

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2021.02.024

突发事件下的城市轨道交通 网络弹性评估

刘福华^{1,2}, 殷勇³, 陈锦渠³

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 中国铁路“一带一路”互联互通研究中心, 成都 610031; 3. 西南交通大学交通运输与物流学院, 成都 611756)

摘要: 评估突发事件下的城市轨道交通(URT)网络弹性对于提升 URT 的运营水平具有重要意义。考虑 URT 网络拓扑结构及乘客出行影响, 提出能够反映 URT 网络运营服务质量的网络性能指标, 并以突发事件下网络性能的恢复速率为指标衡量了 URT 网络的弹性, 以成都地铁网络为例进行了分析。结果表明: URT 网络运营服务损失与突发事件持续时间成正比, 相比于非换乘站, 换乘站运营中断将造成更大的 URT 网络运营服务损失; URT 网络弹性与突发事件持续时间成反比, 且换乘站具有比非换乘站更高的网络弹性。最后, 结合研究结果分别提出正常运营情况下及发生突发事件情况下 URT 网络的弹性提升策略。

关键词: 城市轨道交通; 突发事件; 网络失效; 弹性

中图分类号: U239.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-6073(2021)02-0146-06

Resilience Assessment of an Urban Rail Transit Network under Emergencies

LIU Fuhua^{1,2}, YIN Yong³, CHEN Jinqu³

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031;

2. CREC Research Center for Belt and Road Interconnectivity, Chengdu 610031;

3. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756)

Abstract: Assessing the resilience of urban rail transit (URT) networks under emergencies has practical significance in enhancing the URT system's operation. An URT network performance indicator that considers the URT network's topology structure and passengers' travel is proposed herein. The network performance indicator can reflect the quality of the transport service. Then, the URT network's resilience is measured by considering the URT network's performance recovery rate as an indicator. Finally, the resilience of the Chengdu subway network under emergencies is analyzed using the proposed models. The result indicates that the performance loss of the URT network is proportional to the duration of emergencies. Compared with non-transfer stations, the failure of transfer stations will lead to a higher URT network performance loss. The URT network's resilience is inversely proportional to the duration of emergencies, and transfer stations possess higher resilience than non-transfer stations. Finally, resilience enhancement strategies of an URT are proposed under normal and emergency operation conditions, respectively, based on the results.

Keywords: urban rail transit; emergencies; network failure; resilience

收稿日期: 2020-08-05 修回日期: 2020-12-02

第一作者: 刘福华, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为轨道交通规划及运营组织模式研究, 33365253@qq.com

通讯作者: 殷勇, 男, 博士, 副教授, 研究方向为交通运输规划与管理, yinyong@home.swjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1200701)

引用格式: 刘福华, 殷勇, 陈锦渠. 突发事件下的城市轨道交通网络弹性评估[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(2): 146-151.

LIU Fuhua, YIN Yong, CHEN Jinqu. Resilience assessment of an urban rail transit network under emergencies[J].

Urban rapid rail transit, 2021, 34(2): 146-151.

截至 2019 年底, 中国大陆共有 40 座城市开通城市轨道交通(urban rail transit, URT), URT 运营里程达 6 736.2 km^[1]。我国 URT 的网络化运营在便利乘客出行的同时, 也增加了运营的难度, 各类运营突发事件时有发生, 因此提升了 URT 网络应对突发事件的能力具有重要意义。

已有研究多运用鲁棒性^[2]、脆弱性^[3]等指标来衡量 URT 网络的应急能力。鲁棒性衡量了突发情况下 URT 网络提供备用运营服务的能力; 脆弱性反映了突发事件对 URT 网络运营服务的影响程度。上述定义表明鲁棒性、脆弱性是从不同方面衡量 URT 网络应急能力的指标。Besinovic^[4]指出相比于鲁棒性、脆弱性, 弹性是一种更为综合的衡量系统应急能力的指标。目前, 研究学者已经运用弹性评估了生态系统、公路网络及 URT 网络^[5-7]的应急能力, 他们的研究指出富有弹性的系统具有更强的应急能力。URT 网络弹性评估根据研究重点可以分为两类, 第一类研究结合加权度值及网络效率^[8-9]等指标, 运用 Bruneau 等^[10]提出的弹性三角衡量了 URT 网络的弹性; 第二类研究在分析 URT 网络弹性的基础上, 从修复策略制定、资源分配^[11-12]等方面优化了 URT 网络的弹性。已有研究为 URT 网络弹性的评估及优化奠定了基础, 但也存在以下不足: ①评估 URT 网络弹性时未考虑乘客出行影响; ②未深入分析不同类型突发事件对网络弹性评估的影响。

因此, 为了弥补已有研究的不足, 现提出了综合考虑网络拓扑结构及乘客出行的 URT 网络性能指标, 以突发事件下网络性能的恢复速率为指标评估了 URT 网络的弹性。

1 模型建立

1.1 路径广义出行费用

结合乘客出行过程, 乘客从站点 o 到站点 d 采用路径 k 出行的广义出行费用 $c_{od,k}$, 包括站点广义出行费用 c_{od,k_N} 及区间广义出行费用 c_{od,k_E} , c_{od,k_N} 又由换乘站广义出行费用 $c_{od,k_{N_1}}$ 及非换乘站广义出行费用 $c_{od,k_{N_2}}$ 构成。 $c_{od,k_{N_1}}$ 及 $c_{od,k_{N_2}}$ 分别通过公式(1)及(2)计算得到。

$$\begin{aligned} c_{od,k_{N_1}} &= c_{od,k_{N_1}} + c_{od,k_{N_2}} \\ &= \sum_{n_1 \in k_{N_1}} \lambda(t_{n_1,w} + t_{n_1,h}) \cdot |k_{N_1}|^\beta + \sum_{n_2 \in k_{N_2}} t_{n_2,d} \end{aligned} \quad (1)$$

$$c_{od,k_E} = \sum_{e \in k_E} t_e \cdot Y(v_e) \quad (2)$$

式中, k_{N_1} 、 k_{N_2} 及 k_E 分别为路径 k 上的换乘站、非换乘站及区间集合; λ 及 β 为换乘系数; $t_{n_1,w}$ 及 $t_{n_1,h}$ 分别为换乘站 n_1 的换乘行走时间及候车时间, s , $t_{n_1,h}$ 为换入线路列车发车间隔的 1/2; $t_{n_2,d}$ 为列车在非换乘站 n_2 的停站时间, s ; t_e 为列车在区间 e 的运行时间, s ; $Y(v_e)$ 为区段拥挤度, 通过公式(3)计算得到^[13]; v_e 为区段 e 的客流量, 人次。

$$Y(v_e) = \begin{cases} 1.3, & v_e \leq b_e \\ [1.3b_e + 2.32(v_e - b_e)] / v_e, & b_e < v_e \leq c_e \end{cases} \quad (3)$$

式中, b_e 及 c_e 分别为区间 e 的座位数及最大运输能力。

综上所述, 从站点 o 到站点 d 的路径 k 的广义出行费用为:

$$c_{od,k} = c_{od,k_N} + c_{od,k_E} \quad (4)$$

1.2 基于改进 Logit 模型的随机用户均衡配流模型

本文运用改进 Logit 模型计算路径被选择的概率, 在改进 Logit 模型中, 路径 k 被选择的概率为其广义出行费用的条件概率^[14]:

$$p_{od,k} = \frac{\exp(-\theta c_{od,k} / \bar{c}_{od})}{\sum_{k \in K_{od}} \exp(-\theta c_{od,k} / \bar{c}_{od})} \quad (5)$$

式中, $p_{od,k}$ 为路径 k 被选择的概率; θ 为乘客感知参数, 表示乘客对路径广义出行费用的敏感程度; K_{od} 为从站点 o 到站点 d 的有效路径集合; \bar{c}_{od} 为从站点 o 到站点 d 有效路径的平均广义出行费用, s 。

在计算 $p_{od,k}$ 的基础上, 得到路径 k 的客流量 $v_{od,k}$ 为:

$$v_{od,k} = p_{od,k} \cdot v_{od} \quad (6)$$

式中, v_{od} 为从站点 o 到站点 d 的客流量, 人次。

运用相继加权平均法(method of successive weighted average, MSWA)分配各路径的客流量, 运用 MSWA 的步骤如下^[14]:

Step 1: 初始化参数。令 URT 网络各区间初始客流量为 0, 搜索得到任意 OD(origin station destination station)对间的有效路径, 令迭代次数 $z=1$, 迭代步长参数 $d \geq 0$, 辅助变量 $\gamma_0 = 1$;

Step 2: 客流分配。计算各有效路径的广义出行费用, 运用公式(5)分配各路径客流量, 得到路径 k 的客

流量 $v_{od,k}(z)$ ，记录区间客流量 $v_e(z)$ ；

Step 3: 客流重分配。根据 $v_e(z)$ ，重新计算各路径的广义出行费用，再次运用公式(5)分配各路径的客流量，得到路径 k 的客流量 $v_{od,k}(z)$ ；

Step 4: 计算迭代参数， $\omega_z = z^d$ ， $\gamma_z = \gamma_{z-1} + \omega_z$ ，则 $\alpha_z = \omega_z / \gamma_z$ ；

Step 5: 更新路径客流量， $v_{od,k}(z+1) = (1 - \alpha_z) \cdot v_{od,k}(z) + \alpha_z v_{od,k}(z)$ ，记录各区间客流量 $v_e(z+1)$ ；

Step 6: 收敛判断，计算 $\sqrt{\sum_{e \in E} [v_e(z+1) - v_e(z)]^2} / |E|$ ，若结果不大于误差值 ε ，则结束迭代；否则令 $z = z + 1$ ，转入 Step 3。

1.3 URT 网络弹性

1.3.1 URT 网络性能

URT 站点运营中断将对站间客流量及出行时间产生影响。因此，为了衡量 URT 站点运营中断对网络运营的影响，本文提出了综合考虑站点度值、站间客流量及出行时间的网络性能指标 Q ，通过公式(7)及(8)计算得到：

$$Q_{od} = [v_{od}(1 - \gamma_{od}) \cdot w_{od}] / t_{od} \quad (7)$$

$$Q = \sum_{o \in N} \sum_{d \in N} Q_{od} \quad (8)$$

式中， Q_{od} 为从站点 o 到站点 d 的网络性能，人/s； γ_{od} 为从站点 o 到站点 d 的客流损失比例， $\gamma_{od} = t / T$ ， t 为突发事件持续时间，min， T 为时间周期，min，对于出行路径不受影响的 OD 对， $\gamma_{od} = 0$ ； w_{od} 为出行重要度， $w_{od} = \sqrt{D_o D_d}$ ， D_o 及 D_d 分别为站点 o 及 d 的度值； t_{od} 为从站点 o 到站点 d 的平均出行时间，s， $t_{od} = \sum_{k \in K_{od}} p_{od,k}(t_{k,N} + t_{k,E} + t_{k,wait})$ ， $t_{k,N}$ 、 $t_{k,E}$ 及 $t_{k,wait}$ 分别为路径 k 的站点出行、区间出行及出行等待时间，出行路径不受影响时， $t_{k,wait} = 0$ 。

URT 站点的运营服务中断时，出行受影响乘客的选择包括^[15]：①选择其他备用路径出行；②在运营服务中断站点等待直至恢复运营；③放弃通过 URT 出行。一般而言，URT 站点突发事件多为设备故障，可以在短时间内(1 h 以内)修复完成。由于各路径的站点及区间出行时间是固定的，因此站点运营服务中断仅对出行等待时间产生影响：

$$t_{k,wait} = \begin{cases} 0 & \text{出行路径未涉及运营服务中断站点} \\ t_{k',wait} & \text{采用备用路径 } k' \text{ 出行} \\ t + \lceil (P + t \cdot V) / C \rceil t_f & \text{在站点等待} \end{cases} \quad (9)$$

式中， P 为发生突发事件时在站的乘客数，人； V 为乘客到达率，人/min； C 为列车容量，人； t_f 为列车发车间隔时间，s。

本文令突发事件导致的 URT 网络性能损失占比为突发事件对 URT 网络的运营服务损失，通过公式(10)计算得到

$$I = \frac{Q - Q_m}{Q} \quad (10)$$

式中， Q_m 为发生突发事件后 URT 网络的性能。

1.3.2 URT 网络弹性

弹性被定义为系统准备或适应外界条件，抵御外界威胁并从中断中恢复的能力^[16]。结合上述定义及 Lu^[17]的研究，本文将 URT 网络弹性 R 定义为网络性能从受损状态恢复到正常运营状态的速率，通过公式(11)计算得到

$$R = \frac{I}{\max\{t + \lceil (P + t \cdot V) / C \rceil t_f\}} \quad (11)$$

式中，分母表示恢复网络性能所需的最长时间。

本文所建立的弹性指标同样适用于评估区间运营服务中断情况下的 URT 网络弹性，只需要将公式(7)中的站间客流量替换成区间客流量、站间出行时间替换成区间出行时间及出行重要度替换成区间介数的乘积即可。

2 实例应用

2.1 成都地铁

截至 2019 年底，成都共开通运营 7 条地铁线路、207 座车站(包括 18 座换乘站)，运营里程达 302.3 km。本文以 2019 年 4 月的成都地铁网络(见图 1)为例验证所建立 URT 网络弹性评估模型的有效性。

从成都地铁获得了 2019 年 4 月的自动售检票机数据。计算前对该组数据进行了处理：删除了乘客类型为员工及进站时间在运营时间以外的数据；匹配乘客编号获得了站间 OD。此外，本文还从成都地铁获得了各线路的列车运行图、换乘站换乘时间及列车型号等数据。

在日常运营中，列车故障、信号机故障、站台门故障及电力系统故障是最常见的四类运营突发事件，

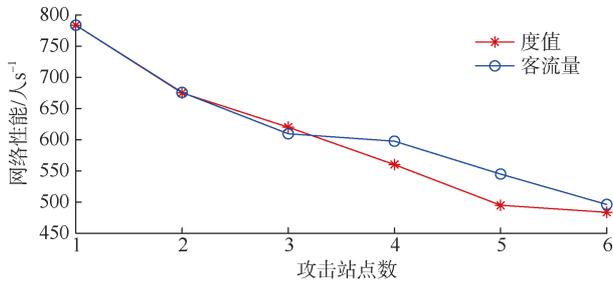


图2 成都地铁网络性能变化

Figure 2 Chengdu subway network's performance change

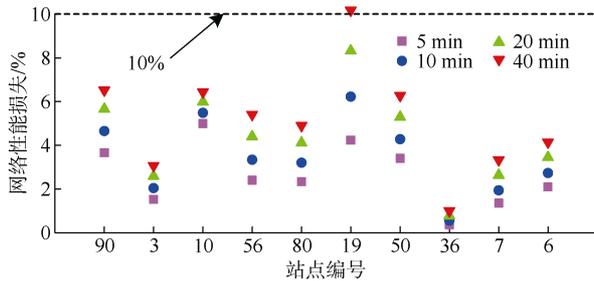


图3 突发事件下成都地铁网络性能损失

Figure 3 Performance of Chengdu subway under emergencies

中断时,绝大多数乘客仍能采用备用路径出行。具体地,天府三街的运营服务中断将造成最严重的运营服务损失,原因在于天府三街是天府新区与成都市其他区域的衔接站点,早高峰期间超过22.46%乘客的目的站点位于天府新区,天府三街的运营服务中断将严重影响乘客的出行;犀浦站的运营服务中断对成都地铁网络性能的影响最小,原因在于犀浦站位于2号线的端点,所影响的有效路径少。因此,为了降低突发事件导致的网络运营服务影响,成都地铁运营部门应重点关注衔接不同区域(例如,成都市中心与天府新区)的换乘站及运输繁忙线路(例如,1号线及2号线),避免上述站点及线路的运营服务中断导致的网络性能损失。

表2 不同突发事件的平均网络性能损失

Table 2 Average performance loss under different emergencies

持续时间/min	度值/%	客流量/%
5	2.98	2.29
10	3.74	3.14
20	4.54	4.09
40	5.27	4.98

2.2.2 URT网络弹性分析

基于突发事件下成都地铁网络的性能损失,结合公式(11)计算得到不同突发事件持续时间下成都地铁

网络的弹性如表3所示。由表3可得,成都地铁网络的弹性与站点运营服务中断持续时间成反比,突发事件持续时间越长,成都地铁网络从受损状态恢复到正常运营状态的速率就越低;相较于非换乘站,换乘站具有更高的网络弹性;换乘站中,衔接不同区域的换乘站具有更高的弹性,表明优先恢复该类换乘站的运营能够快速恢复受损成都地铁网络的性能,降低突发事件所导致的网络运营服务影响。

表3 突发事件下成都地铁网络弹性

Table 3 Resilience of Chengdu subway network under emergencies

持续时间/min	度值/($\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$)					客流量/($\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$)				
	90*	3*	10*	56*	80*	19	50*	36	7*	6*
5	12	5	17	8	8	14.1	11.3	1.2	4.5	7
10	8	3	9	6	5	10.4	7.1	0.9	3.2	4.5
20	5	2	5	4	3	6.9	4.4	0.6	2.2	2.9
40	3	1	3	2	2	4.2	2.6	0.4	1.4	1.7

注: *表示换乘站

2.3 URT网络弹性提升策略

URT网络弹性提升策略包括正常运营情况及突发事件情况下的弹性提升策略。

2.3.1 正常运营情况下的弹性提升策略

正常运营情况下的URT网络弹性提升策略包括优化URT线网结构、强化运营设备维护等。其中,线网结构优化措施通过加强URT线网薄弱环节(例如,成都市中心与天府新区)的衔接、提升运输繁忙线路(例如,1号线及2号线)的能力,提高突发事件情况下乘客出行路径的冗余性,避免因突发事件而导致的网络运输能力瘫痪;强化运营设备维护措施通过关注影响运营的关键设备(例如,在成都地铁中为列车、供电系统)的使用状态,及时纠正设备的错误状态以降低突发事件,尤其是持续时间长的突发事件的发生概率。

2.3.2 突发事件情况下的弹性提升策略

突发事件情况下的URT网络弹性提升策略包括应急运输组织及修复措施制定等。应急运输组织措施包括乘客指引信息发布、列车运输组织等,通过采取乘客指引信息发布措施引导乘客绕过运营服务中断区域;通过列车运输组织措施,临时变更列车运行交路以满足乘客出行需要、最小化URT网络运营服务中断影响。修复措施制度旨在通过明确站点的抢修顺序等来快速提升受损URT网络的性能,根据本文的研究成果,相比于非换乘站,换乘站的运营服务中断将造成

更严重的运营影响,因此,发生突发事件后,应优先抢修换乘站,尤其是作为不同区域衔接节点的换乘站,通过恢复该类站点的运营以快速提升受损 URT 网络的运营服务能力。

3 结论

1) 成都地铁网络的运营服务中断损失与突发事件持续时间成正比;相比于非换乘站,换乘站失效所引起的运营服务影响更高。在日常运营中,成都地铁运营部门应着重关注运输繁忙线路及换乘站,以避免上述站点及线路失效导致的运营服务影响。

2) 成都地铁网络弹性与站点运营服务中断持续时间成反比;相比于非换乘站,换乘站具有更高的弹性。在日常运营中,成都地铁可以通过采取强化线网衔接、加强设备维护、应急运输组织等措施来提升其网络弹性。

3) 本文模型未考虑 URT 系统的应急响应时间,而在实际运营中,URT 系统应急需要一定的响应时间。因此,在评估指标中考虑 URT 系统的响应时间将是接下来所需进行研究的内容。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 2019 年度城市轨道交通运营情况[J]. 城市轨道交通, 2020(6): 37-41.
CAMET. Annual statistic data of urban rail transit in Chinese mainland in 2019[J]. China metros, 2020(6): 37-41.
- [2] 冯春, 朱倩, 于宝. 城市轨道交通网络鲁棒性仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(10): 182-186.
FENG Chun, ZHU Qian, YU Bao. Robustness of urban rail transit network[J]. Computer simulation, 2018, 35(10): 182-186.
- [3] SUN D, ZHAO Y, LU Q, et al. Vulnerability analysis of urban rail transit networks: A case study of Shanghai, China[J]. Sustainability, 2015, 7(6): 6919-6936.
- [4] BESINOVIC N. Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda[J]. Transport reviews, 2020, 40(4): 457-478.
- [5] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual review of ecology, evolution, and systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [6] DONG Y, FRANGOPOL D M. Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties[J]. Engineering structures, 2015, 83(15): 198-208.
- [7] CHOPRA S S, DILLON T, BILEC M M, et al. A network-based framework for assessing infrastructure resilience: a case study of the London metro system[J]. Journal of the royal society interface, 2016, 13(118): 20160113.
- [8] ZHANG D, DU F, HUANG H, et al. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example[J]. Safety science, 2018, 106: 230-243.
- [9] LI M, WANG H, WANG H, et al. Resilience assessment and optimization for urban rail transit networks: A case study of Beijing subway network[J]. IEEE access, 2019(7): 71221-71234.
- [10] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [11] 殷勇, 陈锦渠, 朱蔓, 等. 城市轨道交通站点失效修复策略[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(4): 865-872.
YIN Yong, CHEN Jinqu, ZHU Man, et al. Repair strategies of urban rail transit stations failure[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4): 865-872.
- [12] PEREA F, PUERTO J. Revisiting a game theoretic framework for the robust railway network design against intentional attacks[J]. European journal of operational research, 2013, 226(2): 286-292.
- [13] WARDMAN M, WHELAN G. Twenty years of rail crowding valuation studies: Evidence and lessons from British experience[J]. Transport reviews, 2011, 31(3): 379-398.
- [14] 黄一华. 城市轨道交通客流分配模型与算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
HUANG Yihua. Research on urban rail transit passenger flow assignment model and algorithm[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [15] MAHMASSANI H S. Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications[J]. Networks and spatial economics, 2001, 1(3): 267-292.
- [16] AYYUB B M. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making[J]. Risk analysis, 2014, 34(2): 340-355.
- [17] LU Q. Modeling network resilience of rail transit under operational incidents[J]. Transportation research part A-policy and practice, 2018, 117: 227-237.

(编辑: 郝京红)