

# 广州水上巴士换乘等待时间优化研究\*

李 军, 黄 莎

(中山大学工学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 提出了一种水上巴士换乘等待时间优化模型。在保证运营时间段与发船班次不变的情况下, 协调各线路到达换乘站的时刻, 建立了以总换乘等待时间最小为目标的换乘优化模型, 针对该模型设计了遗传算法。以广州水上巴士西堤码头为例, 用遗传算法进行求解, 得出优化后的班次表。计算结果表明, 通过协调线路在换乘站的到站时间, 模型能有效减小总乘客换乘等待时间。所提出的遗传算法能更快地求出近似最优解, 误差控制在可接受的范围。

**关键词:** 水上巴士; 换乘优化; 换乘等待时间; 遗传算法

**中图分类号:** U491.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)03-0019-07

## Optimization of Transfer Waiting Time of Guangzhou Waterbus

LI Jun, HUANG Sha

(School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** A method to optimize the transfer waiting time of the waterbuses is presented. The operation time and frequencies of waterbuses are assumed to be fixed, a mathematical program model is built to coordinate the arrival times of different waterbus lines at the given wharf so that the total waiting time is minimized. The genetic algorithm is proposed to solve the model. The Xidi Wharf of Guangzhou Waterbus is chosen to test the model. The result indicates that the total transfer waiting time is significantly reduced. The proposed genetic algorithm is a fast and efficient method to solve the model with acceptable error.

**Key words:** waterbus; transfer optimization; transfer waiting time; genetic algorithm

2007年4月10日, 广州市水上巴士正式开通, 当时只有1条线4个站点。经过几年的发展, 目前水上巴士已经增至4条线9个站点。根据《水上巴士发展规划研究(2013-2030)》, 水上巴士线路网络复杂化将成为趋势。如何协调好线路之间的衔接关系、提高换乘站的换乘效率是水上巴士提高服务水平的一个重要方面。

随着城市居民出行范围的不断扩大和出行目的多样性, 换乘已经成为城市公共交通的一个重要

特征, 一般地, 30%~60%的公共交通出行涉及一次或者多次换乘<sup>[1]</sup>。换乘时间的长短直接影响着乘客的旅行时间和乘客对交通系统服务水平的反应。因此提高换乘效率, 减小换乘等待时间, 对交通系统网络化发展有重要的意义。然而现实交通系统中, 当线路设置、站点建设等基础设施完成后, 很难对其进行改变, 以提高换乘效率。在既存运营条件的基础上, 只有协调换乘站各线路的到发时间, 才能达到提高换乘效率、缩短换乘等待时间的

\* 收稿日期: 2014-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178475)

作者简介: 李军(1969年生), 男; 研究方向: 交通工程; E-mail: stsljun@mail.sysu.edu.cn

目的。

目前换乘协调研究主要集中在轨道交通和公交领域<sup>[2-6]</sup>,可以为水上巴士换乘协调提供参考。在轨道交通和公交换乘协调研究领域,尽管两者行车特性有所不同,但是在换乘站点车辆协调研究上主要分两大类:一类是静态协调<sup>[7]</sup>。静态协调根据现有车辆到发时间经验数据,对时间资源进行优化,利用计算机和信息技术设计时刻表,使得不同线路上的车辆在换乘站同步到发或者换乘乘客经过行走后刚好赶上衔接车辆,实现乘客换乘等待时间的最小化;第二类是动态协调<sup>[8-10]</sup>。动态协调利用车辆定位、客流预测等技术来实时调控车辆的行车速度或在换乘站的等候时间以实现到达同步的效果。动态协调依据实时信息进行调整,工作量大,实时性要求高。目前静态协调应用比较广泛。

静态协调研究中,主要是针对时刻表中的运营时间,发车频率以及发车间隔三个要素进行组合协调优化并且考虑了基础设施的容量。常见的优化研究中主要有两种组合方式:一种是在发车频率和发车间隔不变的情况下,协调首车发车时间也就是改变原先的运营时间来进行优化<sup>[11,12]</sup>;另一种是在发车频率不变的情况下,改变运营时间和发车间隔,以达到优化的目的<sup>[13-16]</sup>。生成线路时刻表的考虑因素十分复杂,不只是为了提高换乘效率,所以在优化过程中尽可能少地改变原先的运营条件。水上巴士的运营条件比较稳定,如何在尽可能少改变原先时刻表的条件以达到换乘最优的目标是一个重要问题。

本文综合考虑以上因素,在不改变线路运营时间和发船班次的基础上,以换乘站中乘客换乘等待时间最小为目标,发船间隔满足最大发船间隔和最小发船间隔为约束,建立模型。

## 1 广州水上巴士基本情况

经过 7 年的营运,广州水上巴士作为一种城市公共交通工具,已经承担了一部分沿江日常生活出行,成为广州公共交通中的一大特色。

### 1.1 线路情况

目前广州水上巴士 4 条线,9 个站点,其中 3 个换乘站点分别为黄沙码头、西堤码头和大元帅府码头,如表 1 所示。其中 S1、S2 和 S11 形成了两两相交的线网,S12 保持独立,与其他水上巴士线路不形成换乘关系。每条线路都有上下行两个方向。票价每位 2 元,可刷羊城通和投币。换乘需要重新买票。

表 1 水上巴士线路情况

Table 1 Lines of waterbus

站点序号	线路名称			
	S1	S2	S11	S12
1	金沙洲	芳村	黄沙	长洲
2	石围塘	西堤	大元帅府	鱼珠
3	黄沙	天字	广州塔	海心沙
4	西堤	大元帅府	-	-
5	-	中大	-	-

### 1.2 水上巴士运营特点

广州水上巴士具有固定的营运模式,主要呈现以下特点。

1) 运营时间有限。水上巴士的运营时间基本只覆盖了白天的时间段。

2) 发船间隔时间长。水上巴士中最短的线路发船间隔也有 20 min。在运营时间内,如果乘客错过一个班次,必须要等一个发船间隔才能赶上船,最长等待时间可达到 45 min。

3) 线路少,站点少。与 2007 年广州刚开通水上巴士相比,目前线路已增至 4 条,站点增至 12 个。但是能够互相衔接的只有 3 条线路。

表 2 水上巴士各线路运营状况<sup>1)</sup>

Table 2 Timetable of waterbus lines

线路编号	方向	运营时间	班次间隔 /min	班次数
1	金沙洲 - 西堤	07:00 - 18:30	20 <sup>a</sup> 或 30 <sup>b</sup>	29
2	西堤 - 金沙洲			
3	芳村 - 中大	07:10 - 18:10	30 <sup>c</sup> 或 45 <sup>d</sup>	19
4	中大 - 芳村	07:00 - 18:00	30 <sup>e</sup> 或 45 <sup>f</sup>	
5	黄沙 - 广州塔	07:00 - 18:30	30	24
6	广州塔 - 黄沙			
7	长洲 - 海心沙	07:00;07:30;08:00		3
8	海心沙 - 长洲	17:30;18:00;18:30		

1): a:07:00 - 10:00 和 16:30 - 18:00;

b:10:00 - 16:30;

c:07:10 - 10:10 和 16:10 - 18:10;

d:10:10 - 16:10;

e:07:00 - 10:00 和 16:00 - 18:00;

f:10:00 - 16:00

## 2 换乘等待时间优化模型

根据水上巴士的基本运营情况,本文参考了基于离站时刻的换乘优化模型<sup>[17]</sup>,对其进行改变。将在不改变营运时间和发船班次的条件下,优化水上巴士到达换乘站的时间,加强有关线路之间的衔接,

减少乘客的换乘等待时间。

在同一个换乘站内,有换乘关系的不同线路之间可以直接进行换乘。本文以一天中的运营时段为协调时段,计算在一个换乘站内所有换乘关系下乘客总换乘等待时间。

## 2.1 条件假设

为了降低问题的复杂性,对线路运行做如下假设:

1) 同一航线上下行之间运营独立且不产生换乘关系;

2) 码头停靠泊位充足,即船不会因为停靠点容量问题而进行等待;

3) 换乘时,同一批换乘乘客可以换乘上同一个班次的船,不会因为水上巴士容量问题而分批换乘。

## 2.2 符号说明

为了方便问题描述,对运行过程中的参数作如下符号说明。

$R$  为经过换乘站的所有线路的集合;

$T_i^F, T_i^L$  为分别为线路  $i \in R$  首班船和末班船到达换乘站的时刻;

$N_i$  为线路  $i \in R$  的运营班次;

$t_i^{(m)}$  为线路  $i$  第  $m$  班船到达换乘码头的时刻,  $m = 1, 2, \dots, N_i$ ;

$d_i^{(m)}$  为线路  $i$  第  $m$  班船在换乘码头的停站时间;

$s_{i,j}$  为乘客由线路  $i$  换乘到线路  $j$  的时间,包括旅客站内行走时间、买票时间以及上下车时间;

$Q_{i,m}^j$  为线路  $i$  上第  $m$  班船需要换乘到线路  $j$  上的客流量;

$x_{i,m}^{j,n}$  为线路  $i$  上第  $m$  班船与线路  $j$  上第  $n$  班船的换乘关系,成功换乘  $x_{i,m}^{j,n} = 1$ , 否则  $x_{i,m}^{j,n} = 0$ ;

$c_{i,m}^{j,n}$  为线路  $j$  上第  $n$  班船离开换乘站的时刻与乘客从线路  $i$  上第  $m$  班船上下来步行至线路  $j$  的时刻之差;

$w_{i,m}^{j,n}$  为单个乘客从线路  $i$  上第  $m$  班船换乘到线路  $j$  上第  $n$  班船换乘等待时间。当换乘不成功时,换乘等待时间为 0;

$h_i^{\min}, h_i^{\max}$  - 线路  $i$  上最小和最大发船间隔。

## 2.3 模型建立

本文在发船班次和运营时段不变以及发船间隔时间受约束的条件下建立优化模型,需要明确发船班次、运营时段、发船时间间隔的约束以及有效换乘的条件。

1) 换乘时刻差。

换乘时刻差为线路  $j$  上第  $n$  班船离开换乘站的

时刻  $(t_j^{(n)} + d_j^{(n)})$  与乘客从线路  $i$  上第  $m$  班船上下来步行至线路  $j$  的时刻  $(t_i^{(m)} + s_{i,j})$  之差。当换乘时刻差为负数时,暗含着实际情况中换乘不成功。

$$c_{i,m}^{j,n} = t_j^{(n)} + d_j^{(n)} - t_i^{(m)} - s_{i,j}, \forall i, j, m, n \quad (1)$$

2) 运营时段约束。

为了保证优化前后运营时段不变,只要保证优化前后首末班次的时刻分别相等。又因为线路  $i$  上的发船班次不变,所以第一个运营班次的序号为 1,最后一个班次的序号为  $N_i$ ,则优化后首末班次的时刻分别为:

$$t_i^{(1)} = T_i^F, \forall i \in R \quad (2)$$

$$t_i^{(N_i)} = T_i^L, \forall i \in R \quad (3)$$

3) 发船间隔约束。

发船间隔指线路  $i$  上相邻水上巴士发船时刻的差值。在这里,相邻发船间隔时间控制在最大发船间隔时间和最小发船间隔时间之间。

$$h_i^{\min} \leq t_i^{(m)} - t_i^{(m-1)} \leq h_i^{\max}, \quad \forall i \in R, m = 2, 3, \dots, N_i \quad (4)$$

4) 换乘关系约束。

在同一个换乘站内,线路  $i$  和线路  $j$  存在衔接关系,由于到站的时序性,两条线路上,不是任意两个班次之间都能产生有效的换乘关系。变量  $x_{i,m}^{j,n}$  表示两条线路班次之间的换乘关系。很显然,线路  $i$  上第  $m$  班船的乘客如果要换乘到线路  $j$  上第  $n$  班船,则需满足:

$$t_j^{(n)} + d_j^{(n)} \geq t_i^{(m)} + s_{i,j}, \forall i, j, m, n \quad (5)$$

根据式(1),不难得到单个乘客的换乘等待时间为:

$$w_{i,m}^{j,n} = x_{i,m}^{j,n} \cdot c_{i,m}^{j,n} \geq 0 \quad (6)$$

由于  $x_{i,m}^{j,n}$  为 0, 1 变量,因此如果  $c_{i,m}^{j,n} < 0$ , 上式成立必然有  $x_{i,m}^{j,n} = 0$ , 也就是说两者不可能换乘成功,换乘等待时间为 0; 当  $c_{i,m}^{j,n} \geq 0$ , 两个班次之间存在换乘成功的可能性,但是不一定能成功换乘。因为根据实际情况,乘客从线路  $i$  上第  $m$  班船换乘到线路  $j$  上时,只能选择与线路  $j$  上的一个班次进行换乘,而不能进行多次重复换乘,尽管其他班次也是可以成功换乘的。所以模型还需满足以下约束:

$$\sum_{n=1}^{N_j} x_{i,m}^{j,n} = 1, \forall i, j, m \quad (7)$$

需要指出的是,同一个换乘站内,线路  $i$  和线路  $j$  不存在衔接关系时(一条线路的上下行方向之间或者同一条线路之间),显然两条线路没有换乘需求也就不会产生换乘客流,即  $Q_{i,m}^j$  为 0。

5) 目标函数。

根据以上约束,一个换乘站内所有换乘关系下乘客总的换乘等待时间计算公式如式(8)所示:

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{j \in \mathbf{R}} \sum_m^{N_i} \sum_n^{N_j} w_{i,m}^{j,n} \cdot Q_{i,m}^j = \sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{j \in \mathbf{R}} \sum_m^{N_i} \sum_n^{N_j} c_{i,m}^{j,n} \cdot x_{i,m}^{j,n} \cdot Q_{i,m}^j \quad (8)$$

本文的目标是使得换乘站内所有换乘关系的换乘等待时间最小。由此,得出模型的目标函数  $F$  如式(9)所示。根据以上分析,式(9)~式(16)共同构成了换乘等待时间优化模型。

$$F = \min \sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{j \in \mathbf{R}} \sum_m^{N_i} \sum_n^{N_j} c_{i,m}^{j,n} \cdot x_{i,m}^{j,n} \cdot Q_{i,m}^j \quad (9)$$

$$t_i^{(1)} = T_i^F, \forall i \in \mathbf{R} \quad (10)$$

$$t_i^{(N_i)} = T_i^d, \forall i \in \mathbf{R} \quad (11)$$

$$h_i^{\min} \leq t_i^{(m)} - t_i^{(m-1)} \leq h_i^{\max}, \forall i \in \mathbf{R}, m = 2, 3, \dots, N_i \quad (12)$$

$$c_{i,m}^{j,n} = t_j^{(n)} + d_j^{(n)} - t_i^{(m)} - s_{i,j}, \forall i, j, m, n \quad (13)$$

$$c_{i,m}^{j,n} \cdot x_{i,m}^{j,n} \geq 0, \forall i, j, m, n \quad (14)$$

$$\sum_{n=1}^{N_j} x_{i,m}^{j,n} = 1, \forall i, j, m \quad (15)$$

$$x_{i,m}^{j,n} = 0 \text{ 或 } 1, \forall i, j, m, n \quad (16)$$

## 2.4 模型求解

模型需要解决的问题可以视为一个非线性整数规划问题。整数规划问题求解的方法有很多,可以根据模型复杂程度以及对计算时间和精度要求的不同,按实际情况选择。常用的有枚举法、分支界定法和遗传算法等。随着换乘线路的不断复杂化,模型中可行解的空间非常大,涉及参数较多,如果对解空间进行枚举,寻找最优解的效率较低,所以本文将用遗传算法求解问题。最后对比枚举法求解得到的最优值。

遗传算法是一种搜索寻优技术,它是从代表问题可能潜在的解集的一个种群开始,按照自然生物进化规律的规则,产生较优解<sup>[18-20]</sup>。应用遗传算法求解问题时,需要对以下 5 个方面分别进行设计。

### 1) 编码。

在遗传算法中,把一个问题的可行解从其解空间转换到遗传算法所能处理的空间的方法称为编码。常用的编码方式有二进制编码、实数编码等。实数编码直接使用问题变量进行编码,无需进行特定的编码和解码过程。本算法采用实数编码。

### 2) 初始种群产生。

产生初始种群的方法主要有两种:一种是随机产生;另一种是根据问题的经验约束,具有一定选择方向的选择产生。本算法采用随机产生方式。初始种群个数  $M$  的取值根据具体情况而定,一般取 20 - 100。

### 3) 适应度函数。

适应度函数用来评价个体在优化计算中可能达到或者接近最优解的程度。适应度优的个体遗传到下一代的可能性就大;反之个体被淘汰的可能性就大。由于本文模型的目标函数为最小值,因此可以以目标函数的倒数作为适应度函数。

### 4) 遗传操作设置。

遗传操作包括选择、交叉和变异三方面。选择时为了从当前种群中挑选出准备产生下一代的优良个体,一般包括轮盘赌法、竞标赛选择等,本算法采用轮盘赌法。交叉是为了能够在下一代产生新的个体,使得父代的优秀基因得以在种群中进行传播,以提高整体的搜索能力。一般二进制编码和实数编码下的交叉方式不一样,本算法使用的是实数编码。实数编码下的交叉方式通常有线形交叉、混合交叉、离散交叉等。本模型采用离散交叉法,交叉概率的取值一般为 0.4 ~ 0.99。变异过程本算法选择均匀变异,变异概率的取值范围一般为 0.000 1 - 0.5。

### 5) 算法终止。

算法在迭代若干次后终止,终止条件一般设置为:进化代数限制、计算耗费时间限制等。本算法设置终止条件为确定的进化代数  $ger$ ,  $ger$  的取值一般视具体问题而定。

## 3 实例分析

### 3.1 实例描述

本文以广州市西堤码头中线路 1(金沙洲 - 西堤线)换乘到 3(芳村 - 中大线)进行模型验证。为了计算方便,在优化过程中,固定线路 1 上船的到站时刻,通过优化协调线路 3 上船的到达换乘站的时刻,以减小换乘等待时间。

假设水上巴士运行速度一定,根据这两条线路的运行时间表,可以得到两条线路到达西堤站的时刻表如表 3 第 2 列和第 5 列所示。目前无法获得换乘乘客的数量,假设换乘客流如表 3 第 3 列所示。设乘客从线路 1 上的船下来换乘到线路 3 上的船的平均行走时间为 1 min,线路 3 上的船在西堤换乘站的平均停靠时间为 2 min。

### 3.2 模型输入

表 3 中第 2 列、第 3 列的数据和表 4 中的数据是本次实验模型需要输入的数据。

应用遗传算法时,需要对初始种群个数  $M$ 、交叉概率  $p_c$ 、变异概率  $p_m$ 、进化代数  $ger$  的值进行设置。本文选取多种参数组合进行试验,最后根据平均适应度函数的变化选定一组参数,试验过程不再赘述,

具体参数如表 5 所示。

表 3 优化前协调线路的到站时间与换乘客流量  
Table 3 Arrival time and transfer passenger flow before optimization

$m$	$t_1^{(m)}$	$Q_{1(m)}^3$	$n$	$t_3^{(n)}$
1	7:33	4	1	7:18
2	7:53	6	2	7:48
3	8:13	7	3	8:18
4	8:33	9	4	8:48
5	8:53	10	5	9:18
6	9:13	8	6	9:48
7	9:33	14	7	10:18
8	9:53	19	8	10:48
9	10:13	19	9	11:33
10	10:33	17	10	12:18
11	11:03	17	11	13:03
12	11:33	19	12	13:48
13	12:03	18	13	14:33
14	12:33	18	14	15:18
15	13:03	12	15	16:03
16	13:33	7	16	16:48
17	14:03	11	17	17:18
18	14:33	11	18	17:48
19	15:03	14	19	18:18
20	15:33	18	-	-
21	16:03	12	-	-
22	16:33	13	-	-
23	17:03	6	-	-
24	17:23	6	-	-
25	17:43	7	-	-
26	18:03	3	-	-
27	18:23	0	-	-
28	18:43	0	-	-
29	19:03	0	-	-

表 4 模型参数

Table 4 Parameters of model

参数	$t_3^{(1)}$	$t_3^{(19)}$	$N_3$	$h_3^{\max}$	$h_3^{\min}$	$d_3^{(m)}$	$s_{1,3}$
数值	7:18	18:18	19	25	50	2	1

表 5 遗传算法参数

Table 5 Parameters of genetic algorithm

参数	$M$	$ger$	$P_c$	$P_e$
数值	100	5 000	0.6	0.05

### 3.3 模型输出

遗传算法在 matlab7.0 软件上运行,计算获取

一些较优解,从中选出目标函数值较低的作为这次案例的最终结果。最终结果的每代最小换乘时间变化如图 1 所示。从图中可以看出随着遗传代数的不断增加,最优值不断的降低并且当迭代到 2 500 代时函数值保持稳定。具体优化后的结果如表 6 中第 7 列所示。

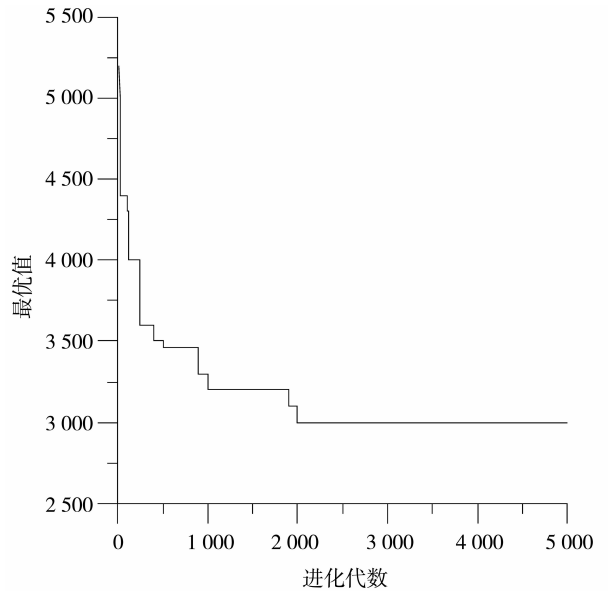


图 1 最优值变化

Fig. 1 Change of optimal value

优化前换乘等待时间为 5 030 min,优化后遗传算法计算下换乘等待时间为 2 997 min,总换乘等待时间减小 40.4%。模型优化效果较为明显。

从表 6 中的数据可以得到,优化后不是所有班次的等待时间都可以减小。这主要是因为模型以客流量为权重进行优化。当客流量较大时,在满足约束条件的前提下,使得两条线路衔接得更紧密些,从而使总换乘等待时间最小。

### 3.4 模型和算法适用性分析

为了验证在不同情景下模型的可行性和算法的适用性,利用模型对西堤码头不同换乘关系问题进行优化,用遗传算法和枚举法分别对问题进行求解,对比结果并且分析。在计算过程中,固定线路 1 的班次时刻表。在这里将在 LINGO 优化软件平台上运行的枚举法的求解时间上限设为 5 h。

具体情景和计算结果如表 7 所示。从多次求解结果与优化前进行对比可得模型对不同情景下的换乘都起到了优化作用。不同换乘情景中,遗传算法均能在 1 h 内得到近似最优解,而枚举法,只能对前 2 种简单换乘关系情景下求出最优解,其他均无法

在 5 h 内解出最优解。在规定的优化时间内,遗传算法的计算结果略劣于枚举法的最优解,并且误差控制在 15% 以内。

表 6 优化结果

Table 6 Optimization results

$m$	$t_1^{(m)}$	优化前			优化后		
		$n$	$t_3^{(n)}$	$w_{1,m}^{3,n}$	$n$	$t_3^{(n)}$	$w_{1,m}^{3,n}$
-	-	1	7:18	-	1	7:18	-
1	7:33	2	7:48	64	2	7:50	72
2	7:53	3	8:18	156	3	8:36	264
3	8:13	3	8:18	42	3	8:36	168
4	8:33	4	8:48	144	3	8:36	36
5	8:53	5	9:18	260	4	9:15	230
6	9:13	5	9:18	48	4	9:15	24
7	9:33	6	9:48	224	5	9:56	336
8	9:53	7	10:18	494	5	9:56	76
9	10:13	7	10:18	114	6	10:33	399
10	10:33	8	10:48	272	6	10:33	17
11	11:03	9	11:33	527	7	11:05	51
12	11:33	9	11:33	19	8	11:35	57
13	12:03	10	12:18	288	9	12:05	54
14	12:33	11	13:03	558	10	12:36	72
15	13:03	11	13:03	12	11	13:14	144
16	13:33	12	13:48	112	12	14:05	231
17	14:03	13	14:33	341	12	14:05	33
18	14:33	13	14:33	11	13	14:33	11
19	15:03	14	15:18	224	14	15:03	14
20	15:33	15	16:03	558	15	15:34	36
21	16:03	15	16:03	12	16	16:04	24
22	16:33	16	16:48	208	17	16:44	156
23	17:03	17	17:18	96	18	17:28	156
24	17:23	18	17:48	156	18	17:28	36
25	17:43	18	17:48	42	19	18:18	252
26	18:03	19	18:18	48	19	18:18	48
27	18:23	-	-	-	-	-	-
28	18:43	-	-	-	-	-	-
29	19:03	-	-	-	-	-	-

表 7 不同情境的计算结果

Table 7 Calculation results of different scenarios

情景	换乘关系	优化前/ min	优化后		
			枚举法/ min	遗传算法/ min	差值/%
1	1 → 3	5 030	2 269	2 997	14.9
2	1 → 3	15 620	10 529	11 130	3.9
	1 → 4				
3	1 → 3	21 508	-	14 616	-
	3 → 2				
4	1 → 3	27 676	-	19 589	-
	1 → 4				
	3 → 2				
4 → 2					

## 4 结 语

广州水上巴士线路成网发展,换乘必然成为其体现服务水平的一个重要方面。基于离站时刻模型主要是调整换乘站内各线路的第一个班次的时间进行换乘优化;而本文在保证线路运营时间、运营班次,在可变的发船间隔前提下,对换乘站内所有线路整个时刻表进行协调,达到优化总换乘等待时间的目的并且用遗传算法对问题进行求解。对多种换乘情景进行计算,对比枚举法的最优解,表明了模型在多种情景下都具有优化作用,且遗传算法的优化差值可以控制在 15% 以下。接下来,研究也将逐步复杂化,考虑水上巴士的容量和码头的停靠站的容量在换乘过程中的影响。

### 参考文献:

- [1] HADAS Y, CEDER A A. Optimal coordination of public-transit vehicles using operational tactics examined by simulation [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(6): 879-895.
- [2] KWAN C M, CHANG C S. Timetable synchronization of mass rapid transit system using multiobjective evolutionary approach [J]. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions, 2008, 38(5): 636-648.
- [3] SHAFABI Y, KHANI A. A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2010, 44(6): 377-389.
- [4] MESA J A, ORTEGA F A, POZO M A, et al. Rescheduling railway timetables in presence of passenger transfers between lines within a transportation network [M] //

- Computer-based Modelling and Optimization in Transportation, Switzerland: Springer, 2014: 347 – 360.
- [5] 白维雅. 城市轨道交通换乘优化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [6] VANSTEENWEGEN P, OUDHEUSDEN D V. Developing railway timetables which guarantee a better service [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 173(1): 337 – 350.
- [7] 马超云. 城市轨道交通换乘站列车时刻表的协调和优化 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [8] DESSOUKY M, HALL R, NOWROOZI A, et al. Bus dispatching at timed transfer transit stations using bus tracking technology [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1999, 7(4): 187 – 208.
- [9] YU B, WU S, YAO B, et al. Dynamic vehicle dispatching at a transfer station in public transportation system [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2011, 138(2): 191 – 201.
- [10] GUEVARA C A, DONOSO G A. Tactical design of high-demand bus transfers [J]. *Transport policy*, 2014, 32: 16 – 24.
- [11] 周雪梅, 杨晓光. 基于 ITS 的公共交通换乘等待时间最短调度问题研究 [J]. *中国公路学报*, 2005, 17(2): 82 – 84.
- [12] SHRIVASTAVA P, O'MAHONY M. A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules—A genetic algorithms approach [J]. *Transport Policy*, 2006, 13(5): 413 – 425.
- [13] WONG R C, YUEN T W, FUNG K W, et al. Optimizing timetable synchronization for rail mass transit [J]. *Transportation Science*, 2008, 42(1): 57 – 69.
- [14] WU Y H, TANG J F. Optimizing timetable synchronization for regional public transit with minimum transfer waiting times [C] // *Proceedings of the Control and Decision Conference (CCDC)*, 2012 24th Chinese, F, 2012.
- [15] ZHAO F, ZENG X. Optimization of transit route network, vehicle headways and timetables for large-scale transit networks [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 186(2): 841 – 855.
- [16] 石琴, 覃运梅, 黄志鹏. 公交区域调度的最大同步换乘模型 [J]. *中国公路学报*, 2008, 20(6): 90 – 94.
- [17] 白广争, 郭进, 石红国. 基于离站时刻协调的地铁换乘站列车衔接优化研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(5): 134 – 139.
- [18] MESA J A, ORTEGA F A, POZO M A. A geometric model for an effective rescheduling after reducing service in public transportation systems [J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(3): 737 – 746.
- [19] VIDAL T, CRAINIC T G, GENDREAU M, et al. A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows [J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(1): 475 – 489.
- [20] 燕乐纬, 陈树辉. 基于改进遗传算法的非线性方程组求解 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2011, 50(1): 9 – 13.

(上接第 18 页)

- [7] HUANG L. Accelerated design convergence with IC compiler-concurrent multi-mode, multi-corner (MCMM) and signoff driven closure [R]. TAIWAN: Synopsys Users Group, 2007.
- [8] Synopsys Inc. Using the synopsys design constraints format application note version Z-2007. 03 [R]. Synopsys Inc, 2007.
- [9] WANG L T, WU C W, WEN X Q. VLSI test principles and architectures: Design for testability [M]. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2006.
- [10] STEIN M. Crossing the abyss: asynchronous signals in a synchronous world [J]. *EDN*, 2003, 48(16): 59 – 69.
- [11] 严天鸣, 刘晓飞, 蔡准. 一种在 MCMM 条件下进行漏功耗优化的有效方法 [C] // *Synopsys Users Group China 2014*. 深圳, 2014: 117 – 124.
- [12] Synopsys Inc. Design compiler 1 workshop student guide 10 – I – 011 – SSG – 017 [R]. Synopsys Inc, 2011.
- [13] 廖日坤, 纪越峰, 李慧. 基于双核心处理架构的视频监控系统的设计 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(2): 33 – 35.
- [14] 陈宏臣, 杨坤怡. 基于 FPGA 高速实时图像数据处理系统的研究 [J]. *微计算机信息*, 2010(2): 128 – 129.
- [15] 房穗韬, 方艳梅. 基于插值检测的扫描图像源辨识方法 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2013, 52(5): 19 – 25.
- [16] Synopsys Inc. IC Compiler™ implementation user guide version G – 2012.06 – SP4 [R]. Synopsys Inc, 2012.