

城市轨道交通网络突发事件影响客流量的计算

洪玲, 高佳, 徐瑞华

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 城市轨道交通网络发生突发事件而造成临时性中断后, 因列车运行延误具有传递性和扩散性, 此时各相关车站会形成延误客流、绕行客流及损失客流。引入图论的方法建立城市轨道交通网络局部中断评价模型; 再结合轨道网络单位时段内各站点间的起讫点出行分布历史或预测矩阵, 得到了在各个受影响站点的各种受影响客流的评价模型。根据这些模型可以得到网络节点破坏后各相关站点随着时间的推移而不断变化的受影响客流量、绕行客流量、拥堵客流量、延误客流量、损失客流量、损失时间等参数。通过对上海轨道交通的局部网络的分析计算, 证明了该应急处置参考模型的有效性。

关键词: 轨道交通; 突发事件; 网络客流分布; 评价模型

中图分类号: U 293.13

文献标识码: A

Calculation Method of Emergency Passenger Flow in Urban Rail Network

HONG Ling, GAO Jia, XU Ruihua

(College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Some stations and intervals may suffer a temporary breakoff due to emergencies of urban mass transit network. The transitivity and diffusivity of train operation delay may lead to delay passenger flow, detour passenger flow and loss passenger flow in some stations. Based on the structure of urban mass transit network and graph theory, the evaluation method of partial interruption were built up. Adopting these models, the affected passenger flow volume, delay passenger flow volume, detour passenger flow volume, loss passenger flow volume, congested passenger flow volume and the lost time of passenger flow could be calculated out as time in different stations. Calculation and analysis of the local network of Shanghai rail transit proves the effectiveness of these models for emergency disposition.

Key words: mass transit; emergency; flow distribution; evaluation model

在城市发展进程中, 城市轨道交通系统凭借其频率高、效率高、运量大、准时性和对城市环境污染小等优点, 已经成为我国主要城市公共交通的骨干。北京、上海、广州等城市的轨道交通已进入网络化运营的新阶段。

城市轨道交通系统是一个高度智能化、信息化、快速化的公共交通体系, 同时也是一个相对封闭、人流密集的系统。在城市轨道交通网络化运营的条件下, 一旦发生突发事件, 不仅会引起事发车站的客流积压, 还将因为网络的传播特点, 进一步引起网络上其他相关车站的客流拥堵, 由此会造成乘客出行的不便, 影响乘客出行安全, 同时也会给城市公共交通系统带来极大压力。因此, 需要轨道交通运营管理部门根据突发事件条件下网络上客流分布情况, 及时采取有效措施进行客流疏散和引导。重点则是分析轨道交通网络各站点和线路的客流受影响情况, 研究准确计算受影响客流量的可行办法, 据此制定合理的行车及客流组织计划, 及时疏散客流, 恢复正常运营秩序, 保障乘客的利益和安全, 并减少影响范围和提高轨道交通的服务质量和服务水平, 对预防、应对和处置城市轨道交通网络的突发事件提供有力支持^[1]。

文献[2]根据轨道交通的具体特征分别对轨道交通网络系统可靠性特征值以及运营可靠性评价模型等做了研究。但这些研究的应用还仅局限于(事前)计划层面。本文基于实际运营管理中应急处置的需要, 通过分析各种不同的受影响客流, 提出受影响客流量及其分布的实时计算模型和方法, 为轨道交

收稿日期: 2010-11-15

第一作者: 洪玲(1972—), 女, 博士生, 主要研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: ss980308@tongji.edu.cn

通讯作者: 徐瑞华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为运输组织现代化、运输系统仿真、计算机在轨道交通系统中的应用。E-mail: rhxu@tongji.edu.cn

通网络突发事件的应急处置提供辅助决策依据。

1 突发事件条件下客流影响分析

城市轨道交通系统发生突发事件条件下,站点附近区段列车不能正常运行时,剩余路网的客流结构会发生巨大变化。根据客流受影响的情况,网络内受影响的客流可分为以下3类:

(1) 车站到发列车受突发事件影响不能按正常时刻运行,产生延误,该部分受影响客流为延误客流。

(2) 突发事件事态严重,事发车站进行紧急疏散后,暂时不再进行旅客乘降,线网上到达该站点的客流出现变化,乘客将改变出站点(提前或推后下车站点)。这部分客流会在剩余轨道交通网络上继续旅行,此类情况下的受影响客流主要是绕行客流。

(3) 当延误时间过长或绕行距离过大时,延误客流和绕行客流会随时间推移,因为不能忍受出行时间的延长放弃乘坐轨道交通(立即从当前车站直接退出),形成损失客流。

3类客流在受影响的各个站点叠加会形成超过正常水平的拥堵客流(损失客流叠加作用为负),而延误客流量与绕行客流量即为受影响客流总量,轨道交通运营管理者需要时刻监控各个相关站点及线路的拥堵客流量,并采取及时应急措施。

各类受影响客流的计算,需要根据实际的突发事件以及轨道交通线网的实际环境(比如折返站的具体位置,是分析轨道交通同线受影响车站的关键因素,它决定了轨道交通网络运营局部中断后,列车临时小交路运行的节点。)确定出应急事件的“物理影响范围”,进而确定出应急事件的客流影响范围;然后需要根据各站、各区间的实际环境分别计算各类客流随着时间的推移而不断变化的叠加客流量。

2 突发事件条件下受影响客流的计算

以拓朴网络基本原理为基础来解决以上问题,把车站看作网络图的节点,轨道线作为网络图的边^[3]。车站分为换乘车站与非换乘车站2种,网络图中两线或多线的交叉节点表示换乘车站,在网络图中增加区间和换乘车站的消耗时间,则城市轨道交通运营网络模型可以看作一无向赋权图。突发事件下路网的客流变化可以基于上述路网的拓朴图进行计算。

根据城市轨道交通运营网络,找到网络中所有OD(origin-destination)点对之间的最短路径,经过编号得到最短路径集 P ,进而得出最短路径区间关联矩阵 H 和最短路径站点关联矩阵 Z 。当事件发生时,选择最近时间段内(以5 min为例)的OD需求矩阵 Q 作为客流量分配和可靠性评价的依据。OD需求矩阵可参考平日需求矩阵。通过客流量分配,得到有向路径上的需求向量 D ,进而得到OD矩阵区间关联矩阵 H 及OD矩阵站点关联矩阵 Z ,以此作为推理计算的基础。

基于以上假设,可以得出网络局部中断评价模型。

2.1 受影响客流总量计算

站点 l 及附近区间不能通行后,受影响客流总量为

$$Q = D \cdot \left(\left(\sum_{x \in \Omega_l} H_x \right) \wedge 1 \right) \quad (1)$$

式中: D 为原OD矩阵各路径上的OD客流向量,该OD客流量可由每5 min间隔的出站客流统计获得, $D = (d_1, \dots, d_k)$, d_i 表示第 i 条路径上的OD客流量; H 为OD对路径区间关联矩阵, $h_{ij} = 1$,第 j 个区间在第 i 条路径上; $h_{ij} = 0$,其他; $i = 1, 2, \dots, m$; H_x 为矩阵 H 的第 x 个列向量; x 为中断区间; Ω 为某区间或站点被破坏后的波及中断范围,即该区间或站点因受到外界破坏作用而停止运营的区间集; Ω_l 表示子站点 l 被破坏后,受其影响路网中不能正常运营的区间或站点。

2.2 绕行客流量计算

站点 l 及附近区间不能通行后,通过换乘到达目的地的绕行客流量为

$$Q_1 = D' \cdot \left(\left(\sum_{x \in \Omega_l} Z_x \right) \wedge 1 \right) \quad (2)$$

式中: D' 为原OD矩阵删除中断站点后矩阵上各路径的OD客流向量,该OD客流量数据可由每5 min间隔的出站客流统计获得, $D' = (d'_1, \dots, d'_k)$, d'_i 表示第 i 条路径上的OD客流量; Z 为原OD矩阵上对各路径站点的关联矩阵, $z_{ij} = 1$,第 j 个站点在第 i 条路径上; $z_{ij} = 0$,其他; $i = 1, 2, \dots, n$; Z_x 为矩阵 Z 的第 x 个列向量,其中 x 为中断车站。

2.3 延误客流量计算

站点 l 及附近区间不能通行后,不能通过换乘到达目的地的延误客流量为

$$Q_2 = Q - Q_1 \quad (3)$$

2.4 拥堵客流量计算

当某一站点因为突发事件而导致其相邻区间不

站;当④号车站中断时,因为③号车站及④号车站与⑦号车站之间设有折返线,所以波及中断车站仅包括②,④号车站;当⑤号车站中断时,因为③,⑥,⑨号车站均设有折返线,所以波及中断车站仅包括⑤号车站;当⑥号车站中断时,因为③,⑤,⑦,⑩号车站均设有折返线,所以波及中断车站仅包括⑥号车站;当⑦号车站中断时,因为⑥号车站及⑦号站南侧,④号车站与⑦号车站之间设有折返线,所以波及中断车站为⑦,⑧号车站;当⑧号车站中断时,因为⑦号车站设有折返线,所以波及中断车站为⑧号车站;当⑨号车站中断时,因为⑤,⑩,⑪号车站设有折返线,所以波及中断车站为⑨号车站;当⑩号车站中断时,因为⑥,⑨,⑪号车站及⑦号车站南侧均设有折返线,所以波及中断车站为⑩号车站;当⑪号车站中断时,因为⑨,⑩号车站均设有折返线,所以波及中断车站为⑪号车站.见表 1.同理可得表 2.

表 1 各站点直接影响分析表
Tab.1 Influence analysis of each site

站点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
波及中断站点	①	②	①,②,③,④	②,④	⑤	⑥	⑦,⑧	⑧	⑨	⑩	⑪

表 2 各区间直接影响分析表
Tab.2 Influence analysis of each interval

区间	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
波及中断区间	A	B	C	D,E	D,E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O

再结合相应的 OD 需求矩阵(采用合适时间段的 OD 需求矩阵,最好与预计中断时间相近)进行计算,当中断时间超过预计中断时间后再增加时间 t_{in} (仍利用原有的 OD 需求矩阵).以预计中断时间为 5 min 为例,采用的 5 min OD 假设需求矩阵,根据上述分析以及计算方法,可得如表 3 所示的 OD 出行分布矩阵,具体计算步骤如下:

表 3 起讫点出行分布矩阵 $N = (n_{ij})$
Tab.3 Origin-destination trip matrix $N = (n_{ij})$ 人

起点	讫点										
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
①	0	100	300	500	400	500	200	400	300	100	200
②	100	0	200	400	500	300	100	400	600	300	600
③	200	100	0	300	500	200	200	100	500	600	400
④	400	300	400	0	300	600	400	200	300	100	200
⑤	600	400	500	200	0	200	100	300	500	400	100
⑥	500	300	300	400	300	0	100	300	400	300	300
⑦	300	100	200	300	200	200	0	100	200	300	400
⑧	200	200	200	100	500	400	100	0	100	100	200
⑨	200	500	400	400	600	500	200	200	0	100	300
⑩	100	100	500	100	300	400	100	100	100	0	300
⑪	100	300	600	400	200	300	500	500	200	200	0

注:该表为 5 min 间隔统计量

步骤 1 首先进行客流量分配,得到各路径上的 OD 客流向量;
步骤 2 根据式(1)计算站点⑥及附近区间不能通行后,受影响客流总量为 12 600 人;
步骤 3 根据式(2)计算站点⑥及附近区间不能通行后,通过换乘到达目的地的绕行 OD 客流量为

1 000人;

步骤 4 根据式(3)计算站点⑥及附近区间不能通行后,不能通过换乘到达目的地的延误客流量为 11 600 人;

步骤 5 根据式(4)计算中断点⑥的拥堵客流量为 3 200 人 + q_6 ;

步骤 6 根据式(5)计算主网中与中断点⑥相邻的站点③,⑤,⑦,⑩的拥堵客流量分别为 1 600 人 + q_{m3} , 700 人 + q_{m5} , 600 人 + q_{m7} , 700 人 + q_{m10} ;

步骤 7 根据式(6)计算断网(没有形成断网,只有断点⑥)中的拥堵客流量为 3 200 人 + q_{s6} ;

步骤 8 根据式(7)计算站点⑥及附近区间不能通行后,在与站点③相邻的站点③,⑤,⑦,⑩形成的损失客流量为 - 212, - 44, - 44, - 176 人;

步骤 9 根据式(8)计算线网中与中断点⑥相邻的站点③,⑤,⑦,⑩的拥堵客流量为 1 388 人 + q_{m3} , 656 人 + q_{m5} , 556 人 + q_{m7} , 524 人 + q_{m10} ;

步骤 10 根据式(9)计算站点⑥及附近区间中断 T_w 后,受影响客流虚拟损失时间为: $44\text{ s} + (104.76\text{ s} + q_8 + q_{m5} + q_{m7} + q_{s9})T_w$. 计算结果如表 4.

表 4 分析计算结果
Tab.4 Analysis and calculation results

延误时间(自变量)	$T_1 = T_w$	$T_2 = T_w + t_{in} / 300$
延误客流量	11 600 T_1	11 600 T_2
损失客流量	- 212 T_1 , - 44 T_1 , - 44 T_1 , - 176 T_1	- 212 T_2 , - 44 T_2 , - 44 T_2 , - 176 T_2
绕行客流量	1 000 T_1	1 000 T_2
拥堵客流量	(3 200 + q_{s6}) T_1 ; (1 600 + q_{m3}) T_1 ; (700 + q_{m5}) T_1 ; (600 + q_{m7}) T_1 ; (700 + q_{m10}) T_1	(3 200 + q_{s6}) T_2 ; (1 600 + q_{m3}) T_2 ; (700 + q_{m5}) T_2 ; (600 + q_{m7}) T_2 ; (700 + q_{m10}) T_2
受影响客流虚拟损失时间	$44 + (104.76 + q_8 + q_{m5} + q_{m7} + q_{s9})T_1$	$44 + (104.76 + q_8 + q_{m5} + q_{m7} + q_{s9})T_2$

与中断站点⑥相关的各类受影响客流量以及受影响客流虚拟损失时间 T_s 随着 T_w 的增加而不断变化,可以实时反映轨道交通网络内部的受影响状况.再将其与各个站点及线路的输送能力相互对照,可以为应急处置提供依据.

4 结语

本文在分析城市轨道交通网络拓扑图的功能性结构的基础上,利用网络局部中断评价模型,通过对比轨道网络中站点或区间临时性中断前后的客流分配情况,计算网络受影响站点的各类受影响客流以及拥堵客流量.该计算结果可以为城市轨道交通网络层面的应急处置方案及救援策略的制定提供一定的参考依据.当轨道交通网络线路出现延误或局部临时性中断时,该模型可以用于实时统计分析各拥堵站点的动态变化客流量,结合各站点的客运能力,判断是否对某站点进行疏散组织、准入限制或制定各站点救援力量的分配方案(例如出行信息的发布、接驳公交车数量等).

参考文献:

[1] 张知青,吴强,徐瑞华.城市轨道交通系统故障时的客流动态分布仿真研究[J].城市轨道交通研究,2006,9(4):52.
ZHANG Zhiqing, WU Qiang, XU Ruihua. Simulation on the dynamic distribution of passenger flow in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit. 2006,9(4):52.

[2] 慈立坤,胡蒙达.上海城市轨道交通网络运营可靠性研究[J].城市轨道交通研究,2009,12(4):41.
CI Likun, Hu Mengda. Reliability of Shanghai urban rail transit networking operation[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(4): 41.

[3] 王云琴.基于复杂网络理论的城市轨道交通网络连通可靠性研究[D].北京:北方交通大学交通运输学院,2008.
WANG Yunqin. Research on connectivity reliability of urban transit network based on theory of complex network [D]. Beijing: Northern Jiaotong University. School of Traffic and Transportation, 2008.

[4] 李鹏翔,任玉晴,席西民.网络节点(集)重要性的一种度量指标[J].系统工程,2004,22(4):13.
LI Pengxiang, REN Yuqing, XI Youmin. An importance measure of actors (set) within a network[J]. System Engineering, 2004, 22(4): 13.