

# 基于换乘运力协调的地铁列车运行调整策略

徐瑞华<sup>\*1a, 1b</sup>, 刘峰博<sup>1a, 1b</sup>, 范 围<sup>1b, 2</sup>

(1. 同济大学 a. 道路与交通工程教育部重点实验室, b. 交通运输工程学院, 上海 201804;

2. 北卡罗来纳大学夏洛特分校 土木与环境工程系, 北卡罗来纳 28223 美国)

**摘要:** 为了应对城市轨道交通网络化条件下的延误影响, 提出基于线路间换乘运力协调的列车运行调整策略. 通过上海轨道交通系统的多源运营大数据分析, 得到运行延误对相邻线路列车间衔接关系和换乘站客流组成的影响规律, 提出衔接调整策略和分流调整策略. 结合相邻线路连接关系, 考虑客流需求和站台能力约束, 给出换乘运力协调方案的求解算法, 并分析策略适用情况. 实例验证结果表明, 线间协调调整策略能够有效降低延误影响, 优于传统的延误本线疏散方案, 可为网络化运营条件下的延误管理提供解决方案.

**关键词:** 城市交通; 调整策略; 大数据; 运行延误; 线间协调; 网络化运营

## Train Operation Adjustment Strategies in Metro Based on Transfer Capacity Coordination

XU Rui-hua<sup>1a, 1b</sup>, LIU Feng-bo<sup>1a, 1b</sup>, FAN Wei<sup>1b, 2</sup>

(1a. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, 1b. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of North Carolina at Charlotte, NC 28223, USA)

**Abstract:** In order to cope with the delay effect under the condition of urban rail transit network, the train adjustment strategies based on inter-line transfer capacity coordination is put forward. Through the analysis of the multi-source operation data of the Shanghai metro system, the influence laws of the train delay, on the relationship between trains of adjacent lines and the passenger flow composition of the transfer station, are obtained. And the linkage adjustment strategy and the diversion adjustment strategy are proposed. Based on the connection relation of adjacent lines, considering the passenger demand and the station capacity constraints, the algorithm of solving the transfer capacity coordination scheme is given, and the application of the strategies are analyzed. The numerical results show that the inter-line coordination adjustment strategies can effectively reduce the impact of delay, which is superior to the traditional single-line adjustment methods and can provide a solution for the delay management of networked operation conditions.

**Keywords:** urban traffic; adjustment strategies; big data; train delay; inter-line coordination; network operation

收稿日期: 2017-08-07

修回日期: 2017-10-03

录用日期: 2017-10-30

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(61473210).

作者简介: 徐瑞华(1963-), 男, 江苏苏州人, 教授.

\*通信作者: rhxu@tongji.edu.cn

## 0 引言

近年来,城市轨道交通突发延误的应急处置问题日益突出,尤其在北京、上海等城市轨道交通网络化运营、高密度开行、常态化高负荷条件下,面对突发事件引起的较长时间的列车延误情况,运营管理部门的应急措施调控效果总不尽如意.对此,需要研究针对网络化运营新形势下突发延误影响特征的应对策略,为相关的应急管理工作提供支撑.

网络化运营条件下,突发事件造成延误后,列车开行方式和客流演化问题的复杂程度都将升级.对此,运用复杂网络理论,陈菁菁<sup>[1]</sup>建立了列车运行延误的网络传播模型,刘小霞<sup>[2]</sup>研究了网络客流量的演变.段力伟等<sup>[3]</sup>分析了突发大客流在发生站、换乘站和中间站的乘客密度影响和列车运行延误时间.着眼于微观层面的延误影响,张铭<sup>[4]</sup>建立了换乘站衔接方案模型,发现延误破坏某一方向线间衔接后,该方向其他换乘节点的衔接都将受到影响,国外也注重类似的换乘站衔接问题<sup>[5-6]</sup>.网络化运营条件下,由于集聚效应,客流增大必然对各线路内部和线路间衔接协调造成很大影响.徐瑞华等<sup>[7-9]</sup>研究了运行延误引起的换乘站大客流处置方法:通过计算受影响客流得到大客流发生站及时段,作为预警依据<sup>[7]</sup>;提出大客流延续周期概念,建立基于行车间隔协调的模型优化潜伏期大客流处置方案<sup>[8]</sup>;研究邻线列车跳停方案<sup>[9]</sup>.综上,运行延误传播特征的研究已经转向网络化运营条件,但侧重于定性分析;网络化运营下列车运行延误调整策略的研究成果较少,主要针对换乘站大客流处置.因此,在不断升级的网络化形势下,延误影响特征的定量分析和行车调整策略研究亟需进一步深入.

基于上海轨道交通系统的自动列车监控系统(ATS)数据、自动售检票系统(AFC)数据和突发事件信息等多源大数据资源,本文关注突发事件造成较长列车运行延误(> 10 min)情况下,相邻线路列车间衔接关系和换乘站客流组织受影响的规律,结合网络中相邻线路的连接关系,研究延误后线路间协同调整列车运行计划的方法.网络化条件下与延误相关的各类影响因素较为复杂,为了不

失一般性,本文以上海地铁典型的繁忙线路及其相邻线路为背景,在故障引起列车运行延误的情况下,重点关注换乘站的列车衔接和客流疏散,研究换乘运力协调的列车运行调整策略.

## 1 列车运行延误对相邻线路的影响分析

### 1.1 对列车间衔接关系的影响

网络化运营下各线路运行计划在换乘站需要衔接匹配,若延误列车到达换乘站时仍有延误,原衔接匹配关系便可能被打乱.以上海地铁L2线1次突发故障为例,如图1所示,匹配ATS实际运行数据与计划图,通过查验列车时刻和间隔波动值 $\Delta I = (I_{\text{实际}} / I_{\text{计划}}) - 1$ ,分析延误对本线行车和列车间换乘衔接的影响.由于延误列车 $T_1$ 到达换乘站时仍有延误,另两条线路的列车 $j_1$ 和 $k_1$ 与之衔接失败.这种现象发生在不同时段有不同影响:

(1) 末班车,需要由L2换去L4和L6的乘客将无车可乘;

(2) 首班车和平峰时段,换入L2的乘客等待时间增加;

(3) 高峰时段,大量需要换入L2的客流在站台积聚,同时延误后的 $T_1$ 满载率极高,将出现上下车过程拥挤和站台大客流等不安全现象.

### 1.2 对换乘站客流组成的影响

乘客在相关车站可能重新选择出行路径,且延误越严重,出行路径甚至方式的改变将越多.对此,可从AFC数据查看车站客流组成和分布的变化.以上海地铁L2线2次分别持续15 min和150 min的故障造成列车运行延误情况为例,关注故障发生站和后续第1换乘站的客流变化.如图2(a)、图2(c)所示,与上一特征日的正常客流相比,延误发生后各个车站的客流均呈现先减少后增加而后趋于稳定的3阶段趋势.减少阶段以进站和换乘客流减少为主,意味着得知故障后部分乘客选择了其他路径或方式;但排除故障后,客流反而较正常情况有所增加,运营恢复阶段的客流压力较大.每阶段的时长(尤其客流增加阶段)随故障持续时长增加而显著增加,而且由于行车间隔增大、客流输送效率降低,相关车站和区段往往十分

拥挤.

换乘站连通网络中的线路,相当于延误影响的发散节点,第1换乘站分方向换乘客流的变化体现延误对相邻线路的影响.图2(b)、图2(d)中某一轴越突出,说明换乘客流量越大,为越主要的换乘方

向.可见延误下换乘方向的主次关系基本不变,但换入和换出延误方向的客流从延误伊始的有所减少到随后逐渐增加,表明在运营恢复阶段相关衔接线路方向的客流需求增大,多数换出延误方向的客流甚至超出了正常水平.

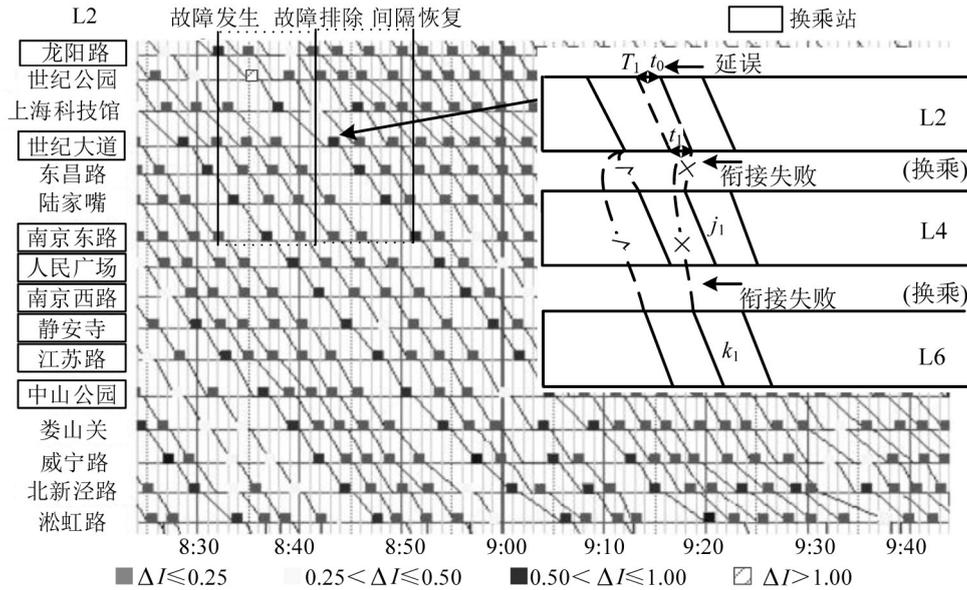


图1 延误下的线路间列车衔接关系

Fig. 1 Inter-line trains connection under delay

可见较长时间故障造成的列车运行延误不仅使得本线的行车计划出现显著的动态波动,还可能破坏相关线路间的换乘衔接关系,故障发生站和邻近换乘站在运营恢复阶段往往面临超出正常水平的客流需求压力.同时,客流分布变化也将进一步扩散延误在网络层面的影响.为了减轻这种延误影响和优化网络客流运输效率,考虑协调相邻线路的列车运行:换乘站列车衔接被影响情况下,适当调整相邻线路的列车时刻以建立新的衔接关系,使换乘客流尽快疏散,称为衔接调整策略;若延误区段能力不足,则可将部分客流引向替代路径,称为分流调整策略.实际上,上述2种情况和策略可能同时出现,其中受引导乘客往往也需要经过换乘站,因此2类线间协调策略的核心是换乘运力协调.

## 2 列车运行延误的线间协调调整策略

### 2.1 相邻线路连接关系

网络化条件下,根据线路的空间走向和形态布局,线路间存在交叉关系和平行关系,各自又有

多个类型,如图3所示.线路间的能力与需求在换乘站动态交互,具有交叉关系的线路相互衔接方便乘客换乘.同时,无论是共线段、近距离平行线,还是2条距离相对较远的平行线,当有换乘站连接,中间区段可作为替代路径起到分流作用.

### 2.2 基于换乘运力协调的列车运行调整策略

线间协调的列车运行调整策略主要基于相邻线路通过换乘站连接而形成的上述交叉或平行关系.因此,以换乘运力协调为关键,分析衔接调整策略和分流调整策略的具体含义.

#### (1) 衔接调整策略.

延误情况下,若线路间列车无序经过换乘站,加之实际环境的复杂性,换乘站甚至网络可能出现运营组织紊乱和不安全现象,因此关注换乘站的运力匹配与时序衔接.

对于运力匹配,以换乘客流量大的主要换乘站为切入点,时段 $T$ 内的能力需满足本线和换乘客流需求,式(1)表示线路II的间隔可由交叉线路I的间隔( $I_1^T$ )、换乘需求( $Q_1^T$ ),本线客流量( $\sum_{o_n} q_n^T$ )、列

车编组( $M_n^T$ )与定员( $N_n^T$ )推算.涉及多条线路时则以需求最大的换乘关系为准.

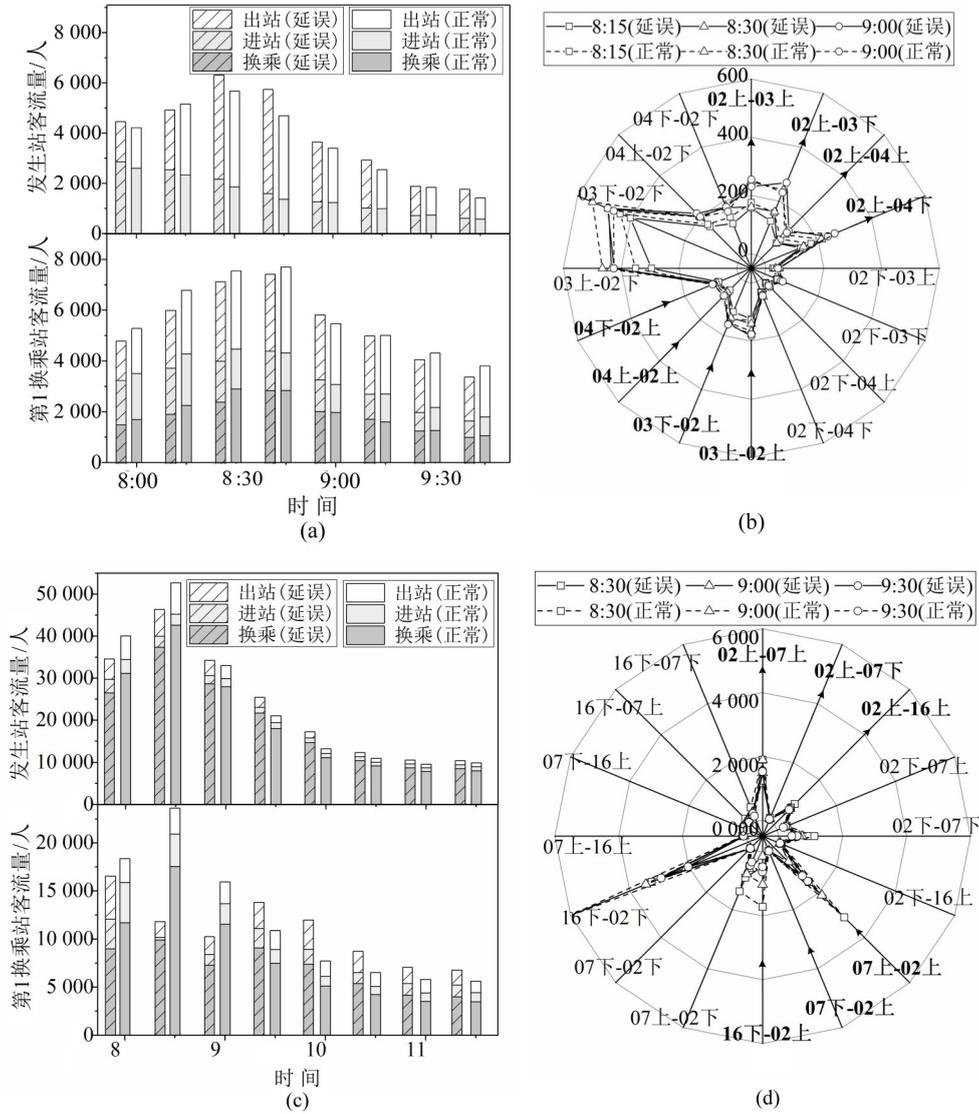


图2 车站客流统计分析

Fig. 2 Statistical analysis of station passenger flow

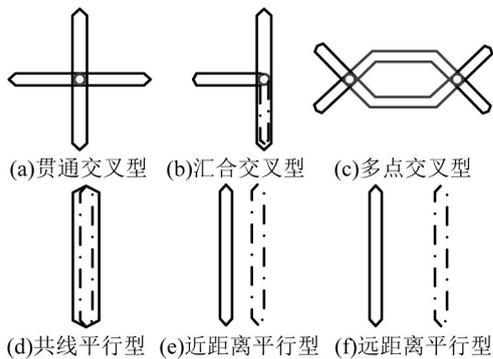


图3 相邻线路连接关系类型

Fig. 3 Relationship between lines

$$I_{l_2}^T = \frac{T \cdot M_{l_2}^T \cdot N_{l_2}^T}{(T/I_{l_1}^T) \cdot \bar{Q}_{l_1}^T + \sum_{Q_{l_2}} q_{l_2}^T}, t \in T \quad (1)$$

对于时序衔接,当有列车延误和客流积压发生时,主要考虑线路走向特征和客流重要程度,让换乘客流较大的方向在换乘站的等待时间最小,同时满足站台能力等安全约束,衔接方案的制定流程如图4所示,其中站台客流不超过站台饱和度的预警值<sup>[9]</sup>.

$$V^t = q_{origin} + q_{in} + q_{interln} \leq V_{预警}^t \quad (2)$$

式中: $q_{origin}$ 表示站台上已有客流; $q_{in}$ 表示进站客流;

$q_{interlin}$ 表示换乘客流中的换入客流.

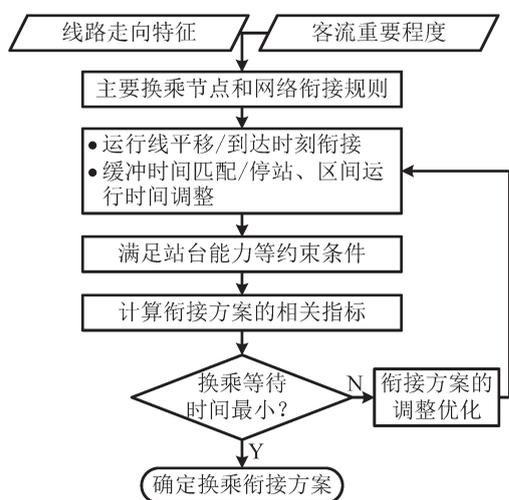


图4 换乘站时间衔接方案的制定流程

Fig. 4 Design procedure of time connecting plans for transfer stations

综合考虑上述方面和因素,换乘运力协调方案的具体求解算法如下:

**Step 1** 初始化.加载列车时刻表,OD客流数据,列车编组数,车辆定员数.其中客流数据可采用与研究时段 $T$ 具有相同特征的历史AFC数据或短期客流预测数据.

**Step 2** 已知延误线路 I 开行间隔( $I_1^T$ ),选取换乘客流量( $Q_1^T$ )和相邻线路 II 的客流量( $\sum_{o_n} q_n^T$ )之和最大的换乘站,由式(1)计算线路 II 的开行间隔,下文称为计算间隔.

**Step 3** 基于相邻线路 II 现有间隔和计算间隔的差值大小,结合线路条件、延误区段内第 1 换乘站各个换乘方向客流量,如图 2 所示,在不影响正常方向的前提下选择相邻线路 II 的调整方向.

**Step 4** 根据图 4,在计算间隔条件下,以所选方向的换乘等待时间最小为目标,满足式(2)中的站台能力约束条件,通过赶点、扣车和跳停等措施调整优化得到相关邻线列车时刻.

## (2) 分流调整策略.

网络化运营条件下乘客出行路径的选择增多<sup>[10]</sup>,路径间具有可替代性,因此发生较大延误后,乘客可以避免延误区段,改乘其他具有平行替代功能的线路.如图 5 所示,当原本出行路径 I 通

行列车很少,列车满载率将大于标准值而造成大量乘客留乘,继续该路径出行会消耗更多时间且存在不确定性,因此可通过换乘站或市内公交衔接去往线路 II,在越过延误区段后,可换乘回到原线路或公交接驳到达目的地.

分流调整策略是将延误时段内超出标准满载率(如 100%)的客流引向相邻线路,在轨道交通系统内部,受引导客流需要经过换乘站,因此在该环节,上述换乘运力协调方案的求解算法同样适用.

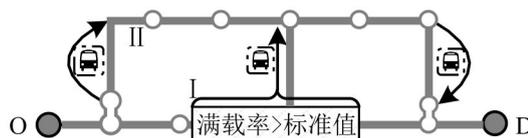


图5 替代路径示意图

Fig. 5 An illustration of alternative path

综上,衔接调整策略一般适用于初始延误线路行车间隔增加、对换乘站运营秩序产生影响的情况,从协调换乘客流的角度出发,适当调整相衔接线路的列车运行以避免延误的网络扩散和换乘大客流事件.分流调整策略是在延误线路能力严重不足甚至中断且恢复运营时间较长的情况下,从降低客流集聚规模的角度出发,考虑借助其他线路的能力,以尽快疏散客流和减轻运营恢复阶段的压力.注意,网络化运营实践中线间衔接的需求更大,且分流调整也以换乘衔接为基础,因此本文研究重点基于换乘运力协调.

## 3 算例分析

以上海地铁 L2 线及其相邻线路为例,根据表 1 中 2 个故障背景及相关数据进行算例分析.故障 1 持续时间较长,实际影响第 1 换乘站中山公园站的时段为 8:25-8:40,期间延误线路方向到达 4 列列车,比计划少 1 列;有交叉关联的共线线路 150 s 间隔到达 6 列列车,原衔接关系被打乱.故障 2 持续时间很长,延误区段能力大幅下降 40%,难以满足高峰客流需求.从图 6 可见故障 1 延误区段末端即是换乘站,故障 2 能力不足区段有绕行路径.结合前文论述,前者采用衔接调整策略,后者采用分流调整策略.

表 1 故障信息

Table 1 Emergency information

故障情景	发生时刻	所在区段	持续时间/min	计划间隔/s	实际间隔/s
1	8:15	淞虹路→中山公园	15	180	225
2	7:50	世纪大道→龙阳路	150	180	300

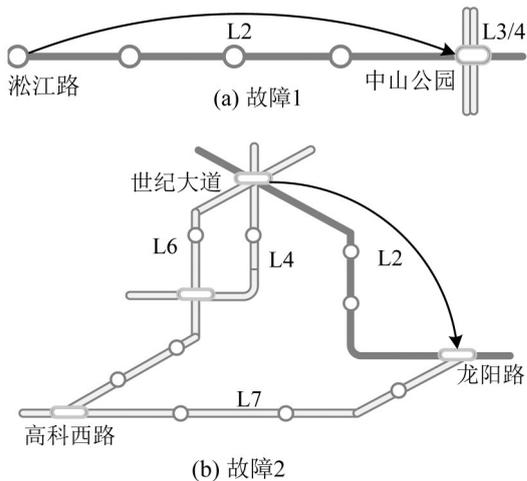


图 6 局部线网结构示意图

Fig. 6 Illustrations of network structure

故障 1 发生在 L2 上行, 根据图 2(b), L2 上行换 L3 两个方向和 L4 下行的客流量相对较大, 但为避免影响 L3 两个方向换 L2 下的正常客流量, 不选 L3 而选择调整 L4 下行以配合 L2 上行. 202 车 8:25:00 到达中山公园站, 换乘时间 5 min, 根据前文方法, 得到被衔接方向的 401 车在中山公园站多停 30 s, 在 8:30:00 发车以与 202 车建立衔接, 其他

列车满足要求而不调整, 得到如图 7 所示的时刻表及衔接方案.

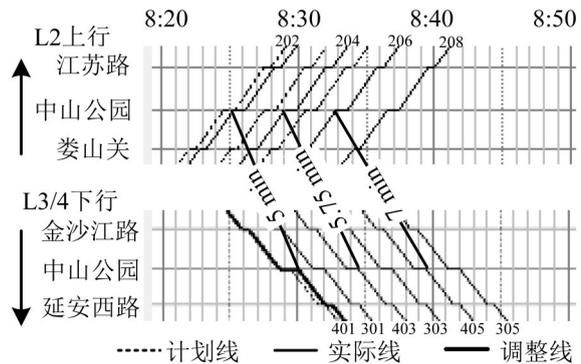


图 7 衔接列车运行图

Fig. 7 Train diagram with connected trains

故障 2 中车间隔增大 2 min, 且列车运行速度减慢, 大量乘客积聚, 最大满载率达到 120%, 原路径旅行时间 9 min 难以实现, 且存在不确定性. 若期望满载率不高于 100%, 则引导 20% 的乘客选择 L6 换 L7 的绕行路径或其他方式, 所需旅行时间为 25 min, 但出行时间可靠. 基于本文方法, 当 10% 的乘客选择绕行路径, 原路径断面满载率得以降低且绕行路径运能得到更充分利用, 如图 8 所示.

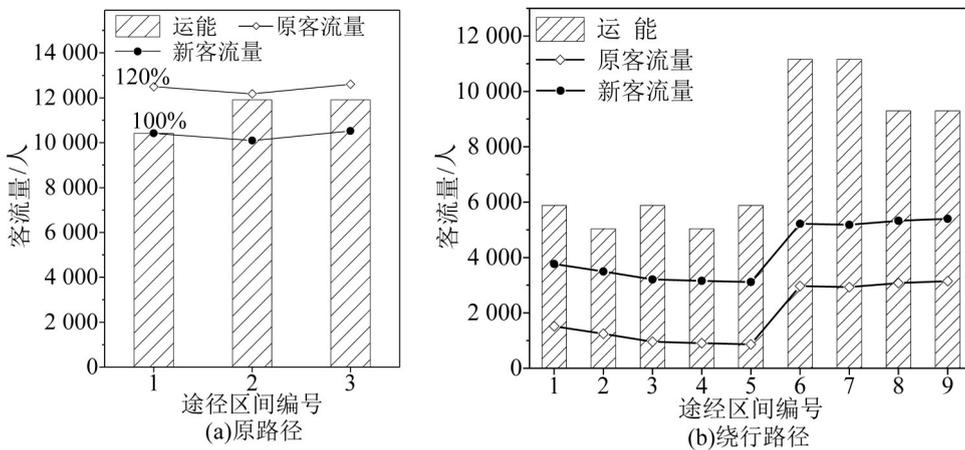


图 8 运能运量匹配图

Fig. 8 Capacity matching charts

表 2 给出了考虑线间协调策略前后的方案指标对比: 对于故障 1, 调整邻线列车的停站时间, 使 202 车的衔接 1 换乘等待时间由 4.5 min 降为 0, 需要换乘该方向的乘客无需等下一列车. 由此, 衔接

调整策略适用于换乘需求较大、等待时间过长的情况, 尤其是在中等故障(10~30 min)下, 使换乘乘客流快速消散, 也能降低站台拥挤现象和不增加后续列车负荷. 对于故障 2, 延误区间不需增加运能,

便使其满载率降到可控范围内。据此,当严重故障(> 30 min)发生后,故障区段异常拥堵,替代路径能力还有富余的情况下,分流调整策略既能减轻

局部客流压力,也能使网络上运能运量匹配更加均衡。

表2 方案结果对比  
Table 2 Results comparison

指标	故障1 换乘等待时间/min			故障2 区间满载率/%		
	衔接1	衔接2	衔接3	区间1	区间2	区间3
原方案	4.5	0.75	2	120	102	106
本文方案	0	0.75	2	100	85	88

#### 4 结论

随着轨道交通网络化运营规模不断升级,新形势、新需求、新问题的出现往往快于运营管理策略的完善,从线路间的相互关系入手有助于从网络层面找到应对策略。通过大数据挖掘得出列车运行延误对相邻线路的列车间衔接关系和换乘站客流组成的影响规律;考虑线路间的连接关系,基于换乘运力协调,提出线间衔接调整和替代路径分流策略以减轻延误影响。算例分析结果表明,本文提出的策略能够通过简单的协同调整方案有效降低延误对网络出行的影响。在我国各个城市轨道交通网络化运营的新阶段,线间协调调整策略具有推广价值。

#### 参考文献:

- [1] 陈菁菁. 城市轨道交通网络运营可靠性研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. [CHEN J J. Reliability of urban rail network operation[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.]
- [2] 刘小霞. 城市轨道交通网络突发客流传播影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011. [LIU X X. Unexpected passenger flow propagation analysis in urban rail transit network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.]
- [3] 段力伟, 文超, 彭其渊. 突发大客流在城市轨道交通网络中的传播机理[J]. 铁道运输与经济, 2012, 34(8): 79-84. [DUAN L W, WEN C, PENG Q Y. Transmission mechanism of sudden large passenger flow in urban rail transit network[J]. Railway Transport and Economy, 2012, 34(8): 79-84.]
- [4] 张铭. 城市轨道交通网络运营计划协调优化研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. [ZHANG M. Coordination and optimization for transportation plan of urban rail transit net[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.]
- [5] SCHACHTEBECK M, SCHÖBEL A. To wait or not to wait—and who goes first? Delay management with priority decisions[J]. Transportation Science, 2010, 44(3): 307-321.
- [6] DOLLEVOET T, HUISMAN D, SCHMIDT M, et al. Delay management with rerouting of passengers[J]. Transportation Science, 2012, 46(1): 74-89.
- [7] 徐瑞华, 叶剑鸣, 潘寒川. 列车运行延误条件下城市轨道交通网络换乘站大客流预警方法[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 127-133. [XU R H, YE J M, PAN H C. Method for early warning of heavy passenger flow at transfer station of urban rail transit network under train delay[J]. China Railway Science, 2014, 35(5): 127-133.]
- [8] 刘涛, 徐瑞华. 基于行车间隔协调调整的换乘站大客流处置[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(2): 50-53. [LIU T, XU R H. Disposal of large passenger flow at transfer station based on coordinated headways adjustment[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(2): 50-53.]
- [9] 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 W, XU R H, ZHU W. Multi-line cooperation method for passenger flow disposal in metro transfer station under train delay[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2015, 43(2): 239-244.]
- [10] 刘剑锋, 孙福亮, 柏赟, 等. 城市轨道交通乘客路径选择模型及算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(2): 81-86. [LIU J F, SUN F L, BAI Y, et al. Passenger flow route assignment model and algorithm for urban rail transit network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(2): 81-86.]