

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20231113002

文章编号:1674-599X(2026)02-0058-08

引用格式:柳伍生,程杰,刘天意,等.接驳城市轨道交通站点的微循环公交网络设计[J].交通科学与工程,2026,42(2):58-65.

Citation: LIU Wusheng, CHENG Jie, LIU Tianyi, et al. Design of microcirculation bus networks connecting urban rail transit stations[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(2): 58-65.

## 接驳城市轨道交通站点的微循环公交网络设计

柳伍生,程杰,刘天意,李薇

(长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】覆盖城市交通网络盲区,提升城市交通系统的整体效能,减少交通拥堵,解决居民“最后一公里”出行难题。【方法】首先,从平衡公交企业和乘客两方利益的角度出发,以满足区域内乘客出行需求最大化、系统成本最小化为双目标,考虑微循环公交最大运营长度、单程最长运营时间、发车频率等因素,构建微循环公交网络模型;然后,基于遗传算法对最优微循环公交网络进行求解,并进行算例分析。【结果】与常规公交线路相比,微循环公交线路所满足的出行需求要高出23.0%,且人均出行成本减少6.11元,表明微循环公交线路的服务效率更高。【结论】在道路条件受限的居民小区路段,微循环公交线路能发挥运营优势,大大提升居民通勤的便利性,这对于推动城市的可持续发展以及未来公交都市发展具有重要意义。

关键词:微循环公交;线路设计;遗传算法

中图分类号:U491

文献标志码:A

## Design of microcirculation bus networks connecting urban rail transit stations

LIU Wusheng, CHENG Jie, LIU Tianyi, LI Wei

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

**Abstract:** [Purposes] This paper aims to cover blind spots in urban transportation networks, improve the overall efficiency of urban transportation systems, reduce traffic congestion, and address the “last mile” travel challenge for residents. [Methods] First, from the perspective of balancing the interests of bus enterprises and passengers, the model of microcirculation bus networks was built with two objectives of maximizing the travel demand of passengers in the region and minimizing the system cost, considering factors such as the maximum operating length, maximum one-way operation time, and departure frequency of microcirculation buses. Then the optimal microcirculation bus network was solved based on the genetic algorithm, and an example analysis was conducted. [Findings] The travel demand of microcirculation bus routes is 23.0% higher than that of conventional bus routes, and the per capita travel cost is reduced by 6.11 yuan, which indicates higher service efficiency of microcirculation bus routes. [Conclusions] In residential areas where road conditions are restricted, microcirculation bus routes demonstrate operational advantages, significantly enhancing residents’

收稿日期:2023-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52102405);教育部人文社科规划基金项目(23YJAZH089);湖南省教育厅重点项目(21A0202);湖南省社会科学成果评审委员会课题(XSP2023GLC090)

通信作者:柳伍生(1976—),男,副教授,主要从事交通行为不确定性分析、综合交通枢纽规划与设计等方面的研究工作。

E-mail:lwusheng@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

commuting convenience. This holds crucial significance in promoting urban sustainable development and the future development of public transit-oriented cities.

**Key words:** microcirculation bus; route design; genetic algorithm

我国城市的公共交通网络主要由地面公交和轨道交通两部分组成。轨道交通大多在交通需求量大的地方沿线设站,其线网密度低、覆盖范围小,很难顾及偏远地区。地面公交虽然线网密度和覆盖范围都大,但这些公交线路大多只覆盖主干路。近些年来,随着城市规模的不断扩大,人们的居住需求日益增加,导致越来越多的小区被开发建设,但这些新开发小区周边的次干路、支路却很少被公交覆盖。为了解决小区居民“最后一公里”的出行问题,微循环公交应运而生。

微循环公交线路通常布设在城市公交网络中支路及以下道路的末梢,作为城市公交线网第三级的延伸。微循环公交因其车型小、线路短等特点,其功能定位主要是服务城市轨道交通、常规公交以及公交快线未能覆盖的区域,将住宅小区同商业地区、学校、交通枢纽等客流密集地区连接起来,提高城市公交线网的覆盖率。

国外对于微循环公交线路设计优化的研究起源较早,LÚCIO-MARTINS等<sup>[1]</sup>针对“一对多”服务模式下的公交接驳网络进行研究,并利用启发式算法对所建立的非线性和非凸性整数问题进行了求解;LOWNES等<sup>[2]</sup>以线路运营成本和乘客出行时间成本最小为目标,建立了环形接驳线路模型;AVISHAI<sup>[3]</sup>引入公交潜在需求这一概念,以接驳公交线路所吸引的潜在客流最大为目标,对公交线路进行优化;DAGANZO<sup>[4]</sup>从城市公交系统全局出发,在轴向辐射的公交线路网络中,考虑步行时间、候车时间、在车时间的成本以及公交企业的运营成本,并针对这四类成本建立了实用的数学模型,对网格距离、出发间隔和公交系统网络覆盖率进行优化,以最大限度降低总成本;CIPRIANI等<sup>[5]</sup>在考虑乘客出行时间成本以及公交企业运营成本的同时,还针对公交服务水平不能满足区域出行需求的现象在模型中设置了惩罚系数;KIM等<sup>[6]</sup>总结了常规公交和灵活公交的服务特点,提出了在交通需求低的区域开设需求响应型微循环公交,以乘客的等车时间与在车时间之和最小为目标对线路进行优化求解。

国内对于微循环公交的研究起步较晚,但近些年在线路优化方面也取得了丰硕的研究成果。蒋

冰蕾等<sup>[7]</sup>根据轨道交通接驳的最大客运周转量来选取接驳站点,以最大接驳效率为目标对公交线路进行优化;许旺土等<sup>[8]</sup>以客流吸引力最大为目标建立优化模型,用改进的遗传算法对其进行了求解;张思林等<sup>[9]</sup>以乘客步行时间为影响因素,优化了微循环公交的站点发车间隔和站点布设;潘述亮等<sup>[10]</sup>面向交通需求量低的区域以及有特殊需求的乘客,建立了一套可以实际运用的微循环公交系统设计理论;熊杰等<sup>[11]</sup>提出了公交潜在需求指标,并基于此构建了微循环公交路径优化模型;周向栋等<sup>[12]</sup>以公交公司成本最小化为目标,建立了微循环公交线路优化模型;王顺等<sup>[13]</sup>以多换乘站、多车场协同运营为思路,构建了响应型接驳公交多换乘站、多车场协同的路径与调度协调二阶段模型。

目前,国内外对于微循环公交的研究大多是在考虑时间因素或成本因素的基础上建立模型,然后对线路进行优化的,很少有研究将微循环公交线路的设计和调度优化进行综合考虑<sup>[14-15]</sup>。本文基于此背景,建立了能够同时考虑微循环公交线路设计及发车频率的模型,并利用遗传算法进行了求解,为社区微循环公交线路布设提出了一套可行的方案。

## 1 模型构建

### 1.1 问题描述

我国的小区与国外的“开放式”小区不同,大多为封闭式住宅小区。这种封闭的小区模式导致公交车无法进入小区内部,且小区的外部道路大多都是次干路、支路,而轨道交通以及公交站点通常设置在客流需求大的主干路上。公交站点的服务范围辐射不到小区,导致小区居民想要通过公交出行通常要花费较长的步行时间才能抵达公交站点,这给居民出行带来了极大的不便,因此急需解决“最后一公里”的出行问题。基于此,本文从乘客和公交企业角度出发,构建微循环公交线路模型。

本文所研究的微循环公交线路设计问题与车辆路径优化问题存在一定的相似性,具体可以将问题描述为:在某一区域内存在一个轨道交通站点(换乘枢纽点)和若干个微循环公交候选站点,已知

区域内各站点的乘客出行需求,在综合考虑微循环公交最大运营长度、单程最长运营时间、最大发车频率等约束条件的情况下,求解出满足区域内乘客出行需求最大化、系统成本最小化要求的微循环公交路径。

### 1.2 模型假设

考虑到现实中各种因素的不确定性,现对模型做出如下假设:①微循环公交采用“一对多”的接驳模式;②研究区域内的社区道路具备微循环公交车条件;③微循环公交备选站点已经确定,站点间的客流需求已知;④微循环公交在线路上的行驶速度是恒定的,不会因道路条件、交通状况、司机的驾驶技术等因素而改变;⑤每个微循环公交备选站点至多有一条线路经过;⑥所有线路采用同一车型的微循环公交;⑦微循环公交运营产生的系统成本与运营时间呈正相关关系。

### 1.3 参数说明

模型中使用的参数有: $I = \{0, 1, 2, 3, \dots, n\}$ 为城市轨道交通站点和微循环公交备选站点的集合; $K = \{1, 2, 3, \dots, k\}$ 为微循环公交线路的集合; $D$ 为乘客出行需求集合; $q_{ij}$ 为站点*i*到站点*j*的乘客需求量, $q_{ij} \in D$ ; $f_k$ 为第*k*条线路的微循环公交发车频率; $l_{ij}$ 为站点*i*到站点*j*的距离; $v$ 为微循环公交在线路上的行驶速度; $R_d$ 为单位时间司机成本; $R_b$ 为1辆微循环公交1 km的运营费用; $t_w^{(k)}$ 为乘客的平均等待时间; $R_v$ 为单位时间乘客等车时间成本; $R_m$ 为单位时间乘客的车内时间成本; $M$ 为微循环公交接驳线路条数; $Q$ 为微循环公交车辆容量; $r_{\min}$ 为微循环公交线路开通的最小上座率; $l_{\max}$ 、 $l_{\min}$ 为微循环公交线路单程长度上下限; $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ 为微循环公交发车频率上下限; $T_{\max}$ 为微循环公交单程最长运行时间; $x_{ij}^{(k)}$ 为决策变量,当微循环公交在线路*k*上从站点*i*到站点*j*行驶时, $x_{ij}^{(k)}$ 取值为1,反方向行驶则取值为0。

### 1.4 数学模型

#### 1.4.1 目标函数

构建以服务区域内乘客出行需求最大化和系统成本最小化的双目标函数。

1) 服务区域内乘客出行需求最大化函数  $Z_1$ 。

微循环公交的功能定位是填补城市公交线网盲区、解决居民“最后一公里”出行问题。因此,在微循环公交线路的设计过程中,首先考虑的目标就是最大化地满足覆盖区域内乘客的出行需求。但

考虑到线路运营成本的问题,在线路设计过程中可能不能满足所有乘客的需求。

$$\max Z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{(k)} \cdot q_{ij} \quad (1)$$

2) 系统成本最小化函数  $Z_2$ 。

在微循环公交运营过程中,要在保证区域公交服务水平良好的基础上,尽可能地使系统成本最小。系统成本主要包括公交企业运营成本和乘客出行成本。

公交企业运营成本主要由司机酬劳、车辆磨损、行驶油耗等构成。为了方便计算,可将运营成本分为司机成本和公交运行成本。司机成本与车辆运行时间相关,公交运行成本与公交行驶的路程相关。公交企业运营成本为:

$$C_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{(k)} \cdot (R_d + R_b \cdot v) \cdot f_k \cdot 2 \frac{l_{ij}}{v} \quad (2)$$

乘客出行成本主要包括乘客等车时间成本和乘客车内时间成本。假设乘客的到达服从均匀分布,且不存在乘客因微循环公交满载而滞留的现象,则乘客的等车时间成本与微循环公交的发车频率直接相关,每个乘客的平均等车时间为发车间隔的一半,即

$$t_w^{(k)} = \frac{1}{2f_k} \quad (3)$$

则乘客的等车时间成本为:

$$\begin{aligned} W_1 &= \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{(k)} \cdot q_{ij} \cdot t_w^{(k)} \cdot R_w \\ &= \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{(k)} \cdot q_{ij} \cdot \frac{1}{2f_k} \cdot R_w \end{aligned} \quad (4)$$

乘客的车内时间是指从上车到下车的时间间隔,暂不考虑车辆在站点的停靠时间,则乘客的车内时间成本为:

$$W_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{(k)} \cdot q_{ij} \cdot R_{in} \cdot \frac{l_{ij}}{v} \quad (5)$$

故乘客的出行成本为:

$$C_2 = W_1 + W_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{(k)} \cdot q_{ij} \cdot \left( \frac{1}{2f_k} \cdot R_w + R_{in} \cdot \frac{l_{ij}}{v} \right) \quad (6)$$

最终,系统总成本最小化函数为:

$$\begin{aligned} \min Z_2 &= C_1 + C_2 = \\ &= \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{(k)} \cdot (R_d + R_b \cdot v) \cdot f_k \cdot 2 \frac{l_{ij}}{v} + \\ &= \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{ij}^{(k)} \cdot q_{ij} \cdot \left( \frac{1}{2f_k} \cdot R_w + R_{in} \cdot \frac{l_{ij}}{v} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

1.4.2 约束条件

1) 起点约束。微循环公交的起点必须是轨道交通站点。

$$\sum_{j \in I, j \neq 0} x_{0j}^{(k)} = 1, \sum_{i \in I, i \neq 0} x_{i0}^{(k)} = 0, \forall k \in K \quad (8)$$

2) 站点约束。每个微循环公交站点最多被服务一次。

$$\sum_{j \in I} x_{ij}^{(k)} \leq 1, \forall i \in I, \forall k \in K \quad (9)$$

3) 站点进出路径约束。起点站只出不进,其余站点的进出路径相同。

$$\sum_{j \in I} x_{ij}^{(k)} = \sum_{j \in I} x_{ji}^{(k)}, \forall i \in I, \forall k \in K \quad (10)$$

4) 接驳线路条数约束。微循环公交线路条数的设置应当合理,线路过多会造成运营成本过高,线路过少又会导致服务水平差。

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in I, j \neq 0} x_{0j}^{(k)} = M, \forall k \in K \quad (11)$$

5) 容量约束。微循环公交服务的乘客不能超过公交容量。

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} q_{ij} \leq Q \cdot f_k, \forall k \in K \quad (12)$$

6) 最小上座率约束。考虑到成本因素,微循环公交线路必须满足最小上座率的条件才能开设。

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} q_{ij} \geq Q \cdot f_k \cdot r_{\min}, \forall k \in K \quad (13)$$

7) 线路单程长度约束。

$$l_{\min} \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} x_{ij}^{(k)} \cdot l_{ij} \leq l_{\max}, \forall k \in K \quad (14)$$

8) 线路单程运行时间约束。

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} x_{ij}^{(k)} \cdot \frac{l_{ij}}{v} \leq T_{\max} \quad (15)$$

9) 发车频率约束。

$$f_{\min} \leq f_k \leq f_{\max}, \forall k \in K \quad (16)$$

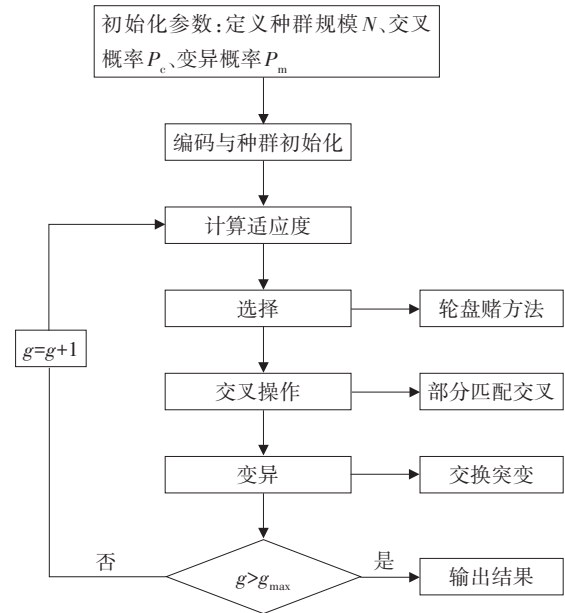
2 模型求解

本研究所构建的模型为双目标规划模型。求解这类问题常用基于偏好的方法,其本质就是通过给两个目标函数赋予相应的权重系数( $\alpha$ 和 $\beta$ ),将其转化成一个新的目标函数。此外,由于这两个目标函数的量纲不一样,需要统一量纲后才能进行下一步求解,在此引入人均出行成本 $\tau$ 的概念对目标函数进行处理,实现量纲的统一。本文定义新的目标函数为线路运营耗费成本,在赋予权重系数时优先考虑的目标是服务区域内乘客需求最大化,在此基

础上再对系统成本最小化目标进行优化,即 $\alpha + \beta = 1$ ,且 $\alpha > \beta$ 。因此,目标函数 $Z$ 的表达式为:

$$\min Z = \beta Z_2 - \tau \cdot \alpha Z_1 \quad (17)$$

本文模型可以看作是有容量限制的车辆路径优化模型,解决此类问题常用的算法有遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等。遗传算法在解决车辆路径优化问题时具有独特的优势和特点:通过全局搜索能力探索解空间,保持种群的多样性以避免陷入局部最优解,利用适应度评估筛选较优解,具有灵活性和可调性,能够根据问题的特点调整参数设置,为寻找到较优的路径规划方案提供了一种高效而有效的求解方法。因此,本文选用遗传算法对上述目标函数进行求解。遗传算法的流程如图1所示。



注:g为迭代次数;g\_max为最大迭代次数。

图1 遗传算法流程图

Fig. 1 Genetic algorithm flow

1) 编码方式。在编码之前,首先对各候选站点进行编号,再采用自然数编码方式对染色体进行编码,自然数编码比二进制编码更加直观、简洁。每条染色体都代表一条线路的布设方案,例如可以用(3,1,7,4,2)表示一条公交线路通过的各站点的顺序,因在本研究中已经默认轨道交通站点为公交线路的首站,故该条线路通过各站点的顺序为轨道交通站点0→公交站点3→公交站点1→公交站点7→公交站点4→公交站点2。

2) 计算适应度。用处理过的目标函数 $Z$ 的倒数来表示适应度函数 $F(x)$ 。

$$F(x) = \frac{1}{Z} \tag{18}$$

3) 选择算子。个体被选择的概率的大小取决于其适应度函数值的大小,适应度函数值越大的个体越容易被选择。本文采用轮盘赌方法,则个体  $x$  被选择的概率  $P(x)$  为:

$$P(x) = \frac{F(x)}{\sum F(x)} \tag{19}$$

4) 交叉算子。本研究中由于每个公交站点至多被服务一次,这表示在染色体中每个整数至多只能出现一次,因此,可以采用部分匹配交叉的方法。具体操作步骤为:首先,随机选取一对染色体相同位置的基因片段进行交换,接着通过映射关系不断替换重复的片段直至没有冲突产生;最后,产生2个新的个体,交叉算子示意图见图2。

5) 变异算子。为了保证种群的多样性,改善遗传算法的局部搜索能力,可预设概率  $P_m$  对个体进行变异操作。具体操作步骤为:随机选取一个个体染色体,将任意2个基因位的基因互换位置形成一个新的个体。变异算子示意图见图3。

6) 不可行解处理方法。建立0-1判断函数,最后输出的路径若能满足所有的约束条件则输出1,否则输出0,并对染色体进行重新编码。

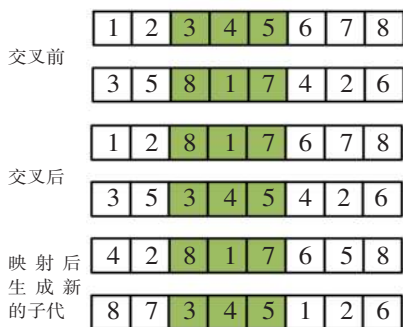


图2 交叉算子示意图

Fig. 2 Crossover operators



图3 变异算子示意图

Fig. 3 Mutation operators

### 3 算例分析

#### 3.1 算例基本数据

假设某研究区域的道路网呈网格状分布,如图

4所示。图4中,一共有19个公交候选站点,其中编号0代表轨道交通站点,相邻节点间的距离为500 m。各候选站点间的距离已知,各候选站点的出行需求见表1。

为了对比微循环公交线路与常规公交线路的优劣,以相同的目标函数和算法运行后进行对比分析。目标函数中的固定参数取值为: $R_d=20$ 元/(人·h), $R_b=3$ 元/(车·km), $R_v=50$ 元/h, $R_m=40$ 元/h, $v=15$  km/h。微循环公交线路参数的取值为:接驳线路的数量为3条, $f_{min}=5$  min, $f_{max}=15$  min, $l_{min}=3$  km, $l_{max}=5$  km,公交容量  $Q$  为20辆。常规公交线路参数的取值为:接驳线路的数量为1条, $f_{min}=5$  min, $f_{max}=20$  min, $l_{min}=6$  km, $l_{max}=8$  km,公交容量  $Q$  为40辆。

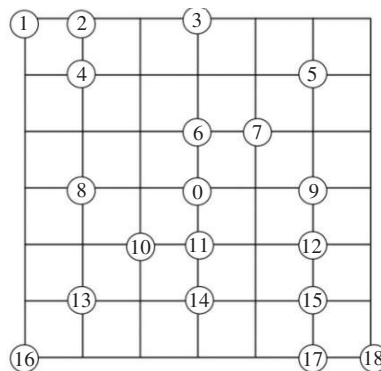


图4 道路网络示意图(算例)

Fig. 4 Road network (example)

表1 候选站点出行需求量

Table 1 Travel demand of candidate stations

站点编号	需求量/人	站点编号	需求量/人
1	36	10	15
2	28	11	25
3	22	12	30
4	27	13	24
5	13	14	26
6	20	15	27
7	27	16	17
8	19	17	29
9	28	18	18

#### 3.2 算例求解及分析

遗传算法的相关参数设定为:种群大小为100,迭代次数为200,交叉概率  $P_c=0.9$ ,变异概率  $P_m=0.05$ , $\alpha=0.6$ , $\beta=0.4$ , $\tau=3$ 。使用MATLAB R2019a软件进行求解,分别得到常规公交和微循环公交的最优线路,结果见表2,常规公交线路和微循环公交线路的流向图分别见图5~6。

表 2 两种公交方案的最优线路

Table 2 Comparison of two bus route design schemes

线路类型	线路数/ 条	线路走向	线路长度/ km	发车频率/ min
常规公交	1	0-6-7-9-12-15-14- 13-8-4-2-1	8	7.5
微循环公 交	3	0-6-3-2-1-4	4	7.0
		0-9-12-15-17-18	3	7.0
		0-11-14-13-8	3	9.0

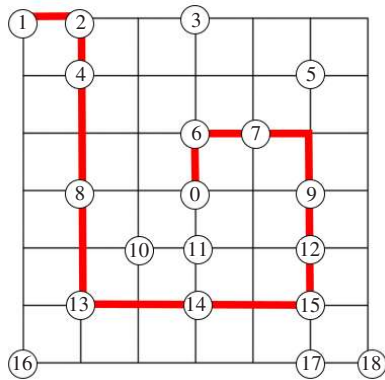


图 5 常规公交线路流向图

Fig. 5 Flow of conventional bus routes

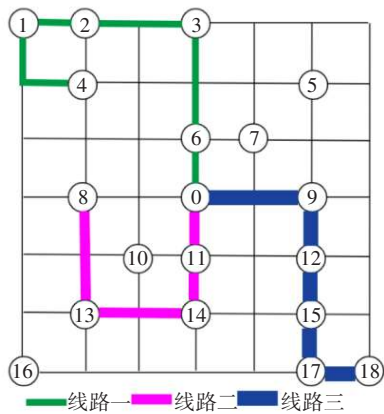


图 6 微循环公交线路流向图

Fig. 6 Flow of microcirculation bus routes

常规公交线路的最优方案共覆盖了 11 个公交站点, 总共服务了 292 名乘客, 占总出行需求的 67.7%, 线路总运营里程为 8 km, 公交企业运营成本为 554.67 元, 乘客出行成本为 4 309.83 元, 系统总出行成本为 4 864.50 元, 人均出行成本为 16.66 元, 乘客平均等待时间为 4 min。

微循环公交线路的最优方案共覆盖了 14 个公交站点, 总共服务了 359 名乘客, 占总体出行需求的 83.3%, 线路运营总长度为 10 km, 公交企业运营成本为 728.00 元, 乘客出行成本为 3 057.89 元, 系统总

出行成本为 3 785.89 元, 人均出行成本为 10.55 元, 乘客平均等待时间为 3.8 min。

从公交企业的角度分析, 可以看到, 虽然微循环公交线路的运营成本比常规公交线路的高, 但微循环公交线路满足的出行需求要比常规公交线路的高 23.0%。从乘客出行角度分析, 可以看到, 微循环公交线路人均出行成本比常规公交线路的低, 这表明微循环公交线路比常规公交线路的服务效率高。这是由于与常规公交相比, 微循环公交的绕行系数更小, 乘客的车内时间也更短, 最终微循环公交线路的乘客出行成本要远比常规公交线路的低。

综合来看, 微循环公交线路的系统总成本比常规公交线路的低得多。因此, 可以判断微循环公交线路方案比常规公交线路方案更优, 其在略微提高公交企业运营成本的前提下, 能够满足更多乘客的出行需求, 并提高服务效率, 这完全符合开设微循环公交的初衷, 即尽可能减小系统成本的同时满足更多的出行需求。

### 3.3 参数灵敏度分析

为了比较在不同参数条件下, 微循环公交线路运营产生的各项成本的变化情况, 本文选取行驶速度  $v$  以及接驳线路条数  $M$  做参数灵敏度分析。

#### 3.3.1 行驶速度 $v$ 的影响

在其他参数不变的前提下, 以一定比例改变行驶速度, 用遗传算法计算目标函数值。不同行驶速度下的目标函数值如图 7~8 所示。

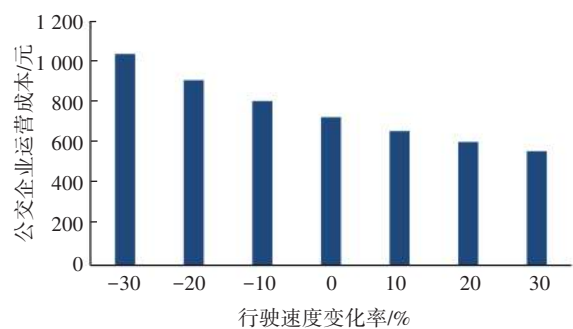


图 7 公交企业运营成本与行驶速度  $v$  的关系曲线

Fig. 7 Relationship between operating costs of bus enterprises and travel speed  $v$

公交行驶速度  $v$  的变化直接影响车辆的行驶时间, 从而间接影响其他量。随着公交行驶速度  $v$  的不断提高, 公交企业运营成本及人均出行成本都在不断减少。公交企业运营成本对行驶速度  $v$  的变化比较敏感, 当行驶速度  $v$  的变化率从 0% 变化到 -30% 时, 公交企业的运营成本从 728.00 元增长到

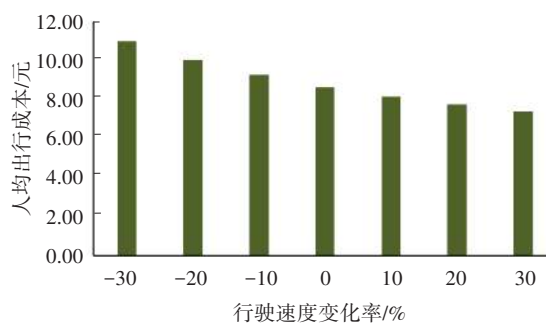


图8 人均出行成本与行驶速度 $v$ 的关系曲线

Fig. 8 Relationship between per capita travel cost and travel speed  $v$

1 040.00元,增加了42.86%,人均出行成本从8.66元增长到11.01元,只增加了27.14%;当行驶速度 $v$ 从0%增加到30%时,公交企业的运营成本从728.00元减少到560.00元,减少了23.08%,人均出行成本从8.66元减少到7.40元,只减少了14.55%。这表明,在一定范围内提高微循环公交行驶速度 $v$ 有利于减少公交企业运营成本和乘客出行成本,提高公交服务质量和乘客出行体验,同时也有利于减少交通堵塞,维持良好的交通秩序。但随着速度的不断增加,公交企业运营成本和乘客出行成本的减小幅度却不断降低,同时速度增加带来的安全风险也越来越大,不利于公交车辆在城市道路上规范、安全行驶。

### 3.3.2 接驳线路条数 $M$ 的影响

在其他参数不变的前提下,改变微循环公交接驳线路条数 $M$ ,利用遗传算法计算目标函数值。不同接驳线路条数下的目标函数值见表3。

表3 不同接驳线路条数对应的各项指标值

Table 3 Index values corresponding to the number of different connecting routes

接驳线路条数	服务乘客数/人	需求满足率/%	公交企业运营成本/元	人均出行成本/元
1	154	36.23	396	10.07
2	221	52.03	511	9.37
3	353	84.10	728	8.64
4	379	89.21	804	8.17
5	402	94.57	861	7.89

由表3可知,随着接驳线路条数的增加,微循环公交能满足更多的出行需求。当接驳线路从1条增加到3条时,出行需求满足率从36.23%增加到84.10%,公交企业的运营成本从396元增加到728元,说明适当增加接驳公交线路的条数可更好地满足乘客的出行需求,而公交企业运营成本的增幅也

不大;当接驳线路从3条增加到5条时,出行需求满足率从84.10%增加到94.57%,公交企业的运营成本从728元增加到861元。综合考虑各项成本,本研究选择3条接驳线路作为最优方案,这将解决研究区域内绝大部分乘客的出行需求。

## 4 结论

本文对国内外微循环公交的研究现状进行了总结,在综合考虑线路设计和调度优化的基础上建立了模型,并设计了遗传算法进行求解,最终得到以下结论:

1) 建立了服务区域内乘客出行需求最大化和系统成本最小化的双目标模型,同时将微循环公交最大运营长度、单程最长运营时间、发车频率等作为约束条件。

2) 通过算例分析,验证了模型与算法的有效性与正确性;与常规公交方案对比分析后发现,微循环公交方案具有更好的服务水平。

3) 灵敏度分析表明,适当地增大行驶速度有利于减小公交企业运营成本和乘客出行成本,提高公交服务质量和乘客出行体验,同时也有利于缓解交通堵塞,维持良好的交通秩序。

微循环公交有着较强的运营活力和服务能力,尤其是在道路条件受限的居民小区路段,可以发挥其运营优势,同时,还可根据不同的客流需求,灵活调整其运营方式。

## 参考文献(References):

- [1] LÚCIO-MARTINS C, VAZ-PATO M. Search strategies for the feeder bus network design problem[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 106(2/3): 425-440. DOI:10.1016/S0377-2217(97)00283-X.
- [2] LOWNES N E, MACHEMEHL R B. Exact and heuristic methods for public transit circulator design[J]. Transportation Research (Part B): Methodological, 2010, 44(2): 309-318. DOI:10.1016/j.trb.2009.07.010.
- [3] AVISHAI C. Public transit planning and operation-theory, modeling and practice [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [4] DAGANZO C F. Structure of competitive transit networks [J]. Transportation Research (Part B): Methodological, 2010, 44(4): 434-446. DOI:10.1016/j.trb.2009.11.001.
- [5] CIPRIANI E, GORI S, PETRELLI M. Transit network design: a procedure and an application to a large urban

- area [J]. *Transportation Research (Part C: Emerging Technologies)*, 2012, 20(1): 3-14. DOI: 10.1016/j.trc.2010.09.003.
- [6] KIM M E, SCHONFELD P. Integration of conventional and flexible bus services with timed transfers [J]. *Transportation Research (Part B: Methodological)*, 2014, 68: 76-97. DOI:10.1016/j.trb.2014.05.017.
- [7] 蒋冰蕾, 孙爱充. 城市快速轨道交通接驳公交线路网规划[J]. *系统工程理论与实践*, 1998, 18(3): 130-134, 139.  
JIANG Binglei, SUN Aichong. Urban rapid rail transit feeder buses routes planning [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 1998, 18(3): 130-134, 139.
- [8] 许旺土, 何世伟, 宋瑞, 等. 基于改进遗传算法的接驳公交线路生成优化模型[J]. *北京交通大学学报*, 2009, 33(3): 40-44, 51. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0291.2009.03.009.  
XU Wangtu, HE Shiwei, SONG Rui, et al. Route generation optimization model for feeder bus based on advanced genetic algorithm [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2009, 33(3): 40-44, 51. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0291.2009.03.009.
- [9] 张思林, 袁振洲, 曹志超. 基于出行成本和运营成本的接驳城市轨道交通社区公交站点布设研究[J]. *北京交通大学学报*, 2016, 40(6): 57-63. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.2016.06.010.  
ZHANG Silin, YUAN Zhenzhou, CAO Zhichao. Study on locating sitting of community shuttle feeder URT based on the user and operator costs [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2016, 40(6): 57-63. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.2016.06.010.
- [10] 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. DOI:10.13813/j.cn11-5141/u.2014.02.009.  
PAN Shuliang, YU Jie, LU Xiaolin, et al. A review of flexible transit service [J]. *Urban Transport of China*, 2014, 12(2): 62-68, 58. DOI: 10.13813/j.cn11-5141/u.2014.02.009.
- [11] 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. DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2014.01.021.
- XIONG Jie, GUAN Wei, HUANG Ailing. 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. DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2014.01.021.
- [12] 周向栋, 匡凯, 梁承愿. 街区制条件下微循环公交网络设计[J]. *交通科学与工程*, 2017, 33(4): 57-63. DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.04.011.  
ZHOU Xiangdong, KUANG Kai, LIANG Chengyuan. Study on bus microcirculation network design under the block system [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2017, 33(4): 57-63. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.04.011.
- [13] 王顺, 刘杰, 姜宁宇, 等. 多换乘站多车场响应型接驳公交的协调优化[J]. *交通科学与工程*, 2021, 37(2): 76-84. DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.012.  
WANG Shun, LIU Jie, JIANG Ningyu, et al. Coordinated optimization of responsive feeder transit with multiple depot and transfer station [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2021, 37(2): 76-84. DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.012.
- [14] 赵泽舟. 大数据背景下公交客流分布及公交线网优化研究: 以嘉兴市为例[J]. *公路与汽运*, 2024, 40(4): 19-22. DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.04.005.  
ZHAO Zezhou. Research on bus passenger flow distribution and bus network optimization under the background of big data: a case study of Jiaxing City [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2024, 40(4): 19-22. DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.04.005.
- [15] 尹梦飞, 柳伍生, 肖娇妍, 等. 不确定需求下基于两阶段鲁棒优化的接驳公交调度模型[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 22(6): 132-143. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20250409001.  
YIN Mengfei, LIU Wusheng, XIAO Jiaoyan, et al. Two-stage robust optimization method for shuttle bus scheduling model under uncertain demand [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2025, 22(6): 132-143. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20250409001.

(责任编辑:石月珍;校对:薛仪)