

文章编号:1671-1637(2019)05-0139-11

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

王正武,陈 涛,宋名群

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:研究了同时接送模式下响应型接驳公交运行路径与车辆调度的协调优化问题,考虑乘客出行时间窗的个性化,构建了基于乘客而不是基于途经需求点的车辆路径表示方法;综合车辆发车和行驶成本、车辆早到和晚到的惩罚成本、票价收入构建了表征系统效益的目标函数,并以车辆容量、乘客时间窗、车辆运行时间、车辆保有量、发车时间等为约束,构建了发车间隔、发出车型与车辆路径的一体化优化模型;针对一体化优化模型的特点,设计了双遗传算法,其中染色体为多链编码结构,染色体交叉方式包含个体内、个体间交叉2种方式;为了验证同时接送模式的优越性、一体化优化模型及算法的有效性,进行了算例分析,对比了同时接送模式与单独接和单独送模式的计算结果,分析了车辆运行车速、单程运行时间限制、车型比例对响应型接驳公交运营效率的影响。计算结果表明:在给定的相同乘客需求下,与单独送和单独接模式相比,同时接送模式发车次数减少了1次,所需车辆数减少了2辆,平均座位利用率提高了8.3%,运送单位乘客的平均车辆行驶距离降低了11.0%,运行成本降低了15.9%,因此,同时接送模式有效地提高了运营效率;同时接送模式下,运行车速、单程运行时间限制、小型车比例分别在基准值附近上下波动15.0%、15.0%、12.5%时,发车次数、座位平均利用率、目标函数值的最大变化率分别达到了20.0%、15.7%、27.1%,这些参数对系统运营效率均有显著影响。

关键词:交通管理;协调优化;响应型接驳公交;同时接送;多车型;车辆调度

中图分类号:U492.43

文献标志码:A

Coordinated optimization of operation routes and schedules for responsive feeder transit under simultaneous pick-up and delivery mode

WANG Zheng-wu, CHEN Tao, SONG Ming-qun

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology,
Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: The coordinated optimization problem of operation routes and vehicle schedules for responsive feeder transit under the simultaneous pick-up and delivery mode was studied. The vehicle route representation method based on passengers rather than demand points was devised by considering the personalization of passenger travel time window. The objective function that represents system benefit was constructed by combining the costs of vehicle departure and travel, penalty costs of vehicle early and late arrival, and ticket fares. The vehicle capacity, passenger time window, vehicle running time, vehicle holding quantity and departure time were all taken as constraints, and the integrated optimization model of departure interval, vehicle type and running

收稿日期:2019-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51678075);湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2171)

作者简介:王正武(1973-),男,湖南长沙人,长沙理工大学教授,工学博士,从事公共交通运营与管理研究。

route was constructed. The double genetic algorithm was designed to solve the integrated optimization model. In this algorithm, the chromosome was coded by multi-chain coding structure, and the chromosome chiasma included two ways of inter-individual and intra-individual. In order to validate the superiority of the simultaneous pick-up and delivery mode, and the effectiveness of the integrated optimization model and the algorithm, several examples were designed to compare the calculation results of the simultaneous pick-up and delivery mode and the separate pick-up and deliver mode. The effects of vehicle speed, single trip running time limit and vehicle composition on the operation efficiency of responsive feeder transit were analyzed. Calculation result shows that under the same passenger demand, compared with the separate pick-up and deliver mode, under the simultaneous pick-up and delivery mode, the departure times reduce by 1, the number of required vehicles reduce by 2, the average seat utilization rate increases by 8.3%, the average vehicle distance required to transport unit passenger reduces by 11.0%, and the operation cost reduces by 15.9%. Therefore, the simultaneous pick-up and delivery mode can effectively improve the operation efficiency. At the same time, under the simultaneous pick-up and delivery mode, when vehicle speed, single trip running time limit, and small vehicle ratio fluctuate by 15.0%, 15.0%, and 12.5% near the reference values, respectively, the maximum change rate of the departure times, the average seat utilization rate, and the objective value reach 20.0%, 15.7%, and 27.1%, respectively, therefore, these parameters have a significant impact on the system operating efficiency. 9 tabs, 5 figs, 32 refs.

Key words: traffic management; coordinated optimization; response feeder transit; simultaneous pick-up and delivery; multi-type vehicle; vehicle scheduling

Author resume: WANG Zheng-wu(1973-), male, professor, PhD, zhengwu.wang@csust.edu.cn.

0 引 言

响应型接驳公交(Responsive Feeder Transit, RFT)是根据乘客约定为换乘站乘客接送服务的一种公交运营方式,是解决公交出行最后一公里难题的有效解决措施。目前,RFT系统是需求响应公交的研究热点之一,国内外学者在系统构成和服务性能评价、服务范围、运行路线和调度优化等方面进行了大量研究,并取得了较多的研究成果。

在系统构成和服务性能评价方面,潘述亮等分析了RFT的研究现状和系统构成^[1];Chandra等基于连通性指数进行了RFT服务性能的评价^[2];Li等探讨了RFT与常规接驳公交2种运营模式的选择和转换问题^[3-5];Edwards等比较了常规定线公交和RFT系统的服务性能^[6]。

在服务范围方面,Li等综合考虑了RFT的服务质量和运营成本,确定了特定规模住宅区的分区数量^[7];苗一迪分析了影响柔性路线公交服务范围的关键因素,基于效用理论提出了可行服务区域的决策模型^[8];芒烈引入经济学“集聚效应”理论确定了RFT的服务范围^[9];Pan等以不规则的封闭区域

为研究对象,构建了混合整数线性规划模型来优化柔性公交的服务区域和运行线路^[10]。

在运行路线和调度优化方面,范文豪构建了有时间窗的、多站点联合调度的、接驳公交的路径优化模型^[11];熊杰等对社区公交巴士与地铁的接驳问题进行了研究,构建了以路径需求潜力值最大化为目标,以路径旅行时间及圈点线路为约束条件的路径优化模型^[12];Yu等根据实时需求信息研究了接驳车辆的循环线路问题,以乘客和运营方总成本最小构建了双层非线性混合整数规划模型^[13];Dessouky等在响应公交运行线路优化中考虑了环境的影响^[14];Nourbakhsh等对低密度需求矩形区域内柔性公交的发车间隔、线路设置进行了研究^[15];Núñez等考虑了乘客满意度,基于预测控制构建了电话公交(Dial-a-Ride, DAR)车辆动态路径优化模型^[16];Kirchler等将粒子群禁忌搜索算法用于DAR车辆路径的优化中^[17];Schilde等对动态车速及随机因素影响下的DAR路径问题进行了研究,提出了一种元启发式算法进行求解^[18];潘述亮等构建了双层规划模型来同时优化RFT的服务区域和车辆路径^[19];Sheu提出了一种能快速响应乘

客需求的模糊聚类调度模型^[20];邱丰等分别设计了可同时处理静态和动态需求的响应公交调度模型^[21-22];赵伟忠设计了响应公交两阶段调度模型来处理随机用户需求问题^[23];陈坚等考虑常规公交与柔性路线公交结合,提出了二者结合的动态调度模型^[24];Ghannadpour等提出了一个含模糊时间窗的多目标实时动态车辆路径问题,并基于遗传算法进行了求解^[25];易星根据居民出行的多样性提出了一种基于动态分配的调度模型^[26];张鹏浩研究了高铁站周边灵活型公交的调度问题,考虑乘客结伴出行的情况,以乘客满意度最大和运营成本最小为目标构建了接驳公交调度模型^[27];王正武等考虑了RFT运行路径与车辆调度的协调问题,对乘客空间分布不均匀下的周期优化问题及大区域内的分区优化问题进行了研究^[28-30];Deng等面向轨道换乘站构建了以接驳公交候车成本、乘客在轨道站点候车总成本最小的路径与调度协调优化模型,并基于遗传算法设计了求解算法^[31]。

到目前为止,有关RFT的相关研究在服务范围确定、服务性能评价、运行路线优化、车辆调度等方面取得了较多成果,但仍存在以下问题:一般假设系统只存在单辆公交或单一类型公交,很少考虑同时拥有多种车型的情况;认为车辆运行模式单一,发出的车辆只接乘客到换乘站或者只送乘客到需求点,没有考虑接、送同时进行的运行模式,实际上,接、送同时进行能提高车辆满载率,降低系统运行成本等;假设同一需求点的乘客具有相同的时间窗,从而忽略了乘客出行时间窗的个性特征;主要是优化车辆的运行路径或发出时间,很少考虑车辆路径、发车时间与发出车型的协调优化。

本文针对现有研究的不足,以接、送能同时进行的RFT为研究对象,考虑乘客时间窗的个性化特性,研究了基于乘客的车辆路径表示方法;考虑车场保有多种车型的实际,研究了车辆路径、发车时间与发出车型的一体化优化方法,从而有效提高RFT系统的运行效率,为RFT系统的推广应用提供有力的技术支持。

1 同时接送模式下RFT系统的一体化优化模型

1.1 问题描述

设大运量公交换乘站有 M 辆接驳公交车,车辆类型有 P 类,其中车型 p 的数量为 M_p ;特定时间段内在服务范围同时存在 m 个乘客预约前往换

乘站、 n 个乘客预约从换乘站离开。那么,同时接送模式RFT系统车辆路径与调度的协调优化问题可描述为:根据 $m+n$ 个乘客的预约需求安排1列车队完成接送任务,在满足乘客出行时间窗、车辆载客量等约束下,通过车队所有班次车辆出发时间、发出车型、运行路线的协调,使系统总效益最大。而且,各班次车辆运行轨迹均为闭合回路,车辆只能从换乘站发出,完成分配的接、送任务后回到换乘站;各班次车辆可以只接乘客,或只送乘客,也可以接、送同时进行。该模式适用于地铁、轻轨、快速公交等大容量公交换乘站乘客的接驳,响应型接驳公交在把从大容量公交换乘站下车的乘客送到各自目的地的同时也把需乘坐大容量公交的乘客接到目标换乘站。

1.2 基于乘客的车辆路径表示

目前,车辆路径一般均由车辆途经需求点(乘客上车或下车的地点)确定,当需求点有多个乘客时,要么认定该站点所有乘客的时间窗相同,这样忽视了乘客时间窗的个性特征;要么需增加虚拟需求点用以区分时间窗要求,路径间重叠的需求点多,路径不容易区分。本文根据乘客确定车辆路径,若某班次的乘客确定了,因这些乘客的需求点位置已确定,可根据乘客需求点的位置关系确定最短路,即车辆路径。这样的路径表示方法既可充分体现乘客时间窗的个性需求,也因每个乘客只能接送一次,路径间无重叠,路径易区分。图1为以途经需求点或虚拟需求点表示的车辆路径,图1(a)要求同一需求点所有乘客的时间窗相同,图1(b)通过增加虚拟节点来考虑同一需求点不同乘客具有的不同时间窗;图2为以乘客表示的车辆路径,路径间无重叠且比较简单。

1.3 模型假设

根据研究问题的特点,结合现状研究中的相关规定,在建模时做如下假设。

- (1)所有班次车辆在路段上的运行车速相同。
- (2)只考虑预约乘客,服务范围内所有的预约需求均被响应,预约乘客即使车辆晚到也不会取消预约。
- (3)忽略乘客上、下公交车花费的时间。
- (4)预约前往换乘站的乘客在上车点有时间窗要求,在下车点无时间窗要求;而离开换乘站的乘客上车时无时间窗要求,在下车点有时间窗要求。
- (5)只考虑换乘站与需求点之间的出行需求,不

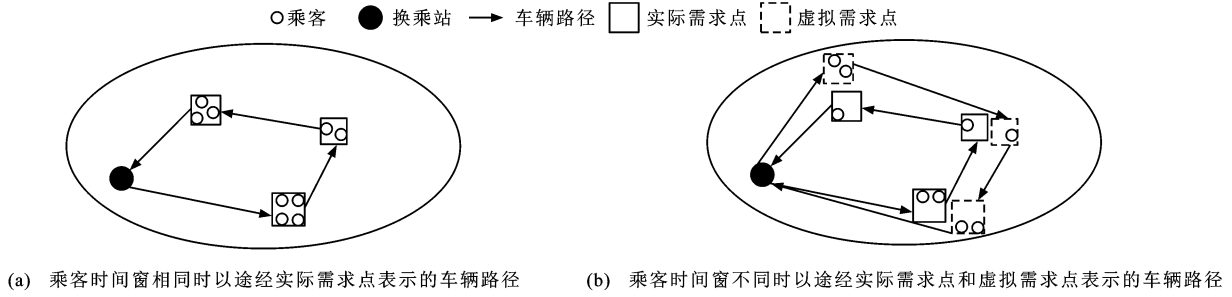


图 1 以途经需求点表示的车辆路径

Fig. 1 Vehicle routes represented by passing requirement points

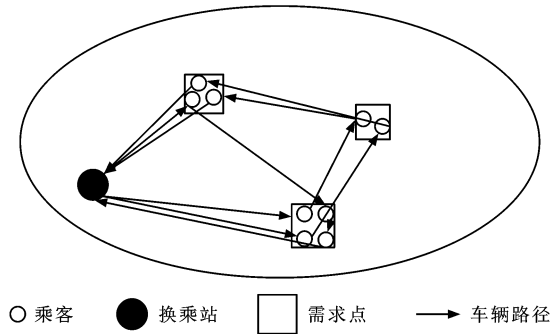


图 2 以乘客表示的车辆路径

Fig. 2 Vehicle routes represented by passengers

考虑需求点之间的出行需求。

1.4 模型构建

以系统运营利润最大为目标,以车辆容量、乘客时间窗、车场车辆保有量、车辆单程最大运行时间等为约束构建车辆路径与调度的一体化优化模型。系统运营利润 Z 为运营收益与运营成本之差,运营成本包括车辆发车及行驶成本 E_1 、车辆早到的惩罚成本 E_2 和晚到的惩罚成本 E_3 ,运营收益即票价收入 E_4

$$\min Z = \alpha \sum_p \sum_k \sum_y [G_p \omega_{pk,y} + \sum_i \sum_j L_{ij} x_{pk,yij} C_p] + \beta \sum_p \sum_k \sum_y \sum_i [U_i (S_{pk,y} + \sum_i \varphi_{pk,yi} \theta_{pk,yi})] + \gamma \sum_p \sum_k \sum_y \sum_i \varphi_{pk,yi} R_i - \sigma \sum_p \sum_k \sum_y |N_{pk,y}| C \quad (1)$$

$$\text{s. t. } S_{pk,y} + \sum_i x_{pk,yij} \theta_{pk,yi} \leq Q_p \quad i \in N_{pk,y} \quad (2)$$

$$0 \leq S_{pk,y} \leq Q_p \quad (3)$$

$$0 \leq \sum_p M_p \leq M \quad (4)$$

$$f_{pk,y} \geq H_{pk,y} \quad (5)$$

$$N_{pk,y} \cap N_{\tilde{p}\tilde{k}\tilde{y}} = \emptyset \quad k \neq \tilde{k}, p \neq \tilde{p}, y \neq \tilde{y} \quad (6)$$

$$U_i = \begin{cases} 0 & a_i \leq t_{pk,yi} \leq b_i, t_{pk,yi} < a_i, \theta_{pk,yi} = -1 \\ h_1(a_i - t_{pk,yi}) & t_{pk,yi} < a_i \text{ 且 } \theta_{pk,yi} = 1 \end{cases} \quad i \in N_{pk,y} \quad (7)$$

$$R_i = \begin{cases} 0 & a_i \leq t_{pk,yi} \leq b_i \\ h_2(t_{pk,yi} - b_i) & t_{pk,yi} > b_i \end{cases} \quad i \in N_{pk,y} \quad (8)$$

$$E_{pk,yi} = \begin{cases} a_i - t_{pk,yi} & \theta_{pk,yi} = 1 \\ 0 & \theta_{pk,yi} = -1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_j \left[\frac{L_{ij} x_{pk,yij}}{V} + \max(E_{pk,yi}, 0) \right] \leq T \quad i, j \in N_{pk,y} \quad (10)$$

$$\sum_i x_{pk,yio} = \sum_j x_{pk,yoj} \quad i, j \in I \quad (11)$$

$$D_{pk,yi} < f_{pk,y} \quad i \in N_{pk,y} \quad (12)$$

$$\sum_p \sum_k \sum_y \varphi_{pk,yi} = 1 \quad i \in I \quad (13)$$

式中: $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$ 分别为权重系数; G_p 为车型 p 的启动成本; $\omega_{pk,y}$ 为 0 或 1, 若车型 p 的第 k 辆车发出了第 y 次, 则为 1, 否则为 0; L_{ij} 为乘客 i 和 j 之间的最短路径距离; $x_{pk,yij}$ 为 0 或 1, 若第 y 次发出的车型 p 的第 k 辆车从乘客 i 的需求点到乘客 j 的需求点, 则为 1, 否则为 0; C_p 为车型 p 的单位距离行驶成本; U_i 为车辆早到乘客 i 的位置惩罚函数; $S_{pk,y}$ 为第 y 次发出的车型 p 的第 k 辆车离开换乘站时的车内乘客数; $\varphi_{pk,yi}$ 为 0 或 1, 若第 y 次发出的车型 p 的第 k 辆车经过乘客点 i , 则为 1, 否则为 0; $\theta_{pk,yi}$ 为 -1 或 1, 若乘客 i 乘坐第 y 次发出的车型 p 的第 k 辆车前往换乘站则为 1, 若乘客 i 乘坐第 y 次发出的车型 p 的第 k 辆车从换乘站离开则为 -1; R_i 为车辆晚到乘客 i 的位置惩罚函数; $N_{pk,y}$ 为第 y 次发出的车型 p 的第 k 辆车服务的乘客集合(按距离发车点的远近排列); C 为票价; Q_p 为车型 p 的最大载客数; M 为系统中车辆总数; $f_{pk,y}$ 为车型 p 的第 k 辆车发出第 y 次的时间; $\tilde{k}, \tilde{p}, \tilde{y}$ 分别为不同于 k, p, y 的值; $H_{pk,y}$ 为第 $y-1$ 次发出的车型 p 的第 k 辆车回到换乘站的时间; h_1 为早到的惩罚系数; a_i, b_i 分别为乘客 i 预约时间窗的上、下界; $t_{pk,yi}$ 为第 y 次发出的车型 p 的第 k 辆车到达乘客 i 所在需求点的时间; h_2 为晚到的惩罚系数; $E_{pk,yi}$ 为第 y 次发出的车型 p 的第 k 辆

车提前到达乘客 i 所在需求点的时间; V 为车速; T 为车辆的单程最大运行时间; o 为换乘站; $D_{pk,yi}$ 为第 y 次发出的车型 p 的第 k 辆车的乘客 i 预约离开换乘站的时间; I 为所有预约乘客集合。

式(1)为目标函数,右边第1~4项分别为 $E_1 \sim E_4$; 式(2)、(3)为车辆容量约束,即途中车上乘客数、离开换乘站时车上乘客数均不能超过车辆容量; 式(4)为车辆保有量约束; 式(5)表示第 y 次发出车型 p 的第 k 辆车前,该车应回到了车场; 式(6)表示每位乘客只能由一辆车服务; 式(7)为车辆早到惩罚,对从换乘站出发的乘客,车辆在车场等候,不予惩罚,但对前往换乘站的乘客,车辆早到给予惩罚; 式(8)为车辆晚到惩罚; 式(9)为早到时间值,用于式(10)的计算; 式(10)为车辆单程最大运行时间约束; 式(11)表示车辆从换乘站出发回到换乘站,形成一个闭合的回路; 式(12)表示车辆的发车时间晚于离开换乘站乘客的预约时间; 式(13)表示所有预约的乘客都要被服务。

2 求解算法

本文的 RFT 运行路径与调度的一体化优化问题可归结为一种较复杂的车辆路径问题,并基于遗传算法求解,遗传算法是一种适用于求解最优化模型的启发式算法,通过遗传算子中的选择、交叉、变异使其兼顾全局和局部均衡的搜索能力^[32]。本文基于双遗传算法设计的一体化优化模型的求解算法流程如图3所示。

图3为双遗传算法流程,首先在发车间隔已知的情况下,基于遗传算法优化发出车型和车辆路径;然后基于遗传算法调整发车间隔,调用遗传算法继续优化发出车型和车辆路径;如此反复,直至获取理想解。在发出车型和车辆路径优化时采用多链编码结构。在仅仅优化路径的遗传算法中,一条染色体即表示一条可行路径。然而在同时优化发出车型和路径的遗传算法中,若仍采用单链编码方式则容易产生非可行解,故本文采用多链编码方式,其中乘客和车辆均采用自然数编码,在 $1 \sim n+m$ 内对 $n+m$ 个乘客随机编码,在 $n+m+1 \sim n+m+M$ 对 M 辆车随机编码,一个个体即为一个可行解,每条染色体链均含车辆基因和乘客基因。算法中,首先输入初始发车间隔种群,然后使用该发车序列对发出车型及路径进行优化,计算初始发车间隔下的系统最优目标值,作为该初始发车间隔下适应度函数值;然后不断对发车间隔进行调整;最后得出最优发车时间,

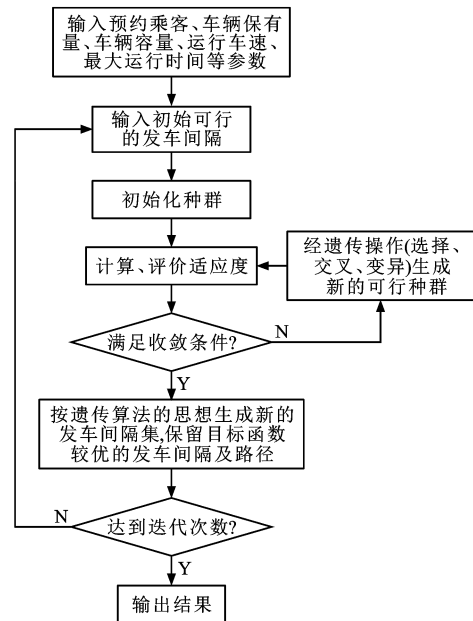


图3 算法流程

Fig. 3 Process of algorithm

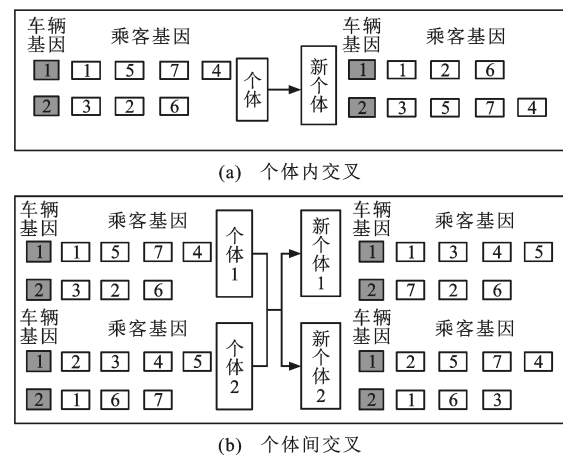
以及在该发车序列下的发出车型及路径。

在车辆路径搜索部分中,个体采用多条链编码,为使子代多样,采用个体内交叉和个体间交叉2种方式,如图4所示。选择操作采用轮盘赌法,适应度函数为目标函数,个体 ζ 被选择的概率 λ_{ζ} 为

$$\lambda_{\zeta} = \frac{Z_{\zeta}}{\sum_{\zeta} Z_{\zeta}} \quad (14)$$

式中: Z_{ζ} 为个体 ζ 的适应度函数。

设定变异概率为 q ,变异操作中,对于乘客基因 κ (由同一条路径的所有乘客组成),在 $(0,1)$ 区间内随机生成一个数 r_{κ} ,若 $r_{\kappa} < q$,则将乘客基因 κ 放入基因库中,并将其从染色体中删除,否则不进行操作。基因库中的基因采用试分配法逐一随机添加到



(b) 个体间交叉

图4 染色体交叉

Fig. 4 Chromosome chiasmata

染色体中。

3 算例分析

3.1 基本参数及条件

以早高峰为例,设研究时段为 7:00~8:00,服务范围为半径 3.5 km 的圆形区域,换乘站坐标为 (0,0), V 为 $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; M_A 为 5 辆,分别为 $A_1\sim A_5$; M_B 为 3 辆,分别为 $B_1\sim B_3$; Q_A 为 $10\text{ 人}\cdot\text{车}^{-1}$, Q_B 为 $15\text{ 人}\cdot\text{车}^{-1}$, G_A 为 $15\text{ 元}\cdot\text{次}^{-1}$, G_B 为 $25\text{ 元}\cdot\text{次}^{-1}$, C_A 为 $1.2\text{ 元}\cdot\text{km}^{-1}$, C_B 为 $1.5\text{ 元}\cdot\text{km}^{-1}$, T 为 40 min , C 为 $4\text{ 元}\cdot\text{人}^{-1}$; α 为 0.3 , β 为 0.2 , γ 为 0.2 , σ 为 0.3 , h_1 为 $0.25\text{ 元}\cdot\text{min}^{-1}$, h_2 为 $0.35\text{ 元}\cdot\text{min}^{-1}$ 。算例中,在服务区域内随机生成 25 个需求点(表 1),在这些需求点内随机分布的 60 位乘客从需求点前往换乘站、20 位乘客从换乘站前往需求点(见图 5,其中 O 为圆点, X 、 Y 分别为横、纵坐标),80 位乘客分布的需求点、时间窗及预约时间见表 2。表 2 中,乘客类型为 1 表示乘客从需求点前往换乘站, -1 表示乘客从换乘站到需求点。

表 1 需求点坐标

Tab. 1 Coordinates of demand points km

站点编号	坐标	站点编号	坐标
1	(0.87, 0.42)	14	(0.43, -3.50)
2	(2.00, 0.02)	15	(-1.01, -0.11)
3	(2.20, 0.90)	16	(-1.56, -1.30)
4	(2.53, 0.14)	17	(-1.62, -2.58)
5	(3.34, 0.47)	18	(-0.77, 0.80)
6	(2.10, 1.34)	19	(-1.21, 0.79)
7	(1.45, 1.13)	20	(-0.21, -1.77)
8	(1.44, -0.22)	21	(-2.11, 2.45)
9	(1.30, -1.31)	22	(-1.09, 1.63)
10	(1.97, -0.86)	23	(-2.00, 0.58)
11	(0.47, -1.25)	24	(1.96, 2.33)
12	(1.30, -2.08)	25	(0.96, 1.78)
13	(1.00, 1.00)		

3.2 算例分析

3.2.1 同时接送模式下的计算结果

根据乘客、车辆的基本情况,基于 MATLAB 编程求解本文模型,车辆路径部分设定变异概率为 0.1,个体间交叉概率为 0.7,个体内交叉概率为 0.1,种群数为 200,迭代次数为 800。发车间隔部分,初始种群数为 100,迭代次数为 300,变异概率为 0.1,交叉概率为 0.7。计算得到同时接送模式下乘客的

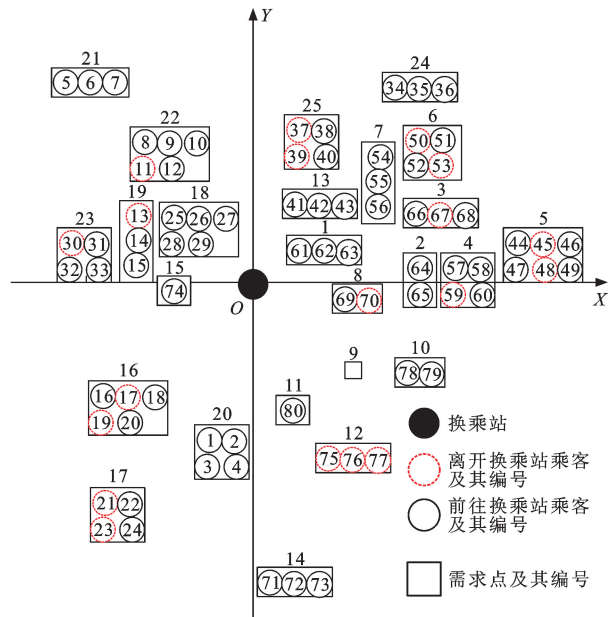


图 5 需求点与乘客的分布

Fig. 5 Distributions of demand points and passengers

路径结果见表 3。

算例中利用协调优化模型获取了最优路径和调度参数, $M=8$ 辆满足需求,共发出 10 车次,其中 A 型车发出 7 车次, B 型车发出 3 车次; $E_1\sim E_4$ 分别为 117.0、1.0、40.3、96.0 元,目标值为 62.4 元;因同时接送模式只需保证车辆在途时车上乘客数不大于容量即可,而车辆接送的累积乘客数可大于其容量(如 7:25 的 A_3 车次与 7:20 的 A_1 车次)。

3.2.2 单独送和单独接模式下的计算结果

在约束、目标函数与同时接送模式相同的情况下,按单独送和单独接模式进行路径优化,优化结果见表 4、5。

若 M_A 为 5 辆, M_B 为 3 辆,采用单独送和单独接模式,则在本文约束条件下无可行解;若 M_A 增加 2 辆,分别为 A_6 、 A_7 ,采用单独送和单独接模式则存在优化解,此时, $M=10$ 辆,共发出 11 车次,其中 A 型车发出 8 车次, B 型车发出 3 车次; $E_1\sim E_4$ 分别为 128.4、3.4、38.4、96.0 元,与同时接送模式相比分别增加了 9.7%、240.0%、-4.7%、0, E_3 降低主要是因为准点率提高了, E_4 保持不变是因为接送的总人数相同;目标值为 74.2 元,与同时接送模式相比增加了 18.9%。

3.2.3 同时接送模式与单独送和单独接模式的比较

从发车次数、所需车辆数、座位平均利用率、运送单位乘客所需的平均车辆行驶距离、目标值等方面对同时接送、单独送和单独接 2 种运行模式进行比较,结果见表 6。

表 2 乘客位置与时间窗
Tab. 2 Locations and time windows of passengers

乘客编号	乘客类型	站点编号	b_i	a_i	$D_{pk,yi}$	乘客编号	乘客类型	站点编号	b_i	a_i	$D_{pk,yi}$
1	1	20	7:08	7:13	无要求	41	1	13	7:13	7:18	无要求
2	1	20	7:19	7:23	无要求	42	1	13	7:24	7:29	无要求
3	1	20	7:38	7:43	无要求	43	1	13	7:35	7:40	无要求
4	1	20	7:19	7:24	无要求	44	1	5	7:11	7:16	无要求
5	1	21	7:06	7:10	无要求	45	-1	5	7:20	7:25	7:04
6	1	21	7:14	7:18	无要求	46	1	5	7:30	7:35	无要求
7	1	21	7:07	7:12	无要求	47	1	5	7:42	7:47	无要求
8	-1	22	7:23	7:28	7:06	48	-1	5	7:40	7:45	7:16
9	1	22	7:18	7:22	无要求	49	1	5	7:28	7:33	无要求
10	1	22	7:33	7:37	无要求	50	-1	6	7:18	7:23	7:03
11	-1	22	7:25	7:30	7:08	51	1	6	7:19	7:23	无要求
12	1	22	7:42	7:47	无要求	52	1	6	7:33	7:39	无要求
13	-1	19	7:09	7:14	7:00	53	-1	6	7:55	7:60	7:00
14	1	19	7:20	7:25	无要求	54	1	7	7:07	7:12	无要求
15	1	19	7:36	7:40	无要求	55	1	7	7:35	7:40	无要求
16	1	16	7:05	7:10	无要求	56	1	7	7:19	7:24	无要求
17	-1	16	7:22	7:27	7:05	57	1	4	7:10	7:14	无要求
18	1	16	7:07	7:12	无要求	58	1	4	7:18	7:23	无要求
19	-1	16	7:25	7:30	7:07	59	-1	4	7:52	7:57	7:20
20	1	16	7:49	7:53	无要求	60	1	4	7:37	7:42	无要求
21	-1	17	7:23	7:28	7:05	61	1	1	7:05	7:10	无要求
22	1	17	7:17	7:22	无要求	62	1	1	7:07	7:12	无要求
23	-1	17	7:52	7:57	7:24	63	1	1	7:34	7:39	无要求
24	1	17	7:33	7:37	无要求	64	1	2	7:18	7:22	无要求
25	1	18	7:12	7:17	无要求	65	1	2	7:42	7:47	无要求
26	1	18	7:26	7:31	无要求	66	1	3	7:14	7:19	无要求
27	1	18	7:41	7:46	无要求	67	-1	3	7:16	7:21	7:02
28	1	18	7:38	7:43	无要求	68	1	3	7:50	7:55	无要求
29	1	18	7:27	7:31	无要求	69	1	8	7:05	7:10	无要求
30	-1	23	7:25	7:30	7:06	70	-1	8	7:23	7:27	7:06
31	1	23	7:16	7:20	无要求	71	1	14	7:16	7:21	无要求
32	1	23	7:37	7:42	无要求	72	1	14	7:30	7:35	无要求
33	1	23	7:09	7:14	无要求	73	1	14	7:23	7:28	无要求
34	1	24	7:39	7:43	无要求	74	1	15	7:40	7:45	无要求
35	1	24	7:24	7:29	无要求	75	-1	12	7:23	7:28	7:04
36	1	24	7:22	7:27	无要求	76	-1	12	7:14	7:19	7:00
37	-1	25	7:45	7:50	7:14	77	-1	12	7:40	7:45	7:20
38	1	25	7:37	7:41	无要求	78	1	10	7:07	7:12	无要求
39	-1	25	7:30	7:35	7:12	79	1	10	7:28	7:32	无要求
40	1	25	7:19	7:24	无要求	80	1	11	7:39	7:43	无要求

表 3 同时接送模式下乘客的路径

Tab. 3 Passenger routes under simultaneous pick-up and delivery mode

发车时间	车辆编号	乘客路径	距离/km	累计乘客数	座位利用率/%	到达时间
7:09	A ₁	0-61-62-25-7-14-13-0	8.12	6	60	7:23
7:14	B ₁	0-76-51-26-6-5-42-40-38-0	17.24	8	53	7:44
7:16	A ₂	0-33-18-56-67-32-3-0	17.60	6	60	7:46
7:20	A ₃	0-58-45-66-50-44-49-79-78-28-10-12-0	13.69	12	120	7:45
7:20	A ₄	0-4-2-73-71-17-80-0	9.96	6	60	7:39
7:23	B ₂	0-16-1-75-72-64-47-65-46-68-0	18.35	9	60	7:55
7:25	A ₁	0-35-36-54-70-69-52-60-57-55-43-27-0	13.48	11	110	7:46
7:30	B ₃	0-21-24-19-30-11-39-8-31-34-0	20.53	9	60	8:15
7:30	A ₅	0-23-15-59-37-53-22-0	22.18	6	60	8:08
7:40	A ₄	0-63-29-74-77-48-20-41-0	19.96	7	70	8:14

表 4 单独送模式下乘客的路径

Tab. 4 Passenger routes under separate delivery mode

发车时间	车辆编号	乘客路径	距离/km	累计载客数	座位利用率/%	到达时间
7:12	A ₁	0-67-70-11-39-8-13-30-0	14.73	7	70	7:42
7:24	A ₂	0-76-75-19-17-21-23-0	9.74	6	60	7:40
7:36	A ₃	0-77-45-48-59-53-37-50-0	12.79	7	47	8:03

表 5 单独接模式下乘客的路径

Tab. 5 Passenger routes under separate pick-up mode

发车时间	车辆编号	乘客路径	距离/km	累计载客数	座位利用率/%	到达时间
7:00	A ₄	0-5-7-18-2-22-42-36-0	19.20	7	70	7:38
7:03	A ₅	0-69-57-6-51-49-58-0	17.50	6	60	7:35
7:06	B ₁	0-44-62-66-79-33-43-54-0	17.77	7	47	7:45
7:10	B ₂	0-71-25-56-1-72-16-0	20.41	6	40	7:45
7:13	A ₆	0-31-41-29-73-0	14.88	4	40	7:41
7:15	A ₇	0-64-78-61-35-46-4-40-9-0	20.87	8	80	7:51
7:24	B ₃	0-26-32-15-28-27-14-12-10-3-24-20-74-0	13.66	12	80	7:58
7:38	A ₅	0-65-60-68-34-55-63-52-38-80-47-0	19.59	10	100	8:18

表 6 两种模式的比较

Tab. 6 Comparison of two modes

模式	发车次数	所需车辆数	座位平均利用率/%	运送单位乘客的平均行驶距离/km	目标值/元
同时接送模式	10	8	71	2.01	62.4
单独送和单独接模式	11	10	63	2.26	74.2

与单独送和单独接模式相比,同时接送模式的发车次数减少了 1 次,所需车辆数减少了 2 辆,座位平均利用率提高了 8.3%,运送单位乘客的平均车辆行驶距离降低了 11.0%,总成本降低了 15.9%。

3.2.4 运营效率的影响因素分析

若 3.1 节中的其他条件不变,只改变车速、车辆单程运行时间限制与车型比例,分析这些参数的变化对发车次数、座位平均利用率与目标值的影响。

设定基准车速为 $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,分别增减车速的 15.0%,分析车速变化对运营效率的影响;设定单程运行时间限制的基准值为 40 min,运行时间限制分别增减 15.0%,分析运行时间限制对运营效率的影响; M 为 8 辆保持不变, A 型车(即小型车)占比的基准数为 62.5%,分别增减占比的 12.5%,即 A 型车分别变为 6、4 辆,分析车型比例变化对运营效率的影响,结果分别见表 7~9。

表7 车速对运营效率的影响

Tab. 7 Impact of vehicle speed on operational efficiency

车速/(km·h ⁻¹)	发车次数	座位平均利用率/%	目标值/元
40.3	9	79	73.6
35.0	10	71	62.4
29.7	10	70	79.3

表8 单程运行时间限制对运营效率的影响

Tab. 8 Impact of one-way running time limit on operational efficiency

最长运行时间/min	发车次数	座位平均利用率/%	目标值/元
46	8	87	54.2
40	10	71	62.4
34	10	70	64.6

表9 车型比例对运营效率的影响

Tab. 9 Impact of vehicle composition on operational efficiency

车辆组成	发车次数	座位平均利用率/%	目标值/元
M为8辆,A型车占比50.0%	10	67	66.6
M为8辆,A型车占比62.5%	10	71	62.4
M为8辆,A型车占比75.0%	10	74	57.5

由表7可知:在设定的需求条件下,当车速提高至40.3 km·h⁻¹,发车次数降低了1次,座位平均利用率增加了7.9%,目标值增加11.2元,增加了18.0%,同时总成本也增加了(因收入未变);当车速降低至29.7 km·h⁻¹时,发车次数保持不变,座位平均利用率下降了1.0%,目标值增加了27.1%,同时总成本也增加了;若持续降低运行车速时,将无满足约束的可行解。

由表8可知:在设定的需求条件下,当车辆单程运行时间限制延长至46 min时,发车次数降低了2次、座位平均利用率增加了15.7%,目标值减少了13.1%,同时总成本也减少了;当车辆单程运行时间限制减少至34 min时,发车次数保持不变,座位平均利用率下降了1.8%,目标值增加了2.2%,同时总成本也增加了;若持续降低运行时间限制时,将无满足约束的可行解。

由表9可知:在设定的需求条件下,减少A型车至4辆时,座位平均利用率降低了4.0%,目标值增加了4.4%,同时总成本也增加了;增加小型车至6辆时,座位平均利用率增加了3.0%,目标值减少了4.9%,同时总成本也减少了;增加或减少小型车,即改变车型比例,发车次数没有变化,说明在所

乘客均要被服务等约束下,改变车型比例不能减少发车次数。

综合表7~9可知:在设定的需求条件下,运行车速、单程运行时间限制与小型车比例分别在基准值35 km·h⁻¹、40 min、62.5%附近上下波动15.0%、15.0%、12.5%时,发车次数、座位平均利用率与目标函数值的最大变化率分别达到了20.0%、15.7%、27.1%,这些参数对系统运营效率、运营成本均有显著影响。

4 结 语

(1)对提出的模型进行了算例验证,结果表明:在乘客需求相同的情况下,与单独送和单独接模式相比,同时接送模式能显著增加座位利用率,也能显著降低系统总成本、车场所需的车辆数、出车次数与运送单位乘客所需的平均车辆行驶距离,运行模式的优越性明显。

(2)在同时接送模式运营效率的影响因素分析时发现:运行车速、单程运行时间限制与车型比例均对系统运营效率与总成本有显著影响。

(3)在RFT系统车辆运行路径与调度的研究中,同时接送模式更符合实际场景,下一步的研究工作将是同时接送模式下多换乘站车辆路径与调度的实时优化问题。

参考文献:

References:

- [1] 潘述亮,俞洁,卢小林,等.灵活型公交服务系统及其研究进展综述[J].城市交通,2014,12(2):62-68,58.
PAN Shu-liang, YU Jie, LU Xiao-lin, et al. A review of flexible transit service[J]. Urban Transport of China, 2014, 12(2): 62-68, 58. (in Chinese)
- [2] CHANDRA S, QUADRIFOGLIO L. A new street connectivity indicator to predict performance for feeder transit services [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 30: 67-80.
- [3] LI Xiu-gang, QUADRIFOGLIO L. Feeder transit services: choosing between fixed and demand responsive policy [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(5): 770-780.
- [4] QUADRIFOGLIO L, LI Xiu-gang. A methodology to derive the critical demand density for designing and operating feeder transit services [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2009, 43(10): 922-935.
- [5] QUADRIFOGLIO L, DDESSOUKY M M, ORDÓÑEZ F. A simulation study of demand responsive transit system design [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2008, 42(4): 718-737.

- [6] EDWARDS D, WATKINS K. Comparing fixed-route and demand responsive feeder transit systems in real-world settings[J]. *Transportation Research Record*, 2013(2352): 128-135.
- [7] LI Xiu-gang, QUADRIFOGLIO L. Optimal zone design for feeder transit services[J]. *Transportation Research Record*, 2009(2111): 100-108.
- [8] 苗一迪. 柔性路径公交车服务区域的决策模型研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
MIAO Yi-di. A decision-making model for determining the service area of a flexible-route bus [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] 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.
MANG Lie. Scheduling method of railway transit station oriented demand responsive connector system [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [10] PAN Shu-liang, YU Jie, YANG Xian-feng, et al. Designing a flexible feeder transit system serving irregular shaped and gated communities: service area and feeder route planning[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2015, 141(3): 04014028-1-9.
- [11] 范文豪. 需求响应式接驳公交路径优化模型研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
FAN Wen-hao. Research on routing optimization model of demand-responsive connector[D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [12] 熊杰, 关伟, 黄爱玲. 社区公交接驳地铁路径优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(1): 166-173.
XIONG Jie, GUAN Wei, HUANG Ai-ling. Research on optimal routing of community shuttle connect rail transit line[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(1): 166-173. (in Chinese)
- [13] YU Yao, MACHEMEHL R B, XIE Chi. Demand-responsive transit circulator service network design[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 76: 160-175.
- [14] DESSOUKY M, RAHIMI M, WEIDNER M. Jointly optimizing cost, service, and environmental performance in demand-responsive transit scheduling[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2003, 8(6): 433-465.
- [15] NOURBAKHS S M, OUYANG Yan-feng. A structured flexible transit system for low demand areas[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2012, 46(1): 204-216.
- [16] NÚÑEZ A, CORTÉS E, SÁEZ D, et al. Multiobjective model predictive control for dynamic pickup and delivery problems[J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 32: 73-86.
- [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: 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.
- [19] 潘述亮, 俞洁, 邹难, 等. 含特殊需求的灵活接驳公交服务区域与路径选择[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(11): 1650-1654.
PAN Shu-liang, YU Jie, ZOU Nan, et al. Service area and route selection choice model for flexible feeder transit with special demands [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(11): 1650-1654. (in Chinese)
- [20] SHEU J B. A fuzzy clustering approach to real-time demand-responsive bus dispatching control[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 150(3): 437-455.
- [21] 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 Feng, LI Wen-quan, SHEN Jin-xing. Two-stage model for flex-route transit scheduling[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(5): 1078-1084. (in Chinese)
- [22] 高照明. 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.
GAO Xu-ming. Research on dispatching system of demand-responsive connector with on-demand stations[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [23] 赵伟忠. 随机用户需求下实时定制公交线路生成模型研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
ZHAO Wei-zhong. The research on route generation model of real-time custom bus based on random user's demand[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [24] 陈坚, 李武, 吴丹, 等. 基于 MAST 的智慧公交系统调度优化模型[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(5): 140-145.
CHEN Jian, LI Wu, WU Dan, et al. Scheduling optimization model of intelligent public transport system based on MAST[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2016, 35(5): 140-145. (in Chinese)
- [25] 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 Journal*, 2014, 14(Part C): 504-527.
- [26] 易星. 基于用户需求的城市公交调度算法研究[J]. *智能计算机与应用*, 2018, 8(4): 129-131, 135.
YI Xing. Research on urban public transport scheduling algorithm based on user needs[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2018, 8(4): 129-131, 135. (in Chinese)
- [27] 张鹏浩. 接驳高铁站的区域灵活型公交调度模型研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
ZHANG Peng-hao. Research on scheduling model of regional flexible feeder bus for high-speed railway stations [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [28] 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. (in Chinese)
- [29] 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. (in Chinese)
- [30] 王正武,刘安琪,谭康康.考虑乘客需求特性的DRC公交运行周期优化[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2016,13(2): 19-25.
- WANG Zheng-wu, LIU An-qi, TAN Kang-kang. DRC bus operation cycle optimization corresponding to passenger demand characters[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 13(2): 19-25. (in Chinese)
- [31] DENG Lian-bo, GAO Wei, ZHOU Wen-liang, et al. Optimal design of feeder-bus network related to urban rail line based on transfer system[J]. Procedia—Social and Behavioral Sciences, 2013, 96: 2383-2394.
- [32] 陈呈频,韩胜军,鲁建厦,等.多车场与多车型车辆路径问题的多染色体遗传算法[J].中国机械工程,2018,29(2):218-223.
- CHEN Cheng-pin, HAN Sheng-jun, LU Jian-sha, et al. A multi-chromosome genetic algorithm for multi-depot and multi-type vehicle routing problems[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(2): 218-223. (in Chinese)