

考虑公交车内拥挤的区间公交优化设计

杨熙宇, 暨育雄

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为满足公交客流走廊集聚的需求,研究了全程车和区间车形成的多服务模式公交优化设计问题. 针对公交走廊需求特征,利用公交客流起止点(OD)数据,建立了双层优化模型,上层模型以发车频率和公交座位数为主要输出参数的公交设计研究模型,下层模型为经典的随机选择(SUE)模型,应用序列二次规划(SQP)算法求解模型. 最后结合相关案例给出了优化算例,案例结果表明,模型具有较强的实用性,能够较好地反映公交车内拥挤对乘客出行成本的影响,能有效地提高公交走廊的运营效率. 同时,模型通过输出不同站点上车在各站点能找到座位的概率,优化乘客选择不同公交出行的行为,均衡了公交客流,提高了车辆服务质量.

关键词: 公交规划; 区间车; 双层模型; 发车频率; 座位数
中图分类号: U491 **文献标志码:** A

Design of Short-turning Services for an Urban Bus corridor Considering Passengers' Congestion

YANG Xiyu, JI Yuxiong

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the urban transportation demand, the paper studied the optimization multiple services approach of bus frequency and bus seats associating with urban transit to transport passengers. For the operation characteristics of a bus corridor, the paper presents a bi-level model for optimization of a bus corridor. The upper optimizing model of minimizes the costs in terms of waiting time, in-vehicle travel time and operator cost. The models then determine which of these services should be offered at what frequencies and with number of vehicles. The lower model is traditional stochastic user equilibrium (SUE) model. The sequential quadratic programming (SQP) algorithm is developed for constructing

optimal approach and proved the ability to find the optimal solution. An application of the models to the case shows that the optimizing models are practical and effective for satisfying the demand of passengers and improving the operating efficiency of bus transit system.

Key words: public transit; short-turning; bi-level model; frequency; bus seats

城市公共交通在城市客运交通体系中处于骨干地位,是大客流输送的主要方式,其客运功能的实现往往需要不同服务模式公交的紧密配合. 尤其是在局部客流需求较大的公交客流走廊上,在全程公交(简称全程车)的基础上合理设置区间公交(简称区间车)将有效地提高公交的运行服务效率. 图 1 所示公交线路 1 为全程车模式,线路服务沿线 7 个公交站点;公交线路 2 为区间车模式,服务固定区间段内的公交站点. 以上两种不同公交模式共同设置在同一公交客流走廊上,如何优化协调设计此类多服务模式公交问题,已经成为当前研究的重点.

区间车优化设计问题的研究最早可追溯到 1987 年, Furth 等^[1]将研究的重点集中在多服务模式公交的优化协调问题上,将发车频率和车头时距偏差作为模型重要的输出参数,但目标函数没有反映公交总成本对多服务模式公交优化的影响^[1]. 后续的研究中,逐渐克服了这一缺点,采用不同的数理模型优化成本目标函数^[2-8]. 其中, Site 等^[2]在模型中考虑了区间车和全程车模式之间换乘时间费用,从而使模型更加符合实际情况. Leiva 等^[4]将双层模型推广到区间车的公交优化设计问题中,并对其适用性和有效性进行了证明. 以上这些研究关注的重点都在公交服务主体,对公交服务客体(乘客)的关注较少,

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(No: 51308410); 中央高校基本科研业务费专项资金(1600219210); 上海市科委科研项目(No: 15DZ1204402)

第一作者: 杨熙宇(1982—),男,博士生,国家注册咨询师,国家注册规划师,主要研究方向为交通运输规划与管理.

E-mail: yangxiyu001@163.com

通讯作者: 暨育雄(1978—),男,工学博士,副教授,主要研究方向为公交管理与控制. E-mail: yxji@tongji.edu.cn

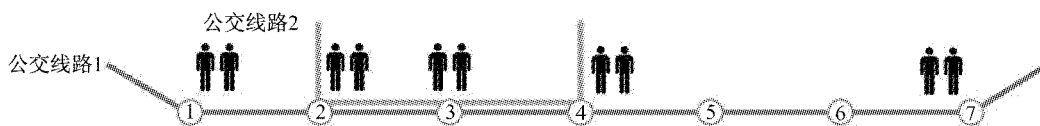


图 1 不同服务模式公交示意图

Fig.1 Example of multiple services transit service

尤其在考虑公交车内拥挤对乘客的影响更是微乎其微。

直到近些年来,研究的热点才逐渐由公交服务主体导向转变为公交服务客体导向,模型中更加着重考虑公交自身服务对乘客的影响,2013年,Ceder等^[6]通过对公交容量进行定义,针对不同的公交模式采用不同的容量的公交车,并应用公交线路起止点(OD)计算出全程车和区间车的优化指标,结果表明乘客对于公交容量的敏感性较高,公交运行距离越长,容量要求就越高.2015年Larrain^[7]利用已知的出行OD,假定公交存在拥挤和非拥挤两种状态,分别就两类状态建立优化模型求解全程车和区间车的发车频率。

就区间车优化设计的方法而言,从国内外的研究现状来看,主要存在如下问题:首先,缺少对于全程车和区间车优化组合的深入探讨;其次,考虑公交车内拥挤对乘客影响的研究不多;再者,模型的求解过程相对繁杂且效率低下。

基于以上的考虑,本文提出在OD需求条件下考虑公交车内拥挤的区间公交优化设计问题.以实际的公交线路为现实背景,分析全程车和区间车的公交特征,解析优化设计的机理,建立实用模型,并应用算法求解。

1 区间公交优化设计问题

1.1 问题描述

在我国现阶段城市发展过程中,出现了公交服务体系不够完善,基础设施较薄弱,城市出行人口密集等一系列问题,这些问题导致现有的公交车内出现了惯性拥挤状态.因此,减少车内拥挤,优化公交服务是体现公交运营“以人为本”的重要指标之一。

近年来研究表明,公交优化问题并不是简单调度优化问题,更多的需要考虑各种模式之间(全程车和区间车)的组合优化^[9],才能有效地提高公交服务质量,多元化地满足不同乘客的出行需求。

由此定位,本文研究在区间车优化设计中如何考虑公交车内拥挤对乘客出行影响,并通过递推迭代求解公交乘客在各站找到座位的概率,区分不同人群受车内拥挤的影响,最后应用序列二次规划(SQP)算法求解.为简化叙述起见,将乘客上车点定义为出行的起点O点,乘客下车点定义为终点D点,OD出行叠加到公交线路,每个出行者在出行过程中都形成一个出行路径。

1.2 建模环境

为更好研究问题,用数学语言对该问题进行描述:设公交线路 m 长度为 l_m (单位:m);公交站点集合为 N ,站点 $n \in N$;公交线路 m 的OD矩阵为 T_m^o ;公交等候时间系数为 c ;车型系数为 α ;公交车座位数为 s_b ;公交车最大容量为 c_b ;公交线路 m 在路段 k 的运行时间为 t_m^k ;运营成本转换为总成本系数为 δ_1 ;等候成本转换为总成本系数为 δ_2 ;车内时间成本转换为总成本系数为 δ_3 ;公交线路 m 的发车频率为 f_m (单位:班次 \cdot h $^{-1}$);公交线路 m 在站点 i 上客人数为 b_i^m ;公交线路 m 在站点 i 下客人数为 a_i^m ;公交线路 m 在站点 i 下客之前留在车上的人数为 $L_{u_i}^m$;公交线路 m 在站点 i 上客之前留在车上的人数为 $L_{d_i}^m$;公交线路 m 在站点 i 下客之后上客之前留在车上的人数为 L_i^m ,如图2所示.其中 $L_i = L_{u_i} - a_i$, $L_{d_i} = L_i + b_i$, $L_{u_{(i+1)}} = L_{d_i}$;二维决策变量为 x_n^m ,选择公交站点 n 时取1,否则取0;在第 j 站下车乘客中未找到座位(站立)坐下来的人数为 a_j^d ;在第 j 站下车乘客中已经找到座位的人数为 a_j^s ;公交线路 m 在站点 j 下客之前留在车上的人中未找到座位(站立)的人数 $L_{u_j}^m$ 。

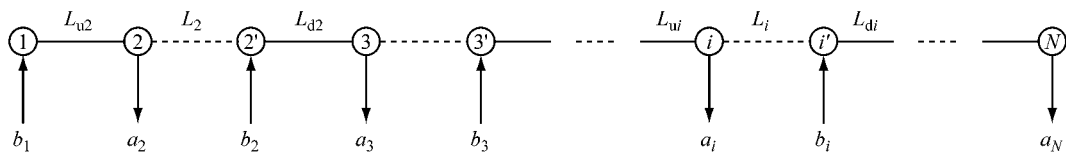


图 2 站点上下客示意图

Fig.2 Example of boarding and alighting services bus lines

为了便于区分有座位和无座位的人群,定义以下4个找到座位的概率,便于后面模型计算。

(1) 在第公交站点 i 上车立即能找到座位的概率 p_{d_i} 为

$$p_{d_i} = \begin{cases} 0, & L_i \geq s_b \\ \min\left(\frac{s_b - L_i}{b_i}, 1\right), & L_i < s_b \end{cases} \quad (1)$$

(2) 上车后在第 j 站能找到座位的概率为 $p_{d_j}^0$, 即在 j 站下车后, 车上站立的人能找到座位的概率为

$$p_{d_j}^0 = \begin{cases} \frac{a_j^d}{L_{u_j}^u - a_j^u}, & L_j > s_b \\ 1, & L_j \leq s_b \end{cases}, \quad a_j^d = \sum_{i=1}^{j-1} P_{d_{ij}} T_{ij}^m \quad (2)$$

(3) 在第 i 站上车第 j 站下车能找到座位的概率 $p_{d_{ij}}$ 为

$$P_{d_{ij}} = P_{d_{i,j-1}} + (1 - P_{d_i}) P_{d_{j-1}}^0 \prod_{k=i+1}^{j-2} (1 - P_{d_k}^0) \quad (3)$$

(4) $P_{d_{ij}}^l$ 从站点 i 到站点 j , 在截面 l 能找到座位的概率为

$$P_{d_{ij}}^l = P_{d_i} + (1 - P_{d_i}) P_{d_{i+1}}^0 + \dots + (1 - P_{d_i}) (1 - P_{d_{i+1}}^0) \dots (1 - P_{d_{i-2}}^0) P_{d_{i-1}}^0 \quad (4)$$

1.3 目标的选取

本次研究目标针对不同模式公交车辆运行, 采用协调优化策略, 车辆资源调度面向指定线路的客运输任务, 由于在线路客流需求确定的情况下, 其总成本的控制主要通过优化发车频率来控制减少总成本。

以往的研究中^[6], 曾经以总成本最小为优化目标建立了公交模型提高系统的运行效率。因此, 下文在以往研究的基础上考虑车内拥挤对乘客的影响, 改进以往模型, 建立以最小总成本为优化目标的优化模型。本文对于建模做如下的假设: ① 线路运营相对独立, 不受相邻线路的影响; ② 服务需求独立于发车频率和车型; ③ 公交站点之间的车辆运行速度稳定不变; ④ 研究时段内车辆发车间隔不变, 各公交站点均相同; ⑤ 站点上车的乘客上车立即找到座位的概率均相等; ⑥ 车上站立的乘客在公交车到站乘客下车后找到座位的概率均相等; ⑦ 假设所有运营的公交车容量大小均相等; ⑧ 车辆到站后, 乘客服从“先下后上”的原则。

2 模型建立

2.1 目标函数

建立以公交自身的运营成本、乘客候车时间成

本和车内时间成本总和为最小的上层模型, 下层模型为经典的 SUE 模型, 考虑站点乘客做不同公交模式选择。

2.1.1 上层模型

上层模型为费用最小模型, 通过上层模型计算出参数 f_m 和 s_b 。

(1) 单位时间内的公交运营成本: 主要与车型大小、公交线路长度和发车频率成如下函数关系^[6]:

$$c_1 = \delta_1 \sum_{m \in M} \alpha \cdot l_m \cdot f_m \quad (5)$$

(2) 单位时间乘客候车成本: 候车成本与发车频率成反比和站点上车人数成正比^[2]。

$$c_2 = \delta_2 \sum_{m \in M} \sum_i \sum_{j=i+1} T_{ij}^m \frac{c}{f_m} \quad (6)$$

(3) 单位时间车内时间成本中, 找到座位人群成本不受拥挤影响和未找到座位的人群成本受到拥挤的影响:

$$c_3 = \delta_3 \sum_{m \in M} \sum_{k=i+1}^j T_{ij}^m [P_{d_{ij}}^{km} t_m^k + (1 - P_{d_{ij}}^{km}) u(s_b^m) t_m^k] \quad (7)$$

式中, 未找到座位人群的拥挤函数为

$$u(s_b) = \begin{cases} 1 + \alpha \left(\frac{L_{uk} - s_b}{c_b} \right)^\beta, & c_b \geq L_{uk} > s_b \\ 1, & L_{uk} \leq s_b \end{cases} \quad (8)$$

综合以上第 2.1.1 节论述, 目标函数为式(5)~(7)中三部分总成本之和的最小值:

$$\min [c_1(f_m) + c_2(f_m) + c_3(s_b)]$$

2.1.2 下层模型

下层模型为经典的随机优化模型, 乘客可根据出行费用成本进行随机选择, 下层模型主要通过随机均衡反馈参数 T_{ij}^m 给上层模型循环计算。

$$T_{ij}^m = T_{ij} \cdot \frac{e^{-(\theta_w \frac{c}{f_m} + \theta_l [P_{d_{ij}}^{km} t_m^k + (1 - P_{d_{ij}}^{km}) u(s_b^m) t_m^k])}}{\sum_{m=1}^M e^{-(\theta_w \frac{c}{f_m} + \theta_l [P_{d_{ij}}^{km} t_m^k + (1 - P_{d_{ij}}^{km}) u(s_b^m) t_m^k])}} \quad (9)$$

2.2 约束条件

模型中变量存在如下的约束条件:

$$\text{St: } f_{\max}^m \geq f_m \geq f_{\min}^m \quad (10)$$

$$c_b \geq s_b \geq 0 \quad (11)$$

$$F_{\max} \geq \sum_{m \in M} f_m \sum_k t_m^k \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{j-1} T_{ij}^m = a_i^m; \quad j = 2, \dots, N \quad (13)$$

$$\sum_{j=i+1}^N T_{ij}^m = b_j^m; \quad i = 1, \dots, N-1 \quad (14)$$

2.3 模型求解

整个模型的求解分为组合问题和优化问题两大

块,在组合问题中利用枚举法穷举可能存在的方案,优化问题利用双层模型进行求解.模型为有约束的非线性规划问题,利用软件工具 Matlab v7.12.0 中序列二次规划(SQP)算法包求解(图 3).图中,MSA 为相继平均法(method of successive average).

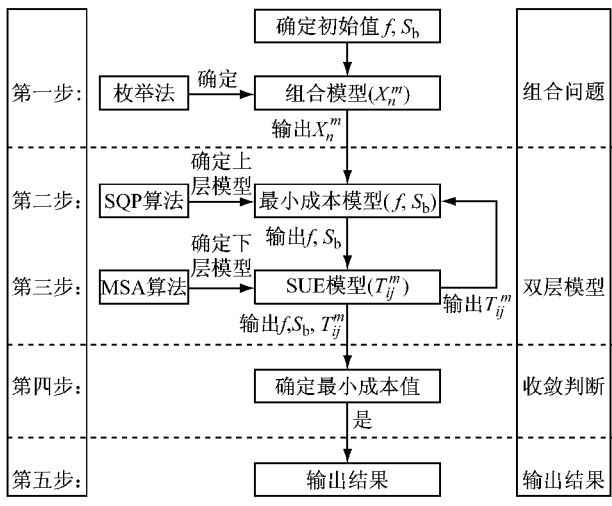
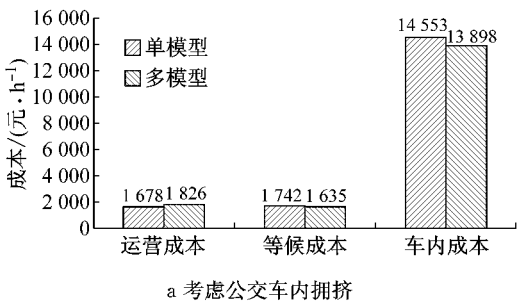


图 3 求解逻辑框架示意图
Fig.3 Logic frame algorithm process

3 实例应用

以 2010 年 Chien^[9]提出的案例应用为基础,将本文提出的模型加以应用,得出结果可做横向比较



模型的优劣性.作为研究多服务模式公交的样本,该线路途经的 6 个公交站,经统计分析统计得到各站点的 OD 数据(表 1).

表 1 公交客流 OD 矩阵
Tab.1 Example of an OD matrix

站点	1	2	3	4	5	6
1	0	0	300	260	78	22
2	0	0	240	280	10	4
3	0	0	0	500	426	18
4	0	0	0	0	300	26
5	0	0	0	0	0	8
6	0	0	0	0	0	0

根据线路情况,对维持全程车模式的基础上,增加区间车的优化设计方案,提出存在的区间车优化设计方案的可能性.

通过模型计算在考虑车内拥挤情况下,优化模型中仅有全程车的情况(单模式)和全程车和区间车同时存在情况(多模式),总成本均高于 Chien^[9]提出模型的总成本,这主要是由于考虑车内拥挤后,运营成本均有所增加,等候成本均有所减少,车内成本也有所增加.

Chien^[9]提出的不考虑公交车内拥挤的传统模型,体现在对等候成本的优化,不能对车内成本进行优化;本次提出的考虑公交车内拥挤的优化模型,能同时优化等候成本和车内成本.结果如图 4 所示.

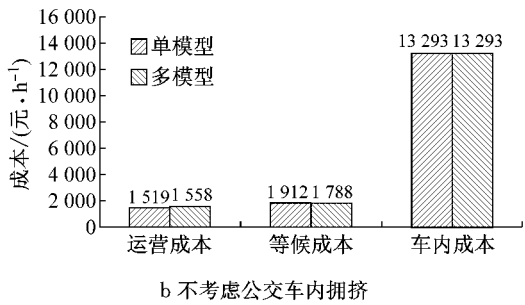


图 4 优化模型和传统模型计算结果对比
Fig.4 Comparison results between the optimization and traditional model

在优化模型不变的情况下,逐渐放大或缩小交通需求量,将原有的矩阵乘以相应的系数进行扩大或缩小,结果表明,优化模型中单模式和多模式均随需求的变化.单模式和多模式对比:当需求矩阵系数小于 0.68 时,单模式的总成本低于多模式,单模式较多模式有较好的优势;当需求矩阵系数大于 0.68 时,单模式的总成本高于多模式,多模式较单模式有较好的优势(图 5).

如表 2 和表 3 所示,对单模式和多模式情况下各 OD 对的出行成本进行细化,易发现多模式较单

表 2 单模式 OD 出行成本矩阵
Tab.2 Single mode OD matrix travel cost

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	3 337.65	3 596.75	1 157.05	382.17
2	0	0	2 342.21	3 497.70	134.68	64.02
3	0	0	0	1 366.29	1 579.82	112.43
4	0	0	0	0	292.78	91.35
5	0	0	0	0	0	20.30
6	0	0	0	0	0	0

模式在 OD 对 2-4(起点为 2,终点为 4)出行成本有明显下降,OD 对 2-3(起点为 2,终点为 3)和 3-4(起

表3 多模式 OD 出行成本矩阵

Tab.3 Multiple mode OD matrix travel cost						
	1	2	3	4	5	6
1	0	0	3 396.55	3 657.57	1 186.33	408.41
2	0	0	2 189.76	2 967.24	157.87	71.52
3	0	0	0	1 152.41	1 597.18	120.53
4	0	0	0	0	297.37	96.45
5	0	0	0	0	0	21.00
6	0	0	0	0	0	0

点为3,终点为4)有适当的下降,其余未覆盖到的OD对成本则均略有上升。

优化模型与传统模型有一个相对较好的优势,能够输出每一个站点上车后在某一站找到座位的概率,将这样的概率表示在图中,纵坐标表示上车的站点,横坐标表示该人群在某一站找到座位的概率大小。不扩大OD交通需求情况下,多模式比单模式找

到座位的概率在局部有所改善,但整体效果不明显(图6)。扩大OD交通需求为原来2倍情况下,多模式比单模式找到座位的概率有明显改善(图7)。

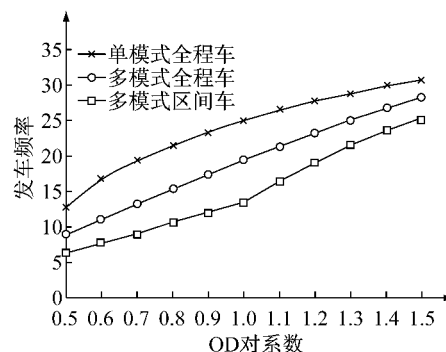


图5 不同交通需求下单模型和多模型的敏感性分析

Fig.5 Sensitivity analysis of the different demand of the single and multiply model

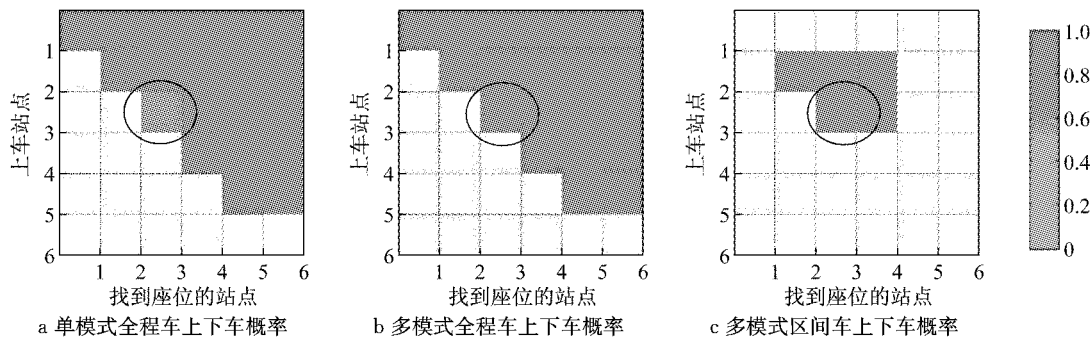


图6 不扩大需求情况下找到座位概率的分布示意图

Fig.6 Probability distribution of finding seats without expanding demand

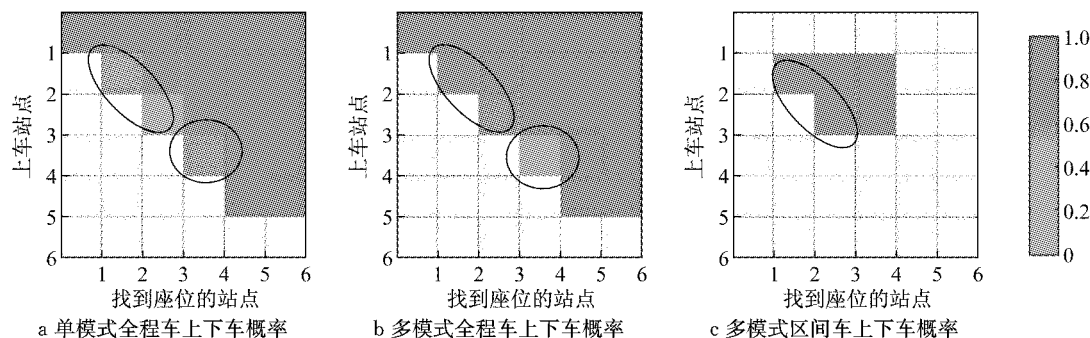


图7 扩大需求2倍情况下找到座位概率的分布示意图

Fig.7 Probability distribution of finding seats with expanding demand

将不同模式的单个车辆运行的路段流量描绘出来,如图8所示。易发现多模式公交在路段流量均衡上明显优于单模式,多模式路段流量集中在(31.13, 61.42),单模式路段流量集中在(26.4, 63.84)。

4 结论

本文在基于公交站点 OD 出行数据,考虑公交

车内拥挤对乘客的影响,构建双层优化模型,并应用算法求解。该方法不仅更能真实地反映乘客的出行成本,同时能够优化公交运营调度系统,对发车频率和车辆座位数提出了新的要求,且提出了上车后何时找到座位的概率的重要计算参数,更加有利于出行者选择公交的决策。

本文提出的公交优化模型,从理论上可以推广到多服务模式公交网络的优化,但实际上由于网络

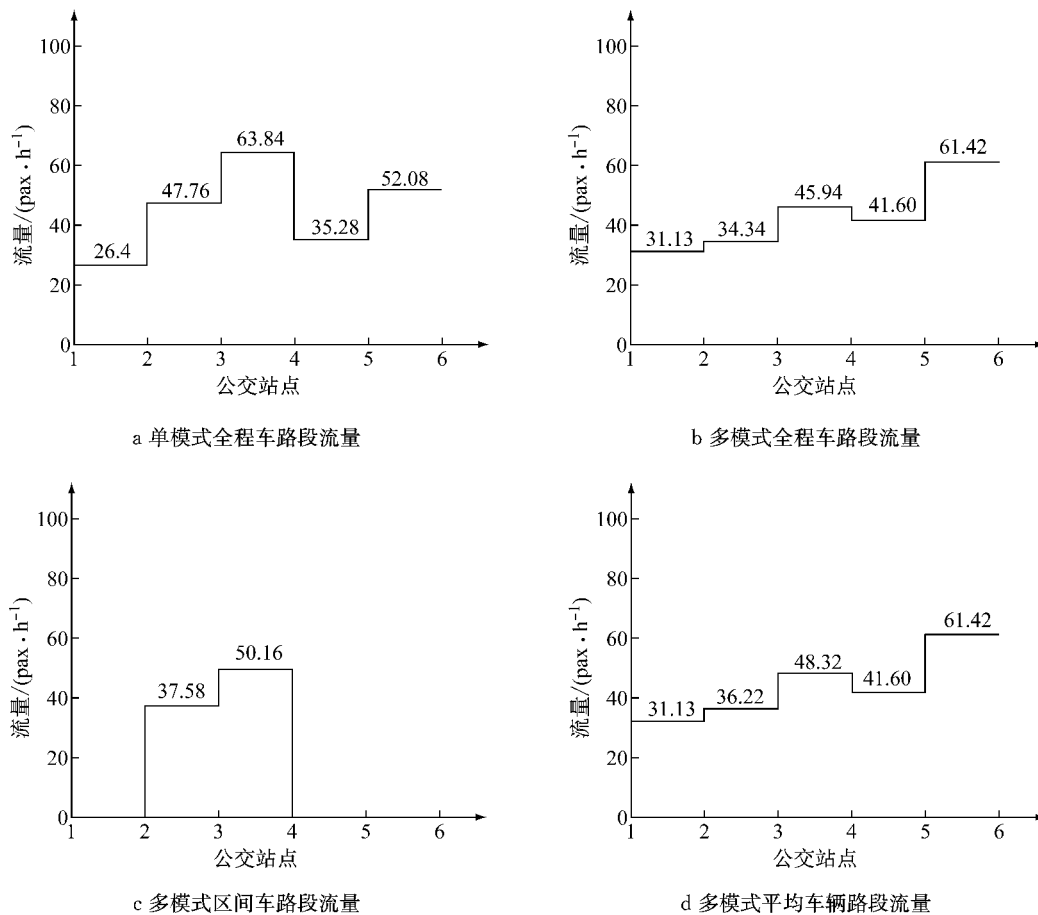


图 8 不同模式的路段流量比较分析图

Fig.8 Different patterns of load volume analysis

问题有一定的复杂性,可能会导致计算过程中收敛于指定线路的最优值而非整个系统的最优值. 同时本文提出模型中利用枚举法解决组合问题,但实际问题中站点数目往往相对较多,模型变得相对复杂,靠枚举法相对困难,进一步的研究工作可以考虑在模型中应用启发式算法来完善解决.

参考文献:

- [1] Furth P G. Short turning on transit routes[J]. Transportation Research Record, 1987, 1108: 42.
- [2] Site P D, Filippi F. Service optimization for bus corridors with short-turn strategies and variable vehicle size [J]. Transportation Research Part A Policy & Practice, 1998, 32 (1):19.
- [3] Homero L, Ricardo G, Juan C M. Choosing the right express services for bus corridor with capacity restrictions [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010, 13(2197):63.
- [4] Leiva C, Muñoz J C, Giesen R, et al. Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2010, 44(10): 1186.
- [5] Tirachini A, Cortés C E, Jara-Díaz S R. Optimal design and benefits of a short turning strategy for a bus corridor [J]. Transportation, 2011, 38(1):169.
- [6] Ceder A, Hassold S, Dano B. Approaching even-load and even-headway transit timetables using different bus sizes[J]. Public Transport, 2013, 5(3):193.
- [7] Larrain H, Muñoz J C, Giesen R. Generation and design heuristics for zonal express services [J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2015, 79: 201.
- [8] Ibarra-Rojas O J, Delgado F, Giesen R, et al. Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2015, 77:38.
- [9] Chien S, Ulusoy Y, Wei C H. Integrated transit services for minimum cost operation considering heterogeneous demand[J]. Transportation Planning and Technology, 2010, 33 (7): 605. doi:10.1080/03081060.2010.512222.