

城市轨道交通接驳公共汽车线路规划 ——以武汉市为例

卢泽超, 刘霞

(江汉大学物理与信息工程学院, 湖北 武汉 430056)

摘要: 针对公共交通接驳网络优化问题, 通过设计蚁群算法, 构建城市轨道交通接驳公共汽车网络优化模型。该模型考虑公共汽车线路布局约束、乘客接驳需求以及公共汽车运能的相互约束, 按照城市道路级别对公共汽车站进行分级, 提高公共汽车线路规划的灵活性。同时, 根据模型特点设计蚁群算法进行优化, 提高模型收敛速度。以武汉市光谷广场地铁站周边接驳公共汽车网络为例, 该模型对既有网络进行了优化。结果表明: 蚁群算法对分级公共汽车站接驳网络有明显的优化效果, 能够显著降低系统总成本。

关键词: 交通规划; 接驳公共汽车; 线路优化; 蚁群算法

Connecting Bus Lines to Urban Rail Transit: A Case Study of Wuhan

Lu Zechao, Liu Xia

(School of Physics and Information Engineering, Jiangnan University, Wuhan Hubei 430056, China)

Abstract: To strengthen the linkages among public transit services, this paper proposes to an optimization model for connecting bus service network to urban rail transit network with an ant colony algorithm. By considering the constraints of bus network layout and restriction between passenger demand for transfer and bus capacity, the model divides bus stops into different levels based on urban roadway classification to improve the flexibility in bus routes planning. The paper also introduces how to use the ant colony algorithm to optimize the model, which can improve the rate of convergence. Taking the connecting bus network within the surrounding areas of Optics Valley Square subway station as example, the model demonstrates how the bus network optimization works. The result shows that the ant colony algorithm significantly improves the connecting capacity between the classification-based bus network and rail transit, which can reduce the system total cost.

Keywords: transportation planning; connecting bus; bus lines optimization; ant colony algorithm

收稿日期: 2018-10-07

基金项目: 湖北省高校优秀中青年科技创新团队计划项目“智能交通和物流的优化与决策”(T201828)、湖北省大学生创新创业训练计划项目“基于蚁群算法的城市轨道交通接驳公交线路规划”(2018zd039)

作者简介: 卢泽超(1997—), 男, 湖北武汉人, 学士, 主要研究方向: 交通系统建模与优化。

E-mail: oscarluuu@163.com

0 引言

很多城市将提高公共交通出行分担率作为目标纳入城市总体规划中。以武汉市为例, 根据《武汉市城市总体规划(2010—2020年)》, 2020年武汉市人口规模预计达到1 200万人, 公共交通出行分担率上升至40%, 占机动化交通出行比例大于60%^[1]。所以, 优先发展城市公共交通系统的需求非常迫切。2010—2015年, 武汉市公共交通客运量稳步增长, 由2010年20.7亿人次增至2015年

24.1亿人次, 增长了16.4%^[2]。其中, 轨道交通+公共汽车运输能力的加强, 是武汉市城市公共交通系统吸引力提升的主要原因。然而, 由于两种交通方式存在建设时序以及规划不同步的问题, 且公共汽车线路调整往往跟不上区域交通功能设施的更新, 轨道交通与公共汽车在线路上会存在不必要的竞争, 这毫无疑问造成了交通资源的浪费。因此, 只有发挥各自交通方式的功能特性, 优势互补, 使轨道交通与公共汽车交通协同运营, 才能加快公共交通系统一体化发展的进程,

最大化地利用公共交通资源。

国外关于公共交通接驳问题的研究起步很早,从20世纪70年代开始,陆续有学者提出基于不同目标的接驳公共汽车网络模型。早期学者^[3-5]主要基于对线网几何结构和客流需求空间分布的假设,推导接驳系统各组成部分的最优关系,这些假设具有一定局限性。文献[6]以系统中乘客出行费用和运营费用总和最小为目标建立了公共汽车线网设计模型,并采用遗传算法进行求解。文献[7]在模型中考虑用户和运营者的利益,基于成对的插入算法对初始解进行局部改进,解决了原本不可行的有需求约束问题。文献[8]考虑乘客时间成本和车辆使用成本,建立环形接驳线网模型,分别采用精确方法和禁忌搜索算法进行求解。文献[9]综合考虑多方式公共交通网络的各种出行成本并建立模型,采用启发式算法和元启发式算法进行求解。文献[10]构造了一个理想化的支线换乘干线接驳系统,在给定干线车辆发车时间的条件下首次运用连续模型分析案例。

中国对公共汽车接驳问题的研究起步晚于国外,但在前人的研究成果上进行了广泛深入的拓展。文献[11]以轨道交通运营部门成本及乘客使用成本之和最小为目标建立接驳线路优化模型,并采用遗传算法来搜索接驳网络的最优线路。文献[12]主要针对公共交通网络的功能层次以及服务层次进行交通方式之间的划分,进而提出轨道交通开通后接驳公共汽车线网的调整目标、原则以及线网优化模型。文献[13]采用遗传算法对平峰时段接驳公共汽车发车间隔进行优化。文献[14]将动态车辆路径问题应用于城乡公共汽车的线路规划,构建城乡公共汽车动态路径优化模型。文献[15]考虑每条公共汽车线路的车站数量约束以保证公共汽车线路距离的均衡性,并采用人工蜂群算法进行求解。

在以往的研究中,对于接驳公共汽车线路规划的建模,单个公共汽车车站只能承接单条公共汽车线路。而在实际情况中,主干路与次干路的客运需求以及交通量差距较大,因此规定每个车站只接入一条公共汽车线路的建模方式与实际不符。本文在原有研究的基础上,将车站以其所在的道路级别进行分级,以此改进模型。以往的研究主要采用遗传算法求解接驳公共汽车线路规划问题,蚁群算法尚没有被应用于求解此类问题中,其在求解效率和稳定性等方面的性能还没有相关研究。本文根据改进后的模型特点,设计

了蚁群算法求解模型。

1 分级公共汽车站接驳模型

1.1 建模思路

早期的接驳公共汽车网络规划主要考虑单个车站和单条道路只有一条接驳公共汽车线路。但在接驳网络需求范围扩大的情况下,单条接驳公共汽车线路存在无法满足与轨道交通车站距离较远区域的接驳需求,同时由于存在道路分级的情况,主干路与次干路相比往往存在更大的接驳需求量以及交通量。因此,本文在公共汽车接驳网络优化问题的基础上,引入接驳车站分级的概念,对不同等级道路上的公共汽车站设置成对应于道路的分级,将主干路上的车站规定为一级车站,次干路上为二级车站,同时规定一级车站可以接入多条线路。并且本文以最小化乘客的候车与乘车成本以及公共汽车运营企业的运营成本为总目标进行建模。

1.2 模型建立

1.2.1 模型假设

- 1) 每一个一级公共汽车站可以为多条公共汽车接驳线路服务。
- 2) 每一个二级公共汽车站只为一条公共汽车接驳线路服务。
- 3) 每一条公共汽车接驳线路只连接到一个轨道交通车站。
- 4) 每一条公共汽车接驳线路在其上的每一个公共汽车站停靠,不存在跨站停车的形式。
- 5) 公共汽车接驳线路双边对称运行,正反方向线路经由的车站相同。
- 6) 所有接驳公共汽车线路的乘客目的地都为接驳车站,不存在中途下车的情况。

1.2.2 参数定义

对于城市接驳公共汽车网络,记轨道交通车站为0,接驳公共汽车车站数量为 n ,接驳公共汽车线路条数为 N ,主干路条数为 M ,次干路公共汽车站集合为 $B_1 = \{1, 2, 3, \dots, n_1\}$,主干路公共汽车站集合为 $B_2 = \{1, 2, 3, \dots, n_2\}$,接驳公共汽车线路集合为 $K = \{1, 2, 3, \dots, N\}$,接驳公共汽车平均行程速度为 v ,公共汽车车站 i 的接驳出行需求为 q_i ,第 k 条接驳线路从车站 i 至车站 j 车上的所有乘客数量为 q_{ij}^k ,接驳公共汽车最大载客量为 P_{\max} ,接驳公共汽车线

路 k 的发车频率为 f_k ，第 k 条接驳公共汽车线路上相邻车站的平均距离为 L_k ，相邻车站之间的常规距离为 L 。

定义如下 0-1 变量来描述车站与车站、车站与线路之间的从属关系：

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{车站 } i \text{ 和 } j \text{ 在第 } k \text{ 条线路上且相邻} \\ 0, & \text{其他} \end{cases},$$

$$y_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{车站 } i \text{ 在第 } k \text{ 条线路上} \\ 0, & \text{其他} \end{cases},$$

$$m_i^k = \begin{cases} 1, & \text{车站 } i \text{ 是第 } k \text{ 条线路的起点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases},$$

式中： x_{ij}^k 为相邻公共汽车站之间关系的变量； y_{ki} 为公共汽车站与线路之间关系的变量； m_i^k 为公共汽车站是否为线路起点的变量。

1.2.3 约束条件

每条接驳公共汽车线路有且只有一个起始车站：

$$\sum_{i \in B_1 \cup B_2} m_i^k = 1, \forall k \in K. \quad (1)$$

每条接驳公共汽车线路有且仅有相同的一个轨道交通车站(以序号 0 表示)作为终点：

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in B_1 \cup B_2} x_{i0}^k = N, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in B_1 \cup B_2} x_{0j}^k = 0. \quad (3)$$

若公共汽车站 i 被第 k 条接驳公共汽车线路连接，必有下一个相邻的公共汽车站 j 通过第 k 条接驳公共汽车线路与之相连：

$$\sum_{j \in B_1 \cup B_2 \cup 0} x_{ij}^k = 1, \forall i \in B_1 \cup B_2, \forall k \in K. \quad (4)$$

一级车站可以与多条接驳公共汽车线路连接：

$$\sum_{k \in K} y_{ki} \geq 1, \forall i \in B_2. \quad (5)$$

二级车站只能与一条接驳公共汽车线路连接：

$$\sum_{k \in K} y_{ki} = 1, \forall i \in B_1. \quad (6)$$

由于接驳公共汽车网络是以轨道交通车站为中心，呈树状向外扩散，并且由于每条主干路必然有连接次干路的功能，因此每条主干路上至少存在一条接驳公共汽车线路。故接驳公共汽车线路数量存在如下约束：

$$N \geq M. \quad (7)$$

所有经过车站 j 的接驳公共汽车，其输送的乘客量为到达车站 j 之前输送的乘客数量与该车站的接驳需求总和：

$$\sum_{k \in K} \sum_{h \in B_1 \cup B_2 \cup 0} q_{jh}^k x_{jh}^k = \sum_{k \in K} \sum_{i \in B_1 \cup B_2} q_{ij}^k x_{ij}^k + q_j, \forall j \in B_1 \cup B_2. \quad (8)$$

任意接驳公共汽车线路运能不小于该线

路乘客接驳需求的总和，对于一级车站，将其客流需求量平均到每条经过的公共汽车线路上：

$$\sum_{i \in B_1 \cup B_2} \frac{q_i y_{ki}}{\sum_{k \in K} y_{ki}} \leq f_k P_{\max}, \forall k \in K. \quad (9)$$

1.2.4 目标函数

1) 乘客乘坐接驳公共汽车的候车时间成本。

对于每条接驳公共汽车线路，乘客的候车时间成本主要取决于其发车频率，根据文献[16]的研究，乘客的候车时间成本

$$Z_1 = 2C_w \sum_{k \in K} \sum_{i \in B_1 \cup B_2} \frac{q_i y_{ki}}{2 \sum_{k \in K} y_{ki} f_k}, \quad (10)$$

式中： C_w 为乘客在单位时间内候车的时间价值/(元·人⁻¹·h⁻¹)。

2) 乘客乘坐接驳公共汽车的乘车时间成本。

对于每条接驳公共汽车线路，乘客的乘车成本主要取决于车辆的行程速度以及乘客的乘坐距离。乘客的乘车时间成本

$$Z_2 = 2C_t \sum_{k \in K} \sum_{i \in B_1 \cup B_2} \frac{d_{ij} q_{ij} x_{ij}^k}{v}, \quad (11)$$

式中： C_t 为乘客在单位时间内乘车的时间价值/(元·人⁻¹·h⁻¹)； d_{ij} 为车站 i 与车站 j 之间的距离/m。

3) 公共汽车企业的运营成本。

公共汽车运营企业总是期望在满足客流需求的前提下，尽可能降低公共汽车运营成本。公共汽车运营成本主要由车辆运行成本、车辆维修成本、场站维护成本、管理成本四部分组成^[17]。在现有研究中，运营成本的计算可以基于车辆的运营时间^[18]。同时，投入运营的公共汽车数量与线路发车频率呈正相关，因此，公共汽车企业的运营成本

$$Z_3 = 2C_o \sum_{k \in K} \sum_{i \in B_1 \cup B_2} \sum_{j \in B_1 \cup B_2 \cup 0} \frac{d_{ij} x_{ij}^k f_k}{v}, \quad (12)$$

式中： C_o 为公共汽车单位时间的运营成本/(元·车⁻¹·h⁻¹)。

4) 系统总成本。

接驳公共汽车网络的系统总成本包括：乘客乘坐接驳公共汽车的候车时间成本、乘车时间成本，以及公共汽车企业的运营成本，即

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3. \quad (13)$$

本文目标函数为系统总成本最小，即 $\min Z$ ，决策变量为接驳公共汽车站与线路之间的从属关系 x_{ij}^k 和 y_{ki} 。

5) 接驳公共汽车线路的发车频率。

为实现系统总成本最小化, 本文将上述模型变为无约束优化模型, 并对系统总成本求一阶导数为0, 可得第 k 条接驳公共汽车线路的最优化频率

$$f_k = \sqrt{\frac{C_w \sum_{i \in B_1 \cup B_2} q_i y_{ki} v}{2C_o \sum_{i \in B_1 \cup B_2} \sum_{j \in B_1 \cup B_2 \cup 0} \sum_{k_i \in k} d_{ij} x_{ij} y_{k_i}}}. \quad (14)$$

$$f_k = \max \left\{ \frac{C_w \sum_{i \in B_1 \cup B_2} q_i y_{ki} v}{2C_o \sum_{i \in B_1 \cup B_2} \sum_{j \in B_1 \cup B_2 \cup 0} \sum_{k_i \in k} d_{ij} x_{ij} y_{k_i}}, \sum_{i \in B_1 \cup B_2} \frac{q_i k_i L_k}{\sum_{k_i \in k} y_{k_i} P_{\max} L} \right\}. \quad (15)$$

1.3 蚁群算法

针对模型结构, 本文采用蚁群算法, 求解目标函数在约束条件下取得最小值时的决策变量值。

1.3.1 蚁群算法概述与原理

蚁群算法是一种用来寻找优化路径的概率型算法。根据蚂蚁寻找食物的群体行为, 意大利学者 Dorigo M 等于 1991 年在法国巴黎召开的第一届欧洲人工生命会议 (European Conference on Artificial Life, ECAI) 上最早提出了蚁群算法的基本模型^[19]; 1992 年, Dorigo M 又在其博士学位论文中进一步阐述了蚁群算法的核心思想^[20]。将蚁群算法应用于解决优化问题的基本思路为: 用蚂蚁的行走路径表示待优化问题的可行解, 整个蚂蚁群体的所有路径构成待优化问题的解空间。路径较短的蚂蚁释放的信息素量较多, 随着时间推进, 较短路径上累积的信息素浓度逐渐增高, 选择该路径的蚂蚁数量也愈来愈多。最终, 蚂蚁群体会在正反馈的作用下集中到最佳路径上, 此时对应的便是待优化问题的最优解。

1.3.2 算法结构

蚁群算法对于每条线路的搜索基于状态转移概率函数

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 为两个车站之间的信息素函数; $\eta_{ij}(t)$ 为两个车站之间的启发函数; α 为信息启发因子, 表示轨迹的相对重要性; β 为期望启发式因子, 表示能见度的相对重要性, β 值越大, 则该状态转移概率越接近于贪心规则; $allowed_k$ 为符合公共汽车接驳网络优化模型假设原则的下一个可搜索车站

为保证满足公共汽车运能约束的同时尽可能地增大每辆公共汽车的有效行驶距离, 本文在公共汽车运能对发车频率的约束上加入第 k 条线路上相邻车站之间的平均距离与相邻车站之间常规距离的比例, 作为有效行驶距离, 由此第 k 条接驳公共汽车线路的最终最优发车频率

集合。

本文将信息素强度 Q 与目标函数的比值作为信息素函数

$$\tau_{ij}(t) = \frac{Q}{Z}, \quad (17)$$

将车站与车站之间的距离的倒数作为启发函数

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d_{ij}}. \quad (18)$$

在目标解的搜索过程中, 将所有的公共汽车线路连接方式作为搜索空间, 每只蚂蚁通过状态转移函数搜索下一个接入公共汽车线路的车站, 从而对所有车站进行串行搜索。当所有车站都接入公共汽车线路时, 单只蚂蚁的搜索过程结束, 记录信息素强度 Q 与所得解的目标值的比值作为信息素变化量, 再将信息素变化量累加到以 ρ 为挥发系数进行过信息素遗忘的累计信息素上, 然后开始下一只蚂蚁的搜索。当一次迭代中所有蚂蚁搜索完毕, 则通过所得的信息素变化量对每条线路上的信息素函数进行挥发以及更新处理, 然后开始下一次搜索的迭代。当所有的迭代次数结束, 则蚁群算法搜索完毕, 以此得到最优解。

针对模型中一级车站存在多次重复搜索的问题, 本文设计了一级车站伪降级的禁忌搜索策略。具体细节为: 当某一条主干路相关联的次干路上所有的二级车站全部连接进入接驳公共汽车网络时, 将此主干路上的所有一级车站暂时降级为二级车站, 在本次搜索的余下过程中剥夺其可连接进入多条线路的性质, 使后续可行解的搜索更快完成。

1.3.3 算法步骤

采用蚁群算法求解城市轨道交通接驳公共汽车网络优化设计问题的具体步骤如下:

1) 参数初始化。令迭代次数 $N_c = 0$, 设置最大迭代次数 N_{\max} , 设置蚂蚁数量 n , 令有向图上每条边 (i, j) 的初始化信息量

$\tau_{ij}(t) = \text{const}$ ，其中 const 表示常数。

- 2) 循环次数 $N_c = N_c + 1$ 。
- 3) 蚂蚁的禁忌表索引号 $k = 1$ 。
- 4) 蚂蚁数量 $k = k + 1$ 。
- 5) 蚂蚁个体根据状态转移概率函数式

(16)计算的概率选择元素(车站) j 前进， $j \in \{allowed_k\}$ 。

6) 修改禁忌表指针，即选择好之后将蚂蚁移动到新的元素(车站)，并将该元素(车站)移动到该蚂蚁个体的禁忌表中。

7) 若集中的元素(车站)未遍历完，则跳转到4)，否则执行8)。

8) 对原有信息素进行以挥发系数 ρ 为比例的遗忘，再对每条路径更新信息素。

9) 若满足结束条件即如果迭代次数

$N_c \geq N_{\max}$ ，则循环结束并输出程序结果，否则清空禁忌表并跳转到2)。

2 案例分析

2.1 案例背景

根据文献[1]的研究可得，武汉市光谷广场地铁站的轨道交通与公共汽车之间的换乘需求很大，其换乘量超过全市95个轨道交通车站换乘量之和的16%。并且由于此车站处于新开发城区，地理位置偏离城市中心区域，居民长距离出行主要依靠地铁。同时，主要功能性设施也基本位于光谷广场地铁站周围，所以光谷广场地铁站为该城区居民出行的主要交通枢纽。鉴于此，本文将光谷广

表1 武汉市光谷广场地区车站数据

Tab.1 Data of subway station around Optics Valley Square in Wuhan

序号	车站名称	经度	纬度	接驳需求/(人次·h ⁻¹)	车站级别	序号	车站名称	经度	纬度	接驳需求/(人次·h ⁻¹)	车站级别
0	光谷广场地铁站	114.397 169	30.505 76	0		23	叶麻店	114.418 9	30.507 03	92	1
1	光谷街光谷广场	114.402 496	30.503 906	24	2	24	关山大道太阳城站	114.411 247	30.491 051	72	2
2	珞喻路邮科院	114.393 326	30.509 605	126	1	25	创业街大贺村	114.418 968	30.500 978	42	1
3	珞喻路光谷广场	114.403 13	30.506 626	12	1	26	鲁磨路南望山	114.405 067	30.524 193	60	2
4	虎泉街化工学院	114.390 9	30.504 91	44	1	27	珞喻路马家庄	114.377 19	30.517 305	138	1
5	鲁磨路光谷广场	114.399 742	30.511 234	56	2	28	省荣军医院	114.377 703	30.505 965	30	1
6	民族大道上钱村	114.398 521	30.499 773	132	1	29	民族大道纺织大学	114.395 729	30.483 351	162	1
7	鲁磨路曹家湾	114.400 131	30.512 878	36	2	30	虎泉街交通学院	114.373 093	30.509 853	54	1
8	步行街省中医院	114.406 487	30.506 424	20	1	31	光谷大道竹林熊	114.423 531	30.505 165	54	1
9	珞雄路公交场	114.405 624	30.501 593	12	2	32	关山大道职业技术学院	114.410 66	30.485 508	92	2
10	珞喻路吴家湾	114.390 572	30.511 871	138	1	33	八一路鲁磨路	114.408 417	30.526 503	16	2
11	珞雄路枫林上城	114.405 22	30.499 18	118	1	34	楚康路雄楚大道	114.370 522	30.503 542	24	2
12	民族大道时间广场	114.397 644	30.495 907	78	1	35	楚康路康福路	114.370 491	30.501 467	28	2
13	鲁磨路中航181	114.400 703	30.515 673	96	2	36	珞喻路卓刀泉中学	114.373 428	30.518 143	114	1
14	湖北省中医院	114.408 407	30.505 922	92	1	37	创业街长飞光纤	114.424 438	30.499 836	54	1
15	雄楚大道当代学生公寓	114.397 263	30.494 099	164	1	38	虎泉街地铁站	114.369 911	30.512 804	44	1
16	虎泉街地铁杨家湾站	114.383 041	30.505 11	20	1	39	楚康路楚安路	114.370 415	30.497 076	44	2
17	关山口	114.412 079	30.507 704	132	1	40	楚康路南湖北路	114.370 407	30.495 028	32	2
18	鲁磨路地质大学	114.401 413	30.519 209	88	2	41	南湖大道东山头	114.397 53	30.479 891	54	1
19	关山大道关山街	114.412 163	30.498 72	112	1	42	南湖大道刘家村	114.402 481	30.479 973	120	1
20	武汉科技会展中心	114.384 827	30.515 873	82	1	43	关山大道曙光村	114.410 255	30.482 088	64	2
21	关山大道湖电社区	114.411 736	30.494 04	78	2	44	卓刀泉南路虎泉	114.368 088	30.515 713	52	1
22	民族大道中南民族大学	114.395 821	30.488 247	72	1						

场地铁站及其周边 3 km 以内的 45 个公共汽车站作为研究对象进行分析。

2.2 基本数据

2.2.1 案例数据

根据调研,武汉市光谷广场地铁站及其周边 3 km 以内的公共汽车站的地理位置、接驳需求以及车站级别如表 1 所示。

2.2.2 模型参数

基于文献[21-23]以及实际调研,本文

表2 模型参数

Tab.2 Model parameters

参数名称	参数值
接驳公共汽车平均行程速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	20
公共汽车最大载容量 $P_{max}/(人 \cdot 车^{-1})$	35
乘客候车的时间价值 $C_w/(元 \cdot 人^{-1} \cdot h^{-1})$	5.8
乘客乘车的时间价值 $C_r/(元 \cdot 人^{-1} \cdot h^{-1})$	7.44
公共汽车运营成本 $C_o/(元 \cdot 车^{-1} \cdot h^{-1})$	21.6
相邻车站之间的常规距离 L/m	500

表3 算法参数

Tab.3 Algorithm parameters

参数名称	参数值
蚂蚁数量 n	5
最大迭代次数 N_{max}	500
信息启发因子 α	4
期望启发式因子 β	2
挥发系数 ρ	0.2
信息素强度 Q	50

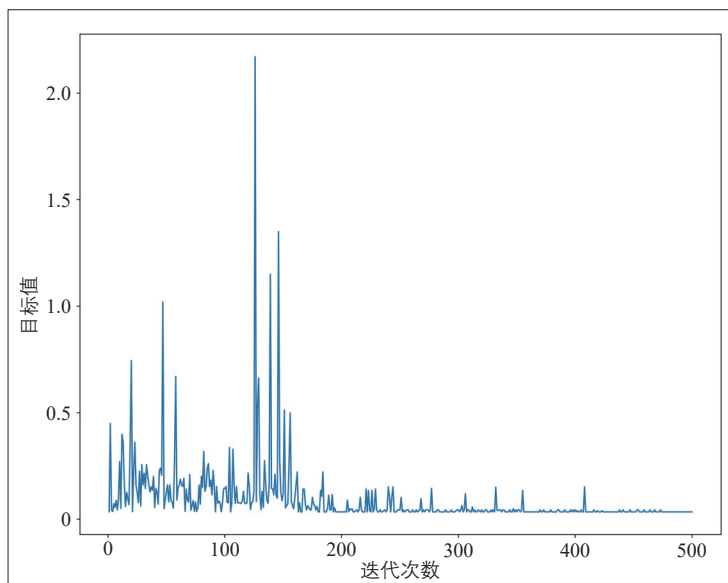


图1 迭代目标值变化

Fig.1 Variation of iterative target value

模型参数取值如表 2 所示。

2.3 算法参数

蚁群算法的各项参数设置如表 3 所示。

本文采用 MinGW64 C++ 进行最优解搜索,经过 500 次迭代之后获得最优目标值。目标值在迭代中的变化如图 1 所示,可以看出,在 170 次迭代后目标值的优化程度大幅增加,400 次迭代后基本稳定在最优解的局部进行搜索,470 次迭代后,便可稳定地求解出最优解,搜索效果良好。

结果表明,最优解形成公共汽车接驳线路 8 条,最优目标值 348 534,最优解的公共汽车线路连接方式如图 2 所示,其连接顺序如下(其中 0 号车站为光谷广场地铁站): 1)接驳线路 1, 9—1—0—3—8—14—17—23—31; 2)接驳线路 2, 0—6—11—19—25—37; 3)接驳线路 3, 0—6—11—19—21—24—32—43; 4)接驳线路 4, 0—6—12—15—22—29—41—42; 5)接驳线路 5, 0—4—16—28—34—35—39—40; 6)接驳线路 6, 0—4—16—28—30—38—44; 7)接驳线路 7, 0—2—10—20—27—36; 8)接驳线路 8, 0—5—7—13—18—26—33。

从最优解的结构分析,接驳公共汽车线路 1 与其他 7 条线路以 0 号地铁车站为始发车站不同,该线路以 9 号公共汽车站(珞雄路公交场)为始发车站,途经 0 号地铁车站,然后再向外连接其他公共汽车站。从地理位置分析,9 号车站缺少直接向外外部方向延伸的后续车站,位置相对孤立;从车站信息来看,9 号车站属于该区域的公共汽车专用停车场所。在实际调查中也发现,存在多条公共汽车线路以此车站作为始发车站,因此最优解中接驳线路 1 的结构存在一定的合理性。

2.4 优化结果对比

经过实地调查,以武汉市光谷广场地铁站为中心 3 km 范围内接驳公共汽车线路为 9 条,其线路的地理连接如图 3 所示,连接顺序如下: 785 路, 0—1—11—19—21—24—32—43; 513 路, 5—0—3—8—14—17—23—31; 18 路, 0—9—8—14—17—23—31; 362 路, 0—6—12—15—22—29—41—42; 786 路, 5—0—14—17—25—37; 572 路, 0—4—16—28—30—38—44; 386—572 路, 0—4—16—28—30—38—34—35—39—40; 905 路, 0—2—10—20—27—36; 340 路, 33—26—18—13—7—5—0—3—8—14。

将实际公共汽车线路车站连接作为可行解代入模型，所得目标值为 $Z_i = 1\,528\,434$ 。就模型而言，实际线路所得目标值超出最优目标值 339%，乘客与企业双方成本都有非常大的改善空间。但就现实而言，公共汽车运营企业存在公共汽车停车场的选址和建设支出，并且很多公共汽车线路有接驳范围以外的运输需求，而这方面的成本会极大影响线路的选择，使其在部分区域形成多条线路重合以及不规律延伸的情况，导致实际线路在模型上的系统总成本是最优目标值的数倍。

就结果而言，分级公共汽车站接驳网络模型成功地将城市不同级别道路间的接驳需求和车流量等差异引入接驳公共汽车线路规划中，对现实需求下的接驳公共汽车线路规划实现了进一步优化。

3 结语

本文通过分析不同级别道路对相应车站的客流需求，将公共汽车站按照其所属的道路等级进行分级处理，并规定高级别车站可连接多条公共汽车线路，然后在现有的研究基础上设计了分级公共汽车站接驳网络模型，同时使用蚁群算法进行寻优。以武汉市光谷广场地铁站及其 3 km 范围内的公共汽车站为分析案例，建立公共汽车接驳网络模型，并采用蚁群算法求解问题。通过与原始公共汽车线路进行对比，表明本文提出的分级公共汽车站接驳网络模型能够显著降低系统总成本。

由于实际环境中接驳需求区域的公共汽车站设计会受外部区域的影响，且存在区域发展速度不均衡的情况。因此，在未来的研究中可以引入区域发展状态参数以及外部区域影响因子，实现公共汽车接驳网络更加全面的优化。

参考文献：

References:

[1] 王新竹, 王冠, 杨伟, 张子培, 等. 基于IC卡数据的武汉市公共交通一体化换乘需求特征分析[J]. 交通与运输(学术版), 2017(1): 142-144+153.
 [2] 武汉市交通发展战略研究院. 2016武汉市交通发展年度报告[R]. 武汉: 武汉市交通发展战略研究院, 2017.
 [3] Hurdle V F. Minimum Cost Locations for

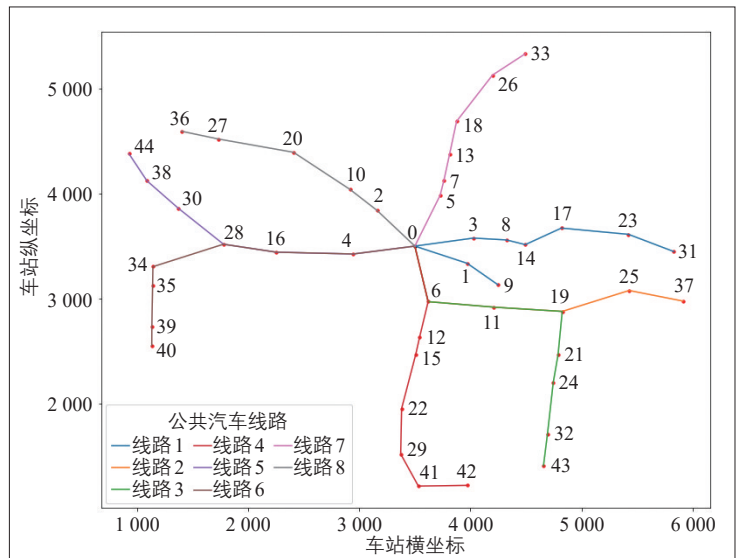


图2 接驳公共汽车线路

Fig.2 Bus connecting lines

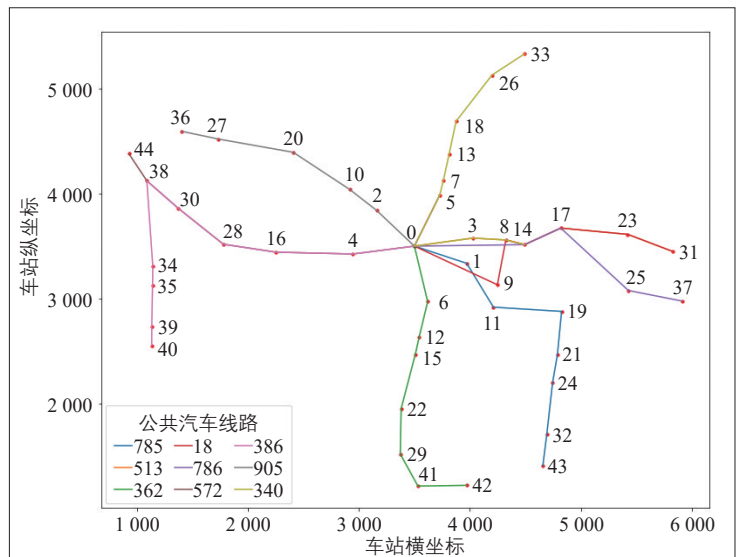


图3 公共汽车实际线路结构

Fig.3 Actual bus lines structure

Parallel Public Transit Lines[J]. Transport Science, 1973, 7(4): 340-350.
 [4] Newell G F. Some Issues Relating to the Optimal Design of Bus Routes[J]. Transportation Science, 1979, 13(1): 20-35.
 [5] Kuah G K, Perl J. Optimization of Feeder Bus Routes and Bus- Stop Spacing[J]. Transport Engineering, 1988, 114(3): 341-354.
 [6] Pattnaik S B, Mohan S, Tom V M. Urban Bus Transit Route Network Design Using Genetic Algorithm[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(4): 368-375.
 [7] Mauttone A, Urquhart M E. A Route Set Construction Algorithm for the Transit Network Design Problem[J]. Computer & Operations Research, 2009, 36(8): 2440-2449.

- [8] 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.
- [9] Gallo M, Montella B, D' Acierno L. The Transit Network Design Problem with Elastic Demand and Internalization of External Costs: An Application to Rail Frequency Optimization [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(6): 1276-1305.
- [10] Sivakumaran K, Li Y W, Cassidy M J, et al. Cost-Saving Properties of Schedule Coordination in a Simple Trunk-and-Feeder Transit System [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012, 46(1): 131-139.
- [11] 曹玫, 林小涵. 基于遗传算法的城市轨道交通接运公交线网规划[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2005, 29(4): 568-570.
- Cao Mei, Lin Xiaohan. Urban Rapid Rail Transit Feeder Buses Routes Planning Based on Genetic Algorithm[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2005, 29(4): 568-570.
- [12] 孙杨. 城市轨道交通新线投入运营下常规公交线网优化调整方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- Methodology of Bus Network Optimization and Adjustment Under the Operation of Urban New Rail Transit Line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [13] 马天山, 曹玮, 乔新宇. 城市轨道交通与接运公交换乘优化模型[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(4): 80-85.
- Ma Tianshan, Cao Wei, Qiao Xinyu. Optimization Model of Shuttle Between Urban-Rail and Feeder-Bus[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2013, 33(4): 80-85.
- [14] 郗文彬, 宋瑞, 何必胜, 等. 基于客运需求的城乡公交动态路径问题研究[J]. *山东科学*, 2013, 26(4): 85-90.
- Xi Wenbin, Song Rui, He Bisheng, et al. Passenger Transport Demand Based Dynamic Routing for Urban-Rural Public Transportation [J]. *Shandong Science*, 2013, 26(4): 85-90.
- [15] 魏超, 龙建成. 城市轨道交通接驳公交线路优化设计[J]. *山东科学*, 2015, 28(3): 65-73.
- Wei Chao, Long Jiancheng. Optimal Design of Urban Rail Transit Feeder Bus Routes[J]. *Shandong Science*, 2015, 28(3): 65-73.
- [16] Newell G F. Dispatching Policies for a Transportation Route[J]. *Transportation Science*, 1971, 5(1): 91-105.
- [17] 徐以群. 城市公交项目经济评价中的运营成本估算方法[J]. *城市公共交通*, 2009, (11): 35-37.
- Xu Yiqun. Operating Cost Assessment in Economic Appraisal for Public Transit Projects[J]. *Urban Public Transport*, 2009 (11): 35-37.
- [18] 孙杨, 宋瑞, 何世伟. 随机需求下公交时刻表设计的鲁棒性优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(5): 986-992.
- Sun Yang, Song Rui, He Shiwei. Robust Optimization for Transit Timetable Design Under Stochastic Demands[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2011, 31(5): 986-992.
- [19] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies[C]// *IEEE. Proceedings of ECAL91: European Conference on Artificial Life*. Paris: Elsevier Publishing, 1991: 134-142.
- [20] Dorigo M. Optimization Learning and Natural Algorithms[D]. Italy: Department of Electronics Politecnico diMilano, 1992.
- [21] 赵骥. 基于多源数据考虑换乘的公交时刻表优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- Zhao Ji. Study on Optimization of Bus Timetable Based on Multi Source Data with the Consideration of Transfer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [22] 吕慎, 陶流洋, 莫一魁. 通勤出行公交车时间的服务等级划分和度量[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(3): 190-195+221.
- Lyu Shen, Tao Liuyang, Mo Yikui, et al. Level of Service Classification and Quantification for Bus Waiting Time on Commuting Trip[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(3): 190-195+221.
- [23] 李田野, 邵敏华. 考虑舒适性的公交乘客出行时间价值对比[J]. *交通科学与工程*, 2011, 27(3): 82-86.
- Li Tianye, Shao Minhua. Comparison of Value of Public Transport Time for Passengers Considering Congestion[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2011, 27(3): 82-86.