

文章编号:1672-9331(2021)03-0069-10

考虑换乘时间需求的响应型接驳公交系统的协调优化

付康林^{1,2},程向昕²,陈涛²,姜宁宇²

(1. 湖南华罡规划设计研究院有限公司,湖南长沙 410076; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙 410114)

摘要: 乘客换乘时间需求是响应型接驳公交提供换乘服务时应考虑的一个重要因素。为此,提出一种考虑换乘时间需求的响应型接驳公交运行路径与调度协调优化方法。首先,将乘客按是否有特定换乘班次需求进行分类;然后,以同时接送模式下响应型接驳公交为研究对象,以乘客与运营商的效用加权之和最大为目标,以乘客换乘时间需求、乘客预约时间窗、车辆容量、车辆单程最大行程时间等为约束,构建发车间隔和运行路径一体化的协调优化模型,并基于遗传算法设计求解算法;最后,以长沙市地铁一号线尚双塘站周边区域为例进行实例分析。结果表明:与单接单送模式相比,同时接送模式系统的总效用提升了17.1%,同时接送模式的优越性显著;乘客换乘时间需求导致系统的总效用降低了9.42%,但考虑换乘时间需求提升了乘客的换乘效率,降低的系统总效用是可接受的;中小型车比较适合响应型接驳公交系统。

关键词: 响应型接驳公交;换乘时间需求;协调优化;同时接送模式;换乘需求

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Coordination and optimization of responsive feeder transit system considering transfer time demand

FU Kang-lin^{1,2}, CHENG Xiang-xin², CHEN Tao², JIANG Ning-yu²

(1. Hunan Huagang Planning and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410076, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The passengers' transfer time demand is an important factor that should be considered when responsive feeder transit provides transfer service. Therefore, a method to coordinate and optimize the operation paths and the dispatching of responsive feeder transit considering the transfer time demand was proposed. First, passengers were classified according to whether they had specific transfer schedules. Then, taking the responsive feeder transit under the simultaneous pickup and delivery mode as the research object, taking the sum of the utility weights of passengers and operators being maximal as the goal, and taking the passengers' transfer time demand, the passengers' appointment time window, the capacities of the vehicles, and the maximal one-way travel time of the vehicles as constraints, an integrated coordination optimization model for departure intervals and operation paths was established, and a solution algorithm based on genetic algorithm was designed. Finally, the

收稿日期:2021-05-10

基金项目:湖南省交通科技项目(201920);国家自然科学基金资助项目(51678075)

通讯作者:付康林(1981—),男,高级工程师,主要从事道路工程、交通运输工程等方面的研究。

E-mail:25696797@qq.com

area around Shangshuangtang Station of Changsha Metro Line 1 was taken as an example for the case analysis. The results show that compared with the single pickup and single delivery mode, the total system utility of the simultaneous pickup and delivery mode has increased by 17.1%, and it has significant advantages. The passengers' transfer time demand leads to the total system utility decreased by 9.42%, but the passengers' transfer efficiency is improved by considering the transfer time demand, so the reduced total system utility is acceptable. Medium and small vehicles are suitable for the responsive feeder transit system.

Key words: responsive feeder transit; transfer time demand; coordination optimization; simultaneous pickup and delivery mode; transfer demand

响应型接驳公交(responsive feeder transit, RFT)是一种典型的需求响应型公交(demand responsive transit, DRT)^[1]。作为一种新兴的、与互联网相结合的公交服务新模式,RFT 比较适于为地铁、快速公交、大型枢纽场站等干线交通提供接驳服务。RFT 具有传统公交运量大的特点,也具有出租车的灵活性特点。乘客通过电话、手机 APP 等方式自行预约,RFT 系统根据乘客预约的接送地点和时间分配适宜车型,规划最佳线路,实现与干线公交同步换乘,尽量减少乘客的换乘时间,能较好地满足低密度出行区域乘客的出行需求。作为“出行最后一公里”难题的有效解决措施,RFT 吸引了众多学者的关注。如 QIU 等^[2]以盐湖城 F94 线路公交为例,用柔性线路的响应型接驳公交代替固定线路公交,为有轨电车的乘客提供接驳服务,结果表明响应型接驳公交具有一定的优越性。NOURBAKHSI 等^[3]对比了不同需求密度下的响应公交,发现在中低密度需求水平下,响应型公交的系统成本最低。安尼瓦等^[4]从出行者的个体特征、出行特征和定制公交的交通特性等方面分析了影响居民选择定制公交作为出行方式的因素。NÚÑEZ 等^[5]提出了多目标动态车辆运行路径问题,在所建立的模型中考虑了运营成本最小、乘客满意度最大这两个对立目标。PAN 等^[6]构建了不规则服务区域内需求响应型公交系统的路径优化模型。SUN 等^[7]研究了地铁站与接驳巴士之间的同步换乘问题。靳文舟等^[8]通过 K-means 算法对公交停靠点进行规划,并基于精英选择遗传算法设计了车辆路径模型的求解算法。高照明^[9]以固定站点的需求响应式公交为研究对象,构建了静态和动态公交调度模型。

芒烈^[10]引入“集聚效应”理论,对接驳区域进行扇形分割,用乘客最大绕行时间标定服务区域的宽度,并构建了响应型接驳公交调度模型。孙博等^[11]提出了一类响应型接驳公交调度的混合整数线性规划模型,考虑了时间窗、最大在车时间等乘客的个性化需求。王正武等^[12-16]对车辆路径问题进行了研究,构建了多车型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模型,提出了多个换乘站之间响应型接驳公交运行线路的协调设计问题,研究了多车型高自由度响应公交的分区优化问题,构建了动态行程时间下响应型接驳公交的路径优化模型。KIRCHLER 等^[17]建立了具有硬时间窗的电召巴士路径优化模型,并用粒子群-禁忌搜索算法对其进行求解,结果表明,与禁忌搜索算法、遗传算法和变邻域搜索算法相比,新算法具有更好的计算性能。SCHILDE 等^[18]对动态电召巴士的路径问题进行了研究,提出了两种元启发式算法,并对动态车辆的路径问题进行了求解。

响应型接驳公交的相关研究主要集中在适用性^[2-4]、车辆路径的优化^[5-16]上,很少考虑与干线公交的协同优化。虽然文献[7,12]考虑了与换乘站的同步换乘,但仅要求车辆到达时间不晚于乘客期望的换乘班次的发车时间,未考虑乘客换乘时间的个性化需求,协调机制也存在一定欠缺,更未考虑同时接送的运行模式。针对上述不足,本研究以同时接送 RFT 为研究对象,首先根据乘客换乘时间需求对乘客进行划分,然后以乘客的换乘时间需求等为约束,构建 RFT 运行路径与发车间隔的协调优化模型,并设计遗传算法对其进行求解,以期降低系统的运营成本,提高运行效率。

1 RFT 系统的协调优化

1.1 问题描述

同时接送 RFT 的路径协调优化问题可描述为:在服务范围内,有一定数量的乘客需搭乘 RFT 前往换乘站换乘干线公交出行,有一定数量的乘客需搭乘 RFT 离开换乘站到达各自的目的地。RFT 系统在收到乘客的出行申请后,调度中心根据乘客申请,在满足车辆保有量、乘客时间窗、车辆单程最大运行时间、换乘时间需求等约束的基础上,以系统总效用最大为目标,在完成全部乘客接送任务的同时,优化确定所有班次的发车时间和运行路径。系统中的车辆,可单独接或单独送乘客,也可同时接送乘客。

1.2 基本假设

1) 需求点之间的最短路径距离不变,接驳车在路网中以恒定车速 v 运行,各需求点乘客的上、下车时间忽略不计,乘客在换乘站需花费的换乘时间固定为 β 。

2) 乘客全部为预约出行且不会取消预约,预约乘客上、下车的需求(乘客)点位置、时间窗等信息已知。

3) 系统中只有一个换乘站,车型单一,RFT 系统在接受乘客的预约需求后,安排接驳车从换乘站出发,最后回到换乘站,车辆运行路径为闭合

回路。

4) 只考虑需求点与换乘站之间乘客的出行需求,不考虑需求点与需求点之间乘客的出行需求。

1.3 换乘时间需求

从需求点前往换乘站的乘客,可分为有特定换乘班次需求的乘客和无特定换乘班次需求的乘客。第一类乘客对到达换乘站的时间有特定要求,他们在到达换乘站后期望换乘某一特定的干线公交班次 m ,该类乘客的换乘时间需求如图 1(a) 所示。在图 1(a) 中, M 为一个无穷大的惩罚值; p 为惩罚成本; $[P_{E,m}, P_{L,m}]$ 为搭乘班次 m 的乘客期望到达换乘站的时间窗; $P_{L,m}$ 为硬约束,若接驳任务中存在此类乘客,则车辆不允许晚到,且到达换乘站的时间必须早于班次 m 的发车时间 (H_m),同时需要给乘客留有一定的换乘时间 β (可以是乘客在换乘站所需的最短步行时间); $P_{E,m}$ 为软约束,若车辆早于 $P_{E,m}$ 到达,则产生惩罚成本。第二类乘客对到达换乘站的时间无特定要求,他们到达换乘站后可换乘任意班次的干线公交,但乘客存在心理预期,对到达换乘站的要求如图 1(b) 所示。该类乘客从需求点到达换乘站后,换乘最近的第 n ($n=1,2,3\cdots$) 班次干线公交。各班次对应的时窗为 $[P_{E,1}, P_{L,1}]$, $[P_{E,2}, P_{L,2}] \cdots$, 车辆无晚到惩罚,但当乘客等待换乘的时间超过心理预期时,将产生惩罚成本。因此,也要尽可能地减少乘客在换乘站的等待时间。

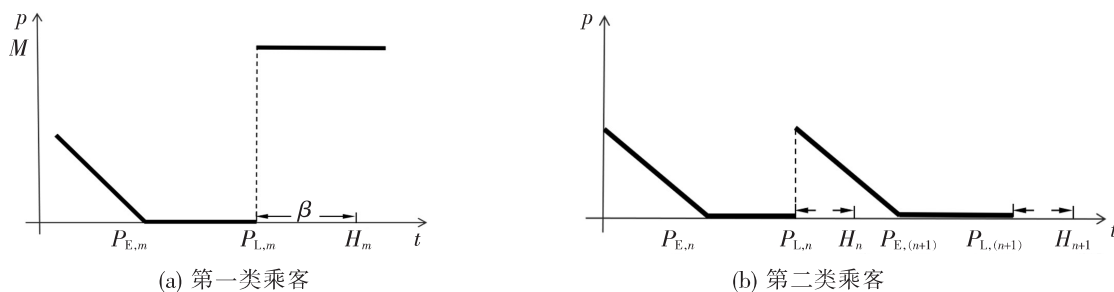


图 1 乘客的换乘时间要求

Fig. 1 Requirements of passengers' transfer time

1.4 模型构建

以 RFT 系统总效用最大为目标,以车容量、乘客时间窗、车辆单程最大行程时间等为约束,构建同时接送模式下车辆路径与发车间隔的协调优

化模型。其中,车辆路径根据所搭乘的乘客确定^[13]。对于预约离开换乘站的乘客(送的乘客),仅考虑乘客到达目的地的时间窗,且对早到乘客不给予早到惩罚,故对离开换乘站乘客的惩罚仅

有晚到惩罚;对于前往换乘站的乘客(接的乘客),既要考虑乘客上车时间窗,也要考虑乘客的换乘时间需求。协调优化模型可表示为:

$$\max f = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 \quad (1)$$

$$f_1 = \sum_r \sum_k |N_{rk}| C - \sum_r \sum_k (G_r x_{rk} + \sum_i \sum_j C_r L_{ij} x_{rkij}) + \sum_r \sum_k \sum_i W_{rk} \cdot \max(T_{E,i} - t_{rki}, 0) \quad (2)$$

$$f_2 = - \sum_i \sum_r \sum_k [P_E(t_i) (D_{rk} + x_{rki} \theta_{rki}) + P_L(t_i) x_{rki}] - \sum_i \sum_r \sum_k P_E(p_i) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & [0, \quad T_{E,i} \leq t_{rki} \leq T_{L,i} \\ P_E(t_i) &= \begin{cases} k_1 (T_{E,i} - t_{rki}), & t_{rki} < T_{E,i} \text{ 且 } \theta_{rki} = 1 \\ 0, & t_{rki} < T_{E,i} \text{ 且 } \theta_{rki} = -1 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

$$P_L(t_i) = \begin{cases} 0, & T_{E,i} \leq t_{rki} \leq T_{L,i} \\ k_2 (t_{rki} - T_{L,i}), & t_{rki} > T_{L,i} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & P_E(p_i) = \\ & [0, \quad P_{E,i} \leq h_{rk} \leq P_{L,i} \\ & \{k_3 (P_{E,n} - h_{rk}), \quad h_{rk} < P_{E,n} \text{ 且 } \theta_{rki} = 1, \mu_{rki} = 2 \\ & \{k_3 (P_{E,m} - h_{rk}), \quad h_{rk} < P_{E,m} \text{ 且 } \theta_{rki} = 1, \mu_{rki} = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{E,m} = h_m - \beta - \Delta t \\ P_{L,m} = h_m - \beta \\ P_{E,n} = h_n - \beta - \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & [P_{L,n} = h_n - \beta \\ \text{s. t. } & D_{rk} + x_{rki} \cdot \theta_{rki} \leq Q_r \end{aligned} \quad (8)$$

$$0 \leq D_{rk} \leq Q_r \quad (9)$$

$$\sum_k x_{rk} \leq M_r \quad (10)$$

$$N_{rk} \cap N_{r'k'} = \emptyset, \forall k \neq k' \text{ 且 } \forall p \neq p' \quad (11)$$

$$\sum_i \sum_j t_{ij} x_{rkij} + \sum_i \max(T_{E,i} - t_{rki}, 0) \leq T_{\max}, i, j \in N_{rk} \quad (12)$$

$$\sum_j x_{rk0j} = \sum_i x_{rk0i} = 1, i, j \in U \quad (13)$$

$$T_{D,i} < T_{rk}, i \in O \quad (14)$$

$$\sum_r \sum_k x_{rki} = 1, i, j \in U \quad (15)$$

$$h_{rk} \leq h_m - \beta = P_{L,m}, \exists \mu_{rki} \in I, \mu_{rki} = 1 \quad (16)$$

式中: f_1, f_2 分别为运营商效用与乘客效用; α_1, α_2 均为权值; N_{rk} 为车辆 r 的第 k 班次车上乘客的集合; $|N_{rk}|$ 为集合 N_{rk} 的元素数量; C 为乘客票价; G_r 为车辆启用成本; C_r 为车辆的单位里程行驶成本; L_{ij} 为需求点 i 到 j 的最短路距离; W_{rk} 为等待时间费用系数; T_{rk} 为车辆 r 的第 k 班次车的发车时间; t_{rki} 为车辆 r 的第 k 班次车到达需求点 i 的时间; Q_r 为车辆的最大载客数; t_{ij} 为从需求点 i 到 j 的最短路时间; $T_{\max}$ 为车辆单班次接驳的最大行程时间; I 为预约前往换乘站的全部乘客的集合; O 为预约离开换乘站的全部乘客的集合; U 为全部乘客的集合; $T_{E,i}, T_{L,i}$ 为需求点(乘客) i 预约乘车时间窗的上下界限; D_{rk} 为车辆 r 的第 k 班次车离开换乘站时车内乘客的数量; $T_{D,i}$ 为乘客 i 从换乘站离开的预约时间; h_{rk} 为车辆 r 的第 k 班次车到达换乘站的时间; $P_{E,i}, P_{L,i}$ 为乘客 i 期望接驳公交到达换乘站时间窗的上下限, 其中第一类乘客的时间窗为 $(P_{E,m}, P_{L,m})$, 第二类乘客的时间窗为 $(P_{E,n}, P_{L,n})$, 时间窗为多段区间, n 为换乘的班次; k_1, k_2, k_3 分别为车辆早到需求点、晚到需求点、早到换乘站的惩罚系数; h_m 为第一类乘客换乘干线公交班次 m 的期望发车时刻; h_n 为第二类乘客换乘干线公交班次 n 的发车时刻; Δt 为乘客在换乘站可容忍的等待时间; x_{rk} 为 0-1 变量, 若车辆 r 发出第 k 班次车, 则为 1, 否则为 0; x_{rkij} 为 0-1 变量, 若车辆 r 的第 k 班次车从需求点 i 到 j , 则为 1, 否则为 0; x_{rki} 为 0-1 变量, 若车辆 r 的第 k 班次车经过需求点 i , 则为 1, 否则为 0; $\mu_{rk} = 1$ 或 2, 若乘坐车辆 r 的第 k 班次车的乘客为第一类乘客, 则为 1, 若为第二类乘客, 则为 2; $\theta_{rk} = 1$ 或 -1 , 若乘客乘坐车辆 r 的第 k 班次车前往换乘站, 则为 1, 若乘客乘坐车辆 r 的第 k 班次车离开换乘站, 则为 -1 。

式(2)中的各项分别表示票价收入、车辆启用成本、车辆行驶成本、车辆在需求点停靠产生的等待成本。式(3)中的各项分别表示车辆早到车上乘客等待所产生的时间效用、车辆晚点候车乘客等待所产生的时间效用及换乘站换乘所产生的时间效用, 其中车辆早到需求点 i 、晚到需求点 i 、早到换乘站的惩罚函数 $P_E(t_i), P_L(t_i), P_E(p_i)$ 分

别由式(4)~(6)表示。乘客期望接驳公交到达换乘站的时间窗由式(7)表示。式(8)~(9)分别表示车辆离开换乘站时车上的乘客数、运行途中车上的乘客数均不能大于车辆的最大载客容量。式(10)为系统车辆数量的约束,即派出车辆数要少于车辆总数。式(11)表示同一批次的每位乘客只能由一辆车服务。式(12)表示预估行程时间不能超过车辆单程最大运行时间。式(13)表示车辆从换乘站出发最终回到换乘站。式(14)表示发车时间晚于乘坐该辆车的乘客离开换乘站的预约时间。式(15)表示所有预约乘客都要被服务。式(16)为车辆到达换乘站的时间约束,若车辆中乘坐着预约前往换乘站的乘客,车辆到达换乘站的时间要早于乘客期望的发车时刻,同时要给乘客留有一定的在换乘站换乘的时间,即不能晚于乘客预约的换乘时间窗的下限。

2 模型求解

上述优化问题是典型的车辆路径问题,而遗传算法能较好地求解这种问题。本研究参考文献[11],采用双遗传算法对所建立的模型进行求解,算法流程如图 2 所示(图中 g_{en} 表示当前代数)。

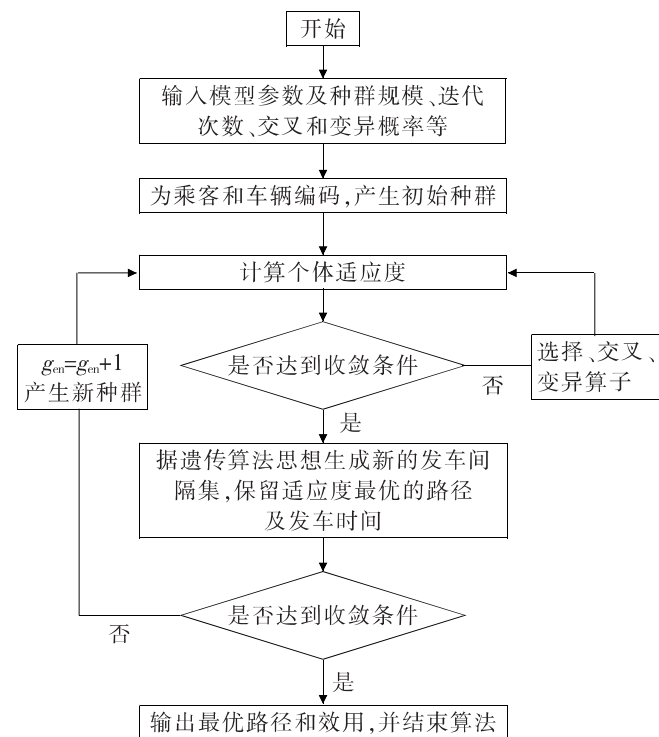


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

在输出预设的参数及初始发车间隔后,随机生成初始种群(即初始车辆路径),根据初始发车间隔及车辆路径计算个体适应度值,并通过遗传算法的选择、交叉、变异操作,优化车辆路径,然后基于遗传算法思想调整发车时间并继续优化路径,如此反复,使种群不断得到进化,直至获得满意解。在优化车辆路径时,采用多链编码结构,设预约乘客共 n 人,换乘站车辆总数为 m 辆,对预约乘客按 $1 \sim n$ 、对车辆按 $(n+1) \sim (n+m)$ 进行编码。一个染色体中有 m 条链,每个染色体链中含有车辆与乘客两种基因。车辆基因包含车辆载客容量、车辆启用成本以及单位里程行驶成本等车辆特征信息;乘客基因包含乘客编号、预约出行需求点、乘客上车时间窗及有硬性换乘时间的乘客类型等乘客特征信息。如在服务范围内有 9 名预约乘客,两辆接驳车,其中换乘站点编号为 0,乘客的编码为 $1 \sim 9$,车辆的编码为 10 和 11,则多链染色体的编码可表示为:10—5—1—7—4—8,11—6—3—2—9,路径 1:0→5→1→7→4→8→0,在该路径上车辆 10 依次服务这 5 名乘客;路径 2:0→6→3→2→9→0,在该路径上车辆 11 依次服务这 4 名乘客。本研究建立的 RFT 优化模型是以系统效用最大为目标,效用值越大,个体适应度值也越大,故本研究直接采用适应度函数 F_i 作为目标函数。采用轮盘赌法对个体进行选择,个体被选择的概率为 $Q_i = F_i / \sum F_i$ 。在交叉过程中,为使优良个体得以保留,结合选择规则,多链染色体的交叉按文献[13]中的形式进行个体间的交叉与个体内的交叉;在变异操作中,设定变异概率 q ,对于选中的基因在区间 $(0,1)$ 中随机生成一个数 r ,若 $r < q$,则判定变异,此时随机产生两个不高于染色体链长度的自然数 x, y ,交换第 x 位与第 y 位的基因位置进行变异操作。

3 实例分析

选取长沙地铁 1 号线尚双塘地铁站的周边区域为研究对象,根据该区域内的土地利用形态及周边乘客的出行分布情况,在服务区域内设置 1 个换乘站、16 个需求点,服务区域内共有 65 名乘

客,服务区域如图 3 所示。需求点坐标、乘客分布见表 1~2。

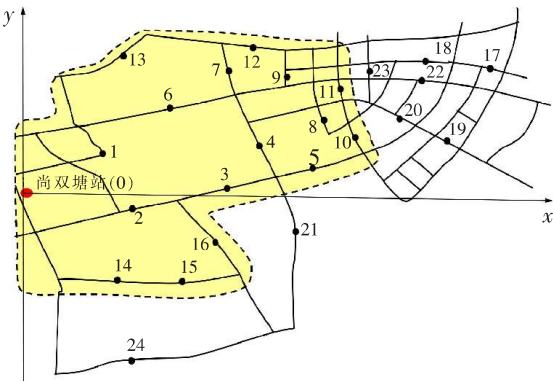


图 3 服务区域

Fig. 3 Service area

表 1 需求点坐标

Table 1 Coordinates of demand points

需求点	<i>x</i>	<i>y</i>	需求点	<i>x</i>	<i>y</i>
0	0.00	0.00	9	2.77	1.68
1	0.84	0.53	10	3.20	0.96
2	1.07	−0.26	11	3.03	1.43
3	1.93	0.02	12	1.60	2.09
4	2.28	0.73	13	0.97	1.82
5	2.77	0.28	14	0.98	−1.23
6	1.48	1.21	15	1.82	−1.22
7	2.04	1.62	16	1.83	−0.59
8	2.85	0.96			

表 2 乘客需求分布表

Table 2 Passenger demand distribution

乘客	乘客类型	换乘时间要求	所属站点	$T_{E,i}$	$T_{L,i}$	$P_{E,m}$	$P_{L,m}$	$T_{D,i}$
1	1	1	1	7:08	7:13	7:24	7:27	—
2	1	2	1	7:15	7:20	—	—	—
3	1	2	1	7:37	7:42	—	—	—
4	—1	—	1	7:42	7:47	—	—	7:33
5	1	1	2	7:06	7:11	7:30	7:33	—
6	1	2	2	7:18	7:23	—	—	—
7	1	2	2	7:40	7:45	—	—	—
8	1	2	2	7:51	7:56	—	—	—
9	1	1	3	7:08	7:13	7:30	7:33	—
10	1	1	3	7:12	7:17	7:24	7:27	—
11	1	2	3	7:22	7:27	—	—	—
12	1	2	4	7:17	7:22	—	—	—
13	1	1	4	7:36	7:41	7:54	7:57	—
14	1	2	4	7:44	7:49	—	—	—
15	—1	—	4	7:19	7:24	—	—	7:03
16	1	2	5	7:12	7:17	—	—	—
17	1	2	5	7:15	7:20	—	—	—
18	1	1	5	7:19	7:24	7:30	7:33	—
19	1	2	5	7:23	7:28	—	—	—
20	—1	—	5	7:49	7:54	—	—	7:39
21	1	1	6	7:04	7:09	7:24	7:27	—
22	1	1	6	7:16	7:21	7:36	7:39	—
23	1	2	6	7:28	7:33	—	—	—
24	1	1	6	7:32	7:37	7:54	7:57	—
25	1	2	6	7:38	7:43	—	—	—
26	—1	—	6	7:40	7:45	—	—	7:33
27	1	2	7	7:14	7:19	—	—	—
28	1	2	7	7:24	7:29	—	—	—
29	1	1	7	7:46	7:51	8:00	8:03	—
30	—1	—	7	7:39	7:44	—	—	7:27

表 2(续)

乘客	乘客类型	换乘时间要求	所属站点	$T_{E,i}$	$T_{L,i}$	$P_{E,m}$	$P_{L,m}$	$T_{D,i}$
31	1	2	8	7:11	7:16	—	—	—
32	1	2	8	7:21	7:26	—	—	—
33	1	1	8	7:47	7:52	8:00	8:03	—
34	1	2	9	7:31	7:36	—	—	—
35	—1	—	9	7:24	7:29	—	—	7:09
36	1	2	10	7:12	7:17	—	—	—
37	1	1	10	7:19	7:24	7:36	7:39	—
38	1	2	10	7:38	7:43	—	—	—
39	1	2	10	7:40	7:45	—	—	—
40	—1	—	10	7:13	7:18	—	—	7:03
41	1	1	11	7:10	7:15	7:30	7:33	—
42	1	2	11	7:16	7:21	—	—	—
43	—1	—	11	7:15	7:20	—	—	7:03
44	—1	—	11	7:51	7:56	—	—	7:39
45	1	1	12	7:20	7:25	7:42	7:45	—
46	1	2	12	7:52	7:57	—	—	—
47	—1	—	12	7:31	7:36	—	—	7:15
48	1	2	13	7:16	7:21	—	—	—
49	1	2	13	7:31	7:36	—	—	—
50	1	2	13	7:38	7:43	—	—	—
51	1	2	13	7:42	7:47	—	—	—
52	—1	—	13	7:51	7:56	—	—	7:39
53	1	2	14	7:14	7:19	—	—	—
54	1	2	14	7:25	7:30	—	—	—
55	1	1	14	7:40	7:45	7:54	7:57	—
56	1	2	14	7:45	7:50	—	—	—
57	—1	—	14	7:45	7:50	—	—	7:27
58	1	1	15	7:39	7:44	7:54	7:57	—
59	1	1	15	7:42	7:47	8:00	8:03	—
60	—1	—	15	7:26	7:31	—	—	7:15
61	1	1	16	7:16	7:21	7:30	7:33	—
62	1	2	16	7:35	7:40	—	—	—
63	1	2	16	7:39	7:44	—	—	—
64	—1	—	16	7:39	7:44	—	—	7:27
65	—1	—	16	7:47	7:52	—	—	7:39

接驳时间设在早高峰 7:00 至 8:30,地铁发车间隔为 6 min,设定发车时间为(7:00,7:06,7:12…)。共有 6 辆接驳车,每辆车的容量为 10 人,车速为 30 km/h。车辆启用成本 $G_r=8$ 元/次、行驶成本 $C_r=0.8$ 元/km,车辆在站点的等待费用系数 $W_{rk}=0.5$ 元/min。车内等待时间价值(车辆早到需求点的惩罚系数) $k_1=0.2$ 元/min,乘客候车时间价值(车辆晚到需求点的惩罚系数) $k_2=0.3$ 元/min,换乘站等待时间价值(车辆早到换乘站的惩罚系数) $k_3=0.15$ 元/min。票价为 4 元,

$\alpha_1=0.6, \alpha_2=0.4, T_{\max}=30, \beta=3 \text{ min}$ 。在遗传算法中,种群规模为 100,最大迭代次数为 1 200,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.05。

3.1 同时接送与单接单送模式的比较

在同时接送模式下协调优化模型的基础上,限定接送方式为单接单送即可进行单接单送模式的协调优化。本研究利用 MATLAB 编程求解得

到同时接送模式、单接单送模式下 RFT 运行路径与发车间隔的优化结果,如表 3~4 所示。由表 3~4 可知,与单接单送模式相比,在同时接送模式下,发车次数减少 1 次,车辆保有量减少 1 辆,座位平均利用率提高了 9.03%,总运行时间减少了 9 min,人均乘车里程降低了 4%,系统总效用增加了 17.1%,说明同时接送模式具有显著的优越性。

表 3 同时接送模式下 RFT 运行路径与发车间隔的优化结果
Table 3 Optimization results of operation paths and departure intervals of RFT under simultaneous pickup and delivery mode

发车时间	车号	车辆运行路径	里程/km	累计载客人数	座位利用率/%	结束时间
7:05	r_1	0-5-9-16-31-40-41-15-27-22-2-54-0	11.32	11	110	7:30
7:06	r_2	0-1-21-36-43-17-10-0	8.15	6	60	7:22
7:14	r_3	0-53-61-18-37-42-35-28-48	9.45	8	80	7:33
7:16	r_4	0-6-60-12-11-19-32-34-45-47-23-49-0	12.38	11	110	7:41
7:31	r_2	0-24-13-30-38-64-57-8-0	10.29	7	70	7:54
7:35	r_1	0-4-50-26-58-62-55-0	8.80	6	60	7:52
7:39	r_3	0-59-63-20-33-39-44-46-29-0	10.44	8	80	8:01
7:40	r_5	0-3-25-51-52-14-65-7-56-0	10.59	8	80	8:01

表 4 单接单送模式下 RFT 运行路径与发车间隔的优化结果
Table 4 Optimization results of operation paths and departure intervals of RFT under single pickup and single delivery mode

发车时间	车号	车辆运行路径	里程/km	累计载客人数	座位利用率/%	结束时间
7:15(送)	r_5	0-15-40-43-35-47-60-0	10.95	6	60	7:36
7:39(送)	r_6	0-4-26-52-30-44-20-64-65-57-0	9.91	9	90	7:59
7:05(接)	r_1	0-5-1-21-31-36-10-53-0	9.31	7	70	7:23
7:11(接)	r_2	0-9-12-41-18-16-17-61-6-2-0	8.85	9	90	7:29
7:15(接)	r_3	0-48-22-27-42-32-37-11-0	8.92	7	70	7:33
7:24(接)	r_4	0-23-28-45-19-54-0	9.31	5	50	7:43
7:27(接)	r_1	0-49-24-34-63-58-59-55-8-0	10.23	8	80	7:53
7:35(接)	r_2	0-3-50-25-13-39-38-62-7-0	8.71	8	80	7:53
7:41(接)	r_3	0-56-14-33-29-46-51-0	8.96	6	60	8:00

3.2 有无换乘时间需求的比较

在同时接送模式下,进行有无换乘时间需求的比较试验,结果如表 5 所示。由表 5 可知,因存在换乘时间需求,车辆运行将受到更严格的到达时间窗的约束,所以发车次数增加了 1 次,系统总效用降低了 9.42%。但因考虑了换乘时间需求,乘客对城市公共交通系统的整体满意度有所提高。

表 5 有无换乘时间需求的 RFT 协调优化结果
Table 5 Coordination and optimization results of RFT with or without transfer time requirement

有无换乘 时间需求	发车 次数	车辆数	座位平均 利用率/%	总运行时 间/min	系统 总效用
有	8	5	81.25	168	62.52
无	7	5	92.86	165	68.41

3.3 车容量灵敏度试验

为确定适合 RFT 系统保有的车辆类型,对大(25 座)、中(15 座)、小(10 座)3 种不同车型同时接送模式下 RFT 的运行路径与调度进行协调优化,结果如表 6 所示。由表 6 可知,随着车容量的增大,座位平均利用率有所减小,系统总效用有所降低。可见,中小型接驳车比较适合 RFT 系统。

表 6 车辆容量影响的比较

Table 6 Comparison of vehicle capacity effects

车容量	车辆启用 成本/(元· 次 ⁻¹)	车辆行驶 成本/(元· km ⁻¹)	发车 次数	座位平 均利用 率/%	系统 总效用
10(基准)	8	0.8	8	81.25	62.52
15	12	1.0	7	61.90	47.34
25	18	1.5	7	37.14	6.34

4 结论

本研究以同时接送模式下 RFT 系统为对象,通过对乘客换乘时间需求的刻画,以乘客与运营商的系统效用加权之和最大为目标,以乘客与车辆时间窗、车辆容量等为约束,构建了考虑乘客换乘时间需求的运行路径与调度的协调优化模型,并进行了案例分析。主要结论如下:

1) 与单接单送模式相比,同时接送模式具有明显的优越性。在参数相同的情况下,与单接单送模式相比,同时接送模式能有效提升车辆载客率(提升了 9.03%)以及系统总效用(提升了 17.1%),且在车辆配置数、发车次数、系统总运行时间以及乘客人均里程方面,均存在优越性。

2) 乘客的换乘时间需求会降低系统总效用,但有助于提升公交系统的整体满意度。与不考虑换乘时间需求相比,考虑换乘时间需求时系统总效用降低了 9.42%,但考虑换乘时间需求能提高乘客的换乘效率,进而有利于提升乘客对城市公交系统的整体满意度。因此,降低的系统效用是可接受的。

3) 在低密度需求区域,随着车容量的增大,座位平均利用率有所减小,系统总效用有所降低。因此,中小型车比较适合 RFT 系统。

有换乘时间需求的同时接送模式 RFT 的优

化设计仅考虑了单一换乘站的同步换乘模式,采用固定票价且未考虑时变动态路网。因此,进一步的研究将考虑多换乘站、不同票制动态路网下 RFT 的协调优化。

〔参考文献〕

- [1] JAEYOUNG J, JAYAKRISHNAN R, NAM D. High coverage point-point transit: hybrid evolutionary approach to local vehicle routing[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(6): 1 882-1 891.
- [2] QIU F, LI W Q, HAGHANI A. An exploration of the demand limit for flex-route as feeder transit services: a case study in Salt Lake City[J]. Public Transportation, 2015, 7: 259-276.
- [3] NOURBAKHSH S M, OUYANG Y. A structured flexible transit system for low demand areas[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(1): 204-216.
- [4] 奴尔加马力·安尼瓦, 王令飞, 艾力·斯木吐拉. 乌鲁木齐市居民定制公交出行意愿及影响因素研究[J]. 公路与汽运, 2019(3): 20-23.
ANIVA Nugamali, WANG Ling-fei, SMTURA Eli. Study on the willingness and influencing factors of Urumqi residents' customized bus trips[J]. Highways & Automotive Applications, 2019(3): 20-23.
- [5] NÚÑEZ A, CORTÉS C E, SÁEZ D, et al. Multi-objective model predictive control for dynamic pickup and delivery problems[J]. Control Engineering Practice, 2014, 32: 73-86.
- [6] PAN S L, YU J, YANG X F, et al. Designing a flexible feeder transit system serving irregularly shaped and gated communities: determining service area and feeder route planning[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2015, 141(3): 1-24.
- [7] SUN B, WEI M, YANG C, et al. Personalised and coordinated demand-responsive feeder transit service design: a genetic algorithms approach[J]. Future Internet, 2018, 10(7): 61-74.
- [8] 靳文舟, 郭献超, 龚隽. 基于精英选择遗传算法的需求响应公交规划[J]. 公路工程, 2020, 45(2): 44-49.
JIN Wen-zhou, GUO Xian-chao, GONG Jun. Based on elitist selection genetic algorithm for demand responsive transit planning[J]. Highway Engineering, 2020, 45(2): 44-49.

- [9] 高煦明. 固定站点需求响应式接驳公交调度模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2015: 27-49.
GAO Xu-ming. Research on dispatching system of demand-responsive connector with on-demand stations[D]. Nanjing: Southeast University, 2015: 27-49.
- [10] 芒烈. 面向轨道交通站点的需求响应型接驳公交系统调度方法[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 22-37.
MANG Lie. Scheduling method of railway transit station oriented demand responsive connector system[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 22-37.
- [11] 孙博, 杨春风, 魏明, 等. 考虑乘客个性化出行的需求响应型接驳公交调度模型[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(1): 122-126.
SUN Bo, YANG Chun-feng, WEI Ming, et al. A demand-responsive feeder bus scheduling model for personalized travel[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 44(1): 122-126.
- [12] 王正武, 易童翔, 高志波. 响应型接驳公交运行路径与车辆调度的协调优化[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(1): 68-73.
WANG Zheng-wu, YI Tong-xiang, GAO Zhi-bo. Coordinated optimization of running route and vehicle scheduling for responsive feeder transit[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(1): 68-73.
- [13] 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 Zheng-wu, CHEN Tao, SONG Ming-qun. 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.
- [14] 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): 164-174.
WANG Zheng-wu, SONG Ming-qun. 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.
- [15] 王正武, 袁媛, 高志波. 高自由度响应公交分区路径与调度的协调优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(1): 41-48.
WANG Zheng-wu, YUAN Yuan, GAO Zhi-bo. Coordination optimization for partition path and scheduling with high degree of freedom demand response transit[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 15(1): 41-48.
- [16] 王正武, 向健, 喻杰. 响应型接驳公交系统基于关键点的动态路径优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 51-61.
WANG Zheng-wu, XIANG Jian, YU Jie. Dynamic route optimization based on key points for responsive feeder transit system[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2020, 17(3): 51-61.
- [17] KIRCHLER D, CALVO R W. A granular tabu search algorithm for the dial-a-ride problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 56(10): 120-135.
- [18] SCHILDE M, DOERNER K F, HARTL R F. Integrating stochastic time-dependent travel speed in solution methods for the dynamic dial-a-ride problem[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 238(1): 18-30.