

基于遗传算法的定制公交线路多目标优化

陶 浪¹,马昌喜^{*1},朱昌锋¹,王庆荣²

(1. 兰州交通大学 交通运输学院,甘肃 兰州 730070;2. 兰州交通大学 电子与信息工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:常规公交乘客乘坐舒适度低,消耗时间长,推行定制公交在一定程度上能够缓解此问题.首先,以最小化乘客的出行时间、最小化车辆的油耗为目标函数,考虑车辆容量限制、出行时间约束、出行费用约束等,建立定制公交线路多目标优化模型.其次,采用改进的 NSGA-II 算法(Nondominated Sorting Genetic Algorithm II)求解,采用基于未到达交通节点顺序的自然数编码方法进行编码,采取锦标赛选择策略进行选择操作,采用均匀变异方式进行变异操作.最后以兰州市局部路网进行模拟研究.研究结果表明:运用建立的定制公交线路多目标优化模型及算法,能够快速得到优化路径,并且该路径能同时满足乘客出行时间短及车辆油耗低的要求.

关键词:交通运输规划与管理;路径优化;多目标遗传算法;定制公交;锦标赛选择策略

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Multiojective Optimization of Customized Bus Routes Based on a Genetic Algorithm

TAO Lang¹,MA Chang-xi^{*1},ZHU Chang-feng¹,WANG Qing-rong²

(1. School of Traffic and Transportation,Lanzhou Jiaotong University,Lanzhou 730070,China;
2. School of Electronic and Information Engineering,Lanzhou Jiaotong University,Lanzhou 730070,China)

Abstract: The use of customized buses, to a certain extent, helps to relieve the disadvantages of regular buses, such as low passenger comfort, long travel time and so on. Firstly, a multiobjective optimization model of customized bus routes was established, with minimizing passenger travel time and vehicle fuel consumption being the objective functions, and taking into consideration of the constraints of vehicle capacity, the travel time, and the travel cost. Secondly, the improved NSGA-II (nondominated sorting genetic algorithm II) was used to solve the problem, using the natural number coding method based on arrival traffic node sequence to encode, taking the tournament selection strategy for selection operation, and adopting the uniform mutation for mutating operation. Finally, a simulation study was conducted on the local road network in Lanzhou. The results show that the use of multiobjective optimization model and algorithm of customized bus routes can quickly obtain the optimal route which can meet the requirements of short travel time and low fuel consumption.

Key words: transportation planning and management; route optimization; multi-objective genetic algorithm; customized buses; tournament selection strategy

收稿日期:2016-08-24 学报网址: <http://xb.lzjtu.edu.cn>

基金项目:教育部人文社科项目(15XJAZH002)

第一作者:陶 浪(1993—),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要研究方向为定制公交路网优化研究. E-mail:549085334@qq.com.

通讯作者:马昌喜(1979—),男,湖北汉川人,教授,工学博士,主要研究方向为交通系统优化与决策、智能交通、交通影响评价. E-mail:machangxi@mail.lzjtu.cn.

定制公交又称定制巴士,商务巴士等,它是一种基于 O2O 模式的小区与单位之间一站式直达的新型的交通出行方式,其以安全、快捷、舒适、环保的特点逐渐被社会各层人士接受和认可. 目前已在我国北京、深圳、成都和福州等地试运行. 为了充分发挥定制公交安全、快捷、舒适、环保的优点,必须对其出行路线进行合理的规划. 国内外学者对于定制公交均开展了一定程度的研究. 在国外, Huang 等^[1]提出了用动态树算法,有效地解决合乘问题的动态调度问题;Huang 等^[2]结合遗传算法与模糊控制,提出了一种面向服务架构的智能拼车系统;Hensher^[3]利用多项式 logit 模型,通过对限制条件进行变化,研究了不同限制条件下旅行时间的变化规律,得出限制条件越少,模型的时间节省越大;Wolfson 等^[4]对大规模的出租车搭车服务融合交通信息的实时更新的要求,对车辆的运行路径进行了规划,减少了总行驶距离;Armant 等^[5]提出了一种基于时间窗以及乘客与司机可以相互转换的混合整数规划模型,以最小化总的行驶距离为目标,解决合乘问题. 在国内,张敏捷等^[6]通过对定制公交服务模式的分析,构建了定制公交线路规划模型并采用蚁群算法求解了模型;李彬^[7]介绍了定制公交的优点及在我国城市的具体应用;程立勤^[8]采用基于点线面的层次分析法研究定制公交线网布局并进行实例分析;刘丞^[9]将定制公交归结为车辆路径优化问题,运用 matlab 工具,利用 NY 大学的通勤车实例对其服务路线进行评估,并对不合理路线进行了改进;张露^[10]介绍了城市通勤车区别于普通公交的特点,为车辆路径的优化考虑提供了方向;任诗发^[11]介绍了定制公交的服务模式,分析了优缺点,为合理解决定制公交的服务模式提供了方向;邱丰等^[12]建立了处理预约需求与实际需求的可变式线路合乘问题的数学模型,运用模拟退火算法对预约需求进行了处理,并采取插入第四类乘客的方式,以实际需求为服务目标,运用启发式算法进行了求解,对定制公交的线路优化有一定的指示意义;李小静等^[13]研究了不同风险态度的出行者在不同均衡状态下的路径选择行为,采用路段中随机流量部分服从正态分布,推导出总需求服从正态分布和通行能力服从均匀分布的供需不确定路网的路段和路径时间特征表达式,并采用案例进行验证比较;杨菊花等^[14]将应急物资运输划分两个阶段,在不同的阶段优化偏重点不一样,构建了多式联运运输网络,并以多出救点-单受灾点的问题建立了多目标调度模型,应用 Dijkstra 算法进

行了求解;张薇等^[15]针对出租车随机合成绕行路径选择问题,构建了出租车合成路径选择演化博弈模型,并研究合乘路径的演化稳定策略,分析合乘演化稳定策略的影响因素. 综上所述,现有文献在建立定制公交线路优化模型时,未能同时考虑定制公交公司和乘客的利益,而且是以某单一的出行小区与到达小区为模型,未考虑同一行政区域内不同出行节点之间的上车顺序和不同到达节点之间的下车顺序. 本文拟同时考虑定制公交公司和乘客的利益,以最小化乘客的出行时间以及最小化定制公交单次发车的燃油费为目标,建立定制公交线路多目标优化模型,采用改进的 NSGA-II 算法对模型进行求解.

1 问题描述

有交通出行需求的乘客通过手机 app 等工具提出申请. 运营公司通过收集出行数据,根据定制公交采用的不同车型车辆的容量,决定发车车型及优化出行路线,并将预计等车时长等信息反馈到 app 上.

1.1 符号及参数定义

1.1.1 集合定义

V 为所有的交通节点的集合, $i, j \in V$; S 为所有的交通节点之间的距离的集合, $S = \{d_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$; Q 为提出交通需求的各个节点的乘客的集合, $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$;

1.1.2 参数的定义

i, j 为交通网络中的交通节点; V_{bus} 为定制公交车的运行速度, km/h; d_{ij} 为 $i \rightarrow j$ 的距离, km, $i, j \in V$; t_{ij} 为 $i \rightarrow j$ 的行驶时间, h, $i, j \in V$; \bar{f} 为定制公交每公里的燃油费, 元/km; k 为标定节点 i 的乘客数量的参数; q_i^k 为交通节点 i 的第 k 位乘客; \bar{x} 为出租车每公里运营费用, 元/km; \bar{y} 为乘坐定制公交乘客每公里的费用, 元/km; m 为交通起始节点的个数; n 为交通终止节点的个数;

1.1.3 相关变量的定义

$$d_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j; \\ d_{ij}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

$$z_i^k = \begin{cases} 1, & i \in V, q_i^k \in Q; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

2 模型的建立

在路段上定制公交运营涉及两类交通出行个体. 一类是乘客, 另一类是定制公交的营运者. 乘客作为一个整体, 在坚持定制公交安全、快捷、舒适和环保等优点的基础上, 乘客唯一的诉求就是花费最

短的时间到达其出行的目的地. 对定制公交的营运者而言, 获取经济效益是其不可避开的目的, 所以在维修保养费用, 司机的工资以及车辆的固定损耗等因素难以进一步优化的情况下, 减少定制公交总的燃油费用就是一条可供选择的途径. 基于此, 在行驶路线不重复的条件下, 我们以最小化乘客的出行时间、最小化定制公交的燃油费为目标, 建立定制公交线路的多目标优化模型.

2.1 目标函数

目标 I :乘客的出行时间最小.

假定定制公交在路段上匀速行驶, 给定每位乘客的上下车时间均为 h , 按照车上乘客整体用时最短为依据来建立多目标定制公交模型的乘客的出行时间目标:

$$\min z_1 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n Q_i \frac{d_{ij}}{V_{bus}} + \sum_{i=m}^{m+n} \sum_{j=n}^{m+n} Q_j \frac{d_{ij}}{V_{bus}} + Qh,$$

(3)

式中: Q_i 为 i 节点的上车人数; Q_j 为 j 节点的下车人数; Q 为交通需求节点的总上车人数, $Q = \sum_{i=0}^m Q_i = \sum_{j=0}^n Q_j$.

目标 II :定制公交单次发行的燃油费最小.

为了节约运营成本, 降低定制公交的损耗, 最大化运营公司的效益, 有必要使定制公交发车的燃油费用最小.

$$\min z_2 = \sum_{i=0}^{m+n} \sum_{j=0}^{m+n} \bar{f} d_{ij}.$$

(4)

2.2 约束条件

1) 车辆容量约束

定制公交的车型是固定的, 其核载人数有上限要求, 在车辆行驶时不应该超过该车型的核载人数.

$$Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_n \leq M.$$

(5)

式中: M 为车辆的核载人数.

2) 出行时间约束

乘客在节约出行成本的前提下, 通常情况选择常规公交的交通方式出行. 降低乘客的出行时间成本, 最小化其出行时间, 是定制公交车运营的基本条件.

$$\sum_{i=0}^{m+n} \sum_{j=0}^{m+n} \frac{d_{ij}}{V_{bus}} \leq \sum_{i=0}^m t_i.$$

(6)

式中: t_i 为乘客在相同的路径条件下乘坐常规公交所用时间

3) 乘客乘坐定制公交在未到达其目的地前不下车

$$\sum_i^m z_i^k = Q.$$

(7)

4) 费用约束

乘客乘坐定制公交的花费应小于选择乘坐出租车的费用.

$$\sum_i^{m+n} \sum_j^{m+n} \bar{y} d_{ij} \leq \sum_i^{m+n} \sum_j^{m+n} \bar{x} d_{ij}.$$

(8)

综上所述, 定制公交路径优化模型如下:

$$\min z_1 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n Q_i \frac{d_{ij}}{V_{bus}} + \sum_{i=m+1}^{m+n} \sum_{j=n}^{m+n} Q_j \frac{d_{ij}}{V_{bus}}.$$

(9)

$$\min z_2 = \sum_{i=0}^{m+n} \sum_{j=0}^{m+n} \bar{f} d_{ij}.$$

(10)

$$s.t. \begin{cases} Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_n \leq M; \\ \sum_{i=0}^{m+n} \sum_{j=0}^{m+n} \frac{d_{ij}}{V_{bus}} \leq \sum_{i=0}^m t_i; \\ \sum_i^m z_i^k = Q; \\ \sum_i^{m+n} \sum_j^{m+n} \bar{y} d_{ij} \leq \sum_i^{m+n} \sum_j^{m+n} \bar{x} d_{ij}. \end{cases}$$

(11)

3 算法设计

鉴于多目标优化模型的优化问题属于 np-hard 问题, 利用传统的单目标遗传无法解决, 因此利用效率较高的多目标遗传算法是必然的选择. 上述定制公交线路优化模型目标函数有时间最优及燃油费最优, 属于多目标优化模型. NSGA- II 采用简洁明晰的非优超排序(Non-dominated Sorting)机制, 使得算法有逼近 Pareto 最优前沿的能力, 采用排挤机制保证得到的 Pareto 最优解具有良好的散布. 本文在 NSGA- II 的基础上, 通过对交叉算子系数进行改进, 从而使 NSGA- II 算法在解决此定制公交线路优化模型上更具有优势.

3.1 NSGA- II 算法中的关键技术

1) 非优超排序机制

对于种群中的每个个体都与群体中随机选取的 m 个个体分别进行比较, 统计这 m 个个体中每个目标函数值都优于给定个体的目标函数值的个数. 优越的个数就作为这个个体的多目标优化进化计算的适应值. 适应值越小, 该个体就越接近于 Pareto 解.

2) 快速非支配排序算法

该算法为种群中的每个个体设定两个参数 n_p 和 S_p 并计算其对应的值, n_p 为种群中支配个体 i 的个体数, S_p 为种群中被个体 i 支配的个体集合. 根据每个个体的两个参数 n_p 和 S_p 对个体按照非劣解进行分层.

快速非支配排序算法的步骤:

NSGA - II 的非支配排序算法(FNSA)需要将组合种群 R_i 分成多层的非支配前沿 $F_i(i=1,2,\cdots,k,k$ 为非支配前沿的层数).

Step1:令 $i=1,R_i$ 中任一个体 p ,都将与其它个体进行支配关系比较,并计算支配个体 p 的个体数目以及被个体 p 支配的个体集合 S_p .凡是支配数目 n_p 为0的个体都被分入第1层非支配前沿 F_1 .

Step2:对于 F_i 中的任一个体 p ,将 S_p 集合中的每一个成员 q 的支配数减1.如果 q 的支配计数 n_q 等于零,将 q 分入下一层非支配前沿 F_{i+1} .

Step3:令 $i=i+1$,如果 F_i 非空,则跳转至step2.否则,返回前沿 F_1,F_2,\cdots,F_k 并结束非支配排序.

拥挤距离:目标空间上的每一点与在同层非支配群体中相邻两点之间的局部拥挤距离.假定 I 为与个体同层的所有非劣解的集合, $i\in I$.

计算方法如下:

Step1:在 i 所在的非劣解层数上初始化每个个体的拥挤距离, $d_i=0$.

Step2:将每个个体 i 在对应的目标上进行排序,求解不同目标个体 i 的拥挤距离,根据公式 $d_i=\frac{1}{w}\sum_{k=1}^w|f_k^{i+1}-f_k^{i-1}|$,其中 w 为目标维数, f_k^i 为第 i 个个体在第 k 维目标上排序后的第 k 维目标值.

Step3:边界上的点赋予最大值,确保其进入下一代, $d_i=+\infty,i=1$ 或者 $i=N$.

Step4:将每个个体在不同维目标上进行排序,并选择拥挤距离大的个体进入下一代.

经过上述快速非支配排序以及对拥挤距离的计算之后,群体中的每个个体都具有两个特征参数,非支配前沿 F_i 和在不同维目标上的拥挤距离 d_i ,这样就明确了群体中任意两个个体之间的支配和非支配关系.

3.2 定制公交多目标路线优化的算法构造

3.2.1 编码与解码

自然数编码在求解路径的优化问题时便于运用求解问题的特点,便于遗传算法与相似算法之间的混合使用.本文运用自然数编码方法,提出一种基于未访问节点顺序的编码方法.

从定制公交多目标路线优化模型节点访问顺序的特殊性出发,对路网中的交通节点用自然数对节点随机编号,按照自然数顺序放在集合 Z 中, $Z=\{1,2,\cdots,n\}$.规定在访问完一个节点之后就在节点

集合 Z 中去掉,则用第 $i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 个访问的节点 p_i 在所有未访问节点 $Z\in\{1,2,\cdots,i-1,i+1,\cdots,n\}$ 中的对应位置序号 $w_i(1\leq w_i\leq n-i)$ 就可以表示具体访问的节点,分别用集合 A,B 储存已经访问的节点和未访问的节点, $Z=A\cup B$. Z 中所有的节点遍历完全后,将全部 w_i 顺序排列在一起就表示一条路线的编码,并用 W 来储存.

假如有一条路线中有7个节点,对7个节点随机编号,其中一条路线的访问顺序为 $R=(3\ 1\ 7\ 6\ 5\ 4\ 2)$, $Z=(1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7)$,编码方法如图1所示.

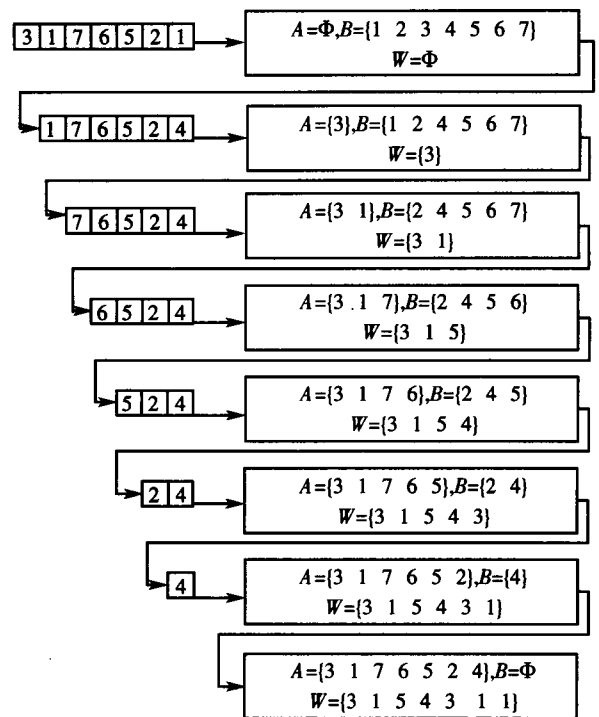


图 1 定制公交车访问顺序编码

Fig. 1 Access sequence coding of customized buses

若某条访问路线的编码 $W=\{3\ 1\ 5\ 4\ 3\ 1\ 1\}$, R 表示访问路线, Z 表示未解码的小区顺序排列,解码过程如图2所示.

访问的路线不同,乘客的出行时间不同,定制公交车的单次发车的油耗不同.对每条访问路线进行编码、解码,在所有的路线中搜索乘客出行时间最少并且公交车的油耗最少的路线.

3.2.2 选择操作

利用定制公交线路的个体特征,非支配前沿和拥挤距离,对个体进行选择.随机选择两个个体 i 和 j ,如果 $F_i < F_j$ 或者 $F_i = F_j$ 并且 $d_i > d_j$,那么个体 i 优于个体 j ,选择 i 进入种群,否则选择 j 进入种群.重复操作直到达到规定的种群数量.

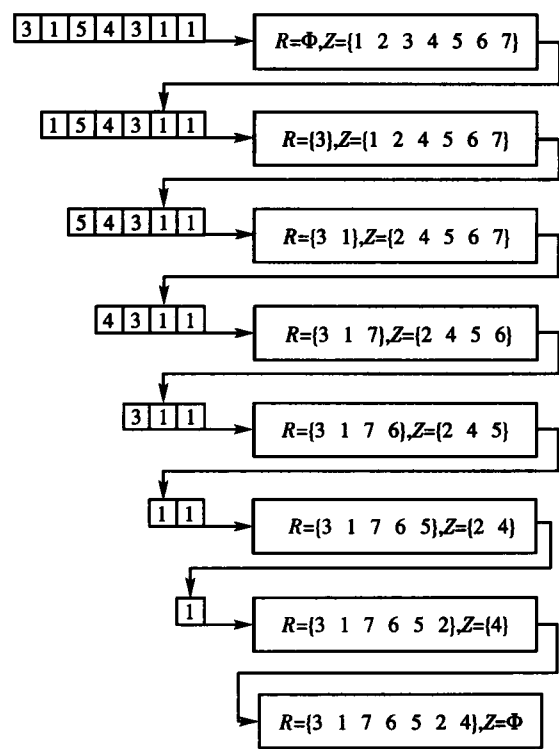


Fig. 2 Access sequence decoding of customized buses

3.2.3 交叉操作

鉴于采用的编码方式,考虑单点交叉产生的个体都对应着一个可行解,通过改进交叉算子大小来完成交叉操作.

3.2.4 变异操作

在满足个体进行变异操作之后,产生的新个体对应一条具有实际意义的路线的前提下,本文采用常规变异的均匀变异算子.

3.3 算法的步骤与流程

Step1:随机生成定制公交模型解的初始群体 $P(t)$, $t=0$,种群大小为 Popsiz

Step2:对 $P(t)$ 进行快速非选择排序,计算个体之间的拥挤距离;

Step3:对 $P(t)$ 进行遗传操作;

Step4:产生子代群体 $Q(t)$,合并 $Q(t)$ 和 $P(t)$,得到 $R(t)$.

Step5:对 $R(t)$ 进行快速非选择排序,计算拥挤距离.根据精英保留策略,更新父代种群,得到 $P(t+1)$.

Step6:判断算法的终止条件,若达到循环的代数则算法停止,输出定制公交优化模型的 Pareto 解,否则 $P(t)=P(t+1)$,转到 step2.

流程如图 3 所示.

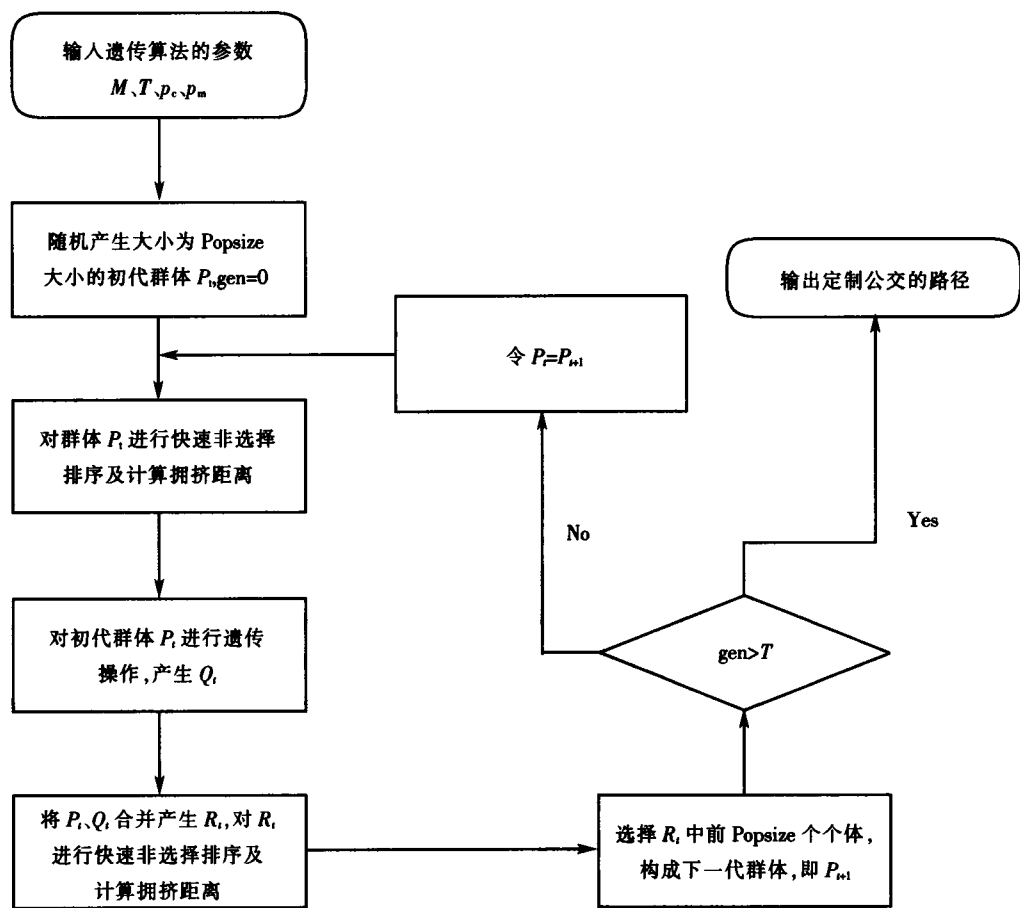


Fig. 3 Algorithm flowchart

4 实例研究

本文在兰州市安宁区的休闲住宅区和城关区的商务工作区随机选择 7 个交通节点,检验本文建立的模型与算法的合理性及有效性.始发节点选择兰州植物园、安宁科教城、十里店,到达节点选择西关

十字、东方红广场、火车站、五泉山公园.定制公交的出发点位于刘家堡广场.为了方便与普通公交车以及出租车进行比较,各个交通小区之间的路段长度选择普通公交的行驶路径,在地图上运用测量工具得到,具体如表 1 所列.

空间位置分布抽象在图纸上,如图 4 所示.

表 1 上车点、下车点之间的距离
Tab. 1 Distance between up-point and down-point

上车点、下车	距离/km	上车点、下车点	距离/km
刘家堡↔植物园	1.6	科教城↔火车站	16.3
刘家堡↔科教城	3.4	科教城↔五泉山公园	13.5
刘家堡↔十里店	5.2	十里店↔西关十字	8.1
植物园↔科教城	4.3	十里店↔东方红广场	10.8
植物园↔十里店	6.0	十里店↔火车站	13.6
科教城↔十里店	2.7	十里店↔五泉山公园	10.8
植物园↔西关十字	14.0	西关十字↔东方红广场	2.7
植物园↔东方红广场	16.4	西关十字↔火车站	4.8
植物园↔火车站	19.7	西关十字↔五泉山公园	3.1
植物园↔五泉山公园	16.9	东方红广场↔火车站	2.9
科教城↔西关十字	12.3	东方红广场↔五泉山公园	2.1
科教城↔东方红广场	13.5	火车站↔五泉山公园	2.2

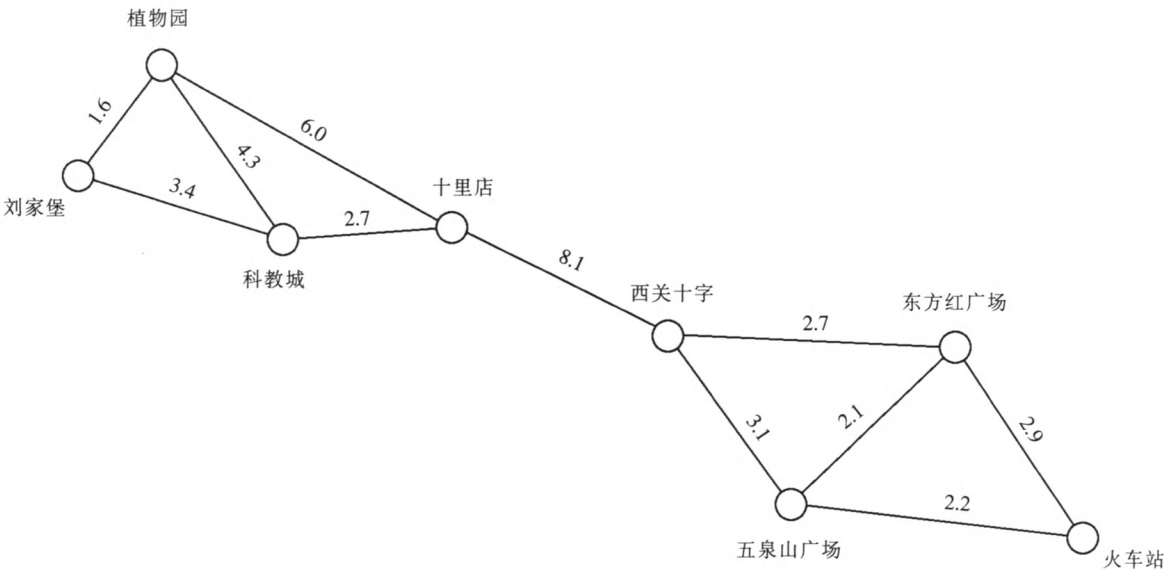


图 4 网络节点空间位置
Fig. 4 Spatial position of the network nodes

对各交通小区的交通 OD 做如下假设(考虑定制公交的车容量为 M 并且忽略司机),如表 2 所列.

运用上述算法,依托 visual c++6.0 平台,设置参数 $\text{Max Gen}=500, \text{Popsiz}=50, P_c=0.6, P_m=0.1, V_{\text{bus}}=30 \text{ km/h}, \bar{f}=0.5$,通过编写代码寻找定制公交线路的最优方案.通过程序,找到此问题的 Pareto 解. Pareto 解就是经过优化获得的定制公交线路.费用参照北京市定制公交商务班车收费标准计算得到.结果如表 3~4 所列.

表 2 上车人数与下车人数 Tab. 2 Number of people getting on and off the buses			
上车点(编号)	人数	下车点(编号)	人数
刘家堡广场(0)	0	西关十字(4)	14
植物园(1)	13	东方红广场(5)	9
科教城(2)	16	火车站(6)	13
十里店(3)	11	五泉山公园(7)	4

表 3 定制公交行驶线路
Tab. 3 Routes of customized buses

Pareto 解	访问顺序	(总乘车时间/人均在车时间)/min	路径距离/km	费用/元
1	0-1-2-3-4-5-6-7	1 173.0/29.3	22.9	13
2	0-1-2-3-4-5-7-6	1 145.8/28.7	23.2	13

表 4 乘坐常规公交与出租车的费用与时间
Tab. 4 Cost and time for taking regular buses and taxis

	平均费用/元	平均时间/min
常规公交	2	59.4
出租车	41.57	25.3

由表 3~4 可知,常规公交较之定制公交,其平均费用 2 元小于定制公交的费用 13 元(Pareto1 和 Pareto2),不过出行时间比定制公交的人均出行时间长;定制公交时间消耗与出租车相仿,但出行费用高于定制公交的费用。相比常规公交,对于此两组 Pareto 解,定制公交人均节省出行时间分别为 36.5 min(Pareto1),36.2 min(Pareto2);较之出租车,对于此两组 Pareto 解,定制公交均节省出行费用 28.57 元。可见,定制公交在价格上高于常规公交,但出行时间短;在出行时间上略大于出租车,但出行成本低。因定制公交快捷,舒适,安全,高效的优点,通过对行驶路线的仔细规划,能节约公交车的燃油费用,减少乘客的出行时间。

5 结论

1) 本文综合考虑车辆容量、出行时间、费用及乘客未到达目的地不下车等约束条件,以乘客出行时间最小,定制公交单次发行的燃油费最少为目标,建立了多目标定制公交线路优化模型。

2) 设计了解定制公交线路优化模型的多目标遗传算法,通过遗传算法获得模型的可行解,给出了定制公交的行驶路线与不同行驶路线下每位乘客的出行费用和平均时间消耗。与采用常规公交及出租车的出行方式对应的出行时间与出行费用进行对比,凸显合理规划定制公交线路能够节约出行车本,节约乘客出行时间的优点。

参考文献:

[1] HUANG Y,BASTANI F,JIN R M,et al. Large scale realtime ridesharing with service guarantee on road networks[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2014,7(14):2017-2028.

[2] HUANG S C,JIAU M K,LIN C H. A genetic-algorithm-based approach to solve carpool service problems in cloud computing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2015,16(1):352-364.

[3] HENSHER D A. The valuation of commuter travel time savings for car drivers: evaluating alternative model specifications[J]. Transportation,2001,28(2): 101-118.

[4] WOLFSON O,ZHENG Y, MA S. T-share: A large-scale dynamic taxi ridesharing service[C]//IEEE International Conference on Data Engineering. IEEE Computer Society,2013:410-421.

[5] ARMANT V,BROWN K N. Minimizing the driving distance in ride sharing systems[C]//IEEE, International Conference on TOOLS with Artificial Intelligence. IEEE Computer Society,2014:568-575.

[6] 张敏捷,冯偲,吕晨曦,等. 定制公交线路优化模型及求解算法[C]//中国智能交通年会. 2014.

[7] 李彬. 定制公交与定制公交客车的研究[D]. 西安:长安大学,2013.

[8] 程立勤. 基于点线面层次分析法定制公交线网布局[J]. 大连交通大学学报,2014,35(3):23-26.

[9] 刘丞. 通勤车路径优化问题研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013.

[10] 张露. 城市通勤商务班车运营模式研究[D]. 西安:长安大学,2014.

[11] 任诗发. 定制公交公共交通服务创新模式调研[J]. 汽车与配件,2014(21):39-41.

[12] 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,2014,44(5):1078-1084.

[13] 李小静,牟海波,马昌喜. 基于不同风险态度的用户均衡状态路径选择[J]. 兰州交通大学学报,2016,35(1):116-123.

[14] 杨菊花,朱昌锋. 基于Ⅱ阶段法的应急物资运输路径选择[J]. 兰州交通大学学报,2013,32(1):133-137.

[15] 张薇,何瑞春. 出租车合乘路径演化博弈分析[J]. 兰州交通大学学报,2015,34(6):70-76.

(责任编辑:李爱军)