

文章编号:1671-1637(2013)01-0062-08

一体化公交网络均衡配流模型

李淑庆¹, 李 哲¹, 朱文英²

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:分析了一体化公交网络的交通特性, 基于一体化公交出行的路径特点, 研究了公交出行时间与出行费用因素对出行阻抗的影响。考虑人流密度对步行速度的影响以及出行费用与时间的换算关系, 将公交出行的路段阻抗、节点阻抗与费用阻抗统一换算为时间, 建立了一体化公交网络的出行阻抗函数。利用 Wardrop 均衡原理, 建立了一体化公交网络的均衡配流模型, 并通过 FW 算法对配流模型进行求解。计算结果表明: 当地面公交线路长度与轨道交通长度分别为 57.3、16.2 km 时, 轨道交通线路输送的客流量占总客运量的 65.4%, 通过换乘进入轨道交通系统的客流量达 55.4%。构建合理的一体化公交网络能降低乘客出行总阻抗, 提高公交系统运输效率。

关键词: 交通规划; 一体化公交网络; 均衡配流; 出行阻抗; 轨道交通; 换乘

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Equilibrium assignment model of integrated transit network

LI Shu-qing¹, LI Zhe¹, ZHU Wen-ying²

(1. School of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The traffic characteristics of integrated transit network were analyzed, the impacts of trip time and cost on trip impedances were studied based on the path features of integrated transit network. By considering the impact of passenger flow density on walking speed and the conversion relation between travel cost and time, the section impedance, node impedance and cost impedance were transformed to time, and the trip impedance function of integrated transit network was set up. By using Wardrop equilibrium theory, an equilibrium assignment model was established, and the model was solved according to FW algorithm. Computation result indicates that when the lengths of bus transit and rail transit are 57.3, 16.2 km respectively, the ratio of passenger flow volume by rail transit and total passenger flow volume is 65.4%, and 55.4% passengers get access to rail transit system through transfer. So by constructing reasonable integrated transit network, the total trip impedance reduces and the transportation efficiency of transit network improves. 4 tabs, 5 figs, 18 refs.

Key words: traffic planning; integrated transit network; equilibrium assignment; trip impedance; rail transit; transfer

Author resume: LI Shu-qing(1963-), male, professor, +86-23-62652107, sql999888@126.com.

0 引 言

一体化公交是将城市中各种公交方式(包括轨

道、地面公交及其他方式)整合为一体,进行统一规划、统一建设、统一资源配置、统一运营管理,发挥各自的优势,相互配合,紧密衔接,安全、快速、高效运

收稿日期:2012-08-20

基金项目:重庆市科技攻关项目(CSTC-2009AA6039);重庆市交通运输工程重点实验室开放基金项目(2011CQJY004);中央高校基本科研业务费专项资金项目(Q1105)

作者简介:李淑庆(1963-),男,四川西充人,重庆交通大学教授,从事交通运输规划与管理研究。

送城市客流的一种立体公交体系。规划构建一体化公交网络是公交优先的重要内容,其重要理论基础为一体化公交网络均衡配流模型,即基于公交阻抗函数将各交通小区之间的公交出行量分配到各条公交网络路径上,使每条路径上的阻抗趋于相等。目前,学者们建立了一些地面公交或轨道交通单独的均衡配流模型。四兵锋等应用 Logit 分离模型得出城市间不同交通方式的客流量,提出了在不同旅客列车之间的铁路客流量均衡分配模型^[1];芦群等分析了城市地面公交网络的阻抗函数,基于最短路径的求解方法,建立了城市地面公交网络的客流均衡分配模型^[2];吴祥云等基于轨道交通阻抗函数,利用均衡分配原理建立了城市轨道交通网络的客流量均衡分配模型,并采用 Frank-Wolfe 算法求解^[3];Huang 等考虑提前与延迟到达目的地的成本,提出了均衡乘坐行为的等价数学模型^[4];程琳等以确定性交通网络用户均衡问题为研究对象,基于确定性用户均衡问题的模型与优化条件的系统分析,提出了将可变步长投影梯度方法应用于交通量分配问题^[5];Wu 等基于频率自适应交通网络模型提出了客流分配框架,可在拥挤的交通网络条件下确定公交线路的频率和网络流模式^[6];Hao 等扩大拥塞风险成本的定义,提出了繁忙时段不同地点的旅行成本模型,并根据不同地点的弹性因素延伸了繁忙时段的弹性瓶颈均衡模型^[7]。这些模型仅考虑了单一公交网络运行的阻抗因素,包括乘客舒适度、站点上下客时间、换乘时间、票价等的影响。

许多学者在两种及以上公交方式流量分配研究中也取得了一些成果。李友好等根据各种运输方式的经济技术特征,用运输通道的时空运营网络来表示各种运输方式的竞争性,提出基于网络的区域运输通道多交通模式客流分配模型,并给出了模型的求解方法^[8];刘晓佳等采用动态交通分配的思想,描述了运输通道内各种运输方式交通量的时空演化特征,构建出基于网络均衡的客流分配模型^[9];陈义华等提出了多模式拥挤交通网络中的路径分配与收费定价模型,根据城市混合交通拥挤的特点,提出在收费路段按不同交通方式收取不同费用,以此控制各种交通方式的分担量^[10];Yu 等提出了城际间多种商品与多方式网络的 SUE 均衡配流模型^[11];四兵锋等针对中国城市混合交通网络的特点,分析了城市混合交通网络中出行者的交通选择行为,提出了城市混合交通网络流量分配的变分不等式模型^[12];韩印等分析了广义费用下多用户多方式的路径选择

机理与网络平衡及信息条件下多用户多方式对路径选择的影响特征,建立了基于信息条件的随机混合交通平衡分配模型^[13];Baillon 等基于动态均衡分配原理,利用嵌入式马尔可夫链来规划乘客的路径选择行为,提出了马尔可夫均衡配流模型^[14];四兵锋等基于图论提出了一种分层网络结构来描述城市多方式交通网络,并采用变分不等式方法构造了城市多方式交通网络的配流模型^[15];罗端高等考虑了自驾车、出租车以及公交车的相互影响,用变分不等式方法建立了多用户多方式混合交通均衡变分模型^[16]。基于一体化公交的理念,这些模型存在以下不足:客流量直接在路网中分配,没有考虑到一体化公交路径问题;时间与费用因素对阻抗的影响分析不够;换乘阻抗概念模糊,影响因素考虑不全。

一体化公交网络与单一或两种及以上公交方式的最大区别在于不同公交方式之间的一体化换乘与衔接。本文在地面公交网络、轨道交通网络的研究基础上,根据一体化公交网络的交通特性,从出行时间、出行费用等影响因素分析,创建一体化公交网络的阻抗函数;利用 Wardrop 均衡原理,建立一体化公交网络均衡配流模型,并提出相应算法。

1 一体化公交网络的交通特性

公交乘客完成一次出行往往根据出行时间、出行费用和舒适度等因素在一体化公交网络中选择不同的出行路径和公交方式(或组合)抵达目的地,因此,一体化公交网络具有如下特性。

(1)连通特性:出行的可选路径增多,公交可达性增加。

(2)换乘特性:包括同一方式公交之间与不同方式公交之间的换乘,一条出行路径往往需要一次或多次换乘。

(3)网络特性:一体化公交网络要求各种公交方式构成有机整体,该网络中的节点由地面公交站点和轨道站点构成,路段由相邻节点的连接段构成,一体化公交网络见图 1,1~5 为交通小区编号,6~12 为轨道站点编号,13~20 为地面公交站点编号,21~23 为城市道路交叉口编号。

2 一体化公交网络的出行阻抗函数

公交出行阻抗是乘客从公交起点站到终点站出行所受到的阻滞,这种阻抗主要包括出行距离阻抗、出行时间阻抗、出行费用阻抗。距离可表示为行驶时间,费用也可换算为时间,因此,一体化公交网络

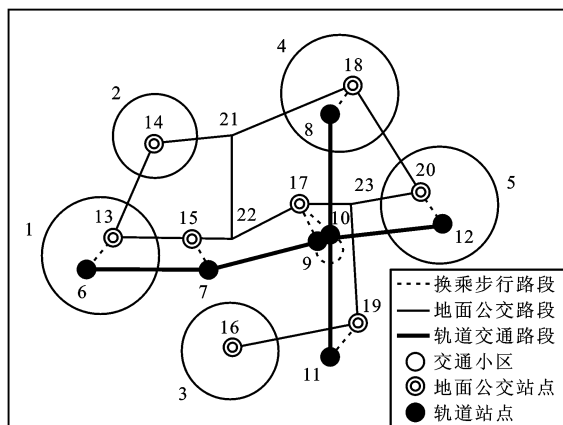


图 1 一体化公交网络

Fig. 1 Integrated transit network

的出行阻抗可统一用时间表示,构成关系见图 2。

2.1 出行时间阻抗

公交网络由路段与节点构成,乘客从公交起点站到终点站出行一般要选择网络中的部分路段和节点组成某一出行路径,该出行路径的出行时间阻抗包括该路径的所有路段时间阻抗和所有节点时间阻抗。

2.1.1 路段时间阻抗

乘客出行从节点 i 到相邻节点 j 可采用步行(距离较短)或乘车(距离较长)方式,因此,路段 ij 时间阻抗可为步行时间阻抗或乘车时间阻抗。

步行时间阻抗 t_1 为

$$t_1 = L_1 / v_1(k_1) \quad (1)$$

$$v_1(k_1) = v_0(1 - k_1/k_0) \quad (2)$$

式中: L_1 为步行距离; $v_1(k_1)$ 为步行人流密度为 k_1 时的平均步行速度; v_0 为人流的自由流速度,即人

流密度趋于 0 时的速度,通常取 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; k_0 为拥挤人流密度,根据文献[17],本文取 $1.52 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

乘车时间阻抗 t_2 由两部分组成,一部分是与乘客数量无关的车辆行走时间 t_{21} ,即

$$t_{21} = L_{21} / v_{21} \quad (3)$$

式中: L_{21} 为车辆行驶距离; v_{21} 为车辆行程速度。

另一部分是乘客数量相关的乘客拥挤额外开销时间,即 $t_{22} = t_{21}Y$,该时间是由于车内的拥挤产生的不舒适感,使乘客感觉车内乘车时间大于实际车辆行走时间。当乘客数量小于座位数量时,额外开销时间为 0;当乘客数介于额定载客数量和座位数量二者之间时,部分乘客因没有座位开始感到不适,并产生额外开销时间,随着乘客数增加,车内拥挤增加,额外开销时间也增大;当乘客数量大于额定载客数量时,此时由于过度拥挤,所产生的额外开销时间更大。额外时间开销函数 Y 为^[3]

$$Y = \begin{cases} \frac{(x - pn)}{pn} A & pn < x \leq pc \\ \frac{(x - pc)}{pn} A + \frac{(pc - pn)}{pn} B & x > pc \end{cases} \quad (4)$$

式中: x 为路段上的客流量; p 为车辆发车频率; n 为车辆的座位数量; c 为车辆能容纳的最大乘客数量; A 为一般拥挤时的额外开销时间系数; B 为过度拥挤时的额外开销时间系数。

综合以上两部分,可知乘车时间阻抗为

$$t_2 = t_{21} + t_{22} = t_{21}(1 + Y) \quad (5)$$

2.1.2 节点时间阻抗

某节点 j 的时间阻抗为该节点公交停靠续乘时间阻抗或节点换乘时间阻抗。

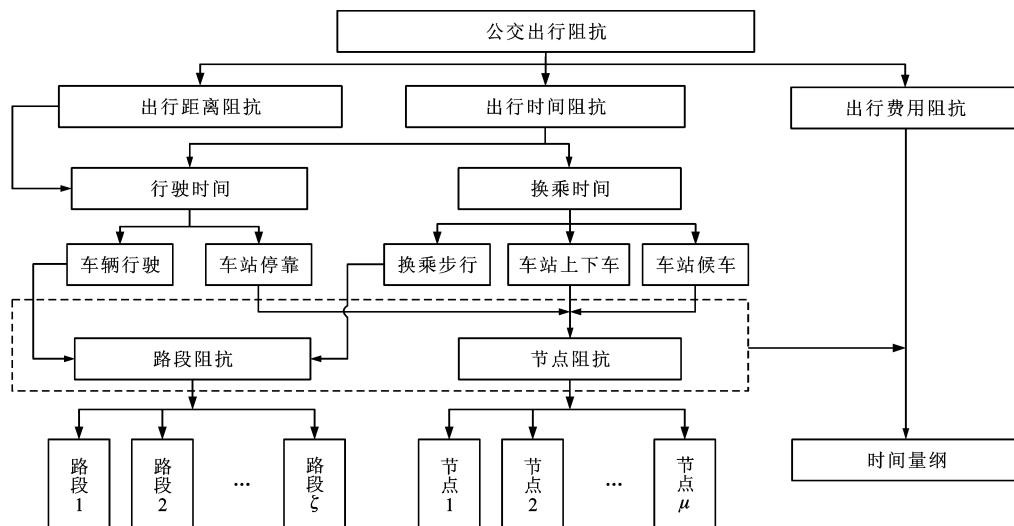


图 2 一体化公交阻抗

Fig. 2 Impedances of integrated transit

(1) 节点停靠续乘时间阻抗

地面公交或轨道车辆到站停靠上下客都要花一定时间。若乘客不下车,继续乘坐同一辆车前行,则需等待一段时间,而产生站点停靠续乘时间阻抗 t_3 (假定车内乘客平均下车时间和车外乘客平均上车时间均为 $t_3/2$)。

(2) 节点换乘时间阻抗

乘客换乘一般经历下车、换乘步行、候车上车 4 个过程。乘客在同一个节点换乘,下车后即可在原地候车上车,一般不需要步行,其换乘时间阻抗包括平均下车时间 $t_3/2$ 、平均候车时间 $\tau/2$ (τ 为轨道交通或地面公交的发车间隔时间)和上车时间 t_3 。不同节点换乘,乘客在前节点下车后,需步行抵达后节点,换乘步行时间阻抗按路段时间阻抗式(1)计算。前节点换乘时间阻抗为平均下车时间 $t_3/2$,后节点的换乘时间阻抗为平均候车时间 $\tau/2$ 和上车时间 t_3 。节点换乘时间阻抗 t_4 为

$$t_4 = \begin{cases} t_3/2 + \tau/2 + t_3 & \text{同节点换乘} \\ t_3/2 & \text{不同节点换乘(前节点,} \\ & \text{车辆到达站)} \\ \tau/2 + t_3 & \text{不同节点换乘(后节点,} \\ & \text{车辆出发站)} \end{cases} \quad (6)$$

综上分析,可用三维数组描述节点阻抗。数组中元素 d_{jgh} 为乘客乘坐线路 g 到达节点 j 的瞬时至换乘线路 h 离开节点 j 的瞬时之间的即节点阻抗,见图 3^[3]。

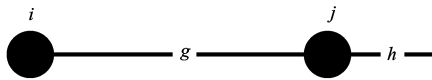


图 3 节点阻抗

Fig. 3 Node impedance

当在节点 j 处无法由线路 g 换乘到线路 h 时, d_{jgh} 为 ∞ ; 当 g 与 h 相同时, 为续乘; 当 g 与 h 不相同, 则为换乘。

2.2 出行费用阻抗

根据一体化公交网络的换乘特性, 乘客从起点站到终点站, 往往需要一次或多次换乘。若仅在轨道交通方式内部进行换乘, 一般没有换乘费用, 乘客只需一次支付起点站与终点站之间乘车距离费用 f_1 , 但在不同公交方式之间或者地面公交方式内部进行换乘, 乘客不仅要支付起终点之间乘车距离费用 f_1 , 还要支付换乘费用 f_2 , 即

$$f_1 = \begin{cases} \beta & 0 < \Delta \leq \eta \\ \beta + \alpha \frac{\Delta - \eta + \theta}{\theta} & \Delta > \eta \end{cases} \quad (7)$$

$$f_2 = \begin{cases} 0 & \text{轨道内部换乘} \\ \sum_{\gamma=1}^{\psi} \varphi_{\gamma} & \text{其他换乘} \end{cases} \quad (8)$$

式中: β 为最低票价; Δ 为乘车距离; η 为最低票价的乘车距离; α 为随乘车距离增加而增加的单位费用; θ 为增加单位乘车费用的距离; φ_{γ} 为第 γ 次换乘所增加的费用; ψ 为换乘次数。

某一路径的总出行费用 $f = f_1 + f_2$, 可换算成时间。将乘车时间的单位时间价值定为单位时间内收入的一半, 按照中国月计薪天 21.75 d, 每天的法定工作时间为 8 h, 每月居民人均收入为 w , 则费用阻抗 t_5 为

$$t_5 = 20\,880 f / w$$

2.3 出行总阻抗

根据一体化公交网络特性, 乘客从起点站到终点站, 在公交网络中选择的某一路径包含了 ∂ 个节点和 $\partial - 1$ 条路段。乘客通过每一个节点都会因为续乘、换乘选择而产生不同的节点阻抗, 通过每一条路段也会因为路段上交通工具内容流量的变化而产生不同的路段阻抗, 所有这些节点时间阻抗、路段时间阻抗以及出行费用阻抗共同构成了该路径的出行总阻抗。

3 一体化公交网络均衡配流模型

均衡配流是指基于 Wardrop 均衡原理的交通流分配方法, 即在交通网络客流达到均衡时, 所有被利用的路径具有相等而且最小的阻抗, 由此, 以起点站到终点站之间某一出行路径的出行总阻抗最小为目标函数 Z , 一体化公交网络均衡配流模型为

$$\min Z = t_5 + \sum_i \sum_j \int_0^{x_{ijgh}} [\Omega_{ijg}(u) + d_{jgh}(u)] du \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \sum_m f_{rsm} = q_{rs} \quad (10)$$

$$f_{rsm} \geq 0 \quad (11)$$

$$x_{ij} = \sum_r \sum_s \sum_m f_{rsm} \delta_{rsijm} \quad (12)$$

$$\delta_{rsijm} = \begin{cases} 1 & \text{路段 } ij \text{ 在 } r, s \text{ 间的第 } m \text{ 条路径上} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (13)$$

式中: x_{ijgh} 为从节点 i 乘坐公交线路 g 到节点 j , 并在节点 j 乘坐公交线路 h 离开的交通流量; u 为交通流量; $\Omega_{ijg}(u)$ 为该路径交通流量为 u 时从节点 i 乘坐公交线路 g 到节点 j 的路段阻抗; $d_{jgh}(u)$ 为该路径交通流量为 u 时乘坐公交线路 g 到达节点 j 以后, 在节点 j 乘坐公交线路 h 离开的节点阻抗; f_{rsm} 为交通小区 r 与 s 间第 m 条路径上的交通流量; q_{rs}

为交通小区 r, s 间的交通流量; x_{ij} 为节点 i, j 之间的交通流量; δ_{rsijm} 为路段-路径相关变量。

模型约束条件式(10)保证网络中任意两点间的出行量等于其间各路径上的流量之和;式(11)保证网络中交通小区 r, s 间的第 m 条路径上的流量必定大于等于 0;式(12)保证路段 ij 的交通量等于网络中所有包含该路段的路径上的交通量之和。

4 模型算法

上述模型为非线性模型,可采用目前广泛使用的 FW 算法进行求解。FW 算法是用线性规划逐步迭代逼近非线性规划的方法,在每次迭代中,先确定目标函数的最速下降方向,再找到一个最优步长,在最速方向上截取最优步长得到下一步迭代的起点,重复迭代直到找到最优解。具体算法如下^[18]。

Step 1:初始化。实行一次全有全无分配,得各流向流量。

Step 2:更新各边阻抗。

Step 3:寻找下一迭代方向。

Step 4:确定迭代步长。

Step 5:确定新的迭代起点。

Step 6:收敛性检验。如果迭代结果小于 ϵ (ϵ 是预先确定的小正数)则停止计算;否则,令 $n_1 = n_1 + 1$ (n 为迭代次数),返回 Step 2。

算法流程见图 4。

5 计算结果分析

5.1 基础数据

以图 1、表 1、2 所描述的一体化公交网络为例,对所建的一体化公交均衡配流模型与算法进行应用。其中,表 1 为该一体化网络中地面公交和轨道交通的线路(表中数字编号同图 1),表 2 为地面公交和轨道交通两站点间连接路径的长度(单位为 100 m), ∞ 表示无法到达。

5.2 均衡配流结果

假定在高峰小时内,编号 1~5 的 OD 小区之间的客流量均为 3 000 人次 $\cdot h^{-1}$,按程序运算,运行结果见图 5、表 3、4。

在图 5 中,路段 14-18、15-17 和 16-19 之间的地面公交客流较大,对道路造成的压力较大,应采取措施缓解相关道路的拥堵;路段 16-19 之间的客流特别大,应提高通道运输能力。在表 3 中,地面公交 II 和地面公交 IV 的部分路段,客流较小,线路配置不尽合理,应进行调整。在表 4 中,交通小区之间所有被

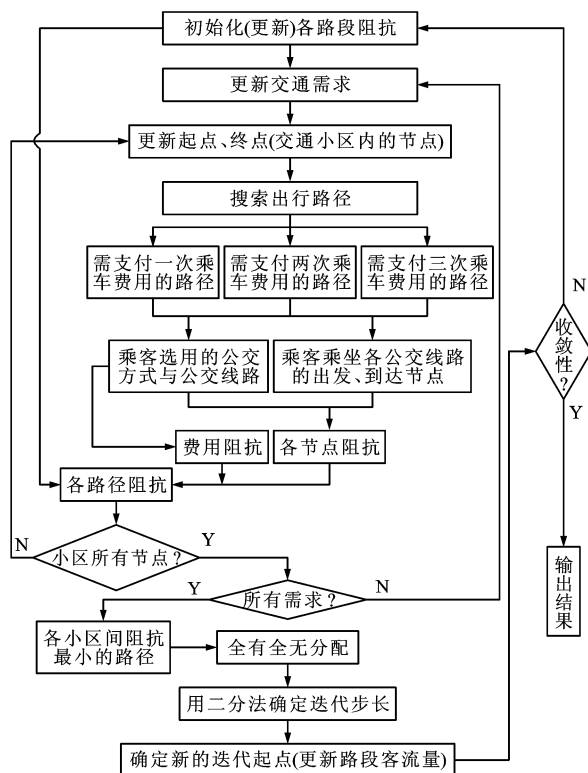


图 4 算法流程

Fig. 4 Algorithm flow

表 1 地面公交和轨道交通的线路

Tab. 1 Routes of bus and rail

线路		线路走向					
轨道	线路 I	6	7	9	12		
	线路 II	8	10	11			
地面公交	线路 I	13	15	17	19	16	
	线路 II	13	15	17	20		
	线路 III	13	14	18	20	19	16
	线路 IV	14	21	17	19	16	

选用的出行路径的出行阻抗达到均衡且最小;轨道 I 和地面公交 II 都是交通小区 1 与交通小区 5 之间的直达线路,但这两个小区之间的交通需求均由轨道 I 满足,地面公交 II 的线路设置不尽合理,应考虑优化调整。本文算例的一体化公交区域中,地面公交线路长度为 57.3 km,覆盖了所有交通小区之间,各交通小区间均有直达线路,而轨道交通线路只有 16.2 km,仅覆盖了部分交通小区。尽管轨道交通线路的里程只占一体化公交网络总里程的 22.0%,但输送的客流量却占总客运量的 65.4%;同时,通过换乘进入轨道交通系统的客流量达 55.4%,因此,构建合理的一体化公交网络,能提供公交乘客多种路径选择,实现乘客在网络中的高效换乘,降低乘客出行总阻抗,提高公交运输效率。

表 2 路径长度
Tab. 2 Route lengths

节点	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
6	0	33	∞	∞	∞	∞	∞	2	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
7	33	0	∞	33	∞	∞	∞	∞	∞	2	∞	∞	∞	∞	∞
8	∞	∞	0	∞	33	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	2	∞	∞
9	∞	33	∞	0	1	∞	30	∞	∞	∞	∞	3	∞	∞	∞
10	∞	∞	33	1	0	33	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
11	∞	∞	∞	∞	33	0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	2	∞
12	∞	∞	∞	30	∞	∞	0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	2
13	2	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	27	21	∞	∞	∞	∞	∞
14	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	27	0	62	∞	69	56	∞	∞
15	∞	2	∞	∞	∞	∞	∞	21	62	0	∞	35	76	∞	∞
16	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	∞	∞	33	∞
17	∞	∞	∞	3	3	∞	∞	∞	69	35	∞	0	46	47	32
18	∞	∞	2	∞	∞	∞	∞	∞	56	76	∞	46	0	65	33
19	∞	∞	∞	∞	∞	2	∞	∞	∞	∞	33	47	65	0	51
20	∞	∞	∞	∞	∞	∞	2	∞	∞	∞	∞	32	33	51	0

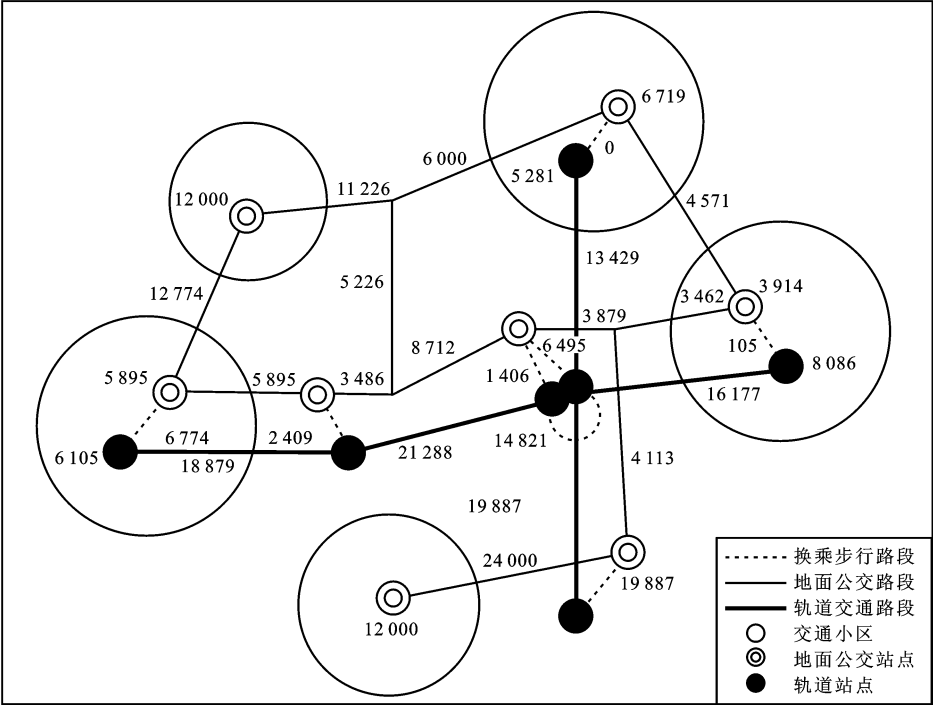


图 5 客流量分配

Fig. 5 Distribution of passenger flow volumes

图 5 为每条路段上高峰小时一体化公交所有线路的客流量总和,单位为人次·h⁻¹。表 3 为各公交线路之间的运输量,路段 6-7 表示图 1 中节点 6 与节点 7 之间的路段,去程表示路段 6-7 的客流量,返程则表示路段 7-6 的客流量。表 4 为每个交通小区之间交通需求的均衡配流结果。

6 结 语

一体化公交通过建立高度系统化、组织化的规划、建设、运营服务体系,对公交资源的开发、利用、整合、配置实行全方位、全过程的统一规划、调控和监督管理,体现整体规模运营效益,规范运营,优化

表 3 各公交线路的客流量

Tab. 3 Passenger flow volumes of transit routes 人次·h⁻¹

线路			路段与客流量				
轨道	I	路段	6-7	7-9	9-12		
		去程	7 619	7 619	8 091		
		返程	9 354	11 763	8 086		
	II	路段	8-10	10-11			
		去程	6 719	8 086			
		返程	6 710	9 895			
地面 公交	I	路段	13-15	15-17	17-19	19-16	
		去程	1 447	1 447	429	4 003	
		返程	1 500	296	429	3 998	
	II	路段	13-15	15-17	17-20		
		去程	1 448	1 448	799		
		返程	1 500	295	815		
	III	路段	13-14	14-18	18-20	20-19	19-16
		去程	6 354	3 000	2 281	914	4 000
		返程	6 420	3 000	2 290	934	4 002
	IV	路段	14-17	17-19	19-16		
		去程	2 580	665	3 997		
		返程	2 646	742	4 000		

服务,提高公共交通服务水平。公交网络均衡配流是一体化公交规划的重要内容。本文根据一体化公交的交通特性,对出行阻抗进行系统分析,特别是对换乘阻抗进行了剖析,考虑了人流密度对步行速度的影响,以及出行费用和时间的换算关系,创建了一体化公交网络均衡配流模型与算法,为一体化公交网络的规划与建立奠定了一定的理论基础。本文在处理轨道线路交汇时,为同一站点设置了2个编号以解决换乘步行问题,在实际应用中较为繁琐,今后需深入研究该问题对有关模型的影响,并优化完善这些模型。

参考文献:

References:

- [1] 四兵锋,高自友.城市间旅客列车的票价与流量的灵敏度分析[J].北方交通大学学报,2001,25(2):49-53,69.
SI Bing-feng, GAO Zi-you. Sensitivity analysis for the relationship between passenger-ticket price and passenger volume of different sorting trains[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2001, 25(2): 49-53, 69. (in Chinese)
- [2] 芦群,刘灿齐.城市公共交通网络均衡配流模型与算法[J].交通与计算机,2004,22(4):3-6.
LU Qun, LIU Can-qi. Equilibrium model and algorithm of urban public traffic network[J]. Computer and Communications, 2004, 22(4): 3-6. (in Chinese)

- [3] 吴祥云,刘灿齐.轨道交通客流量均衡配流模型与算法[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(9):1158-1162.
WU Xiang-yun, LIU Can-qi. Traffic equilibrium assignment model specially for urban railway network[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(9): 1158-1162. (in Chinese)
- [4] HUANG Hai-jun, TIAN Qiong, GAO Zi-you. An equilibrium model in urban transit riding and fare policies [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3521: 112-121.
- [5] 程琳,王炜,王欣.可变步长的投影梯度算法与交通网络流量分配[J].系统工程学报,2006,21(1):44-48.
CHENG Lin, WANG Wei, WANG Xin. Gradient projection with variable step and network traffic assignment[J]. Journal of Systems Engineering, 2006, 21(1): 44-48. (in Chinese)
- [6] WU Z X, LAM W H K. Transit passenger origin-destination estimation in congested transit networks with elastic line frequencies[J]. Annals of Operation Research, 2006, 144(1): 363-378.
- [7] HAO Ji-xiu, ZHOU Wei, PENG Hu, et al. Elastic bottleneck equilibrium model for rail transit passengers at rush hours[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(3): 93-97.
- [8] 李友好,刘晓佳,施其洲.基于网络的运输通道客运流量分配模型[J].交通运输工程与信息学报,2005,3(2):57-62.
LI You-hao, LIU Xiao-jia, SHI Qi-zhou. Trip assignment model for transportation corridor based on network equilibrium[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2005, 3(2): 57-62. (in Chinese)
- [9] 刘晓佳,李友好,施其洲.运输通道结构配置中的客流量分配模型及算法[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(7):924-928.
LIU Xiao-jia, LI You-hao, SHI Qi-zhou. Model and algorithm research on solving passenger flow allocation in transport corridor [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(7): 924-928. (in Chinese)
- [10] 陈义华,吴国强,朱玉琴.多模式拥挤交通网络中的路径分配与收费定价模型[J].交通与计算机,2007,25(6):63-66.
CHEN Yi-hua, WU Guo-qiang, ZHU Yu-qin. Model of route distribution and toll pricing in multi-model congestion transportation network[J]. Computer and Communications, 2007, 25(6): 63-66. (in Chinese)
- [11] YU Si-jun, CAO Cong-yong, LIU Ying-shun. A stochastic user equilibrium assignment model for intercity multi-commodity multi-modal networks[C]//ASCE. The Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals. Chengdu: ASCE, 2008: 3050-3059.
- [12] 四兵锋,赵小梅,孙壮志.城市混合交通网络系统优化模型及其算法[J].中国公路学报,2008,21(1):77-82.
SI Bing-feng, ZHAO Xiao-mei, SUN Zhuang-zhi. Optimization model and its algorithm for urban mixed traffic network system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 77-82. (in Chinese)

表 4 均衡配流结果
Tab. 4 Result of equilibrium assignment

交通小区 起点 终点	出行方式	分配流量/ 人次 · h ⁻¹	出行 阻抗/min	交通小区 起点 终点	出行方式	分配流量/ 人次 · h ⁻¹	出行 阻抗/min
1	2 地面公交Ⅲ	3 000	298.640 0	3	4 地面公交Ⅲ—轨道Ⅱ—地面公交Ⅳ	578	608.404 7
	3 轨道Ⅰ—轨道Ⅱ—地面公交Ⅰ	752	298.563 0		4 地面公交Ⅰ—轨道Ⅱ	1 167	327.028 8
	3 轨道Ⅰ—轨道Ⅱ—地面公交Ⅳ	1 301	298.665 7		4 地面公交Ⅳ—轨道Ⅱ	869	326.977 5
	3 轨道Ⅰ—轨道Ⅱ—地面公交Ⅲ	847	298.614 4		4 地面公交Ⅲ—轨道Ⅱ	964	326.926 2
	4 轨道Ⅰ—地面公交Ⅲ	105	243.038 2		5 地面公交Ⅰ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ	713	326.694 8
	4 地面公交Ⅰ—轨道Ⅱ	1 447	243.104 7		5 地面公交Ⅳ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ	791	326.643 4
	4 地面公交Ⅱ—轨道Ⅱ	1 448	243.017 6		5 地面公交Ⅲ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ	562	326.592 1
	5 轨道Ⅰ	3 000	88.276 5		5 地面公交Ⅲ	934	326.530 0
	1 地面公交Ⅲ	3 000	301.328 0		1 轨道Ⅱ—地面公交Ⅰ	296	172.987 1
	3 地面公交Ⅳ—地面公交Ⅰ	429	590.610 9		1 轨道Ⅱ—轨道Ⅰ—地面公交Ⅰ	1 204	173.003 7
2	3 地面公交Ⅳ	665	595.967 3	4	1 轨道Ⅱ—地面公交Ⅱ	295	173.106 9
	3 地面公交Ⅲ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ—地面公交Ⅰ	1 230	595.575 6		1 轨道Ⅱ—轨道Ⅰ—地面公交Ⅱ	1 205	173.069 0
	3 地面公交Ⅲ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ—地面公交Ⅲ	676	595.626 9		2 地面公交Ⅲ	3 000	300.796 7
	4 地面公交Ⅲ	3 000	300.796 7		3 轨道Ⅱ—地面公交Ⅰ	752	325.386 1
	5 地面公交Ⅳ—轨道Ⅰ	1 406	393.278 8		3 轨道Ⅱ—地面公交Ⅳ	1 301	325.488 8
	5 地面公交Ⅳ—地面公交Ⅱ	80	393.342 7		3 轨道Ⅱ—地面公交Ⅲ	947	325.437 5
	5 地面公交Ⅲ—轨道Ⅰ	1 514	393.250 1		5 轨道Ⅱ—地面公交Ⅱ	719	150.464 0
	1 地面公交Ⅰ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ	1 167	306.384 5		5 地面公交Ⅲ	2 281	150.370 0
	1 地面公交Ⅳ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ	869	306.333 1		1 轨道Ⅰ	3 000	94.437 4
	1 地面公交Ⅲ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ	964	306.281 8		2 轨道Ⅰ—地面公交Ⅲ	3 000	397.071 7
3	2 地面公交Ⅰ—地面公交Ⅳ	429	597.582 9	5	3 轨道Ⅰ—轨道Ⅱ—地面公交Ⅰ	840	325.034 3
	2 地面公交Ⅰ—轨道Ⅱ—地面公交Ⅳ	458	608.507 4		3 轨道Ⅰ—轨道Ⅱ—地面公交Ⅳ	730	325.137 0
	2 地面公交Ⅰ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ—地面公交Ⅲ	64	608.518 7		3 轨道Ⅰ—轨道Ⅱ—地面公交Ⅲ	516	325.085 6
	2 地面公交Ⅳ	742	608.341 8		4 地面公交Ⅲ	914	325.074 0
	2 地面公交Ⅳ—轨道Ⅱ—地面公交Ⅳ	439	608.456 0		4 地面公交Ⅲ	2 185	150.832 0
	2 地面公交Ⅳ—轨道Ⅱ—轨道Ⅰ—地面公交Ⅲ	290	608.467 4		4 地面公交Ⅱ—轨道Ⅱ	815	150.886 4

[13] 韩 印,袁鹏程.多用户多方式混合随机交通平衡分配模型[J]. 交通运输工程学报,2008,8(1):97-101.
HAN Yin, YUAN Peng-cheng. Multi-user and multi-mode assignment model of mixed stochastic traffic balance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(1): 97-101. (in Chinese)

[14] BAILLON J B, COMINETTI R. Markovian traffic equilibrium[J]. Mathematical Programming, 2008, 111(1/2): 33-56.

[15] 四兵锋,杨小宝,高 亮,等.基于出行需求的都市多模式交通配流模型[J]. 中国公路学报,2010,23(6):85-91.
SI Bing-feng, YANG Xiao-bao, GAO Liang, et al. Urban multimodal traffic assignment model based on travel demand[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 85-91. (in Chinese)

[16] 罗端高,史 峰.多用户多方式混合交通均衡分配模型及求解算法[J]. 交通运输系统工程与信息,2010,10(5):110-116.
LUO Duan-gao, SHI Feng. Model and solution algorithm for

multi-user and multi-mode mixed traffic equilibrium variational inequality[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(5): 110-116. (in Chinese)

[17] 梁 科.人行道服务水平的模糊评价模式研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
LIANG Ke. Study on fuzzy evaluation mode of levels of service for sidewalks[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)

[18] 徐 猛,屈云超,高自友. Frank-Wolfe 算法求解交通分配问题:比较不同流量更新策略和线搜索技术[J]. 交通运输系统工程与信息,2008,8(3):14-22.
XU Meng, QU Yun-chao, GAO Zi-you. Implementing Frank-Wolfe algorithm for traffic assignment problem under different flow update strategies and line search technologies[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(3): 14-22. (in Chinese)