

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.6.09

# 地铁网络鲁棒性评价指标

赖丽萍

(闽江学院 互联网创新研究中心, 福建 福州 350108)

**摘要:**以复杂拓扑网络作为理论基础,构建适用于地铁线网的鲁棒性评价指标体系。以2015年北京地铁线网为实例,进行选择性和随机性攻击的两种模拟;分别统计两种供给模式指标值,并分析比较各指标值变化的趋势和原因。

**关键词:**复杂网络;鲁棒性;随机性攻击;选择性攻击

**中图分类号:** U 491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)06-0568-05

## Evaluation index of metro network robustness

LAI Liping

(Internet Innovation Research Center, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Based on complex topology network theory, a subway network robustness evaluation system is built up. With Beijing subway network data in 2015, selectivity and randomness attacks are simulated as two indexes to statistically study the trend and reason of the two attacks.

**Key words:** complex network; robustness; failure; attack.

## 0 引言

鲁棒性在出现偶然性、危机性、不确定性、必然性事件时已经成为系统持续生存的关键因素。鲁棒性健壮则会让系统可靠性、稳定性同步提升,从而保证外界因素在攻击系统时,能够确保系统服务功能不受影响<sup>[1-2]</sup>。地铁线网的鲁棒性是指:当地铁网络遭到针对性攻击或者发生意外事件时,网络可以替代路线,从而保证交通功能发挥。文中以复杂网络为理论基础,建立一个完善并且适用于地铁线网鲁棒性评价的指标体系,并以北京2015年地铁线网为案例,进行攻击模拟,分析

该指标体系评价地铁线网鲁棒性的合理性。

## 1 地铁网络鲁棒性评价指标体系

### 1.1 连通度

外界因素攻击或内部故障干扰复杂网络时,其连通性同应变能力保持正比。因此,文中选择网络连通度作为地铁线网鲁棒性的评价指标之一。

连通度是网络实际边数目与理论最大边数目的比值。与聚集系数的区别在于连通度是面向整个网络,而不是网络中某个节点的域<sup>[3]</sup>。连通度的计算公式如下:

收稿日期: 2018-09-14

基金项目: 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT170450)

作者简介: 赖丽萍(1987-),女,汉族,福建龙岩人,闽江学院讲师,硕士,主要从事城市轨道交通规划与设计方向研究,E-mail: lailiping2006@163.com.

$$\gamma = \frac{|D|}{3|V_d| - 6} \quad (1)$$

式中:  $D$  ——地铁线网拓扑结构图中边的数目;

$V_d$  ——地铁线网拓扑结构图中节点的数目, 换乘、终点车站总量。

### 1.2 最大连通子图的相对大小

最大连通子图是依靠最少数量的边, 从而连接起所有节点所形成的子图。最大连通子图的相对大小是子图中节点总数量同网络中所有节点数量的比值。

原始网络最大连通子图同网络两者的节点数比值等于1。如果网络内部结构出现变动、外界攻击影响下, 网络拓扑结构会被动分裂为多个子图, 而最大连通子图相对大小同样会出现缩小。最大连通子图如图1所示。

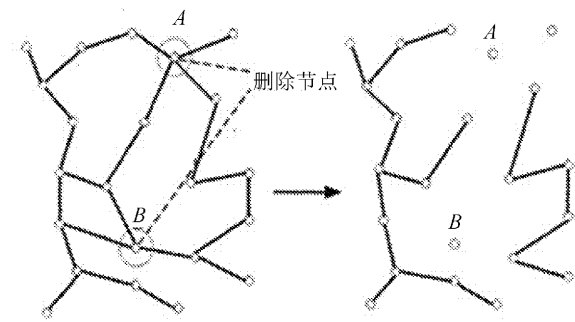


图1 最大连通子图

节点  $A$ 、 $B$  被破坏, 这时原始网络会分裂为四个小集体以及最大连通子图。

地铁线网的最大连通子图的相对大小  $S$  的数学表达式如下:

$$S = \frac{|V'_d|}{|V_d|} \quad (2)$$

式中:  $|V'_d|$  ——地铁线网拓扑图遭到外界攻击或发生内部故障后最大连通子图中的节点数量;

$|V_d|$  ——初始地铁线网拓扑结构图中的节点数目, 即地铁线网中换乘车站和终点车站的总数目。

该指标反映了地铁线网遭到破坏或发生内部故障前后其拓扑结构的变化情况, 集中表现地铁线网破坏程度。

### 1.3 网络效率

近段时间, 国内外学术界在探究复杂网络连通可靠性过程中, 最常见的评价指标为网络平均

路径长度: 如果长度越小, 则连通可靠性越高; 如果长度越大, 则连通可靠性就会越低。

如果系统被破坏超过临界值, 网络就会出现孤立节点。这时初始网络平均路径长度则会被最大连通子图平均路径长度所替代。这种情况的出现代表了网络在遭受一定破坏后, 连通可靠性相比于原始网络要高。而现实情况却是一旦遭受破坏, 其可靠性也会受损, 网络孤立节点同其它节点会断绝连通<sup>[4]</sup>。

可见, 利用网络的平均路径长度评价器连通可靠性是不全面的。

相比平均路径长度, 网络全局效率在反映内部故障、外部攻击前后, 复杂网络连通可靠性变动时极为准确。全局效率直接代表着连通可靠性, 最显著特征便是全局效率同连通可靠性间存在正比关系。网络拥有较高的可替代路径提供力, 则鲁棒性越高。如果出现内部故障或外部攻击情况时, 连通可靠性受此影响会下降, 且全局效率同步下降, 网络可替代路径提供力以及鲁棒性都会很低。

全局效率  $E_{\text{glob}}(G)$  数学表达式如下:

$$E_{\text{glob}}(G) = \frac{1}{|V_d|(|V_d| - 1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (3)$$

显然,  $0 \leq E_{\text{glob}}(G) \leq 1$ 。当  $E_{\text{glob}}(G) = 1$  时, 表示地铁线网的拓扑结构图中任意两节点之间都是直接相连的, 网络连通可靠性进入最大峰值后, 网络可替代路径提供能力同样会升到最大值, 这时鲁棒性会达到最大; 当  $E_{\text{glob}}(G) = 0$  时, 表示地铁线网的拓扑结构图中所有节点都是不连通的, 即每个节点相比于其他节点都是独立存在的。这时的连通可靠性达到最低值, 网络没有提供可替代路径的能力, 网络鲁棒性数值为零<sup>[3]</sup>。

### 1.4 圈数率

城市地铁系统鲁棒性指标集中反映出网络所拥有的可替代路径提供能力。用 Berge 定义中的圈数  $\mu$  来代表可提供的替代路径<sup>[4]</sup>:

$$\mu = |D| - |V_d| + 1 \quad (4)$$

城市轨道交通网络规模逐渐扩大后, 圈数同样增加, 不过这并不代表网络规模越大就会拥有越强鲁棒性。原因在于: 地铁线网规模增大后, 其节点数量会随之增加, 出现内部故障或外部攻击概率会增加<sup>[3]</sup>。因此, 应该用圈数率反映地铁线网的鲁棒性:

$$\mu^T = \frac{\mu}{|V_d|} \quad (5)$$

## 2 攻击模拟

以 2015 年北京地铁线网作为鲁棒性研究对

象,进行随机性攻击和选择性攻击模拟。

2015 年北京市地铁线网拓扑结构如图 2 所示。

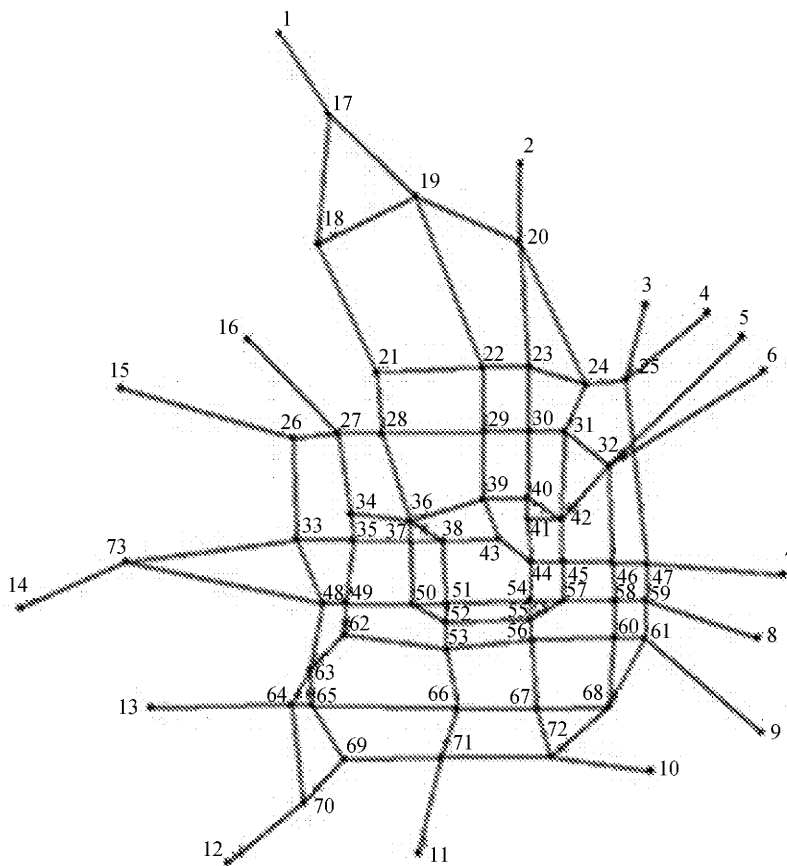


图 2 北京市 2015 年地铁线网拓扑结构图

在模拟攻击前,作如下假设:

1)为了更具体地观察图 2 遭受攻击时其鲁棒性各项指标的变化过程,每次攻击仅针对一个车站,也就是说,每次攻击仅破坏一个节点<sup>[5]</sup>;

2)如果拓扑结构图受到破坏且分裂成多个独立子图后,求取最大连通子图平均最短路径长度,并将此作为破坏后的拓扑图平均路径值<sup>[6]</sup>;

3)当拓扑结构图被破坏分裂成若干个独立子图时,相对于最大连通子图,其他子图发挥的作用甚小,因此,下一次攻击对象为最大连通子图<sup>[7]</sup>;

4)网络出现崩溃时,鲁棒性指标均为零。

现实情况是地铁网络遭受到一定程度攻击后,全局效率会下降到极低程度,网络作用近乎于零。因此可以认为,当  $E_{glob}(G) = 0$  时,网络崩溃<sup>[2]</sup>。

文中在 Visual Studio 2010 环境中借助 ArcEngine 进行攻击模拟。

2015 年北京地铁线网遭到随机性攻击时,全局效率下降程度较为均匀,下降期间也没有出现太多起伏。选择性攻击网络期间,网络全局效率出现下降时遭遇到两次大幅度下降,随机性攻击和选择性攻击下地铁网络全局效率变化曲线如图 3 所示。

当网络受到随机性攻击时,车站遭受攻击概率同样是随机的。攻击期间,最大连通子图相对大小会出现较为均匀的变化,波动几乎为零。同随机性攻击模式相比,这种攻击模式中,节点所遭受的攻击将会按照相应策略和顺序,从而确保网络可以在短时间内遭受到较大程度损坏。随机性攻击和选择性攻击下网络最大连通子图相对大小

变化曲线如图 4 所示。

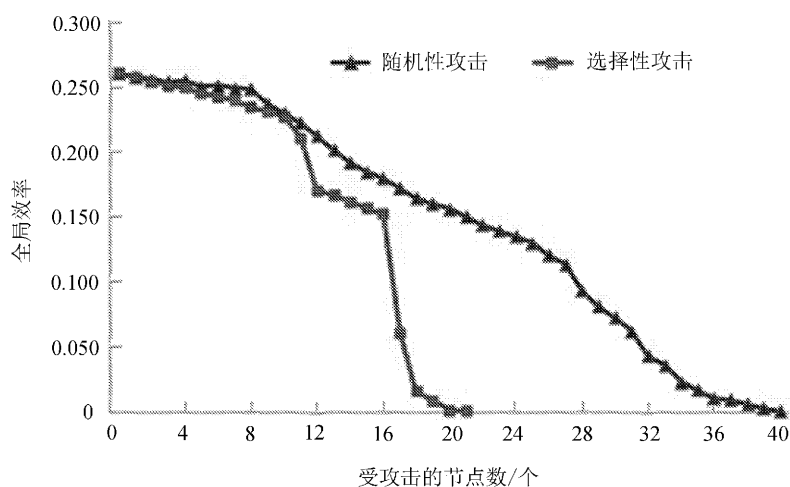


图 3 随机性攻击和选择性攻击下地铁网络全局效率变化曲线

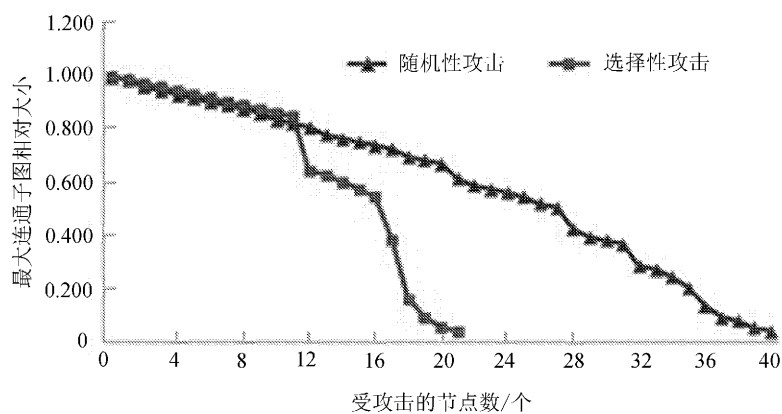


图 4 随机性攻击和选择性攻击下网络最大连通子图相对大小变化曲线

由此可见，地铁线网对选择性攻击的反应比随机性攻击强烈。

攻击模式出现变化时，2015 年北京地铁网络

连通度变化曲线有着很大相似性，随机性攻击和选择性攻击下连通度变化曲线如图 5 所示。

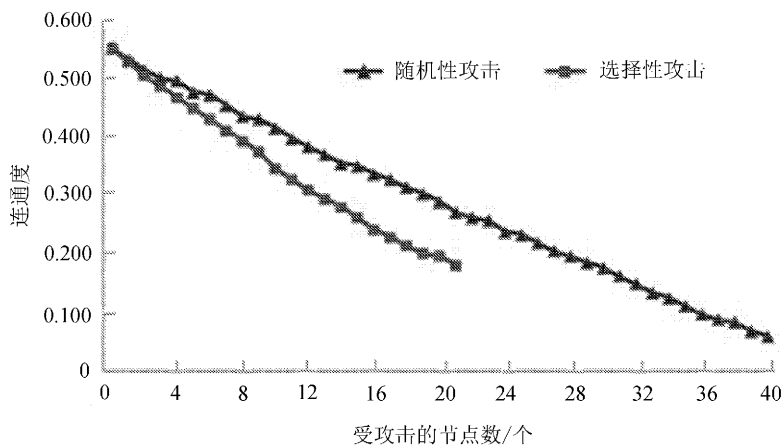


图 5 随机性攻击和选择性攻击下连通度变化曲线

遭受到攻击的节点数量逐渐增多后,连通度会出现均匀下降。如果是遭受到选择性攻击,相比于随机性攻击,其连通度下降较为显著。此情况说明,城市轨道交通网络在遭受外部攻击时,选

择性攻击破坏速度更快。

2015年北京地铁网络在两种不同攻击模式下网络圈数率的变化曲线如图6所示。

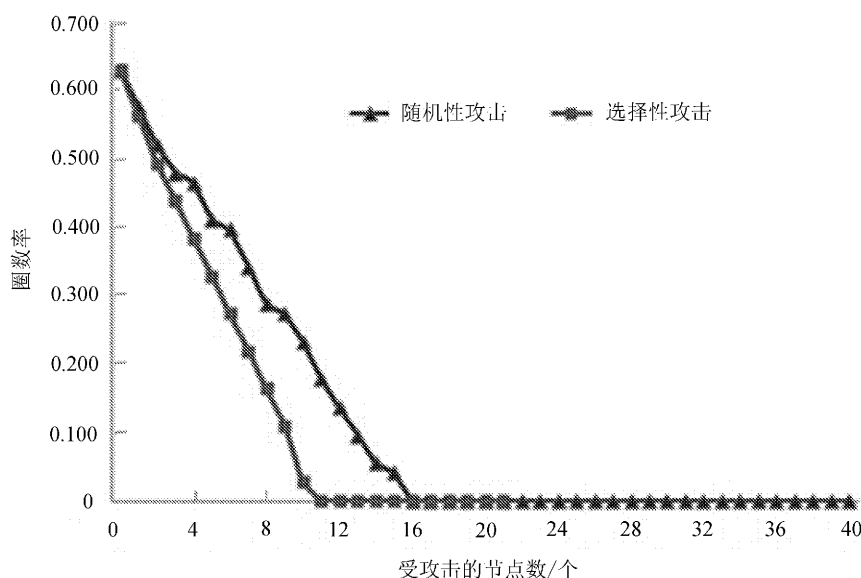


图6 随机性攻击和选择性攻击下圈数率变化曲线

遭受到攻击的节点数量逐渐增多后,圈数率短时间内快速下降。选择性攻击模式相比于随机性攻击模式,其圈数率下降速度更为显著。不管现实中地铁网络遭受何种攻击,只要经过几次攻击,那么地铁网络就会失去回路,最严重时会出现网络崩溃,圈数率为零<sup>[7]</sup>。

### 3 结 语

定义了适用于地铁线网的鲁棒性概念,网络在遭受针对性攻击或发生意外事故时提供替代路径的能力。同时,构建了适用于地铁线网鲁棒性的评价指标体系:圈数率;连通度;最大连同子图的相对大小;网络全局效率。然后详细介绍和量化描述这四个指标。并借助 Visual Studio 2010 和 ArcGIS10.0 模拟 2015 年北京地铁线网拓扑图受到的随机性攻击和选择性攻击,并计算不同攻击模式下攻击过程的各鲁棒性指标值。最后,对不同模式下各指标值的变化情况进行分析比较,得出作为典型复杂网络的地铁线网面对随机性攻击时抵抗力稍强<sup>[8]</sup>。不过在遭受到选择性攻击后,线网在短时间内会出现较大波动,充分表

明网络对选择性攻击抵抗力弱。

### 参考文献:

- [1] Jen E Definitions. Santa Fe Institute Robustness Site [EB/OL]. [2018-09-14]. RS-2001-009, <http://discuss.santafe.edu/robustness>, 2001 Oct, 22th.
- [2] 张海涛,张永奎.物联网体系架构与核心技术[J].长春工业大学学报:自然科学版,2012,33(2):176-181.
- [3] 赖丽萍.城市轨道交通网络鲁棒性研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [4] Kwon Y K, Cho K H. Analysis of feedback loops and robustness in network evolution based on Boolean models[J]. BMC Bioinformatics, 2007, 8(1): 430-439.
- [5] 张德江.智能控制技术现状与展望[J].长春工业大学学报:自然科学版,2002,23(z1):58-61.
- [6] 李彦瑾,罗霞,王莹.考虑多节点拥堵的城市道路网级联失效仿真[J].工业工程,2018,21(4):4-10.
- [7] 谭跃进,吴俊,邓宏钟.复杂网络抗毁性研究综述[J].系统工程学报,2008,24(10):1-5.
- [8] 项佩.电力通信网络拓扑可靠性分析及评估系统实现[D].昆明:云南大学,2013.