

文章编号:1005-0523(2019)01-0079-08

基于换乘重要度的轨道交通网络运营计划协调优化

陈琪¹,曾翠峰¹,郭莹²,罗钦³

(1. 深圳市地铁集团有限公司运营总部,广东深圳 518040;2. 深圳市城市交通规划设计研究中心,广东深圳 518060;
3. 深圳技术大学城市交通与物流学院,广东深圳 518118)

摘要:为提高城市轨道交通整体网络运营效率,提升客运服务水平,以轨道交通乘客出行需求为导向,提出换乘关系综合重要度的衡量指标,以此为依据建立网络运营计划分步协调优化模型及算法,旨在减少乘客换乘候车时间,实现提高换乘站内乘客换乘便利性目的。以某市线网为例进行协调优化,验证模型算法的有效性。算例分析表明,经分步协调后全网平均换乘候车时间缩减了12.42%,乘客单次换乘候车平均节省0.39 min,能够有效地缩减乘客的换乘候车时间,优化网络运营计划衔接状态,提升线网换乘效率。

关键词:轨道交通;网络运营计划;换乘重要度;协调

中图分类号:U121

文献标志码:A

为了充分发挥轨道交通网络的整体效益,保证轨道交通网络运营的高效和可靠,需要基于乘客出行需求对网络各线的运营计划进行协调优化。对网络运营计划协调优化的研究,一方面是从网络全局的角度考虑,以线网中所有换乘站为对象,实现换乘总等待时间费用最小化^[1-3],如曹志超等^[4]构建了0-1变量的轨道交通同步协调优化模型,Wong^[5]通过调整区间运行时间、行车间隔等减少网络整体的换乘等待时间,Li^[6]考虑乘客乘车感受建立总换乘等待费用函数对运行时刻表进行调整优化;另一方面主要以换乘客流量或换乘节点重要度为依据,采用大系统递阶优化方法,以各换乘站为对象对网络运营计划进行分层优化,如张铭等^[7]设计了换乘点衔接—网络协调的二阶协调优化方法,房霄虹^[8]和安亚崢^[9]对换乘节点的优先级进行分析,并按节点重要度分步协调优化。随着线网结构逐步向网络化化发展,应从网络层面综合考虑换乘客流需求和换乘站的运作效率作为网络运营计划协调优化的依据。

考虑到不同换乘站在网络上的重要程度不同,在网络运营协调过程中需要分别对待。本文利用复杂网络理论指标分析网络节点的重要度,并结合网络换乘客流量分布情况,从网络结构和换乘客流两个角度,综合衡量换乘关系的重要度,并以此作为依据,对平峰时段网络运行计划进行分步协调优化,既考虑了网络中换乘节点的重要性,又兼顾了乘客的出行需求,提升网络换乘效率。

1 换乘关系综合重要度分析

轨道交通线网结构可视为复杂网络^[10-12],根据复杂网络理论分析其网络换乘节点的重要度,并结合分换乘方向的换乘客流量,对换乘关系的重要度进行衡量。

1.1 网络换乘节点的重要度

在轨道交通线网结构中,令不同换乘站失效,通过网络效率的变化情况来反映换乘节点的重要度。网络

收稿日期:2018-07-17

基金项目:教育部人文社会科学研究一般项目(15YJCZH108);广东省自然科学基金(2018A030313119)

作者简介:陈琪(1970—),男,工程师,研究方向为轨道交通运营管理。

通讯作者:罗钦(1982—)男,副教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理。

节点信息的交互效率常用平均网络效率 E 来衡量。对于线网结构 G , 其平均网络效率 $E(G)$ 可表示为

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{\substack{v_i \neq v_j \\ v_i, v_j \in G}} \frac{1}{d_{ij}} \quad (1)$$

式中: d_{ij} 为节点 v_i 与节点 v_j 之间的最短路径; N 为线网结构 G 中的节点数。

令网络结构中某一个换乘节点 v_i 失效, 计算当前新线网结构为 G'_v 的平均网络效率 $E(G'_v)$, 并求出网络效率的变化值, 网络效率变化值越大, 代表该换乘节点失效后对网络效率的影响程度越大, 也说明了该换乘节点在网络结构中的重要性越高。定义线网结构中换乘节点 v_i 的重要度为 $I_s(v_i)$, $I_s(v_i)$ 可表示为

$$I_s(v_i) = \frac{E(G) - E(G'_v)}{E(G)} \quad (2)$$

对于同一个线网结构, 初始网络的网络效率值是定值, 换乘站的网络效率变化值越大, 影响程度越明显, 则该换乘节点的重要度 $I_s(v_i)$ 值就越大。

1.2 相对换乘客流分布比例

在衡量换乘关系的重要度时需要考虑换乘客流量的影响。定义各换乘关系 R_i^S 在全网中的相对换乘客流分布比例为 $P_d(R_i^S)$, $P_d(R_i^S)$ 可表示为

$$P_d(R_i^S) = \frac{Q^{R_i^S} - Q_{\min}^R}{Q_{\max}^R - Q_{\min}^R} \quad (3)$$

式中: $Q^{R_i^S}$ 为各换乘站各换乘关系对应的换乘客流量; Q_{\min}^R 和 Q_{\max}^R 分别为换乘客流量(分换乘方向)的最小值和最大值。该换乘关系的 $P_d(R_i^S)$ 越高, 说明该换乘关系在线网中的承担的客流比例越高, 一定程度上反映了该换乘关系的重要性。

综合考虑物理网络结构和客流指标的影响, 提出基于网络节点脆弱度和相对换乘客流分布比例的换乘关系综合重要度衡量指标。定义线网结构中换乘关系 R_i^S 的综合重要度指标为 $I_R(R_i^S)$

$$I_R(R_i^S) = \alpha \times I_s(S) + \beta \times P_d(R_i^S) \quad (4)$$

其中: $I_s(S)$ 为该换乘关系所在换乘节点 S 的重要度; $P_d(R_i^S)$ 为该换乘关系的相对换乘客流分布比例; α 和 β 为分别为网络换乘节点重要度和相对换乘客流分布比例的权重系数, 满足 $\alpha + \beta = 1$ 。 α 和 β 反映了衡量过程中对网络换乘节点重要度和相对换乘客流分布比例的倾向性程度。在协调过程中, α 和 β 的取值取决于协调者或运营管理方对两个因素的倾向程度, 并结合相关实际生产经验取得。在线网结构中, 换乘关系综合重要度的值越大, 表明该换乘关系对网络效率和换乘客流的综合影响越大。通过对换乘关系综合重要度比较, 将其作为轨道交通运营计划协调优化的衡量指标, 既考虑了网络中换乘客流的分布情况, 又兼顾了换乘站在网络结构中的影响。

2 分步协调优化模型与算法

基于换乘节点重要度和换乘客流分布比例对线网结构中的换乘关系进行重要度计算与排序, 根据排序结合优先考虑换乘关系综合重要度较大的衔接方向, 分步对其列车到发时刻进行匹配, 以促成该换乘关系的列车优先衔接, 减少相应乘客的换乘候车时间, 满足企业实际运营管理的需要。

2.1 前提条件

- 1) 协调时段为平峰时段, 且此时段内乘客的换乘需求较为稳定, 分布相对均衡;
- 2) 线网内所有换乘站的所有换乘关系对应的乘客平均换乘走行时间、客流量、客流分布比例均为已知量, 并且不受时间的影响, 基本保持稳定;
- 3) 各线路列车的相关运行参数均为已知量, 且不考虑受时间影响的随机变化;
- 4) 不考虑在换乘站同一线路上、下行方向之间换乘的换乘关系;
- 5) 假定所有换乘乘客在到达接续列车所在站台后均搭乘第一趟接续列车离站;
- 6) 应尽可能避免同一条线路上、下行列车到达换乘站的时刻相同。

2.2 变量说明

在建立模型前,先对相关变量进行说明。 \bar{T}_W 为一个周期中的换乘乘客平均换乘候车时间; $(T_W)_{\min}$ 为一个周期内换乘候车时间的最小值; h_i 为换出线路的行车间隔; h_j 为换入线路的行车间隔; (h_i, h_j) 为两线路行车间隔的最大公约数; $a_{l_j, k_j}^{s_n, q}$ 为换入线路 l_j 的 k_j 方向上第 q 辆列车在换乘站 s_n 的到达时刻; $a_{l_i, k_i}^{s_n, p}$ 为换出线路 l_i 的 k_i 方向上第 p 辆列车在换乘站 s_n 的到达时刻; $w_{l_k, l_{k_i}}^{s_n}$ 为该换乘方向上的走行时间; $\mu_{l_k, l_{k_i}}^{s_n}$ 为该换乘方向上的换乘缓冲时间; $T_s^{s_n}$ 为列车在换乘站 s_n 的停站时分; a_i 为换出线路的到站时刻; a_j 为换入线路的到站时刻; T_w 为乘客换乘所需时间; T_s 为列车停站时间; T_c 为避免同时到站的错车协调时间。

2.3 模型建立

在已知列车运行时间、换乘相关时间条件下,换乘候车时间主要是由列车在换乘站到发时刻决定。因此,在进行网络列车运营计划分步协调优化过程中,需要对协调的换乘关系对应的列车到发时刻进行合理的安排,以减少乘客的换乘候车时间。由于不同线路的列车行车间隔可能存在差异,使每列列车的乘客换乘候车时间呈现出周期性变化的特点,如图 1 所示。图中圆点为列车在该换乘站的到达时刻,箭头为乘客下车后走行到目标站台的过程,假定换乘走行过程需要 4 min,线路 1 上行不同列车的乘客从线路 1 上行换乘至线路 2 上行后,等待接续列车时间呈现出周期性变化。在一个周期中共包含线路 1 上行 6 趟列车搭载的需在该站换乘至线路 2 上行的换乘乘客,且同一周期中乘客平均换乘候车时间为 2.5 min。

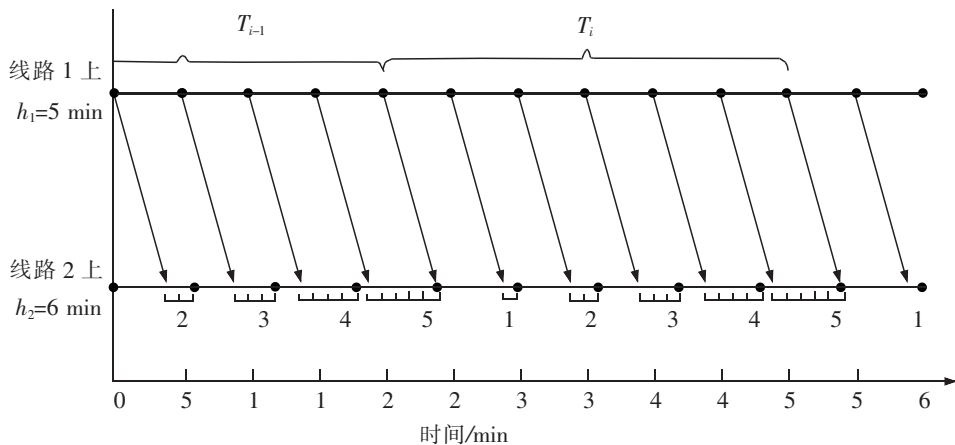


图 1 行车间隔不同的两线路间换乘候车时间示意图

Fig.1 Sketch map of transfer waiting time between two lines with different headways

对于一个周期中的换乘乘客平均换乘候车时间 \bar{T}_W 可以表示为:

$$\bar{T}_W = (T_W)_{\min} + (h_j - (h_i, h_j)) / 2 \tag{5}$$

由式(5)可知,该换乘关系的平均候车时间由该换乘关系中最小的换乘候车时间决定,而换乘候车时间又取决于两列车在该站到发时刻。为了达成列车良好的衔接状态,使该关系的平均换乘候车时间最小,应尽可能使协调时段内该换乘关系的两列车到达时刻满足以下条件

$$a_{l_j, k_j}^{s_n, q} - a_{l_i, k_i}^{s_n, q} = w_{l_k, l_{k_i}}^{s_n} + \mu_{l_k, l_{k_i}}^{s_n} - T_s^{s_n} \tag{6}$$

根据上述对于换乘关系平均换乘候车时间分析,提出基于换乘关系综合重要度的网络运营计划分步协调优化模型:计算基于网络节点脆弱度与相对换乘客流分布比例的换乘关系综合重要度并进行排序,以换乘关系综合重要度从大到小,分步设定各换乘关系对应的列车到站时刻,并避免出现同线列车不同方向同时到达的情况,尽可能使相应列车的到站时刻满足式(6)的条件,以达成平均候车时间最短的目标,进而得到协调优化的网络运行计划。

2.4 求解算法

针对上述模型进行求解算法设计,具体步骤如下:

Step 1:建立网络列车到站时刻矩阵,用于储存分步推算出的各线路各方向的首列车在各换乘站的到达时刻信息,并初始化网络列车到站时刻矩阵中的元素为空。

Step 2:设定基础参数。具体包括:协调时段的起始时刻、线网中各线路列车区间运行时分、停站时间等列车运行状态相关约束条件以及各换乘关系对应的客流量、换乘走行时间、换乘缓冲时间等基础参数。

Step 3:建立换乘关系集合,计算基于网络节点脆弱度与相对换乘客流分布比例的换乘关系重要度,并以此对所有换乘关系进行排序。

Step 4:按换乘关系综合重要度对每一个换乘关系进行如下操作。

1) 分别判断网络列车到站时刻矩阵中该换乘关系对应的列车到站时刻是否为0,并根据以下情况分别进行列车到站时刻设定:

情况① 若 $a_i=a_j=0$,则令 $a_i=a_0, a_j=a_i+T_v-T_s$;

情况② 若 $a_i=0$ 且 $a_j \neq 0$,则保留 a_j 不变, $a_i=a_j-T_v+T_s$;

情况③ 若 $a_i \neq 0$ 且 $a_j=0$,则保留 a_i 不变, $a_j=a_i+T_v-T_s$;

情况④ 若 $a_i \neq 0$ 且 $a_j \neq 0$,则保留 a_i, a_j 不变。

2) 分别判断(1)中新设定的列车到站时刻是否与同线另一方向列车到站时刻相同,并进行相应处理:

① 对情况 1,若 $a_{i1}=a_{i2}$,则令 $a_i=a_{i1}-T_c, a_j=a_i+T_v-T_s$;

② 对情况 2,若 $a_{i1}=a_{i2}$,则令 $a_i=a_{i1}-T_c$;

③ 对情况 3,若 $a_{j1}=a_{j2}$,则令 $a_j=a_{j1}+T_c$ 。

Step 5:结合 Step 2 中设置的相关列车运行参数,根据 Step 4 中设定的列车到站时刻,推算协调线路列车在其余换乘站的到站时刻,并存入网络列车到站时刻矩阵。

Step 6:判断网络列车到站时刻矩阵中的元素是否均不为0。如果是,跳转至 Step 7,否则跳转至 Step 4。

Step 7:根据网络列车到站时刻矩阵中各换乘站各线路方向的到站时刻,结合 Step 2 设定的线路行车间隔,推算出进入协调时段后各换乘站各线路方向的首趟列车到站时刻,并输出结果,算法结束。

3 算例分析

为了验证上述模型算法的有效性,以某市轨道交通实际线网结构中简化的三线换乘网络拓扑结构作为协调优化对象,利用上述分步协调优化算法,对此线网结构平峰时段内(10:00:00至12:00:00)的网络列车运行计划协调进行分步协调优化。

3.1 基本信息

轨道交通三线换乘网络拓扑结构如图2所示,包含3条线路,5个换乘站,共40个换乘关系。区间运行时分: $T_{AB}=14$ min, $T_{BD}=11$ min, $T_{DF}=2$ min, $T_{AC}=20$ min, $T_{CD}=11$ min, $T_{BC}=2$ min, $T_{CF}=14$ min;线路行车间隔: $h_1=5$ min, $h_2=8$ min, $h_3=6$ min;为计算方便,取换乘走行时间均为3.5 min,换乘缓冲时间为1 min。

协调时段内,各换乘站换乘关系对应的客流量如表1所示,换乘客流量数据取自于某市轨道交通客流清分结果。其中,换乘关系编码中第1位数字代表换出线路,第2位数

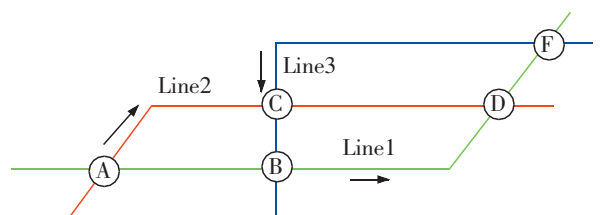


图2 三线换乘网络拓扑结构

Fig.2 The network topology of three line joint

字代表换出线路方向 (1 为上行, 为下行), 第 3 位数字代表换入线路, 第 4 为数字代表换入线路方向, 如 1121 表示 1 号线上行至 2 号线上行。

表 1 协调时段内各换乘站换乘客流量(分换乘方向)统计表
Tab.1 Passenger flow at each transfer station during the coordination period

换乘站	换乘关系	换乘客流量/人次	换乘站	换乘关系	换乘客流量/人次
A	1121	3 350	C	3121	355
A	1122	340	C	3122	325
A	1221	820	C	3221	315
A	1222	3 016	C	3222	385
A	2111	3 470	D	1121	357
A	2112	859	D	1122	347
A	2211	3 135	D	1221	390
A	2212	610	D	1222	312
B	1131	386	D	2111	610
B	1132	85	D	2112	385
B	1231	35	D	2211	358
B	1232	325	D	2212	391
B	3111	398	F	1131	3 358
B	3112	356	F	1132	3 530
B	3211	315	F	1231	3 293
B	3212	377	F	1232	3 945
C	2131	352	F	3111	3 545
C	2132	120	F	3112	3 410
C	2231	360	F	3211	3 791
C	2232	370	F	3212	3 160

3.2 换乘关系综合重要度计算

基于网络节点脆弱度对图 2 线网结构中的换乘节点重要度进行计算, 结果如表 2 所示。

表 2 换乘节点重要度计算结果
Tab.2 Result of the transfer nodes importance

车站	A	B	C	D	F
重要度	0.461	0.833	0.575	0.510	0.461

结合表 1 中各换乘客流量(分换乘方向), 计算各换乘关系的相对换乘客流分布比例。同时, 选取权重系数为 $\alpha=0.5$ 和 $\beta=0.5$, 由式 4 计算各换乘关系综合重要度并排序, 按换乘关系综合重要度排序前 16 名的换乘关系如表 3 所示。

表3 相对换乘客流分布比例及换乘关系综合重要度计算结果(前16名)

Tab.3 Results of relative passenger flow distribution ratio and integrated importance of transfer relationship (top 16)

序号	换乘站	换乘关系	相对换乘客流分布比例	综合重要度	序号	换乘站	换乘关系	相对换乘客流分布比例	综合重要度
1	F	1232	1.000	0.731	9	F	1231	0.831	0.646
2	F	3211	0.960	0.711	10	F	3212	0.797	0.629
3	F	3111	0.896	0.679	11	A	2211	0.461	0.626
4	F	1132	0.892	0.677	12	A	1222	0.461	0.610
5	A	2111	0.877	0.669	13	B	3111	0.833	0.457
6	F	3112	0.861	0.661	14	B	1131	0.833	0.455
7	F	1131	0.848	0.654	15	B	3212	0.833	0.454
8	A	1121	0.846	0.653	16	B	3112	0.833	0.452

3.3 协调结果分析

基于换乘关系综合重要度对网络运营计划分步协调优化,推算得到线网中各线路进入协调时段后的第一趟列车在各换乘站的到站时刻,为保证结果的准确性,经多次实验后得到协调结果如表4所示。

表4 协调时段优化前后换乘站的首班车的到站时刻

Tab.4 Arrival time of first trains at transfer stations both under the original condition and optimization condition

换乘站	线路方向	优化前	优化后	换乘站	线路方向	优化前	优化后
A	1号线上行	10:02:51	10:00:30	C	3号线上行	10:01:49	10:05:00
A	1号线下行	10:02:44	10:02:00	C	3号线下行	10:01:42	10:01:45
A	2号线上行	10:01:44	10:04:45	D	1号线上行	10:02:51	10:00:30
A	2号线下行	10:01:01	10:04:00	D	1号线下行	10:02:44	10:02:00
B	1号线上行	10:01:54	10:04:30	D	2号线上行	10:02:44	10:03:45
B	1号线下行	10:03:44	10:03:00	D	2号线下行	10:00:01	10:05:00
B	3号线上行	10:03:49	10:01:00	F	1号线上行	10:04:51	10:02:30
B	3号线下行	10:05:42	10:05:45	F	1号线下行	10:00:44	10:00:00
C	2号线上行	10:05:44	10:00:45	F	3号线上行	10:05:49	10:03:00
C	2号线下行	10:03:01	10:00:00	F	3号线下行	10:03:42	10:03:45

根据求解得到的结果,分别对协调前后全网换乘乘客的换乘候车时间和平均候车时间进行计算并对比分析,结果如表5所示。

表5 协调前后全网换乘乘客的候车时间对比结果

Tab.5 Comparison of transfer waiting time in the whole network both under the original and optimization condition

协调前后	换乘客流量/人次	总候车时间/min	平均候车时间/min
优化前	51 956	163 142	3.14
优化后	51 956	142 879	2.75
优化量	-	20 263	0.39

从表 5 协调前后的线网中换乘乘客的换乘候车时间的对比结果可以看出:在协调时段内,优化后线网中近 52 000 人次的换乘客流量总换乘候车时间为 142 879 min,相比于协调前减少了 20 263 min;而对线网每一位换乘乘客而言,平均换乘候车时间分钟较协调前缩短了 0.39 min,节约 12.42%的换乘候车时间。基于分步协调方法可以优先考虑重要换乘关系,实现列车的良好衔接,同时及时进行同线列车的错行调整,优化乘客换乘候车时间。

4 结语

考虑网络节点脆弱度和相对换乘客流分布比例提出换乘关系综合重要度指标,在此基础上建立网络运营计划分步协调优化模型,优先实现重要换乘关系的衔接需求,缩短其客流的平均换乘候车时间;以轨道交通三线换乘网络为例进行算例分析,结果表明所提出的协调优化方法及模型能够缩短平均换乘候车时间,有助于提高轨道交通网络运行效率和客运服务水平,增加乘客出行的便捷性。后续可针对权重系数的选取、乘客换乘走行时间的分布规律等开展进一步研究。

参考文献:

- [1] KANG L,ZHU X. A simulated annealing algorithm for first train transfer problem in urban railway networks[J]. Applied Mathematical Modelling,2016,40(1):419-435.
- [2] SHAFABI Y,KHANI A. A practical model for transfer optimization in a transit network:Model formulations and solutions[J]. Transportation Research Part A Policy & Practice,2010,44(6):377-389.
- [3] WU J,LIU M,SUN H,et al. Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies,2015,51:1-18.
- [4] 曹志超,袁振洲,李得伟. 城市轨道交通同步协调的优化模型[J]. 东南大学学报:自然科学版,2016,46(1):221-225.
- [5] WONG R C W,YUEN T W Y,FUNG K W,et al. Optimizing timetable synchronization for rail mass transit[J]. Transportation Science,2008,42(1):57-69.
- [6] LI XUAN,YANG S. The Optimization model and algorithm for train connection at transfer stations in urban rail transit network[J]. Open Cybernetics & Systemic Journal,2015,9(1):690-698.
- [7] 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.
- [8] 房霄虹. 城市轨道交通网络化运输组织协调理论及方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [9] 安亚峰. 基于换乘协调的城轨路网列车开行方案设计优化问题研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
- [10] 叶青. 基于复杂网络理论的轨道交通网络脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报,2012,22(2):122.
- [11] 刘志谦,宋瑞. 基于复杂网络理论的广州轨道交通网络可靠性研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2010,10(5):194-200.
- [12] 周溪召,智路平. 城市轨道交通网络拓扑结构研究[J]. 华东交通大学学报,2016(2):1-8.

Stepwise Coordination Optimization of Urban Rail Transit Operation Schedule Based on Importance of Transfer Nodes

Chen Qi¹, Zeng Cuifeng¹, Guo Ying², Luo Qin³

(1. Operation Headquarter of Shenzhen Metro Group Co., Ltd., Shenzhen 518040, China;

2. Shenzhen Urban Traffic Planning Center Co., Ltd., Shenzhen 518060, China;

3. College of Urban Transportation and Logistics, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China)

Abstract: In order to improve the overall network operation efficiency of urban rail transit and its service, an index which measures the integrated importance of transfer nodes is put forward. Based on this, a coordinated optimization model and algorithm of network operation schedule are established with the consideration of passenger demand. This model aims at reducing the passenger transfer waiting time and facilitating the transfer of passengers in the transfer station. Finally, the proposed method and algorithm are applied in a real rail transit to validate the effectiveness. The results show that after the coordination step by step, the average waiting time of the whole network has been reduced by 12.42%, saving 0.39 minutes for passengers. It proves that the model and algorithm can effectively reduce passenger transfer waiting time, optimize the coordination of network operation schedule, and improve the transfer efficiency of the whole network.

Key words: urban rail transit; network operation schedule; importance of transfer nodes; stepwise coordination