

# 城市轨道交通首班车衔接优化研究

宋悦<sup>1</sup>, 朱江斌<sup>1</sup>, 孟令云<sup>2</sup>, 黄凯<sup>3</sup>, 陈璐<sup>4</sup>

(1.福州城市地铁有限责任公司运营分公司, 福建福州 350011; 2.北京交通大学交通运输学院, 北京 100044; 3.西南交通大学交通运输与物流学院, 四川成都 610031; 4.北京市轨道交通指挥中心, 北京 100101)

**摘要:** 在城市轨道交通首班车接续关系中, 不存在两交路无法接续的情况, 仅需考虑等待时间。因此, 客流分布规律、服务水平对首班车的发车时刻编排具有决定意义。通过分析首班车衔接优化研究的重要性, 提出将各个换乘方向的换乘客流量作为权重定量衡量首班车协调层次的方法。以列车运行组织、换乘站到发时刻等为约束条件, 以首班车乘客加权换乘等待时间最小化为衔接优化目标, 建立首班车衔接优化模型。利用遗传算法思想, 运用 MATLAB 对模型进行求解。最后, 以北京市部分地铁线网为例验证了模型的可行性。

**关键词:** 城市轨道交通; 首班车; 衔接; 优化

Connection of Urban Rail Transit's First Daily Service

Song Yue<sup>1</sup>, Zhu Jiangbin<sup>1</sup>, Meng Lingyun<sup>2</sup>, Huang Kai<sup>3</sup>, Chen Jun<sup>4</sup>

(1.Operation Branch, Fuzhou Metro Co., Ltd., Fuzhou Fujian 350011, China; 2.School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3.School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China; 4.Beijing Metro Network Control Center, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The first trains of two crossing lines of urban rail transit can be always connected to each other. All that matters is the waiting time. Therefore, the distribution of passenger flow and level of service is significant to the scheduling of the departure time of the first train. By analyzing the importance of research into optimizing the connection of the first daily service, this paper proposes a method in which the passenger flow at different transfer directions is used to quantitatively weigh the coordination level of the first train. Based on the constraint conditions of railway transportation management and the arrival and departure time of transfer stations, the paper develops a model of first daily train's connection to minimize the weighted waiting time and transfer time of passengers on the first train. Using the principle of genetic algorithm, the model is solved by MATLAB. Finally, case studies conducted in several subway lines in Beijing are presented to demonstrate the model application.

**Keywords:** urban rail transit; first daily service; connection; optimization

收稿日期: 2016-07-03

基金项目: 国家自然科学基金“高速铁路调度指挥计划同步优化模型和算法”(71571012)

作者简介: 宋悦(1993—), 女, 福建南平人, 主要研究方向: 轨道交通运营组织优化。

E-mail: syshu93@163.com

随着城市轨道交通网络化运营时代的到来, 如何优化各线路间的衔接关系, 成为提高城市轨道交通服务水平的关键问题。当前研究主要集中于日间换乘衔接<sup>[1-3]</sup>, 对城市轨道交通首末班车尤其是首班车的换乘衔接研究尚不丰富, 而首末班车衔接问题不能完全用非首末班车衔接模型解决<sup>[3]</sup>。此外, 在早晚间主要衔接方向的确定方面, 现有研究大多基于已有衔接关系展开讨论<sup>[4-7]</sup>, 或较为主观地认定各衔接方向重要程度<sup>[8-10]</sup>, 极少数

研究将换乘客流作为确定末班车衔接方案的依据, 只考虑了衔不衔接的问题而忽略了等不等待的问题<sup>[11-12]</sup>。首班车协调组织作为线路运营组织协调的一部分, 是整日运营的基础, 一个高效、可靠的首班车衔接方案对提高早间乘客换乘效率、改善整日运营服务水平具有重要意义。因此, 研究如何客观地确定首班车衔接关系、建立首班车衔接优化模型十分必要。

## 1 首班车衔接优化模型构建

首班车衔接应使市郊的乘客能够搭乘所需列车进入市区工作,减少乘客的换乘等待时间<sup>[10]</sup>。由于轨道交通网络的复杂性,列车无法在所有换乘站均达到最佳换乘,需首先确定协调层次,达到优先协调相对重要衔接方向的目的;再根据列车始发时刻、列车区间运行时分(包括起停车附加时间)和列车停站时间等因素的相互关系,推算得到整个轨道交通网络的首班车衔接时刻表。

与城市轨道交通末班车衔接优化相比,由于后续列车的存在,首班车接续关系不成立的两交路间客流换乘还可由后续列车提供服务,客流分布规律、服务水平对首班车的发车时刻编排更具决定意义。因此,本文将客流分布规律即各个衔接方向换乘客流在目标函数中以权重形式表示,以衡量各个衔接方向重要程度,将首班车衔接优化目标设为乘客加权换乘等待时间最小化,以达到乘客总等待时间最小化,提高首班车服务水平。

### 1.1 基本假设

本文进行以下假设:1)对不同乘客、不同换乘来说,在同一换乘站换乘步行时间取值相同;2)在首班车运营时段,同一条线路发车间隔不变;3)乘客到达输送线站台后始终选择乘坐到达的第一辆列车,且该列车容量足够运送所有乘客。

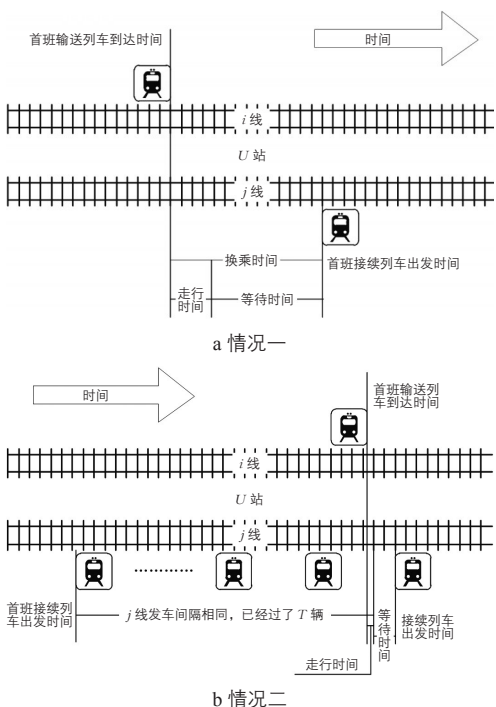


图1 首班车衔接示意

Fig.1 Connection of the first daily service

## 1.2 首班车衔接优化模型

首班车衔接优化模型

$$\min T_{wait} = \sum_{i,j \in L} \sum_{p,q \in S} (V_{ij,U}^{pq} t_{ij,U}^{C,pq}), \quad (1)$$

$$i \neq j, p \in (1, 2), q \in (1, 2)$$

式中:  $T_{wait}$  为乘客换乘等待时间/min;  $L=(1, 2, 3, \dots, i, \dots, j, \dots, n)$  为线路集,其中  $i$  为输送线,  $j$  为接续线;  $S=(1, 2, 3, \dots, U)$  为换乘站集,对各个换乘站进行编号;  $V_{ij,U}^{pq}$  为在  $U$  站从  $i$  线  $p$  行换乘至  $j$  线  $q$  行的首班车换乘客流量/(人次·h<sup>-1</sup>);  $p \in (1, 2)$ ,  $q \in (1, 2)$ , 其中,  $p=1$  表示  $i$  线上行,  $p=2$  表示  $i$  线下行,  $q$  与  $j$  线同理;  $t_{ij,U}^{C,pq}$  为乘客在  $U$  站从  $i$  线  $p$  行换乘至  $j$  线  $q$  行的换乘等待时间/min。

首班车在换乘站的衔接分为两种情况,一种是当乘客到达接续线站台时,首班接续列车尚未到达(或正准备离开),乘客需等待首班接续列车(或形成无缝衔接)(见图1a)。此时的换乘弹性时间大于或等于0,换乘等待时间等于换乘弹性时间

$$t_{ij,U}^{R,pq} = t_{j,U}^{D,q} - t_{i,U}^{A,p} - t_{ij,U}^W \geq 0, \quad (2)$$

$$t_{ij,U}^{C,pq} = t_{ij,U}^{R,pq}, \quad (3)$$

式中:  $t_{ij,U}^{R,pq}$  为乘客在  $U$  站从  $i$  线  $p$  行换乘至  $j$  线  $q$  行的换乘弹性时间/min,即接续列车出发时间与输送列车到达时间的的时间差再扣除乘客换乘走行时间的剩余时间;  $t_{j,U}^{D,q}$  为  $j$  线  $q$  行接续列车在  $U$  站的出发时间/min,另设  $t_{j,U}^{D,q}$  为  $j$  线  $q$  行的首班车始发时刻;  $t_{i,U}^{A,p}$  为  $i$  线  $p$  行输送列车到达  $U$  站的时间/min;  $t_{ij,U}^W$  为乘客在  $U$  站从  $i$  线换乘至  $j$  线的换乘走行时间/min。

对于上述到达时刻和出发时刻,计算时需选取一个基础时刻节点。例如选取基础时刻节点为5:00,当到达时刻为5:15时,则记为15 min。

另一种情况则是当乘客到达接续线站台时,首班接续列车已经出发,乘客只需等待下一辆到达车站的列车即可。此时,由于假设乘客均乘坐到达站台的第一辆列车离开,所以此时乘客的换乘等待时间一定小于或等于接续列车的发车间隔时间(见图1b)。此时换乘弹性时间小于或等于0,即

$$t_{ij,U}^{R,pq} = t_{j,U}^{D,q} - t_{i,U}^{A,p} - t_{ij,U}^W < 0. \quad (4)$$

假设在乘客乘坐首班输送列车到达换乘站并行走至接续线站台的同时,接续线经过了  $K$  辆列车,则  $K$  等于乘客换乘弹性时间  $t_{ij,U}^{R,pq}$  的绝对值对  $j$  线发车间隔时间取整,即

$$K = \left[ \begin{array}{c} -t_{ij,U}^{R,pq} \\ t_j^{H,q} \end{array} \right], \quad (5)$$

式中：[ ]表示取整函数； $t_j^{H,q}$ 为*j*线*q*行列车发车间隔时间/min。

又由于乘客只需等待下一辆到达车站的列车即可离开，所以乘客需等待时间

$$t_{ij,U}^{C,pq} = \begin{cases} t_j^{H,q} - (-t_{ij,U}^{R,pq} - K t_j^{H,q}), & -t_{ij,U}^{R,pq} - K t_j^{H,q} \neq 0 \\ 0, & -t_{ij,U}^{R,pq} - K t_j^{H,q} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中： $-t_{ij,U}^{R,pq} - K t_j^{H,q} = 0$ 表示无缝衔接的情况。

对于换乘站，可由*U*值确定*i, j, u<sub>i</sub>, u<sub>j</sub>*的值。输送线(*i*线)上行列车在换乘站*U*的到达时刻为*i*线起始车站发车时刻、*U*(*u<sub>i</sub>*)站前各站区间运行时间和*U*(*u<sub>i</sub>*)站前各站停车时间之和，即

$$t_{i,U}^{A,1} = t_{i,O}^{D,1} + \sum_{x_j=2, x_j \in Z_i}^{u_i} t_{i,x(x_j-1)}^{Y,1} + \sum_{x_j=2, x_j \in Z_i}^{u_i-1} t_{i,x_j}^{T,1}. \quad (7)$$

接续线(*j*线)上行列车在换乘站*U*的出发时刻为该线起始车站的发车时刻、*U*(*u<sub>j</sub>*)站前各站区间运行时间、*U*(*u<sub>j</sub>*)站前各站及*U*(*u<sub>j</sub>*)站停车时间之和，即

$$t_{j,U}^{D,1} = t_{j,O}^{D,1} + \sum_{x_j=2, x_j \in Z_j}^{u_j} t_{j,x(x_j-1)}^{Y,1} + \sum_{x_j=2, x_j \in Z_j}^{u_j} t_{j,x_j}^{T,1}. \quad (8)$$

由于*u<sub>i</sub>*、*u<sub>j</sub>*均表示换乘站从上行方向看的位置，所以下行方向的到达时刻和出发时刻的计算与上行方向略有不同，需看作从上行方向的终端车站开始计算，即

$$t_{i,U}^{A,2} = t_{i,O}^{D,2} + \sum_{u_i, u_i \in Z_i}^{m_i-1} t_{i,u(u_i+1)}^{Y,2} + \sum_{u_i, u_i \in Z_i}^{m_i-2} t_{i,u_i+1}^{T,2}, \quad (9)$$

$$t_{j,U}^{D,2} = t_{j,O}^{D,2} + \sum_{u_j, u_j \in Z_j}^{m_j-1} t_{j,u_j(u_j+1)}^{Y,2} + \sum_{u_j, u_j \in Z_j}^{m_j-1} t_{j,u_j}^{T,2}, \quad (10)$$

式中： $Z_n = (1, 2, 3, \dots, x_n, u_n, \dots, m_n)$ 为线路*n*的车站集，表示按上行方向顺序对线路上的各个车站进行编号； $x_n$ 为线路*n*上任意车站的编号； $u_n$ 为换乘站*U*在线路*n*上的车站编号； $m_n$ 为线路*n*的终端车站编号； $t_{i,x(x_j-1)}^{Y,p}$ 为*i*线*p*行列车在*x<sub>i</sub>*与(*x<sub>i</sub>-1*)站间的列车运行时间(包括起停车附加时分)/min，*j*线同理； $t_{i,x_i}^{T,p}$ 为*i*线*p*行列车在*x<sub>i</sub>*站的停留时间/min，*j*线同理。

每条线路列车的始发时刻 $t^D$ 、接续线(*j*线)的发车间隔时间 $t^H$ 、各站的停站时间 $t^T$ 以及每两站间区间运行时分(包括起停车附加时分) $t^Y$ 均需遵循相关规定，即

$$t_{\min}^D \leq t_{i,O}^{D,p} \leq t_{\max}^D, \quad (11)$$

$$t_{\min}^D \leq t_{j,O}^{D,q} \leq t_{\max}^D, \quad (12)$$

$$t_{\min}^H \leq t_j^{H,q} \leq t_{\max}^H, \quad (13)$$

$$t_{\min}^T \leq t_{i,x_i}^{T,p} \leq t_{\max}^T, \quad (14)$$

$$t_{\min}^T \leq t_{j,x_j}^{T,q} \leq t_{\max}^T, \quad (15)$$

$$t_{\min}^Y \leq t_{i,x(x_i-1)}^{Y,p} \leq t_{\max}^Y, \quad (16)$$

$$t_{\min}^Y \leq t_{j,x(x_j-1)}^{Y,p} \leq t_{\max}^Y. \quad (17)$$

另外需要说明的是，由于将输送线设为*i*，接续线设为*j*，所以无论换乘站*U*为2条线路换乘还是多条线路(3条或以上线路)换乘，本模型均适用，只不过在多条线路换乘时，*i*和*j*的取值范围相应增加而已。

### 1.3 模型求解

文献[13]证明时刻表的同步优化问题属于NP难度等级，而遗传算法是一种随机优化方法，具有高效运行，能够并行、全局搜索等优点，能在列车时刻表优化问题中取得较好效果<sup>[3]</sup>。因此，本文运用遗传算法对建立的首班车衔接优化模型进行求解，步骤如下：

1) 参数的编码与解码。考虑首班车衔接优化模型的搜索空间大、变量多，采用实数编码方式进行编码。将每条线路上、下行首班车的始发时间、每两站间的区间运行时分、每个车站的停站时间，以及每条线路上、下行的列车发车间隔时间作为遗传算法中每条染色体的基因，一条染色体代表问题的一个解(见图2)。

2) 种群初始化。采用随机初始化的方式生产初始种群。每个参数的取值均从其对应的范围内随机产生。

3) 适应度函数值计算。采取直接以待解的目标函数*f*转化为适应度函数*Fit*(*f*)的转换方式，将首班车衔接优化模型的适应度函数*Fit*(*f*)设置为目标函数*f<sub>i</sub>*的相反数，即

$$Fit(f_i) = -f_i. \quad (18)$$

4) 选择操作。采用锦标赛选择法，取*n*=2，则新种群中与父代染色体相同的染色体有*N*/2个，*N*为种群的个体数量。该方法的优点是对个体适应度函数值的取正或取负值无要求，且有较高概率保证最优个体被选择，最差个体被淘汰。

5) 交叉操作。采用单点交叉法，即在满足交叉概率的情况下，在随机配对的父代个体中随机选择一个交叉点，将位于交叉点之前或之后的变量进行交换，以形成后代。

6) 变异操作。采用基本位变异的方法，即以变异概率，随机指定某一位或某几位基因座上的值做变异运算。

7) 判断是否满足终止条件。采用给定

1号线 上行 始发时间	2号线 上行 始发时间	.....	n号线 上行 始发时间	1号线 上行 1站—2站 运行时间	1号线 上行 2站—3站 运行时间	.....	n号线 上行 Mn-1站—Mn站 运行时间	1号线 下行 1站—2站 运行时间	.....	n号线 下行 Mn-1站—Mn站 运行时间
5:00	5:05	.....	5:30	5	6	.....	5	5	.....	5
首班车首站始发时间				列车区间运行时分(包括起停车附加时分)						
1号线 上行1站 停留时间	1号线 上行2站 停留时间	.....	n号线 上行Mn站 停留时间	1号线 下行1站 停留时间	.....	n号线 下行Mn站 停留时间	1号线 上行 间隔时间	2号线 上行 间隔时间	.....	n号线 下行 间隔时间
1	2	.....	2	2	.....	1	3	5	.....	6
列车停站时间							发车间隔时间			

图2 染色体编码串  
Fig.2 Encoded string of chromosome

表1 各换乘站位置及乘客换乘走行时间  
Tab.1 Position of transfer stations and walking time of passengers during transfer

U	i	j	u <sub>i</sub>	u <sub>j</sub>	min l <sub>i,j,U</sub> <sup>w</sup>
1	1	2	2	4	2
1	2	1	4	2	2
2	1	3	7	3	3
2	3	1	3	7	3
3	1	2	8	11	2
3	2	1	11	8	2
4	2	3	9	2	3
4	3	2	2	9	3
5	2	3	15	8	3
5	3	2	8	15	3

最大迭代次数法作为算法的终止条件，即当迭代次数达到给定的最大迭代次数时，遗传算法终止，输出适应度函数值最大的个体，否则，跳转至第三步。

## 2 案例研究

### 2.1 参数设置

选取北京地铁1号线(南礼士路—永安里段)、2号线和5号线(磁器口—和平里北街段)构建路网作为研究对象(见图3)，图中箭头方向表示线路上行方向。

根据案例路网情况以及调研结果，对模型中的参数进行如下设置：

1) 路网参数。

线路集  $L=(1, 2, 3)$ ；换乘站集  $S=(1,$

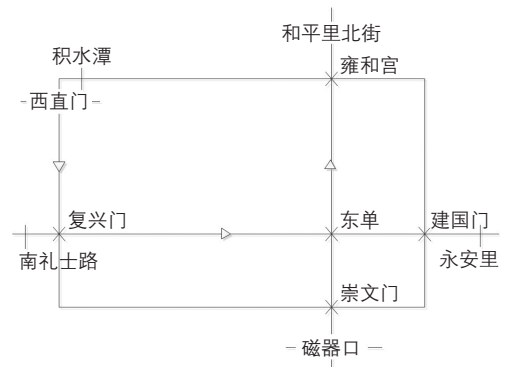


图3 实例路网结构示意图  
Fig.3 Structure of roadway network as an example

2, 3, 4, 5)；线路车站集  $Z_1=(1, 2, 3, \dots, 9)$ ， $Z_2=(1, 2, 3, \dots, 18)$ ， $Z_3=(1, 2, 3, \dots, 9)$ 。

2) 列车运行参数。

根据北京市地方标准《城市轨道交通运营服务管理规范》(DB11/T 647—2009)《地铁设计规范》(GB 50157—2013)等有关规定，北京地铁首班车发车时刻不晚于5:30，理论最高运行速度为80 km·h<sup>-1</sup>；远期平峰时段最大运行间隔时间不宜大于6 min。结合各站间的里程和首班车时刻表情况，设置列车运行参数如下(单位：min)：列车始发时间  $t^D \in (0, 30)$ ；发车间隔时间  $t^H \in (3, 6)$ ；区间运行时间  $t^Y \in (2, 4)$ ；列车停站时间  $t^T \in (1, 2)$ 。

3) 换乘站位置及换乘走行时间。

参数  $U, i, j, u_i, u_j$  用来表示换乘在各个线路中的位置， $l_{i,j,U}^w$  表示换乘走行时间，它们间的对应关系见表1。

4) 遗传算法参数。

根据遗传算法试算的结果分析，将遗传

表2 现状首班车各换乘站各换乘方向到发时刻

Tab.2 Arrival and departure time in different transfer directions at transfer stations for the first daily train

换乘站名称	换乘衔接方向	到达时刻	出发时刻	换乘走行时间/min	发车间隔时间/min	等待时间/min	换乘客流量/(人次·h <sup>-1</sup> )	加权等待时间/min
复兴门	1号线上行→2号线上行	5:15	5:18	2	3	1	83	83
	1号线上行→2号线下行	5:15	5:38	2	3	21	173	3 633
	1号线下行→2号线上行	5:20	5:18	2	3	2	5	10
	1号线下行→2号线下行	5:20	5:38	2	3	16	19	304
	2号线上行→1号线上行	5:17	5:16	2	3	0	56	0
	2号线上行→1号线下行	5:17	5:21	2	3	2	63	126
	2号线下行→1号线上行	5:37	5:16	2	3	1	12	12
	2号线下行→1号线下行	5:37	5:21	2	3	0	214	0
东单	1号线上行→5号线上行	5:25	5:34	3	4	6	78	468
	1号线上行→5号线下行	5:25	5:37	3	4	9	17	153
	1号线下行→5号线上行	5:09	5:34	3	4	22	31	682
	1号线下行→5号线下行	5:09	5:37	3	4	25	38	950
	5号线上行→1号线上行	5:33	5:26	3	3	2	41	82
	5号线上行→1号线下行	5:33	5:10	3	3	1	50	50
	5号线下行→1号线上行	5:36	5:26	3	3	2	43	86
	5号线下行→1号线下行	5:36	5:10	3	3	1	124	124
建国门	1号线上行→2号线上行	5:28	5:24	2	3	0	49	0
	1号线上行→2号线下行	5:28	5:22	2	3	1	10	10
	1号线下行→2号线上行	5:07	5:24	2	3	15	71	1 065
	1号线下行→2号线下行	5:07	5:22	2	3	13	44	572
	2号线上行→1号线上行	5:23	5:29	2	3	4	263	1 052
	2号线上行→1号线下行	5:23	5:08	2	3	1	305	305
	2号线下行→1号线上行	5:21	5:29	2	3	6	59	354
	2号线下行→1号线下行	5:21	5:08	2	3	0	71	0
崇文门	2号线上行→5号线上行	5:28	5:32	3	4	1	22	22
	2号线上行→5号线下行	5:28	5:39	3	4	8	14	112
	2号线下行→5号线上行	5:26	5:32	3	4	3	83	249
	2号线下行→5号线下行	5:26	5:39	3	4	10	201	2 010
	5号线上行→2号线上行	5:31	5:29	3	3	1	46	46
	5号线上行→2号线下行	5:31	5:27	3	3	2	45	90
	5号线下行→2号线上行	5:38	5:29	3	3	0	17	0
	5号线下行→2号线下行	5:38	5:27	3	3	1	31	31
雍和宫	2号线上行→5号线上行	5:34	5:44	3	4	7	106	742
	2号线上行→5号线下行	5:34	5:27	3	4	2	6	12
	2号线下行→5号线上行	5:11	5:44	3	4	30	20	600
	2号线下行→5号线下行	5:11	5:27	3	4	13	18	234
	5号线上行→2号线上行	5:43	5:35	3	3	1	16	16
	5号线上行→2号线下行	5:43	5:12	3	3	2	6	12
	5号线下行→2号线上行	5:26	5:35	3	3	6	114	684
	5号线下行→2号线下行	5:26	5:12	3	3	1	140	140
总计								15 121

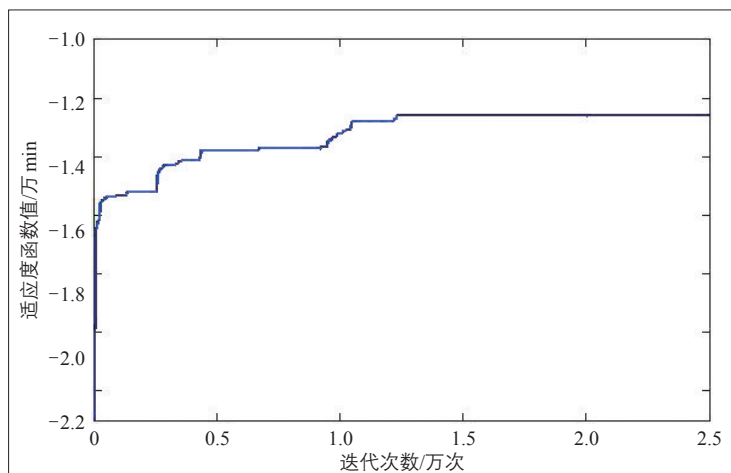


图4 首班车衔接优化模型适应度函数值变化曲线

Fig.4 Variation curve of fitness function value of first daily train connection model

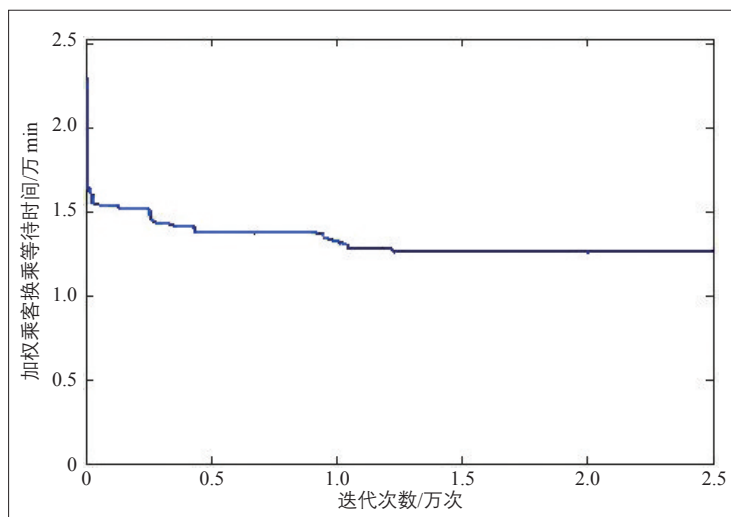


图5 首班车衔接优化模型目标函数值变化曲线

Fig.5 Variation curve of objective function value of first daily train connection model

算法中的参数设置为：初始种群大小120；迭代次数8 000；锦标赛选择法次种群个数2；交叉概率0.9；变异概率0.1。

### 2.2 首班车衔接优化结果分析

各换乘站各换乘方向的首班车到发时刻见表2，其中，各换乘方向的换乘客流  $V_{ij,U}^{pq}$  由调研得到。

在 Windows 7 系统下，使用 Matlab R2013b 编写并运行遗传算法的程序代码，代码可以成功运行。算法进行过程中，首班车衔接优化模型的适应度函数值变化曲线如图4所示，适应度函数值在1.2万次左右迭代时趋于稳定，因此，将首班车衔接优化模型求解过程中的最大迭代次数设置为2.5万次足够满足要求。

运行算法，算法进行过程中目标函数值(加权乘客换乘等待时间)的变化曲线如图5

所示。

优化后各换乘站各换乘方向的首班车到发时刻见表3。在原始时刻表下，全路网的加权乘客换乘等待时间总和为15 121 min，而优化后的时刻表则下降为12 897 min，减少14.7%。此外，原时刻表无缝衔接方向仅为5个，占总衔接方向的12.5%，而优化后的时刻表则提高至18个，占全部衔接方向的45%。可见，该首班车衔接优化模型的优化效果十分显著。

### 3 结语

本文以城市轨道交通首班车的换乘衔接优化为研究内容，建立网络化运营条件下的首班车衔接优化模型，设计模型求解的遗传算法，并通过实例验证了模型的可行性。通过分析首班车的衔接特性确立了客流分布规律对首班车衔接优化的重要影响，从而提出以各个换乘方向的换乘客流量为权重定量衡量协调层次的方法。将大多数研究中的换乘时间最小化目标进一步设置为加权换乘时间最小化，将首班车乘客的总等待时长最小化作为衔接优化的目标。本文建立的模型对2条或多条线路在同一个换乘站的换乘均适用。虽然优化实例验证了优化模型的可行性，但优化实例收敛速度较慢，如何提高模型的优化效率是今后研究的重点问题。

### 参考文献:

#### References:

- [1] Chen Shaokuan, Leng Yan, Mao Baohua, et al. Integrated Weight-Based Multi-Criteria Evaluation on Transfer in Large Transport Terminals: A Case Study of the Beijing South Railway Station[J]. Transportation Research Part A, 2014, 66(1): 13-26.
- [2] 邓连波, 高伟, 赖天珍, 等. 基于换乘网络的城市轨道交通关联公交接驳线网优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(6): 77-83. Deng Lianbo, Gao Wei, Lai Tianzhen, et al. Optimal Design of Feeder-Bus Network Related to Urban Rail Transit Based on Transfer Network[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(6): 77-83.
- [3] Shafahi Y, Khani A. A Practical Model for Transfer Optimization in a Transit Network: Model Formulations and Solutions[J]. Transportation Research Part A, 2010, 44(6): 377-389.

表3 优化后首班车各换乘站各换乘方向到发时刻

Tab.3 Arrival and departure time in different transfer directions at transfer stations for the first daily train after optimization

换乘站名称	换乘衔接方向	到达时刻	出发时刻	换乘走行时间/min	发车间隔时间/min	换乘等待时间/min	换乘客流量/(人次·h <sup>-1</sup> )	加权等待时间/min
复兴门	1号线上行→2号线上行	5:17	5:13	2	3	0	83	0
	1号线上行→2号线下行	5:17	5:46	2	4	27	173	4 671
	1号线下行→2号线上行	5:48	5:13	2	3	2	5	10
	1号线下行→2号线下行	5:48	5:46	2	4	0	19	0
	2号线上行→1号线上行	5:21	5:24	2	3	1	56	56
	2号线上行→1号线下行	5:21	5:41	2	4	18	63	1 134
	2号线下行→1号线上行	5:39	5:24	2	3	1	12	12
	2号线下行→1号线下行	5:39	5:41	2	4	0	214	0
东单	1号线上行→5号线上行	5:35	5:32	3	3	0	78	0
	1号线上行→5号线下行	5:35	5:34	3	3	2	17	34
	1号线下行→5号线上行	5:31	5:32	3	3	1	31	31
	1号线下行→5号线下行	5:31	5:34	3	3	0	38	0
	5号线上行→1号线上行	5:18	5:21	3	3	0	41	0
	5号线上行→1号线下行	5:18	5:46	3	4	25	50	1 250
	5号线下行→1号线上行	5:51	5:21	3	3	0	43	0
	5号线下行→1号线下行	5:51	5:46	3	4	0	124	0
建国门	1号线上行→2号线上行	5:39	5:35	2	3	0	49	0
	1号线上行→2号线下行	5:39	5:27	2	4	2	10	20
	1号线下行→2号线上行	5:28	5:35	2	3	5	71	355
	1号线下行→2号线下行	5:28	5:27	2	4	1	44	44
	2号线上行→1号线上行	5:49	5:51	2	3	0	263	0
	2号线上行→1号线下行	5:49	5:23	2	4	0	305	0
	2号线下行→1号线上行	5:23	5:51	2	3	26	59	1 534
	2号线下行→1号线下行	5:23	5:23	2	4	2	71	142
崇文门	2号线上行→5号线上行	5:38	5:38	3	3	0	22	0
	2号线上行→5号线下行	5:38	5:26	3	3	0	14	0
	2号线下行→5号线上行	5:23	5:38	3	3	12	83	996
	2号线下行→5号线下行	5:23	5:26	3	3	0	201	0
	5号线上行→2号线上行	5:13	5:13	3	3	0	46	0
	5号线上行→2号线下行	5:13	5:46	3	4	30	45	1 350
	5号线下行→2号线上行	5:55	5:13	3	3	0	17	0
	5号线下行→2号线下行	5:55	5:46	3	4	0	31	0
雍和宫	2号线上行→5号线上行	6:06	6:00	3	3	0	106	0
	2号线上行→5号线下行	6:06	5:25	3	3	1	6	6
	2号线下行→5号线上行	5:23	6:00	3	3	34	20	680
	2号线下行→5号线下行	5:23	5:25	3	3	2	18	36
	5号线上行→2号线上行	5:34	5:35	3	3	1	16	16
	5号线上行→2号线下行	5:34	5:27	3	4	2	6	12
	5号线下行→2号线上行	5:30	5:35	3	3	2	114	228
	5号线下行→2号线下行	5:30	5:27	3	4	2	140	280
总计								12 897

- [4] Kang Liujiang, Wu Jianjun, Sun Huijun, et al. A Case Study on the Coordination of Last Trains for the Beijing Subway Network[J]. *Transportation Research Part B*, 2015, 72(72): 112-127.
- [5] 罗钦, 徐瑞华, 江志彬, 陈菁菁. 基于运行图的轨道交通网络动态可达性研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(1): 72-75. Luo Qin, Xu Ruihua, Jiang Zhibin, Chen Jiangjing. Dynamic Accessibility of Urban Mass Transit Network Based on Train Diagram[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(1): 72-75.
- [6] 彭益兵, 苏厚勤, 何晋川. 轨交末班车可达多路径换乘算法的研究与实现[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(4): 1373-1379. Peng Yibing, Su Houqin, He Jinchuan. Study and Implementation of Algorithm for Reachable Multi-Path Transfer of Rail Transit's Last Trains[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(4): 1373-1379.
- [7] 徐杰, 张新, 郭建媛, 杜婷婷. 基于末班车时刻表的城市轨道交通客流诱导系统的研究[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35(2): 112-119. Xu Jie, Zhang Xin, Guo Jianyuan, Du Tingting. Research on Passenger Guidance System of Urban Rail Transit Network Based on Timetable of Last Train[J]. *China Railway Science*, 2014, 35(2): 112-119.
- [8] 张铭, 徐瑞华. 轨道交通网络列车衔接组织的递阶协调优化[J]. *系统工程*, 2007, 25(9): 33-37. Zhang Ming, Xu Ruihua. Hierarchical Coordination Optimization of Train Schedule for Transfer in Urban Rail Network[J]. *Systems Engineering*, 2007, 25(9): 33-37.
- [9] 张铭, 杜世敏. 基于递阶偏好的轨道交通网络化运营换乘协调优化[J]. *铁道学报*, 2009, 31(6): 9-14. Zhang Ming, Du Shimin. Transfer Coordination Optimization for Network Operation of Urban Rail Transit Based on Hierarchical Preference[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2009, 31(6): 9-14.
- [10] 徐瑞华, 张铭, 江志彬. 基于线网运营协调的城市轨道交通首末班列车发车时间域研究[J]. *铁道学报*, 2008, 30(2): 7-11. Xu Ruihua, Zhang Ming, Jiang Zhibin. Study on Departure Time Domain of the First and Last Trains of Urban Mass Transit Network Based on Operation Coordination [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2008, 30(2): 7-11.
- [11] 孙爱钦. 城市轨道交通路网首末班车衔接方案研究[D]. 上海: 上海工程科技大学, 2015. Sun Aiqin. The Research on Connection Scheme of First and Last Bus of Urban Rail Transportation Network[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2015.
- [12] 徐瑞华, 李璇. 城市轨道交通网络末班车衔接方案的综合优化[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 1510-1516. Xu Ruihua, Li Xuan. Comprehensive Optimization for Connection Scheme of Last Trains in Urban Mass Transit Network[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(10): 1510-1516.
- [13] Ibarra-Rojas O J, Rios-Solis Y A. Synchronization of Bus Timetabling[J]. *Transportation Research Part B*, 2012, 46(5): 599-614.
- [14] 王永亮, 张星臣, 徐彬, 解晓灵. 城市轨道交通网络化列车开行方案优化方法[J]. *中国铁道科学*, 2012, 33(5): 120-126. Wang Yongliang, Zhang Xingchen, Xu Bin, Xie Xiaoling. Optimization Method for the Networking Train Operation Plan of Urban Rail Transit[J]. *China Railway Science*, 2012, 33(5): 120-126.
- [15] 周艳芳, 周磊山, 乐逸祥. 城市轨道交通网络换乘站列车衔接同步协调优化[J]. *铁道学报*, 2011, 33(3): 10-16. Zhou Yanfang, Zhou Leishan, Yue Yixiang. Synchronized and Coordination Train Connecting Optimization for Transfer Station of Urban Rail Networks[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(3): 10-16.
- [16] 何韬, 毛保华, 杨远舟, 朱锦. 地铁换乘站线路间列车到站间隔优化问题研究[J]. *物流技术*, 2011, 30(6): 118-121. He Tao, Mao Baohua, Yang Yuanzhou, Zhu Jin. Optimization of Arrival Intervals at Metro Interchange Stations[J]. *Logistics Technology*, 2011, 30(6): 118-121.
- [17] 史瑞洁. 城市轨道交通运营组织优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011. Shi Ruijie. Optimization Study on Operation Organization of Urban Rail Transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [18] Kang Liujiang, Wu Jianjun, Sun Huijun, et al. A Practical Model for Last Train Rescheduling with Train Delay in Urban Railway Transit Networks[J]. *Omega*, 2015, 50: 29-42.