

蓄意攻击下城市地铁网络级联失效仿真

王媛媛

浙江财经大学工商管理学院, 浙江 杭州
Email: wangyuan_123@126.com

收稿日期: 2020年9月2日; 录用日期: 2020年9月15日; 发布日期: 2020年9月22日

摘要

由于人群密集、进出方便、通风条件有限且环境相对封闭等特征, 城市地铁网络成为不法分子实施蓄意攻击, 制造伤害事件的重要场所之一。本文基于负载-能力模型进行地铁网络级联失效仿真, 模拟不同蓄意攻击策略下城市地铁网络抗毁性, 通过设置4个并得出以下结论: 1) 地铁网络在随机多节点攻击下的抗毁性低于单节点随机攻击; 2) 对节点度最大的节点进行攻击, 将会破坏网络的连通性, 导致大量客流转移至其他交通方式, 因此并不一定会产生级联失效; 3) 对介数最大的节点进行攻击将会导致严重的级联失效; 4) 增加节点容量能够有效抑制级联失效。

关键词

地铁网络, 蓄意攻击, 级联失效

Cascading Failure Simulation of Metro Network under Deliberate Attacks

Yuanyuan Wang

School of Business Administration, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou Zhejiang
Email: wangyuan_123@126.com

Received: Sep. 2nd, 2020; accepted: Sep. 15th, 2020; published: Sep. 22nd, 2020

Abstract

Due to the characteristics of dense crowd, convenient access, limited ventilation conditions and relatively closed environment, metro network has become one of the important targets for criminals to carry out intentional attacks and create injuries. In this paper, the cascading failure simulation of metro network is carried out based on the load capacity model. We set up three scenarios,

composed of random attacks and deliberate attacks. We get a series of conclusions from the results of simulation, which are: 1) The resistance of metro network to single-node attack is higher than that of multi-nodes attack; 2) The attack on the nodes with the highest degree doesn't always cause cascading failure in metro network; 3) The attack on the node with the highest betweenness will cause serious cascading failure; 4) The increase of node capacity can effectively restrain cascading failure of the network.

Keywords

Metro Network, Deliberate Attack, Cascading Failure

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于人群密集、进出方便、通风条件有限且环境相对封闭，城市地铁网络成为不法分子实施蓄意攻击，制造伤害事件的重要场所之一。蓄意攻击是指人为主动地攻击城市地铁车站或区间，使网络破坏效果最大。2001年以来，世界各国已发生近400起针对公共交通设施的蓄意攻击事件，约占各类恐怖事件总数的13% [1]。比较著名的四起地铁蓄意攻击案件分别是：1995年3月20日日本东京地铁沙林袭击案件，造成12人死亡，5000余人受伤，地铁系统停运；2005年7月7日英国伦敦地铁连环爆炸造成43遇难，上百人受伤，整个伦敦地铁全部瘫痪；2010年3月29日莫斯科地铁爆炸袭击事件，造成40人死亡；2011年4月11日，白俄罗斯地铁恐怖袭击事件，伤亡十分惨重。在地铁运营区域内发生的恐怖袭击会对社会造成巨大影响、由于人员密集所以伤亡惨重，并且事故的处置和人员的救援都十分困难，严重影响了政治的稳定、生命的安全和财产的损失。

城市地铁网络具有强连通性、高负载等典型特征，一旦遭受蓄意攻击，节点的失效便会引起整个网络负载流量的重新分配，进而导致某些节点和边上的负载超过其容量而失效，这些节点的失效又可能导致其他节点和边的级联失效[2]。网络关键节点的失效可能触发整个网络的崩溃，即级联崩溃。随着地铁运营里程的增加，国内外大量学者对地铁网络开展研究[3] [4] [5] [6]。本文在负载-能力模型的基础上进行地铁网络蓄意攻击下的级联失效仿真，通过设置4种袭击场景，以揭示不同蓄意攻击策略下城市地铁网络抗毁性。

2. 地铁网络级联失效模型

地铁网络可以表示为无向图 $G = (L, N, E)$ ， L 为线路集合， N 为车站集合， E 为边的集合。对于 $\forall l \in L$ ，线路 l 可以表示为线路车站集合，即 $l = \{n_{l,1}, n_{l,2}, \dots, n_{l,i}, \dots, n_{l,|l|}\}$ 。车站 $n_{l,i} \in N$ 是线路 l 的第 i 个车站。由于地铁网络 OD 对之间的可行路径有限，假设乘客在地铁网络上选择最短路出行。

2.1. 初始负载

初始负载即蓄意攻击发生时地铁网络各节点的客流分布。借鉴文献[7]，本文根据交通流分配的方法进行初始负载流量分配。令 $A_{l,i}(0)$ 表示节点 $n_{l,i} \in N$ 的初始负载， D_{jk} 为节点 j 和 k 之间的客流量。 $\beta_{l,i,jk}$ 为 0~1 变量，当车站 $n_{l,i}$ 在 OD 对 (j, k) 的最短路上时， $\beta_{l,i,jk} = 1$ ，否则 $\beta_{l,i,jk} = 0$ 初始负载 $A_{l,i}(0)$ 可按下式进行计算：

$$A_{l,i}(0) = \sum_{j \in N} \sum_{k \in N, j \neq k} D_{jk} \beta_{l,i,jk} \quad (1)$$

2.2. 节点能力

节点能力 $C_{l,i}$ 是车站 $n_{l,i}$ 可以容纳的最大客流量, 根据“按需定容”的设计规则, 借鉴文献[2]和[8], 可令 $C_{l,i}$ 与初始负载的关系式(2)所示, 其中 α 为容量备用系数。

$$C_{l,i} = (1 + \alpha) A_{l,i}(0) \quad (2)$$

2.3. 负载重分配规则

一旦节点被攻击, 该节点被移除, 地铁网络 OD 对之间的最短路将会发生变化, 地铁网络客流也将重新分配。令 $\bar{W}(t)$ 表示在 t 时刻受影响的 OD 对集合, 网络负载重分配的流程:

Step 1: 在 $t-1$ 时刻, 地铁网络某节点被攻击, 移除该节点, 分析网络可达性, 获取受影响 OD 集合 $\bar{W}(t)$, 并计算各受影响 OD 对的最短路。

Step 2: 对于 $(u, v) \in \bar{W}(t)$, 根据式(1)进行网络节点重加载。如果节点 $n_{l,j}$ 在 OD 对在 (u, v) 的最短路上, 则 $\beta_{l,j,uv} = 1$, 则节点 $A_{l,j}(t)$ 在 t 时刻的负载为:

$$A_{l,j}(t) = A_{l,j}(t-1) + D_{uv} \quad (3)$$

Step 3: 重复上述过程, 直至 $\bar{W}(t)$ 中的 OD 对全部被加载。

2.4. 节点失效的判断准则

一旦节点负载超过其容量, 则该节点失效, 即:

$$A_{l,j}(t) > C_{l,j} \quad (4)$$

3. 地铁网络抗毁性评价指标

地铁网络节点攻击将会给网络带来两方面的影响, 一是由于网络客流重分配造成的级联失效, 二是由于节点移除破坏了网络的连通性, 导致大量客流转移至其他交通方式。因此, 本文从上述两方面构建地铁网络抗毁性评价指标。令 Z 表示地铁网络抗毁性评价指标, Z_1 表示地铁网络级联失效后的节点存活率, Z_2 表示节点移除后, 地铁网络上仍保持连通的客流量。令 Z 为 Z_1 和 Z_2 的加权和, 即

$$Z = \varphi_1 Z_1 + \varphi_2 Z_2 \quad (5)$$

φ_1 和 φ_2 分别表示 Z_1 和 Z_2 的权重系数, 其中 $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$ 。

地铁网络级联失效后的节点存活率 Z_1 可用下式进行计算, 其中 N 表示地铁网络节点总量, N_c 表示存活节点数量。

$$Z_1 = \frac{N_c}{N} \quad (6)$$

令 F_a 表示地铁网络节点移除后可达客流量, F 表示客流总量, 则 Z_2 可用下式进行计算:

$$Z_2 = \frac{F_a}{F} \quad (7)$$

4. 地铁网络级联失效仿真过程

地铁网络级联失效仿真过程如下图 1 所示:

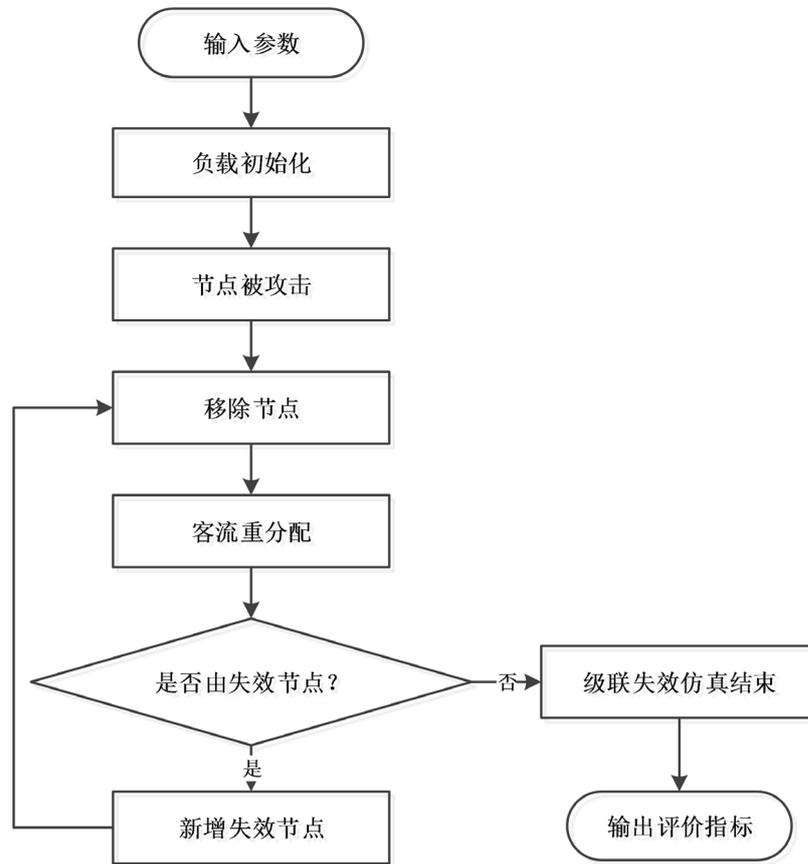


Figure 1. Cascading failure Simulation process of metro network
图 1. 地铁网络级联失效仿真流程图

5. 案例仿真

5.1. 参数和场景设置

本文采用德国汉堡市的地铁网络进行级联失效仿真分析，该网络包括 U1、U2、U3 和 U4 共四条线路，共计 97 个车站，其中 9 个为换乘站，如下图 2 所示：

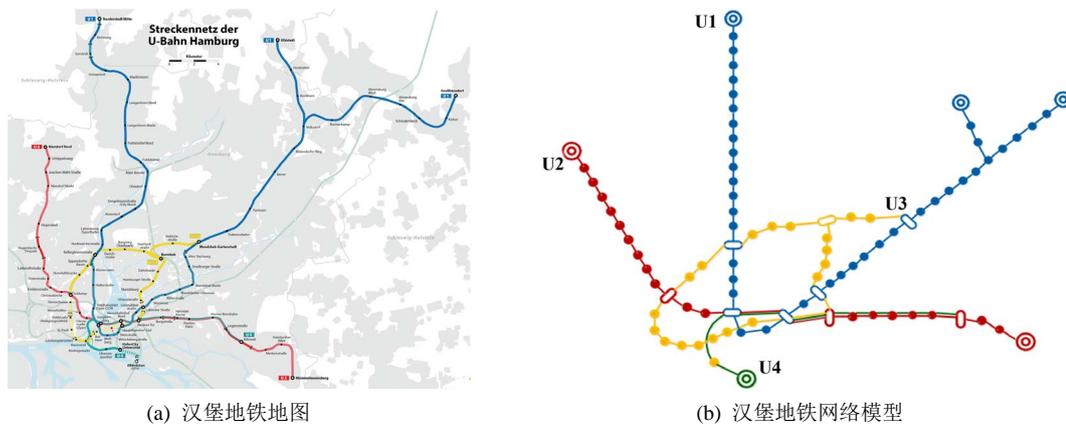


Figure 2. Hamburger Metro Network
图 2. 汉堡地铁网络

该网络的区间运行时分可从汉堡公共交通联盟(HVV)主页获取。假设各换乘站的换乘走行时间为 5 min, 各个 OD 对之间的客流量均为 1。车站能力备用系数为 0.2, ϕ_1 和 ϕ_2 均设置为 0.5。本文设置以下 4 个蓄意攻击场景, 如下:

场景 1: 随机单节点攻击。随机生成 8 个[1, 97]之间的随机数, 分别进行级联失效仿真, 计算这 10 次仿真的平均值, 以此评价地铁网络在随机单节点攻击下的抗毁性。

场景 2: 随机多节点攻击。随机生成 6 组[1, 97]之间的随机数进行仿真, 每组包括 3 个节点, 取 6 次仿真的随机数, 来评价地铁网络在随机多节点攻击下的抗毁性。

场景 3: 蓄意单节点攻击。选择度最大和介数最大的节点分别进行攻击。

场景 4: 蓄意多节点攻击。选择两组节点分别进行攻击, 一组是度最大的三个节点, 一组是介数最大的三个节点。

5.2. 结果分析

各场景中攻击的节点, 以及各场景下的地铁网络抗毁性指标分别如表 1 和表 2 所示。在场景 1 中, 本文选择 Eppendorfer Baum、Hamburger Straße、Habichtstraße、Wandsbek Markt、Schlump、Trabrennbahn、Steinstraße 和 Hammer Kirche 等车站分别进行攻击, 节点存活率为 89.8%, 可达客流比例为 59.2%, 网络抗毁性为 0.745。其中对 Trabrennbahn 和 Steinstraße 的攻击并未引发级联失效。而对 Eppendorfer Baum 的攻击引发了严重的级联失效, 其导致 23 个节点失效, 节点存活率 Z_1 和可达客流比例 Z_2 分别为 75.2% 和 13.3%, 远低于随机攻击下的平均值。

在场景 2 中, 本文随机选择 6 组车站进行攻击, 如表 1 所示, 节点存活率和可达客流比例分别为 83.3% 和 26.6%, 其低于随机单节点攻击。网络抗毁性也下降为 0.549。

Table 1. Attack nodes in each scenario

表 1. 各场景中的攻击节点

场景	攻击节点
场景 1	(1) Eppendorfer Baum, (2) Hamburger Straße, (3) Habichtstraße, (4) Wandsbek Markt, (5) Schlump, (6) Trabrennbahn, (7) Steinstraße, (8) Hammer Kirche
场景 2	(1) {Hallerstraße, Landungsbrücken, Rauhes Haus} (2) {Stephansplatz, Saarlandstraße, Burgstraße} (3) {Fuhlsbüttel, Hauptbahnhof Süd, St.Pauli} (4) {Alsterdorf, Wandsbeker Chaussee, Schlump} (5) {Stephansplatz, Ritterstraße, Eppendorfer Baum} (6) {Ohlsdorf, Saarlandstraße, RauhesHaus}
场景 3	(1) Kellinghusenstraße, (2) HauptbahnhofSüd
场景 4	(1) {Kellinghusenstraße, Schlump, Berliner Tor}, (2) {HauptbahnhofSüd, Jungfernstieg, Lübecker Straße}

Table 2. Simulation result

表 2. 仿真结果分析

场景	攻击节点	节点存活率 Z_1	可达客流比例 Z_2	网络抗毁性 Z
场景 1	(1)~(8)	89.8%	59.2%	0.745

Continued

场景 2	(1)~(6)	83.3%	26.6%	0.549
场景 3	(1)	98.9%	71.4%	0.851
	(2)	80.4%	19.04%	0.497
场景 4	(1)	96.9%	33.9%	0.654
	(2)	85.5%	11.8%	0.486

在场景 3 中, 本文选择度最大的车站 Kellinghusenstraße 和介数最大的车站 HauptbahnhofSüd 进行攻击。从仿真结果可以得知, 对车站 Kellinghusenstraße 的攻击导致网络的不连通, 可达客流比例下降为 71.4%, 由于大量客流转移至其他交通方式, 致使网络并未产生级联失效。由于可以得知, 对网络度最大的节点进行攻击, 并不一定会产生级联失效。对 HauptbahnhofSüd 的攻击引发了严重的级联失效, 共 18 个节点失效, 网络节点存活率下降为 80.4%, 可达客流比例下降为 19.04%, 网络抗毁性也下降为 0.497, 由此可以得知, 对介数最大的节点进行攻击将会引发严重级联失效。

在场景 4 中, 我们选择两组节点进行攻击, 一组是选择度最高的节点 Kellinghusenstraße、Schlump 和 Berliner Tor。对该节点的攻击, 导致网络被分割成五个不连通的子网络, 如下图 3 所示, 可达客流比例降低为 33.9%, 意味着 76.1% 的乘客无法通过地铁网络到达其目的地。由于大量客流转移至其他交通方式, 地铁网络并未产生级联失效。

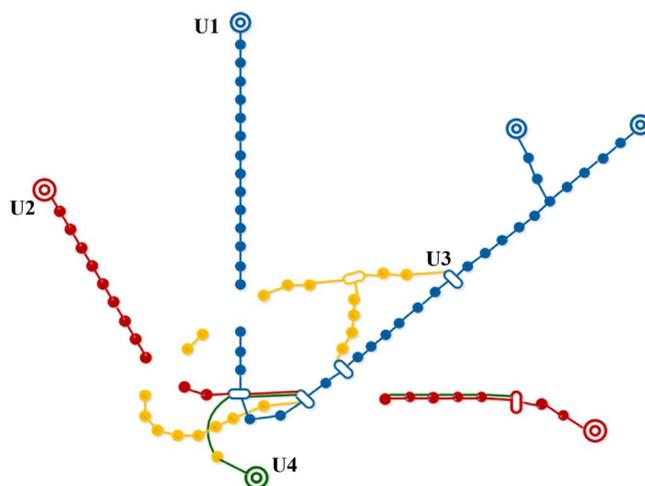


Figure 3. Attack result of Scenario 4(a)

图 3. 场景 4(a) 的攻击效果图

场景 4 中的另一组节点是选择介数最高的三个节点, 即 HauptbahnhofSüd、Jungfernstieg 和 Lübecker Straße。对该组节点的攻击导致 11 个车站失效, 节点存活率为 85.5%, 可达客流比例降低为 11.8%。值得指出的是, 从仿真结果可以得知引发地铁网络级联失效的节点并不一定是度最大或介数最大的节点。例如, 场景 1 中的 Eppendorfer Baum 车站失效共导致 23 个节点失效。

5.3. 灵敏性分析

以对节点 Habichtstraße 进行攻击为例分析能力备用系数 α 对网络抗毁性的影响。如下图 4 所示, 能力备用系数 α 从 1.1 变化为 1.5 时, 失效节点数量从 22 下降为 1, 这意味着当数 α 为 1.5 的时候, 仅有被攻击节点失效, 而网络上并未产生级联失效, 由此可以得知, 增加能力备用系数能显著增加网络抗毁性。

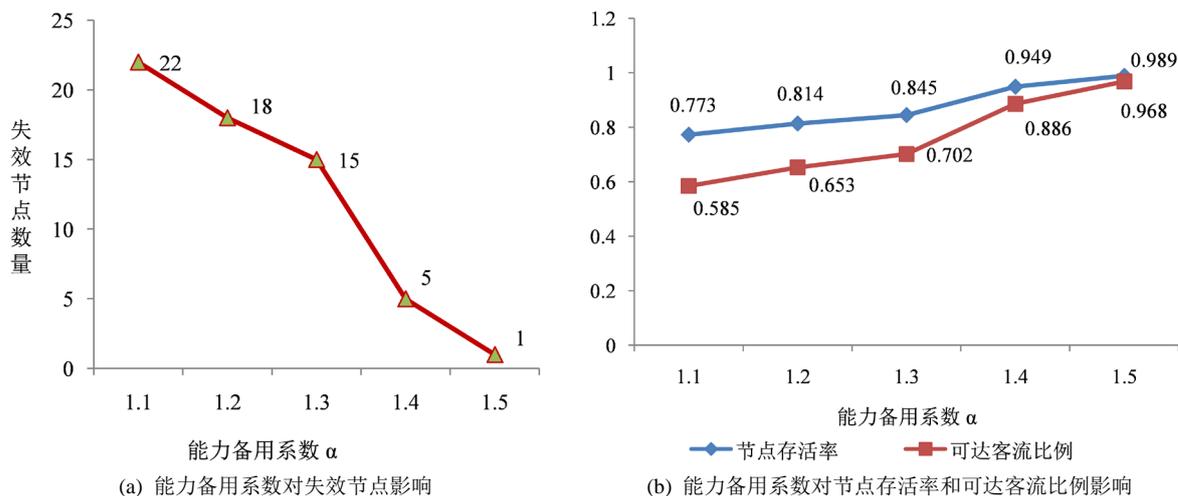


Figure 4. Sensitivity analysis of capacity coefficient
图 4. 能力备用系数的灵敏性分析

5. 结论分析

本文基于负载-能力模型构建了地铁网络级联失效模型, 设置了随机单节点攻击、随机多节点攻击和蓄意攻击三种方式, 进行汉堡地铁级联失效仿真, 得出以下结论:

- 1) 地铁网络在随机多节点攻击下的抗毁性低于单节点随机攻击;
- 2) 对节点度最大的节点进行攻击, 将会破坏网络的连通性, 导致大量客流转移至其他交通方式, 因此并不一定会产生级联失效;
- 3) 对介数最大的节点进行攻击将会导致严重的级联失效;
- 4) 选择度最大的多节点进行攻击将会加剧破坏网络的连通性;
- 5) 增加节点容量能够有效抑制级联失效。

基金项目

浙江省自然科学基金资助(LQ18G030012), 教育部人文社科基金资助(18YJC630190)。

参考文献

- [1] 欧雯. 恐怖袭击下城市轨道交通网络抗毁性分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [2] Motter, A.E. and Lai, Y. (2002) Cascade-Based Attacks on Complex Networks. *Physical Review E*, **66**, 1-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.065102>
- [3] Shen, Y., et al. (2020) Model of Node Traffic Recovery Behavior and Cascading Congestion Analysis in Networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **545**, 1-92. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.065102>
- [4] Zhang, L., et al. (2019) A Cascading Failures Model of weighted bus transit route network under Route Failure Perspective Considering Link Prediction Effect. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **523**, 1315-1330. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.122>
- [5] 李思佳, 帅斌, 刘奕杉. 城市轨道交通网络级联失效机理研究[J]. 综合运输, 2020, 42(7): 69-74.
- [6] 李倩. 城市轨道交通网络节点重要度评估及级联失效抗毁性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [7] 刘朝阳, 吕永波, 刘步实, 等. 城市轨道交通网络级联失效抗毁性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(5): 82-87.
- [8] Crucitti, P., Latora, V. and Marchiori, M. (2004) Model for Cascading Failures in Complex Networks. *Physical Review E*, **69**, 1-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.045104>