

轨道与常规公交局域换乘网络站点优化模型

赵淑芝¹, 刘华胜¹, 张晓亮¹, 高祥涛²

(1. 吉林大学 交通学院, 130022 长春; 2. 吉林省工程咨询科技公司, 130061 长春)

摘要: 为提高轨道交通站点与周边常规公交所构成的局域换乘网络的运行效率, 首先借鉴 space P 法对所研究的局域网络进行拓扑描述, 确定了合理的换乘网络规模; 然后以乘客费用最小为目标, 同时考虑站点容量、站间距等约束条件建立优化模型, 采用复杂网络社团结构理论构造模型求解算法. 最后将模型应用于长春市轨道交通 3 号线某站点及周边常规公交组成的局域换乘网络. 结果表明: 优化后的局域网络总换乘时间可缩短 16%, 在考虑时间价值的情况下系统总费用降低了 6.16%, 模型具有一定的实用价值.

关键词: 交通运输工程; 轨道交通; 常规公交; 换乘网络; 站点优化

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)12-0096-06

Station optimization in local transfer network of rail transit and bus

ZHAO Shuzhi¹, LIU Huasheng¹, ZHANG Xiaoliang¹, GAO Xiangtao²

(1. College of Transportation, Jilin University, 130022 Changchun, China;

2. Jilin Engineering Consulting Technology, Inc., 130061 Changchun, China)

Abstract: To improve the transfer efficiency of local network including rail transit and bus station, local transfer network was described based on space P and a reasonable network size was determined. Considering the capacity of the station and station spacing as the constraints, optimization model was established to minimize the travel cost and model algorithm was proposed based on community structure of complex network. The model is applied to local transfer network including some station of Changchun light rail No.3 and bus stations around it. The results show that the overall transfer efficiency of the local network can be increased by 16%, and total system costs can be decreased by 6.16% considering the case of the time value.

Keywords: traffic and transportation engineering; rail transit; bus; transfer network; station optimization

目前我国已进入城市轨道交通快速建设时期, 已有 18 个城市拥有轨道交通, 但大多数城市轨道交通未形成完善网络, 建设初期网络功能受限, 需要与其他交通方式配合才能有效发挥其运输功能. 由于运营的相似性, 轨道交通与常规公交协调发展已成为轨道交通建设运营后需研究的重要课题. 已有研究主要侧重接运线路的优化设计和两种方式协调运营, 前者研究多以运营者、乘客和社会成本最小化为目标, 建立线路优化模型并求解^[1-4], 后者通过优化发车间隔、车站停留时间、松弛时间等变量, 达到协调运营的目的^[5-8]. 公

共交通网络设计的目标之一是最大程度地提高直达客流量, 但由于受城市规模、经济及网络自身条件等因素限制, 换乘现象不可避免. 而换乘实际上是公共交通服务过程中存在的不公平现象, 对于部分出行者而言是一种效率损失. 上述研究的最终目的是在确定的约束条件下有效满足乘客的换乘需求, 多以衔接线路布设、运营时刻的优化为研究重点, 对于换乘过程中的乘客费用考虑较少. 基于此, 本文将轨道交通与常规公交组成的局域换乘网络作为研究对象, 通过调整所确定的局域换乘网络内的部分常规公交站点, 并考虑通过性交通量和到站不换乘及非换乘上车客流, 达到减少研究范围内乘客出行费用, 同时提高节点换乘效率的目的.

收稿日期: 2013-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金(51378237).

作者简介: 赵淑芝(1958—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘华胜, liuhuasheng521@163.com.

1 局域换乘网络拓扑描述

对于城市公共交通网络,其包含停靠站点和公交网络两个基本要素,现有的公交网络有 space L,space P 和公交线路网络 3 种描述方法^[9].借鉴 space P 法并考虑站点所服务的公交线路实际情况,构造复杂局域拓扑网络,描述如下:拓扑网络中的节点分停靠站 B_i 及可停靠的线路站点 $c_i(i = 0,1,2,\cdots,n)$ 两种, $i = 0$ 时为轨道交通,其他为常规公交.节点间的权重 $W_{i,j}$ 为乘客由节点 i 至节点 j 所消耗的时间.乘客由一站点至另一站点换乘需先步行至站点,然后等待车辆到站,最后乘车.所构造的拓扑网络包含两种权重,一种是站点间 ($B-B$) 的步行时间,记为 $W_{i,j}^{BB}$,一种是乘客候车时间 ($B-c$),记为 $W_{i,j}^{Bc}$,位于同一停靠站的线路间的权重仅为候车时间,局域换乘网络拓扑见图 1.

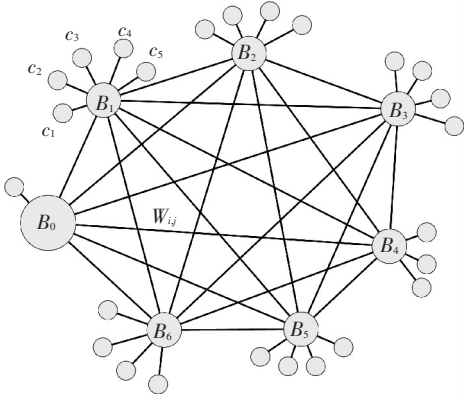


图 1 局域换乘网络拓扑

2 局域换乘网络规模确定

在对公交站点进行优化之前,需要确定轨道交通站点及周边常规公交停靠站所构成的局域换乘范围,通常认为步行时间在 15 min 以内是出行者可接受的极限范围,根据行人的平均步行速度 4 km/h,得到客流辐射区域是以轨道交通站点为圆心、最大步行距离 1 km 为半径的圆形区域^[10],将此设定为初始研究范围,然后根据复杂网络构造的一般过程,确定公交站点的优化范围,步骤如下.

步骤 1 对以轨道交通站点为中心的 1 km 半径范围内轨道交通及公交停靠站点服务的线路进行编号,轨道线路站点 c_0 ,常规公交线路站点为 $c_i(i = 1,2,\cdots,n)$.

步骤 2 构造网络的换乘矩阵,定义

$$Q[i,j] = \begin{cases} w_{i,j}, \\ 0. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $w_{i,j}$ 为线路 i 与线路 j 之间的日换乘客运量 (人次 / 日),0 定义为线路间无换乘.

步骤 3 初始网络有 $N + 1$ 个孤立节点,以概率 p 增加新的内部连接,即在已存在的节点间添加新的边,选取 c_0 作为新边的起始点,在其他 N 个节点中搜索,节点 c_i 被选作为一条边的端点的概率为

$$p(c_i) = \begin{cases} 1, & Q[i,j] = w_{i,j}; \\ 0, & Q[i,j] = 0. \end{cases} \tag{2}$$

步骤 4 设上一步中新增 k 个节点被选作为 c_0 的端点,选取这些新增的 k 个节点,对每一个节点按照式 (2) 中的规则对其他 N 个节点进行搜索并添加新边,最终形成由 $n + 1$ 个节点构成换乘网络模型,定义网络为 $G = (V,E)$,其中 V 为网络中点集合, E 为网络中的边集合.

网络中与轨道交通形成换乘的常规公交节点 k 个,记为 V^k ,其他常规公交节点 $n - k + 1$ 个,记为 V^{n-k+1} .设定优化过程只调整与轨道交通形成换乘的常规公交线路的 k 个站点,其他 $n - k + 1$ 个节点作为对 k 个节点的约束保持不变.

3 站点优化模型

3.1 假设条件

模型建立的假设条件:1) 公交停靠站布局确定且线路局部站点调整不影响换乘客流量.2) 为保证运营服务水平,假设局域范围内站点优化不影响线路发车频率及其稳定性,即线路期望发车频率及其方差保持不变.3) 不考虑乘客步行速度差异,假设平均步行速度为 v .

3.2 目标函数

城市公共交通具有公益属性,这决定了企业运营不是以盈利为目的,而应以最大限度满足公共交通出行为目标,由此造成的亏损应由政府以补贴形式弥补,因此本文中站点优化的目标设定为最小化公共交通出行成本.所构造的局域换乘网络内涉及的客流可分为换乘客流、通过性客流、到达不换乘客流以及非换乘上车客流.站点调整的目的就是将局域换乘网络看作换乘枢纽,通过优化“枢纽”内站点,减少内部客流的出行费用,该模型可作为公共交通线网优化与设计的有效补充.局域范围内出行成本包括票款费用 (不变)、步行时间、在车时间及候车时间.根据文献 [11],乘客的平均候车时间 T_w 可表示为

$$W_{i,j}^{Bc} T_w = \frac{1}{2} \left[E(H_s) + \frac{v(H_s)}{E(H_s)} \right]. \tag{3}$$

式中: $E(H_s)$ 、 $v(H_s)$ 分别为线路 s 的期望发车间隔及方差.

根据假设条件可知,乘客总等车时间可视为不变.因此设定优化目标为

$$\min(F) = \min \sum_{i=1}^5 T_i \gamma_i. \quad (4)$$

其中: F 为局域范围内乘客总时间, T_i 为站点间乘客换乘步行用时. 需换乘的乘客步行时间为步行距离 $l_{i,j}$ 与步行速度 v 的比值, 则 $T_1 = \frac{w_{i,j}}{v} \sum_{i,j \in V} l_{i,j}$; T_2 为换乘乘客在局域范围内的总在车时间, 即换乘站点至换乘方向邻近站点的行车时间与换乘客流的乘积; T_3 为通过性客流在局域范围内的总在车时间, 是线路中与所调整的站点紧邻的两站点间的行车时间与在车客流量的乘积; T_4 、 T_5 分别为非换乘客流步行至站点的时间和局域范围内的在车时间, T_4 通过对未优化前站点的驻站调查得到初始客流出发起点, 以此计算其到各站点距离, T_5 为上车站点至该方向邻近站点的行车时间与上车客流的乘积; γ_i 为各出行时间对应的权重, 体现各类时间的重要程度.

3.3 约束条件

站点调整过程中, 各个停靠站所能服务的公交线路是有限的, 若超过服务容量, 则会导致车辆停靠排队时间过长, 延误较大, 降低运营效率. 定义停靠站的容量 L_{ξ_i} 为节点服务公交线路的最大能力, 对网络节点容量作约束

$$\begin{cases} l_{\xi_i}^{\alpha} \leq L_{\xi_i}^{\alpha}, \\ l_{\xi_i}^{\beta} \leq L_{\xi_i}^{\beta}. \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\xi_i \in \mathbf{V}(G) = \{B_i\}$; $l_{\xi_i}^{\alpha}$ 、 $l_{\xi_i}^{\beta}$ 均为节点停靠公交线路数, $L_{\xi_i}^{\alpha}$ 为配有停车场设施的公交停靠设计容量, $L_{\xi_i}^{\beta}$ 为一般停靠站的容量.

停靠站的通行能力^[12]为

$$B_{\xi_i}^S = N_{\xi_i}^{\text{el}} B_{\xi_i}^1 = \frac{3\ 600gc^{-1}}{t_c + t_dgc^{-1} + Zc_v t_d}. \quad (6)$$

式中: $B_{\xi_i}^S$ 为停靠站公交车通行能力, 辆/h; $B_{\xi_i}^1$ 为单个车位公交车通行能力, 辆/h; $N_{\xi_i}^{\text{el}}$ 为有效车位数; g/c 为绿信比; t_c 为清空时间; t_d 为平均停靠时间; Z 为满足期望进站失败率的标准正态变量; c_v 为停靠时间波动系数.

停靠站点所服务的线路条数上限满足约束

$$B_{\xi_i}^S \geq \sum_{c_i \in V_c} \frac{60}{f_{c_i}}. \quad (7)$$

此外, 结合实际情况, 站点调整过程中存在无法调整的站点, 定义为不动点, 可分为以下情况: 1) 轨道交通站点代表的节点; 2) 因线路走向及道路路况等原因无法调整的线路站点所代表的节点; 3) 第2节中, 其他 $n-k+1$ 个常规公交节点 V^{n-k+1} 集合. 定义网络不动点集合为

$$\mathbf{V}^* = \{c_i^*\}. \quad (8)$$

站点优化过程中应考虑是否保留原有站点. 不予保留情况下, 当原有站点与调整后站点距离较大时, 会对直达客流造成一定的影响, 因此应考虑优化后线路站间距的合理性. 站间距应大于车辆启动加速至正常行驶速度再减速到停止所行驶的距离 $Y_{\min}$, 同时考虑乘客到站点的最大容忍步行距离 $Y_{\max}$, 即

$$Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max}. \quad (9)$$

当调整后站点不满足上述约束时, 采用保留原站点的方法进行优化, 当保留原站点仍不满足约束条件时, 选择次优站点进行优化.

3.4 求解算法

本文结合复杂网络社团理论构造算法以得到该问题的满意解. 网络中的社团结构^[13]是指一组相互之间有着较大的相似性而与网络中的其他部分有着很大不同的节点群. 即在社团内部, 节点之间的联系非常紧密, 而社团之间的联系相对而言比较稀疏. 本文基于 Aaron Clauset 提出的局部模块度概念^[14], 以最大化模块度为目标, 同时考虑站点调整对通过性客流和到达不换乘客流以及非换乘上车客流的费用影响, 通过搜索局部社团实现站点优化, 步骤如下.

步骤1 初始化网络. 确定网络规模并初始化网络状态, 即确定不动点集合 $\mathbf{V}^*$, 除不动点外的可优化点集合 $\{c_i\}$ 以及每个 c_i 对应的可选择停靠点集合 $c_i \rightarrow \{B_j^c\}$, 构造停靠站点距离矩阵 $\mathbf{W}^{BB}$. 构造换乘矩阵, 当 $c_i \in \mathbf{V}^*$ 且 $c_j \in \mathbf{V}^*$ 时, 令 $w_{ij} = 0$, 得到换乘矩阵 $\mathbf{w}^0 = [w_{ij}]_{(n+1) \times (n+1)}$, 给出模型其他相关参数.

步骤2 定义局部模块度. 基于上一步构造的换乘矩阵, 定义节点 j 的强度为

$$w(j) = \sum_{i \in V} w_{i,j}. \quad (10)$$

所构造的换乘网络为 $G(\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{w})$, 给定网络 G 的一个划分 $G^{(1)}(\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{w}), \dots, G^{(n)}(\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{w})$, 定义网络中社团 $G^{(i)}$ 的局部模块度为

$$Q_{G^{(i)}} = \frac{W_{\text{in}}^{G^{(i)}}}{W_{\text{in}}^{G^{(i)}} + W_{\text{out}}^{G^{(i)}}}. \quad (11)$$

其中: $W_{\text{in}}^{G^{(i)}}$ 为社团 $G^{(i)}$ 内部节点间权重之和; $W_{\text{out}}^{G^{(i)}}$ 为社团内部与社团外部节点间权重之和.

测定节点 a 能否加入社团 $G^{(i)}$ 的标准定义为节点对社团的适应度为

$$Q_{G^{(i)}}^a = Q_{G^{(i)} \cup \{a\}} - Q_{G^{(i)}}. \quad (12)$$

其中: $Q_{G^{(i)} \cup \{a\}}$ 为节点 a 加入社团 $G^{(i)}$ 后的局部模块度, 当 $Q_{G^{(i)}}^a > 0$ 时, 表示节点 a 加入社团 $G^{(i)}$ 后

使其局部模块度增大, a 可以加入到社团 $G^{(i)}$.

步骤 3 令初始社团 $G^{(i)}$ 为空 (首次运行算法 $i = 1$).

步骤 4 选择未划分网络中强度最大的节点 c_i 为社团 $G^{(i)}$ 的初始节点, 令 $G^{(i)} = G^{(i)} + c_i, V = V - c_i$, 若其所在站点存在不动点 c_i^* , 令 $G^{(i)} = G^{(i)} + c_i^*, V = V - c_i^*$, 若 $G^{(i)}$ 包含的线路站点所在的停靠站公交车通行能力 $B_{\xi_i}^S \leq \sum_{c_i \in V_c} \frac{60}{f_{c_i}}$, 则该社团划分完毕, 输出社团, 令 $i = i + 1$, 返回步骤 3, 否则进行下一步.

步骤 5 若 c_i 不是轨道交通站点, 令 c_i 所在的停靠点为 $c_i \rightarrow B_j^{c_i}$, 若 c_i 为轨道交通站点, 则选择与该站点距离最近的停靠站为 $c_i \rightarrow \tilde{B}_j^{c_i}$, 选择节点 $c_h (B_j^{c_i} \in \{B_j^{c_h}\})$ 计算 $Q_{G^{(i)}}^{c_h}$ 值, 根据 $Q_{G^{(i)}}^{c_h}$ 值的大小对 c_h 进行排序, 构建备选站点集合 $\{c_h\}$, 对于原 c_h 所在的停靠站, 当调整后停靠站不满足约束 (9) 时, 保留原有站点.

步骤 6 搜索备选 c_h 调整后与其相邻两站点间的最短路径并计算 F 值, 选择最小 F 值对应优化站点 c_h , 令 $G^{(i)} = G^{(i)} + c_h, V = V - c_h$, 将 c_h 纳入 $B_j^{c_i}$ 或 $\tilde{B}_j^{c_i}$. 当 $G^{(i)}$ 包含的线路站点所在的停靠站公交车通行能力 $B_{\xi_i}^S \leq \sum_{c_i \in V_c} \frac{60}{f_{c_i}}$, 则该社团划分完毕, $i = i + 1$, 返回步骤 3, 否则返回步骤 5.

步骤 7 当所有节点均划分完毕, 输出结果.

4 实例分析

选取长春市轻轨 3 号线某停靠站 B_0 及周边常规公交停靠站 $B_1 \sim B_{10}$ 构造局域换乘网络进行实例分析. 经调查, 与轨道交通直接换乘的常规公交线路站点 18 个, 网络中的站点 25 个, 根据换乘情况确定接运站点网络规模, 通过初始化网络, 对站点进行编号, 1 ~ 18 为可调整点集合, 其他为不动点, 局域换乘网络见图 2.

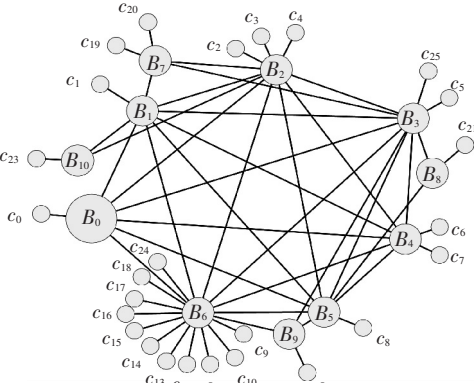


图 2 长春轻轨 3 号线某停靠站点局域换乘网络

根据道路及交通条件得到网络中各线路可选的停靠站点, 通过调查得到各停靠站点间的换乘距离 (m) 矩阵、各站点可选的停靠站及时耗 (min)、各线路站点间的换乘量 (人次) 矩阵分别见表 1 ~ 3. 根据实际调查, 时间权重参数 $\gamma_1 = 0.36, \gamma_2 = 0.12, \gamma_3 = 0.10, \gamma_4 = 0.32, \gamma_5 = 0.10$.

表 1 停靠站点间的换乘距离矩阵 m

$l_{i,j}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	347	389	276	266	455	429	316	416	426	278
1	347	0	461	414	508	900	518	636	859	349	312
2	389	461	0	453	367	367	686	622	356	467	615
3	276	414	453	0	278	316	419	298	297	348	365
4	266	508	367	278	0	513	389	369	319	416	267
5	455	900	367	316	513	0	487	425	410	364	318
6	429	518	686	419	389	487	0	287	396	516	416
7	316	636	622	298	369	425	287	0	418	413	319
8	416	859	356	297	319	410	396	418	0	312	316
9	426	349	467	348	416	364	516	413	312	0	318
10	278	312	615	365	267	318	416	319	316	318	0

表 2 各停靠站对应的可供停靠的公交站及时耗

线路-可停靠 公交站	出行时耗/min			
	T_2	T_3	T_4	T_5
$c_1 - B_1$	488	7 218	3 804	634
$c_1 - B_2$	495	8 234	3 861	644
$c_1 - B_{10}$	516	9 217	4 025	671
$c_2 - B_1$	514	5 039	4 006	668
$c_2 - B_2$	514	5 039	4 006	668
$c_2 - B_4$	534	7 317	4 006	668
$c_2 - B_9$	522	7 634	4 072	679
$c_3 - B_2$	315	4 331	2 456	409
$c_3 - B_3$	315	6 240	2 456	409
$c_3 - B_{10}$	339	5 530	2 644	441
$c_4 - B_1$	376	5 643	2 933	489
$c_4 - B_2$	376	5 764	2 935	489
$c_4 - B_{10}$	435	7 374	2 828	566
$c_5 - B_3$	479	5 053	3 114	623
$c_5 - B_{10}$	598	6 452	3 887	777
$c_6 - B_3$	439	8 373	5 268	659
$c_6 - B_4$	479	8 728	4 311	719
$c_6 - B_5$	468	9 770	4 212	702
$c_6 - B_8$	476	8 875	4 284	714
$c_6 - B_9$	468	9 252	4 212	702
$c_7 - B_3$	449	6 496	4 041	674
$c_7 - B_4$	457	7 411	4 113	685
$c_7 - B_5$	468	8 295	4 212	702
$c_7 - B_6$	512	7 536	4 608	768
$c_7 - B_7$	497	7 855	4 473	746
$c_7 - B_8$	471	8 793	4 239	707
$c_8 - B_4$	516	7 162	4 029	671
$c_8 - B_5$	516	5 528	4 029	671
$c_8 - B_6$	569	10 139	3 699	740
$c_8 - B_6$	383	5 774	2 490	498
$c_8 - B_7$	419	6 587	2 724	545
$c_8 - B_6$	295	5 053	1 916	383
$c_8 - B_9$	419	4 940	2 724	545

表 3 线路站点间的换乘量矩阵

人次

OD	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0	0	73	124	43	54	33	163	117	137	54	65	55	54	33	42	16	33	38	31	0	0	0	0	0	0	0
1	98	0	29	40	55	21	11	10	41	10	21	28	32	25	16	21	19	17	14	10	14	0	0	0	0	0
2	136	32	0	21	22	50	11	16	44	21	10	29	22	16	16	10	26	11	17	40	8	0	0	0	0	0
3	34	43	22	0	13	20	14	22	28	23	21	9	7	19	9	4	7	19	16	9	8	0	0	0	0	0
4	47	56	21	12	0	13	18	23	28	10	9	8	12	31	15	18	17	13	22	15	18	0	0	0	0	0
5	35	23	49	18	12	0	6	9	10	6	10	11	14	4	10	19	5	22	26	21	14	8	0	0	0	7
6	157	12	12	13	17	5	0	22	24	27	22	10	10	21	20	17	20	14	13	11	10	9	0	7	0	8
7	126	9	16	21	22	8	23	0	14	17	19	21	20	6	10	11	13	18	22	32	10	14	0	19	0	18
8	147	45	45	26	24	9	25	16	0	13	22	23	6	10	8	14	19	22	23	16	17	6	0	8	0	11
9	45	12	21	22	9	7	28	15	12	0	7	8	13	10	22	25	30	17	19	17	20	22	11	14	0	13
10	68	19	9	19	8	12	24	18	21	8	0	12	14	16	22	21	28	21	33	18	11	9	7	10	9	12
11	57	26	31	8	6	10	12	19	22	6	11	0	10	13	7	9	10	6	21	23	23	23	15	14	11	17
12	46	31	21	6	11	16	9	21	5	12	13	11	0	22	25	24	26	13	15	14	11	10	9	8	6	5
13	36	22	15	17	30	5	23	5	9	9	15	12	21	0	9	12	6	9	6	9	6	6	6	7	6	8
14	57	14	12	8	12	9	21	9	7	21	21	6	23	10	0	13	29	22	11	10	8	6	8	13	9	12
15	21	19	9	3	16	18	16	10	15	23	22	8	22	11	12	0	22	13	9	10	11	13	15	17	16	20
16	37	17	23	6	17	5	21	11	19	28	25	9	25	6	31	21	0	10	9	6	6	5	5	6	7	9
17	46	16	12	17	12	21	15	19	21	16	19	5	12	8	21	11	9	0	19	15	13	10	11	12	9	8
18	44	14	15	14	21	25	14	21	22	17	31	19	14	4	10	8	8	21	0	9	13	11	6	13	6	6
19	0	9	41	8	16	24	12	31	15	18	19	22	15	8	9	9	6	16	8	0	0	0	0	0	0	0
20	0	16	8	6	15	15	9	12	17	19	12	21	10	6	8	12	5	11	12	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	10	9	15	8	21	8	21	9	5	5	12	4	9	10	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	6	13	9	9	7	15	6	9	4	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	8	18	9	13	9	12	8	4	12	16	5	11	14	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	10	7	5	10	17	9	10	5	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	8	7	17	10	12	11	16	5	5	11	19	8	9	6	0	0	0	0	0	0	0

根据以上初始条件,利用本文所构造的算法,得到站点优化结果如图 3 所示,可知部分停靠站服务的公交线路有所调整,其中停靠站 B_1 、 B_3 分别增加了 c_3 、 c_4 线路站点, B_4 增加了 c_2 和 c_8 线路站点,停靠站 B_6 处的线路 c_{11} 和 c_{13} 分别调整至 B_7 和 B_9 进行停靠, B_4 停靠站处的 c_7 调整至 B_7 停靠站,其他未作调整,即为了实现局域网络整体最优,部分线路取消或将站点设置到了其他停靠站处.站点社团划分过程中局部模块度 Q 的变化趋势见图 4.优化前后步行距离-换乘量分布情况见图 5,优化前后各指标计算结果见表 4.

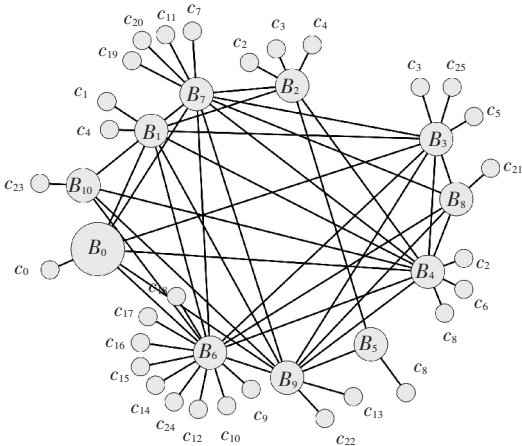


图 3 站点优化结果

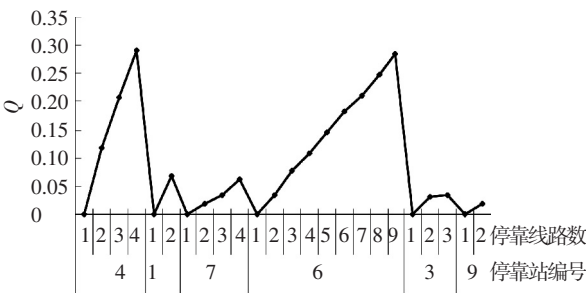


图 4 站点社团划分过程局部模块度变化趋势

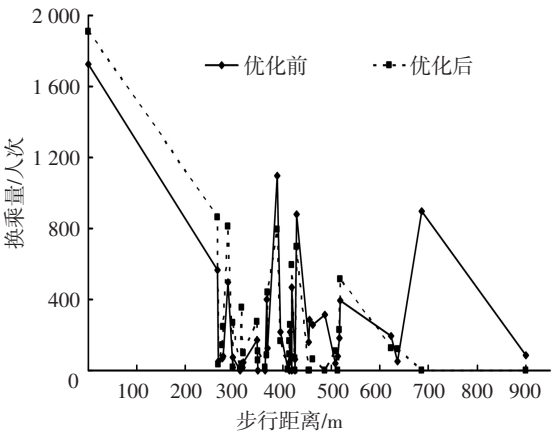


图 5 站点优化前后步行距离-换乘量分布

由图 4 可知,本实例共对 6 个社团(停靠站)的节点(线路)进行了重新划分,其余均保持原状态.每一个社团划分过程中的局部模块度逐渐增大,当节点数量达到社团容量时该社团划分结束,

进而搜索下一个社团直到所有社员划分完毕, 优化结束. 图 5 表明, 步行距离小于 419 m 时, 优化后的换乘量较优化前有所增加, 步行距离大于 419 m 的换乘量较优化前减少.

表 4 站点优化前后相关指标计算结果

指标条件	出行时耗/min					
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	F
优化前无权重	53 471	4 302	59 898	33 173	5 779	156 623
优化前有权重	19 250	516	5 990	10 615	578	36 949
优化后无权重	44 791	4 446	65 486	33 978	5 940	154 641
优化后有权重	16 125	533	6 549	10 873	594	34 674

由表 4 得出, 与原换乘网络相比, 在不考虑各类时间价值差异的情况下, 总换乘步行时间减少了 8 680 min, 降低 16. 23%, 人均换乘步行距离减少了 62. 9 m, 降低 14. 28%; 无需步行而直接换乘的人数增加了 184 人次, 提升 10. 67%; 其余各类时间均有不同程度的增加, 局域范围内总出行耗时减少了 1 982 min, 降低 1. 27%. 在考虑时间价值的情况下系统总费用降低 6. 16%. 总体上, 在不影响总体出行时耗的前提下模型的优化效果比较明显.

5 结 论

- 1) 构建了常规公交与轨道交通局域换乘网络的站点优化模型, 在对换乘网络进行拓扑描述及规模确定的基础上, 采用复杂网络社团划分理论构造算法对模型进行求解.
- 2) 在公交停靠站布局确定的情况下, 站点容量也可以根据需要的服务水平通过调整参数取值或结合路况对其进行改、扩建予以调整, 以得到更符合实际的站点优化结果.
- 3) 通过实例计算, 表明该优化模型可一定程度上减少局域范围内总出行费用, 对于缩短换乘步行时耗效果明显, 由此验证了模型的有效性, 模型对于换乘量较大的局域网络效果明显, 该方法有很好的实用价值, 丰富了城市公共交通规划方法体系.

参考文献

[1] 刘汶菠. 基于轨道交通的常规公交线网优化模型研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2011, 30(1): 12-15.

[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.

[3] MOHAYMANY A S, GHOLAMI A. Multimodal feeder

network design problem: ant colony optimization approach [J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(4): 323-331.

[4] DIJOSEPH P, CHIEN S I J. Optimizing sustainable feeder bus operation considering realistic networks and heterogeneous demand [J]. Journal of Advanced Transportation, 2013, 47(5): 483-497.

[5] 陈旭梅, 林国鑫, 于雷. 常规公共交通与轨道交通运营调度协调模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(10): 165-173.

[6] 陈鹏, 严新平, 李旭宏, 等. 轨道交通与常规公交计划调度协调模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(4): 950-955.

[7] SIVAKUMARAN K, LI Y, 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, 2010, 46(1): 131-139.

[8] CHOWDHURY M S, CHIEN S I J. Joint optimization of bus size, headway, and slack time for efficient timed transfer [J]. Transportation Research Record, 2011, 2218: 48-58.

[9] 顾前, 杨旭华, 王万良, 等. 基于复杂网络的城市公共交通网络研究[J]. 计算机工程, 2008, 34(20): 266-268.

[10] 张宁, 戴洁, 张晓军. 基于多项 Logit 模型的轨道交通站点步行接驳范围[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(5): 46-49.

[11] CHOWDHURY M. Intermodal transit system coordination with dynamic vehicle dispatching [D]. New Jersey: New Jersey Institute of Technology, 2000.

[12] 美国交通运输委员会. 公共交通通行能力和服务质量手册[M]. 2 版. 杨晓光, 滕靖, 译. 中国建筑工业出版社, 2010: 164-168.

[13] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 162-163.

[14] CLAUSET A. Finding local community structure in networks [J]. Physical Review E, 2005, 72(26132): 1-6.