

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.05.015

# 基于 K-means 聚类的城郊公交网络设计

罗孝羚<sup>1,2</sup>, 蒋阳升<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:**为改变现有城郊公交线网规划不合理的状况, 通过将物流领域的 Milk-run 和 Hub-spoke 的设计方法应用到公交网络优化和设计中, 构建了新的城郊公交线网优化模型。同时, 为求解所构建的城郊公交线网优化模型, 设计了相应的启发式算法。首先通过 k-means 聚类方法将城区公交站点进行聚类, 同类站点即为 Milk-run 线路的组成站点, 再将同类站点的公交线路长度优化问题转化为经典 TSP 问题进行求解, 结合多种局部搜索的操作方式, 得到每条 Milk-run 线路的最短设计方案。然后依据规划好的 Milk-run 线路, 通过遍历 Milk-run 线路中所有站点, 确定每条 Milk-run 线路 hub 的站点所在的位置。最后结合客流需求, 为各线路分配相应的车辆数量, 结合线路的运行时间, 可以获得各线路相应的发车频率。为验证所提出的模型和算法的实用性和有效性, 将提出的方法应用到香港天水围区域的实际城郊公交线网优化, 通过 Matlab 编程实现了方案求解。案例求解结果表明: 与现有的实际公交服务对比, 在不改变现有的站点布局及车辆配置数量的条件下, 当客流需求维持现有的水平时, 应用 Milk-run 和 Hub-spoke 方法对现有的公交服务进行优化, 能够减少乘客 4.2% 总的出行时间; 通过 Milk-run 线路及 hub 站点的设置, 可以产生规模效应, 能够有效提高城郊公交系统的服务水平, 使居民出行更加方便快捷。

**关键词:** 交通工程; 城市交通; 公交线网优化; Milk-run 和 Hub-spoke; 城郊公交出行; K-means 聚类

中图分类号: U491.1+3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2018) 05-0115-06

## Design of Transit Network between Urban Area and Suburb Based on K-means Clustering

LUO Xiao-ling<sup>1,2</sup>, JIANG Yang-sheng<sup>1,2</sup>

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China; 2. National & Local United Engineering Laboratory of Integrated Intelligent Transport, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

**Abstract:** To change the unreasonable situation of the existing suburban transit network planning, a new suburban transit network optimization model is constructed by applying the Milk-run and Hub-spoke design method in the logistics field to the optimization and design of transit network. At the same time, the corresponding heuristic algorithm is designed to solve the new suburban transit network optimization model. First, the urban bus stations are clustered by k-means clustering method. The same classed stations are the composition stations of a Milk-run line. And the bus line length optimization problem of the same type stations is turned into a classic TSP problem to solve. Combining with a variety of local searches, the shortest path design of each milk-run line is obtained. Then, according to the planned Milk-run line, by traversing all the stations in the milk-run line, the hub location of each Milk-run line in determined. Finally, combining with the passenger demand, the corresponding number of vehicles for each line is allocated, and the corresponding starting frequency of each line based on the running time can be obtained. To verify the practicability and effectiveness of the proposed model and algorithm, the proposed method is applied to the actual suburban

收稿日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578465, 71771190); 重庆市应用开发计划重点项目 (cstc2014yykfb30003, 2015H01373)

作者简介: 罗孝羚 (1991-), 男, 湖南岳阳人, 博士研究生. (luoxiaoling@my.swjtu.edu.cn)

transit network optimization in Tin Shui Wai District, Hong Kong. The scheme is solved by Matlab programming. The result of the case study shows that (1) comparing with the actual bus service without changing the existing station layout and the number of vehicles, when the passenger demand maintains the existing level, it can reduce 4.2% total travel time of passenger by using the Milk-run and hub-spoke method to optimize the existing bus service; (2) the setting of Milk-run line and hub stations can produce scale effect, effectively improve the suburban transit system service level, and make residents travel more convenient and quick.

**Key words:** traffic engineering; urban traffic; transit network optimization; milk-run and hub-spoke; travel between urban area and suburb; K-means clustering

## 0 引言

随着城市的日益扩张,城市居民交通出行问题越来越严重,构建合理高效的公共出行系统成为缓解这一问题的有效手段。在公交系统设计中,公交线网规划是最关键的部分,因此,如何依据现有的客流出行需求设计和优化相应的公交线网成为了城市交通研究热点。

国外对于公交线网优化起步较早,如 Lampkin 等<sup>[1]</sup>在 1967 年就进行了公交线网规划的初步研究,他们以节约运营车辆设备为优化目标,将公交线路设计和线路车辆配置分为两个阶段进行优化。随后,Newell<sup>[2]</sup>和 Salzborn<sup>[3]</sup>根据给定的公交资源,从乘客的角度优化发车频率,使乘客出行时间最小化。相比于国外,国内学者对于公交系统研究较晚,如 1992 年,刘清等<sup>[4]</sup>展开了对公交线网模型和算法的研究,王炜<sup>[5]</sup>对网络规划软件进行了相关研究。但早期的公交线网都是针对单条线路或小规模的网络进行设计,考虑因素较少,假设条件较多,模型较为理想化,与实际的公交线网设计要求存在一定的差距。

考虑到公交线网设计的实际需求,文献[6-12]从网络层面对公交线网设计进行了相关研究。由于网络规模变大,考虑因素增多,传统的解析式算法很难求解出有效解,因此这些研究都集中在如何设计有效算法上求解该问题。且研究表明,由于公交线网优化问题属于 NP-Hard 问题,智能算法相比于其他算法对于该问题求解更为有效<sup>[13-15]</sup>。

通过对公交线网文献综述回顾,现有的公交线网规划主要是以乘客出行时间及运营商的车辆配置为主要优化目标,分阶段分别对公交线网结构及线路的车辆数量配备进行优化,且研究集中在城区公交线网设计问题,对于城郊公交线网设计很少涉及。

而在城市发展的过程中,由于城市扩张,城郊

出行需求日益增长,仅仅考虑城区公交系统的优化建设很难满足现有的城市发展需求,据此,本研究针对城郊公交设计问题,引入物流领域 Milk-run 线路的 Hub-spoke 设计理念,其中 Milk-run 概念的提出是应用小批量的货物进行循环取货<sup>[16]</sup>,hub 站点可以实现货物聚集,形成规模优势<sup>[17]</sup>,将其应用到城郊公交线网设计,可以用 Milk-run 线路及 hub 站点设计将公交站点分布密集区域的客流集中到 hub 站点,形成规模优势,实现大客流运输,以达到优化现有的城郊公交网络服务水平的目的。

## 1 模型构建

### 1.1 模型假设

城郊公交线网优化问题是公交线网规划及线路车辆配置组合问题,目的是为了获取最佳的线网布局及相应的线路发车频率,尽可能使乘客出行时间最小化。依据公交线网规划相关研究,对模型构建做出如下假设:

- (1) 假设客流出行需求已知。
- (2) 假设线路 hub 设置数量确定。
- (3) 有直达服务的,乘客优先选择直达服务出行。
- (4) 规划区域站点数量及站点位置确定。
- (5) 可以分配到线路的车辆总数已知。
- (6) 站点停靠时间已知。
- (7) 不考虑交通状况对公交车辆运行速度的影响

### 1.2 模型构建

$$\min Z = \sum_{o \in D_o} \sum_{d \in D_d} D_{od} (T_{od} + W_{od}), \quad (1)$$

$$T_{od} = T_{oh}^{hod} + T_{hd}^{hod}, \quad (2)$$

$$W_{od} = W_{oh}^{hod} + W_{hd}^{hod}, \quad (3)$$

$$T_{oh}^{hod} = c_{oh} x_{ohl} + \sum_{o \in L_o \cup L_m, j \neq o \cap j \neq h} x_{ojl} RT_{jh}^l (T_{jh}^l + c_{oj} + s), \quad (4)$$

$$T_{hd}^{hod} = c_{hd}x_{hd} + \sum_{h \in L_o \cup L_m, j \neq o \cap j \neq d} x_{hjl} RT_{jd}^l (T_{jd}^l + c_{hj} + s), \quad (5)$$

$$W_{oh}^{hod} = 0.5h_{oh}^{hod}, \quad (6)$$

$$W_{hd}^{hod} = 0.5h_{hd}^{hod}, \quad (7)$$

$$RT_{ik}^l = x_{ikl} + \sum_{j \in L_o \cup L_m, j \neq i, j \neq k} x_{ijl} RT_{jk}^l, \quad (8)$$

$$h_{num} = h_{set}, \quad (9)$$

$$\sum_{l=1}^L 2f_l T_l \leq B, \quad (10)$$

式中,  $Z$  为目标函数;  $o, d, h, i, j, k$  为站点标号;  $l$  为线路标号;  $D_o, D_d$  为客流需求起始点和终到站点集合,  $D_{od}$  为从站点  $o$  到站点  $d$  的单位小时出行客流需求量;  $T_{od}$  为单位人次从站点  $o$  到站点  $d$  所需的总车旅行时间;  $W_{od}$  为单位人次从站点  $o$  到站点  $d$  所需的总等待时间;  $T_{oh}^{hod}$  为单位人次从站点  $o$  到 hub 站点  $h$  的在车旅途时间;  $T_{hd}^{hod}$  为单位人次从 hub 站点  $h$  到目的站点  $d$  的在车旅途时间;  $c_{oh}$  为站点  $o$  到站点  $h$  的在车旅行时间;  $x_{ohl}$  为 0-1 变量, 当线路  $l$  连续相邻经过站点  $o$  和站点  $h$  时取 1, 否则取 0;  $x_{ojl}$  为 0-1 变量, 当线路  $l$  经过连续相邻站点  $o$  和站点  $j$  时取 1, 否则取 0;  $RT_{jh}^l$  为 0-1 变量, 当线路  $l$  通过站点  $j$  和 hub 站点  $h$  的在车旅行时间;  $c_{oj}$  为站点  $o$  到站点  $j$  的在车旅行时间;  $s$  为站点平均停靠时间;  $c_{hd}$  为 hub 站点  $h$  到目的站点  $d$  的在车旅行时间;  $x_{hdl}$  为 0-1 变量, 当线路  $l$  经过连续相邻 hub 站点  $h$  和目的站点  $d$  时取 1, 否则取 0;  $x_{hjl}$  为 0-1 变量, 当线路  $l$  经过连续相邻 hub 站点  $h$  和站点  $j$  时取 1, 否则取 0;  $RT_{jd}^l$  为 0-1 变量, 当线路  $l$  通过站点  $j$  和目的站点  $d$  时取 1, 否则取 0;  $T_{jd}^l$  为线路  $l$  通过站点  $j$  和目的站点  $d$  的在车旅行时间;  $c_{hj}$  为 hub 站点  $h$  到站点  $j$  的在车旅行时间;  $W_{oh}^{hod}$  为单位人次从站点  $o$  到 hub 站点  $h$  的等待时间;  $W_{hd}^{hod}$  为单位人次从 hub 站点  $h$  到达目的站点  $d$  的等待时间 (其中该时间是由于 hub 站点换乘所导致的二次换乘时间, 将其列为目标函数的一部分进行优化, 实际使两次乘车行为有效衔接, 减少换乘所带来的影响);  $h_{oh}^{hod}$  为站点  $o$  到 hub 站点  $h$  的 Milk-run 线路发车间隔,  $h_{hd}^{hod}$  为 hub 站点  $h$  到目的站点  $d$  的发车间隔,  $RT_{ik}^l$  为 0-1 变量, 当线路  $l$  通过站点  $i$  和站点  $k$  时取 1, 否则取 0;  $x_{ikl}$  为 0-1 变量, 当线路  $l$  经过连续相邻站点  $i$  和站点  $k$  时取 1, 否则取 0;  $x_{ijl}$  为 0-1 变量, 当线路  $l$  经过连续相邻站点  $i$  和站点  $j$  时取 1, 否则取 0;  $RT_{jk}^l$  为 0-1 变

量, 当线路  $l$  通过站点  $j$  和站点  $k$  时取 1, 否则取 0;  $L_o$  为线路起点站点集合;  $L_m$  为线路的中间站点集合;  $h_{num}$  为实际 hub 站点设置数量;  $h_{set}$  为预先设置的 hub 站点数量;  $L$  为线路集合;  $f_l$  为线路  $l$  的发车频率;  $T_l$  为线路  $l$  的单程旅行时间;  $B$  为车辆总的配置数量。

模型说明: 式 (1) 为目标函数计算方式, 为乘客总的车旅行时间和等待时间的和, 式 (2) 为单位人次站点  $o$  到 hub 站点  $h$  的在车旅途时间计算式, 式 (3) 为单位人次从站点  $o$  到站点  $d$  所需的总等待时间计算式, 式 (4) 和式 (5) 分别为单位人次从站点  $o$  到 hub 站点  $h$  的在车旅途时间计算式和单位人次从 hub 站点  $h$  的在车旅途时间计算式, 式 (6) 和 (7) 分别为乘客从站点  $o$  到 hub 站点  $h$  和从 hub 站点  $h$  到达目的站点  $d$  的平均等待时间计算式, 式 (8) 为 0-1 变量  $RT_{jh}^l$  的计算式, 式 (9) 为约束线网中实际设置的 hub 数量要与预设的 hub 数量一致, 式 (10) 为所有线路分配的车辆总和不能大于现有可用的车辆总数量。

## 2 求解算法

为求解所构建的优化模型, 本研究设计了相应的求解算法。首先, 根据站点位置信息对站点进行分类, 分类数量等于给定的 hub 数量, 然后将规划每个类的 Milk-run 线路设计转化为经典的 TSP 问题求解, 然后对于每条 Milk-run 线路选择最佳的 hub 位置, 最后给每条线路分配相应的车辆数量, 具体算法步骤如下。

Step 1 数据输入: 将规划区域站点数量、站点间最短出行时间、客流需求及参数进行设置, 包括站点平均停靠时间和 hub 设置数量输入。

Step 2 站点聚类: 依据站点间的距离及 hub 数量, 采用 K-means 算法对规划区域的公交站点进行聚类。

Step 3 Milk-run 线路设计: 得到聚类之后, 进行 Milk-run 线路设计时, 该问题就变成了经典 TSP 问题。本研究设计了局部最优算法, 得到最优解, 其中 Milk-run 线路设计步骤如下。

- (1) 随机生成某一个初始 Milk-run 的线路。
- (2) 计算并记录 Milk-run 的线路长度。
- (3) 改变 Milk-run 的线路结构, 计算并记录新的 Milk-run 的线路长度。
- (4) 如果新的 Milk-run 的线路长度小于原 Milk-run 的线路长度, 用新的 Milk-run 的线路替换原来的

线路,并返回(2);否则返回(3)。

(5)判断是否达到算法终止条件,在本算法中终止条件设置为目标函数连续迭代P1代,目标函数值不发生变化,即认为目标函数没有优化空间。

其中所设计的改变Milk-run的线路长度有3种方式,分别见图1~图3。

①站点交换:首先随机确定需要交换的站点对,如图1(a)所示,为站点2和站点5,然后交换站点位置,交换之后的线路结构为图1(b)。

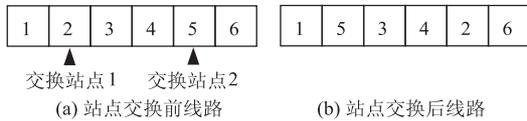


图1 站点交换改变线路结构方式

Fig.1 Mode of exchanging stations to change route structure

②线路截断对接:首先确定需要截断的点,如图2(a)所示,为站点3和站点4之间,截断对接之后的线路结构如图2(b)所示。

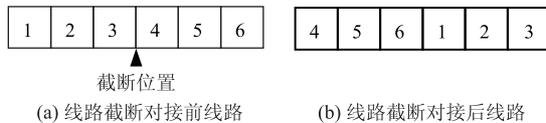


图2 站点截断对接改变线路结构方式

Fig.2 Mode of stations truncation and joint to change route structure

③线路截断翻转对接

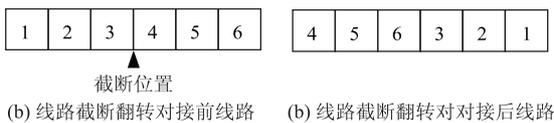


图3 站点截断翻转对接改变线路结构方式

Fig.3 Mode of stations reversal and truncation to change route structure

Step 4 hub 站点确定:由于Milk-run线路内任意站点都可作为hub站点,但是由于各站点位置不同及客流在站点间分布不均,需要找出最优的hub站点,其步骤如下。

(1)首先设置站点计数器 $count = 1$ ,然后对一条Milk-run线路随机选择1个站点 $i$ 作为唯一hub站点,依据该线路的客流需求,计算相应的出行时间 $T_i$ ,并将站点 $i$ 作为最优hub选取站点 $s_{opt}$ , $T_i$ 作为最优出行时间 $T_{i+count}$ 。

(2)选择该Milk-run线路初始 $i + count$ 作为唯一hub站点,同样地依据客流需求,计算相应的出

行时间 $T_{i+count}$ 。

如果 $T_{i+count} < T_{opt}$ ,则最优hub选取站点 $s_{opt}$ 设置为站点 $i + count$ ,最优出行时间 $T_{opt}$ 设置为 $T_{i+count}$ ,并使 $count = count + 1$ ,然后返回步骤(2),否则使 $count = count + 1$ ,然后进入步骤(2)。

(3)直到所有站点都被当作过hub站点,则停止计算输出最优结果 $s_{opt}$ 。

Step 5 线路网络确定:线网布局由规划区域Milk-run线路,以及规划区域中最优的hub站点与规划区域外目的地连接的两站点直达线路组成。

Step 6 线路车辆数量分配及优化:通过前面的优化步骤对已经优化好的公交线路进行车辆数进行配置,其步骤如下。

(1)首先对公交线网随机分配车辆数量。

(2)然后对线路间的车辆进行调整,调整步骤如下。

①依据客流需求、已经优化的线网布局及随机分配的車輛数量 $veh_{ini}$ ,计算初始目标函数 $fit_{ini}$ ,并将初始车辆分配记为最佳车辆分配方案 $veh_{bes}$ ,将初始目标函数记为最佳目标函数 $fit_{bes}$ 。

②随机选择线路 $l_{i1}$ 和线路 $l_{i2}$ 。

③将线路 $l_{i1}$ 的车辆配置数量转移1辆车到线路 $l_{i2}$ ,并计算新的目标函数 $fit_{new}$ ,如果目标函数 $fit_{new} < fit_{bes}$ ,则将转移之后的车辆分配方案作为 $veh_{bes}$ ,将 $fit_{new}$ 作为 $fit_{bes}$ ,并返回步骤(2),否则进入下一步。

(4)是否达到停止条件。如果到达则输出最终车辆分配方案 $veh_{bes}$ 以及目标函数为 $fit_{bes}$ ,如果没有则返回Step 2,其中车辆分配停止条件时连续迭代P2代,目标函数不发生改变,即算法停止。

### 3 实际案例分析

#### 3.1 案例数据及现有实际公交服务说明

(1)数据说明

将本研究所提出的模型及算法应用到图4的实际公交网络中<sup>[15]</sup>,该网络为香港天水围区域的城乡实际公交线网,是典型的城乡公交线网案例。天水围区域为郊区聚集区域,有23个站点,分别标号为1~23,站点24~28为天水围区域所到达的5个城区站点,另外还有一个换乘站点T,该网络所有数据均依据文献[15]调查所得,另外站点平均停靠时间为1.5 min,网络中各线路配置的车辆总数为176 veh。根据假设条件中网络中hub的数量,结合实际网络规模大小及站点位置,通过K-means将天水围区域的站点分为3类,即hub数量为3。

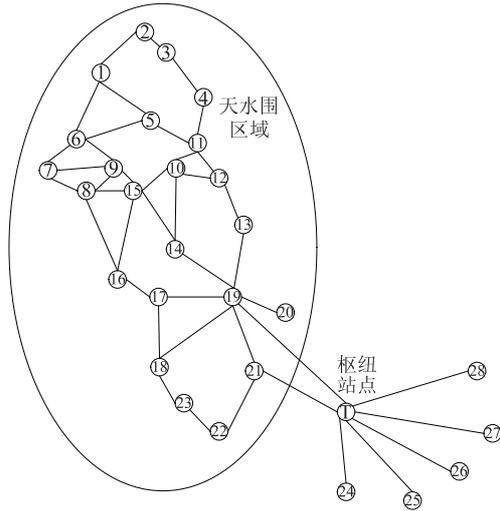


图 4 案例站点布局

Fig. 4 Layout of stations in case study

(2) 现有公交服务说明

现有的公交线网布局如表 1 所示, 所有不能通过现有服务到达目的地的乘客需要在换乘站点 T 换乘, 然后转由其他线路完成出行。根据文献 [18] 所获得的客流需求数据及站点间距离, 在现有服务中, 乘客出行总时间为 1 578 830 min。

表 1 现有公交线网结构

Tab. 1 Existing transit network structure

线路	线路结构	车辆数量/veh	发车间隔/min	单程运行时间/min
1	20 19 T 25	12	10.1	62.2
2	16 17 18 23 22 21 T 25	17	8.3	72
3	1 6 9 10 12 13 19 21 T 25	19	8.7	84.1
4	14 13 12 10 8 16 17 18 23 22 T 26	18	10.9	99.3
5	1 6 8 16 17 18 23 22 21 T 28	30	4.2	64.2
6	9 10 11 5 6 8 16 17 18 23 22 T 27	16	11.5	93.5
7	16 17 18 23 22 21 T 24	19	5.1	50
8	7 6 1 2 3 4 11 12 13 19 T 24	11	12.3	78.9
9	1 6 5 4 11 12 13 19 T 24	23	5.3	62.3
10	14 15 8 9 10 12 13 19 T 24	11	11.1	62.6

(3) 算法参数说明

在本案例中, Milk-run 线路的局部搜索停止条件设置为: 算法连续迭代 50 代, 线路长度不发生变化时, 停止 Milk-run 线路局部搜索, 即  $P1 = 50$ , 对于车辆分配的局部搜索停止条件设置为: 算法连续迭代 100 代, 目标函数不发生变化时, 停止车辆分配局部搜索, 即  $P2 = 100$ 。需要说明的是, 算法中  $P1$  和  $P2$  的参数取值都是根据测试结果进行的, 将案例数据代入两个局部搜索程序中运行 20 次, 然后依据其最优解出行的代数进行  $P1$  和  $P2$  的取值。

3.2 本模型的应用及分析

依据案例中的数据说明, 结合文中模型及算法,

采用 Matlab 语言实现算法编写, 得到最终优化结果, 如图 5 和表 1 所示, 其中在图 5 中, 同一形状的站点表示聚类结果为同类站点, 加粗站点表示一条 Milk-run 线路的 hub 站点。具体线路走向及车辆分配结果如表 1 所示, 线路标识为 I 的表示 Milk-run 线路, 线路标识为 II 的表示 hub 到目的地的线路。

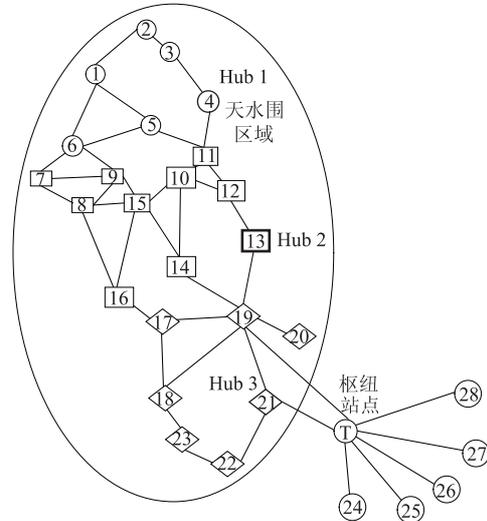


图 5 优化后站点线路聚类及 hub 站点选取图

Fig. 5 Selection of cluster of optimized transit lines and hub stations

对其中 3 个 hub 站点, 首先计算了郊区的 23 个站点之间任意两站点的距离, 得到站点间的距离矩阵, 然后代入 Matlab 中采用其自带的 K-means 命令, 得到 hub 站点布局为 4, 13, 21。

其中通过 Milk-run 线路及设置 hub 站点方式得到的线路运营方案中, 该方式得到的乘客总体出行时间为 1 512 495 min, 相比于现有的出行方案出行时间 1 578 830 min, 减少了 4.2% 的出行时间。

3.3 优化结果分析

通过上述案例验证结果可知, 对于城郊公交出行, 采用 Milk-run 及 hub 站点设置能够有效减少乘客出行时间。其主要原因是: 将站点聚类之后, 能够有效形成规模优势, 减少了乘客在中间站点停靠时间的消耗。

3.4 算法应用于大规模效率分析

本研究算法中 hub 站点的编码方式采用二进制变量, 在确定 hub 站点之后, 采用最短路判别方法对 hub 站点的归属站点进行了确定。启发式算法基本上都沿用了现有的成熟算法, 且这些算法均在大规模网络中表现出较好的求解能力。为了验证本研究的启发式算法, 对 100 站点的网络进行了 Milk-run 线路设置, 数据包括 100 个站点间的最短距离, 通

过网络验证,说明该算法也能适应于较大规模网络的公交线网设计。

表2 优化后的公交线网布局

Tab.2 Layout of optimized transit network

线路 标号	线路 结构	线路 标识	车辆配备 数量/veh	发车间 隔/min	单程旅行 时间/min
1	20 17 18 19 21 22 23	I	16	2.7	21.9
2	7 8 9 10 11 12 13 14 15 16	I	18	3.2	29
3	1 2 3 4 5 6	I	14	2.4	17
4	21 24	II	11	5.9	32.5
5	21 25	II	11	9.9	54.5
6	21 26	II	10	12.3	61.5
7	21 27	II	7	15.4	54
8	21 28	II	8	8.3	33
9	13 24	II	14	5.5	38.2
10	13 25	II	11	10.9	60.2
11	13 26	II	11	12.2	67.2
12	13 27	II	7	17.1	59.7
13	13 28	II	9	8.6	38.7
14	4 24	II	6	14.3	42.9
15	4 25	II	6	21.6	64.9
16	4 26	II	6	24	71.9
17	4 27	II	5	25.8	64.4
18	4 28	II	6	14.5	43.4

#### 4 结论

本研究将物流领域的 Milk-run 及 hub 设置方法应用到城郊公交线网优化中,构建了相应的模型,并设计了针对该问题相应的求解算法。通过实际案例验证,说明该方法能够有效减少乘客出行时间。

本案例验证的是在原有车辆配置条件不变的情况下应用该方法的效果,因此实际操作过程中不需要额外增加车队规模,使其应用于实际更加便利。

通过该方法应用到大规模网络中,说明该方法也适应于大规模公交网络。

在公交出行过程中,乘客从出发地到目的地都必须经由 hub 站点进行换乘,在对城乡公交线网优化及设计过程中,应该重点考虑对 Milk-run 的运行车辆与 hub 站点到目的地的车辆换乘衔接问题,对 hub 站点的换乘设施进行配置及优化设计,提高换乘服务水平,从而提高整个公交系统的运营效率,这也是后续研究的一个方向。

#### 参考文献:

#### References:

[1] LAMPKIN W, SAALMANS P D. The Design of Routes, Service Frequencies, and Schedules for a Municipal Bus

Undertaking: A Case Study [J]. Journal of the Operational Research Society, 1967, 18 (4): 375 - 397.

[2] NEWELL G F. Dispatching Policies for a Transportation Route [J]. Transportation Science, 1971, 5 (1): 91 - 105.

[3] SALZBORN F J M. Optimum Bus Scheduling [J]. Transportation Science, 1972, 6 (2): 137 - 148.

[4] 刘清, 袁仁保, 朱志勇, 等. 实现城市公交线网优化的数学模型和广义 A\* 算法 [J]. 系统工程理论与实践, 1992, 12 (2): 11 - 17.

LIU Qing, ZHONG Ren-bao, ZHU Zhi-yong, et al. The Mathematical Models & Extensive Algorithm A\* for Optimization to Public Traffic Network in the City [J]. System Engineering - Theory and Practice, 1992, 12 (2): 11 - 17.

[5] 王伟. 实用交通网络规划软件系统研制 [J]. 中国公路学报, 1992, 5 (2): 13 - 17.

WANG Wei. Research on Practical Software System of Traffic Network Planning [J]. China Journal of Highway and Transport, 1992, 5 (2): 13 - 17.

[6] SHIH M C, MAHMASSANI H, BAAJ M. Trip Assignment Model for Timed-transfer Transit Systems [J]. Transportation Research Record, 1997, 1571: 24 - 30.

[7] CEDER A. Public Transit Planning and Operation: Theory, Modeling and Practice [M]. Oxford: Elsevier, 2007.

[8] SZETO W Y, WU Y. A Simultaneous Bus Route Design and Frequency Setting Problem for Tin Shui Wai, Hong Kong [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 209 (2): 141 - 155.

[9] VERBASIÖ, MAHMASSANI H S. Exploring Trade-offs in Frequency Allocation in a Transit Network Using Bus Route Patterns: Methodology and Application to Large-scale Urban Systems [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 81 (2): 577 - 595.

[10] 蒋阳升, 罗孝羚. 考虑首末站约束和站间客流强度的公交线网优化 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2017, 37 (1): 106 - 111.

JIANG Yang-sheng, LUO Xiao-ling. Optimization of Public Transit Network Considering Initial and Terminal Stations Location Requirements and Passenger Flow intensity [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37 (1): 106 - 111.

[11] 蒋阳升, 罗孝羚, 刘媛, 等. 公交线网空间可达性优化研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (4): 102 - 107.

(下转第 134 页)

- 绿波协调控制方法 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (9): 112 - 119.
- QU Da-yi, WAN Meng-fei, WANG Zi-lin, et al. A Coordinate Control Method for Arterial Green Wave Traffic Based on Traffic-wave Theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (9): 112 - 119.
- [11] 裴玉龙, 冯树民. 城市行人过街速度研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (9): 104 - 107.
- PEI Yu-long, FENG Shu-min. Research on Design Speed of Urban Pedestrian Crossing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (9): 104 - 107.
- [12] GARTNER N H, ASSMAN S F, LASAGA F, et al. A Multi-band Approach to Arterial Traffic Signal Optimization [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1991, 25 (1): 55 - 74.
- [13] 朱和, 常玉林. 基于灵活相位的双向绿波协调控制 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (7): 140 - 143.
- ZHU He, CHANG Yu-lin. Bidirectional Green Wave Coordinative Control Based on Flexible Phase [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (7): 140 - 143.
- [14] 李海蛟, 陆建. 基于交通流理论的公交站点间行程时间预测 [J]. 交通信息与安全, 2012, 30 (3): 29 - 32.
- LI Hai-jiao, LU Jian. Travel Time Prediction between Bus Stops Based on Traffic Flow Theory [J]. Computer and Communications, 2012, 30 (3): 29 - 32.
- [15] DURÁN-HORMAZÁBAL E, TIRACHINI A. Estimation of Travel Time Variability for Cars, Buses, Metro and Door-to-door Public Transport Trips in Santiago, Chile [J]. Research in Transportation Economics, 2016, 59: 26 - 39.
- [16] 美国交通运输研究委员会, 杨晓光, 滕靖, 等. 公共交通通行能力和服务质量手册 [M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- American Transportation Research Council, YANG Xiao-guang, TENG Jing, et al. Manual of Transit Capacity and Service Quality [M]. 2nd. ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [17] 陈秋莲, 王成栋. 基于 Matlab 遗传算法工具箱的优化计算实现 [J]. 现代电子技术, 2007, 30 (2): 124 - 126.
- CHEN Qiu-lian, WANG Cheng-dong. Optimization of Genetic Algorithm Toolbox Based on Matlab [J]. Modern Electronics Technique, 2007, 30 (2): 124 - 126.
- [18] 曹交交, 韩印, 姚佼. 城市交通干线动态双向绿波优化控制模型 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (9): 115 - 120.
- CAO Jiao-jiao, HAN Yin, YAO Jiao. A Dynamic Dual-direction Green Wave Optimization Control Model for Urban Arterial Roads [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (9): 115 - 120.
- 
- (上接第 120 页)
- JIANG Yang-sheng, LUO Xiao-ling, LIU Yuan, et al. Study of Optimizing Transit Network Spatial Accessibility [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (4): 102 - 107.
- [12] 魏明, 陈学武, 孙博. 多模式区域公交协调调度模型和算法 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (4): 136 - 142.
- WEI Ming, CHEN Xue-wu, SUN Bo. A Model and an Algorithm of Schedule Coordination for Multi-mode Regional Bus Transit [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (4): 136 - 142.
- [13] BAAJ M H, MAHMASSANI H S. Hybrid Route Generation Heuristic Algorithm for the Design of Transit Networks [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1995, 3 (1): 31 - 50.
- [14] MARTÍNEZ H, MAUTTONE A, URQUHART M E. Frequency Optimization in Transitation Systems: Formulation and Metaheuristic Approach [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 236 (1): 27 - 36.
- [15] WU J, SONG R, WANG Y, et al. Modeling the Coordinated Operation between Bus Rapid Transit and Bus [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015 (1): 1 - 7.
- [16] ARBULU R, BALLARD G, HARPER N. Kanban in Construction [C] // Proceedings of 11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Blacksburg, US: International Group for Lean Construction, 2003: 16 - 17.
- [17] YANG K, YANG L, GAO Z. Hub-and-spoke Network Design Problem under Uncertainty Considering Financial and Service Issues: A Two-phase Approach [J]. Information Sciences, 2017, 402: 15 - 34.
- [18] SZETO A W Y. A Simultaneous Bus Route Design and Frequency Setting Problem for Tin Shui Wai, Hong Kong [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 209 (2): 141 - 155.