

高峰时段城市轨道交通线路客流协调控制

赵 鹏, 姚向明, 禹丹丹

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 应用数学规划方法构建线路层车站间及时段间协调控制模型, 以乘客延误损失最小化和客运周转量最大化为优化目标, 利用所求解的控流率为限流措施制定提供量化依据. 以北京市轨道交通 5 号线为例, 对输送能力利用率、滞留率、滞留人次三个指标进行控制效果分析, 结果表明该方法能够提高能力利用率, 减少滞留人次, 有效缓解客流需求与运输能力间矛盾.

关键词: 城市轨道交通; 客流控制; 线性规划控制模型; 高峰客流

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

Cooperative Passenger Inflow Control of Urban Mass Transit in Peak Hours

ZHAO Peng, YAO Xiangming, YU Dandan

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A cooperative control model was established based on mathematical programming to minimize the passenger loss delays and maximize their turnover by adopting the flow control rate as the quantitative basis. Then, an empirical analysis was made of Beijing subway Line 5 on the indicators of transport capacity utilization, retention rate and stranded passengers. Results show that this model can effectively improve the transportation capacity utilization, therefore, stranded passengers are reduced, and the contradiction between the passenger flow and the transport capacity is relieved.

Key words: urban rail transit; passenger flow control; linear programming control model; peak flow

矛盾日益突出, 客流拥挤和乘客滞留问题严重, 给运营安全带来极大隐患. 管理部门已采取了一系列措施来保障运营安全, 其中限流(客流控制)已成为一种常用的管理措施. 限流是指为保障客运安全而限制乘客的进站速度^[1], 从而减少单位时间内进站客流量. 2012 年北京常态限流车站约为 32 座, 上海常态限流车站约为 30 座. 限流车站、限流时段、限流强度的设定依据为达到或超过车站客流警戒线(车站承载能力的 70%)^[1], 但该依据笼统且应用效果并不明显.

目前, 城市轨道交通客流控制方面研究相对缺乏, 而且主要集中于大客流情况下车站客流组织. 文献[2]对大客流进行了分类, 从客流预测、车站客流组织、列车运能、票务组织等方面提出了大客流条件下具体运营组织措施, 并以西安地铁 2 号线为背景, 构建了地铁车站发生大客流的组织管理模式. 文献[3]以广州地铁 1 和 2 号线为背景, 从客流分析、行车组织、客运组织、票务组织等方面提出了城市轨道交通应对高峰客流的运营组织办法. 文献[4]结合北京奥运赛事引发的大客流问题进行了相关研究, 从突发客流预测、运营组织以及运输能力角度详细分析了突发大客流情况下运输组织协调过程, 并提出了应对措施. 文献[5]对缓解城市轨道交通运力与客流需求矛盾而采取的客流控制措施及计算方法进行了简要介绍, 指出客流控制应从车站级、线路级、网络级三层控制模式予以实施, 但对于具体控制措施的制定及计算方法尚未完善.

车站限流问题属于运输系统流入控制的研究范围, 需从需求和能力协调的角度制定限流措施, 其与城市快速路匝道流入控制相似, 后者国内外已进行了较深入研究^[6-7]. 匝道流入控制模型中以主线上各区间的流入交通量不超过通行能力为约束的线性规划方法称为线性规划(linear programming, LP)控

城市轨道交通高峰时段客流需求量大、到达时间集中且方向性明显, 导致需求与运输能力不匹配

收稿日期: 2013-11-02

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20120009110016); 中央高校基本科研业务费专项资金(T13JB00340); 国家自然科学基金(51278030)

第一作者: 赵 鹏(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: pzhaop@bjtu.edu.cn

制方法^[8]. 车站限流与快速路匝道流入控制具有一定的相似性,但也存在较大不同. 轨道交通乘客在路网上的移动载体为列车,列车区间运行状态不因列车内客流拥挤而改变,输送堵塞问题主要体现为乘客站台滞留. 本文结合城市轨道交通特点,借鉴LP控制方法的思想,利用数学规划方法构建以车站进站量为变量的准动态控制模型. 通过协调各车站各时段进站量,达到缓解区间输送压力和有效分配线路运输能力的目的,为限流措施的制定提供量化依据.

1 协调控制模型构建

1.1 模型框架构建

城市轨道交通客流具有动态变化的特点. 首先,客流需求量及起讫点(origin-destination, OD)分布结构随时间变化. 其次,客流在路网上的时空分布状态不断变化,表现为客流自进站到通过各个区间的时间不同. 为体现控制模型的动态性,根据实际需要,将高峰时段离散化为若干控制时间段,在每个控制时间段内采用LP控制方法,求得车站最佳进站量. 最佳进站量是指满足特定目标条件下各车站在单位控制时间段内客流流入量,该部分客流能够顺利上车,不产生乘客站台滞留现象,也可以理解为最佳上车量. 在求解最佳进站量的基础上,结合各车站基础设施(如站台容纳能力、通道通过能力等)及外部交通环境(如站外空间、是否具有平行公交线路等),建立最佳进站量和客流需求量间的关系,从而制定恰当的限流措施来调节乘客进站速度. 本文构建模型的整体框架如图1所示.

由于车站间关联性以及客流在路网上的动态传播特性,某一时段进入车站的客流通过下游各区间的时间不同,因此本文结合客流特征及列车运行过程,构造了客流传播影响系数,用于描述客流在路网上的动态移动过程.

1.2 模型假定

为构建模型,本文对相关影响因素作如下假设: ①控制时段内客流需求量及OD结构已知. 由于早晚高峰时段客流主要为通勤乘客,结构相对稳定,通过历史数据分析及预测可得到较高精度的客流OD信息. ②列车运行秩序良好,不存在严重晚点及突发事件. 列车为乘客移动的载体,列车流状态对客流状态有很大影响,假定研究时段内列车按既定运行图运行. ③出站客流能够快速出站,对站台及站厅客流

影响较小,模型中忽略出站客流影响. ④控制时间段内进站客流状态稳定,视为均匀分布. ⑤在满足车站设计通过能力条件下,客流能够顺畅进入站台候车. 该模型主要从线路的角度考虑车站间协调控制,因此弱化站内基础设施通过能力的影响. ⑥当客流需求不能满足时,假定乘客不会换乘其他交通方式,即客流需求总量保持不变.

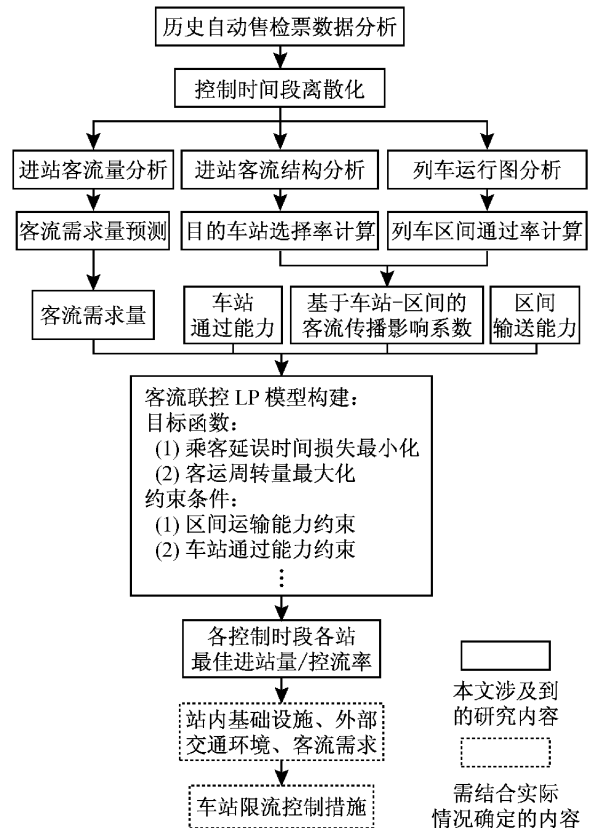


图1 客流控制模型框架

Fig.1 Framework of inflow control model

1.3 因素模型化

(1) 客流需求约束

控制时段 t 内的实际进站客流需求包含新到达客流和前一时段滞留客流两部分,客流需求量、滞留客流量、第一控制时段客流需求量计算式如下所示:

$$U_m^{(t)} = D_m^{(t)} + S_m^{(t-1)}, \quad \forall t \in T \text{ 且 } t > 1, m \in M \quad (1)$$

$$S_m^{(t-1)} = U_m^{(t-1)} - \bar{U}_m^{(t-1)}, \quad \forall t \in T \text{ 且 } t > 1, m \in M \quad (2)$$

$$U_m^{(t)} = D_m^{(t)}, \quad t = 1, \forall m \in M \quad (3)$$

式中: $U_m^{(t)}$ 为车站 m 在 t 时段的实际客流量, $D_m^{(t)}$ 为车站 m 在 t 时段内新到达的客流量, $\bar{U}_m^{(t-1)}$ 为车站 m 在 $(t-1)$ 时段的最佳进站客流量, $S_m^{(t-1)}$ 为车站 m 在 $(t-1)$ 时段的滞留量, T 为控制时段集合, M

为车站集合.

最佳进站客流量 $\bar{U}_m^{(t)}$ 首先需满足客流需求上限约束, 即最佳进站客流量不能超过实际客流需求量. 同时, 在实际运营中非异常情况(突发事件发生)下不会采取封站措施, 即最佳进站客流量需满足最低进站客流量要求, 约束条件如下所示:

$$\bar{U}_m^{(t)} \leq U_m^{(t)}, \quad \forall t \in T, m \in M \quad (4)$$

$$\bar{U}_m^{(t)} \geq U_{m,\min}^{(t)} = \varphi U_m^{(t)}, \quad \forall t \in T, m \in M \quad (5)$$

式中: $U_{m,\min}^{(t)}$ 为车站最低进站客流量, 采用最低进站比例系数 φ 来计算最低进站客流量.

(2) 区间输送能力约束

区间输送能力约束是模型的主要约束, 超出区间输送能力时即形成区间输送堵塞(表现为车站乘客滞留). 区间 l 输送能力约束为

$$C_l^{(t)} = \sum_{k \in T} \sum_{m \in M} \bar{U}_m^{(k)} Q_{m,l}^{(k,t)} \leq C_{l,\max}^{(t)} \Delta \tau \gamma, \quad k \leq t, \forall t \in T, l \in L \quad (6)$$

$$C_{l,\max}^{(t)} = n_{l,\max}^{(t)} \beta \alpha, \quad \forall l \in L, t \in T \quad (7)$$

$$n_{l,\max}^{(t)} = \min\{n_{\text{线路}}^{(t)}, n_{\text{折返}}^{(t)}, n_{\text{车辆}}^{(t)}, n_{\text{供电}}^{(t)}\}, \quad \forall l \in L, t \in T \quad (8)$$

式中: $C_l^{(t)}$ 为区间 l 在时段 t 内的通过客流量; $Q_{m,l}^{(k,t)}$ 为时段 k 由车站 m 进站的客流在时段 t 内通过区间 l 的流量与时段 k 车站 m 总进站客流量的比值; $C_{l,\max}^{(t)}$ 为区间 l 在时段 t 内的输送能力; $\Delta \tau$ 为控制时段时间长度; γ 为列车满载系数, 一般不超过 140%; L 为区间集合; $n_{l,\max}^{(t)}$ 为区间 l 在时段 t 内的最大通过能力; $n_{\text{线路}}^{(t)}$, $n_{\text{折返}}^{(t)}$, $n_{\text{车辆}}^{(t)}$, $n_{\text{供电}}^{(t)}$ 分别为线路、折返设备、车辆段设备及牵引供电设备所对应的通过能力; β 为列车编组数; α 为车辆定员数.

(3) 车站基础设施能力约束

单位时间内容许进站客流量不仅与线路输送能力有关, 还与车站基础设施通过能力相关. 影响车站通过能力的因素主要包括售检票设施能力、闸机通过能力、通道通过能力、楼扶梯通过能力、车站承载能力等. 本文主要从车站间协调角度考虑进站客流控制, 因此从站内基础设施通过能力约束弱化角度, 仅考虑满足车站设计通过能力约束. 车站基础设施能力约束模型如下:

$$\bar{U}_m^{(t)} \leq U_{m,\max} (1 - \theta_m) \Delta \tau, \quad \forall t \in T, m \in M \quad (9)$$

式中: $U_{m,\max}$ 为车站 m 在单位时间内的设计通过能力; θ_m 为保障运营安全及其他因素而设定的通过能力折减系数, 在此设为 0.2.

(4) 客流传播影响系数 $Q_{m,l}^{(k,t)}$

客流传播影响系数用于刻画客流在线路上的动

态传播过程, 含义为车站进站客流在后续不同时段内会分别通过哪些区间以及通过各区间上的客流量与总进站客流量的比例. 该系数体现了客流在路网上的动态移动过程, 也体现了客流对区间输送能力的占用情况, 其随着客流结构及列车运行过程而动态变化, 计算表达式如下所示:

$$Q_{m,l}^{(k,t)} = \sum_{v \in M} (P_{m,v}^{(k)} T_{m,l}^{(k,t)} \delta_{m,v}^{(l)}), \quad k \leq t, \forall m \in M, l \in L \quad (10)$$

式中: $P_{m,v}^{(k)}$ 为时段 k 内进入车站 m 的客流中去往车站 v 的比例, 即目的车站选择率; $T_{m,l}^{(k,t)}$ 为列车区间通过率, 描述时段 k 内经过车站 m 的列车在时段 t 内通过区间 l 的比例, 后续详细介绍; $\delta_{m,v}^{(l)}$ 描述车站 m 和 v 间是否经过区间 l , 为 0-1 变量.

目的车站选择率是从量值的角度考虑, 表示进站客流中选择某站为目的车站的比例, 结合客流总量即可计算流经各区间的客流量. 列车区间通过率则从时间的角度考虑, 反映了列车运行速度的快慢. 乘客出行以列车为载体, 因此列车区间通过率反映了客流在路网上的移动速度. 由于列车对运行区间的独占性使得某一时刻仅有一列车通过区间(闭塞区间), 为准确描述列车区间通过率, 应将控制时段限定在发车间隔内. 但控制时段越短, 进站客流规律越不明显, 而在实际运营过程中, 也难以在很短的时间内进行客流控制措施的改变. 在此采取近似策略计算列车区间通过率, 以时段 k (时段长度大于发车间隔) 内通过 m 站的列车数(该部分列车称为目标列车, 对于时段 k 内进站的客流出行具有实际意义)与时段 t 内通过区间 l 的列车数的比值来表示, 具体计算方法如下所示:

$$T_{m,l}^{(k,t)} = \frac{R_{m,l,\text{pass}}^{(k,t)}}{R_{m,\text{all}}^{(k)}}, \quad k \leq t, \forall l \in L, m \in M \quad (11)$$

式中: $R_{m,\text{all}}^{(k)}$ 为时段 k 内通过 m 站的目标列车数, 如图 2 中粗线表示; $R_{m,l,\text{pass}}^{(k,t)}$ 为目标列车中在时段 t 内通过区间 l 的列车数. 列车区间通过率满足如下约束条件:

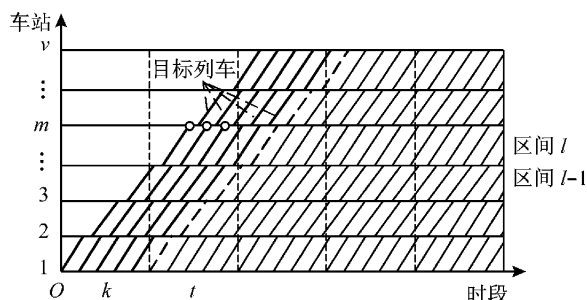


图 2 列车区间通过率计算示意图

Fig. 2 Schematic map of the passing rate calculation

$$\sum_{t \in T} T_{m,l}^{(k,t)} = 1, \quad k \leq t, \forall m \in M, l \in L \quad (12)$$

(5) 车站控流率

控流方案制定时需选择控流站点,确定控流时段及控流强度.定义车站控流率来量化描述控流强度,表示因控流而受延误的客流量与实际客流需求量的比值,也可理解为车站不能满足的客流需求与实际需求的比值.至于控流站点及控流时间可根据分时段车站控流率计算结果确定.车站控流率 $\omega_m^{(t)}$ 计算表达式如下所示:

$$\omega_m^{(t)} = (U_m^{(t)} - \bar{U}_m^{(t)}) / U_m^{(t)}, \quad \forall m \in M, t \in T \quad (13)$$

2 客流协调控制模型

从车站协调的角度对进站客流进行控制的目的除了预防区间输送堵塞外,还包括提高城市轨道交通的社会效益.因此,可从多个角度构建控制目标,如运营企业收益最大、客运周转量最大、滞留人次最少、乘客延误时间损失最小、运输效益最大等,在此仅构建以乘客总延误时间最小和客运周转量最大的多目标规划模型,如下所示:

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} (U_m^{(t)} - \bar{U}_m^{(t)}) \Delta \tau \quad (14)$$

$$\max \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} C_l^{(t)} h_l \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k \in T} \sum_{m \in M} \bar{U}_m^{(k)} Q_{m,l}^{(k,t)} \leq C_{l,\max}^{(t)} \Delta \tau \gamma, \quad k \leq t, \forall t \in T, l \in L \quad (16)$$

$$U_{m,\min}^{(t)} \leq \bar{U}_m^{(t)} \leq U_m^{(t)}, \quad \forall t \in T, m \in M \quad (17)$$

$$\bar{U}_m^{(t)} \leq U_{m,\max} (1 - \theta_m) \Delta \tau, \quad \forall t \in T, m \in M \quad (18)$$

$$U_m^{(t)} = (U_m^{(t-1)} - \bar{U}_m^{(t-1)}) + D_m^{(t)}, \quad \forall t \in T \text{ 且 } t > 1, \forall m \in M \quad (19)$$

$$U_m^{(t)} = D_m^{(t)}, \quad t = 1, \forall m \in M \quad (20)$$

$$C_l^{(t)} = \sum_{k \in T} \sum_{m \in M} \bar{U}_m^{(k)} Q_{m,l}^{(k,t)}, \quad k \leq t, \forall l \in L \quad (21)$$

式中: h_l 为区间长度,即相邻车站间距离.式(14)为乘客总延误时间最小化目标函数,式(15)为客运周转量最大化目标函数,式(16)为区间输送能力约束,式(17)为客流需求约束,式(18)为车站通过能力基本约束,式(19)为客流量计算关系式,式(20)为第一控制时段客流量表达式,式(21)为区间通过量计算表达式.

模型不仅考虑了线路内车站间的协调性,同时对控制时段间客流相互影响也进行了考虑,协调性体现在车站协调和时段协调两个方面,从而保证在整个高峰时段达到理想运输状态.该模型为多目标线性规划模型,可通过理想点法等方法转化为单目标模型,利用相关优化软件即可快速求解,在此不再描述求解算法.在应用该模型时参数的计算过程较为复杂,尤其是客流传播影响系数 $Q_{m,l}^{(k,t)}$,需借助编程手段对客流 OD 信息和列车时刻表数据进行分析,推算出各车站关于区间的客流传播影响系数.

3 案例分析

3.1 基本信息

截至 2012 年末,5 号线是北京市轨道网络中惟一的一条南北贯穿的线路,潮汐客流特征十分明显,同时也是常态限流车站数(共 14 座)最多的线路,几乎对一半车站进行了限流,因此选取其作为研究对象进行案例分析.

城市轨道交通列车分上下行独立运行,单方向的计算不会影响线路整体分析结果,在此仅对下行方向(见图 3)进行分析,研究时段为早高峰时段(7:00—9:00).为减少换乘客流影响,将换乘客流转换为本线客流(本线进他线的客流视为换乘站出站客流,他线进本线的客流视为换乘站进站客流).

以 2012 年 8 月某工作日自动售检票系统(automatic fare collection, AFC)数据为基础数据进行分析.为获取本线客流信息,需对 AFC 数据进行

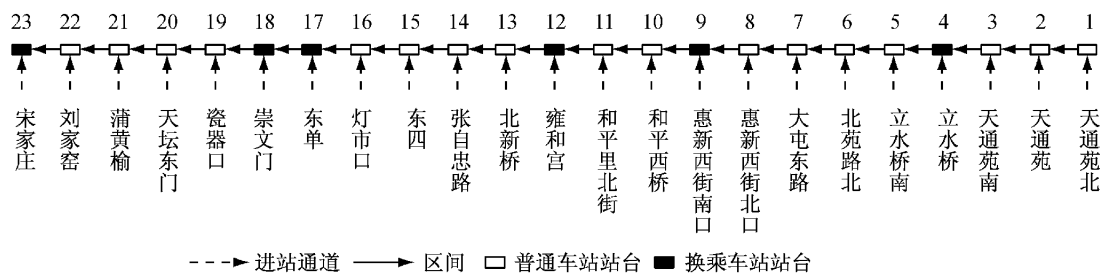


图3 5号线下行线路简化示意图

Fig.3 Schematic map of Line 5 (down direction)

处理,处理过程中对起讫点均位于线路内的 AFC 记录可直接确定为本线乘客记录,对于起点或终点仅含一方面的 AFC 记录则采用径路选择模型确定合适径路,再根据起点与换乘点间的行程时间将跨线 AFC 记录转换成本线 AFC 记录,这样就可以统计得到线路 OD 矩阵及进站客流需求量。另外,由于该数据为已实施限流后的实际进站客流量,因此需对实际客流需求进行预测,本文采用放大系数的方法进行实际客流需求预测(已限流车站客流放大系数为 1.2),时变客流需求量预测结果见表 1,相关模型

参数见表 2。

表 1 为分时段各车站客流需求量。从表 1 可以看出,各站客流需求量严重不均衡,天通苑和天通苑北站客流需求量巨大;不同时段间客流需求量也存在较大差异。该特点极易导致列车在前方区间运能被快速占用,后方车站乘客大量滞留,当列车通过客流断面分解点后(车站编号为 9,车站编号如图 3 所示)运能快速释放,各区间运能利用严重不均衡。对于市郊线路以及连接大型居住小区的线路均具有该客流特征,给运输组织带来极大不便。

表 1 车站客流需求量预测值

Tab.1 Forecast of passenger demand at stations

车站编号	时段								人
	7:00—7:15	7:15—7:30	7:30—7:45	7:45—8:00	8:00—8:15	8:15—8:30	8:30—8:45	8:45—9:00	
1	2 853	2 964	3 012	3 074	2 742	2 261	2 182	2 042	
2	2 601	3 406	3 666	3 745	3 630	3 197	2 661	1 974	
3	903	1 044	1 295	1 416	1 442	1 036	934	671	
4	1 033	1 430	1 710	2 080	1 785	1 419	1 214	979	
5	690	799	798	856	719	605	586	441	
6	404	516	500	513	421	477	422	386	
7	398	458	542	628	623	636	504	518	
8	436	650	657	732	774	740	658	430	
9	880	1 452	1 886	2 670	3 062	3 276	3 186	2 680	
10	211	321	479	481	439	464	395	242	
11	166	202	231	282	307	343	312	286	
12	102	162	252	246	250	156	188	142	
13	56	76	80	82	120	92	99	53	
14	72	58	101	137	136	111	87	76	
15	63	76	82	102	139	119	98	104	
16	46	58	82	63	96	78	63	40	
17	736	1 146	1 206	1 378	1 432	1 284	1 166	854	
18	696	718	822	914	770	712	630	572	
19	50	62	108	78	84	50	34	12	
20	32	40	68	62	106	50	42	36	
21	86	126	154	132	176	128	76	38	
22	198	266	356	322	308	178	134	86	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	

表 2 模型相关参数

Tab.2 Model parameters

参数	数值	说明
发车时间间隔/s	170	采用 5 号线最短发车时间间隔,计算线路通过能力
列车定员/人	1 424	列车标准载荷(B 型车六节编组)
满载系数/%	130	列车最大承载人数与列车定员的比值
断面初始客流量/人	2 300	为减少 7:00 以前客流的影响,初始值设为输送能力的 30%
控制时段	7:00—9:00	研究时段为早高峰时段
单个控制时段长度/min	15	以 15 min 为最小控制时段长度
车站通过能力/(人·h ⁻¹)	24 000	单位时间车站设计进站通过能力
区间输送能力/(人·h ⁻¹)	38 875	根据公式计算理论输送能力
最小进站量比例/%	50	非异常事件下车站应满足的最小进站比例,用于最小进站需求量计算

客流传播影响系数 $Q_{m,i}^{(k,p)}$ 不仅体现了客流在路网上的动态移动过程,也体现了客流对区间输送能力的占用情况,是模型中最重要的参数,该系数需借

助编程手段加以推算。首先通过 OD 信息计算各车站进站客流的目的车站选择率 $P_{m,v}^{(k)}$,然后对列车时刻表(本算例中采用等间隔平行运行图)分析得到列

车区间通过率 $T_{m,l}^{(k,l)}$,最后结合车站-区间关联系数 $\delta_{m,v}^{(l)}$ 即可推算出在不同时段各车站关于区间的客流传播影响系数.客流传播影响系数部分计算结果如表3所示.

表3 客流传播影响系数计算结果

Tab.3 The calculated passenger impact factors

时段 k	时段 t	车站 m	区间 l	影响系数 Q
1	1	1	1	0.833 333
1	1	1	2	0.666 666
1	1	1	3	0.499 999
1	1	1	4	0.250 757
1	1	1	5	0.083 750
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$k(k \leq t)$	t	m	l	Q

3.2 结果分析

采用数学优化软件 Lingo 对所构建模型进行求解,得到各车站分时段最佳进站客流量及车站控流率.本文所定义的控流率(见式(13))为控制时段内不能满足的客流需求与实际客流需求的比值.为便于结果分析,选取区间运输能力平均利用率、平均滞留率和滞留人次三个指标对协调控制和不采取协调控制措施两种情况进行对比分析.其中,不采取协调控制措施指仅满足区间运输能力约束条件下乘客按优先权乘坐(前方车站客流和早到达客流具有优先权),求解时通过赋予车站权重(前方车站权重重大),

采用逐次递推方式即可求解各区间通过量客流及车站滞留客流量;协调控制措施则考虑了前后车站间的协调,还考虑了前后控制时段的影响,以达到预防区间输送堵塞为目的,使交通系统在一定时期内(高峰时段)达到理想运输状态.因此,在模型求解时需对八个控制时段同时进行求解,而不采用逐次递推的求解方式.

表4为计算得到的车站控流率.首先,从控流车站数来看,5号线下行方向应选择的控流车站为九座,计算结果同实际限流站点基本一致.虽然高峰时段内立水桥南、北苑路北、大屯路东和惠新西街北口站下行方向客流需求总量均不超过6 000人,但由于天通苑小区客流过于旺盛,导致列车运能很快被占用,后方车站乘客难以快速上车,也不得不对这些车站进行适当控流,为“受迫”控流策略.其次,从控流时间来看,主要集中在7:00—8:30间,随着高峰后期客流量的减少,部分车站可以降低或解除限流措施.再者,从控流强度来看,由于模型中设定各车站应满足的最低客流需求为实际需求的50%,因此最大控流率为50%,可以看出天通苑北、天通苑等多个车站达到最大控流率,说明这些车站客流压力较大.从平均控流率来看(见图4),天通苑站和惠新西街南口站控流强度最大,相比之下大屯路东和惠新西街北口站客流组织压力较小.

表4 车站分时段控流率

Tab.4 Time-dependent inflow control rate

%

车站	时段							
	7:00—7:15	7:15—7:30	7:30—7:45	7:45—8:00	8:00—8:15	8:15—8:30	8:30—8:45	8:45—9:00
天通苑北	50	50	50	39	26	13	—	—
天通苑	48	50	43	50	50	30	—	—
天通苑南	33	50	50	42	20	16	10	8
立水桥	40	10	33	24	30	50	36	18
立水桥南	36	42	42	50	50	26	—	—
北苑路北	30	43	50	38	32	34	23	—
大屯路东	15	17	20	24	23	29	—	—
惠新西街北口	10	15	15	17	40	29	—	—
惠新西街南口	21	33	43	50	42	34	32	20

注:“—”表示车站控流率为零,即无需控流.

图5给出了高峰时段区间输送能力平均利用率.可以看出,协调控制策略能够一定程度上提高区间输送能力平均利用率,特别是惠新西街南口站(车站编号9)后方的区间.从表1可以看出,惠新西街南口站处于客流断面分界点,如若不采取协调控制措施,会导致车辆在后方区间处于低负荷运行状态,同时也说明包含周转量为目标的协调控制能够提高区间运能利用率.

滞留率为滞留量与客流需求量的比值,滞留率越大表示客流需求量与运输能力供给矛盾越突出,车站客运组织压力越大.滞留率与控流率含义相似,控流可以理解为人为控制条件下的乘客滞留,因此在不进行协调控制时乘客滞留采用滞留率刻画,协同控制时采用控流率予以刻画,图4所示的车站平均控流率与图6所示的车站滞留率(实线表示)所对应的值相同.

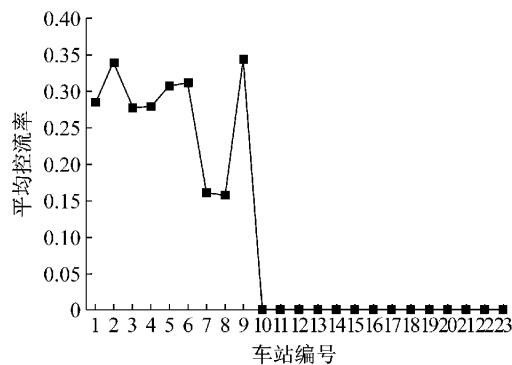


图 4 车站平均控流率

Fig. 4 Average inflow control rate of stations

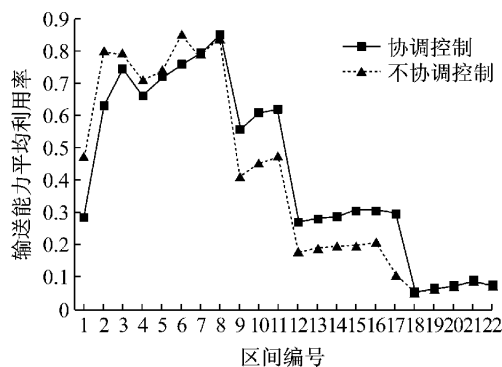


图 5 区间输送能力平均利用率

Fig. 5 Average utilization of section transport capacity

图 6 给出了高峰时段车站平均滞留率. 可以看出, 协调控制时能够有效降低车站滞留率, 且使各站客流压力处于相对均衡的状态. 通过车站间的协调控制, 能够将拥挤压力分散至多个车站, 降低单个车站过度拥挤带来的安全风险. 对比不采取控流措施, 协调控制对端点车站(编号 1 和 2)进行了较大强度控流, 这样可以大大缓解后方车站的滞留现象, 说明对端点客流量大的车站进行有效控制对保障线路运输安全具有重要作用, 实际中应积极采用.

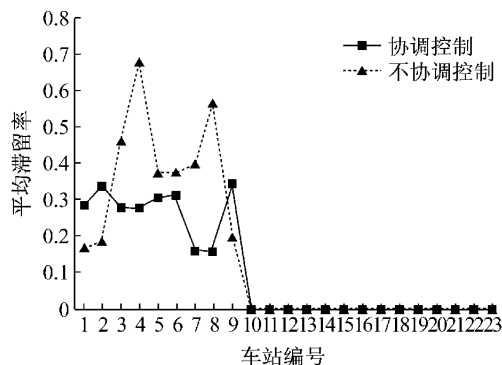


图 6 车站平均滞留率

Fig. 6 Average passenger retention rate of stations

仅从滞留率的角度并不能完全反映车站客流压力, 还需考虑到客流需求总量影响, 如中间站虽然滞留率较高, 但客流需求较小使得滞留乘客并不多, 车站客流压力亦较小. 图 7 给出了高峰时段内各车站滞留总人次, 结合滞留率和滞留人次来看, 天通苑北、天通苑、惠新西街南口站客流压力最大, 其中惠新西街南口站为换乘站, 由于换乘客流为网内客流, 其限流难度将更大.

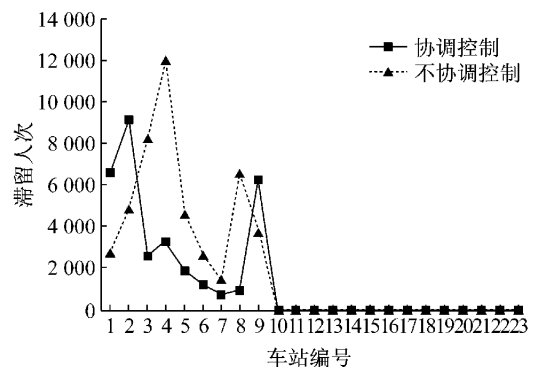


图 7 车站滞留人次

Fig. 7 Numbers of stranded passengers

换乘客流为网内客流, 倘若在换乘站内部进行限流, 容易造成客流站内淤积, 危险性较大. 因此, 实际限流中应尽可能避免站内控流, 由于模型中将跨线客流转化为本线客流, 计算时难以对换乘站的换乘流和进站流予以区分, 考虑到换乘流控流难度, 对换乘站进行控流强度设定时应在计算结果的基础上适当调整.

4 结语

本文针对城市轨道交通早晚高峰客流控制问题, 利用数学规划方法构建了协调客流控制模型. 案例结果表明, 所提出的控制方法能够有效提高区间输送能力利用率, 缓解车站客流滞留现象, 均衡车站客流压力, 从而保障城市轨道交通运营安全. 所构建模型以线性规划方法为基础, 具有求解容易的特点, 对于早晚高峰客流量大、客流方向性明显、客流状态稳定的线路具有较好适用性.

在计算车站最佳进站量及控流率基础上, 结合车站内基础设施通过能力及外部交通环境, 即可确定具体限流措施, 如设置围栏长度、宽度及分批放行时间周期等.

(下转第 1443 页)