【交通物流 / Transportation Logistics】

城轨车站大客流条件下列车运行调整

周菁楠¹, 李 伟², 罗 钦²

1) 深圳市规划国土发展研究中心, 广东深圳 518040; 2) 深圳技术大学城市交通与物流学院, 广东深圳 518118

摘 要: 为快速疏散城轨大客流下的车站集聚客流, 提出调整部分列车停站方案的行车调整方法, 通过跳停大客流车站的前序车站以保留列车的载客能力, 实现线路上发生大客流时的乘客快速疏散. 以乘客平均等待周期最短为优化目标, 建立线路突发大客流列车合理停站调整优化模型, 并设计遗传算法进行求解, 实现快速合理安排列车停站方案. 以中国深圳市地铁前海站发生大客流的情况进行案例分析, 验证所提出模型能够达到均衡乘客等待周期的目的, 提高轨道交通车站的疏散效率, 从而保证轨道交通系统的正常运营秩序.

关键词: 交通运输工程; 城市轨道交通; 大客流; 运行调整; 列车跳停; 遗传算法

中图分类号: U292.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.06617

Adjustment for train operation under the condition of mass passenger flow in urban rail transit

ZHOU Jingnan¹, LI Wei², and LUO Qin²

1) Shenzhen Planning & Land Development Research Center, Shenzhen 518040, Guangdong Province, P. R. China

2) College of Urban Transportation and Logistics, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: To quickly evacuate the delayed passengers in emergencies, this paper proposes an adjustment method for metro train operation to improve the stop schedules for some trains, and the train capacity can be maintained by skip-stop of the front sequence station of stations with massive passenger flow. In order to minimize the average waiting time for passengers, this paper establishes a reasonable train collaborative disposal model for trains with mass passenger flow and develops a genetic algorithm to solve this problem so as to achieve a rapid and reasonable train stop schedule plan. Finally, an event of mass passenger flow caused by a concert at Houhai station of Shenzhen Metro is used as a study case which proves that the proposed model can shorten the average waiting time of passengers in the emergency. Overall, the proposed method can improve the evacuation efficiency of rail transit stations and ensure the normal operation order of rail transit system when a mass passenger flow occurs.

Key words: transportation engineering; urban rail transit; mass passenger flow; train operation adjustment; skip-stop train; genetic algorithm

Received: 2019-08-07; **Accepted:** 2019-11-26

Foundation: National Social Science Foundation of China (20BGL301); Ordinary University Innovation Project of Guangdong Province (2018KTSCX350)

Corresponding author: Professor LUO Qin. E-mail: luoqin@sztu.edu.cn

Citation: ZHOU Jingnan, LI Wei, LUO Qin. Adjustment for train operation under the condition of mass passenger flow in urban rail transit [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(6): 617-622. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

城市轨道交通具有运输能力大、运行平稳、舒适、安全、准点及快捷的优势,吸引了大量城市交通客运需求,能够有效缓解城市内交通压力.但经济高速发展使居民的物质文化需求水平不断提升,在城市内以体育赛事或演唱会等为代表的大型活动举办日益频繁,不可避免引发大客流集聚和疏散.作为城市运输主体,城市轨道交通将不可避免的受到大客流冲击,因此,给轨道交通的正常运营带来较大压力.当大客流事件发生时,原有列车运行计划将无法充分满足客运需求,导致乘客在车站内部发生拥挤,同时站外乘客无限制进站,也会进一步增加车站的安全隐患.如何合理配置运力,有效处置突发大客流,恢复轨道交通系统运营秩序,保证系统安全已成为亟待解决的一大问题.

现有处置方案从客运组织管理、车站限流及列车运行调整方面进行孤立研究.客流组织管理与乘客出行行为、网络设施设备的布局和能力有关,既有研究方法主要集中在宏观和微观两个层面,宏观层面研究成果包括大客流方案编制^[1]和大客流组织管理^[2];在微观层面主要集中在车站内部的微观行为和微观模型分析(如社会力学模型^[3]、元胞自动机模型^[4]及多智能体模型^[5]等).针对车站的限流,目前各个城市采用的限流措施还只是基于历史客流的分析及经验总结^[6].由于无法实时评估网络客流变化及相互影响,目前的限流措施在操作上比较简单机械,仅能通过定性控制实现,也很少与列车的运行调整形成互动联合控制.列车运行调整以计划运行图为基础,当发生较短时间延误时,列车控制系统可以利用缓冲时间,通过加速运行及缩短停站时间的方法自动调整列车^[7-8].常用的列车调整措施包括加车、扣车^[9]、列车甩站通过^[10]、改变运行交路^[11]及备车投用^[12]等.但发生长时间延误时,调度人员主要还是基于经验与一定的调度规则进行人工调度.

因此,如何通过合理的列车停站方案优化,使列车在大客流站台前序车站部分跳停,保留列车载客能力,实现线路上大客流状态下的乘客快速疏散,并最小化乘客平均等待周期,保证乘客服务水平成为目前的研究重点.为保证运营安全,快速疏散突发大客流车站的集聚客流,从全线角度出发,综合整条线路的乘客需求,本研究通过调整列车运行计划,使列车选择性地不停站直接通过,以减少突发大客流车站乘客的候车客流量,达到均衡全线乘客等待周期的目的.

<http://journal.szu.edu.cn>

1 车站大客流列车协同处置模型

本研究以乘客平均等待周期最短为优化目标,建立线路突发大客流列车合理停站处置模型,通过合理安排列车停站方案,实现客流快速输送,减少乘客在车站内的留乘.

1.1 模型假设

假设 1 研究时段内的线路列车行车间隔、列车区间运行时间、列车停站时间及车站站台最大客流量等参数为已知量.

假设 2 乘客上车遵循先到先行原则,即先进站的乘客先乘车,滞留乘客在下次列车到达时优先乘车.

1.2 变量定义

为便于叙述模型构造,本研究对变量进行如下定义: $P_{i,j}^d$ 为列车 j 在车站 i 的候车客流量; $P_{i,j}^{\text{new}}$ 为列车 j 在车站 i 的新进站候车客流量; $P_{i,j}^b$ 为列车 j 在车站 i 的实际上车客流量; $P_{i,j}^{q_k}$ 为在换乘车站 i 至 q_k 线路站台,等候该线路方向的 j 次列车的换入客流量; $x_{i,j}^{\text{stop}}$ 为布尔变量,也是模型的决策变量,当列车 j 在车站 i 停车时, $x_{i,j}^{\text{stop}} = 1$,不停车直接通过时, $x_{i,j}^{\text{stop}} = 0$; $P_{i,j}^{\text{re}}$ 为列车 j 在车站 i 的剩余容量; $P_{i,j}^a$ 为列车 j 在车站 i 的实际下车客流量; $P_{i,j}^c$ 为列车 j 在车站 i 的新到站最大载客量; $x_{i,j}^b$ 为布尔变量,当列车 j 在车站 i 的剩余容量足够容纳前行列车全部滞留客流时, $x_{i,j}^b = 1$,反之 $x_{i,j}^b = 0$; $T_{i,j}^{\text{dp}}$ 为列车 j 离开车站 i 的时刻; T_i^{sec} 为列车从车站 i 开往下一站的区间运行时分; T_i^{stop} 为列车在车站 i 的停站时分; $h_{\min}$ 为最小追踪安全间隔.

1.3 建模思路

1.3.1 客流需求

在构建模型前,需要确定部分客流需求作为输入条件,如 $P_{i,j}^{\text{new}}$ 、 $P_{i,j}^b$ 、 $P_{i,j}^{q_k}$ 及 $P_{i,j}^a$.通常计算流程如图 1.

由于列车容量有限,当列车剩余容量不能满足乘车需求时,本来要乘坐该次列车的乘客不得不滞留至少 1 个周期等待后续列车.等待过程中又有新的进站客流需求,因此,每次列车的客流需求可表示为

$$P_{i,j}^d = \begin{cases} P_{i,j}^{\text{new}}, & j = 1 \\ \sum_{k=1}^{j-1} [P_{i,k}^d - P_{i,k}^b] + P_{i,j}^{\text{new}}, & j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

图1 输入客流数据计算流程

Fig. 1 Calculation process of input passenger flow

其中, $[P_{i,k}^d - P_{i,k}^b]$ 为不小于0 的数值.

若该站为换乘站, 假设换乘车站有 q_n 条线路, 每条线路都有上行和下行两个方向, 则到目标站台的输送线路方向为 $2(q_n - 1)$ 个, 因此, 研究时段内目标站台的客流需求为

$$P_{i,j}^d = \begin{cases} \sum_{k=1}^{2(q_n-1)} P_{i,j}^{q_k} + P_{i,j}^{new}, & j = 1 \\ \sum_{k=1}^{j-1} [P_{i,k}^d - P_{i,k}^b] + \sum_{k=1}^{2(q_n-1)} P_{i,j}^{q_k} + P_{i,j}^{new}, & j > 1 \end{cases} \quad (2)$$

1.3.2 列车运行调整

定义轨道交通线路上车站集合为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, n 为该线路的车站总数; 突发大客流时段调整列车集合为 $M = \{1, 2, \dots, m\}$, m 为调整列车数. 在列车车厢容量有限的条件下, 当车站 i 的列车剩余容量不满足客流需求时, 实际上车客流量不等于实际客流需求, 模型遵循先到先得原则, 因此, 每次列车的剩余容量为

$$P_{i,j}^{rc} = \begin{cases} P_{i,j}^c, & i = 1 \\ P_{i-1,j}^{rc} + x_{i-1,j}^{stop} P_{i-1,j}^b - x_{i,j}^{stop} P_{i,j}^a, & i > 1 \end{cases} \quad (3)$$

列车 j 在车站 i 的实际上车客流量与列车剩余容量及各次列车滞留客流量关系为

$$\min \bar{T} = \sum_{j=2}^m \sum_{i=2}^n \left(\sum_{k=1}^{j-1} P_{i,k}^b (T_{i,j}^{dp} - T_{i,k}^{dp}) - \omega \cdot x_{i,j}^{stop} \cdot P_{i,j}^a \cdot 2T_i^{sec} \right) / \sum_{j=2}^m \sum_{i=2}^n \sum_{k=1}^{j-1} P_{i,k}^b \quad (6)$$

其中, $T_{i,j}^{dp} - T_{i,k}^{dp}$ 为大客流条件下, 滞留乘客需要的额外等候时间; ω 为惩罚系数, 扩大因跳站未能下车对乘客的影响作用.

模型需要满足的约束条件为

1) 列车运行约束.

规定了列车在线路上运行的时间标尺, 当列车在车站停车时, 列车的出发时间需考虑停站时分, 否则不需考虑停站时分, 即

$$P_{i,j}^b = \begin{cases} \min(P_{i,j}^{rc}, P_{i,j}^d), & j = 1 \\ x_{i,j}^b \min(P_{i,j}^{rc} - \sum_{g=1}^{j-1} P_{i,g}^d, P_{i,j}^d), & j > 1 \end{cases} \quad (4)$$

布尔变量 $x_{i,j}^b$ 为

$$x_{i,j}^b = \begin{cases} 0, & P_{i,j}^{rc} - \sum_{k=1}^{j-1} P_{i,k}^d < 0 \\ 1, & P_{i,j}^{rc} - \sum_{k=1}^{j-1} P_{i,k}^d \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

同时, 跳停列车会对列车上原本计划在该站下车的乘客造成影响, 此时乘客需要在后一站乘坐对面列车返回原计划到达站, 在构建列车调整计划时应充分考虑到这一因素. 受影响车站的下车客流可以表示为 $x_{i,j}^{stop} \cdot P_{i,j}^a$, 受影响的总时间可以表示为 $x_{i,j}^{stop} \cdot P_{i,j}^a \cdot 2T_i^{sec}$.

1.3.3 目标函数及约束条件

本模型以客流需求为导向, 以列车在线路大客流方向各车站是否停靠 $x_{i,j}^{stop}$ 为决策变量, 建立以最小化全线乘客平均等待周期为目标的站车协同突发大客流处置模型, 通过合理的列车停站方案, 实现大客流车站的乘客运输. 所得到的停站方案可用于控制站台候车客流量密度, 提高车站的安全可靠性. 模型目标函数为

$$T_{i,j}^{dp} = T_{i-1,j}^{dp} + T_i^{sec} + T_i^{stop} \cdot x_{i,j}^{stop} \quad (7)$$

2) 列车越行约束.

由于轨道交通线路条件约束, 本研究不考虑城市轨道交通列车越行方案, 所有相邻列车到达同一车站的时间间隔大于或等于 h_{min} , 以保持列车间的安全运行, 即

$$T_{i,j+1}^{dp} + T_{i,j}^{dp} \geq h_{min} \quad (8)$$

3) 列车停站车站约束.

优化列车停站方案的目的是为大客流车站预留更多的车内空间, 单次运输更多乘客, 因此, 当车站 k 突发大客流时, 需同时满足

$$\sum_{i=1}^{k-1} x_{i,j}^{\text{stop}} \leq k-2, \quad \begin{cases} x_{i,j}^{\text{stop}} = 1, & i = 1 \\ x_{i,j}^{\text{stop}} = 0 \text{ 或 } 1, & i > 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$x_{i,j}^{\text{stop}} = 1, i \geq k \quad (10)$$

其中, 式(9)约束线路的起始车站必须为 1, 控制车站 k 之前的列车停站; 式(10)约束车站 k 直至终点的车站均要停车。

4) 列车跳停约束.

由于轨道交通行车调度规定, 跳停措施中同一列车不能连续跳 2 个站, 同一站不能连续跳 2 辆车, 模型还需分别满足

$$x_{i,j}^{\text{stop}} + x_{i+1,j}^{\text{stop}} > 0, \forall i \quad (11)$$

$$x_{i,j}^{\text{stop}} + x_{i,j+1}^{\text{stop}} > 0, \forall j \quad (12)$$

2 模型求解算法

突发大客流条件下, 城市轨道交通列车协同处置方案的优化具有规模大、因素多、约束复杂、动态及不确定的特点, 是一个由车站、列车及乘客等多元信息融合的多项式复杂程度的非确定性多项式 (non-deterministic polynomially, NP) 问题. 由于计算效率的问题, 需要在可接受的时间内找到接近最优解决方案所需的启发式方法, 然而启发式方法容易陷入远离最佳状态的局部最优. 遗传算法 (genetic algorithm) 是一种高效、并行的全局搜索方法, 可以在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识, 并自适应地控制搜索过程以找到最佳解决方案. 遗传算法作为一种仿生启发式算法技术, 与城市轨道交通系统有控随机性、动态性和协同性的需求相适应, 为解决城市轨道交通列车协同处置方案优化问题提供一种新途径.

以列车停站策略 $(x_{i,j}^{\text{stop}}, \forall i, j)$ 为遗传算法中的染色体编码, 以全线乘客平均等待时间为遗传算法适应性函数值, 设计遗传算法流程如图 2.

3 案例分析

以中国深圳市地铁为例, 2018 年某日在深圳湾体育中心举办演唱会期间, 后海车站发生的大客流为案例, 研究具有较大客流需求线路方向的列车停

<http://journal.szu.edu.cn>

图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the algorithm

站处置方案. 该案例中后海车站是地铁 2 号线与 11 号线的换乘车站, 大客流发生在晚间 22:00 至 22:50 期间. 发生大客流与当日的客流量如图 3.

图 3 后海站当日客流数据与
历史同期客流数据对比

Fig. 3 Passenger flow comparison between current data and historical data at Houhai station

构建列车协同处置模型, 并利用遗传算法对其进行求解. 假设地铁 11 号线上行客流均乘坐普通车厢, 结合实际车站信息, 模型求解过程中涉及的相关参数设置如表 1.

表 1 模型及算法相关参数取值
Table 1 Relevant parameters of the model and algorithm

参 数	取 值	参 数	取 值
列车车型	A 型车	列车最高运行速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	120
车辆编组/节	8	列车最小追踪间隔/s	300
车辆定员/人	310	迭代次数/次	1 000
站台类型	岛式站台	站台安全容量/人	6 019
列车满载率/%	110	ω	2

表 2 11 号线各趟次列车的车站停站方案
Table 2 Train stop schedule for each train in Line 11

列车编号	碧 头	松 岗	后 亭	沙 井	马 安 山	塘 尾	桥 头	福 永	机 场 北	机 场	碧 海 湾	宝 安	前 海 湾	南 山	后 海	红 树 湾 南	车 公 庙	福 田
00618	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
00118	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
00318	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
01816	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
00218	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02206	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
01218	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
01008	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
00720	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
00920	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

图 4 原运行计划和优化处置后计划在 11 号线
后海站站台滞留客流对比
Fig. 4 Comparison of the number of delayed passengers
for each train at Houhai station in Line 11

由图 4 可见，在跳停方案下后海站 11 号线上行方向站台的滞留人数明显减少，且滞留人数均不足 200 人（图中浅色所示），证明模型已达到均衡

在案例场景下通过遗传算法获得的学习曲线表明，乘客的平均等待周期随探索次数的增加而降低。约 3.85 s 后，学习值在第 660 次迭代时收敛。经过算法求解，11 号线上行方向在突发大客流时段各次列车的停站方案如表 2。其中，1 表示该次列车在车站停车；0 表示该次列车在车站不停车。由表 2 可见，原站站停车方案下乘客平均等待周期为 221 s，而在本研究提出的优化列车处置方案下，乘客平均等待周期降低为 191 s，各次列车在 11 号线后海车站站台的乘客滞留情况对比如图 4。

乘客等待周期的目的。以牺牲部分客流需求较小车站的乘客正常上下车，实现突发大客流车站的乘客疏散，保证突发大客流车站的运营秩序，整体上满足轨道交通系统的安全要求，所建模型合理有效。

结 语

本研究对发生可预测突发大客流情况下的地铁车站控流及列车停站计划优化问题展开分析，通过合理安排列车停站方案，实现快速客流输送，减少乘客在车站内留乘。以实际客流需求量为指导，以全线路乘客平均等待周期最小化为目标，对该时段大客流线路方向的列车停站方案优化问题进行建模，并设计遗传算法进行求解。最后通过算例对所建立模型及算法进行验证。结果表明，模型及其求解算法能够均衡突发大客流车站所在线路乘客的等待周期，从而减少突发大客流车站的滞留客流量。

基金项目: 国家社会科学基金资助项目 (20BGL301); 广东省普通高校特色创新资助项目 (2018KTSCX350)

作者简介: 周菁楠 (1990—), 深圳市规划国土发展研究中心规划师. 研究方向: 交通运输规划与管理.
E-mail: zhoujn1111@163.com

引文: 周菁楠, 李 伟, 罗 钦. 城轨车站大客流条件下列车运行调整[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(6): 617-622.

参考文献 / References:

- [1] 姚向明, 赵 鹏, 乔 珂, 等. 城市轨道交通网络客流协同控制模型[J]. 中南大学学报自然科学版, 2015, 46(1): 342-350.
YAO Xiangming, ZHAO Peng, QIAO Ke, et al. Modeling on coordinated passenger inflow control for urban rail transit network [J]. Journal of Central South University Science and Technology, 2015, 46(1): 342-350. (in Chinese)
- [2] 马 羽, 王卓群, 温少表, 等. 基于乘客均衡候车的轨道交通协同限流建模[J]. 深圳大学学报理工版, 2017, 34(5): 537-543.
MA Yu, WANG Zhuoqun, WEN Shaobiao, et al. Modeling of flow co-control among multi-stations based on passenger equilibrium waiting for urban rail transit [J]. Journal of Shenzhen University Science and Technology, 2017, 34(5): 537-543. (in Chinese)
- [3] YANG Xiaoxia, DONG Hairong, YAO Xiuming. Passenger distribution modelling at the subway platform based on ant colony optimization algorithm [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2017, 77: 228-244.
- [4] HU Jun, YOU Lei, ZHANG Hong, et al. Study on queueing behavior in pedestrian evacuation by extended cellular automata model [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 489: 112-127.
- [5] MARTINEZ-GIL F, LOZANO M, FERNÁNDEZ F. Multi-agent reinforcement learning for simulating pedestrian navigation [C]// International Workshop on Adaptive and Learning Agents. Taipei, China: Springer, 2012: 54-69.
- [6] 潘寒川, 刘志钢, 邹承良, 等. 城市轨道交通网络协调限流优化研究[J]. 重庆交通大学学报自然科学版, 2018, 37(5): 77-83.
PAN Hanchuan, LIU Zhigang, ZOU Chengliang, et al. Optimization of cooperative passenger flow control in urban rail transit network [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University Natural Science Edition, 2018, 37(5): 77-83. (in Chinese)
- [7] LIU Renming, LI Shukai, YANG Lixing. Collaborative optimization for metro train scheduling and train connections combined with passenger flow control strategy [J]. Omega, 2020, 90: 101990.
- [8] 赵宇刚, 毛保华, 蒋玉琨. 基于列车运行时间偏离的地铁列车运行图缓冲时间研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 118-121.
ZHAO Yugang, MAO Baohua, JIANG Yukun. Study on the buffer time of metro train diagram based on train running time deviation [J]. China Railway Science, 2011, 32(1): 118-121. (in Chinese)
- [9] MUÑOZ J C, CORTÉS C E, GIESEN R, et al. Comparison of dynamic control strategies for transit operations [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 28: 101-113.
- [10] 李 伟, 徐瑞华, 朱 炜. 运行延误下地铁换乘站多线协同客流处置方法 [J]. 同济大学学报自然科学版, 2015, 43(2): 239-244.
LI Wei, XU Ruihua, ZHU Wei. Multi-line cooperation method for passenger flow disposal in metro transfer station under train delay [J]. Journal of Tongji University Natural Science Edition, 2015, 43(2): 239-244. (in Chinese)
- [11] WEERAWAT W, CHUMKAD K. A new operations approach for Bangkok Metro Green Line using short turn operation patterns [J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2018, 8(3/4): 207-219.
- [12] 徐瑞华, 江志彬, 邵伟中, 等. 城市轨道交通列车运行延误及其传播特点的仿真研究 [J]. 铁道学报, 2006, 28(2): 7-10.
XU Ruihua, JIANG Zhibin, SHAO Weizhong, et al. Simulation study on train delay and propagation characteristics of urban mass transit systems [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(2): 7-10. (in Chinese)

【中文责编: 方 圆; 英文责编: 淡 紫】