

【交通物流 / Transportation Logistics】

基于ALNS-TS算法的半灵活型需求响应公交调度问题

靳文舟, 杜昊, 巫威眺

华南理工大学土木与交通学院, 广东广州 510641

摘要: 半灵活型需求响应公交模式往往拥有1个基准线路方向与1批确定访问的固定站点, 服务车辆可以根据预约请求灵活响应候选的可变站点为其提供服务, 当可变站点无请求时则不服务. 基于低客流区域内需求响应公交服务所面临载客率低、运营成本高等问题, 完善该模式的发车条件, 设计差异化票价策略和未预约乘客服务判断的半灵活型需求响应公交服务系统, 并建立车辆路径优化模型. 为提高算法的搜索空间范围和局部搜索强度, 设计了混合自适应大邻域禁忌搜索算法进行模型求解. 以中国广州市黄埔区公交站点网络作为案例分析, 结果表明, 在新策略模式下, 去除和未去除未预约乘客的半灵活型需求响应公交的票价收入较传统模式分别提高3.0%和15.5%, 响应未预约乘客服务模式的服务人数可以提高7.5%; 混合自适应大邻域搜索算法在求解速度和求解质量上均有较好表现, 与混合模拟退火算法和遗传算法相比, 计算时间分别节约76.9%和97.0%.

关键词: 交通运输工程; 公共交通; 需求响应公交; 票价制定; 路径规划; 混合大邻域搜索算法
中图分类号: U491; C935 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3724/SP.J.1249.2023.04425

Semi-flexible demand responsive transit scheduling based on ALNS-TS algorithm

JIN Wenzhou, DU Hao, and WU Weitiao

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

Abstract: The semi-flexible demand responsive transit is an innovative combination of traditional fixed-route transit and demand responsive transit. It is considered as semi-flexible because it has a predetermined base route and a batch of fixed stations that are determined to be visited, and has some candidate variable stations that the service vehicles can flexibly respond to provide services based on reservation requests. Responding to the problems of low passenger capacity and high operating costs faced by demand responsive transit services in low-demand areas, the departure conditions of this mode are established. A semi-flexible demand responsive transit system based on differentiated fare strategy is designed and the transit scheduling model is established. To improve the search space range and local search intensity of the algorithm, a hybrid adaptive larger neighborhood search - tabu search (ALNS-TS) algorithm is designed to solve the model. The conclusion shows that under the new strategy, the semi-flexible demand responsive transits with and without reservation passengers have increased ticket fare revenue by 3.0% and 15.5%, respectively, compared with the traditional mode, and the mode with responding to unreserved passengers can increase the number of passengers served by 7.5%. ALNS-TS algorithm has better performance in solving speed and quality. Compared with simulated annealing - tabu search (SA-TS) algorithm and genetic algorithm, the

Received: 2023-01-10; **Accepted:** 2023-03-30; **Online (CNKI):** 2023-04-19

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52072128, 72071079, 52272310); Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (2023A1515011696)

Corresponding author: Professor WU Weitiao. E-mail: ctwtwu@scut.edu.cn

Citation: 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)



calculation time of ALNS-TS is saved by 76.9% and 97.0% of the computing time, respectively.

Key words: transportation engineering; public transit; demand responsive transit; ticket pricing; route planning; hybrid adaptive large neighborhood search algorithm

随着中国城镇化进程地不断加快,涌现出众多新建成的城市新区,由于乘客公交需求分散,出行起讫点(origin destination, OD)变化快,传统公交在这些区域的上座率往往很低,出现“空跑”现象.半灵活型公交是定线公交和需求响应公交的结合,既拥有 1 个基础线路方向和一些固定站点,又允许对部分预约请求进行响应服务.在部分城郊区域,由于客流量低无法开行定线公交,而纯需求响应公交的运营成本高,因此,半灵活型需求响应模式具有更好的适用性.

在需求响应公交系统设计方面, DAGENZO^[1]在 20 世纪 80 年代提出一种带有控制站点的需求响应型公交; KOFFMAN^[2]将需求响应型公交分为线路偏移型、站点偏移型、接驳型、站点请求型、区域灵活型及区域走廊型共 6 种主要服务模式; WANG 等^[3]设计一种高自由度的支线需求响应运输系统.

现阶段需求响应公交系统的应用场景研究主要集中于低客流区域,优化目标主要集中于企业成本和服务质量等方面. NOURBAKSH 等^[4]在低客流区域设计了一种基于方格网络的灵活需求响应服务系统; QIU 等^[5]在需求响应公交中加入了动态站点策略,能够显著降低系统成本; SHEN 等^[6]设计一种考虑可变站点的需求响应系统; PAQUETTE 等^[7]从企业、乘客和社会公平性视角建立多目标的需求响应服务模型; 庞明宝等^[8]设计了城郊乡村的静态和动态可变线路公交系统,并同时考虑发车时刻的优化; 陆百川等^[9]设计了可以处理混合需求的两阶段站点需求响应式公交系统; 靳文舟等^[10]在农村场景下建立考虑需求响应集中度的需求响应公交模型; 胡迪等^[11]设计一种基于距离和密度的 k -means (D- k -means) 聚类算法用于确定可变线路公交的备选站点; 齐曼等^[12]在对临时站点进行优先级拓扑排序的基础上进行可变线路公交的路线调度.

在模型求解方面,已有研究多集中于精确算法和元启发式算法. ZHAO 等^[13]设计自适应大邻域和整数规划算法求解电动车路线问题; WANG 等^[14]设计多种邻域搜索与破坏算子求解多车程异构车队危险品运输问题; 巫威眺等^[15]设计了变邻域搜索与粒子群混合算法,求解多目标危险品库存路径问题.

对于需求响应公交的发车条件一般考虑载客量

约束或直接对预约需求进行配车服务与路线规划,半灵活型需求响应模式往往应用于城郊或农村等低客流区域,对发车条件依赖更高.针对应用场景的研究大多考虑多对一或接驳型多对一的出行需求^[10],针对票价策略,现有研究在线路调度中较少考虑动态票价收入对线路规划的影响^[8-12],或单一研究票价的定价规则^[6]对出行方式选择的影响,即大多忽略了车辆路径规划和票价方案间的相互影响.

本研究模型允许乘客在任意站点间进行出行预约,更贴合实际应用场景;同时考虑差异化票价策略并将动态收入纳入模型的优化目标,建立考虑动态票价收入的需求响应型公交车辆调度模型,设计了混合自适应大邻域禁忌搜索(adaptive larger neighborhood search - tabu search, ALNS-TS)算法对问题进行求解.该模型可以服务多对多的乘客需求.

1 需求响应公交建模

1.1 问题描述

本研究的半灵活型需求响应服务模式为:在服务区域内为乘客开放一批可预约站点,供乘客进行出行预约;在发车前,调度系统通过预先收集乘客的订单信息(包括上车站点、下车站点和服务时间等),基于设定的发车条件,对订单信息进行处理,判定是否发车;当满足发车条件后,确定该班次所要服务的固定站点和可变站点,最终符合发车条件的需求响应公交按照乘客预约信息依次服务乘客,并对不同类型乘客收取不同的票价.每一名乘客均有一个对应的上车点和下车点,以乘客 1 为例,其上车点和下车点分别用 O_1 和 D_1 表示.半灵活型需求响应式公交服务模式如图 1.

半灵活型响应公交需要在满足一定实载率条件下才能发车,本研究设置 2 个实载率发车要求:①最低载客率要求.该条件要求预约人数达到最低载客率要求才能发车;②满意载客率要求.若该班次预约人数达到要求,当相邻两班发车间隔已大于最小发车间隔要求,立即发车.考虑到乘客的使用体验,系统响应太慢会影响服务质量,是否发车又受一定的时间间隔约束,本研究设置 2 个发车间隔要求:①最小发车间隔.该条件要求相邻两班车

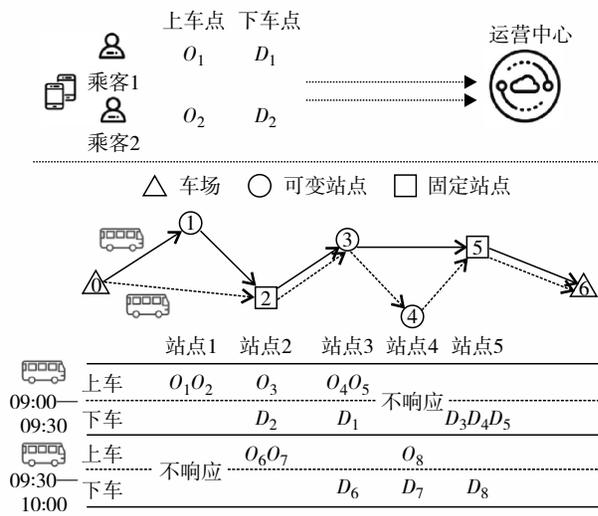


图1 半灵活型需求响应公交服务示意

Fig. 1 Semi-flexible demand responsive bus service.

发车时间必须大于该间隔. ② 最大发车间隔. 要求系统必须在一定时间内完成响应, 当到达最大发车间隔, 载客率仍未达到最低载客率要求时, 拒绝预约乘客, 不发车; 否则发车.

对于预约乘客的公交调度, 在满足发车条件后, 确定所需要服务的所有站点, 包括被响应的可变站点和固定站点, 以发车固定成本、运营成本、票价收入及时间窗惩罚为目标规划车辆的服务路线. 基于乘客是否提前预约及其上车站点性质将乘客分类, 并对不同类别乘客进行差异化票价收费; 对于非预约乘客, 在保障预约乘客享有服务的前提下, 通过判断接受该乘客后车辆在其乘坐路段是否满足载客量约束, 仅对满足约束的非预约乘客提供服务. 需求响应系统的服务流程如图2.

1.2 模型建立

1.2.1 发车条件判断

需求响应公交调度问题不仅与行车路径有关, 还与车辆发车条件和发车时刻有关, 因此, 也需对发车时刻进行优化. 图3为不同发车时刻下采取相同路线方案引起的服务流程差异.

假设在需求响应服务时段 T 内, 实际发车班次集合为 K , 总预约乘客集合为 Q ; 实际发车次数为 γ 辆; 每个预约乘客用 q 表示, 则 q 包含3个属性, 分别为上车站点 O_q 、下车站点 D_q 和最早服务时间 a_q ; x_{ij}^k 和 y_q^k 为决策变量, 当车辆 k 依次服务站点 i 和 j 时, $x_{ij}^k = 1$, 否则为0, 当乘客 q 由车辆 k 服务时, $y_q^k = 1$, 否则为0; 最低载客率为 δ_{\min} ; 满意载客率为 δ_{satisfy} ; 公交响应发车间隔的最大和最小值分别为

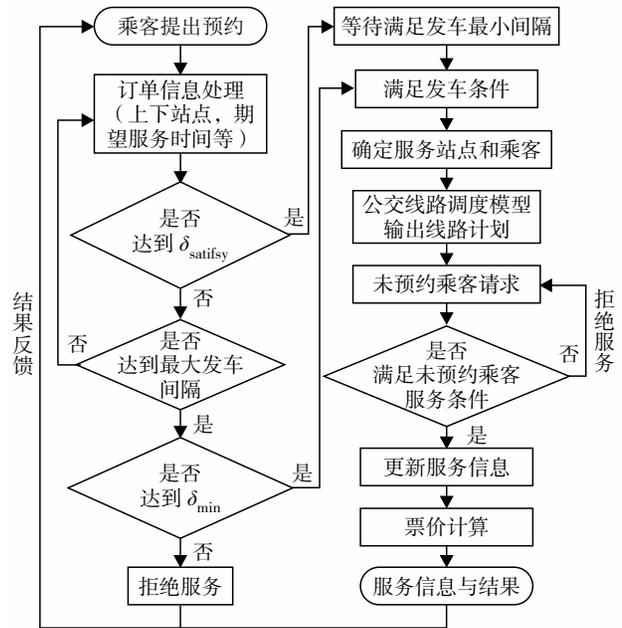


图2 需求响应系统服务流程

Fig. 2 Flow chart of demand responsive system.

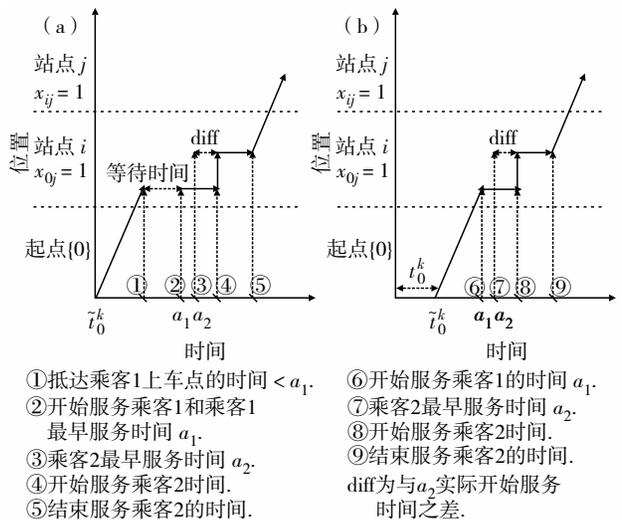


图3 (a)基准发车时刻与(b)优化发车时刻后的服务流程对比

Fig. 3 Comparison of service flow between (a) baseline departure time and (b) optimized departure time.

t_{\max} 和 t_{\min} ; Q_{\max} 为车辆额定载客量; \bar{t}_0^k 为班次 k 的基准发车时刻; t_0^k 为班次 k 在发车起点 $\{0\}$ 的发车时刻偏移量, $t_0^k = 0$ 表示在 \bar{t}_0^k 时刻发车, 实际发车时刻与基准发车时刻一致, $t_0^k = 1$ 代表实际在 \bar{t}_0^k 延迟 1 min 后发车; 所有班次的发车时刻偏移量组成集合 $T_0 = \{t_0^1, t_0^2, t_0^3, \dots, t_0^\gamma\}$, $t_0^k \in T_0$, $t_0^k \in \mathbf{N}$; \tilde{t}_0^k 为班次 k 的实际发车时刻, 且 $\tilde{t}_0^k = \bar{t}_0^k + t_0^k$; 对于任意已发车班次 k , 有如下约束

$$\sum_{k \in K} \sum_{q \in Q} y_q^k \leq |Q| \quad (1)$$

$$\sum_{j \in S \setminus \{0\}} x_{0j}^k = 1, \forall \frac{\sum_{q \in Q} y_q^k}{Q_{\max}} \geq \delta_{\min} \text{ 且 } \tilde{t}_0^k - \tilde{t}_0^{k-1} \geq t_{\max} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in S \setminus \{0\}} x_{0j}^k = 1, \forall \frac{\sum_{q \in Q} y_q^k}{Q_{\max}} \geq \delta_{\text{satisfy}} \text{ 且 } \tilde{t}_0^k - \tilde{t}_0^{k-1} \geq t_{\min} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in S \setminus \{0\}} x_{0j}^k = 0, \forall \frac{\sum_{q \in Q} y_q^k}{Q_{\max}} \leq \delta_{\min} \text{ 且 } \tilde{t}_0^k - \tilde{t}_0^{k-1} \geq t_{\max} \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{q \in Q} y_q^k}{Q_{\max}} \geq \delta_{\min} \text{ 且 } \tilde{t}_0^k - \tilde{t}_0^{k-1} \geq t_{\min}, \forall \sum_{j \in S \setminus \{0\}} x_{0j}^k = 1 \quad (5)$$

其中,式(1)表示所有班次服务乘客数量不超过总预约人数;式(2)表示当达到最大发车间隔,且该班次载客率达到最小载客率要求,该班次发车;式(3)表示当班次载客率达到满意载客率,且满足最小发车间隔要求,该班次立即发车;否则等待发车间隔满足要求后发车;式(4)表示当达到最大发车间隔时,载客率仍不满足最低要求,则拒绝该批次的预约服务,不发车;式(5)表示一旦班次发车,则载客率和发车间隔一定满足最低载客率和最小发车间隔要求。

1.2.2 乘客分类与差异化票价策略

有研究表明,乘客愿意额外支付票价用以享受需求响应公交的个性化服务^[16],因此,有必要对乘客所享受的不同服务质量采取差异化收费.参考SHEN等^[17]对乘客的分类规则,基于上车站点性质及是否提前预约,将乘客分为3类.

类型1 提前进行预约,在固定站点或起点上车的乘客;

类型2 提前进行预约,在可变站点上车的乘客;

类型3 未进行预约,但符合服务条件的乘客;

在3类乘客中,类型1乘客的预约上车站点位于固定站点或起点,只收取定额票价;类型2乘客的预约上车点在可变站点,由于车辆为了响应该站点需额外行驶,票价为定额票价加可变票价;类型3乘客由于没有进行预约,收取更高的定额票价.对于类型1和类型2的预约乘客,其票价主要与上车点的性质和位置有关,与下车点性质无关.假设车辆按顺序依次服务 $(i-1, i, i+1)$ 3个站点,且 i 站点为可变站点,各类乘客的响应票价为

$$p_1 = p_{\rho} \quad (6)$$

$$p_{2,i} = p_{\rho} + p_i \quad (7)$$

$$p_3 = p_{\rho_2} \quad (8)$$

$$p_i = \eta(d_{i-1,i} + d_{i,i+1} - d_{i-1,i+1}) \quad (9)$$

$$p_1 < p_{2,i} \leq p_3 \quad (10)$$

其中,式(6)表示类型1乘客支付的票价为 p_1 , p_{ρ} 为预约乘客的固定票价;式(7)表示类型2乘客支付的票价为 $p_{2,i}$, p_i 表示在可变站点 i 上车的类型2乘客的可变票价金额;式(8)表示类型3乘客支付的票价为 p_3 , p_{ρ_2} 为未预约乘客的固定票价;式(9)为可变票价 p_i 的计算规则, η 为额外行驶距离对票价的影响系数, $d_{i,j}$ 为从站点 $i-1$ 驶向站点 $i+1$ 的行驶距离;式(10)表示不同类型乘客票价约束.

1.2.3 车辆调度模型

本研究车辆调度问题可描述为:服务区域内有1个固定发车场(起点)和1个固定停车场(终点),满足发车条件后发出车辆,乘客预约的上下车点分布在起点、终点、 M_1 个固定站点及 M_2 个可变站点中,对于某一车辆班次 k ,该公交车从起点出发,依次在固定站点及被响应的可变站点服务,最后行驶到终点结束该班次服务.车辆行驶过程需要尽可能满足预约需求的上车时间请求,若车辆提前到达,则需要等待至最早乘客上车时间再开始服务,且等待过程中产生惩罚,同时满足车辆载客量与最长行驶时间等约束.

需求响应公交调度模型基于如下假设:①乘客提交预约需求后,不会因个人原因更改或取消出行需求;②除被拒绝乘客外,被服务乘客不会出现计划更改的情况;③每个乘客的上车时间已知,即每个站点的服务时间已知;④道路条件良好,道路外部条件对车辆行驶无干扰,车辆可通过调节速度达到平均速度进行服务;⑤服务车辆车型已知,额定载客量唯一;⑥车辆均从起点车场出发,完成任务后,均回到同一终点,起终点车场不同;⑦车辆行驶时,任意站点间的距离和行驶时间已知.

在单独考虑某一班次的发车路线时,将决策变量 x_{ij}^k 简化为 x_{ij} ,并引入决策变量 U_i ,当站点 i 属于可变站点时, $U_i = 1$,否则为0;FS为固定站点集合;VS为可变站点集合;PS为被响应服务的可变站点集合; S 为该班次所有经停站点, $S = \{0\} \cup \text{FS} \cup \text{PS} \cup \{M_1 + M_2 + 1\}$; c_0 为车辆的单次发车固定成本; c_1 为车辆可变成本系数; v 为车辆平均行驶速度; α_1 为车辆早到时间惩罚系数; T_{\max} 为

车辆最大行驶时间; t_{ij} 为站点 i 和 j 之间的行驶时间; h_i^+ 为车辆驶入站点 i 的实际时间; h_i^- 为车辆从站点 i 驶离的实际时间; l_i 为车辆离开站点 i 时车辆上的乘客数量; n_i 为车辆在站点 i 的上下车人数净值.

半灵活型需求响应公交调度模型为

$$\min \left(c_0 + \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} c_1 x_{ij} d_{ij} + W - P \right) \quad (11)$$

约束条件为

$$W = \sum_{q \in Q} y_q^k \left(\alpha_1 \max(a_q - h_{o_q}^+, 0) \right) \quad (12)$$

$$P = \sum_{q \in Q} y_q^k (p_{f1} + U_{o_q} p_{2.o_q}) \quad (13)$$

$$\sum_{i \in S} x_{ij} = 1, \forall j \in \text{FS} \cup \{M_1 + M_2 + 1\} \quad (14)$$

$$\sum_{j \in S} x_{ij} = 1, \forall i \in \text{FS} \cup \{0\} \quad (15)$$

$$\sum_{i \in S} x_{ij} \leq 1, \forall j \in S \quad (16)$$

$$\sum_{j \in S} x_{ij} \leq 1, \forall i \in S \quad (17)$$

$$\sum_{j \in S} x_{o_q j} - \sum_{i \in S} x_{i D_q} = 0, \forall q \in Q, y_q^k = 1 \quad (18)$$

$$l_i + x_{ij} n_i = l_j, \forall i, j \in S, i \neq j, x_{ij} = 1 \quad (19)$$

$$0 \leq l_i \leq Q_{\max}, \forall i \in S \quad (20)$$

$$h_i^- + x_{ij} \left(\frac{d_{ij}}{v} \right) \leq h_j^+, \forall i, j \in S, i \neq j, x_{ij} = 1 \quad (21)$$

$$\max(h_{o_q}^+, a_q) + \mu \leq h_{o_q}^-, \forall q \in Q, y_q^k = 1 \quad (22)$$

$$h_{D_q}^+ + \mu \leq h_{D_q}^-, \forall q \in Q, y_q^k = 1 \quad (23)$$

$$h_i^+ - h_0^- \leq T_{\max}, \forall i \in S \setminus \{0\} \quad (24)$$

$$h_{o_q}^- \leq h_{D_q}^+, \forall y_q^k = 1 \quad (25)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (26)$$

$$y_q^k = 0 \text{ 或 } 1 \quad (27)$$

$$U_i = 0 \text{ 或 } 1 \quad (28)$$

其中, 式(11)表示目标函数由单次发车成本、运营成本、时间惩罚成本和票价收入组成, 运营成本包括车辆在行驶过程中产生的燃料成本和折旧成本, 与行驶里程相关; 式(12)表示早到时间惩罚成本; 式(13)表示票价收入; 式(14)和式(15)表示固定站点一定有车辆服务且只服务1次, 车辆一定从起点出发到终点结束; 式(16)和式(17)表示站点最多被服务1次; 式(18)表示同一乘客只能被1辆车服务;

式(19)表示车辆连续服务两站点间的载客量关系; 式(20)表示车辆在每个站点的载客量始终小于额定载客量且大于0; 式(21)表示车辆连续服务两站点间的时间关系; 式(22)和式(23)分别表示车辆在服务需求 q 时, 上车站点 O_q 驶入时间与下车站点 D_q 驶离时间之间的关系; 式(24)表示车辆的总营运时间约束; 式(25)表示车辆服务过程中满足乘客先上后下顺序; 式(26)至(28)表示决策变量的取值范围.

1.2.4 未预约乘客服务响应判断

假设车辆在服务类型3乘客所产生的的车辆时间延误可通过调节自身行驶速度而忽略, 则类型3乘客是否被服务的条件为

$$Q_{\max} - l_{o_{q_{i,n}}} > 0 \quad (29)$$

$$Q_{\max} - l_j > 0, x_{o_{q_{i,n}} j} = 1, D_{i,n} \neq j \quad (30)$$

$$l_j = l_{o_{q_{i,n}}} + n_j, x_{o_{q_{i,n}} j} = 1 \quad (31)$$

其中, $q_{i,n}$ 表示在站点 i 的第 n 个未预约乘客, 式(29)表示对于乘客 $q_{i,n}$, 若允许服务, 则在乘客上车时车辆不能满载; 式(30)表示若服务乘客 $q_{i,n}$, 则在车辆行驶的下一站点(且该站点不是乘客 $q_{i,n}$ 的下车点), 接受乘客 $q_{i,n}$ 前该车辆不能满载; 式(31)表示相邻站点间的车上人数关系.

依次递推, 设集合 $S'_{i,n}$ 表示当车辆服务未预约乘客 $q_{i,n}$ 时, 车辆在该乘客想要搭乘路段中途经的所有站点构成的集合(下车站点除外), 即 $S'_{i,n} = \{O_{q_{i,n}}, \dots, D_{q_{i,n}}\} \setminus \{D_{q_{i,n}}\}$, 故对于乘客 $q_{i,n}$, 若允许服务, 则应满足

$$Q_{\max} - l_s \neq 0, \forall s \in S'_{i,n} \quad (32)$$

$$l_{s+1} = l_s + n_{s+1}, x_{s,s+1} = 1, s+1 \in S'_{i,n} \quad (33)$$

$$\prod_{s \in S'_{i,n}} (Q_{\max} - l_s) \neq 0 \quad (34)$$

其中, 式(32)表示对于乘客 $q_{i,n}$, 若允许服务, 则车辆在集合 $S'_{i,n}$ 中的任意站点均未满载; 式(33)表示集合 $S'_{i,n}$ 中站点间的载客量关系; 式(34)表示若乘客 $q_{i,n}$ 上下车路段中某一路段已经满载, 拒绝服务该乘客.

2 混合自适应大邻域禁忌搜索算法设计

2.1 编码规则

编码包括路径信息、发车时间信息和票价信息. 假设有 n 个预约乘客, 其预约上车点编号为

1 ~ n, 预约下车点对应编号为 n + 1 ~ 2n. 对于发车信息, 编码数值代表实际发车时刻偏移基准发车时刻的分钟数; 对于票价信息编码, 乘客的上车点对应该乘客票价, 下车点和终点的编码为 0, 起点处储存该班次对应的发车时间信息. 图 4 为编码过程示例. 其中, 第 1 行表示路径段编码, 黑色为起点或终点, 白色为预约上车点, 灰色为预约下车点; 第 2 行表示各个发车时间信息和动态票价信息. 可见, 3 名预约乘客对应的预约上车点 {1, 2, 3} 和预约下车点 {4, 5, 6} 分布在固定站点

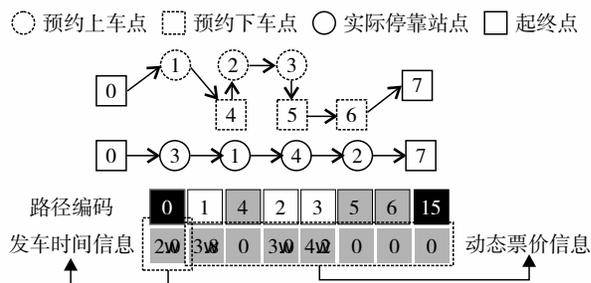


图 4 编码示例
Fig. 4 Coding example.

{1} 和可变站点 {2, 3, 4} 中, 如乘客 1 的预约上车点 {1} 和 {4} 分别对应可变站点 {3} 和固定站点 {1}; 对于固定站点 {1}, 需要服务乘客 2 上车和乘客 1 下车.

2.2 初始解构造

将预约上车点随机排列, 并根据上下车约束依次插入每个预约下车点, 最后插入起点和终点构成路径编码, 计算对应的第 2 层信息生成初始解.

2.3 ALNS 破坏与修复算子

本研究共采用 4 个破坏算子和 2 个修复算子. 乘客随机破坏算子将随机移除当前解中 m_1 个乘客; 预约站点随机破坏算子将随机移除当前解中 m_2 个预约站点. 乘客最坏破坏算子和预约站点最坏破坏算子对目标值影响最高的乘客或预约站点进行移除. 随机修复算子将被移除的预约站点随机插入解中; 贪婪修复算子通过寻找最优站点位置进行插入. 由于随意插入会导致无法满足乘客上下车先后顺序约束, 故根据修复点性质与对应上(下)车点所处位置分类讨论了 3 种不同的插入情景, 插入情景及相关规则如图 5.

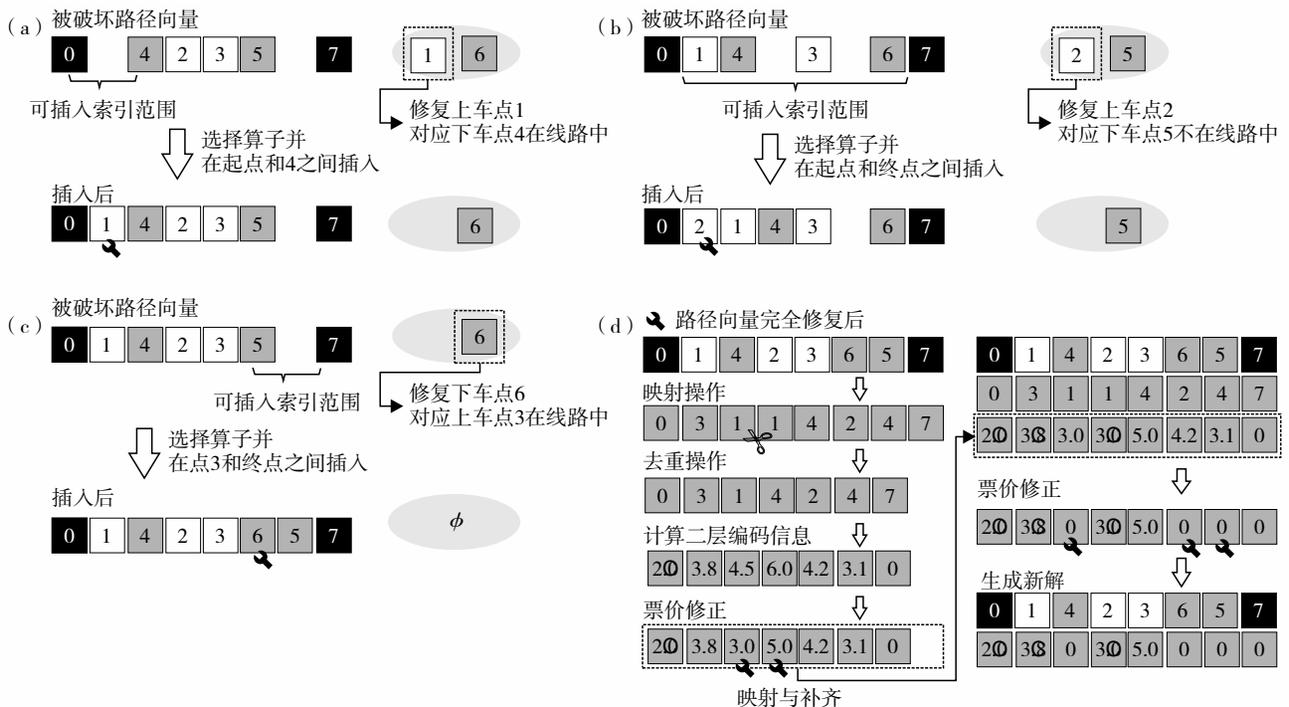


图 5 插入情景与规则 (a)情景 1: 修复点为上车点, 对应下车点已在线路中; (b)情景 2: 修复点为上(下)车点, 对应下(上)车点不在线路中; (c)情景 3: 修复点为下车点, 对应上车点已在线路中; (d)发车信息与票价向量计算示例

Fig. 5 Insert scenario and rules. (a) Scenario 1: the repaired point is a pick-up point, corresponding to a drop-off point already in the line; (b) scenario 2: the repaired point is a pick-up (drop-off) point, corresponding to a drop-off (pick-up) point that is not in the line; (c) scenario 3: the repaired point is the drop-off point, and the corresponding pick-up point is already in the line; (d) example of departure information and fare vector calculation.

2.4 混合自适应大邻域禁忌搜索算法流程

混合自适应大邻域禁忌搜索算法流程如图6.

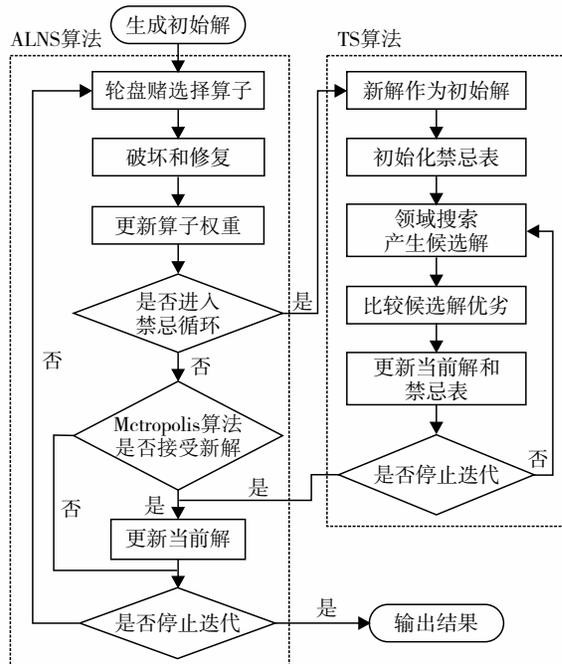


图6 混合自适应大邻域禁忌搜索算法流程
Fig. 6 Flowchart of hybrid ALNS-TS algorithm.

3 算例求解

以中国广州市黄埔区部分区域为例进行实例分析. 通过在线地图和实地调研方式获取公交站点的相关信息和区域内乘客出行规律, 将符合出行规律的乘客信息用于计算, 按1:1 000的比例将站点坐标转换为对应坐标值, 其站点位置分布如图7.

首先, 以30 min为间隔开放多个时段供乘客预约, 并根据每个时段内的预约数据, 进行发车判

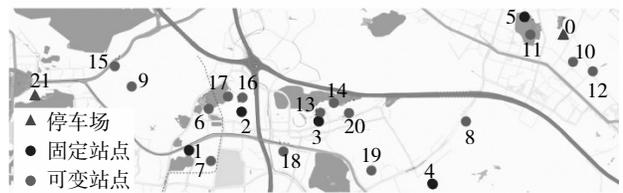


图7 实例站点分布示意

Fig. 7 Schematic diagram of example site location. The triangle, black circle and grey circle stand for depots, fixed stations and alternative stations.

断, 得到发车结果如表1. 经判断, 时段1、2、3和4满足发车条件, 允许进行发车服务, 每个时段所发班次分别称为班次1、2、3和4; 经判断时段5不发车, 拒绝该时段的预约乘客. 其中, 班次1预约乘客信息见表2. 每班次随机在节点间路径产生 m_3 名未预约乘客, m_3 参考实际公交客流确定. 广州市948路和333路公交与本研究需求响应线路的东侧和西侧线路相似, 两条线路在2022-02-08折算单班次载客分别为16人和13人, 按照公交运营规律, 新开行线路会产生一定的诱增客流, 参考文献[18]取诱增客流比例系数为5%^[18], 折算为每班次诱增 $(16 + 13) \times 5\% \approx 1$ 名乘客, 即每班次随机产生1名未预约乘客.

表1 发车判断结果

Table 1 Departure judgment results

预约时段	预约需求人数	未预约需求人数	发车判断结果
1 (09:00, 09:30]	14	1	发车
2 (09:30, 10:00]	9	1	发车
3 (10:00, 10:30]	12	1	发车
4 (10:30, 11:00]	12	1	发车
5 (11:00, 11:30]	5	0	不发车

表2 班次1预约乘客出行信息

Table 2 Information of scheduled passengers for shift 1

乘客编号	上车站点	下车站点	期望时间	乘客编号	上车站点	下车站点	期望时间	乘客编号	上车站点	下车站点	期望时间
1	0	12	(09:00, 09:10]	8	4	19	(09:15, 09:20]	15	18	9	(09:25, 09:30]
2	0	17	(09:05, 09:10]	9	4	1	(09:15, 09:20]	16	18	1	(09:25, 09:30]
3	0	14	(09:00, 09:10]	10	4	14	(09:15, 09:20]	17	2	9	(09:30, 09:40]
4	10	16	(09:10, 09:15]	11	20	1	(09:20, 09:25]	18	6	15	(09:32, 09:37]
5	10	18	(09:10, 09:15]	12	20	6	(09:20, 09:25]	19	7	15	(09:35, 09:40]
6	5	19	(09:05, 09:10]	13	13	9	(09:20, 09:25]	20	1	15	(09:40, 09:45]
7	11	8	(09:15, 09:20]	14	3	1	(09:25, 09:30]				

参考半灵活型需求响应公交相关研究^[19]，对类型3乘客收取定额票价5元。类型2乘客的可变票价单票价做不超过5元的约束。

将满足发车条件的数据输入线路调度模型，其中，车辆平均行驶速度取40 km/h，根据车辆油耗及车辆最大行驶公里，折算车辆油价和折旧成本分别为1.5元/km和1.2元/km，故车辆的运营成本为2.7元/km，车辆最大载客量为22人，固定票价为3.0元。取服务范围内单点服务最大与最小行驶距

离之差，将动态票价幅度平均分配在该差值上，得到额外行驶距离对票价影响系数0.5元/km，参考相关文献中的参数确定方法^[12]，根据2021年广州市人均国民生产总值确定早到时间窗惩罚系数0.5元/min，票价上限为5.0元，通过对司机薪资和保修成本进行折算，单班次发车成本 c_0 取52.7元， t_{min} 和 t_{max} 分别取20 min和40 min， δ_{min} 和 $\delta_{satisfy}$ 分别取40%和100%。各个班次的发车时刻和运行线路如表3。

表3 发车时刻与运行线路方案结果

Table 3 Results for departure times and route options

班次	基准发车时刻	基准线路	优化发车时刻	运行线路
1	09:00	21—5—4—3—2—1—0	09:05	21—12—10—5—11—8—4—19—20—14—13—3—18—2—16—17—6—7—1—9—15—0
2	09:30	21—5—4—3—2—1—0	09:38	21—12—10—5—8—4—19—20—14—3—16—2—1—15—0
3	10:00	21—5—4—3—2—1—0	10:13	21—11—5—8—4—3—13—18—2—6—7—1—15—0
4	10:30	21—5—4—3—2—1—0	10:31	21—5—8—4—3—13—18—2—1—9—15—0

将本研究策略模式与常规模型需求响应公交进行对比可见，①在总票价收入方面，本研究模式根据乘客类型和可变站点额外行驶里程确定乘客的实际支付票价，并可以服务部分满足条件的未预约乘客，本研究模式4个班次不考虑类型3乘客的总票价收入为163.72元，考虑类型3乘客的总票价收入183.72元，而常规模式总票价收入为159.0元，

相较之分别提升3.0%和15.5%。②在总服务人数方面，在所有已发车班次中，本研究模式能够服务部分未预约需求，总计服务57人，而常规需求响应型公交服务预约乘客53人，较之提高了7.5%。本研究策略模式和常规模型需求响应公交的运营效果对比见表4。

表4 本研究策略模式和常规模型需求响应公交的运营效果对比

Table 4 Comparison of the operational effectiveness of the new strategy mode and conventional mode

班次 编号	本研究策略模式				常规模式		
	去除未预约乘客 总票价收入/元	包含未预约乘客的 总票价收入/元	服务 人数	投入 产出比	总票价 收入/元	总服务 人数	投入 产出比
1	62.9	67.9	21	1.02	60	20	0.90
2	27.5	32.5	10	0.53	27	9	0.44
3	36.4	41.4	13	0.72	36	12	0.63
4	37.0	42.0	13	0.77	36	12	0.66
合计	163.8	183.8	57	—	159	53	—

基于班次1乘客数据分别分析ALNS-TS算法、混合模拟退火禁忌搜索(simulated annealing - tabu search, SA-TS)算法、自适应大邻域搜索(adaptive large neighborhood search, ALNS)算法、禁忌搜索(tabu search, TS)算法、模拟退火(simulated annealing, SA)算法及遗传算法(genetic algorithm, GA)的求解精度、求解稳定性和求解效率。6种算法的参

数设置相同，算子一致。算法主框架最大迭代次数为500，禁忌长度为30，初始温度为100℃，温度下降系数为0.97，当温度下降到1℃以下保持不变，禁忌搜索模块最大迭代次数30次，子禁忌长度取5，算子更新权重0.8，初始算子分数均为10，加分规则分别为(3, 2, 1, 0)，遗传算法种群数为100，选择产生新个体数为50，染色体交叉概率

0.6, 染色体变异概率0.1. 取10次独立计算的平均值, 6种算法的迭代曲线及求解质量和求解速度对比分别如图8和表5.

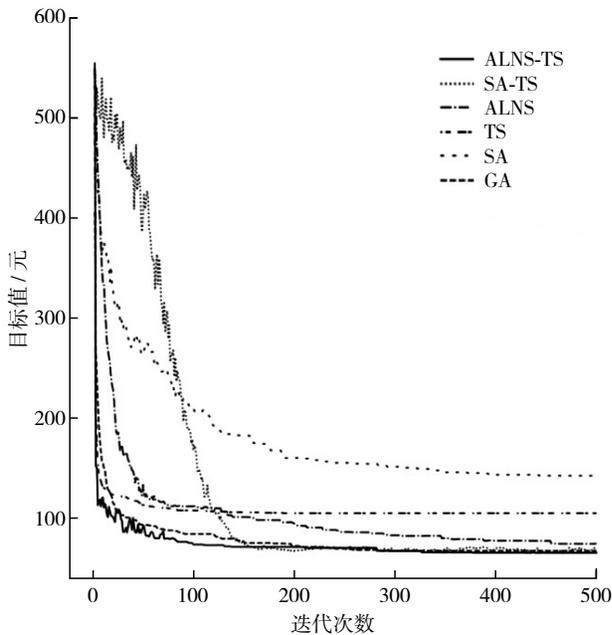


图8 ALNS-TS、SA-TS、ALNS、TS、SA及GA算法的迭代曲线

Fig. 8 Iteration curves of ALNS-TS algorithm (solid line), SA-TS algorithm (dotted line), ALNS algorithm (dash-dotted line), TS algorithm (short dash-dotted line), SA algorithm (short dashed line) and GA algorithm (dashed line), respectively.

表5 ALNS-TS、SA-TS、ALNS、TS、SA和GA算法的求解质量与速度对比

Table 5 Comparison of solution quality and speed of ALNS-TS algorithm, SA-TS algorithm, ALNS algorithm, TS algorithm, SA algorithm and GA algorithm

算法	最优解		收敛代数	计算时间/s
	均值	标准差		
ALNS-TS	62.36	2.67	350	172
SA-TS	61.94	2.60	300	744
ALNS	72.95	10.95	450	70
TS	103.59	14.94	100	543
SA	140.21	22.42	400	162
GA	65.90	3.91	300	5 562

由图8可见, TS算法的强局部搜索能力使其早期迭代效率较高, 但易陷入局部最优, 求解结果较普通; ALNS算法的搜索能力使其能得到较好解, 但得到满意解需要较大的迭代次数; SA算法不具备算子的自适应选择能力, 收敛最慢; GA算法在300代后开始收敛, 且求解质量较高; SA-TS混合

算法在前期下降速度不快, 但在300代后开始收敛, 求解质量最高; 而ALNS-TS算法既拥有TS的强搜索能力, 也能在更大邻域内进行破坏修复, 前期下降速度最快且求解质量较好.

由表5可见, ALNS-TS混合算法和SA-TS算法的求解质量最高, 但SA-TS算法的求解时间较长, ALNS-TS算法的求解时间较SA-TS算法节约了76%; GA算法求解质量较高, 但求解时间在所有算法中最长; ALNS算法的求解时间在所有算法中最快. 同样可知, ALNS-TS算法性能更优.

结 语

本研究设计一种考虑乘客差异化票价和未预约乘客需求的需求响应公交运营系统, 并通过ALNS-TS混合算法进行求解. 研究结果表明, 该系统能够满足多对多的乘客公交出行需求, 差异化票价和服务未预约乘客可以提高企业的经营效益; 改进的ALNS-TS算法在求解质量、精度及效率方面较传统GA、SA、TS、ALNS及SA-TS算法表现更优. 后续研究可以通过考虑乘客下车点以及乘客在服务过程中的动态状态, 制定不同的票价标准.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52072128, 72071079, 52272310); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023A1515011696)

作者简介: 靳文舟(1960—), 华南理工大学教授、博士生导师. 研究方向: 交通规划运输与管理. E-mail: ctwzhjin@scut.edu.cn

引 文: 靳文舟, 杜昊, 巫威跳. 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.

参考文献 / References:

[1] DAGANZO C F. Checkpoint dial-a-ride systems [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1984, 18 (4/5): 315-327.

[2] Transportation Research Board, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Operational experiences with flexible transit services [M]. Washington D C: The National Academies Press, 2004.

[3] WANG Zhengwu, YU Jie, HAO Wei, et al. Joint optimization of running route and scheduling for the mixed demand responsive feeder transit with time-dependent travel times [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2498-2509.

[4] NOURBAKHS S M, OUYANG Yanfeng. A structured

- flexible transit system for low demand areas [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2012, 46(1): 204-216.
- [5] QIU Feng, LI Wenquan, ZHANG Jian. A dynamic station strategy to improve the performance of flex-route transit services [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 48: 229-240.
- [6] SHEN Jinxing, YANG Shuqian, GAO Xuming, et al. Vehicle routing and scheduling of demand-responsive connector with on-demand stations [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(6): 1687814017706433.
- [7] PAQUETTE J, CORDEAU J F, LAPORTE G, et al. Combining multicriteria analysis and tabu search for dial-a-ride problems [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013, 52: 1-16.
- [8] 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)
- [9] 陆百川, 黄镜轶, 张冬梅, 等. 站点需求响应式公交调度系统优化研究[J]. *重庆理工大学学报自然科学版*, 2021, 35(2): 34-43.
LU Baichuan, HUANG Jingyi, ZHANG Dongmei, et al. Research on optimization of station demand-responsive public transit dispatching system [J]. *Journal of Chongqing University of Technology Natural Science*, 2021, 35(2): 34-43. (in Chinese)
- [10] 靳文舟, 邓钦原, 郝小妮, 等. 改进人工蜂群算法的农村 DRT 路径优化研究[J]. *郑州大学学报工学版*, 2021, 42(4): 84-90.
JIN Wenzhou, DENG Qinyuan, HAO Xiaoni, et al. Research on route optimization of rural DRT based on improved ABC algorithm [J]. *Journal of Zhengzhou University Engineering Science*, 2021, 42(4): 84-90. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 齐曼, 庞明宝. 基于优先级拓扑排序的可变线路式公交调度[J]. *深圳大学学报理工版*, 2023, 40(4): 435-442.
QI Man, PANG Mingbao. Flex-route buses scheduling based on priority topological sorting [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2023, 40(4): 435-442. (in Chinese)
- [13] ZHAO Mengting, LU Yuwei. A heuristic approach for a real-world electric vehicle routing problem [J]. *Algorithms*, 2019, 12(2): 45.
- [14] WANG L, KINABLE J, VAN WOENSEL T. The fuel replenishment problem: a split-delivery multi-compartment vehicle routing problem with multiple trips [J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 118: 104904.
- [15] 巫威眺, 王殿雷, 马昌喜. 液化天然气库存路径问题建模与算法[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(11): 252-270.
WU Weitiao, WANG Dianlei, MA Changxi. Model and algorithm for inventory routing problem of liquified natural gas [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(11): 252-270. (in Chinese)
- [16] KIM W, MOON N, KIM J W. Fare estimation for demand responsive transport based on a stated preference survey [J]. *Transportation Research Procedia*, 2017, 25: 5235-5241.
- [17] SHEN Jinxing, QIU Feng, ZHENG Changjiang, et al. Fare strategy for flex-route transit services: case study in Los Angeles [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 82038-82051.
- [18] ZHENG Yue, LI Wenquan, QIU Feng, et al. Travelers' potential demand toward flex-route transit: Nanjing, China, case study [J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2020, 146(1): 05019018.

【中文责编：方圆；英文责编：淡紫】