

# 城市轨道交通网络脆弱性对比研究<sup>\*</sup>

万丹<sup>1</sup> 郭倩<sup>2</sup> 邓良凯<sup>3</sup> 郭凯睿<sup>4</sup> 黄勇<sup>4</sup>

(1. 重庆大学规划设计研究院有限公司, 400033, 重庆; 2. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 401120, 重庆;  
3. 同济大学建筑与城市规划学院, 200092, 上海; 4. 重庆大学建筑城规学院, 400030, 重庆//第一作者, 工程师)

**摘要** 脆弱性分析是提升城市轨道交通系统干扰应对能力的关键性课题。运用复杂网络原理, 构建城市轨道交通网络模型, 建立多维度的城市轨道交通网络脆弱性评价指标体系, 运用计算机仿真技术, 基于线路失效模式, 以线路组合方式对可能出现的故障情境进行模拟, 并以北京、上海两地为例开展实证对比。研究表明, 城市轨道交通网络在核心线路或线路组合失效的情况下, 表现出较高脆弱性; 核心线路和非核心线路的脆弱性影响差异较大; 北京城市轨道交通网络基于线路失效的脆弱性要显著高于上海。同时, 对指标方法的现实意义和适用性问题进行了讨论。

**关键词** 城市轨道交通网络; 线路失效; 脆弱性; 对比研究  
**中图分类号** U293.13

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.01.013

## Comparative Study on Vulnerability of Urban Rail Transit Network

WAN Dan, GUO Qian, DENG Liangkai, GUO Kairui, HUANG Yong

**Abstract** Vulnerability analysis is a critical issue to improve the interference response ability of urban rail transit system. Using the principle of complex network, urban rail transit network model is constructed, and a multi-dimensional urban rail transit network vulnerability evaluation index system is established. Adopting computer simulation technology, based on the line failure modes, possible failure scenarios are simulated in the form of line combinations, and Beijing and Shanghai are taken as the actual cases for comparative verification. The research result shows that the urban rail transit networks exhibit higher vulnerability in the occurrence of failure in core line or line combination. The core and non-core lines have significant differences in their impact on the vulnerability. The vulnerability of Beijing urban rail transit network from line failure is significantly higher than that of Shanghai. The practical significance and applicability of the index method are discussed.

**Key words** urban rail transit network; line failure; vulnerability; comparative study

**First-author's address** Plan and Design Institute Co., Ltd., Chongqing University, 400033, Chongqing, China

城市交通是城市发展的基础性条件, 是城市经济社会正常运行的基本保障。近年来, 城市轨道交通逐渐成为保证居民顺畅出行和解决拥堵问题的有效手段<sup>[1]</sup>。但同时, 城市轨道交通一旦发生故障或蓄意破坏, 将给城市交通体系造成巨大压力<sup>[2-4]</sup>。因此, 城市轨道交通网络在干扰下的脆弱性表现, 历来受到研究者关注<sup>[5-6]</sup>。较多研究者将城市轨道交通系统抽象为网络模型, 分析其在各类扰动下的响应状态, 侦测系统的薄弱环节; 部分研究者关注城市轨道交通网络的统计学特征, 分析不同干扰模式下城市轨道交通网络节点度、平均路径长度、距离系数等统计指标的响应特征<sup>[1]</sup>。也有部分研究者侧重于评价指标的构建, 如通过局部效率指标对城市轨道交通网络的局部连通性进行评价<sup>[7]</sup>, 通过站点线路度指标对车站的重要性进行评价<sup>[2]</sup>; 还有部分研究者关注客流对网络状态的影响, 证实加载了客流的城市轨道交通网络脆弱性更为明显<sup>[8]</sup>, 发现不同站点在等量突增客流冲击下的脆弱性表现存在巨大差异<sup>[9]</sup>; 有研究者关注常规地面道路公交对城市轨道交通系统的补充作用, 证实常规道路公交网络可以降低城市轨道交通系统的脆弱性<sup>[10]</sup>, 或从发展时序上对现有城市轨道交通网络和规划网络进行对比, 对城市轨道交通系统发展阶段进行评价<sup>[11]</sup>。

综合来看, 以上研究较多基于站点或连边失效模式展开, 对于城市轨道交通线路停运模式下的系统脆弱性响应分析较少, 事实上, 各种原因造成的线路停运事件时有发生, 且危害较大<sup>[10]</sup>; 同时, 在模拟攻击策略上, 多以随机方式或以节点权重为序累加, 并不能形成对现实可能性的全面预判。基于以上分析, 本研究构建以线路失效为基本故障单元, 采用线

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目(2018YFD1100804)

路组合方式对可能的全部失效场景展开分析,构建由网络分裂系数、连通站点对下降率系数、全局换乘效率下降率系数等构成的城市轨道交通网络脆弱性多维度评价体系,选取我国城市轨道交通系统发育相对完善的北京、上海两地作为研究对象,开展实证研究,总结脆弱性规律并进行对比分析。

## 1 研究方法

### 1.1 整体研究思路

整体研究思路如图1所示,运用复杂网络理论,将现实的城市轨道交通系统转化为网络数理模型;构建干扰仿真策略,运用计算机仿真技术,作用于初始状态下的网络数理模型;构建脆弱性评价指标体系,对城市轨道交通网络遭遇干扰前后的状态变化进行对比,总结城市轨道交通网络脆弱性响应规律。其中,干扰仿真策略的制定和脆弱性评价指标体系,是核心技术环节。

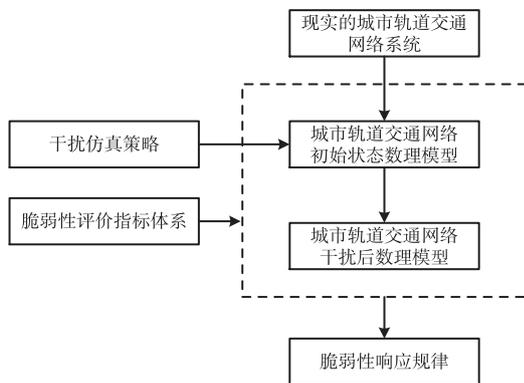


图1 整体研究思路

### 1.2 干扰仿真策略

干扰仿真策略的构建是为了对城市轨道交通系统局部失效状态进行模拟。当城市轨道交通系统遭遇机械故障、人为干扰、蓄意攻击等影响时,可能导致部分线路停运。本研究设定线路失效机制为:该条线路上的站点相互间失去联系性,同时其他线路上的站点不受影响(见图2)。进行多条线路的累积失效仿真时,通过线路组合方式,对全部可能情境进行完全模拟,以获得基于线路失效情境的全面认识。

### 1.3 脆弱性评价指标体系

#### 1.3.1 网络分裂系数

城市轨道交通网络遭遇干扰,可能会分裂为多个相互之间失去联系性的子图,是城市轨道交通网络结构脆弱性的直接反映。构建网络分裂系数  $P_N$ ,可对城市轨道交通网络在干扰下分裂为独立子图的

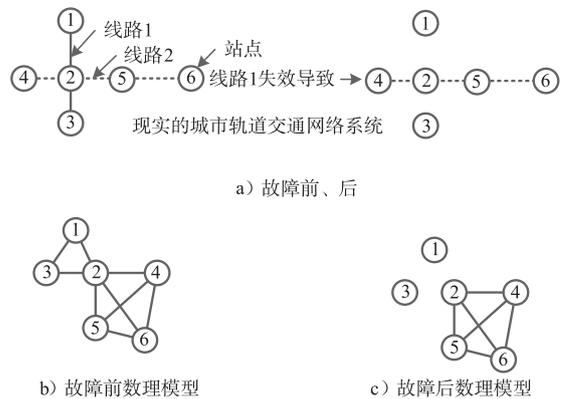


图2 城市轨道交通线路失效机制示意

破碎化程度进行评价,  $P_N$  值越高,表明网络在干扰下的破碎化程度越高。对于大部分城市的城市轨道交通网络而言,初始网络一般只含有1个独立子图。

$$P_N = m/n \quad (1)$$

式中:

$n$ ——初始网络中含有的独立子图数量;

$m$ ——干扰发生后网络中含有的独立子图数量。

#### 1.3.2 连通站点对下降率

城市轨道交通网络遭遇干扰,可能导致部分站点对之间失去联系性。构建连通站点对下降率  $\Delta P$ ,对干扰发生后网络站点对失去连通性的规模进行评价。 $\Delta P$  值越高,表明网络中站点对失联比例越高。

$$\Delta P = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m C_{N_j}^2}{\sum_{i=1}^n C_{N_i}^2} \quad (2)$$

式中:

$n$ ——初始网络中含有的独立子图数量(子图编号分别为  $1, 2, \dots, n$ );

$m$ ——干扰发生后网络中含有的独立子图数量(子图编号分别为  $1, 2, \dots, m$ );

$N_i$ ——初始网络中编号为  $i$  的独立子图所含节点数量;

$N_j$ ——干扰发生后网络中编号为  $j$  的独立子图所含节点数量。

#### 1.3.3 全局换乘效率下降率

网络遭遇干扰,可能导致部分站点间实现通勤需要的换乘次数增加,从而引起网络的整体换乘效率下降。构建全局换乘效率下降率  $\Delta E$ ,可对网络中所有站点对之间换乘效率变化的总体情况进行评价。 $\Delta E$  值越大,网络的整体换乘效率下降程度越高。

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} 1/d_{ij}$$

$$E_m = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} 1/d_{ij,m} \quad (3)$$

$$\Delta E = 1 - E_m/E$$

式中:

$E$ ——初始网络的全局换乘效率;

$d_{ij}$ ——初始网络中站点  $i$  与站点  $j$  之间的换乘次数;

$E_m$ ——干扰发生后的全局换乘效率;

$d_{ij,m}$ ——干扰发生后网络中站点  $i$  与站点  $j$  之间的换乘次数;

$N$ ——网络站点数量。

## 2 案例分析

### 2.1 研究靶区

选取北京、上海作为研究靶区。按第六次全国人口普查数据,北京、上海人口总数分别为 1 961.23 万人和 2 301.91 万人。为了缓解城市交通压力,两地均较早地建设了城市轨道交通系统,分别于 1969 年、1993 年开通第一条线路。截止 2017 年底的数据显示,上海、北京两地城市轨道交通运营线路长度分别排名全国第一、第二位<sup>[12]</sup>。截止 2019 年 1 月,北京拥有城市轨道交通线路 23 条、站点 243 个,上海拥有城市轨道交通线路 21 条、站点 343 个。运用随机组合方法,分别针对两地城市轨道交通线路失效场景展开计算机仿真模拟。当 1 条线路失效时,北京、上海模拟场景分别为 23 种、21 种;当 2 条线路同时失效时,两地模拟场景分别为 253 种、210 种;当 3 条线路失效时,两地模拟场景分别为 1 771 种、1 830 种;当 4 条线路同时失效时,两地模拟场景分别为 8 855 种、5 985 种。

### 2.2 网络分裂情况分析

部分线路失效导致的网络破碎化情况见图 3。当 1 条线路失效时,北京、上海城市轨道交通网络最多可能分裂为 2 个不相联系的子图;当 2 条、3 条、4 条线路同时失效时,北京城市轨道交通网络最多可能分裂为 4 个、5 个、6 个不相联系的子图,上海则分别为 3 个、3 个、4 个(见表 1)。从平均值统计数据来看,相同数量的城市轨道交通线路失效,北京城市轨道交通系统的网络分裂情况整体上较上海更为严重。

### 2.3 连通站点对下降情况分析

部分线路失效导致的连通站点对下降情况如图 4 所示。当 1 条线路失效时,北京、上海城市轨道交通

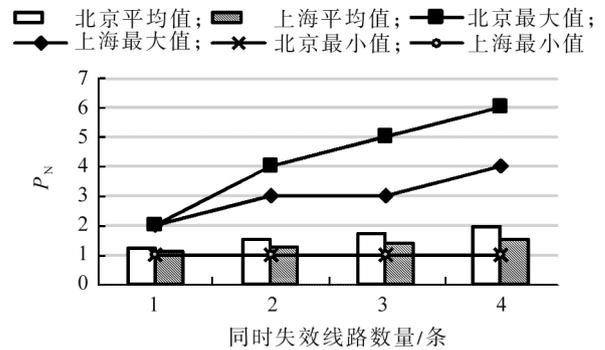


图3 部分线路失效时网络分裂情况

表1 部分线路失效时网络破碎化程度最高场景

城市名	失效线路数/条	$P_N$ 最大值	最大 $P_N$ 对应的失效场景数/种
北京	1	2	6
上海	1	2	3
北京	2	4	1
上海	2	3	2
北京	3	5	4
上海	3	3	41
北京	4	6	6
上海	4	4	7

通网络连通站点对下降率分别为 20.15%、20.95%;当 2 条、3 条、4 条线路同时失效时,北京城市轨道交通网络连通站点对下降率最高分别达到 38.92%、54.03%、66.53%,上海则分别达到 33.80%、45.43%、55.95%(见表 2)。从平均值统计数据来看,相同数量的轨道线路失效,北京轨道系统的连通站点对下降情况整体上较上海轨道系统更为严重。

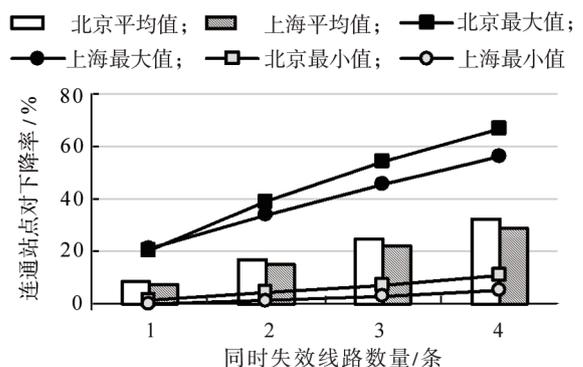


图4 部分线路失效时连通站点对下降情况

### 2.4 全局换乘效率下降情况分析

部分线路失效导致的全局换乘效率下降情况如图 5 所示。当 1 条线路失效时,北京、上海城市轨道交通网络全局换乘效率下降率最高分别为 23.60%、17.00%;当 2 条、3 条、4 条线路同时失效时,北京城

表2 部分线路失效时连通站点对最大下降率对应的失效线路名

城市名	失效线路数/条	连通站点对下降率最大值/%	最大下降率对应的失效线路名
北京	1	20.15	10号线环线
上海	1	20.95	1号线
北京	2	38.92	4号线,10号线环线
上海	2	33.80	1号线,9号线
北京	3	54.03	4号线,9号线,10号线环线
上海	3	45.43	1号线,8号线,9号线
北京	4	66.53	4号线,6号线,9号线,10号线环线
上海	4	55.95	1号线,7号线,8号线,9号线

市轨道交通网络全局换乘效率下降率最高分别达到42.20%、56.30%、66.90%，上海则分别达到30.10%、42.00%、52.50%（见表3）。从平均值统计数据来看，相同数量的线路失效，北京城市轨道交通系统的全局换乘效率下降情况较上海更为严重。

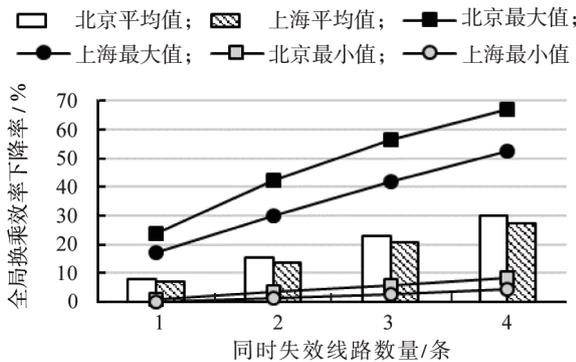


图5 部分线路失效时全局换乘效率下降情况

表3 部分线路失效时全局换乘效率最大下降率对应的失效线路名

城市名	失效线路条数/条	全局换乘效率下降率最大值/%	最大下降率对应的失效线路名
北京	1	23.60	10号线环线
上海	1	17.00	1号线
北京	2	42.20	4号线,10号线环线
上海	2	30.10	1号线,9号线
北京	3	56.30	4号线,6号线,10号线环线
上海	3	42.00	1号线,8号线,9号线
北京	4	66.90	4号线,5号线,6号线,10号线环线
上海	4	52.50	1号线,7号线,8号线,9号线

### 3 结论

#### 1) 实证研究结果分析:

(1) 北京、上海两地城市轨道交通网络在核心线路或核心线路组合失效的情况下，均表现出较高

脆弱性。以北京城市轨道交通为例，4号线和10号线同时失效，会造成网络分裂为3个不相联系的子图，同时造成连通站点对数量下降38.92%，全局换乘效率下降42.20%。

(2) 核心线路和非核心线路对城市轨道交通网络脆弱性的影响，表现出较大差异性。以上海为例，当1号线、8号线、9号线同时失效时，连通站点对下降率为45.43%，而当10号线、11号线、磁悬浮线同时失效时，相应下降率为2.87%。

(3) 从脆弱性响应的总体表现来看，北京城市轨道交通网络脆弱性高于上海。在两地线路规模相当的前提下，相同数量的线路失效，通过网络分裂系数、连通站点对下降率、全局换乘效率下降率等不同评价标准进行考察，北京城市轨道交通网络脆弱性响应的最大值和平均值均高于上海城市轨道交通。

#### 2) 方法适用性评价:

(1) 本文分别从网络连通状态整体评价、系统功能失效程度评价、系统效率降低程度评价等3方面，构建3项脆弱性评价指标。网络分裂系数主要从图论角度，对遭遇故障后网络结构分裂程度进行描述；连通站点对下降率，主要从系统功能失效角度，对遭遇故障后站点对丧失连通功能的程度进行量化评价；全局换乘效率下降率系数，主要从系统效率降低角度，对遭遇故障后站点对实现联系的效率下降程度进行量化评价。整体上看，以上指标从不同维度对城市轨道交通系统脆弱性表现进行评价，有助于侦测城市轨道交通系统脆弱性薄弱环节，从结构和功能层面，为城市轨道交通网络规划优化提供理论参考。同时，也可以在一定范围内用于城市轨道交通运营服务，如通过脆弱性高敏感线路的识别，制定城市轨道交通系统应急救援等级，以指导资源配置，从而提高城市轨道交通系统应对故障的综合能力。

(2) 城市轨道交通网络的规划建设，通常是在多目标引导背景下，遭受多要素制约的综合实践活动，故须综合考虑城市土地利用关系、城市既有交通结构、经济成本、工程可行性等现实因素。同时，随着城市轨道交通系统在城市机动化出行中的重要程度越来越高，其面对故障和干扰的服务维持能力也越来越重要。本文提出的脆弱性评价指标，可用于城市轨道交通网络规划的综合决策中，在考虑多种可行性的前提条件下，尽可能降低城市轨道交通系统的潜在脆弱性水平，从而做出综合最优的线网规划决策。本文将脆弱性评价指标初步应用于不同城市相

近规模的城市轨道交通网络的横向比较,得到两者的脆弱性差异评价,证实了其在量化评价上具备一定可行性。对于不同城市、不同规模的城市轨道交通网络,可通过增加样本量的深入研究,并结合其他数据,获得不同规模条件下网络脆弱性的参考值范围,对于脆弱性水平显著较高的城市轨道交通网络,可以通过后续线网优化、局部线网增强设计等方法,提高城市轨道交通系统抵御故障和干扰的能力。

本研究提出的城市轨道交通网络脆弱性评价方法,弥补了现有研究对线路失效情境下城市轨道交通网络脆弱性响应认识的不足,有助于侦测网络中的高敏感型线路,有助于提高运营管理者对城市轨道交通系统面对干扰时的系统响应预判能力,从而提升城市轨道交通运营管理的科学化水平。

本文亦存在如缺乏对核心线路空间分布和拓扑结构的对应性考察等不足;同时,对于城市轨道交通通勤者而言,通勤时间效率也是其关注的重要问题之一,而本文在效率降低层面仅考虑了换乘效应,未考虑时间效应。拟在下一步研究工作中,构建相应指标,对系统遭遇干扰时的时间效率下降程度进行更为精确的量化评价。

## 参考文献

[1] 叶青.基于复杂网络理论的轨道交通网络脆弱性分析[J].中国

安全科学学报,2012(2):122.

- [2] 王志如,李启明,梁作论.城市地铁网络拓扑结构脆弱性评价[J].中国安全科学学报,2013(8):114.
- [3] NGUYEN T P K, BEUGIN J, MARAIS J. Method for evaluating an extended fault tree to analyse the dependability of complex systems: Application to a satellite-based railway system [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 133:300.
- [4] CADARSO L, MARÍN Á, MARÓTI G. Recovery of disruptions in rapid transit networks [J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2013(1):15.
- [5] 秦孝敏.城市轨道交通网络可靠性研究[J].城市轨道交通研究,2015(12):90.
- [6] 袁若岑,王丽琼,温志伟.基于攻击策略的城市轨道交通网络脆弱性研究[J].城市轨道交通研究,2015(8):57.
- [7] 韩纪彬,郭进利,张新波.上海市轨道交通网络可靠性研究[J].中国安全科学学报,2012(12):103.
- [8] 陈峰,胡映月,李小红,等.城市轨道交通有电网络相继故障可靠性研究[J].交通运输系统工程与信息,2016(2):139.
- [9] 王俊杰,谭倩,王璞.城市轨道交通客流突增研究[J].铁道科学与工程学报,2015(1):196.
- [10] 曲迎春,徐仲之,龚航,等.城市轨道交通网络脆弱性分析[J].铁道科学与工程学报,2016(11):2276.
- [11] 耿丹阳,郭兰兰,李博.基于复杂网络理论的深圳和东京地铁线网系统对比分析[J].公路交通科技,2015(8):126.
- [12] 王有发,杨照,庞瑾.2017年中国城市轨道交通运营线路统计和分析——中国城市轨道交通“年报快递”之五[J].城市轨道交通研究,2018(1):1.

(收稿日期:2019-03-18)

## 上海轨道交通 10 号线二期、18 号线一期南段开通试运营

上海轨道交通 10 号线二期、18 号线一期南段(航头站-御桥站),两条新线新段于 2020 年 12 月 26 日起开通试运营。上海轨道交通全网络运营线路长度增至 729 km (10 号线二期 9.8 km,18 号线一期南段 14.5 km),运营车站数增至 430 座(10 号线二期 6 座,18 号线一期南段 8 座),换乘车站增至 59 座。上海轨道交通 10 号线二期工程为 10 号线一期工程的东延伸段,起于 10 号线一期新江湾城站,终点为基隆路站,经过杨浦区、浦东新区,运营线路长度为 9.8 km,全线共设 6 座新站,其中高架车站 5 座、地下车站 1 座。至此,10 号线全线累计运营线路长度将达到 45 km,运营车站 37 座。10 号线二期工程开通后,将构建起虹桥枢纽、新天地、豫园、南京东路、五角场及外高桥保税区等重点区域的快捷交通走廊。在中国首条全自动地铁运行系统上海轨道交通 10 号线取得成功的基础上,此次 10 号线二期以及 18 号线一期南段开通后均直接启用全自动驾驶模式,并较之前有了进一步的升级优化。首先,升级了智能运维系统,可实现故障统一管理、智能诊断、智能分析、智能定位,并提供维护建议策略等功能,大大提高了故障处理效率,提升了全线运营可靠度水平;信号设备可实现主备控制中心的无扰切换,同时具备远程重启功能,增强了信号系统设备故障处置能力;升级了车辆在线监测平台,具有更为丰富的监测及报警功能,可以远程在线查看列车运行状态,同时具备提供维护建议策略等功能;实现了正线与停车场的一体化管理,在正线设置休眠区,列车可在正线任一休眠区内休眠、唤醒,以实现基于客流需求的列车灵活投放和运能调整。

(摘自 2020 年 12 月 25 日澎湃新闻)