and behavior* [M]. 2nd ed. Boca Raton, USA: CRC Press, 2015.
- [4] IBARRA-ROJAS O J, DELGADO F, GIESEN R, et al. Planning, operation, and control of bus transport systems: a literature review [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 77: 38-75.
- [5] 胡迪, 靳文舟. 基于站点优化的需求响应公交调度研究[J]. *深圳大学学报理工版*, 2022, 39(2): 209-215.
HU Di, JIN Wenzhou. Flex-route demand response transit scheduling based on station optimization [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2022, 39(2): 209-215. (in Chinese)
- [6] 靳文舟, 杜昊, 巫威眺. 基于 ALNS-TS 算法的半灵活型需求响应公交调度问题[J]. *深圳大学学报理工版*, 2023, 40(4): 425-434.
JIN Wenzhou, DU Hao, WU Weitiao. Semi-flexible demand responsive transit scheduling based on ALNS-TS algorithm [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2023, 40(4): 425-434. (in Chinese)
- [7] 庞明宝, 陈茂林, 张宁. 基于 MAST 的智慧公交优化调度研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(1): 143-149, 163.
PANG Mingbao, CHEN Maolin, ZHANG Ning. Scheduling optimization of intelligent public transport system based on MAST [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(1): 143-149, 163. (in Chinese)
- [8] 于乐乐. 可变线路公交动态站点选取与时刻表编制研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
YU Lele. Study on the dynamic stop selection and timetable creation for flex-route transit [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [9] 邵孜科, 张泉, 王树盛, 等. 可变线路公交车辆调度算法优化研究[J]. *交通信息与安全*, 2018, 36(5): 83-89.
SHAO Zike, ZHANG Quan, WANG Shusheng, et al. Optimization algorithms for scheduling of flex-route buses [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2018, 36(5): 83-89. (in Chinese)
- [10] 郭献超. 纯电动需求响应公交路径规划研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
GUO Xianchao. Research on bus route planning of pure electric demand response [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] TANG Xindi, YANG Jie, LIN Xi, et al. Dynamic operations of an integrated mobility service system of fixed-route transits and flexible electric buses [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 173: 103081.
- [12] CAROSI S, FRANGIONI A, GALLI L, et al. A matheuristic for integrated timetabling and vehicle scheduling [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 127: 99-124.
- [13] XU Xiaoming, YU Yanhong, LONG Jiancheng. Integrated electric bus timetabling and scheduling problem [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 149: 104057.
- [14] CAPRARA A, FISCHETTI M, TOTH P. Modeling and solving the train timetabling problem [J]. *Operations Research*, 2002, 50(5): 851-861.
- [15] CACCHIANI V, CAPRARA A, TOTH P. A column generation approach to train timetabling on a corridor [J]. *4OR*, 2008, 6(2): 125-142.

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】



补充材料