

文章编号:1672-9331(2021)01-0040-09

# 管理者与乘客相互影响下的响应型 接驳公交协调优化

王正武,姜宁宇,谭 笑

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 根据响应型接驳公交(responsive feeder transit, RFT)系统管理者与乘客的相互影响关系,研究二者的协调优化方法,构建了同时优化车辆路径和乘客下车站点的非线性混合整数双层规划模型。上层是在乘客目的地已知的情况下 RFT 车辆路径与停靠站的优化模型,下层是在车辆路径与停靠站已知的情况下乘客下车站点的优化选择模型。然后,基于逆推归纳法设计了双层规划模型的求解算法。算例的计算结果表明:与仅优化车辆路径的方法相比,协调优化方法使系统总成本降低了 7.23%,证明该方法是可行且有效的。

**关键词:** 交通工程;响应型接驳公交;路径优化;双层规划;遗传算法

**中图分类号:** U491.1

**文献标志码:** A

## Coordination optimization of responsive feeder transit with interaction of system managers and passengers

WANG Zheng-wu, JIANG Ning-yu, TAN Xiao

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

**Abstract:** According to the interaction relationship of the managers and the passengers in the responsive feeder transit (RFT) system, the coordination optimization method of the two was studied, and a nonlinear mixed integer bilevel programming model was constructed for the simultaneously optimizing vehicle routes and passengers' get-off stations. The upper layer is the optimization model of RFT vehicle routes and stations when the passengers' destinations are known, while the lower layer is the optimization selection model of passengers' get-off stations when vehicle routes and stations are known. Then, the algorithm of bilevel programming model was designed based on the inverse induction method. The results of the example show that the coordination optimization method reduces the total cost of the system by 7.23% compared with the method of only optimizing vehicle routes, which shows that the coordination optimization method is feasible and effective.

**Key words:** traffic engineering; responsive feeder transit; route optimization; bilevel programming; genetic algorithm

收稿日期:2020-11-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678075);湖南创新型省份建设专项经费资助项目(2019SK2171);湖南省交通科技项目(201920)

通讯作者:王正武(1973—),男,教授,主要从事交通运输规划与管理方面的研究。E-mail:zhengwu.wang@126.com

轨道公交是缓解城市交通压力的一种有效途径,但在轨道公交运营过程中,往往忽略了与沿线接驳公交的衔接,严重影响了轨道公交的吸引力。响应型接驳公交(responsive feeder transit, RFT)是轨道公交出行“最后一公里”问题的有效解决措施。Guo 等<sup>[1]</sup>通过 24 h 的运营模拟验证了在低需求量条件下 RFT 具有的优势。Frei 等<sup>[2]</sup>发现出行者在选择地铁出行的同时也倾向于选择 RFT。文献[3-9]分别以系统效用、成本、总运输里程、满意度、换乘次数、可靠性等为目标构建了响应公交运行线路优化模型。王正武等<sup>[3]</sup>、潘述亮等<sup>[10]</sup>探讨了接驳线路与发车频率的协调优化问题。高煦明<sup>[11]</sup>分析了固定站点需求响应公交的调度优化问题。文献[12-15]分别构建了双层混合整数线性规划模型来优化设计弹性接驳公交线网、RFT 网络、接驳公交专线、常规公交线网等。迄今为止,国内外对 RFT 路径优化、调度的研究取得了一些成果,但仍存在以下不足:① 假设 RFT 系统无固定站点,乘客下车站点由乘客指定,站点分布具有强随机性且过于分散在路网上,增加了运营成本。② 很少考虑系统管理者与乘客之间的相互影响关系,实际上乘客下车站点的调整将影响接驳公交的运行路径、站点停留时间等,从而影响系统总成本;车辆路径与停靠站的调整,也将影响乘客下车站点的选择范围以及从停靠站到出行起(讫)点的

步行距离。

因此,本研究针对上述问题,分析了 RFT 系统管理者与乘客的协调优化方法。根据历史乘客需求点分布和路网条件,在各小区周边设立多个固定的备选停靠站,并根据实际路网计算各停靠站之间的距离;协调系统管理者和乘客成本,构建同时优化 RFT 运行路径及其停靠站与乘客下车站点的非线性混合整数双层规划模型,并基于逆推归纳法设计了遗传算法对其进行求解。

## 1 双层规划模型

### 1.1 问题描述

地铁站 RFT 系统包含若干个停靠站、地铁站以及连接这些站点的道路(如图 1 所示)。根据用地性质、道路网络等将整个服务范围划分为若干个目的地小区(在图 1 中序号为 46,47,48,...),并根据乘客出行需求的分布、道路条件、小区出入口等因素在每个服务小区周边布设一定数量的、位置固定的备选停靠站(在图 1 中序号为①,②,③,...)。乘客通过手机等在线预约、上传目的地以及最长行程时间要求(即时间窗),系统管理者规划该批次接驳车辆路径方案和乘客乘车方案并发送给乘客,乘客按指令乘车,并由接驳车送达目的地所在小区周围停靠站,下车后步行到达目的地。

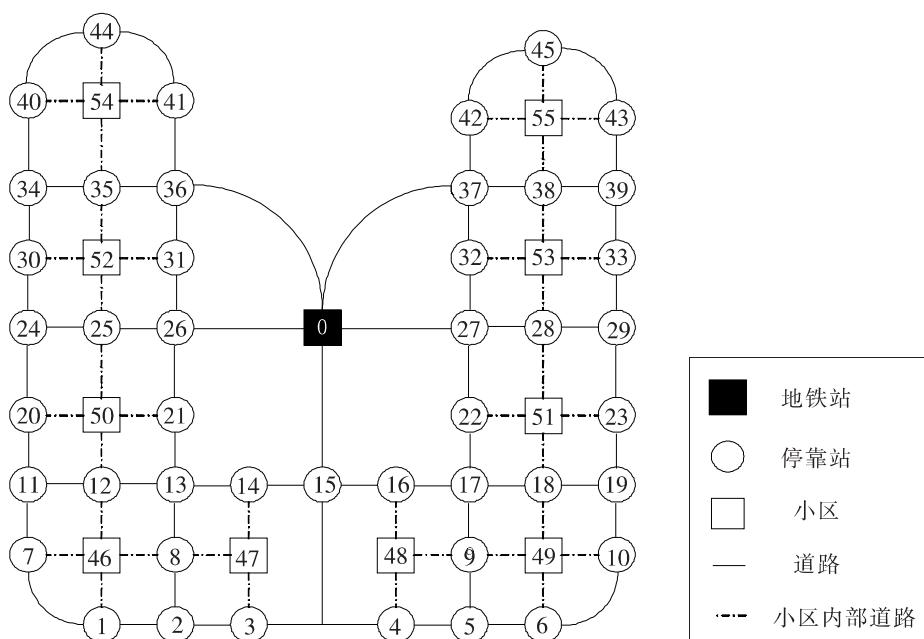


图 1 RFT 系统

Fig. 1 RFT system

## 1.2 模型构建

RFT 车辆路径及其停靠站优化与乘客下车站点选择是一个典型的 Stackelberg 主从博弈问题。系统管理者作为领导层设计车辆路径及其停靠站方案,乘客作为从属层选择最有利的停靠站下车。上层的决策不仅受到道路条件、乘客出行需求等的制约,还会受到乘客下车停靠站选择的影响。一方面在 RFT 车辆路径及其停靠站方案确定后,乘客下车站点选择范围会受到影响;另一方面, RFT 车辆路径及其停靠站方案也需要根据乘客下车站点进行评价并调整。

综上所述,可构建双层规划模型来同时优化车辆路径及其停靠站与乘客下车站点。上层是从管理者角度出发以系统总成本最小为目标的车辆路径及其停靠站优化模型;下层是从乘客角度出发以乘客步行距离最小为目标的乘客下车站点选择模型(如图 2 所示)。

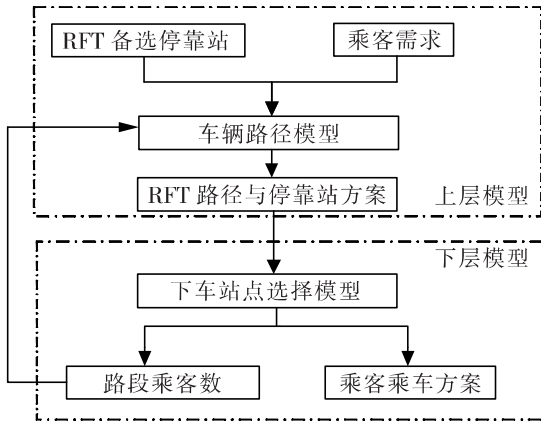


图 2 模型结构

Fig. 2 Model structure

在上层,系统管理者根据 RFT 备选停靠站、乘客需求、下层选择的下车站点优化车辆路径;在下层,乘客根据上层确定的车辆路径及其停靠站方案基于步行距离最小选择下车站点,并将选择结果反馈给上层。

本研究基于以下基本假设构建双层优化模型:① 接驳车辆和乘客分别以恒定速度  $V$  和  $v$  移动;② 乘客目的地坐标、时间窗以及备选停靠站的坐标已知;③ 只考虑单独送客,不考虑中途上车,每一班次 RFT 路径均以地铁站为起点,最后回到地铁站接送下一轮乘客;④ 预约需求一旦被响应乘客就不会取消预约,同一停靠站同一班次接驳车最多停靠一次。

在优化过程中,主要涉及乘客出行成本和运营成本。乘客的出行成本包括车外成本  $F_1$  和车内成本  $F_2$ ,车外成本是由于乘客步行产生的,车内成本是指乘客在车上的行程时间产生的费用;运营成本  $F_3$  是车辆在运行过程中的费用。 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  计算式分别为:

$$F_1 = C_{ov} \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} \tau_{ig} y_{ig} \quad (1)$$

$$F_2 = C_{iv} \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} t_{ij} w_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \delta_i w_{ij} \right) \quad (2)$$

$$F_3 = C_o \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{n \in N} t_{ij} x_{ijn} + \sum_{i \in I} \delta_i \right) \quad (3)$$

式中:  $C_o$  为单位时间的车辆成本系数;  $C_{iv}$  为乘客车内时间的等效成本系数;  $C_{ov}$  为乘客车外时间的等效成本系数;  $G = \{g\}$  为目的地集合;  $N = \{n\}$  为车辆组合;  $I = \{i, j\}$  为停靠站点集合, 0 为地铁站;  $\tau_{ig}$  为乘客从站点  $i$  步行到  $g$  小区的平均步行时间;  $y_{ig}$  为下层模型决策变量, 表示步行路径  $i$  到  $g$  是否被选择, 被选择为 1, 否则为 0;  $t_{ij}$  为  $i$  到  $j$  的行程时间;  $w_{ij}$  为乘车从  $i$  到  $j$  的乘客数量;  $\delta_i$  为在站点  $i$  的停留时间;  $x_{ijn}$  为上层模型的决策变量, 表示行车路径  $i$  到  $j$  是否被  $n$  号车选择, 被选择为 1, 否则为 0。

### 1.2.1 上层模型

上层模型为同时发车情况下的车辆路径优化模型。在该模型中,系统根据乘客选择的下车站点以及到达目的地的时间窗等确定各班次车辆途经的停靠站及顺序。上层模型可表示为:

$$\min Z = \sum_{g \in G} F_1 + F_2 + F_3 \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in I} x_{0jn} \leq Q, n \in N \quad (5)$$

$$\delta_i = \delta_0 + \delta' \sum_{g \in G} y_{ig} d_g \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} t_{ij} x_{ijn} + \sum_{i \in I} \delta_i \leq H, n \in N \quad (7)$$

$$T_i + \tau_{ig} \leq h_g \quad (8)$$

$$\sum_{j \in I} x_{ijn} = z_i \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} x_{0i} = q \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} x_{i0} = 0 \quad (11)$$

$$z_i \in I_g \quad (12)$$

式中:  $d_g$  为目的地为  $g$  的乘客数;  $Q$  为车辆的最大容量;  $\delta_0$  为每次停车的固定消耗时间;  $\delta'$  为单个乘客下车消耗时间;  $H$  为地铁到达的时间间隔;

$T_i$  为到达  $i$  站点的时间;  $h_g$  为  $g$  小区乘客要求的最晚到达时间;  $z_i$  表示站点  $i$  是否为停靠站, 是为 1, 否则为 0;  $q$  为本次输送的乘客数;  $I_g = \{i\}$  为目的地  $g$  周围的停靠站集合。其中  $i$  停靠站下车人数  $\sum_{g \in G} y_{ig} d_g$  由下层模型决定。

在上层模型中, 式(4)表示尽可能地降低系统总成本; 式(5)表示每辆车载客数不得超过容量限制; 式(6)表示每辆车在各个站点的停靠时间; 式(7)表示接驳车辆每次送客时间不得超过地铁到达的时间间隔; 式(8)表示乘客必须在时间窗要求内到达目的地; 式(9)表示每一班次对每个站点最多访问 1 次; 式(10)和式(11)表示所有乘客都会被服务到; 式(12)表示必须将  $g$  站点的乘客送到  $g$  周围的停靠站。

### 1.2.2 下层模型

下层模型为乘客下车站点的选择模型。在该模型中, 每班次每个小区的乘客只能选择一个停靠站下车, 同时使该班次该小区所有乘客的平均步行成本最低。乘客根据上层规划的行车方案, 确定各自的下车站点。下层模型可表示为:

$$\min Z' = F_1 \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in I} y_{ig} = 1 \quad (14)$$

$$y_{ig} \leq z_i \quad (15)$$

在下层模型中, 式(13)表示乘客的步行距离最小; 式(14)表示每个目的地有且仅有一个停靠站为其服务; 式(15)表示当该站点为停靠站时, 乘客才可在此站下车。其中, 乘客是否在  $i$  停靠站下车, 其决策变量  $y_{ig}$  由上层模型中的  $z_i$  决定。

## 2 模型求解

上层模型属于车辆路径问题, 常用模拟退火算法<sup>[16]</sup>、粒子群算法<sup>[17]</sup>和禁忌搜索算法<sup>[18]</sup>等启发式算法进行求解。遗传算法的精度仅次于禁忌搜索算法, 但是收敛速度较快, 本研究拟采用遗传算法进行求解。下层模型为乘客步行路径的选择问题, 利用 Floyd 法求解目的地乘客到各个停靠站点的最短步行路径, 并基于步行距离最短选择下车站点与对应的步行路径。

协调优化模型的总体目标是使系统总成本最小, 并使每个乘客自我寻优的个体费用最小。可

以利用逆推归纳法通过寻找其子博弈完美均衡解来解决该问题, 即在系统管理者掌握乘客行为的背景下优化车辆路径及其停靠站, 将问题分解为确定停靠站与设计经过停靠站的路径。王正武等<sup>[19]</sup>采用迭代法求解双层规划模型, 而本研究采用一种基于遗传算法设计的优化模型求解方法, 并基于步行距离最短对下层模型乘客的选择进行模拟决策, 算法流程见图 3。首先生成停靠站, 然后基于步行距离最短判断各个乘客的下车站点, 确定步行路径, 最后规划出经过上述停靠站的最优路径组合。

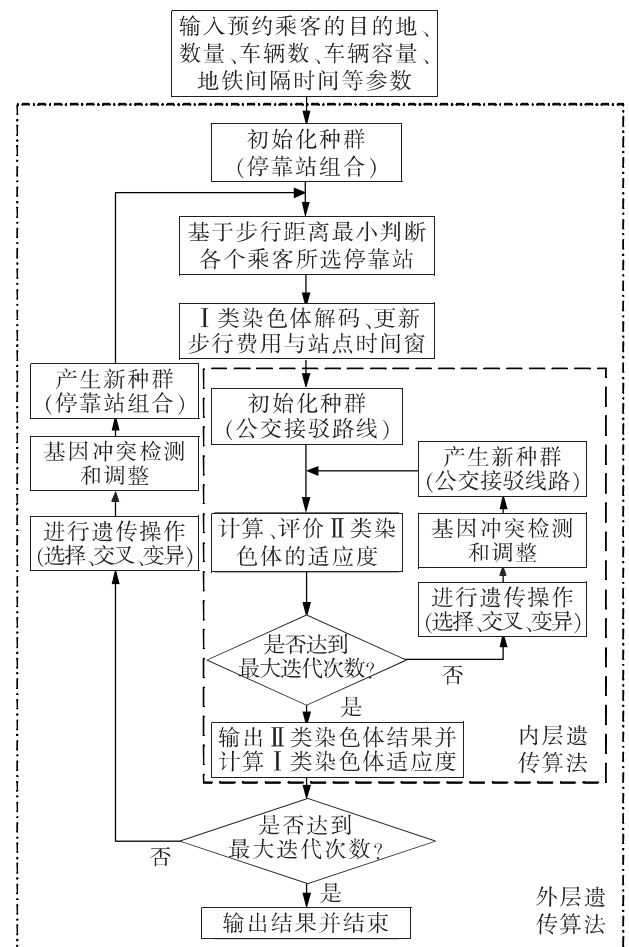


图 3 算法流程

Fig. 3 Algorithm flow

考虑到问题求解的复杂性, 本研究设计的遗传算法采用两种不同的编码方式。在优化停靠站点组合时, 染色体采用单链结构二进制编码方式, 在本研究中被命名为 I 类染色体, 由  $I$  个站点基因组成, 每一个基因位置表示一个站点, 编码表示每一个停靠站点是否被选中, 1 表示在此站点停靠, 0 表示不在此站点停靠。在优化车辆路径问题时, 染色体采用单链结构自然数编码方式, 在本研究中被命名为 II 类染色体, 由  $m$  个站点与 1 个地

铁停靠站基因组成,每一个自然数表示一个站点,顺序表示车辆路径,即停靠站的访问顺序。

在遗传算法中适应度函数在处理不同层次问题时存在一些差异。在优化公交停靠站点组合时,其适应度用系统总费用的倒数表示,即:

$$f_1 = \frac{1}{\sum_{g \in G} F_1 + F_2 + F_3} \quad (16)$$

在优化车辆路径问题时,当公交停靠站点组合固定时,每个乘客的步行路径一致,使得  $\sum_{g \in G} F_1$  保持不变,即:

$$f_2 = \frac{1}{F_2 + F_3} \quad (17)$$

计算个体适应度看其是否满足条件,若满足条件或达到最大迭代次数则计算结束,否则进入下一轮迭代循环。

本研究所采用的遗传算子包括以下3种:

① 选择 选择操作采用常用的轮盘赌法,每个个体被选中的概率为:

$$\lambda_\tau = \frac{f_\tau}{\sum f_\tau} \quad (18)$$

式中:  $f_\tau$  为个体  $\tau$  的适应度函数。

② 交叉 本研究在处理两类染色体时,采用不同的操作方法对基因冲突进行检测与调整。在处理 I 类染色体即停靠站组合问题时,选用常规的交叉方式,选取两条染色体并随机在染色体基因位置生成  $a$ 、 $b$ ,交换两条染色体的  $ab$  段基因。在产生新基因后再进行冲突检测,防止出现停靠站点数大于有实际需求的目的地个数,剔除站点数大于目的地个数的染色体,同时复制另外一条染色体以保证种群中染色体的个数。在处理 II 类染色体时,在一条染色体基因位置随机产生  $a$ 、 $b$ ,且使  $a$ 、 $b$  对应 II 类染色体的基因 0,否则向左或向右移动到最近的 0,然后将选中的字串移到临时染色体的首位,其他依次后移。删去另外一条染色体中与临时染色体相同的基因码,得到后代需要的其他基因码的顺序。按此顺序,从左到右替代临时染色体中没被选中的字串基因码,得到后代染色体。

③ 变异 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  $r < q$ ,则对该基因进行如下变异操作:针对站点组合优化和路

径优化两类问题分别在  $[1, I]$  或者  $[1, n]$  区间中随机生成两个整数  $a$ 、 $b$ ,然后交叉调换  $a$ 、 $b$  位置的基因,产生新的染色体。

### 3 算例分析

以一趟地铁到达后送客为例,采用图 1 所示的 RFT 系统网络,其中路网间距为 0.5 km,有 45 个备选固定停靠站(以地铁站为原点,备选停靠站坐标如表 1 所示)和 10 个服务小区,39 名乘客预约需求情况如表 2 所示,路网中弯道路段距离如表 3 所示。主要参数包括:步行速度为 1.5 m/s,行驶速度为 8 m/s,共 3 辆车,每辆车的容量为 15 人,地铁到达的时间间隔为 12 min,车辆每次停靠的时间为 25 s,每个乘客下车花费时间 1.5 s,费用系数  $C_o$ 、 $C_{iv}$  和  $C_{ov}$  分别为 17、7、10。

表 1 备选停靠站坐标

Table 1 Coordinates of alternate stations

编号	坐标/km	编号	坐标/km
1	(-0.75, -1.00)	24	(-1.00, 0.00)
2	(-0.50, -1.00)	25	(-0.75, 0.00)
3	(-0.25, -1.00)	26	(-0.50, 0.00)
4	(0.20, -1.00)	27	(0.50, 0.00)
5	(0.50, -1.00)	28	(0.75, 0.00)
6	(0.75, -1.00)	29	(1.00, 0.00)
7	(-1.00, -0.75)	30	(-1.00, 0.25)
8	(-0.50, -0.75)	31	(-0.50, 0.25)
9	(0.50, -0.75)	32	(0.50, 0.25)
10	(1.00, -0.75)	33	(1.00, 0.25)
11	(-1.00, -0.50)	34	(-1.00, 0.50)
12	(-0.75, -0.50)	35	(-0.75, 0.50)
13	(-0.50, -0.50)	36	(-0.50, 0.50)
14	(-0.25, -0.50)	37	(0.50, 0.50)
15	(0.00, -0.50)	38	(0.75, 0.50)
16	(0.20, -0.50)	39	(1.00, 0.50)
17	(0.50, -0.50)	40	(-1.00, 0.80)
18	(0.75, -0.50)	41	(-0.50, 0.80)
19	(1.00, -0.50)	42	(0.50, 0.80)
20	(-1.00, -0.30)	43	(1.00, 0.80)
21	(-0.50, -0.30)	44	(-0.75, 1.10)
22	(0.50, -0.30)	45	(0.75, 1.00)
23	(1.00, -0.30)		

注:以地铁站为原点,负数表示备选停靠站在地铁站的西/北方。

表 2 出行者相关信息

Table 2 Information of travelers

编号	坐标	时间窗	所属小区
1	(-0.76,0.57)	3 min59 s	54
2	(-0.88,0.00)	6 min19 s	52
3	(-0.67,0.58)	3 min24 s	54
4	(0.75,-0.17)	3 min30 s	51
5	(-0.80,-0.25)	9 min40 s	50
6	(-0.86,0.55)	3 min30 s	54
7	(0.26,-0.67)	6 min20 s	48
8	(-0.48,-0.78)	8 min41 s	47
9	(-0.57,-0.85)	8 min18 s	46
10	(0.20,-0.50)	8 min12 s	48
11	(0.73,-0.04)	2 min7 s	51
12	(-0.32,-0.90)	5 min23 s	47
13	(0.72,0.88)	7 min38 s	55
14	(0.25,-0.72)	6 min52 s	48
15	(0.50,0.90)	8 min15 s	55
16	(-0.82,0.08)	6 min59 s	52
17	(0.77,-0.05)	2 min13 s	51
18	(0.37,-0.94)	5 min35 s	48
19	(0.85,0.20)	5 min1 s	53
20	(-0.75,0.60)	3 min21 s	54
21	(0.72,1.00)	6 min37 s	55
22	(-0.75,0.66)	4 min58 s	54
23	(0.76,0.08)	2 min28 s	53
24	(0.91,0.00)	3 min26 s	51
25	(0.83,0.97)	6 min14 s	55
26	(-0.75,0.58)	3 min59 s	54
27	(-0.67,-1.00)	7 min31 s	46
28	(-0.71,-0.93)	7 min31 s	46
29	(-0.75,0.06)	5 min27 s	52
30	(0.72,-0.06)	2 min19 s	51
31	(-0.63,-0.88)	7 min39 s	46
32	(0.60,0.00)	3 min23 s	53
33	(-0.75,0.52)	2 min26 s	54
34	(0.13,-0.59)	7 min19 s	48
35	(-0.82,0.62)	4 min47 s	54
36	(-0.74,0.10)	6 min57 s	52
37	(-0.52,-0.90)	8 min28 s	46
38	(0.30,-0.69)	6 min13 s	48
39	(-0.05,-0.92)	6 min26 s	47

注:以地铁站为原点,负数表示出行者在地铁站的西/北方。

表 3 弯曲路段的距离

Table 3 Distance of curved sections

路段	距离/km	路段	距离/km
40-44	0.45	0-36	0.75
41-44	0.45	0-37	0.75
42-45	0.40	1-7	0.40
43-45	0.40	6-10	0.40

3.1 协调优化的计算结果

本研究利用 Floyd 算法求解各点之间的最短距离与路径,并基于 Python 编程求解双层模型。用外层遗传算法求解最优停靠站组合,设定变异概率为 0.01,个体间交叉概率为 0.6,种群数为 60,最大迭代次数为 100;用内层遗传算法规划最优路径,设定变异概率为 0.01,个体间交叉概率为 0.6,种群数为 30,最大迭代次数为 50。求解结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 协调模式下乘客的安排与成本

Table 4 Passenger arrangement and cost in coordination mode

目的地 编号	服务 车辆	下车 站点	平均步行 距离/km	平均行程 时间
46	A	8	0.21	4 min16 s
47	A	8	0.25	5 min22 s
48	A	16	0.20	3 min41 s
49	—	—	—	—
50	C	25	0.30	8 min13 s
51	B	28	0.10	2 min40 s
52	C	35	0.25	4 min52 s
53	B	28	0.15	3 min14 s
54	C	35	0.10	3 min12 s
55	B	42	0.25	7 min9 s

车辆 A 行驶路径为 0-15-16-15-14-13-8-13-14-15-0,48 号小区的乘客在 16 号停靠站下车,46 号和 47 号小区的乘客在 8 号停靠站下车,全程行驶时间为 5 min12 s。车辆 B 行驶路径为 0-27-28-27-32-37-42-37-0,51 号和 53 号小区的乘客在 28 号停靠站下车,55 号小区的乘客在 42 号停靠站下车,车辆行驶时间为 7 min4 s。车辆 C 行驶路径为 0-36-35-34-30-24-25-26-0,50 号小区的乘客在 25 号停靠站下车,52 号和 54 号小区的乘客在 35 号停靠站下车,行驶时间为 6 min53 s。3 辆接驳车辆共运输 39 名乘客,RFT 系统总费用为 1 296。该案例可以证明模型的可行性和有效性。

表 5 协调模式下车辆的安排与成本

Table 5 Vehicle arrangement and cost in coordination mode

车辆	路径	停靠站	服务小区	人数	行驶时间	系统成本
A	0-15-16-15-14-13-8-13-14-15-0	16,8	46,47,48	14	5 min12 s	531
B	0-27-28-27-32-37-42-37-0	28,42	51,53,55	12	7 min4 s	389
C	0-36-35-34-30-24-25-26-0	35,25	52,54,50	13	6 min53 s	376
合计				39		1 296

3.2 仅优化车辆路径的计算结果

当不考虑 RFT 系统与乘客的协调优化时,以小区为单位对乘客需求点进行分析。选择离目的地平均距离最小的停靠站点,并且接驳公交必须

将乘客送达该指定站点,系统根据系统成本最小调整路径规划。相关参数与前文保持一致,计算得到的结果如表 6 和表 7 所示。

表 6 仅优化车辆路径时的车辆安排与成本

Table 6 Vehicle arrangement and cost when only optimizing vehicle routes

车辆	路径	停靠站	服务目的地	人数	行驶时间	系统成本
A	0-27-28-27-37-42-45-42-37-0	28,45	51,53,55	12	8 min44 s	356
B	0-15-16-15-3-2-1-2-3-15-0	16,3,1	48,47,46	14	9 min48 s	623
C	0-36-35-34-30-24-25-24-20-24-25-26-0	35,25,20	52,54,50	13	9 min23 s	418
合计				39		1 397

表 7 仅优化车辆路径时的乘客安排与成本

Table 7 Passenger arrangement and cost when only optimizing vehicle routes

目的地 编号	服务 车辆	下车 站点	平均步行 距离/km	平均行程 时间
46	B	1	0.16	7 min26 s
47	B	3	0.22	6 min26 s
48	B	4	0.20	4 min43 s
49	—	—	—	—
50	C	20	0.26	9 min14 s
51	A	28	0.10	2 min40 s
52	C	25	0.10	5 min54 s
53	A	28	0.15	3 min14 s
54	C	35	0.10	3 min12 s
55	A	45	0.13	6 min37 s

车辆 A 行驶路径为 0-27-28-27-37-42-45-42-37-0,51 号和 53 号小区的乘客在 28 号停靠站下车,55 号小区的乘客在 45 号停靠站下车,全程行驶时间为 8 min44 s。车辆 B 行驶路径为 0-15-16-

15-3-2-1-2-3-15-0,48 号小区的乘客在 4 号停靠站下车,47 号小区的乘客在 3 号停靠站下车,46 号小区的乘客在 1 号停靠站下车,车辆行驶时间为 10 min1 s。车辆 C 行驶路径为 0-36-35-34-30-24-25-26-0,54 号小区的乘客在 35 号停靠站下车,52 号小区的乘客在 25 号停靠站下车,50 号小区的乘客在 20 号停靠站下车,行驶时间为 9 min23 s。RFT 系统总费用为 1 397,与协调优化模式相比,总费用增长了 7.79%。

3.3 比较分析

从 RFT 系统总成本、车辆行驶距离与时间、乘客平均步行距离以及平均行程时间等角度对协调优化与仅优化车辆路径的两种运行模式进行比较分析,结果见表 8。

与仅优化车辆路径模式相比,在协调优化模式下系统总成本下降了 7.23%,车辆平均行驶距离缩短了 0.78 km,行驶时间缩短了 2 min19 s,乘客步行距离增加了 16 m,最大步行距离增加了 42 m,但乘客的平均行程时间缩短了 1 min2 s。

表 8 两种模式的比较

Table 8 Comparison of two modes

模式	系统	车辆(平均)		乘客(平均)		
	成本	行驶距离/km	行驶时间	步行距离/km	行程时间	最大步行距离/km
协调优化模式	1 296	2.36	7 min4 s	0.199	6 min	0.516
仅优化车辆路径模式	1 397	3.14	9 min23 s	0.164	7 min2 s	0.500

4 结论

本研究构建了一个双层规划模型来协调优化车辆路径和乘客的下车站点,上层模型是网络设计模型,用于规划 RFT 车辆路径及其停靠站方案,下层模型是乘客最优下车站点选择模型,主要反映乘客的步行路径选择行为,并利用逆推归纳法设计遗传算法对其进行求解,主要结论如下:

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,与仅优化车辆路径模式相比,协调优化模式下的系统总成本降低了 7.23%。

2) 在乘客需求相同的情况下,与仅优化车辆路径模式相比,协调优化模式下的乘客平均步行距离有所增加,但是车辆平均行驶距离、行驶时间以及乘客的平均行程时间明显缩短,说明协调优化模式明显有效。

在 RFT 系统车辆路径与调度的研究中,同时接送模式更符合实际场景。因此,进一步的研究应考虑同时接送等运营模式,并兼顾系统管理者和乘客效用、车辆路径与调度协调等因素。

〔参考文献〕

[1] Guo Q, Chow J Y, Schonfeld P. Stochastic dynamic switching in fixed and flexible transit services as market entry-exit real options [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 94: 288-306.

[2] Frei C, Hyland M, Mahmassani H S. Flexing service schedules: assessing the potential for demand-adaptive hybrid transit via a stated preference approach [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 76: 71-89.

[3] 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. Co-ordinated optimization of running route and vehicle scheduling for responsive feeder transit [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(1): 68-73.

[4] 卢小林, 潘述亮, 邹难. 复杂路网下灵活接驳公交线路优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(6): 128-134.

LU Xiao-lin, PAN Shu-liang, ZOU Nan. Flexible feeder transit route design in complex road network [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(6): 128-134.

[5] 李沐轩. 需求响应式定制公交线路设计研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018: 27-31.

LI Mu-xuan. Research of demand response of public transport route design [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018: 27-31.

[6] 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 transit scheduling model for personalized travel [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science, 2019, 44(1): 122-126.

[7] 邵文, 贾顺平, 曹文娟. 基于混合车型的灵活型接驳公交线路协同优化研究[J]. 山东科学, 2019, 32(4): 64-73.

SHAO Wen, JIA Shun-ping, CAO Wen-juan. Cooperative optimization of flexible shuttle transit routing in case of various vehicle types [J]. Shandong Science, 2019, 32(4): 64-73.

[8] 张辉, 赵鹏. 基于改进蜂群算法的城市公交网络设计[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(4): 118-124.

ZHANG Hui, ZHAO Peng. Transit network design based on modified beccolony algorithm [J]. Journal of

- Beijing Jiaotong University, 2015, 39(4):118-124.
- [9] 何民,李沐轩,税文兵,等.考虑可靠性和舒适性要求的响应式定制公交线路设计[J].交通工程,2018,18(2):8-12.
- HE Min, LI Mu-xuan, SHUI Wen-bing, et al. The route design of demand-responsive transit in consideration of reliability and comfort [J]. Journal of Transportation Engineering, 2018, 18(2):8-12.
- [10] 潘述亮,卢小林,邹难.灵活型接驳公交路径优化及协同调度模型[J].吉林大学学报:工学版,2016,46(6):1 827-1 835.
- PAN Shu-liang, LU Xiao-lin, ZOU Nan. Route planning and coordinated scheduling model for flexible feeder transit service[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46(6):1 827-1 835.
- [11] 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,2015:16-26.
- GAO Xu-ming. Research on dispatching system of demand-responsive connector with on demand stations [D]. Nanjing: Southeast University, 2015:16-26.
- [12] 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, 2014, 141 (3): 04014028. 1-04014028. 9.
- [13] Yu Y, Machemehl R B, Xie C. Demand-responsive transit circulator service network design[J]. Transportation Research: Part E, 2015, 76:160-175.
- [14] 陈雪珍.基于双层规划的城市轨道交通接驳公交线路研究[D].南昌:华东交通大学,2016:29-34.
- CHEN Xue-zhen. Research of urban rail transit feeder transit routes based on bilevel programming [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016:29-34.
- [15] 任华玲,高自友.动态公交网络设计的双层规划模型及算法研究[J].系统工程理论与实践,2007(5):82-89.
- REN Hua-ling, GAO Zi-you. Research on bilevel model and solution algorithm for dynamic transit design problem [J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2007(5):82-89.
- [16] 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.
- [17] Kechagiopoulos P N, Beligiannis G N. Solving the urban transit routing problem using a particle swarm optimization based algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2014, 21:654-676.
- [18] 谢九勇,符卓,邱萌,等.带多软时间窗 VRP 及其禁忌搜索算法[J].计算机工程与应用,2019,55(6):252-256.
- XIE Jiu-yong, FU Zhuo, QIU Meng. Tabu search algorithm for vehicle routing problem with multiple soft time windows [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(6):252-256.
- [19] 王正武,谭海婷,刘杰.与共享单车相互竞争的响应型接驳公交的票价研究[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2020,17(2):46-53.
- WANG Zheng-wu, TAN Hai-ting, LIU Jie. Pricing study on responsive feeder transit considering the competitive relationship with shared bikes[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2020, 17(2):46-53.