

引入车辆窗的定制公交线路优化

岳昊¹, 常笑¹, 刘建业^{1,2}, 曲秋蒨³

(1. 北京交通大学综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044; 2. 沧州市沧县交通运输局公路规划股, 河北沧州 061700; 3. 北京交通运输职业学院城市轨道交通学院, 北京 100096)

摘要: 针对多车型定制公交线路优化研究中考虑因素不够贴近实际情况的问题, 本文引入车辆窗来研究定制公交线路优化问题。首先, 引入车辆窗概念, 以描述不同公交车辆的发车成本、行驶成本、车辆容量和行驶速度。其次, 构建引入车辆窗的整数线性规划模型, 以乘客时空窗和车辆窗为输入, 以企业运营成本和乘客出行成本最小化为目标。最后, 针对大多采取混合编码所导致站点服务顺序混乱与寻优效率低的问题, 结合模型特点, 设计了包括公交车辆、上车点和下车点的三段式混合编码的遗传算法对模型进行求解, 并在 Sioux Falls 网络开展算例分析。结果表明: 引入车辆窗后能够得到更贴合实际的线路方案, 且车辆的车速比差值越大对方案的影响也越大。

关键词: 交通运输规划与管理; 定制公交; 线路优化; 车辆窗; 遗传算法

中图分类号: U491.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)04-1266-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230710

Customized bus route optimization with vehicle window

YUE Hao¹, CHANG Xiao¹, LIU Jian-ye^{1,2}, QU Qiu-shi³

(1. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Ministry of Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Highway Planning Unit, Cangxian Transportation Bureau Communication, Cangzhou 061700, China; 3. Urban Rail Transit Department, Beijing Vocational College of Transport, Beijing 100096, China)

Abstract: The vehicle window was introduced to the study to address the problem that the factors considered in the route optimization study of multi-vehicle customized bus are not close to the actual situation. Firstly, the concept of vehicle window was introduced to describe the departure cost, travelling cost, vehicle capacity and travelling speed of different type of customized bus. Secondly, an integer linear programming model with vehicle window was constructed. The model has passenger time-space window and vehicle window as input, and the minimization of enterprise operation cost and passenger travel cost as objective. Finally, a three-segment hybrid encoding genetic algorithm including the customized bus, boarding point and alighting point was designed to solve the model according to the characteristics. It solves the problems of chaotic service order and low optimization efficiency caused by hybrid coding in most

收稿日期: 2023-07-07.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019JBM341); 国家自然科学基金项目(71771013).

作者简介: 岳昊(1975-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 交通运输规划与管理, 城市交通工程理论与技术.

E-mail: hyue@bjtu.edu.cn

stations. An example analysis was carried out in the Sioux Falls network. The results show that: The model with vehicle window is more suitable to the actual scheme, and the greater the difference of vehicle speed ratio, the greater the impact on the scheme.

Key words: transportation planning and management; customized bus; route optimization; vehicle window; genetic algorithm

0 引言

定制公交是在一定区域范围内,根据乘客出行需求和交通状况等条件进行线路规划,并提供高效、便捷、舒适的出行服务的新型公共交通服务模式,其运营模式起源于国外共享出行的理念。在汽车共享理念基础上,美国及欧洲的一些城市为乘客出行设置专门的定制公交线路,满足居民出行需求^[1]。Kirby等^[2]通过分析定制公交开行案例,证明了定制公交有利于提高公共交通使用率。国内在定制公交的探索阶段起步较晚,直到2013年北京和青岛才首次开通了定制公交线路^[3]。Liu等^[4]首次分析了定制公交在国内的发展,重点解释了定制公交的设计运营过程。

在定制公交线路优化方面,国内外学者也开展了相关研究。Plum等^[5]引入动态时间和优先关系完善模型,使用遗传算法使得到的车辆路径方案可应用性更强;Chiarot等^[6]提出了适用于任意节点位置数据的启发式定制公交线路生成方法,使模型在应用过程中不受成簇地点的条件限制;王健等^[7]建立了以车辆总运营里程最小为目标,考虑乘客站点约束、车辆容量约束以及乘客出行时间窗的单车型优化模型,并设计了遗传算法求解;胡郁葱等^[8]构建了考虑多起终点、多车型和乘客混载等运行模式的定制公交线路规划模型,并设计了“ $4 \times k \times n$ 位数编码”的遗传算法求解;Guo等^[9]基于乘客出行特征开发了混合整数规划模型来解决单车型多车辆路径问题,并采用遗传算法和分支切割法求解;马昌喜等^[10]构建了以应急定制公交总运行时长最短为目标,以乘客上座率不超过安全阈值为约束的单车型优化模型,并采用遗传算法求解;杨明等^[11]构建了兼顾运营公司和乘客利益、满足多个上下车站点和多车型的定制公交线网优化模型,并采用包含所发出的车辆、各车辆载运的OD对和各车辆行驶路径三部分内容的实数编码遗传算法进行求解;Wang等^[12]以乘客总出行时间最短和企业总运营成本

最低为目标函数,考虑站点乘客人数约束和车辆容量约束,构建了定制公交线路的单车型优化模型,并提出了一个基于NSGA-II算法的两阶段法求解模型;Ma等^[13]针对不确定条件下定制公交线路优化问题,构建了以最小化乘客出行时间和定制客车碳排放为目标的鲁棒优化模型,并设计了基于停车场和上下车站的三段式混合编码的遗传算法求解;杜太升等^[14]建立了考虑柔性时间窗的通勤多车型定制公交线路优化模型,并设计了禁忌搜索算法求解;孙倩^[15]建立了多车场多车型的定制公交线路优化与车型适配模型,并采用混合遗传算法进行求解。

综上所述,目前研究主要关注于单车型定制公交线路优化问题,多车型问题中仅考虑车辆数量、车辆容量、发车成本以及行驶成本其中的一个或多个的组合,并假设不同车型的行驶速度相同,不贴近实际情况。当目标函数涉及乘客行驶时间时,车速设置问题将会影响目标函数的最优值,进而影响最优运输方案的选取。因此,本文引入车辆窗描述不同公交车辆的发车成本、行驶成本、车辆容量和行驶速度,得到更加切合实际的最优方案。此外,现有研究中大多采取公交车辆、乘客上下车站点的混合编码方式,容易导致站点服务顺序混乱,线路寻优难度大以及寻优效率低等问题。基于此,本文采用包含公交车辆段、上车站点段和下车站点段的三段式分开编码方法,对乘客上下车站点分开编码,令公交车辆段的每一个基因代表一个车辆窗,进而提高求解效率。

本文综合考虑乘客与公交企业之间的权衡关系,以降低企业运营成本与乘客出行成本为目标,研究定制公交线路优化问题。首先,引入车辆窗的概念描述不同公交车辆的发车成本、行驶成本、车辆容量和行驶速度;搭建时空网络,将乘客时间窗约束隐形地嵌入时空网中以简化模型。其次,构建定制公交线路优化模型,以企业运营成本和乘客出行成本最小为目标函数。最后,针对模型特点,设计了包括公交车辆、上车点和下车点的

三段式分开编码的遗传算法对模型进行求解,并通过算例对模型和算法进行验证。

1 问题转化

1.1 问题描述

乘客提前一定时间预约出行,并提交自己的基本出行信息,包括上下车位置和期望的下车时间窗;系统根据所有乘客的上下车位置和下车时间窗对乘客-车辆分配、车辆的行驶路线及发车时刻表等做出安排,并将乘客的上下车时间及时反馈给乘客,将问题转化为带有时间窗约束的乘客接送服务车辆路径问题。表1描述了问题的主要输入和输出。

表1 定制公交线路优化问题的输入输出

Table 1 Customized bus route optimization problem input and output

输入			输出	
道路网络	车辆	乘客	车辆	乘客
节点、路段长度	车辆窗	OD、时间窗	停靠站、时刻表、车辆路径、车辆运用数	上下车时刻表、乘客-车辆分配

1.2 时空网络

在乘客出行的规划问题中,一般会采用时间窗的概念表示乘客出行要求的时间范围,包括上车时间窗和下车时间窗,如乘客想要在 $t-s$ 内出发,其上车时间窗可表示为 $[t, s]$ 。

给定一个由 (N, M) 表示的物理运输网络,其中 N 是节点集合, M 是有向弧的集合,点 $i, j \in N$,弧 $(i, j) \in M$ 。用 (V, A) 表示时空网,其中 V 是时空点集合, A 是时空弧的集合,点 $(i, t) \in V$ 表示时刻 t 位于点 i ,弧 $(i, j, t, s) \in A$ 表示时刻 t 从点 i 出发,时刻 s 到达点 j 的时空路径。时间维采用均匀离散时间间隔(如1 min),此时乘客时间窗约束自然地嵌入时间维中,进而简化了模型。

1.3 车辆窗

由于不同类型定制公交车辆的车长、发动机马力、载质量、运行工况以及维修保养花费不同,其车辆容量、发车成本、行驶成本以及行驶速度等属性是不一样的。在实际工程应用中,车辆的车辆容量、发车成本、行驶成本以及行驶速度等不同属性势必会影响到企业的运营成本、乘客的出行时间以及乘客的服务数量,进而影响到最佳线路

优化方案的选取。因此,本文有意将车辆不同属性引入定制公交线路优化研究中,使定制公交线路优化研究更贴合实际,为公交企业制订运营方案提供一定的借鉴作用。

为了在定制公交线路优化模型输入时更好地描述车辆容量、发车成本、行驶成本以及行驶速度等车辆信息,引入车辆窗的概念,即车辆窗就是定制公交车辆的不同属性的集合,包括车辆容量、发车成本、行驶成本以及行驶速度等车辆的属性信息。例如,A型公交车辆的车辆容量为5人/辆,发车成本为10元/次,行驶成本为1元/km,行驶速度为20 km/h,其车辆窗就可以表示为 $[5, 10, 1, 20]$ 。

为了更好地理解车型属性对线路优化的影响,以一个6个节点和6条无向边的小型物理网络为示例进行问题说明,边上的数字表示距离(单位为km),如图1所示。假设有20位乘客早上想要乘坐定制公交出行上班,这20位乘客可以被分为两组,每组乘客的上车点相同,下车点和期望下车时间也相同,所有乘客的出行信息如表2所示。提供3个车型配备方案:方案一采用单车型B;方案二采用车速相同的多车型A、B;方案三采用车速不同的多车型A、B。除方案三的小车型A的平均车速设定为50 km/h外,其余车型参数均参照文献[16]算例中给定的参数,如表3所示。

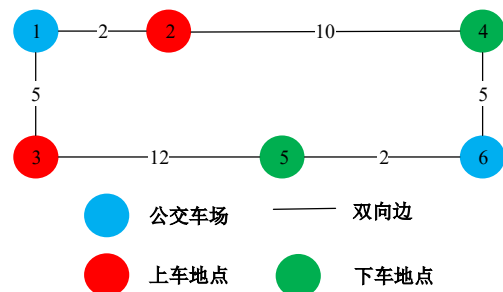


图1 小型物理网络示例图

Fig. 1 Example diagram of a small physical network

表2 乘客的出行信息

Table 2 Passenger travel information

预约乘客数	上车地点	下车地点	期望到达时间
8	2	4	8:00
12	3	5	8:30

根据给定的乘客OD和期望到达时间,分别给出在不同车型配备方案下示例的最优运输方案,企业运营成本为发车成本和行驶成本之和,如表4所示。

表 3 车型配备方案

Table 3 Vehicle configuration scheme

车型	方案一		方案二		方案三
	B	A	B	A	B
车辆数量/辆	1	1	1	1	1
车辆容量/(人·辆 ⁻¹)	15	10	15	10	15
发车成本/(元·次 ⁻¹)	25	15	25	15	25
行驶成本/(元·km ⁻¹)	1.5	1.2	1.5	1.2	1.5
车辆速度/(km·h ⁻¹)	35	35	35	50	35

表 4 不同车型配备方案下的最优运输方案

Table 4 Optimal transportation scheme under different vehicle type configuration scheme

最优运输方案	方案一	方案二	方案三
		B:2-3	A:2-3
发车成本/元	B:4-6	B:4-6	B:4-6
行驶成本/元	50	40	40
企业运营成本/元	33	30	30
乘客总出行时间/min	83	70	70
	384.0	384.0	342.8

由表 4 可知,在给定的需求下,相较于方案一,方案二的企业运营成本下降了 15.7%,方案三的乘客总出行时间减少了 10.7%。相较于采用单车型,采用多车型考虑多属性对定制公交线路优化有显著影响。

在定制公交的实际工程应用中,考虑不同车辆容量可以合理配备运力,避免运力浪费,提高运力利用率;考虑不同的车辆运行成本可以有效降低企业的运营成本;考虑不同的车速可以减少乘客总出行时间,提高乘客整体出行效率,使企业在固定运营时间内服务更多的乘客,进而提高企业的运营收入。因此,考虑车辆容量、发车成本、行驶成本以及行驶速度等车辆的不同属性,即考虑车辆窗对定制公交线路优化具有重要的实际意义。

2 模型建模

2.1 符号说明

本文用到的符号及相关定义如表 5 所示。

2.2 模型构建

在对定制公交线路问题进行优化时,从乘客的角度出发,一般选择总行驶时间最短作为优化目标;从企业的角度出发,一般选择公交企业的运营成本最小、运营车辆数量最少、车辆运行成本最小以及运营收益最大作为优化目标^[17]。本文同

表 5 符号说明

Table 5 Notation and description

符号类别	符号	定义
集合	N	物理网络中节点的集合
	M	物理网络中有向弧的集合
	T	时空网中时空点的集合
	A	时空网中时空弧的集合
	V	车辆集合
	V_m	车型 m 的车辆集合
	P	乘客集合
	A_v	时空网中车辆 v 所属的时空弧的集合
	A_v^p	时空网中车辆 v 对乘客 p 的服务弧的集合
	参数	v
p		乘客索引
k		迭代次数索引
s_p		乘客 p 的上车点
d_p		乘客 p 的下车点
$(i, t), (j, s)$		时空点
(i, j, t, s)		时空弧
ω		权重系数
C_{ijts}^v		车辆 v 经过时空弧 (i, j, t, s) 的运输成本
C_v		车辆 v 单位距离行驶成本
L_{ijts}^v		车辆 v 经过时空弧 (i, j, t, s) 的行驶距离
G_v		车辆 v 的发车成本
C_p		乘客的单位出行时间成本
t_{ij}^p		乘客 p 从 i 点到 j 点的行驶时间
$B_{cap}(v)$		车辆 v 的座位数
t_v^p		车辆 v 到达乘客 p 下车点的时刻
e_p		乘客 p 下车时间窗的上界
l_p		乘客 p 下车时间窗的下界
o_v		车辆 v 的起点
d_v		车辆 v 的终点
e_v	车辆 v 的工作起始时段	
l_v	车辆 v 的工作结束时段	
D	迭代次数	
s	种群规模	
p_c	交叉概率	
p_m	变异概率	
决策变量	x_{ijts}^v	车辆路径变量(如果车辆 v 选择时空弧 $(i, j, t, s), x_{ijts}^v = 1$; 否则, $x_{ijts}^v = 0$)

时兼顾乘客和企业,以企业运营成本和乘客出行成本最小作为优化目标。权重系数 ω 表示企业运营成本和乘客出行成本之间的权衡。

2.2.1 目标函数

目标函数为企业运营成本和乘客出行成本最小,如式(1)所示。其中企业运营成本 Z_1 主要包

括车辆的发车成本和行驶成本,如式(2)所示;乘客出行成本 Z_2 如式(3)所示。

$$\min Z = Z_1 + Z_2 \quad (1)$$

$$\min Z_1 = \omega \cdot \left(\sum_{v \in V} \sum_{(i,j,t,s) \in A_v} C_v \cdot L_{ijts}^v \cdot x_{ijts}^v + \sum_{v \in V} \sum_{(i,j,t,s) \in A_v, (i,t)=(o_v,e_v)} G_v \cdot x_{ijts}^v \right) \quad (2)$$

$$\min Z_2 = C_p \cdot \sum_{\forall p \in P, i=s_p, j=d_p} t_{ij}^p \quad (3)$$

2.2.2 约束条件

(1)需求约束:式(4)确保每一个客户正好被服务一次。

$$\sum_{v \in V} \sum_{(i,j,t,s) \in A_v^+} x_{ijts}^v = 1, \forall p \in P \quad (4)$$

(2)站点约束:式(5)确保只要公交车 v 经过乘客 p 的上车点 s_p , 那么之后必将经过相应的下车点 d_p 。

$$\sum_{i=s_p} x_{ijts}^v = \sum_{j=d_p} x_{ijts}^v, \forall p \in P, v \in V \quad (5)$$

(3)容量约束:式(6)保证一辆公交车服务的乘客数不能超过其座位数,保证每个乘客都有一个座位。

$$\sum_{p \in P} \sum_{(i,j,t,s) \in A_v^+} x_{ijts}^v \leq B_{\text{cap}}(v), \forall v \in V \quad (6)$$

(4)时间窗约束:式(7)保证乘客均在下车时间窗内被公交车辆送至下车点,在模型输入时会提前将此约束嵌入时空网络中简化模型。

$$e_p < t_v^p < l_p, \forall p \in P, v \in V \quad (7)$$

(5)流平衡约束:式(8)和式(9)确保每辆公交车辆在开始时(即 e_v 时刻)离开起点 o_v , 在结束时(即 l_v 时刻)到达终点 d_v 。式(10)保证其他中间节点上的流量平衡。

$$\sum_{(i,j,t,s) \in A_v} x_{ijts}^v = 1, i = o_v, t = e_v, \forall v \in V \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j,t,s) \in A_v} x_{ijts}^v = 1, i = d_v, t = l_v, \forall v \in V \quad (9)$$

$$\sum_{(j,s)} x_{ijts}^v - \sum_{(j,s)} x_{jist}^v = 0,$$

$$(i,t) \notin \{(o_v, e_v), (d_v, l_v)\}, \forall v \in V \quad (10)$$

(6)决策变量约束:式(11)保证变量 x_a^v 的取值为 0 或 1;式(12)保证变量 t_{ij}^p 的取值不小于 0。

$$x_{ijts}^v \in \{0, 1\}, \forall (i,j,t,s) \in A_v, v \in V \quad (11)$$

$$t_{ij}^p \geq 0, \forall p \in P, i = s_p, j = d_p \quad (12)$$

3 求解算法

针对模型特点,本文设计了基于三段式分开编码的遗传算法对所构建的模型进行求解。遗传算法的主要步骤包括编码与解码、种群初始化、适应度函数、选择、交叉、变异等操作。算法流程图如图 2 所示。

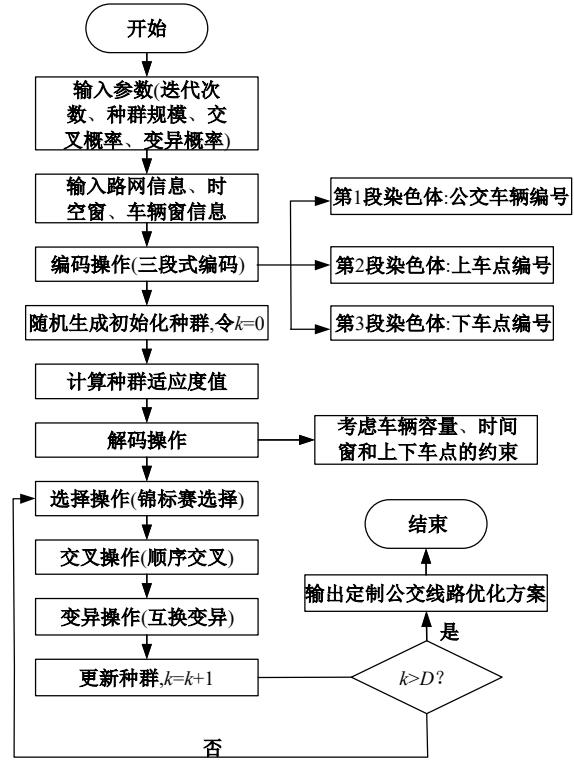


图 2 本文算法流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed algorithm

3.1 编码与解码

本文采用的编码策略是三段式分开编码方式对染色体进行编码,第 1 段染色体由定制公交车辆编号组成,其中每一个基因表示一个车辆窗,包括车辆容量、发车成本、行驶成本以及行驶速度,其染色体长度为车辆总数;第 2 段染色体由定制公交乘客的上车点编号组成,其长度为上车点总数;第 3 段染色体由定制公交乘客相应的下车点编号组成,其长度与上车点总数相等。特别地,当乘客下车点数与上车点数不相等时,需要用乘客相同的下(上)车点补齐乘客下(上)车点数。例如,假设路网中一共有 5 位乘客出行,5 个上车点(编号为 1~5),2 个下车点(编号为 6,7),出行 OD 信息分别为 (1,6)(2,7)(3,6)(4,6)(5,7),则 2 段染色体的长度均为 5,第 1 段染色体可为 1-2-3-4-5,第 2 段染色体可为 6-7-6-6-7。

解码时采用“后推”的方式,即按照“第一段、第 3 段、第 2 段”染色体的顺序进行解码,同时考虑车辆容量、乘客下车时间窗和上下车点的约束。具体为:首先,在第 1 段染色体中按顺序取出第 1 个基因作为第 1 辆车,在第 3 段染色体中按顺序取出第 1 个基因作为第 1 位乘客 a 的 D 点,在第 2 段染色体中相应取出表示乘客 a 的 O 点基因,同时计算第 1 辆车从乘客 a 的 D 点到 O 点再到车场的时间,若该时间不小于 0,则第 1 辆车可服务第一位乘客 a ;之后在第 3 段染色体中按顺序取出下一个基因作为第 2 位乘客 b 的 D 点,若车辆容量约束和乘客 b 的下车时间窗约束都满足,同样计算第 2 辆车到车场的时间,若该时间不小于 0,则将乘客 b 加入当前车辆的行驶线路,直到下一个乘客 p 不满足任一约束为止,得到当前车辆的载客数及行驶路径。

具体编码与解码操作为:假设某路网中有 1 辆 a 型车(容量为 3)、2 辆 b 型车(容量为 1)、2 辆 c 型车(容量为 2),5 位定制公交乘客的上车站点编号分别为 1~5,其对应的下车站点编号分别为 6~10,利用计算机随机生成 1 条三段式混合染色体为 c-b-c-a-b-2-1-5-4-3-9-8-10-6-7,在不考虑乘客下车时间窗的约束下,依照解码规则,可解码为 c-9-8-4-3、b-10-5、c-6-7-2-1。

3.2 种群初始化和适应度函数

为了最大化地保证种群的多样性,以及有效避免遗传算法陷入局部最优解,本算法采用随机方式生成初始种群。首先随机排列乘客的乘车需求生成初始个体;然后根据设置的种群规模生成初始种群。本文的适应度函数即为目标函数,因此适应度值为种群中每个个体的成本。

3.3 选择操作

本文采用多元锦标赛选择的方法。首先,确定每次选择的个体数量(如 2 个);其次,每次从种群中抽取 2 个个体(放回抽样),计算每个个体的适应度值,选择其中适应度最好的进入子代种群;最后,重复该操作(重复次数即为种群规模),直到种群规模和原来的种群规模一样。

3.4 交叉操作

由于本文是车辆路径问题,因此在算法交叉部分,对上车点段染色体分别采用了顺序交叉。首先,随机选择一对个体中几个基因的起止位置;其次,取出其中一个父代起止位置之间的基因生

成子代,并保证该子代被选中基因的位置与父代相同;最后,找出选中基因在另一个父代中的位置,再将其余基因按顺序放入生成的子代中。例如,有 3 辆公交车辆(a、b、c),有 5 个上车点(编号为 1~5),5 个下车点(编号为 6~10),随机产生 2 条染色体,2 段染色体选定的交叉基因起始位置均为第 2 位和第 3 位,则交叉过程如表 6 所示。

表 6 交叉过程

Table 6 Cross process

交叉前	染色体 1	a-b-c - 1-[2,3]-4-5 - 6-7-8-9-10
	染色体 2	b-a-c - 5-[4-3]-2-1 - 10-9-8-7-6
交叉后	子代 1	a-b-c - 1-4-3-2-5 - 6-7-8-9-10
	子代 2	b-a-c - 5-2-3-4-1 - 10-9-8-7-6

3.5 变异操作

根据本文的实际情况,在设计变异算子时,采取重新生成新路径替换原路径的方法,即 2 段染色体分开实行单亲互换变异操作。首先,随机在种群中选取一个个体;其次,根据变异概率确定是否要进行变异操作;最后,若进行变异,则在该个体的 2 段染色体上分别随机选择 2 个基因作为变异点进行互换。例如,有 3 辆公交车辆(a、b、c),有 5 个上车点(编号为 1~5),5 个下车点(编号为 6~10),随机产生 1 条染色体,2 段染色体选定的交叉基因起始位置均为第 2 位和第 4 位,则变异过程如表 7 所示。

表 7 变异过程

Table 7 Variation process

变异前	a-b-c - 1-[2]-3-[4]-5 - 6-7-8-9-10
变异后	a-b-c - 1-4-3-2-5 - 6-7-8-9-10

4 算例分析

4.1 数据说明

算例采用简化的 Sioux Falls 网络,对所建立的模型和算法进行验证。该网络具有 24 个节点和 38 条无向边,边上的数字表示行程时间(单位为 min),车场用蓝点标记,乘客的上车地点和下车地点分别用红点和绿点标记,其他节点用灰点标记,如图 3 所示。路网中共有 30 位乘客希望通过定制公交服务完成通勤活动。考虑到乘客的上班时间是固定的,将乘客到达工作地点的最晚时间设置为 8:00,同时假设乘客可以接受提前 5 个时间单位内(5 min)到达目的地,由此得到乘客的下车时间窗[7:56,8:00]。在程序执行过程中,采用时间差值法,计算最晚时间与最早时间差值,后

重新分配所用的时间。假设最早时间为7:00,则[7:56,8:00]表示为[56,60]。提供2种公交车辆,其中A型公交的车辆窗为[10,15,1.2,30],B型公交的车辆窗为[5,10,1,40]。将 C_p 设定1; ω 设定1。表8列出了30位预约乘客的通勤需求。

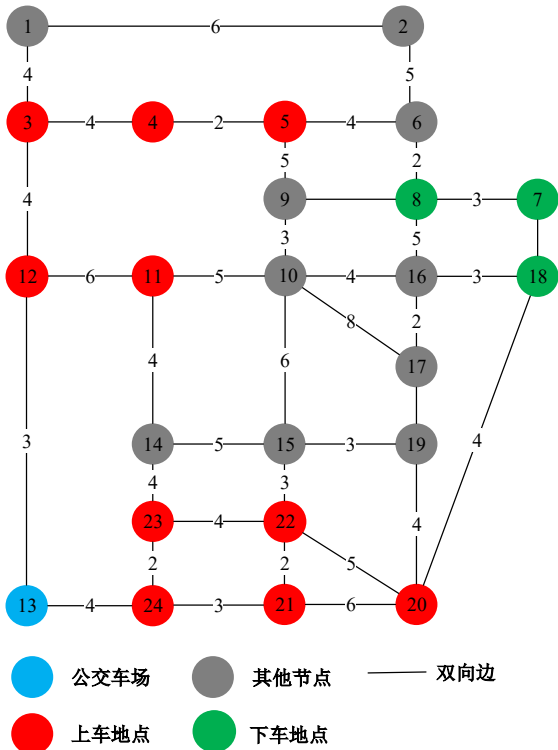


图3 简化的Sioux Falls网络

Fig. 3 A simplified Sioux Falls network

表8 乘客的通勤需求

Table 8 Passenger's commuting demand

乘客预约数	上车地点	下车地点	下车时间窗/min
2	3	7	[56,60]
1	4	8	[56,60]
3	5	18	[56,60]
5	11	8	[56,60]
3	12	7	[56,60]
4	20	18	[56,60]
2	21	7	[56,60]
2	22	8	[56,60]
5	23	7	[56,60]
3	24	18	[56,60]

4.2 算例求解

利用遗传算法求解算例,相关参数赋值如下:迭代次数 $D=200$;种群规模 $S=100$;交叉概率 $p_c=0.8$;变异概率 $p_m=0.2$ 。算例最终求解时间为15.729 s,迭代结果如图4所示。

由图4可知,目标函数在100代后趋于稳定,

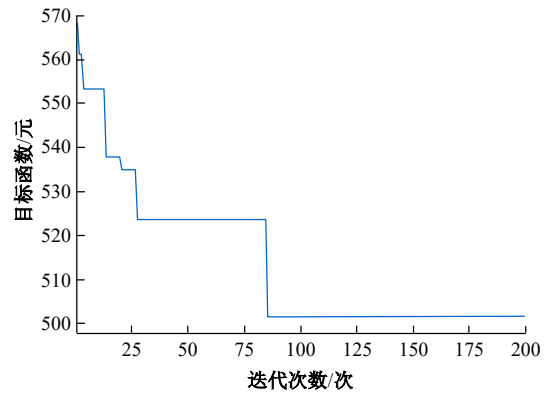


图4 遗传算法迭代曲线

Fig. 4 Optimal solution evolution of genetic algorithm

计算得到的最优目标函数值 $Z=501.8$ 元。企业共使用了2辆A型、4辆B型公交车辆,运送方案如表9所示。

表9 运送方案

Table 9 Transport scheme

发车时间	车型	路径	服务乘客数/人	座位利用率/%	到达时间
7:14	A	13-12-11-4-5-6-8	6	60	8:00
7:16	A	13-24-23-22-20-18-7-8	7	70	8:00
7:21	B	13-24-21-20-18-7	5	100	8:00
7:24	B	13-12-3-4-5-6-8-7-18	3	60	8:00
7:27	B	13-12-3-4-5-6-8-7	5	100	8:00
7:34	B	13-24-21-20-18	4	80	8:00

4.3 影响因素分析

在图3所示的简化的Sioux Falls网络上,保持其他条件不变,进一步分析车型比例、车速比以及乘客时间窗宽度等影响因素的变化对运营效率的影响。设定A型车占比的基准数为50%,通过保证总车数不变的基础上调整A型车占比,分析车型比例变化对运营效率的影响;设定A、B型车的基准车速比为3:4,通过在A型车基准车速的基础上增减B型车的车速来调整二者车速比例,分析车速对运营效率的影响;设定乘客时间窗基准宽度为5,通过在基准时间窗的基础上增加或减少下界若干个时间单位(如1 min)来改变时间窗宽度,分析时间窗宽度变化对运营效率的影响,结果分别如表10~12所示。

由表10可知:在设定的需求条件下,当调整A型车占比为100%时,运用车辆数不变,座位平均利用率下降25.0%,乘客总出行时间增加14.2%,目标函数值增加15.9%,同时企业运营成本增加17.3%;当调整A型车占比为0%,即B

表10 车型占比对运营效率的影响

Table 10 Impact of vehicle type ratio on operational efficiency

车辆组成	运用车辆数/辆	座位平均利用率/%	乘客总出行时间/min	目标函数值/元
A:100%	6(A:6,B:0)	50.0	254.0	581.6
B:100%	7(A:0,B:7)	85.7	207.5	510.5
A:50%, B:50%	6(A:2,B:4)	75.0	222.4	501.8

表11 车速比对运营效率的影响

Table 11 Impact of speed ratio on operational efficiency

车速比/(km·h ⁻¹)	运用车辆数/辆	座位平均利用率/%	乘客总出行时间/min	目标函数值/元
A:B=1:1	7(A:2,B:5)	66.7	254.0	569.2
A:B=3:4	6(A:2,B:4)	75.0	222.4	501.8
A:B=3:5	7(A:1,B:6)	75.0	163.8	464.8
A:B=1:2	7(A:0,B:7)	85.7	142.0	432.2

表12 时间窗宽度对运营效率的影响

Table 12 Impact of time window width on operational efficiency

时间窗宽度	时间窗宽度/min	运用车辆数/辆	座位平均利用率/%	乘客总出行时间/min	目标函数值/元
减少4个单位	1	8(A:1,B:7)	60.0	204.3	542.5
减少2个单位	3	7(A:2,B:5)	66.7	215.2	512.8
不变	5	6(A:2,B:4)	75.0	222.4	501.8
增加2个单位	7	6(A:1,B:5)	85.7	214.6	491.4

型车占比100%时,运用车辆数增加1辆,座位平均利用率提高10.7%,乘客总出行时间减少6.7%,目标函数值增加1.7%,同时企业运营成本增加8.4%。

由表11可知:在设定的需求条件下,当车速比缩小至1:1时,运用车辆数增加1辆,座位平均利用率下降8.3%,乘客总出行时间增加14.2%,目标函数值增加13.4%,同时企业运营成本增加12.8%;当车速比扩大至3:5时,运用车辆数增加1辆,座位平均利用率不变,乘客总出行时间减少26.3%,目标函数值减少7.4%,同时企业运营成本增加7.7%;当车速比扩大至1:2时,运用车辆数增加1辆,座位平均利用率提高10.7%,乘客总出行时间减少36.2%,目标函数值减少13.9%,同时企业运营成本增加3.9%。

由表12可知:在设定的需求条件下,当时间窗较宽松时,乘客出行约束较松弛,乘客间的组合更加灵活,企业运用车辆数越小,座位平均利用率越高,目标函数值越小;当时间窗较紧时,乘客出行约束较严格,企业运用车辆数越大,座位平均利用率越低,目标函数值越大。

综合表10~12可知:在设定的需求条件下,车型比例、车速比及乘客时间窗宽度等影响因素的变化对系统运营效率有显著影响。

5 结束语

针对多车型定制公交线路优化研究中考虑因素不贴近于实际情况,本文提出车辆窗的概念,构建以乘客时空窗和车辆窗为输入,以企业运营成本和乘客出行时间最小化为目标的整数规划模型。针对大多采取混合编码导致站点服务顺序混乱与寻优效率低的问题,设计了三段式分开编码的遗传算法求解模型并利用算例进行验证,并对比分析车型比例、车速比以及乘客时间窗宽度等影响因素的变化对运营效率的影响。结果表明:多车型的方案比单车型的方案更优,多车型能够充分利用运力资源,成本总和更小;多车型的车速比对运营效率有显著影响,且车速比差值越大对方案的影响也越大;在乘客时间窗一定的宽度下,成本总和随时间窗宽度的增加而减小。

参考文献:

- [1] Hamilton B. Wasteful commuting[J]. The Journal of Political Economy, 1982, 90(5): 935-953.
- [2] Kirby R F, Bhatt K U. Guidelines on the operation of subscription bus services[J]. National Technical Information Service, 1974: 432-451.
- [3] 詹海林,董景瞬. 交运集团(青岛)开通"定制公交",真的会成为公交车史上一次革命性创新吗?[J]. 运输经理世界, 2013(9): 20-23.
Zhan Hai-lin, Dong Jing-shun. Qingdao transport Group(Qingdao) launched a "customized bus", will it really be a revolutionary innovation in the history of public transport?[J]. Transport Manager World, 2013(9): 20-23.
- [4] Liu T, Ceder A. Analysis of a new public-transport-service concept: customized bus in China[J]. Transport Policy, 2015, 39(4): 63-76.
- [5] Plum D, Ali H H. An evolutionary approach to vehicle routing problem with dynamic time and prece-

- dence relationships[J]. Journal of Computational Methods in Sciences & Engineering, 2005, 5(Sup. 1): 57-66.
- [6] Chiarot G, Silvestri C. Multi-line customized bus planner for on-demand origin-destination travel requests[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Management of Digital EcoSystems, Beijing, China, 2022:84-87.
- [7] 王健, 曹阳, 王运豪. 考虑出行时间窗的定制公交线路车辆调度方法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(5): 143-150.
Wang Jian, Cao Yang, Wang Yun-hao. Customized bus route vehicle schedule method considering travel time windows[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(5): 143-150.
- [8] 胡郁葱, 陈栩, 罗嘉陵. 多起终点多车型混载的定制公交线路规划模型[J]. 广西师范大学学报:自然科学版, 2018, 36(4): 1-11.
Hu Yu-cong, Chen Xu, Luo Jia-ling. Network design model of customized bus in diversified operation of multi-origin-destination and multi-type vehicle mixed load[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(4): 1-11.
- [9] Guo R G, Guan W, Zhang W Y. Route design problem of customized buses: mixed integer programming model and case study[J]. Transportation Engineering Part A: Systems, 2018, 144(11):1-14.
- [10] 马昌喜, 王超, 郝威, 等. 突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 89-99.
Ma Chang-xi, Wang Chao, Hao Wei, et al. Emergency customized bus route optimization under public health emergencies[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 89-99.
- [11] 杨明, 黄乐. 面向早高峰通勤客流的多车型定制公交线网优化[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2020, 17(3): 71-78.
Yang Ming, Huang Le. Network optimization of multi-vehicle-type customized bus for commuting demand during morning peak hour[J]. Journal of Changsha University of Technology(Natural Science Edition), 2020, 17(3): 71-78.
- [12] Wang C, Ma C X, Xu X C. Multi-objective optimization of real-time customized bus routes based on two-stage method[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 537: No. 122774.
- [13] Ma C X, Wang C, Xu X C. A multi-objective robust optimization model for customized bus routes[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2359-2370.
- [14] 杜太升, 陈明明. 考虑时间窗的通勤定制公交线路优化[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(1): 152-163.
Du Tai-sheng, Chen Ming-ming. Optimization of customized bus routes for commuting considering time windows[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2023, 21(1): 152-163.
- [15] 孙倩. 城市定制公交线路优化与车型适配[D]. 西安: 长安大学运输工程学院, 2022.
Sun Qian. Urban customized bus service design for jointly optimizing bus line and mixed fleet size[D]. Xi'an: School of Transportation Engineering, Chang'an University, 2022.
- [16] 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.
- [17] 马昌喜, 郝威, 沈金星, 等. 定制公交线路优化综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 30-41.
Ma Chang-xi, Hao Wei, Shen Jin-xing, et al. Review on customized bus route optimization[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 30-41.